



Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.8, n°.5, p.354 - 365, 2014
ISSN 1982-7679 (On-line)
Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>
DOI: 10.7127/rbai.v8n500219
Protocolo 219.14 – 11/02/2014 Aprovado em 28/08/2014

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

Maria Monaliza de Sales¹; José Ribeiro de Araújo Neto²; Helba Araújo de Queiroz Palácio³;
Luiz Carlos Guerreiro Chaves²; Francisco Emanuel Firmino Gomes¹

RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da salinidade da água de reservatórios da bacia metropolitana do Ceará, bem como, desenvolver e validar modelos empíricos onde a concentração dos íons cloreto e do sódio, possam ser estimados com base na condutividade elétrica da água (CE). O estudo foi desenvolvido utilizando dados provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará, no período de 1998/2009 no total de 372 amostras em 7 reservatórios da bacia metropolitana. Os parâmetros avaliados foram condutividade elétrica e os teores solúveis dos íons sódio e cloreto. Os valores médios foram submetidos a análise de variância e a comparação das médias pelo teste de Tukey a 5% de significância, para verificação de diferenças estatísticas. Pelos resultados as águas dos reservatórios em estudo exibem riscos de salinidade de moderado a severo. As concentrações de Na⁺ e Cl⁻ dos reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho são extremamente elevadas, tanto em relação à utilização da água na irrigação, como para consumo humano. Pelos índices aplicados, o modelo desenvolvido apresentou um ótimo desempenho permitindo estimar os teores de sódio e o cloreto das águas superficiais com base na condutividade elétrica.

Palavras-chave: qualidade de água, salinidade, modelagem.

SPATIAL VARIATION AND MODELING OF THE SURFACE WATER SALINITY FROM RESERVOIRS IN THE METROPOLITAN BASIN OF THE CEARÁ

ABSTRACT

The main goal of this work was evaluate the special variability of salinity of the surface water in the Metropolitan basin located in the State of Ceará, Brazil. It proposes to develop and validate empirical models when the concentration of chloride and sodium ions can be

¹ Graduando(a) do curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - *Campus* Iguatu – CE. E-mails: monnallysa2011@hotmail.com, emanoelfg@hotmail.com;

² Doutorando em Engenharia Agrícola/Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido, DENA/CCA/UFC. juniorifcelabas@gmail.com, luizcarlosguerreiro@gmail.com;

³ Doutorado em Agronomia, DENA/CCA/UFC, Prof. do IFCE, *Campus* Iguatu. helbaraujo23@yahoo.com.br;

stimated using the electrical conductivity of the water (CE). To this study dates sampled by the Water Resources Management Company of Ceará (COGERH) from 1998 to 2009. 372 water samples were shown in seven reservoirs of the Metropolitan basin. Electrical conductivity and soluble levels of sodium and chloride ions were evaluated. To observe the statistical differences methods the Analysis of Variance (ANOVA) and the comparison of means by Tukey test at 5% significance were applied to the mean values of the analyzed parameters. The results showed that the studied waters presented moderated to severe risks of salinity. The total of Na^+ and Cl^- ions to Castro and Pompeu Sobrinho reservoirs are very high in relation to use their water to irrigation and to human consumption. According to index applied in this study the model presented is very good to estimate the sodium and chloride in the surface water using the conductivity electricity of this water.

Keywords: water quality, salinity, modeling

INTRODUÇÃO

Atualmente um dos maiores problemas da população mundial está sendo a qualidade da água disponível para consumo humano e demais usos, sendo a região mais afetada a de clima semiárido, pois há escassez devido ao déficit hídrico, típico desta região. Devido a este grande problema, milhares de reservatórios foram construídos no semiárido do Ceará, com a finalidade principal de armazenar água para múltiplos usos, principalmente, durante os períodos de estiagem (PALÁCIO et al., 2011). Embora os açudes contribuam significativamente para o abastecimento hídrico do Estado, a região se depara com um novo problema: a qualidade da água em muitos reservatórios não é adequada para os múltiplos usos. A água, sujeita à elevada taxa de evaporação características do semiárido, tornam-se salinas, atingindo, em alguns casos, concentrações de sais que impedem o seu uso para consumo humano e agricultura, principalmente no período de estiagem (MEIRELES et al., 2007; PALÁCIO et al., 2011).

