**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desempenho de equações de lavagem para recuperação de solo salinizado
por excesso de fertilizantes em ambiente protegido**

José Leôncio de Almeida Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

José Leôncio de Almeida Silva
Engenheiro Agrônomo

Desempenho de equações de lavagem para recuperação de solo salinizado por excesso de fertilizantes em ambiente protegido

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **SÉRGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2016**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Silva, José Leôncio de Almeida

Desempenho de equações de lavagem para recuperação de solo salinizado por excesso de fertilizantes em ambiente protegido / José Leôncio de Almeida Silva. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016. 53 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Salinização 2. Manejo da irrigação 3. Lixiviação 4. Fertirrigação I. Título

CDD 631.45
S586d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Aos meus pais, por nunca medirem esforços para que fosse possível a realização de todos os meus sonhos, em especial a minha mãe Maria Leoneide que pede todos os dias a Deus para iluminar minha vida e por todo exemplo de confiança, fé e amor.

Dedico este trabalho

As minhas irmãs, Lidiana e Lilia, pelo incentivo e carinho, que mesmo distante sempre me apoiaram nessa jornada, sendo muito importante no meu fortalecimento durante essa caminhada.

Ofereço

AGRADECIMENTOS

“Reconhecimento é a melhor forma de dizer obrigado.”

Em primeiro lugar a **Deus**, pela iluminação, força e sabedoria para superar todos os obstáculos vividos em minha vida, por ser meu alicerce maior e minha fortaleza;

Ao programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, pela oportunidade de realização deste curso;

Ao CNPq, em nome do **Prêmio Jovem Cientista**, pela concessão da bolsa de estudo;

Ao Prof. **Sergio Nascimento Duarte**, meu muito obrigado pelo seu incentivo, orientação, amizade e principalmente pela sua confiança e a credibilidade depositada em minha pessoa;

A todos os professores do Curso do Programa e Engenharia de Sistemas Agrícolas da ESALQ, que tenho muito respeito e admiração;

A professora Sonia Maria de Stefano Piedade, pela sua atenção, disponibilidade e orientações na análise dos dados;

Aos membros da Banca examinadora pelas sugestões e contribuição na melhoria da qualidade do trabalho;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, em especial a Davilmar, Beatriz, Paulinha, Ezequiel, Sr. Antônio, Gilmar e Fernando, pelo apoio recebido durante minha caminhada acadêmica na ESALQ;

Aos colegas de curso Osvaldo, Ana Luiza, Nathália, Rony, Luís, Alex, Jeferson, Jeferson “Peq”, Danilo, João Paulo, Timóteo, Asdrúbal, Maria, Débora, Arthur, Irineu, Otavio, Fabrício, Rogério e Eder pelos momentos vividos durante o Mestrado; cada um teve sua contribuição de forma especial para o sucesso deste trabalho;

Ao **GOU**, Grupo de Oração Universitário da ESALQ, por inúmeras vezes ser minha ponte de luz na oração em Deus;

Aos amigos da vila acadêmica de Pós-Graduação da ESALQ, pelos momentos compartilhados; Laiane, Daniela, Renata, Tamires, Laís, Maria, Carlos, Marcos, Ricardo, Timóteo, Bruno, Melina, Sibelle, Bruna, Isa, Kely, Camila, Jhinmy; e

Por final, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse sonho.

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS!

EPÍGRAFE

"Não fiz o melhor,
mas fiz tudo para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser,
mas não sou o mesmo que era antes".

Martin Luther King

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Origem dos sais no solo.....	17
2.2 Salinidade na agricultura irrigada.....	18
2.3 Recuperação de solos afetados pela salinidade	21
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Localização e preparação do experimento.....	27
3.2 Construção da curva de salinização.....	28
3.3 Implantação dos tratamentos	30
3.4 Cálculo e aplicação das lâminas de lavagem por lixiviação.....	33
3.5 Medição da salinidade do solo após a lavagem.....	34
3.6 Avaliação do desempenho das equações empíricas	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Estatísticas clássicas para a performance das equações empíricas.....	38
4.2 Desempenho das equações para predição da salinidade do solo no sistema intermitente..	39
4.3 Desempenho das equações para predição da salinidade do solo no sistema contínuo	42
5 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49

RESUMO

Desempenho de equações de lavagem para recuperação de solo salinizado por excesso de fertilizantes em ambiente protegido

Em regiões nas quais a irrigação é intensiva, visando o aumento da produção de culturas, a fertirrigação é uma prática muito utilizada como uma alternativa para a adubação, proporcionando o menor grau de risco possível. Entretanto, a aplicação excessiva de adubos, via fertirrigação, pode elevar o risco de salinização dos solos, especialmente pela aplicação indiscriminada de fertilizantes. Nem sempre as chuvas que ocorrem em campo aberto são suficientes para lavar os sais do solo. O volume de água necessário para a lavagem de recuperação de um perfil de solo é calculado em função da salinidade inicial do solo, do nível final desejado, do tipo de solo e da profundidade de solo a recuperar, do método de aplicação da água de irrigação e da concentração de sais da água de lavagem. O objetivo desse trabalho foi avaliar o desempenho de equações empíricas para recuperação de solo salinizado, em sistema de lixiviação contínua e intermitente, para o caso de lâminas de lavagem de sais fertilizantes. O experimento foi conduzido em lisímetros tubulares com a superfície protegida com plásticos, localizados em uma área a campo aberto, pertencente às dependências do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, Piracicaba – SP. O estudo consistiu em três etapas: 1) Salinização dos solos armazenados em lisímetros tubulares de concreto, impermeabilizados em seu interior; 2) Recuperação dos solos salinizados; e 3) Medição das concentrações dos sais nos solos após o procedimento de dessalinização e comparação dessas com as previstas por fórmulas empíricas. Os tratamentos foram compostos pela combinação de dois fatores em esquema fatorial de 2x5, sendo duas formas de recuperação do solo (R1=contínua e R2=intermitente) em cinco níveis iniciais de salinidade no solo (S1=2,0: S2=4,0: S3=6,0: S4=8,0 e S5=10,0 dS m⁻¹). O delineamento experimental adotado para o experimento foi o de blocos ao acaso, com 6 repetições. Tecnicamente, é possível o uso de lavagem de solos salinizados como estratégia de manejo da irrigação, sendo essa bastante satisfatória. Dentre as equações avaliadas, a que apresentou melhor performance na recuperação do solo salinizado foi a de Volobuyev, fornecendo respostas mais coerentes aos resultados obtidos experimentalmente. De maneira geral, as equações testadas foram mais eficientes no sistema de recuperação intermitente; no sistema contínuo, os valores calculados para as lâminas de lavagem foram todos subestimados para condições estudadas.

Palavras-chave: Salinização; Manejo da irrigação; Lixiviação; Fertirrigação

ABSTRACT

Performance of washing equations for recovery salty soils with excess of fertilizers in protected environment

In regions where irrigation is intensive, aimed at increasing crop production, fertigation is a practice widely used as an alternative to the fertilizing, with the lowest possible level of risk. However, the excessive application of fertilizers, via fertigation can raise the risk of salinization of soils, especially indiscriminate application of fertilizers. Not always the rains that occur in open country are enough to wash the salts from the soil. The volume of water required for washing recovery of a soil profile is calculated on the basis of initial soil salinity, final level desired, type of soil and depth of soil to recover, method of application of irrigation water and concentration of salts in the wash water. The objective of this work was to evaluate the performance of empirical equations for soil recovery in continuous and intermittent leaching system, for the determination of fertilizer salts wash blades. The experiment was conducted in lysimeters with tubular plastic-protected surface, located in an area in open field, belonging to the Department of Biosystems Engineering from Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz-ESALQ/USP, Piracicaba – SP. The study consisted of three steps: 1) Salinisation of soils stored in lysimeters concrete tubular, waterproofed inside; 2) salinized soil recovery; and 3) measurement of concentrations of salts in the soil after the procedure of desalination and comparison of these with those provided by empirical formulas. The treatments were composed by the combination of two factors in factorial scheme of 2 x 5: two forms of recovery (R1=R2 = continuous and flashing) in five levels of salinity in the soil (S1=2.0: S2=4.0: S3=6.0: S4=8.0 and S5=10.0 dS m⁻¹). The experimental design adopted for this experiment was random blocks with 6 repetitions. Technically, it is possible the use of salinized soils washing as irrigation management strategy, quite satisfactory. Among the equations evaluated, the best presented performance at salinized soil recovery was Volobuyev, providing coherent answers to the results obtained experimentally. In general, the equations tested were more efficient in the intermittent recovery system; the system keep the values calculated are praying all underestimated for studied conditions.

Keywords: Salinisation; Irrigation management; Leaching; Fertigation

1 INTRODUÇÃO

Em regiões nas quais a irrigação é intensiva, visando o aumento da produção de culturas, a fertirrigação é uma prática muito utilizada como alternativa para a adubação, pois apresenta menor grau de risco. A técnica combina o suprimento da demanda hídrica da cultura, associado à aplicação de nutrientes via água de irrigação, deixando os nutrientes na forma solúvel e, portanto, mais disponíveis para a cultura. Entretanto, a aplicação excessiva de adubos, via fertirrigação, pode elevar o risco de salinização dos solos, especialmente pela aplicação indiscriminada de fertilizantes.

