



## Modelagem da estrutura iônica das águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará, Brasil usando regressão linear múltipla

### *Ionic structure modeling of surface water from reservoirs in Metropolitan basin of Ceará State, Brazil using multiple linear regression*

**José Ribeiro de Araújo Neto<sup>\*1</sup>, Maria Monaliza de Sales<sup>2</sup>, Ana Célia Maia Meireles<sup>3</sup>, Helba Araújo de Queiroz Palácio<sup>4</sup>, Luiz Carlos Guerreiro Chaves<sup>5</sup>**

**Resumo** - Este trabalho foi realizado com o objetivo de desenvolver e validar modelos de regressão múltipla em que a condutividade elétrica das águas superficiais de reservatórios na bacia Metropolitana do Ceará, pudesse ser estimada com base na concentração de cada íon pesquisado, determinando, assim, a ordem de influência dos íons nos valores da CE, isso para cada grupo formado a partir de uma análise multivariada de agrupamento hierárquico - AAH. Os dados utilizados foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará e contemplam o período de 1998/2009, com um total de 290 amostras de 7 reservatórios. As características avaliadas foram: Condutividade elétrica da água (CE), Sódio ( $\text{Na}^+$ ), Cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) e Bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Os resultados mostram que a AAH deu origem a dois grupos distintos, sendo que os valores de todas variáveis estudadas do grupo 2 apresentaram-se sempre com maiores médias em relação aos valores do grupo 1, mostrando que, os açudes que compõem esse grupo (Castro e Pompeu Sobrinho) apresentam maiores nível de salinidade na bacia Metropolitana. O cloreto se fez presente nos dois modelos desenvolvidos, sendo o principal íon responsável pela composição iônica da CE. Os modelos estatísticos desenvolvidos apresentaram valores simulados bem próximos dos observados, o que indica boa acuracidade de tais modelos. Pelos índices aplicados, os modelos calibrados e validados apresentaram boa precisão, com índices de confianças (c) superiores a 0,71; e índices de Willmott (id) maiores que 0,85; indicando bom desempenho dos modelos.

**Palavras-chave** - Irrigação. Salinidade da Água. Composição Iônica. Estatística Multivariada. Semiárido.

**Abstract** - The main goal of this work was to develop and validate multiple regression models to estimate the electrical conductivity of the surface water reservoir in the basin Metropolitan Ceará State, based on the concentration of the each investigated ion. The influence of ions on the values of EC formed by each group from a hierarchical cluster analysis – HCA was determined. The data were provided by the Company of Water Resources Management of Ceará and cover the period of 1998/2009. A total of 290 samples from seven reservoirs were used. The parameters evaluated were: Electrical conductivity of water (EC), Sodium ( $\text{Na}^+$ ), calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ), magnesium ( $\text{Mg}^{+2}$ ), chloride ( $\text{Cl}^-$ ) and bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ). The results showed that the HCA formed two distinct groups and the values of all parameters studied in the group 2 always presented with average highest than the group 1. The reservoirs in the group 1 (Castro and Pompeu Sobrinho) have the highest level of salinity in the Metropolitan basin. Chloride was present in the both models developed and it was the main ion responsible for the ionic composition of the EC. The statistical models developed had simulated values very close to those observed and this indicates a good accuracy of the models. According to the indices applied, calibrated and validated models showed good accuracy with indices Trusts (c) greater than 0.71, and with the indexes Willmott (id) greater than 0.85. This fact show a good performance of the models applied in this work.

**Key words** - Irrigation. Water salinity. Ionic Composition. Multivariate Statistics. Semiarid.

\*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 27/08/2013 e aprovado em 04/04/2014.

<sup>1</sup>Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC; Técnico no Laboratório de Água, Solos e Tecidos Vegetais - LABAS do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu, juniorifcelabas@gmail.com

<sup>2</sup>Graduanda do curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus Iguatu, monnallysa2011@hotmail.com

<sup>3</sup>Bolsista PNPd/CAPES pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC, ameireles2003@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC; Prof. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu, helbaraujo23@yahoo.com.br

<sup>5</sup>Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC, luizcarlosguerreiro@gmail.com

## Introdução

O Semiárido brasileiro, com área de 969.589,4 km<sup>2</sup> e população de cerca de 22 milhões de habitantes, é um dos maiores e mais densamente habitados do mundo (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2010). A região caracteriza-se, ambientalmente, por apresentar elevada incerteza de como, onde e quando os eventos pluviométricos ocorreram (ANDRADE *et al.*, 2010b). A escassez de água decorrente da pouca incidência de chuvas, aliada a ocorrência de altas taxas de evaporação, é responsável pela intermitência de quase toda a rede hidrográfica, com os cursos apresentando vazão mínima igual a zero em torno de 9 a 10 meses do ano. Este fato representa um severo problema para a captação e armazenamento de água nesta região. Portanto, milhares de reservatórios foram construídos na região do semiárido brasileiro com a finalidade de armazenar água para múltiplos usos e perenização dos rios durante, principalmente, os períodos de estiagem (PALÁCIO *et al.*, 2011).