Os sais presentes nas águas têm sua origem na intemperização das rochas e dos solos, pela dissolução lenta dos minerais, que são levados pelas águas de irrigação e se

depositam no solo, acumulando à medida que a água evapora ou é consumida pelas culturas (AYERS; WESTCOT, 1999, CAVALCANTE et al., 2012 Outra origem comum é devido à ação antrópica a que são submetidos os cursos hídricos (FROTA JUNIOR et al., 2007). A prática de irrigação é indispensável para a garantia da produção das culturas nas regiões áridas e semiáridas Nordeste (MENDES et al., 2008; SANTOS et al., 2009; FIGUEREDO JÚNIOR et al., 2013), entretanto, a agricultura irrigada resulta em altas concentrações de sais no solo, muitas vezes além da capacidade de tolerância para a maioria das plantas (ARAÚJO NETO et al., 2010).

Os principais problemas de qualidade de água para irrigação estão relacionados com a salinidade uma vez que o excesso de sais solúveis no solo reduz a disponibilidade da água para às plantas, pode de causar sérios problemas de impermeabilização dos solos, além de toxicidade em culturas sensíveis (AYERS; WESTCOT, 1999). Com isso o conhecimento da composição iônica é primordial na avaliação da qualidade da água para fins agrônômicos (ARRAES et al., 2009). Através de alguns parâmetros pode-se verificar possíveis alterações na qualidade, e assim definir as

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

políticas para a utilização destas águas. Esta política funciona como um sensor que possibilita o acompanhamento do processo de uso dos recursos hídricos, apresentando seus efeitos sobre características qualitativas das águas, visando subsidiar as ações de controle ambiental (LEMOS et al., 2010).

O monitoramento da qualidade da água destinada à irrigação, normalmente é feito com a finalidade de identificar e prevenir problemas como à salinidade dos solos, por isso, deve ser considerado como parte de um programa de utilização racional dos recursos hídricos na agricultura (AYERS; WESTCOT, 1999). Os parâmetros físico-químicos que caracterizam a salinidade das águas sofrem grandes variações no tempo e no espaço, havendo a necessidade de programas de monitoramentos sistemático para se obter a estimativa mais provável da variação da qualidade das águas superficiais. Em geral, um programa de monitoramento inclui coletas frequentes nos mesmos pontos de amostragem e análises em laboratório dos parâmetros, resultando em uma matriz de grandes dimensões e complexa interpretação (PALÁCIO et al., 2011).

Diante do exposto o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial da salinidade da água de reservatórios da bacia metropolitana do Ceará, bem como, desenvolver e validar modelos empíricos onde as concentrações dos íons cloreto e sódio, possam ser estimadas com base na condutividade elétrica da água (CE), visto que a mesma pode ser determinada facilmente por condutivímetro portátil.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido utilizando informações provenientes do banco de dados da

Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), no período de 1998/2009 no total de 372 amostras, onde foram monitorados sete reservatórios da bacia metropolitana, sendo eles: Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba, Riachão, Castro e Pompeu Sobrinho (Figura 1) e (Tabela 1).

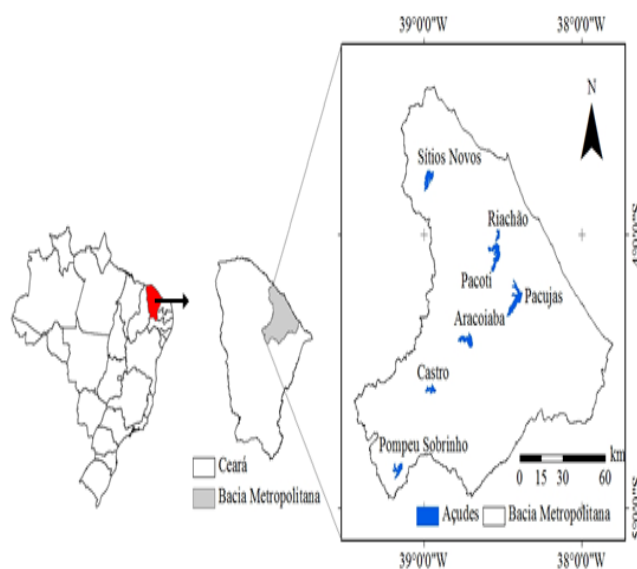


Figura 1. Localização dos reservatórios na bacia Metropolitana do Ceará, Brasil.