O aumento da salinidade do solo, sob ambiente protegido, geralmente está relacionado com o uso em excesso de fertilizantes aplicados via água de irrigação. Portanto, é necessário que medidas preventivas e corretivas sejam tomadas, pois o uso intensivo de adubos, a falta de chuvas e a contínua evaporação da água do solo podem aumentar o teor de sais na solução do solo, refletindo em sérios danos para agricultura irrigada e principalmente para o meio ambiente.

Sob essas condições de cultivo, quando se utiliza a tecnologia de incremento de fertilizantes via água de irrigação, sem nenhuma forma de manejo ou conhecimento técnico, a fertirrigação torna-se um contribuinte problemático, devido ao aumento de áreas com altas concentrações salinas no solo, o que pode acarretar em um problema grave para a cultura.

Embora muitos produtores utilizem água de irrigação de boa qualidade, com baixa salinidade, a aplicação de fertilizantes em ambiente protegido é geralmente feita via água de irrigação, o que a torna salina, sendo o nível de salinidade da água de irrigação aproximadamente proporcional à quantidade de fertilizantes adicionada.

Vários são os efeitos negativos da salinidade no solo; esses estão diretamente relacionados ao crescimento e ao rendimento das plantas e, em casos extremos, podem causar perda total da cultura. Em regiões semiáridas, com o intuito de minimizar esses problemas, os produtores têm utilizado práticas de lixiviar os sais rotineiramente para camadas mais profundas do solo. Porém, quando as frações de lixiviação utilizadas não são suficientes para impedir o aumento do teor de sais no solo durante o ciclo de uma cultura, faz-se necessária a redução da salinidade do solo, até um nível tolerado pela cultura a ser implantada, por meio de uma lavagem de recuperação (RHOADES et al., 1992). Segundo Hoffman et al. (1992), quando a água não é muito salina, de modo que, durante o ciclo da cultura, a salinidade do solo não ultrapasse a salinidade limiar, não é necessário se realizar lixiviações constantes;

nesse caso, pode ser realizada apenas uma lavagem de manutenção no final do ciclo da cultura.

Devido a esses problemas, a FAO adverte que, aproximadamente, 50% dos 250 milhões de hectares irrigados no mundo já apresentam problemas de salinização e saturação do solo, e que cerca de 10 milhões de hectares sejam abandonados anualmente em virtude desses problemas.

Nem sempre as chuvas que ocorrem em campo aberto são suficientes para lavar os sais do solo. Então, quando a salinidade do solo supera o limite de tolerância das culturas, deve-se parar o cultivo temporariamente e acelerar o processo de remoção dos sais por meio do uso de práticas de recuperação.

O volume de água necessário para a lavagem de recuperação de um perfil de solo é calculado em função da salinidade inicial do solo, do nível final desejado, do tipo de solo e da profundidade de solo a recuperar, do método de aplicação da água de irrigação e da concentração de sais da água de lavagem (DIAS, 2003). Embora muitas pesquisas já tenham sido desenvolvidas com modelos matemáticos para simular a recuperação de solos salinos, a quantidade de água utilizada na lavagem, necessária para recuperação desses solos, é geralmente calculada usando relações empíricas derivadas de experimentos em campo (RHOADES & LOVERDAY, 1990).

A irrigação com aplicação intermitente da água tem um grande potencial para aumentar a eficiência da aplicação de água de lavagem, por causa do aumento do tempo necessário para que os solutos dos microporos se difundam até os macroporos. Este fato permite que, geralmente, se consiga um maior decréscimo da CE com uso de menos água (KEMPER et al., 1988).

Tendo em vista as tecnologias que podem ser empregadas, e diante das informações relativas ao controle da salinidade e ao manejo do solo, e considerando que atualmente existem diversos modelos e fórmulas para o cálculo da lâmina de lavagem, resultando em uma grande variação na quantidade de água recomendada, pretende-se avaliar o desempenho dessas equações de recuperação de solos afetados por sais, buscando identificar aquelas que forneçam o manejo mais preciso, para sais de fertilizantes, realizado de forma sustentável, com menor grau de risco possível ao meio ambiente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem dos sais no solo

Os sais são originados da intemperização dos minerais primários encontrados nos solos e nas rochas. Esses sais são transportados pelas águas pluviais e armazenados nos solos, acumulando-se à medida que a água é evaporada ou consumida pelas culturas, originando o processo de salinização (DAKER, 1988). Os sais liberados durante o processo de intemperização das rochas, dependendo da geomorfologia da região, podem ser carreados para horizontes inferiores, mediante percolação, ou ser levados a lugares distantes por escoamento superficial. Conforme as condições de relevo, fluxo de água, etc, os sais são depositados nas águas sub-superficiais, podendo, por capilaridade, acumular-se na superfície do solo, à medida que a água é evaporada ou consumida pela planta; o segundo fenômeno, isto é, o escoamento superficial, é responsável pela deposição e acumulação de sais em rios, mares, açudes e lagoas (AYERS & WESTCOT, 1991).

Em regiões de clima árido e semiárido, por apresentarem déficit hídrico na maior parte do ano, em parte devido ao fator dos solos serem rasos ou apresentarem camadas impermeáveis, a água que contém sais fica sujeita aos processos de evaporação ou evapotranspiração, podendo, com o tempo, atingir níveis na solução do solo comprometedores para o crescimento e desenvolvimento das plantas (GHEYI, 2000).

Embora a fonte principal e direta de todos os sais presentes no solo seja a intemperização das rochas, são raros os exemplos em que esta fonte de sais tenha provocado diretamente problemas relacionados com a salinidade do solo. Comumente, a salinização dos solos ocorre pelo acúmulo de sais transportados pelas águas de outros locais, assim como a invasão das águas de marés nas regiões costeiras e a concentração por evaporação em regiões de baixa precipitação, quando o lençol freático encontra-se próximo à superfície. A salinização do solo por este fenômeno é denominada salinização primária (RIBEIRO et al., 2009).

Os problemas de salinidade têm sido também associados à água utilizada na irrigação, à drenagem deficiente, à presença de águas sub-superficiais ricas em sais solúveis e à pouca profundidade do lençol. Nesses casos, ou seja, quando a salinização resultante é devida à ação antrópica, a mesma é conhecida como salinização secundária. Além disso, a salinização pode ser causada pela aplicação de fertilizantes, de forma excessiva e pouco parcelada ao longo do

ciclo cultural, induzindo o sistema radicular ao estresse osmótico (AYERS & WESTCOT, 1991).

Em alguns casos, a salinização secundária é responsável por perdas irreparáveis na capacidade produtiva dos solos, tornando-os estéreis em grandes extensões de terras cultivadas. Assim, águas de qualidade duvidosa (com riscos de salinidade e sodicidade), adubos com elevado índice salino (cloreto de potássio, nitrato de sódio e nitrato de amônio, dentre outros), drenagem ineficiente, e etc, podem acelerar o processo de salinização secundária (OLIVEIRA, 1997).

A água é um recurso de suma importância para a sustentação da vida, do ambiente e de um conjunto de atividades que movem a economia de um país, com destaque para a Agricultura (MACHADO et al., 2003). Segundo Becker (2005), a água é considerada o “ouro azul do século XXI”, devido à escassez e ao crescente uso no mundo, principalmente nos países semiáridos, que utilizam a irrigação em cultivos agrícolas. Ademais, há previsões de que a disputa por água possa gerar conflitos. Nesse contexto, surge a necessidade de desenvolver maneiras mais eficientes de captação, armazenamento e utilização da água, para evitar que essa não falte para as futuras gerações.

A irrigação com aplicação intermitente de água compreende diversas formas de irrigações incompletas, denominadas ciclos, em que a fase de avanço continua após o corte da água na seção de aplicação e, muitas vezes, durante as fases de depleção e recessão (WALLENDER E RAYEJ, 1985). De acordo com Bishop et al. (1981), o tempo cíclico pode variar de alguns segundos até horas, devendo, porém, estar entre 10 e 60 min. A taxa cíclica é definida como sendo a razão entre o tempo de aplicação e o tempo cíclico.

Coolidge et al. (1982) destacaram duas vantagens práticas encontradas na aplicação intermitente: a variação do tempo de aplicação permite projetar o sistema, prevendo a redução da vazão média depois que se completou a fase de avanço, podendo, dessa maneira, reduzir as perdas por escoamento superficial; é observado que, para o mesmo volume de água aplicado, quando comparado com aplicação contínua, a eficiência de aplicação aumenta. Assim, a aplicação intermitente por superfície é mais usada em locais com abastecimento de água limitado e em áreas sistematizadas, o que facilita o manejo da irrigação (STONE, 2005).

2.2 Salinidade na agricultura irrigada

O uso da irrigação tem contribuído, significativamente, para o aumento da produtividade agrícola e para a incorporação, ao sistema produtivo, de áreas cujo potencial

para exploração da agricultura é limitado, em razão de seus regimes pluviais. Por outro lado, a irrigação tem causado alguns problemas ao meio ambiente. Dentre eles, destaca-se o uso inadequado de água salina e/ou sódica, resultando na perda da capacidade produtiva do solo. A salinidade da água pode provocar alterações nas propriedades físico-químicas do solo (RHOADES et al., 1992, citados por LIMA, 1998).

Em geral, a Agricultura Irrigada depende tanto da quantidade quanto da qualidade da água. Até o início do século XX, devido à disponibilidade de água de boa qualidade e de fácil utilização, não havia a preocupação com a preservação e uso racional da água. A partir dessa época, com o aumento do consumo de águas de qualidade, houve uma redução da disponibilidade dessas, provocando, consequentemente, a necessidade de se usar águas de qualidade inferior (AYERS & WESTCOT, 1991). Dentre as características que determinam a qualidade da água para a irrigação, a concentração de sais solúveis ou salinidade é um dos fatores mais limitantes ao desenvolvimento de algumas culturas (BERNARDO, 1996).