Embora os açudes contribuam significativamente para o abastecimento hídrico, essa região se depara com um novo problema: a qualidade das águas em muitos reservatórios não é adequada para os múltiplos usos. O conceito de qualidade da água refere-se às suas características que podem afetar sua adaptabilidade para uso específico, em outras palavras, a relação entre a qualidade da água e as necessidades do usuário. A qualidade da água define-se por uma ou mais características físicas, químicas ou biológicas. Preferências pessoais, como o sabor, podem também constituir simples avaliação de aceitabilidade, porém na avaliação da qualidade da água para irrigação leva-se em consideração, principalmente, as características químicas e físicas (AYERS; WESTCOT, 1999).

O conhecimento da composição iônica da água é primordial quando se deseja avaliar a sua qualidade para fins agronômicos e, mais especificamente, para uso na irrigação (MAIA *et al.*, 2001; FROTA JUNIOR *et al.*, 2007; BARROSO *et al.*, 2011). Segundo Ayers e Westcot (1999) a salinidade, definida como a medida da quantidade de sais existentes em massas de água naturais, é um dos principais problemas de qualidade de água quando se trata do uso para irrigação, pois o excesso de sais solúveis no solo e na água reduz a disponibilidade da água para as plantas. A variável mais empregada para se avaliar a salinidade, é a condutividade elétrica (CE) a qual corresponde à medida da capacidade dos íons presentes na água conduzir eletricidade e cresce proporcionalmente ao aumento da concentração de sais.

Atualmente, vários pesquisadores vêm empregando com sucesso análise de regressão linear múltipla na

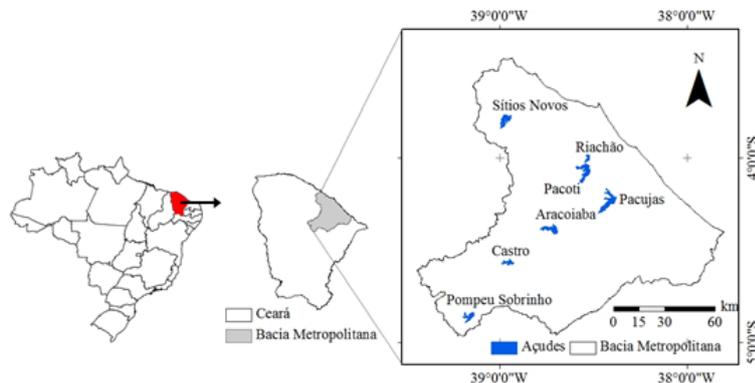
determinação da composição iônica da água, ou seja, teor e proporção de sais presentes na solução e a contribuição de cada íon na condutividade elétrica (MAIA *et al.*, 2001; BATISTA *et al.*, 2006; RODRIGUES *et al.*, 2007; ARRAES *et al.*, 2009). O conhecimento das variáveis de maior peso permite identificar os elementos que determinam a maior ou menor alteração da condutividade elétrica da água (ARRAES *et al.*, 2009).

Nesse contexto, objetivou-se com o presente trabalho desenvolver e validar modelos de regressão linear múltipla em que a condutividade elétrica das águas superficiais de reservatórios na bacia Metropolitana do Ceará, possa ser estimada com base na concentração de cada íon pesquisado, determinando, assim, a ordem de influência dos íons nos valores da CE, isso para cada grupo formado a partir de uma análise multivariada de agrupamento hierárquico.

## Material e Métodos

O estudo foi realizado na bacia Metropolitana do Estado do Ceará, localizado na região norte do Estado. A Figura 1 e a Tabela 1 ilustram a área do levantamento, destacando os sete reservatórios estudados ao longo da bacia metropolitana do Estado Ceará. A região apresenta grande variabilidade pluviométrica tempo-espacial para os períodos diário, mensal, estacional e anual. Na porção ocidental da região, as condições climáticas são mais secas, a precipitação média oscila em torno de 700 a 1.200 mm, com temperaturas mais elevadas, em torno de 33°C a 34°C média das máximas. Uma das principais características do clima regional diz respeito à favorável insolação, o número médio de horas de insolação na área, está entre 1.903,4 horas/ano em Guaramiranga e 2.694,3 horas/ano em Fortaleza (FUNCEME, 2002).

A Bacia Metropolitana engloba três grandes domínios distintos. O primeiro, mais antigo, é composto pelas rochas cristalinas, o segundo grande domínio é formado pelas rochas sedimentares que compõem o Grupo Barreiras e o terceiro domínio é constituído pelos sedimentos eólicos litorâneos, que constituem as dunas. Cabe mencionar ainda a presença, ao longo das planícies dos grandes rios como o Choró, Pacoti, Ceará e Pirangi, dos sedimentos aluviais recentes, localmente coluviais (FUNCEME, 2002). Os principais tipos de solos encontrados na bacia Metropolitana são: Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, Bruno Não Cálcico, Planossolo Solódico, Solonetz Solodizado, Solonchak, Vertissolos, Solos Litólicos, Regossolos Eutróficos e Distróficos, Areias Quartzosas Distróficas e Solos Aluviais (FUNCEME, 2002).