Tabela 1. Características dos reservatórios em estudo.

Reservatório	Capacidade (m ³)	Localização	Coordenadas
Pacajus	240 milhões	Pacajus e Chorozinho	E: 562.948 N: 9.531.995
Pacoti	370 milhões	Horizonte e Itaitinga	E: 548.283 N: 9.548.002
Sítios Novos	126 milhões	Caucaia	E: 504.706 N: 9.583.427
Aracoiaba	170 milhões	Aracoiaba	E: 529.926 N: 9.515.186
Riachão	46 milhões	Itaitinga	E: 553.073 N: 9.557.737
Castro	64 milhões	Itapiúna	E: 504.160 N: 9.495.633
Pompeu Sobrinho	143 milhões	Choró	E: 484.328 N: 9.465.204

A temperatura média do ar da bacia Metropolitana varia de 25,7 a 27,34°C em Fortaleza e de 19,2 a 21,2°C em Guaramiranga. Na porção ocidental da região, as condições climáticas são mais secas, a precipitação média

oscila em torno de 900 a 1.200 mm ano⁻¹, com temperaturas mais elevadas, em torno de 33° 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⁻¹ em Guaramiranga e 2.694,3 horas ano⁻¹ em Fortaleza (FUNCEME, 2002). Os ventos predominantes são os Alísios de sudeste que sopram com mais intensidade no período não chuvoso. A compartimentação do relevo é representada pelas unidades geomorfológicas; Planície-litorânea, Tabuleiros pré-litorâneos; Planícies fluviais; Depressão sertaneja e Maciços residuais (FUNCEME, 2002).

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 (INCTSal) - UFC. Os parâmetros avaliados foram: condutividade elétrica (CE) e os íons sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻), sendo o monitoramento realizado entre os anos de 1998 a 2009, totalizando 372 amostras.

As variáveis monitoradas foram submetidas a uma análise de variância (ANOVA), logo após, foi feita a média de cada reservatório e submetidas ao teste de comparação de média de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa SPSS 13.0 (Statistical Package for the Social Sciences).

Posteriormente foi realizada análise da correlação entre os íons estudados e os dados de CE, como também foram gerados modelos de regressão simples. A geração dos modelos dividiu-se em duas fases, uma primeira etapa, com os resultados das análises referentes aos íons cloreto (Cl⁻) e sódio (Na⁺) e a condutividade elétrica (CE), para as coletas entre

1998 e 2003, calibraram-se as equações de regressões linear simples. Na segunda fase foi feita a validação dos modelos empregando-se dados referentes ao período de 2004 a 2009, evitando com isso falhas promovidas pela autocorrelação dos dados. Para se validar o modelo empregaram-se índices estatísticos que correlacionam os valores estimados (gerados a partir do modelo) com valores das concentrações medidos em laboratório. Os índices adotados foram: o coeficiente de correlação (r) (Tabela 2), índice de confiança (c) índice de Willmontt (d). Maiores informações sobre os índices de Willmontt e o de confiança ou desempenho são encontrados em Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 2. Interpretação dos coeficientes de correlação e determinação de Pearson.

Escala de Person			
Coefficiente	Fraca	Moderada	Forte
Determinação	$0 \leq R^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq R^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq R^2 \leq 1$
Pearson	$0 \leq r \leq 0,50$	$0,50 \leq r \leq 0,90$	$0,90 \leq r \leq 1$

Adaptado de Milton (1992)

Para a análise de correlação foi utilizada a equação 1:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n =1(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n =1(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n =1(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

Em que: r - coeficiente de correlação; x_i - expressa o valor estimado da variável; y_i - representa o valor observado; \bar{x} - define a média dos valores variáveis; \bar{y} - define a média dos valores observados, e n - tamanho da amostra.