Os principais problemas causados pela salinização do solo são a redução do potencial osmótico da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade às plantas e o aumento do risco de toxicidade de certos íons às plantas (BERNARDO, 1996).

A acumulação de sais na rizosfera prejudica o crescimento e o desenvolvimento das culturas, provocando um decréscimo de produtividade e, em casos mais severos, pode levar a um colapso da produção agrícola. Os sais são transportados pela água de irrigação e depositados no solo, onde se acumulam, à medida que a água se evapora ou é consumida pelas culturas. O prejuízo decorre da diminuição do potencial osmótico da solução do solo ou de efeitos tóxicos dos íons específicos ou devido à alteração das condições físicas e químicas do solo (LIMA, 1998).

Solos normais podem se tornar improdutivos se receberem sais solúveis em excesso, devido a irrigações mal conduzidas com águas salinas. Mesmo com um bom controle da qualidade da água de irrigação, o que raramente é feito na prática, há um contínuo resíduo de sais no solo (SOUZA, 1995).

A salinização secundária é causada pela ação do homem e manifestada, principalmente, em decorrência da irrigação, em áreas onde o controle da drenagem não é realizado ou onde a drenagem é feita de forma ineficiente. No mundo, estima-se que 19,5% das terras irrigadas (45 milhões de hectares) e 2,1% das não irrigadas (32 milhões de hectares) estejam afetadas pelos sais. A salinização dos solos é particularmente evidente nas regiões áridas e semiáridas, atingindo cerca de 25% das áreas irrigadas. Atualmente, estima-se que ocorra uma perda de cerca de 1,5 milhões de hectares de terras aráveis a cada ano devido ao acúmulo de sais.

Dessa forma, a salinização tem sido identificada como o principal processo de degradação dos solos no mundo (FAO, 2006).

O processo de salinização dos solos e das águas subterrâneas e superficiais é um dos mais importantes problemas de degradação ambiental, sendo seus efeitos prejudiciais mais pronunciados nas áreas de regiões áridas e semiáridas. Este problema vem crescendo rapidamente em diversas partes do globo, causando problemas de grandes proporções na produtividade das culturas agrícolas. Em uma escala mundial, existe uma área de aproximadamente 400 milhões de hectares de terras utilizadas com agricultura, cuja produção vem sendo severamente restringida pela salinidade (BOT et al., 2000).

No Brasil, embora a informação sobre as áreas salinas não esteja bem definida, estima-se que de 20 a 25% das áreas irrigadas enfrentem problemas de salinização (FAO, 2006). Este problema é mais visto na região Nordeste, a qual possui uma área de 155 milhões de hectares, com 52% dessa superfície em clima semiárido. Considerando que a prática da irrigação constitui a única maneira de garantir a produção agrícola com segurança sob este clima e que a implantação dos projetos de irrigação tem sido incrementada nas últimas décadas, configura-se como de grande importância para a produção agrícola o desenvolvimento de pesquisas que venham a possibilitar um melhor manejo do solo e da água, face às projeções futuras de aumento da população e da demanda por alimentos (HOLANDA et al., 2010).

No Nordeste semiárido, as maiores incidências de áreas comprometidas com salinização secundária se concentram nas terras mais intensamente cultivadas, com o uso da irrigação, nos chamados perímetros irrigados (OLIVEIRA, 1997). A salinização do solo tem como consequência a redução do rendimento dos cultivos, tornando necessário realizar uma lavagem de recuperação e, em alguns casos, adição de condicionadores químicos, como o gesso agrícola, o que leva a custos adicionais.

A prática da irrigação nas regiões áridas e semiáridas é indispensável, devido à ocorrência do déficit hídrico para culturas na época seca (OLIVEIRA, 1997). Entretanto, nestas regiões é comum a ocorrência de fontes de água com elevados teores de sais que, antes de serem utilizadas na irrigação, deveriam ser avaliadas, principalmente sob os aspectos da salinidade, da sodicidade e da toxicidade de íons. A qualidade da água de irrigação pode variar significativamente de acordo com o tipo e a quantidade de sais nela dissolvidos. Para se prever problemas futuros referentes à qualidade da água para a irrigação, é importante considerar o potencial da água em criar condições no solo que restrinjam sua utilização e avaliar a necessidade em ampliar técnicas especiais de manejo para manter bons rendimentos (AYERS; WESTCOT, 1991).

Esforços têm sido feitos com o objetivo de controlar a salinidade por intermédio de meios técnicos; porém, a recuperação de um solo inutilizado pelo excesso de sais ou de sódio, ou em vias de inutilização, em geral envolve grandes investimentos e somente em determinadas circunstâncias poderá ser economicamente viável (PRISCO, 1987). Assim, para melhorar as propriedades físicas do solo, podem ser utilizadas várias combinações de práticas de lavra, de uso de corretivos e de práticas culturais (GHEYI, 2000).

2.3 Recuperação de solos afetados pela salinidade

A água de irrigação, com altos teores de sais, pode contribuir diretamente para o acréscimo da concentração salina do solo, e juntamente com uma excessiva evaporação, pode acarretar na acumulação de sais solúveis na superfície e/ou na sub-superfície do solo (BERNARDO, 2005, PEREIRA, 1998). Para remover os sais solúveis, a lavagem é o método mais eficaz para a recuperação de solos salinos. A técnica recomenda a aplicação de água em quantidade suficiente para dissolver e transportar os sais solúveis até o sistema de drenagem. A profundidade da recuperação depende do tipo de cultura que se vai explorar. Para uma cultura de sistema radicular superficial, a profundidade poderá ser de 60 cm; no entanto, se a cultura a ser explorada apresentar sistema radicular profundo, o solo deverá ser corrigido até cerca de 2,00 m de profundidade (RICHARDS, 1954; RHOADES, 1974; RIBEIRO et al., 2003).

Na recuperação dos solos salinos existem várias alternativas que podem ser utilizadas, separadamente ou em combinação (AYERS & WESTCOT, 1991).

O manejo adequado dos solos afetados por sais é essencial para uma agricultura irrigada eficiente e sustentável. Compreende a recuperação de solos afetados por sais, geralmente causada por uma irrigação inadequada, e a manutenção ou prevenção dos solos irrigados não afetados e dos recuperados. Envolve aplicações das teorias e conhecimentos existentes na física e na química do solo, como também nas relações irrigação-salinidade e produção-salinidade, (SANTOS & HERNADEZ, 1997).

A lavagem de sais pode ser realizada com duas finalidades: 1) reduzir a alta salinidade inicial do solo até níveis toleráveis pelas culturas, denominado lavagem de recuperação; 2) impedir a ressalinização dos solos recuperados ou prevenir a salinização dos solos irrigados não afetados, que comumente é chamada de lixiviação de manutenção (PIZARRO, 1978). Esta prática é necessária na recuperação tanto de solos salinos como de solos sódicos, (SANTOS & HERNADEZ, 1997).

A lavagem de recuperação normalmente requer grandes quantidades de água e, quando a salinidade do solo é muito alta ($CE_{es} > 10-15 \text{ dS m}^{-1}$), se realiza sem utilização agrícola do solo por um determinado período de tempo (de semanas a meses). Quando a salinidade do solo não é muito elevada ($CE_{es} < 10-15 \text{ dS m}^{-1}$), a lavagem de recuperação pode ser feita com água extra, aplicada na irrigação de culturas tolerantes (AYERS & WESTCOT, 1991). A quantidade de água a ser usada, assim como o tempo de recuperação de solos salinos, depende da salinidade inicial do solo, da qualidade da água de irrigação, da profundidade do solo a ser recuperado, das técnicas de irrigação utilizadas, entre outras.

Assim, práticas de manejo mais apropriadas para controlar a salinidade dos solos a longo prazo tornam-se fundamentais em um programa de cultivo de solos afetados por sais, principalmente visando à sustentabilidade, além de constituírem alternativas de uso e de recuperação do solo. Dentre as técnicas de recuperação dos solos salino-sódicos, a aplicação de corretivos químicos e a posterior lavagem do solo são bastante utilizadas, por atuarem diretamente na correção dos problemas desses solos em relação às plantas (QADIR et al., 1996; MONTENEGRO & MONTENEGRO, 2004).

Pizarro (1996), citado por Tavares Filho (2010), cita que, para a correção de solos salinos a lavagem de sais pode ser feita de duas maneiras:

1. Lavagem contínua - cobrir a superfície do solo com uma lâmina de água de 10 cm de altura. Aqui, os sais são removidos mais rapidamente e permite um retorno da exploração da área mais cedo. Este método é recomendado para os solos que apresentam boa permeabilidade, lençol freático profundo e alta taxa de evaporação; e
2. Lavagem intermitente - própria para os solos com reduzida capacidade de drenagem, lençol freático elevado e água subterrânea de baixa salinidade. Deve ser aplicada nos períodos de baixa taxa de evaporação.