**Figura 1** - Localização dos reservatórios na bacia Metropolitana do Ceará, Brasil

**Tabela 1** – Características dos reservatórios estudados na Bacia Metropolitana do Ceará

Reservatório	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Localização	Coordenadas	Altitude (m)	Precipitação Anual (mm)	T <sub>min</sub> - T <sub>max</sub> (°C)
Pacajus	240 milhões	Pacajus e Chorozinho	E: 562.948 N: 9.531.995	100	1.057	22 - 34
Pacoti	370 milhões	Horizonte e Itaitinga	E: 548.283 N: 9.548.002	85	1.137	24 - 32
Sítios Novos	126 milhões	Caucaia	E: 504.706 N: 9.583.427	29	1.216	26 - 29
Aracoiaba	170 milhões	Aracoiaba	E: 529.926 N: 9.515.186	86	1.058	21 - 35
Riachão	46 milhões	Itaitinga	E: 553.073 N: 9.557.737	67	1.216	24 - 32
Castro	64 milhões	Itapiúna	E: 504.160 N: 9.495.633	132	805	21 - 35
Pompeu Sobrinho	143 milhões	Choró	E: 484.328 N: 9.465.204	228	748	21 - 36

O trabalho foi desenvolvido utilizando dados provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) disponibilizados ao Instituto Nacional Científico Tecnológico em Salinidade/ UFC - INCTSal. O monitoramento foi realizado entre os anos de 1998 a 2009, totalizando 290 amostras. As variáveis avaliadas foram: Condutividade elétrica da água (CE) medida por meio de condutivímetro portátil, Sódio (Na<sup>+</sup>) determinado utilizando o fotômetro de chama, Cálcio (Ca<sup>+2</sup>) e Magnésio (Mg<sup>+2</sup>) pelo método titulométrico - EDTA, Cloreto (Cl<sup>-</sup>) pelo método titulométrico - Nitrato de Prata e Bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) pelo método titulométrico - Ácido/Básico. Todas as análises de água foram realizadas conforme metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2005).

A semelhança na salinidade das águas entre os açudes do estado do Ceará foi estimada pelo emprego da técnica de análise multivariada, análise de agrupamento hierárquico (AAH), processada no software SPSS 16.0. As amostras de água foram agrupadas com base no seu grau de semelhança definida pela variação entre os coeficientes de agrupamento de dois grupos consecutivos como em estudos realizados por Palácio *et al.* (2011). Como as variáveis classificatórias adotadas neste estudo são variáveis reais e, portanto, mensuradas em uma escala de intervalo, adotou-se a combinação da distância Euclidiana ao quadrado para a formação da matriz de similaridade e o algoritmo do método de ligação Ward (método da variância mínima) (PALÁCIO *et al.*, 2011).

Os dados médios de cada variável analisada dos respectivos grupos formados foram submetidos à análise de teste de média e confrontados pelo teste “t” ao nível de significância de 1%, através do programa SPSS 16.0 for Windows.

Após formados os grupos na AAH, foi aplicado a técnica de estatística multivariada regressão múltipla para definir os íons que apresentavam maior correlação com a CE em cada grupo. O presente trabalho foi composto por duas etapas, uma primeira, com resultado das análises referentes aos íons ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) e a CE (condutividade elétrica da água), no período de 1998 a 2005, calibraram-se para cada grupo as equações de regressões múltipla. Utilizou-se a seleção por etapa, em que a variável dependente foi a condutividade elétrica (CE) e as variáveis independentes a concentração dos íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Esta mesma metodologia foi empregada por Maia *et al.* (2001) em águas subterrâneas da Chapada do Apodi, por Batista *et al.* (2006) em águas superficiais na bacia do Acaraú - Ceará e por Arraes *et al.* (2009) na bacia do Curu - Ceará. O nível de significância adotado na seleção das variáveis foi de 5% ( $p < 0,05$ ).

A equação calibrada (Equação 1) tem a seguinte forma:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + \dots + e_i \quad (1)$$

Onde: Y – expressa a condutividade elétrica (variável dependente);  $X_i$  – concentração do íon (variável independente);  $a_0$  – constante de regressão;  $a_1$ ;  $a_2$ ;  $a_3$ ;... - coeficientes das variáveis incluídas no modelo;  $e$ ,  $e_i$  – erro.

A validação do modelo de cada grupo foi efetuada empregando-se a outra parte dos dados coletados, entre 2006 e 2009. Seguiu-se esse procedimento para eliminar o risco de auto-correlação, uma vez que o modelo foi validado com dados não empregados na sua calibração, conforme metodologia empregada por Batista *et al.* (2006) e Arraes *et al.* (2009).

Para se avaliar o desempenho das equações de regressão, a qual compunha a segunda fase da modelagem, foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (R), o qual indica a dispersão dos dados em relação à média (precisão) e índice de Willmott (id) que indica o grau de exatidão do modelo, ou seja, de quanto os valores estimados se aproximam dos observados. Por último empregou-se o índice de confiança ou desempenho (c), o qual é o produto do coeficiente de correlação com o índice de Willmott ( $c = R * id$ ), em que  $c = 1$  significa confiança perfeita e  $c = 0$  considerado péssimo (Tabela 2), conforme proposto por Camargo e Sentelha (1987).

**Tabela 2** - Valores do coeficiente de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de “c”	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
≤ 0,30	Péssimo

## Resultados e Discussão

### Análise de Agrupamento Hierárquico - AAH

A semelhança entre os reservatórios foram determinados pelo a técnica de análise multivariada/ análise de agrupamento hierárquico (AAH). Os valores médios, o desvio padrão e os valores máximos e mínimos dos atributos indicadores da salinidade das águas de cada grupo da bacia metropolitana do Ceará, podem ser vistos na Tabela 3. Observa-se que há, entre os dois grupos formados, uma diferença estatística significativa ao nível de 1% de significância entre todas as variáveis estudadas CE,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Os valores do grupo 2 apresentaram-se sempre com maiores médias em relação aos valores do grupo 1 para todas as variáveis, mostrando que, os açudes que compõem esse grupo (Castro e Pompeu Sobrinho) apresentam maiores nível de salinidade na bacia metropolitana.

