

# IMPORTÂNCIA RELATIVA DOS ÍONS NA SALINIDADE DE UM CAMBISSOLO NA CHAPADA DO APODI, CEARÁ<sup>1</sup>

DEBORAH M. B. A. D'ALMEIDA<sup>2</sup>, EUNICE M. ANDRADE<sup>3</sup>, ANA C. M. MEIRELES<sup>4</sup>, RICARDO L. L. NESS<sup>5</sup>

**RESUMO:** Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver e validar modelos em que a ordem de influência dos íons nos valores da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) fosse identificada. As coletas foram realizadas em duas áreas com bananeiras cultivadas sob irrigação (água subterrânea e superficial) e em áreas de vegetação nativa localizadas na Chapada do Apodi, Ceará, sendo uma em Quixeré e a outra no Distrito de Irrigação Jaguaribe Apodi (DIJA), em Limoeiro do Norte. A pesquisa ocorreu no período de dezembro de 1999 a dezembro de 2000 e setembro a dezembro de 2001. Foram retiradas 312 amostras de solo e, por meio das análises do extrato de saturação do solo, foram determinados as CEes e os íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ . Posteriormente, foram desenvolvidas equações lineares múltiplas, relacionando a CEes com os íons estudados. Os modelos estatísticos desenvolvidos apresentaram valores simulados bem próximos dos observados, o que indica boa acuracidade de tais modelos. Os resultados obtidos mostraram que, em Quixeré, o íon  $\text{Cl}^-$  exerce maior influência nos altos valores das CEes, seguido dos íons  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ , exceto para a camada de 30-60 cm, em que o íon  $\text{Na}^+$  aparece após o  $\text{Cl}^-$ . Já no DIJA, o  $\text{Cl}^-$  foi predominante na camada de 0-30 cm, seguido por  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  e o  $\text{Na}^+$  na de 30-60 cm, seguido pelo  $\text{Cl}^-$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** salinidade no solo, modelos estatísticos.

## RELATIVE IMPORTANCE OF IONS IN SALINITY OF CAMBISSOIL AT THE APODI PLATEAU, CEARÁ - BRAZIL

**ABSTRACT:** The main objective of this study was to develop and to evaluate models in order to identify the influence of ions on the values of electrical conductivity of saturation extracts (CEes). The samples were collected in areas under irrigated banana trees (with subsurface and surface water) and native forest areas. Samples were taken in two areas in the Apodi Plateau, State of Ceara. One area was in Quixeré County and the other was at the Jaguaribe Apodi Irrigation District - DIJA, in Limoeiro do Norte County. Research was done during two periods, one from December 1999 to December 2000 and the other from September to December 2001. The 312 soil samples were taken to the laboratory for analyses of extract saturation for determination of CE and the ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{K}^+$ . A stepwise regression analysis model was tested, using CEes as the dependent variable and analyzed ions as the independent variables in all tested models. Results obtained through statistical models showed that the ion  $\text{Cl}^-$  had greater influence in the elevation of the CEes values followed by the ions  $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$  in Quixeré. In the soil of the DIJA area, for layers of 30-60 cm, the most important ion was  $\text{Na}^+$  followed by  $\text{Cl}^-$ . The linear models for the several layers, for both areas, presented a good accuracy, as the simulated values were very close to those observed.

**KEYWORDS:** soil salinity, statistical models.

<sup>1</sup> Extraído da Dissertação de Mestrado do primeiro autor.

<sup>2</sup> Eng<sup>a</sup> Civil, M.Sc. em Irrigação e Drenagem, Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos - COGERH, Fortaleza - CE, deborah@cogerh.com.br

<sup>3</sup> Profa., Ph.D., Departamento de Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, UFC, eandrade@ufc.br. Bolsista do CNPq.

<sup>4</sup> Eng<sup>a</sup> Agrônoma, Doutoranda em Recursos Hídricos, UFC, ana\_meireles@bol.com.br

<sup>5</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Prof. Dr., FAFIDAM/UECE, Limoeiro do Norte - CE, langeness@hotmail.com

Recebido pelo Conselho Editorial em: 17-10-2002

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 22-8-2005

## INTRODUÇÃO

A expansão das áreas irrigadas no mundo deu-se de forma a atender à crescente demanda de alimentos, tornando-se, assim, um recurso para garantir a sobrevivência (RHOADES et al., 2001). Assim como a grande maioria das atividades humanas gera algum tipo de impacto negativo ao meio ambiente, a irrigação, se não for conduzida de modo racional, pode acarretar sérios danos ao solo, como o aumento das concentrações de sais e sódio trocável, o que reduz sua fertilidade e, em longo prazo, pode provocar desertificação da área afetada.