Embora já se tenham desenvolvidos modelos físico – químicos que simulam a recuperação de solos salinos, as estimativas da quantidade de água de lavagem necessária para a recuperação desses solos são geralmente baseadas em relações empíricas derivadas de pesquisas e experiências práticas de campo (RHOADES E LOVEDAY, 1990). Segundo Palácios (1969), a relação mais indicada é a proposta por Volobuyev, por apresentar resultados mais próximos aos obtidos em campo e em laboratório. Algumas das equações encontradas na literatura são apresentadas a seguir, como a eq. (01), de Volobuyev, que tem a seguinte expressão:

$$L = \alpha \log \frac{CEi}{CEf} \quad (01)$$

em que:

L – Lâmina de água necessária para lavar um metro de profundidade de solo, cm;

α – Coeficiente que depende do conteúdo de cloretos e da textura do solo, Tabela 1;

CEi – Condutividade elétrica inicial do extrato de saturação do solo, dS m⁻¹; e

CEf – Condutividade elétrica final desejada no extrato, dS m⁻¹ a 25°C.

Tabela 1 - Coeficiente α , em função do conteúdo de cloretos, em %, e da textura do solo

Texturas	CONTEÚDO DE CLORETOS (%)			
	60 - 40	40 - 20	20 - 10	<10
Pesada	122	132	142	178
Média	92	102	112	148
Ligeira	62	72	82	118

(Adaptada de CORDEIRO, 2001)

Embora a equação (01) tenha sido bastante difundida, Cordeiro (2001) relata que esta fórmula possui várias limitações, como o fato do coeficiente “ α ” ser obtido apenas em função do conteúdo de cloretos e da textura do solo, sem considerar a influência que outros sais podem ter sobre o comportamento físico e químico dos solos a serem lavados. Como alternativa, o autor apresenta a eq. (02), desenvolvida a partir da anterior, porém com a vantagem de que ao coeficiente “ α ” estão integrados fatores como: a qualidade química da água de lavagem, as condições de salinidade do solo, a profundidade de lavagem, etc.

$$L = 9,0 (p)^{0,75} \frac{(70 - CEr)}{(CEi - CEr)} \cdot 0,3 \cdot \log \frac{CEi}{CEf} \quad (02)$$

em que:

L – Lâmina de água necessária para lavagem, cm;

p – Profundidade do solo a ser recuperado, cm;

CEr – Condutividade elétrica da água de lavagem, dS m⁻¹;

CEi – Condutividade elétrica inicial ao solo, dS m⁻¹; e

CEf – Condutividade elétrica final desejada do solo, dS m⁻¹.

Também, Jury et al. (1979) estabeleceram a relação apresentada na equação seguinte (03):

$$\frac{C}{C_0} \cdot \frac{D_L}{D_S \cdot \theta} = 0,8 \quad (03)$$

em que:

C – Concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹;

C₀ – Concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L⁻¹;

D_L – Lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, cm;

D_S – Profundidade do solo que se deseja recuperar, cm; e

θ – Conteúdo volumétrico de água no solo, cm³ cm⁻³.

Baseado em dados experimentais de campo, Hoffman (1980) propôs a utilização de um coeficiente na relação anterior, resultando na eq. (04), proposta para recuperação de solos salinos:

$$\frac{C}{C_0} \cdot \frac{D_L}{D_S} = k \quad (04)$$

em que:

C – Concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹;

C₀ – Concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L⁻¹;

D_L – Lâmina de lavagem de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, cm;

D_S – Profundidade do solo que se deseja recuperar, cm; e

k – Constante que varia com o tipo de solo e método de aplicação de água.

O valor de “K” referente ao tipo de solo, pode ser de 0,45 para solos orgânicos, 0,3 para solos argilosos e 0,1 para solos franco arenosos. O coeficiente K varia de 0,3 a 0,1 quando a recuperação é realizada por inundação e o solo varia de argiloso a arenoso. Quando a aplicação de água é feita por aspersão ou gotejamento, sugere-se o valor 0,1, independente do tipo de solo. Entretanto, Blanco & Folegatti (2001), avaliando diferentes lâminas de lavagem e métodos de aplicação de água, concluíram que a aplicação por gotejamento foi mais eficiente na recuperação do solo, do que foi previsto pela adoção de k=0,1.

Reeve et al. (1957) também estabeleceram a relação apresentada na equação seguinte (05):

$$\frac{La}{Ls} = \frac{CEi}{5CEf} + 0,15$$

(05)

em que:

La – Altura de água a ser lixiviada, cm;

Ls – Espessura de solo a ser recuperado, cm;

CEi – Concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L; e

CEf – Concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e preparação do experimento

O experimento foi conduzido em lisímetros tubulares com a superfície protegida com plásticos, localizados em uma área em campo aberto, pertencente às dependências do Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP, Piracicaba – SP, situado nas coordenadas geográficas de 22° 42’ de latitude sul e 47° 37’ de longitude oeste, a uma altitude 540 m (Figura 1).

Figura 1 - Localização da Área Experimental no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Segundo a classificação de Koppen, o clima da região é do tipo C_{Wa}, isto é, tropical úmido, com 3 meses mais secos (de junho a agosto), ocorrendo chuvas de verão e secas de inverno, apresentando temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18 °C.

O estudo consistiu em três etapas: 1) Salinização dos solos armazenados nos tubulões de concreto, impermeabilizados em seu interior; 2) Recuperação dos solos salinizados; e 3) Medição das concentrações dos sais nos solos após o procedimento de dessalinização e comparação dessas concentrações com as calculadas pelas fórmulas empíricas. A primeira etapa teve como base a utilização de curvas de salinização artificial, já obtidas para o solo em questão (Latosolo Vermelho Amarelo da Série “Sertãozinho”) em colunas de percolação.

A segunda etapa constituiu-se na aplicação das lâminas de percolação para a lavagem e recuperação dos solos salinizados, que estavam armazenados nos tubulões.

Na etapa seguinte, foram utilizadas as equações empíricas extraídas de publicações técnicas e científicas, que foram usadas para estimar as concentrações dos sais remanescentes na solução do solo, após a aplicação das lâminas de lavagem. A concentração prevista pelas equações foi comparada com a concentração real medida no solo dos tubulões.

3.2 Construção da curva de salinização

Para a construção da curva de salinização visando à obtenção de valores de condutividade elétrica em função das concentrações dos sais, utilizou-se a metodologia a seguir.

Para encontrar a relação entre a condutividade elétrica da solução (CEs) e os totais de sais a serem aplicados, esses foram dissolvidos nas proporções desejadas de sais, tomando inicialmente como referência a equação proposta por Richards (1954). Essa fórmula empírica é apresentada como eq. (06).

$$C = 640.CE_s \quad (06)$$

em que:

C – Concentração de sais fertilizantes, mg L⁻¹;

CEs – Condutividade elétrica da solução, dS m⁻¹.

Com base na eq. (06), foram preparadas diferentes concentrações que corresponderiam a uma salinidade chamada de “salinidade teórica”, para então determinar a condutividade elétrica real das soluções, utilizando um condutivímetro de bancada. Foi feito, então, uma curva relacionando a concentração da solução com fertilizantes e a condutividade elétrica dessas soluções, por meio de um diagrama de dispersão. Posteriormente foram coletadas amostras de 10 kg do solo, a ser utilizado neste mesmo experimento, as quais foram secas ao ar, peneiradas e acondicionadas em vasos de 8 L. Os vasos tinham sua base perfurada e uma camada de 2 cm de brita, recoberta por uma manta geotextil (BIDIM OP-30), resultando em uma camada de solo de 20 cm.

O solo foi coletado na profundidade de até 0,50 m, na camada considerável agricultável de um perfil classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (EMBRAPA, 2006), fase arenosa, proveniente do campus da ESALQ e denominado localmente de Série “Sertãozinho”.

A umidade do solo nos vasos foi elevada, de seca ao ar até a máxima capacidade de retenção, por meio da aplicação das soluções diluídas pré-estudadas, com o objetivo de se obter 9 níveis de condutividade elétrica no extrato de saturação (CEes: 1,0:2,0:3,0:4,0:5,0:6,0:7,0:8,0 e 9,0 dS m⁻¹), com 3 repetições. Os valores da concentração final dos fertilizantes na água (C_f) aplicados ao solo, foram aqueles necessários para se obter os níveis de CEes a serem atingidos na etapa de campo do experimento, sendo estimados com base nos níveis utilizados na curva de salinização, com correção devido à diferença de umidade.

A proporção entre os nutrientes das soluções adotadas para a salinização foi baseada na solução nutritiva de Hogland, descrita por Furlani (1999), (Tabela 2).

Tabela 2 - Concentração de macro e micronutrientes da solução nutritiva

Macronutrientes (mg L ⁻¹)						Micronutrientes (mg L ⁻¹)					
N	P	K	Ca	Mg	SO	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
200	31	293	100	24	32	0,2	0,03	3,4	1,1	0,05	0,2

Hogland, segundo Furlani (1999)

O volume de água aplicado foi aquele necessário para elevar a umidade do solo nos vasos à máxima capacidade de retenção, e as quantidades de sais que foram adicionadas eram suficientes para se atingir os valores desejados de CEes. Foi estimada a concentração final dos fertilizantes que foram utilizados pela relação apresentada na eq. (07).

$$CF = \frac{U_s}{U_{cc}} \cdot CI \quad (07)$$

em que:

CF – Concentração final de fertilizantes na solução salinizante, mg L⁻¹;

U_s – Umidade à base de peso na correção da pasta satura, g g⁻¹;

U_{cc} – Umidade do solo à base de peso na capacidade de campo, g g⁻¹; e

CI – Concentração de fertilizantes, com base na curva de salinização na etapa anterior, mg L⁻¹.