O dendrograma observado na Figura 2 evidencia que o ponto ótimo de corte da distância reescalada de combinação se encontra entre 1,3 e 8,0 a qual é determinada um distanciamento maior na medida de similaridade para a formação de agrupamentos posteriores. Para efeito de “corte” do dendrograma e assim se definir o número de grupos, optou-se por efetuá-lo na distância reescalada de valor 7,5, dando origem a dois grupos distintos. O grupo 1 formou-se com os reservatórios Pacoti, Riachão, Sítios Novos, Aracoiaba e Pacajus, já o grupo 2 foi formado com os reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho.

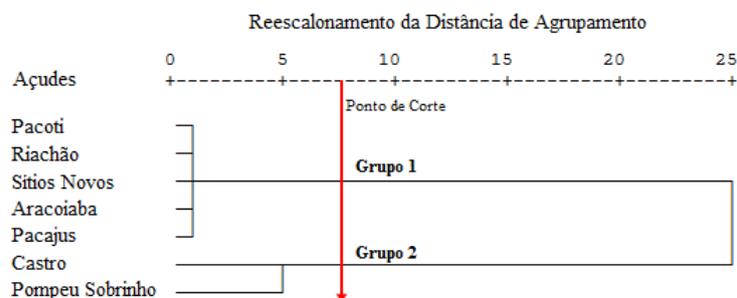
### Grupo 1

O grupo 1 foi formado pela similaridade existente entre os reservatórios que apresentaram as menores concentrações médias entre as variáveis estudadas. Todos os atributos: CE,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{HCO}_3^-$  desse grupo diferiram estatisticamente a um nível de 1% de significância do grupo 2. Este grupo apresentou durante o período de estudo valor médio de CE = 0,54 dS  $\text{m}^{-1}$  que

**Tabela 3** - Valores médios das variáveis em estudo para os grupos da salinidade das águas dos reservatórios da bacia metropolitana, definidos pela técnica da AAH

Variáveis	Estatística	Grupo 1	Grupo 2
CE (dS m <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	0,54 ± 0,18	1,18 ± 0,54
	Mínimo	0,23	a 0,58 b
	Máximo	1,71	3,74
Cl <sup>-</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	4,03 ± 1,68	10,32 ± 4,71
	Mínimo	0,84	a 4,56 b
	Máximo	18,6	32,4
Na <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	3,01 ± 1,45	6,64 ± 3,51
	Mínimo	0,4	a 2,96 b
	Máximo	17,11	21,79
Ca <sup>+2</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	0,93 ± 0,32	2,10 ± 0,55
	Mínimo	0,2	a 0,64 b
	Máximo	1,93	4,48
Mg <sup>+2</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	1,53 ± 0,56	3,88 ± 1,73
	Mínimo	0,26	a 1,7 b
	Máximo	3,31	12,33
HCO <sup>3-</sup> (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> )	Média ± D. P.	1,31 ± 0,31	1,94 ± 0,42
	Mínimo	0,66	a 0,84 b
	Máximo	2,83	3,1

\* Médias seguidas de letra minúscula diferente diferem entre si na coluna pelo teste “t”, a nível de 1% de significância; n=?



**Figura 2** - Dendrograma dos açúdes do Ceará agrupados quanto à salinidade das águas.

indica baixos teores de sais dissolvidos, sem restrição de uso na irrigação e adequada para múltiplos usos, abastecimento doméstico e industrial e dessedentação animal. Resultados semelhantes foram encontrados por Barroso *et al.* (2011), que estudando a qualidade das águas superficiais do município de Jucás na região Centro Sul, no estado do Ceará, observou valor médio de CE = 0,58 dS m<sup>-1</sup>.

Os íons Na<sup>+</sup> e o Cl<sup>-</sup> apresentaram valores médios de 3,01 mmol<sub>c</sub>.L<sup>-1</sup> e 4,03 mmol<sub>c</sub>.L<sup>-1</sup> respectivamente.

Apesar das menores salinidades para este grupo, diferindo estatisticamente a 1% do grupo 2 que apresentou os maiores teores de sais, as concentrações dos íons Na<sup>+</sup> e o Cl<sup>-</sup> encontram-se acima do limite estabelecido para uso na irrigação com moderado risco de toxicidade às plantas (AYRES; WESTCOT, 1999). De acordo com Silva Júnior *et al.* (2000) as águas do cristalino do Nordeste brasileiro classificam-se, na sua maioria, como cloretadas sódicas com alguma variação, de acordo com a litologia do local de origem. Podendo, no caso da bacia Metropolitana do Ceará, essas altas concentrações de Cl<sup>-</sup> e Na<sup>+</sup> estarem

relacionadas a formação geológica composta em partes por rochas cristalinas. No entanto, outra forte influência para essas águas apresentarem altas concentrações dos íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  na bacia deve-se em decorrência da ação antrópica como deposição de esgotos domésticos e a lavagem de roupas presente nesta bacia, concordando com assertiva verificada por Frota Junior *et al.* (2007). Por se tratar de uma bacia litorânea, não se deve descartar, também, a influência da proximidade do mar e dos aerossóis marinhos, pois a água da chuva apresenta o íon  $\text{Cl}^-$  como o elemento mais abundante, seguido do  $\text{Na}^+$  (MEIRELES *et al.*, 2007).