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

Na determinação do índice de Willmontt (d) que varia de 0 a 1, sendo que zero indica nenhuma concordância, e 1 expressa concordância perfeita, foi utilizado a equação 2:

$$d=1-\frac{\sum (x_i-y_i)^2}{\sum (x_i-\bar{y})^2+(y_i-\bar{y})^2} \quad (2)$$

Em que: d - é o índice de concordância de Willmontt; x_i - expressa o valor estimado da variável; y_i - representa o valor observado, e \bar{y} - define a média dos valores observados.

O índice “c” é calculado pelo produto entre os índices de correlação “r” e Willmott “d”, cuja interpretação é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3. Critérios de interpretação do índice de desempenho “c”.

Valor "c"	Desempenho
76 a 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Adaptado de Camargo e Sentelhas (1997)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variação Espacial

A condutividade elétrica da água dos reservatórios da bacia Metropolitana apresentou variações com valores médios entre 0,51 dS m⁻¹ e 2,15 dS m⁻¹ para os reservatórios Pacoti e Pompeu Sobrinho, respectivamente (Tabela 4), variando quanto a restrição para uso na irrigação de nenhum a moderado risco de

causar salinidade aos solos, segundo a classificação de Ayers e Westcot (1999).

Tabela 4. Valores médios das variáveis em estudos para os reservatórios da bacia metropolitana do Ceará.

Açudes	Estatística	CE (dS.m ⁻¹)	Cl ⁻ (mmolc.L ⁻¹)	Na ⁺ (mmolc.L ⁻¹)	
Pacajus	Média ± D. P.	0,66 ± 0,18 a	5,08 ± 1,07 a	3,48 ± 1,30	A
	Mínimo	0,33	2,37	0,47	
	Máximo	1,15	9,42	9,29	
Pacoti	Média ± D. P.	0,51 ± 0,14 a	3,67 ± 1,21 a	2,79 ± 0,94	A
	Mínimo	0,25	1,69	0,84	
	Máximo	0,94	6,36	5,12	
Sítios Novos	Média ± D. P.	0,52 ± 0,18 a	3,44 ± 2,11 a	2,92 ± 2,05	A
	Mínimo	0,23	0,84	0,4	
	Máximo	1,71	18,6	17,11	
Aracoiaba	Média ± D. P.	0,56 ± 0,32 a	4,59 ± 3,71 a	2,52 ± 0,98	A
	Mínimo	0,28	2,99	0,62	
	Máximo	1,47	15,69	4,69	
Riachão	Média ± D. P.	0,51 ± 0,13 a	3,74 ± 1,27 a	2,84 ± 1,04	A
	Mínimo	0,24	1,69	1,06	
	Máximo	0,99	8,31	7,05	
Castro	Média ± D. P.	1,07 ± 0,31 b	9,10 ± 2,90 b	5,79 ± 2,42	B
	Mínimo	0,58	2,68	2,96	
	Máximo	1,86	17,52	13,95	
Pompeu Sobrinho	Média ± D. P.	2,15 ± 1,11 c	21,61 ± 10,08 c	10,47 ± 5	C
	Mínimo	0,69	0,23	4,64	
	Máximo	4,19	44,91	21,79	

*Média seguida de letra minúscula diferem entre si na linha pelo teste de Tukey, em nível de 5% de significância

Constata-se, com a aplicação do teste de comparação de médias ao nível de 5% de significância, basicamente, dois grupos de açudes quanto a salinidade das águas na bacia metropolitana, o primeiro grupo formado pelos açudes Pacajus, Sítios Novos, Riachão, Pacoti e Aracoiaba, que apresentam valores médios de

CE abaixo do limite de $0,70 \text{ dS.m}^{-1}$ estabelecido por Ayers e Westcot (1999) para águas sem nenhuma restrição de uso, quanto à salinidade para a agricultura irrigada.