Após a aplicação das soluções nos solos, foram aguardados 2 dias e, em seguida, foram retiradas amostras de solo dos vasos na camada de 0 a 20 cm, após uma raspagem na qual se eliminou a parte superficial do solo. A partir dessas, foi determinada a condutividade elétrica do extrato de saturação real, ou seja, aquela que corresponderia aos valores que foram encontrados na curva de salinização, por meio da metodologia de pasta de saturação proposta por Richards (1954). O resultado dessa metodologia é apresentado na Figura 02.

Figura 2 - Concentração da solução a ser aplicada para se obter a CE desejada na pasta de saturação do solo utilizado

3.3 Implantação dos tratamentos

Os tratamentos foram compostos pela combinação de dois fatores em esquema fatorial de 2x5, sendo duas formas de recuperação do solo (R1=continua e R2=intermitente) e cinco níveis de salinidade no solo (S1=2,0: S2=4,0: S3=6,0: S4=8,0 e S5=10,0 dS m⁻¹). O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, com 6 repetições.

Na área experimental, foram utilizados de uma pesquisa anterior, já distribuídos, 60 tubulões de concreto impermeabilizados, com 1,2 m de altura e 0,5 m de diâmetro, totalizando 0,20 m² de área superficial e 240 litros de volume útil; os recipientes foram posicionados em 4 linhas de 15 tubulões, de forma que cada um desses recipientes representaram uma parcela experimental (Figura 3).

Figura 3 - Croqui da área experimental

O sistema de drenagem dos tubulões foi constituído de orifícios, localizados próximos à base de cada tubulão, onde foram inseridos tubos de PVC de 19 mm de diâmetro, vedados com massa epóxi e veda calha. Os tubos têm um comprimento de 0,60 m, com furos de 5 mm de diâmetro em seu perímetro, espaçados entre si de 0,50 m; para facilitar a drenagem e evitar o carregamento de solo, foi utilizado como material filtrante, uma manta sintética (bidim OP – 20) e uma camada de 0,10 m de brita nº1 lavada (Figura 4).

Figura 4 - Esquema dos tubulões de concreto que se constituíram em parcelas experimentais

Para se obter o nível de salinidade proposto, os solos tiveram seus valores de condutividade elétrica no extrato de saturação elevados aos seguintes níveis: (S1=2,0; S2=4,0; S3=6,0; S4=8,0 e S5=10,0 dS m⁻¹), por meio da adição de soluções salinas nutritivas, dissolvidas em água da rede de abastecimento da ESALQ. A quantidade do sal que foi utilizado no preparo de cada solução foi calculada com base na curva de salinização artificial do respectivo solo (DIAS, 2001).

A composição da solução adotada para a salinização foi à mesma adotada na curva de salinização, baseado na proporção da solução nutritiva de Hogland, descrita por Furlani (1999), (Tabela 2).

A aplicação da solução salina foi realizada por meio de um sistema de irrigação por gotejamento, a uma vazão de 8 L h⁻¹. O sistema foi composto por emissores auto compensadores de vazão, do tipo botão. A fim de obter uniformidade de distribuição da solução na superfície do solo, cada gotejador foi conectado a um divisor de duas descargas. Ao término das aplicações, os níveis de condutividade elétrica na solução do solo foram aferidos por meio da análise das soluções extraídas do solo 48 horas após a salinização. Feito isso, as colunas foram cobertas com plástico polietileno, para evitar evaporação, permanecendo assim até o solo atingir umidade próxima à da capacidade de campo.

Foram realizadas coletas de solo nos tubulões para fins de análises físico-hídricas. As propriedades físicas do solo foram analisadas a partir da metodologia descrita pela Embrapa (2009). As frações granulométricas foram determinadas a partir de proporções de areia grossa, areia fina, silte e argila, pelo método da pipeta, e expressas em porcentagem; a densidade de partículas do solo (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico; e a densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método da proveta, para amostra deformada, ambas expressas em g cm⁻³ (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização físico-hídrica do solo utilizado no experimento: umidade na capacidade campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (AD), densidade do solo (D_s), densidade das partículas do solo (D_p), macroporosidade (MP) e porosidade total do solo (PT)

CC	PMP	AD	D _s	D _p	MP	PT	Granulometria			Classe Textural
							Areia	Silte	Argila	
cm ³ cm ⁻³			g cm ⁻³				%			
0,23	0,09	0,15	1,30	2,64	27	50	73	8	19	Franco Arenoso

CC e PMP – Umidades determinadas nas tensões de 6,0 e 1500 kPa, respectivamente

Antes da salinização foram realizadas coletas de solo em profundidades de 0,00-0,20; 0,20-0,40; e 0,40-0,60 m para fins de caracterização química dos íons solúveis (Tabela 4); para a preparação das soluções, utilizou-se uma pasta de saturação na umidade de saturação,

da qual foi extraída a solução por intermédio de sucção, de acordo com a metodologia proposta por Richards (1954).

Tabela 4 - Caracterização química dos íons solúveis no solo antes do processo de salinização

Profundidade	pH (Pasta)	CE	Na ⁺	K ⁺
m		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹	
0,00-0,20	8,27	1,04	82,50	46,40
0,20-0,40	7,87	1,29	106,60	35,70
0,40-0,60	7,97	1,02	61,20	24,00

CE: condutividade elétrica do extrato de saturação

Para a caracterização química do solo foram determinados os teores de fósforo (P) e o de potássio (K), pelo método da resina de troca catiônica e expressos em (mg dm⁻³). Os teores de cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) trocáveis e a acidez potencial (H +Al) foram extraídos do solo com solução de acetato de amônio 1 mol L⁻¹ e determinados por fotometria de emissão de chama (EMBRAPA, 1997) e expressos em (cmol_c dm⁻³). A partir desses valores, anteriormente obtidos, foram determinados a Capacidade de Troca Catiônica (CTC a pH 7,00) e a soma de bases (SB), expressas em (cmol_c dm⁻³); a saturação por bases (V) foi expressa em %.

Tabela 5 - Caracterização química do solo utilizado no experimento

pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	Al	H +Al	SB	CTC	V	M
	g dm ⁻³	---mg dm ⁻³ ---					mmolc dm ⁻³				-----%	
6,3	11	174	16	3,4	5,1	27	< 1	15	81,4	96,4	84	1

3.4 Cálculo e aplicação das lâminas de lavagem por lixiviação

O processo de recuperação dos solos salinizados consistiu na aplicação de lâminas de água para lixiviação dos sais e redução da condutividade elétrica, baseando-se em uma recomendação empírica da dinâmica dos solutos. Esta recomendação preconiza que para o cálculo da lâmina de lavagem de recuperação de solos salinos deve-se aplicar dois volumes de poros. Num primeiro passo, foi calculada uma lâmina inicial para elevar o solo das colunas à capacidade de campo, e só a partir de então, foram aplicadas as lâminas de lavagem de recuperação. Em ambos os sistemas foram aplicados um volume de 176 L de água por tubulão, sendo no sistema intermitente esse volume fracionado em duas aplicações, com um intervalo de seis dias por aplicação. Logo após as aplicações, foram colocados plásticos de polietileno preto sobre os tubulões para evitar a evaporação da água.

A água que foi utilizada nas aplicações foi proveniente da rede de abastecimento do campus da Escola, uma vez que o local do ensaio já dispunha de tubulação com acesso a esse sistema. A CE dessa água foi considerada desprezível.

3.5 Medição da salinidade do solo após a lavagem

As alterações nas características químicas do solo, em resposta à aplicação das lâminas de lavagem, foram avaliadas por meio do monitoramento da condutividade elétrica e da concentração dos íons remanescentes na solução do solo de cada coluna. Para isso, a solução do solo foi obtida com o uso de extratores, e posteriormente corrigida para umidade de saturação.

Com esse objetivo, foram instalados três extratores de cápsula cerâmica no solo de cada uma das colunas (Figura 5). Assim, foram utilizados 180 unidades desse dispositivo, que consiste basicamente de um tudo de PVC com uma cápsula porosa na extremidade inferior. As cápsulas foram posicionadas em três profundidades (20, 40 e 60 cm) no perfil do solo.

Figura 5 - Detalhes dos extratores de cápsula cerâmica, que foram instalados nos tubulões

Para a obtenção da solução do solo, foi aplicada uma tensão de 80 KPa na câmara de cada extrator, utilizando uma bomba de vácuo, 48 horas após o fim da aplicação das lâminas. Após 24 horas, necessárias para que ocorresse a redistribuição da solução que estava em equilíbrio entre a cápsula e o solo, as soluções foram recolhidas dos extratores por meio de

uma seringa hospitalar; essas foram armazenadas em tubos de acrílico, sendo posteriormente conduzidas para análises em um laboratório do Departamento de Engenharia de Biosistemas.