O íon  $\text{Ca}^{+2}$  apresentou para esse grupo valores variando entre 0,20 e 1,93  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  com média de 0,93  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  e o  $\text{Mg}^{+2}$  apresentou concentrações variando entre 0,26 e 3,31  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  com média de 1,53  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ . Esses valores se encontram abaixo do limite de 5  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  para  $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}$  estabelecido por Ayres e Westcot (1999).

Para o íon  $\text{HCO}_3^-$  o valor médio apresentado no grupo 1 foi de 1,31  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ . Essa concentração, por sua vez, não é preocupante, pois, de acordo com Ayers e Westcot (1999), valores inferiores a 1,5  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  expressam águas com baixo grau de restrição para uso na agricultura irrigada. Resultados semelhantes foram observados por Palácio *et al.* (2011), que encontrou valor médio de  $\text{HCO}_3^- = 1,32 \text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  para o primeiro grupo em sua AAH.

## Grupo 2

O grupo 2 constituído apenas pelos açudes Castro e Pompeu Sobrinho, teve como fator determinante para a formação, os maiores valores médios de todos os indicadores analisados nesse estudo. De acordo com Palácio *et al.* (2011), as elevadas concentrações de sais podem ser relacionadas ao fato de o reservatório Pompeu Sobrinho passar longos períodos sem renovações de água e com isso o acúmulo de sais devido a evaporação, e ainda a condições antrópicas advindas da cidade Itapiúna ao reservatório Castro aliados a águas novas das primeiras coletas deste reservatório, pouco depois da sua conclusão que foi em 1997.

A CE para este grupo apresentou valor médio de 1,18  $\text{dSm}^{-1}$ , sendo superior ao limite para irrigação que é 0,7  $\text{dSm}^{-1}$  (AYERS; WESTCOT, 1999), este comportamento é justificado pelo o alto valores dos íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Na}^+$ . O íon  $\text{Na}^+$  apresentou valor médio de 6,64  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , superior ao limite para irrigação, e o dobro da média do grupo 1, podendo causar risco moderado de toxidez nas plantas. De modo específico o sódio apresentou para o grupo 2, grande variações de valores, com mínimo de 2,96  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  e máximo 21,79  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , este último apresentando risco severo de toxidez em plantas. Os sintomas típicos

de toxidez das plantas pelo sódio aparecem na forma de necrose na borda das folhas, as concentrações de sódio nas folhas alcançam níveis tóxicos depois de vários dias ou semanas (AYERS; WESTCOT, 1999).

Os valores de  $\text{Cl}^-$  mostraram-se muito elevados para o grupo 2 quanto o risco de toxidez nas plantas, principalmente quando comparado com o grupo 1, variando entre 4,56 e 32,4  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , com média de 10,32  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  o triplo do valor aceitável de 3  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , classificando como severo risco. Altas concentrações de cloreto também foram observadas por Andrade *et al.* (2010a). Já o íon  $\text{Mg}^{+2}$  de modo geral também apresenta o mesmo comportamento dos demais íons, com valor médio 3,88  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ , acima do limite e o dobro do valor médio do grupo 1.

O  $\text{HCO}_3^-$  e o  $\text{Ca}^{+2}$  apresentaram-se ambos com valores altos, com valores médios de 1,94  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  e 2,10  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  respectivamente, sendo o  $\text{HCO}_3^-$  apresentando valor superior ao limite máximo e o  $\text{Ca}^{+2}$  abaixo do limite que segundo Ayers e Westcot (1999) são de 1,5  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  e 20  $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$  respectivamente. Estas concentrações devem estar associadas a existência de solos sedimentares e ocorrência de carregamentos de moléculas de  $(\text{CaCO}_3)$ . Ainda de acordo com Ayers e Westcot (1999), quando são utilizadas águas para irrigação com elevados teores de bicarbonatos pode ocorrer precipitação de cálcio, na forma de carbonato de cálcio, o que pode ocasionar incrustações em tubulações de irrigação (ARRAES *et al.*, 2009). Moura *et al.* (2011) avaliando a qualidade da água para uso em irrigação na microbacia do córrego do cinturão verde, município de ilha solteira, também encontrou valores de cálcio enquadrados ao limite para irrigação, não apresentando problemas aos sistema de irrigação.

## Calibração dos Modelos

Os modelos de regressão linear para os grupos formados na AAH para o conjunto de bacias hidrográficas da região Metropolitana do Estado do Ceará, desenvolvido entre os valores da CE e dos íons analisados estão presentes na Tabela 4. Vale salientar a importância de dois modelos considerando os grupos formados na AAH, pois o grupo 1 aplica-se para a estimativa da CE dentro do limite de aplicação  $0,23 \text{dS m}^{-1} \leq \text{CE} \leq 1,71 \text{dS m}^{-1}$ , já quanto desejar estimar a CE das águas superficiais da bacia Metropolitana para valores superiores a 1,71  $\text{dS m}^{-1}$ , pode-se utilizar a equação do grupo 2 que apresenta limite de aplicação  $0,58 \text{dS m}^{-1} \leq \text{CE} \leq 3,74 \text{dS m}^{-1}$ . Verifica-se que para as águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará, os íons que apresentaram maior expressão para determinação da CE foram:  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Ca}^{+2}$  para ambos os grupos e também  $\text{Na}^+$  para o grupo 1. Os íons  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{HCO}_3^-$  apresentaram-se fora do modelo devido a suas baixas sensibilidades na variação

da CE. A dependência entre a CE e os íons selecionados pode ser estimada com elevado grau de confiabilidade, baseado não somente nos coeficientes de determinação  $R^2$ , mas também nos valores de F (Tabela 4). De acordo com os valores dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das equações desenvolvidas, pode-se afirmar, que a correlação entre as variáveis independentes e a dependente é de forte ( $R^2 > 0,81$ ) pela escala de Pearson.