Baixas concentrações de sais no Nordeste também foram observadas por Figueredo Junior et al. (2013) avaliando a qualidade de água no distrito de irrigação Tabuleiros Litorâneos – DITALPI no Piauí. Resultados semelhantes com baixas salinidades em águas superficiais também foram obtidos por Franco et al. (2009) ao avaliarem a qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, São Paulo, e observarem que há um baixo risco de salinização do solo considerando-se as análises da condutividade elétrica na água do córrego do manancial, com os valores sempre abaixo de $0,25 \text{ dS m}^{-1}$ e por Lobato et al. (2008) avaliando a sazonalidade na qualidade da água de irrigação do Distrito Irrigado Baixo Acaraú, Ceará, que observou valor máximo de CE durante o estudo de $0,55 \text{ dS m}^{-1}$.

O segundo grupo é composto pelos açudes Castro e Pompeu Sobrinho, que apresentaram elevadas concentrações de sais, com moderada e alta restrição de uso de acordo com os limites estabelecidos por Ayers e Westcot (1999) para uso na irrigação, apresentando valores médios de CE diferindo estatisticamente ao nível de 5% de significância dos demais reservatórios. Concentrações acima do limite de $0,70 \text{ dS.m}^{-1}$ também foram observadas por Mendes et al. (2008) avaliando a qualidade da águas para fins de irrigação da região do Congo, Paraíba.

Outra informação obtida da Tabela 4 é a ordem decrescente dos reservatórios quanto aos valores médios do íon Cl^- que foram: Pompeu

Sobrinho > Castro > Pacajus > Aracoiaba > Riachão > Pacoti > Sítio Novos.

As concentrações médias do íon Cl^- ficaram entre $3,44 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e $21,61 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ nas águas dos reservatórios Sítios Novos e Pompeu Sobrinho, respectivamente. Para Ayers e Westcot (1999) concentrações superiores a $3,00 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ do íon Cl^- podem causar toxicidade às culturas, reduzindo a produtividade.

Segundo Grattan (2005), culturas sensíveis podem tolerar até $3,4 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e culturas mais resistentes, como a videira, podem tolerar $19,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ou mais.

Quanto ao consumo humano, os valores observados para os açudes Castro e Pompeu Sobrinho apresentaram restrições para tal uso, com concentrações acima dos $5,6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ (200 mg L^{-1}), limite estabelecidos pela portaria 518/05 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004) sendo as águas desses reservatórios classificadas inadequadas consumo humano.

Outros autores que também encontraram valores semelhantes foram Arraes et al. (2009), estudando os íons determinantes das águas superficiais na Bacia do Acaraú, que observou em todos os 9 pontos analisados na bacia valores acima do limite para o uso na irrigação de $3,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ estabelecidos por Ayers e Westcot (1999), e nas estações amostrais 8 e 4 valores acima do limite de $5,6 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ para consumo humano.

Baseando-se nos valores médios do íon Na^+ analisados, (Tabela 4), apresentam-se em ordem decrescente de concentração os reservatórios: Pompeu Sobrinho > Castro > Pacajus > Sítios Novos > Riachão > Pacoti > Aracoiaba. As concentrações médias do íon

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

ficaram entre $2,52 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ e $10,47 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$, respectivamente para os reservatórios de Aracoiaba e Pompeu Sobrinho, apresentando moderado e severo risco de toxicidade.

Estudos semelhantes foram realizados por Santos et al. (2009) estudando as concentrações de Na^+ em águas superficiais na bacia do Acaraú. Quanto à toxicidade do sódio, é mais difícil de diagnosticar os sintomas típicos, pois aparecem em forma de queimaduras ou necroses, ocorrendo ao longo das bordas nas folhas das plantas sensíveis quando a concentração do sódio atinge 0,25% a 0,5% com base em peso seco e alcançam níveis tóxicos depois de vários dias ou semanas Ayers e Westcot (1999). Segundo Grattan (2005), a habilidade de uma planta tolerar sódio varia consideravelmente, de maneira que nos citros e fruteiras de caroço a sensibilidade pode ser observada em concentrações inferiores a $5,0 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$.

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.

No caso da bacia Metropolitana do Ceará, essas altas concentrações de Cl^- e Na^+ devem está relacionadas a formação geológica composta em partes por rochas cristalinas, no entanto, outra forte influência para essas águas apresentarem altas concentrações dos íons Cl^- e 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 Cl^- como o elemento mais abundante, seguido do Na^+ (MEIRELES et al., 2007).