No laboratório, foi determinado a condutividade elétrica de cada amostra, por meio de um condutivímetro de bancada, e a concentração dos principais íons. Os valores da condutividade elétrica e da concentração de íons, determinados mediante a solução extraída pelas cápsulas porosas, foram corrigidos para a umidade de saturação empregando a eq. (08):

Uma vez estimada a concentração do Sal (C) necessária ao preparo da solução, por meio da equação ajustada a partir da curva de salinação, foi efetuado a correção dos valores para a umidade de saturação. Assim, a concentração corrigida, que associa a CE lida nos extratores com a CE do estrato de saturação, foi obtida aplicando a expressão apresentada na eq. (08).

$$C_{CORRIGIDA} = \frac{C_{cp} \cdot U_{cp}}{U_s} \quad (08)$$

em que:

$C_{CORRIGIDA}$ – Condutividade elétrica ou concentração de íons no extrato de saturação, estimada a partir dos valores determinados na solução do solo, $dS\ m^{-1}$ ou $mmol\ L^{-1}$;

C_{CP} – Condutividade elétrica ou concentração de íons na solução do solo, obtida com extrator de cápsula porosa, $dS\ m^{-1}$ ou $mmol\ L^{-1}$;

U_{cp} – Umidade do solo durante aplicação de tensão na cápsula dos extratores, $g\ g^{-1}$; e

U_s – Umidade de saturação do solo (pasta de saturação) $g\ g^{-1}$.

3.6 Avaliação do desempenho das equações empíricas

Terminados os ensaios no experimento de campo, foram utilizadas as equações empíricas citadas anteriormente para estimar a CE da solução do solo, após a aplicação das lâminas de lavagem. Para efeito de comparação, foram adotadas nos cálculos as mesmas lâminas de lixiviação aplicadas nos ensaios reais; as condições químicas iniciais também foram as mesmas medidas nos solos armazenados nas colunas de percolação.

Desta forma, os valores de CE foram calculados empregando-se as equações (01, 02, 03, 04 e 05); para facilitar os cálculos, foram isoladas as variáveis de interesse em cada uma das equações (09, 10, 11, 12 e 13), respectivamente. É importante se observar que algumas equações apresentam os resultados em condutividade elétrica enquanto outras apresentam em

concentração de íons. Neste caso, os resultados em CE foram convertidos em concentração utilizando-se a correlação entre C e CEs obtida na fase inicial do experimento.

$$CF_f = CE_i \cdot 10^{-\left(\frac{L}{\alpha}\right)} \quad (09)$$

em que:

CEf – Condutividade elétrica final no extrato de saturação, dS m⁻¹;

CEi – Condutividade elétrica inicial no extrato de saturação, dS m⁻¹;

L – Lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, mm; e

α – Coeficiente que depende do conteúdo de cloreto e da textura do solo.

$$CE_f = CE_i \cdot 10^{-\left(\frac{L}{2,025 \cdot (P) \cdot \left(\frac{70 - CE_r}{CE_i - CE_r}\right)}\right)} \quad (10)$$

em que:

CEf – Condutividade elétrica final no extrato de saturação, dS m⁻¹;

CEi – Condutividade elétrica inicial no extrato de saturação dS m⁻¹;

L – Lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, mm;

p – Profundidade do solo a ser recuperado, cm;

CEr – Condutividade elétrica da água de lavagem, dS cm⁻¹; e

CEi – Condutividade elétrica inicial, dS m⁻¹.

$$C = 0,8 \cdot C_o \cdot \theta \cdot \left(\frac{D_s}{D_e}\right) \quad (11)$$

em que:

C – concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹;

C_o – concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L⁻¹;

θ – umidade volumétrica do solo, cm³ cm⁻³;

D_s – profundidade do solo que se deseja recuperar, cm; e

D_e – lâmina de água a ser aplicada no solo para a lavagem dos sais, cm.

$$C = C_o \cdot K \cdot \left(\frac{D_s}{D_e}\right) \quad (12)$$

em que:

- C – Concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹;
 C_o – Concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L⁻¹;
 K – Constante que varia com o tipo de solo e o método de aplicação de água;
 D_s – Profundidade do solo que se deseja recuperar, cm; e
 D_e – Lâmina de água a ser aplicada no solo para a lavagem dos sais, cm.

$$CEf = \frac{\left(\frac{La}{Ls} - 0,15\right) \cdot CEi}{5} \quad (13)$$

em que:

- CEf – Concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L⁻¹;
 La – Altura de água a ser lixiviada, cm;
 Ls – Espessura de solo a ser recuperado, cm; e
 CEi – Concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L.

Foram utilizados o índice de concordância (CAMARGO & SENTELHAS 1998) e a raiz do erro quadrático médio para medir o desempenho das equações utilizadas nessa pesquisa.

Os parâmetros avaliados foram também analisados estatisticamente por meio da análise da variância, realizando teste de média de tukey em 5 e 1% de probabilidade. As análises dos dados, foram realizadas na linguagem e ambiente R, 2.15. 1. (R DEVELOPEDMENT CORE TEAM 2013).

O desempenho das equações foi avaliado comparando a CE final obtida nos cálculos com o uso dessas equações, com os resultados experimentais medidos no ensaio, nos tubulões instalados na área experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Estatísticas clássicas para a performance das equações empíricas

De acordo com a análise de variância, verificou-se interação significativa ($p < 0,01$) entre os fatores sistema de recuperação e níveis de salinidade para os dados obtidos, somente para a lavagem de volumes de poros “Experimento”, e efeito isolado da salinidade tanto para experimento quanto para todas as equações estudadas; para os sistemas de recuperação não houve significância nas equações (Tabela 6). Esses resultados evidenciam que os sistemas de recuperação não causam efeito nas equações estudadas, pois a maioria delas não chega ao requinte de indicar qual o sistema que será utilizado na recuperação do solo.

Tabela 6 - Resumo da análise da variância (teste F) e significância estatística para os valores dos experimentos e para as variáveis CE estimada e CE medida nos sistemas de recuperação

FV	GL	Estatística (F)					
		Experimento	Volubuyev	Cordeiro	Jury	Hoffman	Reeve
Sistema	1	185,94**	0,58 ^{ns}	2,66 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,58 ^{ns}	0,58 ^{ns}
Salinidade	4	67,69**	2078,31**	701,91**	2078,77**	2077,25**	2078,01**
Sis x Sali	4	12,82**	2,16 ^{ns}	1,65 ^{ns}	2,16 ^{ns}	2,16 ^{ns}	2,16 ^{ns}
CV (%)	-	18,317	3,897	1,879	3,896	3,898	3,897

**significativo em 5% de probabilidade e ^{ns} não significativo

Observou-se efeito significativo para a interação dos sistemas de recuperação e os níveis de salinidade para os valores obtidos no experimento, apenas para a lavagem de volumes de poros “Experimento” (Tabela 06). Esses dados são coerentes com os obtidos por Barros (2005) e De Jong (1982). Trabalhando com solos salinos, esses autores constataram uma lixiviação de 50% dos sais dissolvidos, quando foi aplicada uma lâmina de lixiviação igual a 1,0 volume de poros. Resultados similares foram obtidos por Silveira (2000); empregando gesso dissolvido na água de irrigação para a recuperação de solos salinos e salino-sódicos de Custódia, PE, esse autor observou que o primeiro lixiviado coletado das colunas do solo apresentou os maiores valores de CE, decrescendo sucessivamente, até se igualar à CE da água usada na irrigação.

Desdobrando-se a interação sistema-salinidade, verifica-se que, para os dois tipos de sistemas ocorreram um aumento do nível salino com o incremento da salinidade; verificou-se ainda que houve variação de acordo com o sistema utilizado. De forma geral, os menores valores foram obtidos no sistema intermitente, o qual se baseia na lavagem gradativa dos sais, permitindo assim lavar mais esses sais que ficam retidos nos solos; já o manejo contínuo,

apesar do curto tempo de aplicação, não consegue ser tão eficiente na remoção desses sais no solo.

O movimento dos sais na solução do solo ocorre por meio do fluxo de íons no solo, sendo que este se dá por dois processos: difusão e transporte de massa. 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.

Os maiores valores médios de salinidade foram verificados no sistema contínuo (Tabela 7). Comparando-se os sistemas dentro de cada nível de salinidade, verifica-se que para todos os níveis de salinidade os sistemas não diferem estatisticamente. De forma geral, para os sistemas estudados, foi verificado efeito de concentração nos níveis de salinidade de forma gradativa (Tabela 7).

Essa interação da salinidade teve influência nos resultados possivelmente em função da granulometria do solo, tratando-se de um solo de textura intermediária. O incremento observado vai no sentido daquele esperado e proposto, por exemplo, por van der Sloot et Col. (1997), que estudaram a influência do tamanho das partículas nos ensaios de lixiviação. Esses autores verificaram que áreas de superfícies específicas maiores, por unidade de massa ou volume, podem permitir a dissolução rápida na superfície.

Tabela 7 - Valores médios de salinidade no experimento nos sistemas de recuperação

SISTEMAS	NÍVEIS DE SALINIDADE (dS m ⁻¹)				
	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00
Intermitente	0,562 Ce	0,646 Cd	0,712 BCc	0,986BAb	1,438 Aa
Contínuo	0,876 Ce	1,181 Cd	1,641 Bc	1,836 Bb	2,867 Aa

Valores seguidos pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem entre si pelo Teste de Tukey em 5% de probabilidade.

4.2 Desempenho das equações para predição da salinidade do solo no sistema intermitente

Na Figura 06 são apresentadas as cinco dispersões dos pontos que representam os valores de condutividade elétrica, medidos e simulados, em torno da reta 1:1, assim como a equação de regressão, para as cinco equações de lavagem, no sistema de recuperação intermitente.