A salinização dos solos não está ligada somente à qualidade da água para irrigação, depende também das características físico-químicas do solo em seu estado natural e das técnicas de manejo a ele aplicado. É comum o surgimento da salinidade em áreas irrigadas cujas técnicas de manejo não visam à aplicação suficiente de água e conservação da capacidade produtiva dos solos, bem como um eficiente sistema de drenagem e em locais onde há uso excessivo de fertilizantes (SILVA FILHO et al., 2000).

A salinidade, assim como outras propriedades físicas e químicas do solo, apresenta variabilidade espacial e temporal natural em função das práticas de manejo utilizadas, da profundidade do lençol freático, da permeabilidade do solo, da taxa de evapotranspiração, das chuvas, da salinidade da água subterrânea e de outros tantos fatores hidrogeológicos. A análise de dados de salinidade deve ser realizada de modo a permitir a identificação dos fatores que estão contribuindo para o aumento de sais, para a identificação das áreas afetadas e para o monitoramento de variações temporais, tornando possível planejar o estudo de recuperação, definição de estratégias de manejo e identificação dos fatores responsáveis pelo problema. A utilização de recursos da estatística clássica e da geoestatística complementam a análise e interpretação de dados de salinidade numa dada região (QUEIROZ et al., 1997). A análise de regressão em estudos de concentração de íons e a CEes vêm sendo empregadas com sucesso por vários pesquisadores como NUNES FILHO et al. (2000), SILVA JÚNIOR et al. (1999) e MAIA et al. (2001).

Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver e validar modelos em que a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) pudesse ser estimada com base na concentração de cada íon pesquisado, determinando, assim, a ordem de influência dos íons nos altos valores da CEes.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a presente pesquisa, foram utilizados dados provenientes de amostras coletadas em duas áreas cultivadas e irrigadas por microaspersão, sendo elas: Fazenda Apodi, no Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodí (DIJA), município de Limoeiro do Norte, e a Fazenda Frutacor, no município de Quixeré, ambos localizados no Ceará. As áreas distam, aproximadamente, 200 km da cidade de Fortaleza, estando entre as coordenadas geográficas 5°06'38" e 5°11'39" de latitude sul e a oeste entre os paralelos 37°52'21" e 37°56'05" de longitude.

A região apresenta clima quente e semi-árido, do tipo BSw'h', de acordo com a classificação de Köppen. Sua temperatura média anual é de 28,5 °C, sendo as temperaturas máxima e mínima anual de 36 °C e 22 °C, respectivamente. A precipitação média anual da região é de 772 mm, sua evaporação potencial média anual é de 3.215 mm e a umidade relativa média anual é de 62%. Os estudos pedológicos identificaram os solos como sendo Cambissolos (EMBRAPA, 1999).

As coletas de solo foram realizadas mensalmente, no período de dezembro/1999 a dezembro/2000, e nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro de 2001. As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-30; 30-60 e 60-90 cm, na propriedade em Quixeré. Já para a

propriedade no DIJA, as profundidades estudadas foram 0-30 e 30-60 cm, devido à presença de camada de impedimento a 60 cm.

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos e Água para fins de Irrigação do CENTEC de Limoeiro do Norte. Foram determinadas, seguindo a metodologia recomendada por RICHARDS (1954), as seguintes características físico-químicas: condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), cálcio e magnésio, sódio, potássio e cloretos. Determinaram-se o  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Cl}^-$  por titulação com solução de EDTA a 0,02N e  $\text{AgNO}_3$  a 0,0141N, respectivamente. Os íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  foram obtidos por fotometria de emissão de chama, e a CEes foi determinada utilizando-se de um condutivímetro de bancada.

Foram desenvolvidas equações lineares múltiplas, em que as concentrações de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  eram as variáveis independentes e a CEes a variável dependente. A equação de regressão teve a seguinte forma:

$$Y = a + bX_i + cX_{i+1} + dX_{i+2} + \dots + e_i \quad (1)$$

em que,

Y - condutividade elétrica ou variável dependente,  $\text{dS m}^{-1}$ ;

$X_i$  - concentração do íon ou variável independente,  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ;

a - constante de regressão;

b, c, d - coeficientes angulares da variável, e

e - erro aleatório.