Quanto ao teste de comparação de médias, os reservatórios Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba e Riachão, não diferiram entre si estatisticamente ao nível de 5% para todos os parâmetros avaliados formando o primeiro grupo. Já os reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho diferiram estatisticamente ao nível de 5% dos demais reservatórios, formando o segundo grupo. Estes dois reservatórios são caracterizados por apresentarem altos níveis de salinidade e de toxicidade. Os valores mais elevados foram para o Pompeu Sobrinho, que durante o período de estudo, chegou a apresentar valores máximos de CE $4,19 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; Cl^- $44,91 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ e Na^+ $21,79 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$. No reservatório Castro foi verificado valores máximos de CE $1,86 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; Cl^- $17,52 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ e Na^+ $13,95 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$, menores do que o açude Pompeu Sobrinho que apresentou as maiores concentrações, no entanto, maiores que os demais reservatórios.

As concentrações dos reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho são extremamente preocupantes, inclusive superiores aos limites tolerados para o consumo humano que é de $10,8 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ para o Na^+ e $5,6 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ para o Cl^- , de acordo com a portaria 518/05 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), pois o alto consumo de sódio é apontado como indicador na predição de doenças cardiovasculares (Molina et al., 2003).

Em referência a quantidade usualmente encontrada em águas doces, os cloretos não são prejudiciais, entretanto, altas concentrações do

íon cloreto podem trazer restrições ao sabor e, desta maneira, levar o consumidor a procurar outras fontes de suprimento, frequentemente de qualidade sanitária pouco desejável (LEMOS et al., 2010). De acordo com Palácio et al. (2011), estas elevadas concentrações de sais verificadas para estes reservatórios podem ser relacionadas a pressão da cidade de Itapiúna ao reservatório Castro aliados a águas novas das primeiras coletas deste reservatório que foi concluído em 1997, pouco tempo antes do início do monitoramento. Para o Pompeu Sobrinho, o principal problema que o torna de maior salinidade é o superdimensionamento do reservatório, que ocasiona longos períodos sem renovação das águas, agravando assim o processo de acumulação de sais ao longo do tempo, proporcionado pela evaporação.

Pelo mapa da bacia metropolitana (Figura 2) observa-se a condutividade elétrica das águas não oferecem nenhuma restrição para uso na agricultura irrigada. Os mananciais estão localizados na parte baixa da bacia, representando 46,3% da sua área total, na qual inclui os reservatórios: Sítios Novos, Riachão, Pacajus, Pacoti e Aracoiaba.

A área com águas de altas restrições quanto à condutividade elétrica foram verificadas em áreas da parte alta da bacia metropolitana no qual apenas o reservatório Pompeu Sobrinho está inserido, representando apenas 2,4% da área total da bacia. A alta evaporação potencial do semiárido aliado ao superdimensionamento do reservatório favorece esta alta concentração de sais (PALÁCIO et al., 2011). A área da bacia Metropolitana no qual o reservatório Castro está inserido é considerada intermediária, incluído na faixa de

limite $0,7 \text{ dS.m}^{-1}$ a $1,5 \text{ dS.m}^{-1}$, na qual representa 43,4% da área total da bacia.