Observa-se na Figura 06 um ajuste de $R^2=0,9281$ para A; 0,9081 para C; 0,9481 para D; 0,9088 para E é de 0,8387 para B, entre os valores de condutividade elétrica medidos no extrato de saturação (estimados a partir da condutividade elétrica da solução) e valores

calculados. Os valores medidos foram obtidos com extratores de cápsula porosa, com correção em função da umidade, no sistema de recuperação intermitente; já os valores estimados foram calculados com as equações de Volobuyev – A; Cordeiro – B; Jury – C; Hoffman – D e Reeve – E. De acordo com a Figura 6A, utilizando a equação de recuperação de Volobuyev, a estimativa da condutividade elétrica se aproxima daquela obtida com os valores medidos, sendo que a linha de tendência quase sobrepõe a linha 1;1. Esses resultados mostram que a equação de Volubuyev é capaz de estimar com boa precisão, indicando que o método apresenta confiabilidade para a estimativa de CE no sistema de recuperação intermitente. Em comparação, os valores estimados nas Figuras 6B, 6C, 6D e 6E tiveram performance inferiores. As Figuras 6B, 6C e 6E correspondem às equações que apresentaram maiores superestimativas de valores de condutividade elétrica para esse método de recuperação; já os valores encontrados pela equação de Hoffman subestimaram os valores medidos de condutividade elétrica do extrato.

Em geral, as equações utilizadas tenderam a superestimar os valores medidos, principalmente para os valores mais elevados, como a equação de Jury; a equação de Cordeiro foi a que apresentou as maiores discrepâncias. Esse comportamento, possivelmente, deve-se ao fato de que essa equação tem uma grande sensibilidade aos níveis iniciais de salinidade do solo.

* Significativamente > 1 em nível de 5% de Probabilidade, pelo teste “t”

Figura 6 – Relação entre os valores de condutividade elétrica do extrato de saturação estimados com as equações e os valores medidos a partir da condutividade elétrica da solução do solo obtida com extratores de cápsula porosa, para recuperação intermitente, (A - Volubuyev; B - Cordeiro; C - Jury; D - Hoffman e E - Reeve)

Os valores dos coeficientes de determinação, de correlação linear de Pearson, do índice de concordância de Willmott, do índice de desempenho de Camargo Sentelhas, do erro-padrão da estimativa e da raiz do quadrado médio podem ser visualizados na Tabela 08.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes de determinação (R^2_a), de correlação linear de Pearson (r), do índice de concordância de Willmott (w), do índice de desempenho de Camargo Sentelhas (c), do erro-padrão da estimativa (EEP) e da raiz do quadrado médio do erro (RQME) obtidos nas correlações entre os valores de CE estimados e CE medidos no sistema de recuperação intermitente

Equações	P - Valor	R^2	r	w	c	EEP	RQME
Volobuev	<0,001	0,946	0,832	0,999	0,857	0,039	4,874
Cordeiro	<0,001	0,833	ns	0,868	0,621	0,197	9,396
Jury	<0,001	0,946	0,832	0,945	0,810	0,120	8,224
Hoffman	<0,001	0,946	0,878	0,956	0,819	0,064	3,427
Reeve	<0,001	0,946	0,832	0,965	0,828	0,096	7,452

Na Tabela 8 observa-se igualdade nos valores dos coeficientes de determinação para as equações estudadas; somente a equação de Cordeiro mostrou valor inferior às demais, com R^2 de 0,833. Para a correlação linear de Pearson, somente a equação de Cordeiro não apresentou significância, sendo as demais significativas em probabilidade de 5%. Este fato de igualdade ocorre, pois, o agrupamento dos valores de CE estimados em relação aos medidos tende a melhorar as estimativas da CE. Os métodos em estudo apresentaram elevados valores para o coeficiente de Willmott, sendo os valores obtidos por Volobuyev os que proporcionaram esse índice mais próximo de 1, ou seja, valores que mais se aproximam da concordância perfeita. Sendo assim, o melhor resultado obtido por equações para o sistema de recuperação intermitente foi o de Volobuyev. Essa equação, além de apresentar melhor índice de desempenho segundo Camargo e Sentelhas, apresenta menor valor do EEP e da RQME, comprovando que o produto das dimensões lineares aumenta a intensidade da associação linear entre as variáveis. Segundo José (2014), que trabalhou com esses mesmos parâmetros, avaliando equações para a estimativa da área foliar na cultura do manjeriço, quanto mais o valor de R^2 se aproxima de 1,0, mais os valores do erro se aproximam de zero e maior é a precisão do modelo ajustado.

4.3 Desempenho das equações para predição da salinidade do solo no sistema contínuo

De acordo com a Figura 7, observam-se os valores dos coeficientes de determinação $R^2 = 0,9186$ para A; $0,9108$ para C; $0,9644$ para D; $0,9463$ para E e $0,8009$ para B. Os CEes medidos foram obtidos com extratores de cápsula porosa, com correção em função da umidade; os valores estimados foram calculados pelas equações de Volobuyev – A; Cordeiro – B; Jury – C; Hoffman – D e Reeve – E. Pode-se verificar, também na Figura 07, que de uma forma geral, todas as equações estudadas nesse sistema de recuperação apresentaram valores que subestimaram os valores medidos. A equação de Cordeiro foi a que propiciou melhor reta de regressão em relação à reta 1:1; porém, com valores muito discrepantes se comparadas às outras. Como essas dispersões são caracterizadas por aproximações matemáticas que avaliam a exatidão, a dispersão e o afastamento dos valores simulados em relação aos calculados, pode-se afirmar com base nesses resultados que, para esse método de recuperação, as equações não são tão eficientes quando comparadas ao método anterior. Assim, os valores no sistema intermitente são melhores descritos pelas equações empíricas.

Ainda analisando a Figura 7B, observa-se que ocorre grande dispersão dos pontos, ao redor da linha de regressão, comportamento diferente das outras equações em que os pontos

estão mais próximo da reta 1:1, permitindo boa correlação entre os valores medidos e calculados.

* Significativamente > 1 em nível de 5% de Probabilidade, pelo teste “t”

Figura 7 – Relação entre os valores de condutividade elétrica do extrato de saturação estimados pelas equações e os valores medidos a partir da condutividade elétrica da solução do solo obtidas com extratores de cápsula porosa, para a recuperação contínua, (A - Volubuyev; B - Cordeiro; C - Jury; D - Hoffman e E - Reeve)

Os valores do coeficiente de determinação, do coeficiente de correlação linear de Pearson, do índice de concordância de Willmott, do índice de desempenho de Camargo & Sentelhas, do erro-padrão da estimativa, e da raiz do quadrado médio, para o sistema de recuperação contínua, podem ser visualizados na Tabela 09.

Tabela 9 - Valores dos coeficientes de determinação (R^2), de correlação linear de Pearson (r), do índice de concordância de Willmott (w), do índice de desempenho de Camargo Sentelhas (c), do erro-padrão da estimativa (EEP) e da raiz do quadrado médio do erro (RQME) obtidos nas correlações entre os valores de CE estimados e CE medidos no sistema de recuperação intermitente

Equações	P - Valor	R_a^2	r	w	c	EEP	RQME
Volobuev	<0,001	0,963	0,898	0,870	0,799	0,173	4,913
Cordeiro	<0,001	0,794	ns	0,999	0,702	0,157	9,116
Jury	<0,001	0,963	0,897	0,989	0,908	0,168	8,289
Hoffman	<0,001	0,963	0,898	0,735	0,675	1,209	3,454
Reeve	<0,001	0,963	0,898	0,977	0,987	0,094	7,512

Na Tabela 9 observa-se igualdade nos valores dos coeficientes de determinação para as equações estudadas; somente a equação de Cordeiro mostrou valor inferior às demais, com R^2 de 0,794. Para a correlação linear de Pearson, somente a equação de Cordeiro não apresentou significância, sendo todas as demais significativas em probabilidade de 5%. Os métodos em estudo: Cordeiro, Jury e Reeve foram os que apresentaram melhores valores para o coeficiente de Willmott, sendo os valores obtidos por Cordeiro o método que mais se aproximou de 1, valor esse que caracteriza uma concordância perfeita. Os valores do EEP foram menores nas equações de Reeve (0,094), seguida por Cordeiro (0,157); Jury (0,168) e Volobuev (0,173), sendo a equação de Hoffman a que apresentou maior valor, com 1,209. Para o RQME, a equação que propiciou o menor valor foi também a de Hoffman.

Os resultados encontrados nessa pesquisa discordam dos valores obtidos por Franco (2013). Esse autor, trabalhando com quatro das cinco equações utilizadas nessa pesquisa e com o mesmo solo e dois níveis de salinidade, sugeriu que a melhor equação seria a de Cordeiro, para o cálculo de lamina de lixiviação de sais em solos salinizados. A única diferença é que Franco (2013) salinizou os solos com cloreto de sódio.

Ainda Franco (2013), ressalta que os valores obtidos pelas equações diferem de alguns trabalhos apresentados na literatura, e que esses são bastantes variáveis, o que pode estar relacionado com a diversidade de solos e das condições em que foram realizados os estudos. Evidencia-se, assim, que os resultados obtidos pelas equações de recuperação possivelmente dependem de fatores físico-químicos relacionados aos solos ou inerentes à própria metodologia utilizada, e que esses impedem a obtenção de resultados consistentes sob condições variadas de experimentos.