As análises foram executadas utilizando-se do programa SPSS (Statistical Package For Social Sciences) v.10.0, sendo obtidos, por meio do método da seleção por etapa (*the stepwise regression procedure*), os coeficientes da equação, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajust}}$ ), o valor de significância da equação (F) e o erro do desvio da regressão.

Para a avaliação da acuracidade das equações de regressão, testaram-se os modelos empregando-se dados coletados no mesmo período, em área vizinha, que apresentava características físicas e químicas do solo semelhantes àquelas das áreas avaliadas. A validação foi efetivada com dados não empregados na calibração (reta de melhor ajuste) do modelo para eliminar o risco da autocorrelação, que poderia levar o modelo a apresentar resultados tendenciosos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os modelos de regressão linear desenvolvidos entre os valores da CEes e dos íons analisados, para as diversas camadas dos solos estudados, estão presentes na Tabela 1. Pelos resultados obtidos, observa-se que a dependência entre as CEes e os íons pode ser estimada com elevado grau de confiabilidade, baseando-se não só na análise dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), mas também nos valores de F.

Observando-se as equações desenvolvidas para Quixeré, pode-se dizer que, de modo geral, os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  expressaram maior contribuição para os valores da CEes, exceto para a segunda camada (30-60 cm), o que também explica a variabilidade da CEes. Acredita-se que a contribuição significativa do íon cloreto nas três camadas seja em decorrência da qualidade da água aplicada, que é de origem subterrânea e classificada como  $\text{C}_3\text{S}_1$ , por CRUZ (2001), de acordo com a University of California Committee of Consultants - UCCC, e do manejo da fertirrigação na área, na qual são aplicadas elevadas doses de KCl para suprimento da necessidade de potássio pela cultura da bananeira. A correlação entre a CEes e os íons foi de forte a muito forte, de acordo com a interpretação do coeficiente de Pearson (MILTON, 1992).

TABELA 1. Equações de regressão linear múltipla entre a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e as concentrações dos íons  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  calculadas pelo método Stepwise, coeficientes de determinação ( $R^2$ ), valores de F e significância estatística (Sig.) para as áreas de Quixeré e DIJA.

Camadas (cm)	Equação	$R^2$	F	Sig.
Quixeré				
0-30	$\text{CEes} = 0,181 + 0,075 (\text{Cl}^-) + 0,060 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	0,995	1.355,60	<0,001
30-60	$\text{CEes} = 0,099 + 0,065 (\text{Cl}^-) + 0,044 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) + 0,057 (\text{Na}^+)$	0,990	392,65	<0,001
60-90	$\text{CEes} = 0,196 + 0,086 (\text{Cl}^-) + 0,379 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	0,964	173,66	<0,001
DIJA				
0-30	$\text{CEes} = 0,106 + 0,091 (\text{Cl}^-) + 0,048 (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	0,969	204,90	<0,001
30-60	$\text{CEes} = 0,119 + 0,073 (\text{Cl}^-) + 0,106 (\text{Na}^+)$	0,878	54,73	<0,001

As concentrações máximas de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  ocorreram na camada mais profunda do solo, o que pode indicar excessiva aplicação de lâmina d'água, promovendo a lixiviação do excesso de  $\text{Cl}^-$  para as camadas inferiores. Já os valores mais altos de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  se devem às condições edáficas da região, que possui solos do tipo Cambissolos Háplicos, oriundos de rochas calcárias (EMBRAPA, 1999).

Na área estudada no DIJA, o  $\text{Cl}^-$  foi o íon predominante na solução do solo para a primeira camada (0-30 cm), seguido dos íons  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ . Já para a segunda camada, o íon  $\text{Na}^+$  apresenta maior peso, seguido do  $\text{Cl}^-$ , conforme indicam os coeficiente angulares das equações (Tabela 1). Pelos valores de F, a 1% de significância, a hipótese de que a variação dos elementos estudados não pode ser explicada por modelo linear, foi rejeitada. Observando-se os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das equações desenvolvidas, pode-se afirmar, com base na escala de Pearson (MILTON, 1992), que a correlação entre a CEes e os íons foi de forte a muito forte.