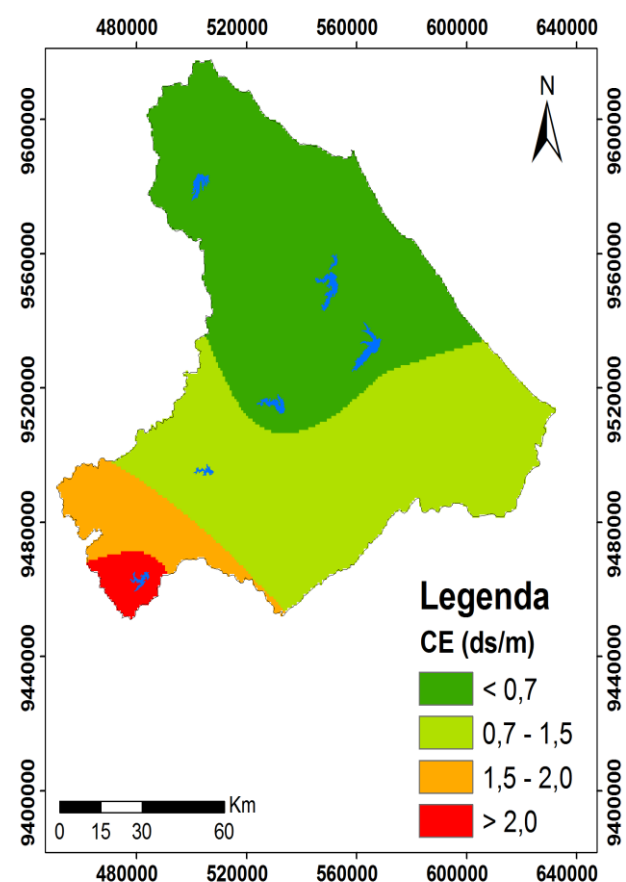


Figura 2. Mapa da qualidade das águas da Bacia metropolitana do Ceará para o parâmetro Condutividade Elétrica – CE.

Na Figura 3 pode-se observar os mapas da qualidade das águas da Bacia metropolitana do Ceará para os indicadores cloreto (Figura 3a) e sódio (Figura 3b). Os valores dos íons Na^+ e Cl^- classificam a água em quatro classes $< 3 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$; $3 - 6 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$; $6 - 9 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$; $> 9 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$. O Na^+ está inserido nas quatro classes, enquanto o íon Cl^- em três classes distintas, não apresentando valores médios na classe 1 ($\text{Cl}^- < 3 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$), isso ocorreu em decorrência dos altos valores do íon Cl^- na bacia Metropolitana que variaram entre $3,44 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$ a $21,61 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1}$.