Ao que tudo indica, é necessário a ser abordado nas futuras pesquisas considerações sobre as formulações das equações e a parte físico-química do solo, e não somente os valores de condutividade elétrica inicial e final do solo e da água utilizada na lavagem.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista as condições em que o experimento foi conduzido, pode-se concluir que:

Tecnicamente, é possível o uso de lavagem de recuperação de solos salinizados como estratégia de manejo da irrigação, sendo essa bastante satisfatória;

Dentre as equações avaliadas, a que apresentou melhor performance na recuperação do solo salinizado foi a de Volobuyev, fornecendo respostas mais coerentes com os resultados obtidos experimentalmente; e

De maneira geral, as equações testadas foram mais eficientes no sistema de recuperação intermitente; no sistema contínuo, os valores calculados de condutividade elétrica após a lavagem foram todos subestimados quando comparados com os medidos experimentalmente.

REFERÊNCIAS

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p.

BARROS, M. F. C.; SANTOS, P. M.; SILVA, A.J. Recuperação de solos afetados por salinização usando água de qualidade inferior. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB. v.9, (Suplemento), p.310-313, 2005.

BECKER, B.K. Geopolítica da Amazônia. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 19, n. 53, p. 71-86, jan./abr. 2005.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, 1996. 596p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI E.C. **Manual de irrigação**. 7. ed. atual e ampliada. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.

BISHOP, A.A.; WALKER, W.R.; ALLEN, N.L.; POOLE, G.J. Furrow advances rates under surge flow systems. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.107, n.3, p.257-264, 1981.

BOT, A.; NACHTERGAELE, F.; YOUNG, A. **Land resource potential and constraints at regional and country levels**. Rome: FAO, 2000. 180p. (FAO. World Soil Resources Report, 90).

BLANCO, F.F. ; FOLEGATTI, M.V. Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola**, Campina Grande, PB. v.5, n.1, p. 76-80, 2001

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CORDEIRO, G.G. **Salinidade em agricultura irrigada (conceitos básicos e práticos)**. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2001. 38p.

COOLIDGE, P.S.; WALKER, W.R.; BISHOP, A.A. Advance and run-off surge flow furrow irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v.108, n.1, p.35-42, 1982.

DAKER, A. **A água na agricultura: manual de hidráulica agrícola**. 7.ed. Rio de Janeiro, RJ: Freitas Bastos, 1988. 543p.

DE JONG, E. Reclamation of soils contaminated by sodium chlorid. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, v.62, n.2, p.351-364, 1982.

DIAS, N.S. **Prevenção, manejo e recuperação dos solos afetados por sais**. DIAS, N. da SILVA X GHEYI, H.R.; X ;DUARTE,S.N. Piracicaba: ESALQ/USP/LER, 2003.118p. (Série Didática, 13).

DIAS, E.G.C.S. **Avaliação de Impacto Ambiental de projetos de mineração no Estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento**. 2001. 206p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Embrapa Informação Tecnológica. 2. ed. revista e ampliada. 2009. 167p.

FRANCO, E.M. **Eficiências de equações empíricas utilizadas para a determinar a lamina de lixiviação de sais e modelagem da distribuição do sódio no solo**. 2013. 54p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultras “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

FAO. **Water in agriculture**: opportunity untapped. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.203p.

FURLANI, P.R. ;SILVEIRA, L.C.P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Campinas: IAC, 1999. 52p. (Boletim técnico, 180).

GHEYI, H.R. Problema de salinidade na agricultura irrigada. In: OLIVEIRA, T.S.; ASSIS, R.N.; ROMERO, R.E.; SILVA, J.R.C. (Ed.). **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: DCS/UFC, 2000. p. 329-346.

HOFFMAN, G.J.; RHOADES, J.D.; LETEY, J.; SHENG, F. Salinity management. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, Pamela De-Vore-Hansen, 1992. cap.18 p.667-715, (ASAE Monograph.).

HOFFMAN, G.J. Alleviating salinity stress. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M. (Ed.). **Modifying the cRoot environment to Reduce Crosp stress**. St. Joseph, MI: American society of Agricultural Engineers, 1980. chap.9 p. 305-343.

HOLANDA, J.S.; AMORIM, J.R.A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A.C. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H.R.; DIAS, N.S.; LACERDA, C.F. **Manejo da salinidade na agricultura**: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade, 2010. p. 43-61.

JOSÈ, J.V. **Adubação potássica e laminas de irrigação na produção de biomassa e óleo essencial no manjerição (*Ocimum basilicum* L.)**. 2014. 115p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultras “Luiz de Queiroz” , Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

JURY, W.A.; JARRELL, W.M.; DEVITT, D. Reclamation of saline-sodic soils by leaching. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 1100-1106, 1979.

KEMPER, W.D.; TROUT, T.J.; HUMPHERYS, A.S.; BULLOCK, M.S. Mechanisms by Which Surge Irrigation Reduces Furrow Infiltration Rates in a Silty Loam Soil. **Transaction of the ASAE**, cidade, v.31, n.3, p.821-829, 1988.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Edusp, 2012. 344p.

LIMA, V.L.A. **Efeitos da qualidade da água de irrigação e da fração de lixiviação sobre a cultura do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) em condições de lisímetro de drenagem**. 1998. 87p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

MACHADO, S.L.O. MARCHEZAN, E. ; VILLA, S.C.C. ; CAMARGO, E.R. Os recursos hídricos e a lavoura arrozeira e recursos hídricos. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, n. 27, p. 97-106, 2003.

MONTENEGRO, A.A.A.; MONTENEGRO, S.M.G. Aproveitamento sustentável de aquíferos aluviais no Semi-Árido. In: CABRAL, J.S.P.; FERREIRA, J.P.C.L.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COSTA, W.D. **Água subterrânea: Aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento. Tópicos especiais em recursos hídricos**. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 2004. v.4. 447p.

OLIVEIRA, M. Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais. In: GHEYI, H.R. QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB/SBEA, 1997. cap.1, p.1-35.

_____. Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais. In: SIMPÓSIO “MANEJO E CONTROLE DA SALINIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA”, 1997, Campina Grande, PB. **Anais...** Campina Grande: UFPB, 1997. p. 3-35.

PALÁCIOS, O.V.; ACEVES, E.N. **Instructivo para el muestreo registro de dados e interpretacion de calidad del agua para Riego agrícola**. Chapingo: Colegio de postgraduados, Escuela Nacional de agricultura, 1969. 498p. (Rama de Riego y Drenaje, 15).

PEREIRA, J.R. Solos afetados por sais. In: CAVALCANTI, F.J.A. (Coord). **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 2 ed. Recife: IPA, 1998. p. 76-82.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelo salinos**. Madrid: Agrícola Espanola, 1978. 521p.

PIZARRO, R. **Rasgos y actitudes del profesor efectivo**. Tesis para optar el Grado de Magíster en Ciencias de la Educación Pontificia. Universidad de Chile, 1996, Chile.

PRISCO, J.T. Alguns aspectos da fisiologia do etresse salino. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 3, p. 85-94, 1987.

QADIR, M.; QURESHI, R.H.; AHMAD, N. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. **Geoderma**, Amsterdam, v.72, p.207-217, 1996.

R DEVELOPMENT CORE TEAM R: language and environment of statistical computing. Vienna, 2013.

REEVE, R.C. **The relation of salinity to irrigation and drainage requirements.** Int. Comm. Irrig. Drainage Third Cong. Q. 10, 1957. p.175-187. (US. Saline Lab., riverside Calif).

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas.** 2.ed. Piracicaba: Ed. ESALQ, 1996. 513p.

RHOADES, D.J. Drainage for salinity control. In: SCHNFGAARDE, J.VAN. (Ed.). **Drainage for agriculture.** Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1974. p.433-460. (Agronomy, 17).

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **The use saline water for crop production.** Rome: FAO, 1992. 133p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 48).

RHOADES, J.D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, D.R.; NIELSEN, D.R. (Ed.) **Irrigation of agricultural crops.** Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1990. p. 1089-1142. (Agronomy, 30).

RIBEIRO, M.R.; BARROS, M.F.C.; FREIRE, M.B.G.S. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo.** Parte II – Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 449-484.

RIBEIRO, M.R.; FREIRE, F.J.; MONTENEGRO, A.A.A. Solos halomórficos no Brasil: ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S; ALVAREZ, V.H. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, 2003. p.165-208.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: United States Department of Agriculture, 1954. 160p. (Agriculture Handbook, 60).

SANTOS, R.V. dos ; HERNANDEZ, F.F.F. Recuperação de solos afetados por sais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – MANEJO E CONTROLE DA SALINIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA, 26., 1997. Campina Grande . **Anais...** Campina Grande: UFPB, 1997. p. 319 – 356.

SOUZA, M.R. de. **Comportamento do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L. CV Eriparza) submetido a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação.** 1995. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

SILVEIRA, K.R. **Influência da aplicação do gesso na água de irrigação sobre a salinidade, sodicidade e condutividade hidráulica de solos aluviais.** 2000. 73p Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Recife, 2000.

STONE, L.F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 22p.

TAVARES FILHO, A.N. **Níveis da necessidade de gesso sobre as características físico-químicas e na correção de solos salino-sódicos do perímetro irrigado de Ibimirim -PE.** 81p. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Recife, 2010.

VAN DER SLOOT, H.A.; HEASMAN, L.; QUEVAUVILLER, Ph.; **Harmonization o Leaching/ Extraction Tests.** Amsterdam: Elsevier, 1997. 281p.

WALLENDER, W.W.; RAYEJ, M. Zero-Inertia Surge Model with Wet-Dry Advance. **Transaction of the ASAE**, Britain, v. 28, n.5, p.1530-1534, 1985.