Os modelos desenvolvidos para os grupos ajustaram-se aos dados com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,888 e 0,910 para respectivamente os grupos 1 e 2, mostrando que próximo de 90% das variabilidades da CE das águas podem ser explicadas pelo modelo. Para a bacia Metropolitana, a equação mostrou-se altamente significativas, com o valor de F igual 280,47 e 351,26 para os grupos 1 e 2, respectivamente. Estes valores assemelham-se aos resultados encontrados por Batista *et al.* (2006) no desenvolvimento dos modelos para as águas superficiais das partes alta e baixa da bacia do Acaraú - Ceará e também por Arraes *et al.* (2009), para modelos desenvolvidos para as partes alta e baixa da bacia do Curu - Ceará.

A correlação entre CE e os íons foi classificada como forte, uma vez que as equações obtidas foram significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Portanto, a hipótese de nulidade foi rejeitada (intervalo = 0) e os íons podem ser utilizados com segurança na estimativa da CE. Resultados semelhantes foram observados por Rodrigues *et al.* (2007) e Arraes *et al.* (2009).

No intuito de assegurar as informações geradas pela análise de regressão, realizou-se o teste do nível de significância das variáveis presentes no modelo proposto (Tabela 5). Verifica-se que os elementos de maior expressão para a determinação da CE, tendo por base o maior teste t ao nível de 5% de significância, encontram-se na seguinte ordem:  $Cl^- > Ca^{2+} > Na^+$  para o grupo 1 e  $Cl^- > Ca^{2+}$  para o grupo 2. De acordo com o modelo, pode-se observar para ambos os grupos em estudo o teor do íon  $Cl^-$  foi o parâmetro de maior expressão para a determinação da CE das águas.

A maior sensibilidade da bacia para o íon  $Cl^-$  se deve, provavelmente, estar relacionada a formação geológica composta em partes por rochas cristalinas, e ainda à ação antrópica como deposição de esgotos domésticos e a lavagem de roupas presente nesta bacia. De acordo com trabalhos de Mendiguchía *et al.* (2004) e Afonseca *et al.* (2005), o  $Cl^-$  é um bom indicador de poluição urbana, uma vez que o mesmo está presente em detergentes e sabões que são despejados através dos esgotos.

Em estudos realizados por Silva Júnior *et al.* (2000) as águas do cristalino do Nordeste brasileiro classificam-se, na sua maioria, como cloretadas sódicas com alguma variação, de acordo com a litologia do local de origem. No caso da bacia Metropolitana, assim como as águas do cristalino do Nordeste brasileiro, sofre influência da formação geológica cristalina, sendo a influência antrópica para adição de  $Cl^-$  um fator relevante. Por se tratar de uma bacia litorânea, não se deve descartar, também, a influência

**Tabela 4** - Regressão linear, coeficiente R e valores do teste F para a bacia Metropolitana.

Local	Equação	$R^2$	F	Sig.	Limites de Aplicação
Grupo 1	$CE = 0,07844 + 0,07236 Cl^- + 0,08246 Ca^{+2} + 0,04115 Na^+$	0,888	280,47	0,000	$0,23 \leq CE \leq 1,71$
Grupo 2	$CE = - 0,23176 + 0,08947 Cl^- + 0,025598 Ca^{+2}$	0,910	351,26	0,000	$0,58 \leq CE \leq 3,74$

CE = condutividade elétrica em  $dS m^{-1}$ ; e,  $Cl^-$ ,  $Ca^{+2}$  e  $Na^+$  em  $mmol L^{-1}$ .

**Tabela 5** - Análise de significância das variáveis da regressão

Local	Variáveis	Sig. (%)	t	Intervalo
Grupo 1	$Cl^-$	0,000	7,174	0,052 - 0,092
	$Ca^{2+}$	0,001	3,391	0,034 - 0,131
	$Na^+$	0,003	3,008	0,014 - 0,068
	Constante	0,000	4,338	0,043 - 0,114
Grupo 2	$Cl^-$	0,000	12,600	0,075 - 0,104
	$Ca^{2+}$	0,001	3,818	0,119 - 0,393
	Constante	0,028	-2,315	(-0,437) - (-0,027)

da proximidade do mar e dos aerossóis marinhos, pois a água da chuva apresenta o íon cloreto como o elemento mais abundante, seguido do sódio (QUEIROZ, 2000; MEIRELES *et al.* 2007). Além de ser o íon de maior expressão para determinação da CE em ambos os grupos 1 e 2, o cloreto também apresentou as maiores concentrações durante o período de estudo, com valor médio de 4,03  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para o grupo 1 e 10,32  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para o grupo 2 (Tabela 3). Este íon passa a apresentar limitações de uso para irrigação por aspersão quando sua concentração for superior a 3,00  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  e para irrigação por superfície superior a 4,00  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  (AYRES; WESTCOT, 1999).