A predominância do íon  $\text{Cl}^-$  na primeira camada do DIJA pode ser atribuída à qualidade da água utilizada na irrigação, que é de origem superficial, oriunda do rio Jaguaribe e classificada por CRUZ (2001) como  $\text{C}_1\text{S}_2$ , de acordo com o UCCC. De acordo com o estudo de MAIA et al. (2001), as águas superficiais da Chapada do Apodi foram classificadas como cloretadas, podendo resultar em adições consideráveis de cloreto ao solo.

Pode-se verificar, na Tabela 1, que, nas duas áreas estudadas, Quixeré e DIJA, o modelo de melhor ajuste da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo nas distintas camadas apresentou maior dependência pelo íon cloreto. Acredita-se que tal fato seja decorrência do emprego do cloreto de potássio na fertirrigação, uma vez que as águas empregadas na irrigação pertenciam a diferentes classes, com teores de cloro bem distintos. Para Quixeré, a concentração do íon cloreto nas águas de irrigação era de  $10,88 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ , enquanto, para aquelas usadas no DIJA, a concentração do referido íon era de  $1,41 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$  (CRUZ, 2001).

Na Figura 1, apresentam-se comparações efetuadas entre os valores observados da condutividade elétrica do extrato de saturação e os valores estimados ao longo do perfil do solo de Quixeré, para as camadas de 0-30; 30-60 e 60-90 cm, representadas nas Figuras 1A, 1B e 1C, respectivamente. Essa comparação fornece a base para a avaliação da acuracidade da simulação do modelo. Se a simulação apresentar acuracidade, os pares de pontos - observados e calculados - deverão estar em torno da reta 1:1, que representa a igualdade perfeita. Observa-se alta correlação entre os valores observados em laboratório e os simulados pelas equações apresentadas na Tabela 1. Todos os modelos expressaram coeficientes de correlação superiores a 0,97 e desvio da inclinação da reta inferior a 3,6% em relação à linha 1:1. Tais parâmetros demonstram alta precisão e acuracidade, indicando que o modelo não é tendencioso, ou seja, estima valores bem próximos do real, para baixas ou altas concentrações.

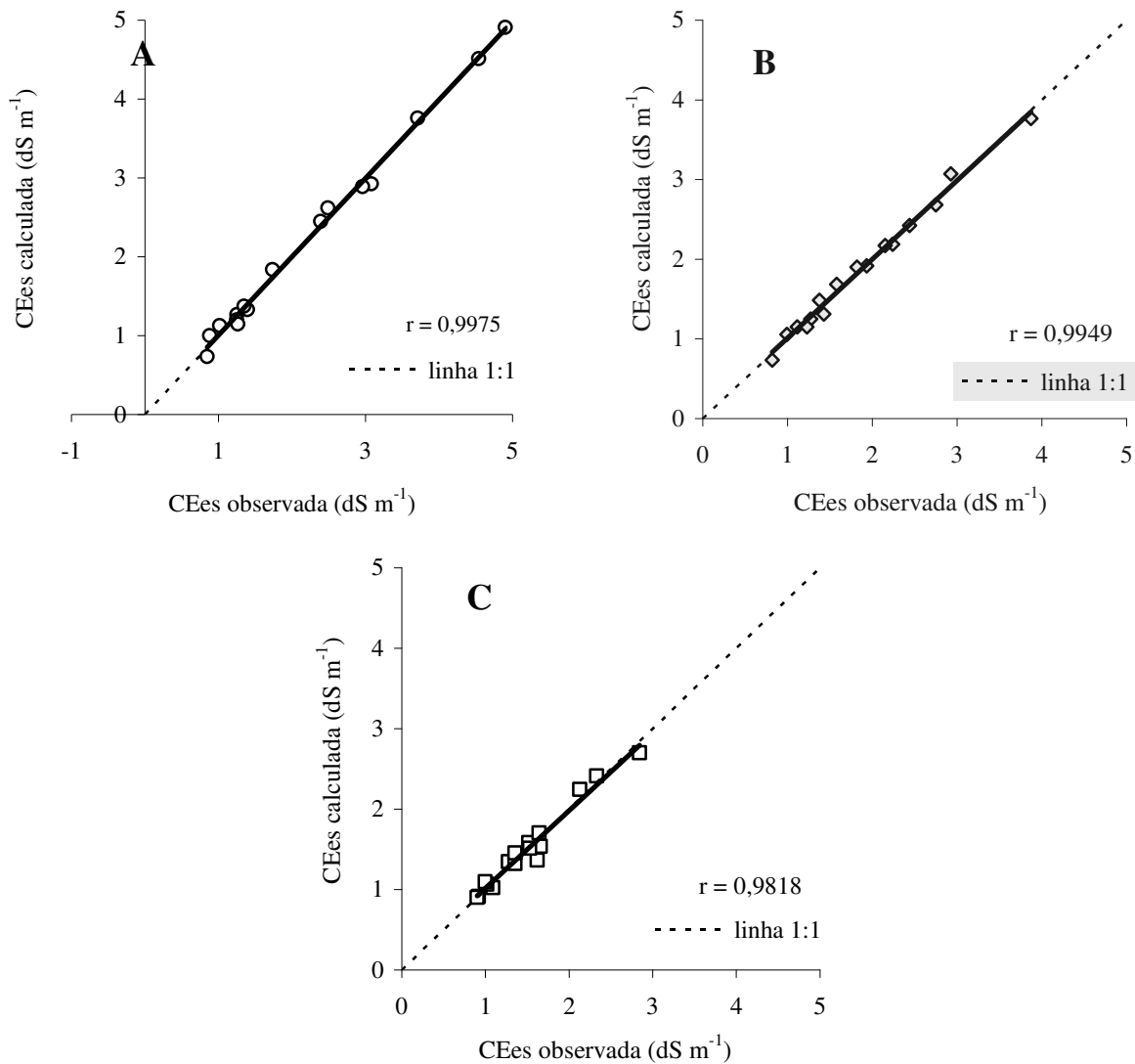


FIGURA 1. Comparação entre os valores observados e os valores calculados da CEes, para as diversas camadas do solo, em Quixeré - CE. A - camada 0-30 cm; B - camada 30-60 cm; C - camada 60-90 cm.

Pela Figura 1A, fica evidente que os valores da CEes foram mais altos na camada 0-30 cm do que nas demais, sendo a camada 60-90 cm a de menores valores registrados (Figura 1C). Pode-se explicar isso pelo fato de que, na camada superficial, o processo de evapotranspiração contribui para o aumento da salinidade, além de ser nessa mesma camada a aplicação direta da fertirrigação. Os valores de CEes variaram de 0,85 a 4,90 dS m<sup>-1</sup> na camada de 0-30 cm; de 0,82 a 3,77 dS m<sup>-1</sup> na camada de 30-60 cm, e, na camada 60-90 cm, a variação foi de 0,90 a 2,70 dS m<sup>-1</sup>.

Na Figura 2, apresenta-se a comparação entre os valores da CEes observados em laboratório e os valores calculados por meio das equações estimadas para a área do DIJA, nas camadas de 0-30 cm e 30-60 cm. Na primeira camada (Figura 2A), os valores da CEes variaram entre 0,53 e 1,65 dS m<sup>-1</sup>. Novamente se observa excelente simulação dos valores da CEes. A inclinação da reta de melhor ajuste diverge apenas 3% da reta 1:1, e a interseção da reta nas ordenadas ocorre praticamente na origem, diferindo apenas em 0,028 dS m<sup>-1</sup>. Tais valores indicam excelente acuracidade e precisão, demonstrando a alta correlação entre os íons Cl<sup>-</sup> e Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup> e a CEes na área do DIJA.