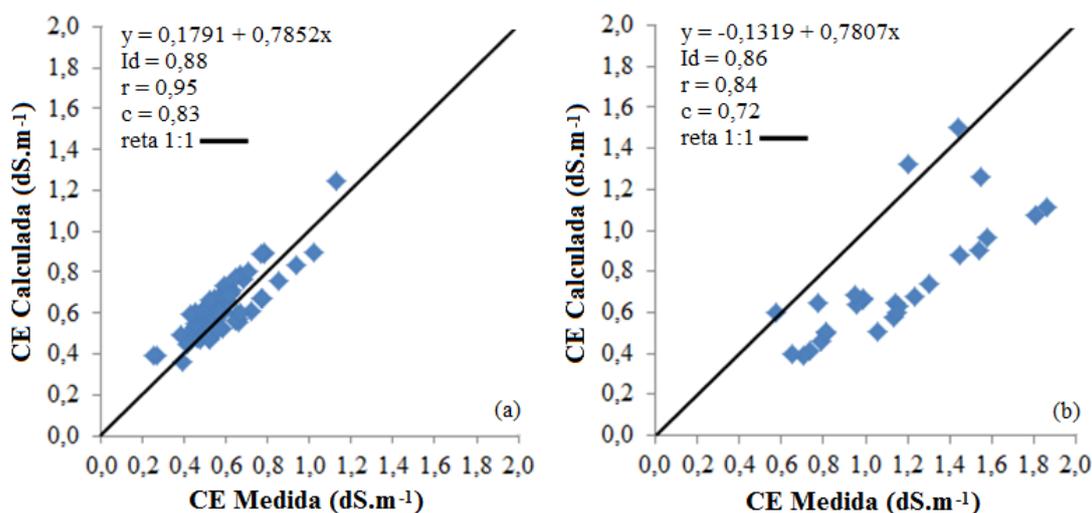
Após o íon  $\text{Cl}^-$ , o  $\text{Ca}^{2+}$  apresentou maior sensibilidade na determinação da CE para as águas superficiais da bacia Metropolitana, apesar da baixa solubilidade desse elemento. Acredita-se que, tal fato seja em decorrência da precipitação dos íons de  $\text{Ca}^{2+}$  na forma de carbonatos ( $\text{CO}_3$ ). No entanto, a avaliação correta das perdas de salinidade por efeito da precipitação ainda é bastante discutível. A presença do  $\text{Ca}^{2+}$  pode ainda reforçar a influência dos aerossóis marinhos, visto que este é o quarto elemento mais abundante nas águas das chuvas. De acordo com estudos realizados por Souza *et al.* (2002), avaliando a origem dos sais nas águas subterrâneas de Fortaleza, as águas estudadas são predominantemente cloretadas sódicas, com o cloreto apresentando concentrações mais elevadas do que as do sódio. Isto indica que o cloreto também está associado ao magnésio e ao cálcio decorrentes da presença de aerossóis marinhos.

Apesar do íon  $\text{Ca}^{2+}$  apresentar maiores expressões para a determinação da CE do que o  $\text{Na}^+$  em ambos os grupos, sua concentração média de 0,93  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para

o grupo 1 e 2,10  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para o grupo 2, apresentou-se inferior a concentração média do íon sódio que foi de 3,01  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para o grupo 1 e 6,64  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$  para o grupo 2 (Tabela 3). Segundo Ayres e Westcot (1999), os valores admissíveis de  $\text{Na}^+$  nas águas sem restrição de uso para irrigação é de até 3  $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$ . Uma fonte de influência para as elevadas concentrações de  $\text{Na}^+$  nas águas da bacia pode estar relacionada à existência de lixões localizados na região de drenagem dos principais afluentes, concordando com resultados verificados por Arraes *et al.* (2009) que observou altos valores de sódio em decorrência de lixões na bacia do Curu. De acordo com resultados encontrados por Magalhães *et al.* (2002), em estudo sobre a qualidade das águas do rio Bodocongô-PB, as concentrações do teor de sódio aumentaram na proximidade dos centros urbanos. Outra influência para as maiores concentrações de sódio deve estar ligada aos aerossóis marinhos que apresentam o sódio como segundo elemento mais abundante (QUEIROZ, 2000).

### Validação dos Modelos

Os valores da condutividade elétrica, obtidos em laboratório e aqueles estimados pelos modelos, estão apresentados na Figura 3a para o grupo 1 e Figura 3b para o grupo 2. Observa-se que os valores estimados da CE apresentam-se próximos daqueles determinados em laboratório, indicando que os íons selecionados como variáveis independentes mostram uma alta correlação com a CE. Observa-se que a reta ajustada está bem próxima da reta 1:1, tanto para os menores como para os maiores valores da CE. Pelos índices aplicados, os modelos desenvolvidos apresentam boa precisão, com coeficiente de correlação (R) e índice de Willmott (id) maior que 0,80, indicando



**Figura 3** - Valores observados e calculados da CE das águas superficiais para: (a) o grupo 1 da AAH e (b) o grupo 2 da AAH.

um bom a muito desempenho do modelo com coeficiente de desempenho  $c = 0,83$  para o grupo 1 e  $c = 0,72$  para o grupo 2. Tais parâmetros demonstram uma boa precisão e acurácia, ou seja, estima valores próximos do real, quer para as maiores quer para as menores concentrações testadas. O modelo apresentado mostra comportamento excelente quanto a linearidade dos dados observados em relação aos calculados ( $R > 0,81$ ), expressando a sensibilidade da CE com as variáveis selecionadas ( $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Na^+$ ), sendo estes determinantes da condição salina das águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará.

## Conclusões

A análise de agrupamento hierárquico - AAH originou dois grupos de reservatórios distintos nas águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará, sendo o grupo 1 composto por reservatórios com baixa salinidade, com todas as variáveis estudadas: CE,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{+2}$  e  $HCO_3^-$  apresentando menores valores e diferindo estatisticamente a um nível de 1% de significância do grupo 2 composto pelos reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho, que apresentaram os maiores nível de salinidade na bacia;

O emprego da regressão linear múltipla permitiu conhecer a influência e a contribuição dos íons para determinação da CE; sendo o íon cloreto, presente nos dois modelos desenvolvidos, o principal íon responsável pela composição iônica da CE, seguido em importância pelo cálcio e por último o sódio somente para o modelo desenvolvido para o grupo 1;

Pelos índices aplicados, os modelos calibrados e validados apresentaram boa precisão, com índices de confiança ( $c$ ) superiores a 0,71; e índices de Willmott ( $id$ ) maiores que 0,85; indicando um bom desempenho dos modelos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará - COGERH, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade - INCTSal, e ao CNPq pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

## Literatura científica citada

AFONSECA, T. G.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; RODRIGUES, J. O. Ação do clima na dinâmica do nitrato e cloreto no lençol freático do DIBA, Ceará. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, João Pessoa. **Anais...** São Paulo: UNIUS, 2005. 1 CD ROM.

ANDRADE, E. A.; AQUINO, D. N.; CRISOSTOMO, L. A.; RODRIGUES, J. O.; CHAVES, L. C. G. Similaridade da composição hidroquímica das águas freáticas do perímetro irrigado do Baixo Acaraú, Ceará, Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 4, n. 1, p. 11-19, 2010a.

ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; PALÁCIO, H. A. Q. O Semiárido cearense e suas águas. In: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. (Ed.). **Semiárido e o manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Fortaleza: Graphiti Gráfica e Editora LTDA., 2010, cap. 3, p. 57-80, 2010b.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; FROTA, J. I. J.; SANTOS, J. C. N. Identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, p. 346-355, 2009.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999, 153p. Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1).

BARROSO, A. A. F.; GOMES, G. E.; LIMA, A. E. O.; PALÁCIO, H. A. Q.; LIMA, C. A. Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 588-593, 2011.

BATISTA, T. M.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, M.; RODRIGUES, J. O. Modelagem da estrutura iônica das águas da bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 37, n. 1, p. 1-6, 2006.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, n. 01, p. 89-97, 1997.

FROTA JUNIOR, J. J.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; BEZERRA, A. M. E.; SOUZA, B. F. S. Influência antrópica na adição de sais no trecho perenizado da bacia hidrográfica do Curu, Ceara. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 02, p. 142-148, 2007.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia Metropolitana**. Fortaleza, v. 01, p. 142, maio, 2002.

MAGALHÃES, F. N.; NUNES, A. B. A.; CEBALHOS, B. S. O.; KONIG, A. Principais impactos nas margens do rio Bodonocó-gó-PB, decorrentes da irrigação com águas poluídas com esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 01, p. 71-75, 2002.

MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; 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. 01, p. 55-59, 2001.

MEIRELES, A. C. M.; FRISCHKORN, H.; ANDRADE, E. M. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no Semiárido cearense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, p. 25-31, 2007.

- MENDIGUCHÍA, C.; MORENO, C.; GALINDO-RIANO, M. D.; GARCÍA-VARGAS, M. Using chemometric tools to assess antropogenic effects in river water a case study: Guadalquivir river (Spain). **Analytica Chimica Acta**, v. 515, n. 01, p. 143-149, 2004.
- MOURA, R. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; LEITE, M. A.; FRANCO, R. A. M.; FEITOSA, D. G.; MACHADO, L. F. Qualidade da água para uso em irrigação na microbacia do córrego do cinturão verde, município de ilha solteira. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 5, n. 1, p. 68-74, 2011.
- PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; CHAVES, L. C. G.; Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.
- QUEIROZ, G. H. **Salinização em açudes no município de Tauá – CE**. 2000. 118 f. Dissertação (Mestrado em Eng<sup>a</sup>. Civil – Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2000.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; TEIXEIRA, A. S. Modelos da concentração iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 38, n. 04, p. 360-365, 2007.
- SILVA JÚNIOR, J. N.; SOUSA, A. R. de; SÁ, V. A. L.; LIMA, B. P. Relações entre a concentração de íons e a salinidade de águas subterrâneas e superficiais visando à irrigação no sertão de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 02, p. 189-193, 2000.
- SOUZA, S. M. C.; SANTIAGO, M. M. F.; SANTIAGO, R. S.; FRISCHKORN, H. A origem dos sais nas águas subterrâneas amostradas em Fortaleza. In: XX ENCONTRO DE FÍSICOS DO NORTE E NORDESTE, Recife, 2002. **Anais...** Recife, CD-ROM.
- STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 21.ed. Washington, DC, EUA: **American Public Health Association (APHA)**, the American Water Works Association (AWWA), and the Water Environment Federation (WEF), 2005.