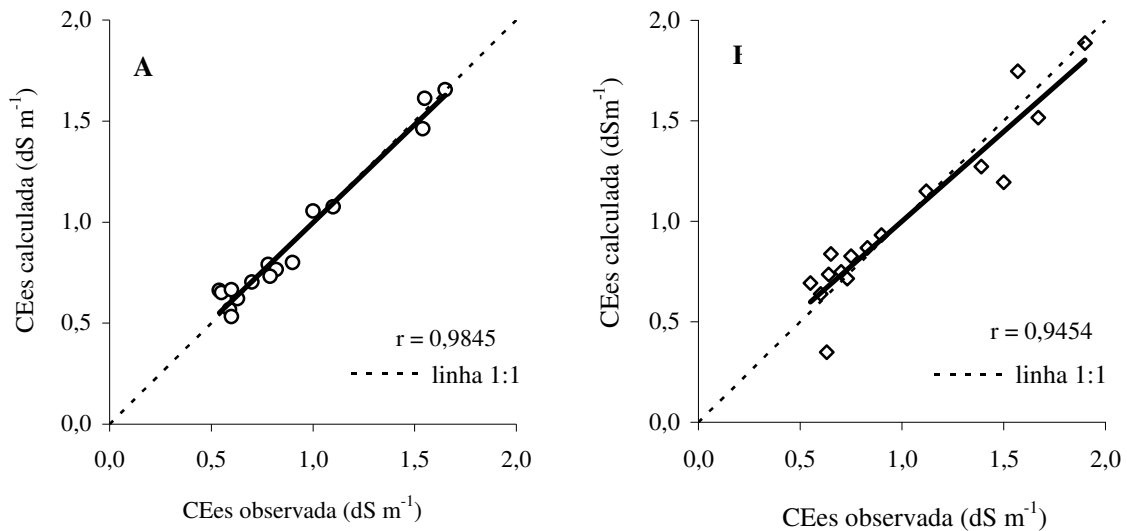


FIGURA 2. Comparação entre os valores observados e os valores calculados da CEes, para as diversas camadas do solo, no DIJA - CE. A - camada 0-30 cm; B - camada 30-60 cm.

Já na segunda camada, ocorreu pequeno desvio em relação à linha 1:1, mas ainda mostrando boa relação. Embora o modelo estatístico para a segunda camada apresente alto coeficiente de correlação ( $r = 0,945$ ), observou-se variação da inclinação da reta de melhor ajuste dos pontos em relação à reta da igualdade perfeita, expressando erro em torno de 11%. Pode-se verificar pela Figura 2B que, para valores de CEes superiores a  $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ , o modelo mostra tendência a subestimá-los, sugerindo que, para valores de CEes elevados, passa a ocorrer a inferência de outros íons com intensidade maior. Por fim, pode-se dizer que, nas cinco equações desenvolvidas, as simulações da CEes apresentaram valores bem próximos daqueles observados em laboratório, indicando que os íons selecionados como variáveis independentes mostraram alta correlação com a CEes.

## CONCLUSÕES

O emprego da regressão linear múltipla permitiu conhecer a influência dos íons pesquisados nos valores da CEes. Por meio dos modelos estatísticos, observou-se que, em Quixeré, o íon  $\text{Cl}^-$  exerce maior influência nos valores da CEes, seguido dos íons  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , exceto para a camada de 30-60 cm, em que o íon  $\text{Na}^+$  aparece após o  $\text{Cl}^-$ . Já para o DIJA, o íon  $\text{Cl}^-$  apresentou peso maior para a camada 0-30 cm, seguido de  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , e, na camada 30-60 cm, o íon mais influente foi o  $\text{Na}^+$ , seguido do  $\text{Cl}^-$ .

Os valores simulados pelos modelos desenvolvidos neste estudo, para as diversas camadas de ambas as áreas, apresentaram valores bem próximos dos observados, o que indica boa acuracidade de cada um dos modelos.

Os modelos ajustados para a área de Quixeré apresentaram melhores simulações, pois o desvio da inclinação da reta em relação à linha 1:1 foi inferior a 4%, e a interseção da reta com o eixo das ordenadas ocorre a menos de 5 centésimos de  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  da origem.

## REFERÊNCIAS

CRUZ, M.G.M. *Avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas do distrito de irrigação Jaguaribe-Apodi*. 2001. 66 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C. de; OLIVEIRA, M. de. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.5, n.1, p.55-9, 2001.

MILTON, J.S. *Statistical methods in the biological and health sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Washington: Library of Congress, 1992. 156 p.

NUNES FILHO, J.; SOUSA, R. de; SÁ, V.A. de L.; LIMA, B.P. Relações entre a concentração de águas subterrâneas e superficiais, visando à irrigação, no sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.2, p.189-93, 2000.

QUEIROZ, J.H.; GONÇALVES, A.C.; SOUTO, J.S.; FOLEGATTI, M.V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. de (Ed.). *Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada*. Campina Grande: UFPB, 1997. p.69-111.

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

RHOADES, J.D; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. *Uso de águas salinas para produção agrícola*. Campina Grande: UFPB, 2001. 117 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 48).

SILVA FILHO, S.B.; CAVALCANTE, L.F.; OLIVEIRA, F.A ; LIMA, E.M; COSTA, J.R.M. Monitoramento da qualidade da água e acúmulo de sais no solo pela irrigação. *Irriga*, Botucatu, v.5, n.2, p.112-25, 2000.

SILVA JÚNIOR, L.G.A.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F. Composição química de águas do cristalino do Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.3, n.1, p.11-17, 1999.