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

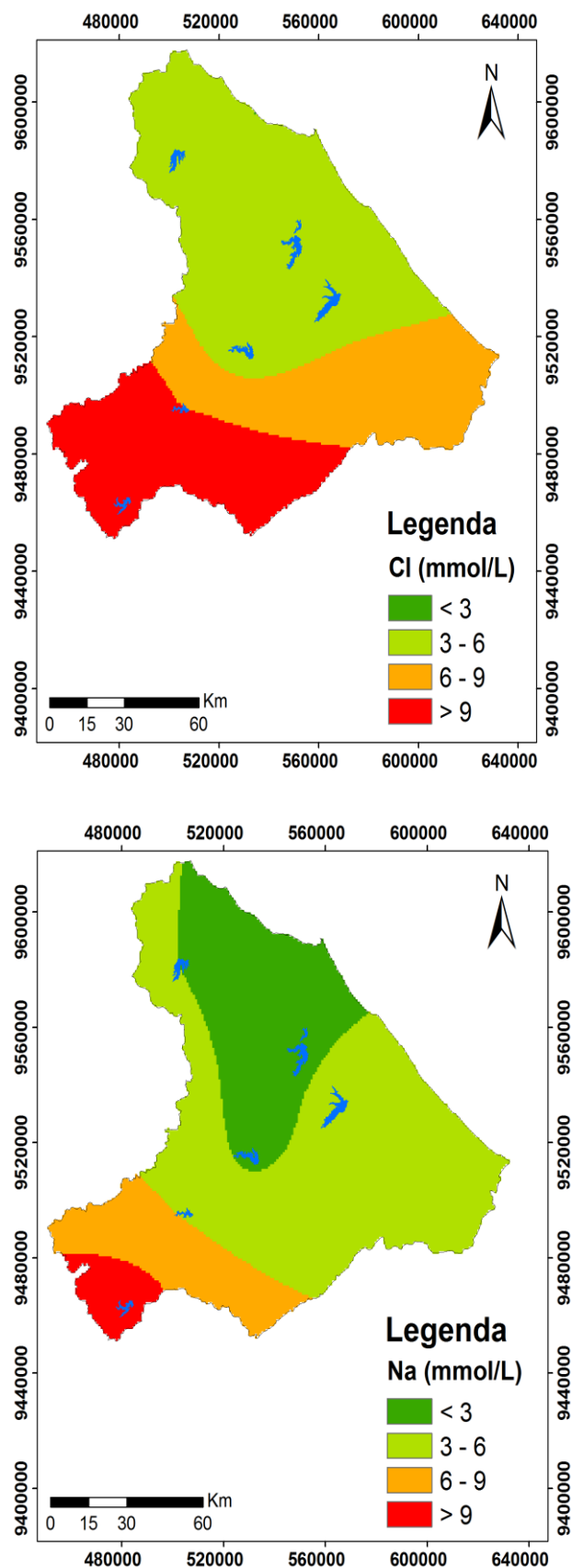


Figura 3. Mapa da qualidade das águas da Bacia metropolitana do Ceará para os parâmetros, (a) Cloreto - Cl⁻ e (b) Sódio - Na⁺.

Os valores do íon Cl⁻ apresentaram-se sempre acima do limite de 3 mmol_c.L⁻¹, onde 50,2% da área da bacia está na faixa de 3 mmol_c.L⁻¹ a 6 mmol_c.L⁻¹, estando nela incluída, os reservatórios: Sítios Novos, Riachão, Pacajus, Pacoti e Aracoiaba. A faixa de maior concentração do Cl⁻ concentram-se na parte alta da bacia, correspondendo a 24% da área total, nela estão incluídos os reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho, em decorrência de características específicas destes reservatórios, como o superdimensionamento, a pressão da cidade, aliados às ações antrópicas e evaporação. O mapa da bacia para o íon sódio apresenta 27,8% da área na faixa de nenhuma restrição para uso na irrigação, 54,1% para o intervalo de 3 mmol_c.L⁻¹ a 6 mmol_c.L⁻¹, e 4,5% na faixa de valores acima de 9 mmol_c.L⁻¹.

Calibração e Validação dos Modelos

Na Tabela 5 encontram-se as equações dos modelos desenvolvidas para os íons sódio (Na⁺) e cloreto (Cl⁻) com a condutividade elétrica da água (CE). Os resultados das análises de regressão simples e as equações evidenciam mudanças no valor do coeficiente de determinação (R²) dos modelos desenvolvidos, apresentando uma maior correlação entre o íon Cl⁻ e a condutividade elétrica. A correlação para o íon Cl⁻ apresentou um valor de R² 0,9025, valores obtidos significativamente ao nível de 5% de probabilidade, podendo ser classificada como forte de acordo com a Tabela 2. Por outro lado, a correlação avaliada para o íon Na⁺ é classificada como moderada com coeficiente de determinação R² de 0,7491. Pelos resultados, observa-se que os íons Cl⁻ e

Na^+ , podem ser estimados com elevado a médio grau de confiabilidade respectivamente; tomando-se como base de análise não apenas o coeficiente de determinação, mas também os elevados valores de F. Estudos semelhantes foram realizados por Andrade et al. (2004), Rodrigues et al. (2007) e Arraes et al. (2009).

Tabela 5. Regressão linear e parâmetros empregados na avaliação dos modelos gerados.

Relação	Modelo de equação	R ²	F	Sig.
$\text{Cl}^- \times \text{CE}$	$\text{Cl}^- = 9,0263 * \text{CE} - 0,7799$	0,9025	1.511,7	0,000
$\text{Na}^+ \times \text{CE}$	$\text{Na}^+ = 5,4588 * \text{CE} + 0,0536$	0,7491	443,4	0,000

Cl^- e Na^+ em $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$

CE = condutividade elétrica em $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$

As concentrações de Cl^- e Na^+ nas águas da bacia metropolitana determinadas em laboratório e as estimadas pelos modelos estão relacionadas na Figura 4. Essa relação é de fundamental importância para fornecer suporte na estimativa da acuracidade da simulação do modelo. Se a simulação apresentar acuracidade, os pares de pontos (medidos e estimados) deverão estar em torno da reta 1:1, a qual conecta os valores computados iguais aos observados, ou seja, a igualdade perfeita (ANDRADE et al., 2004).

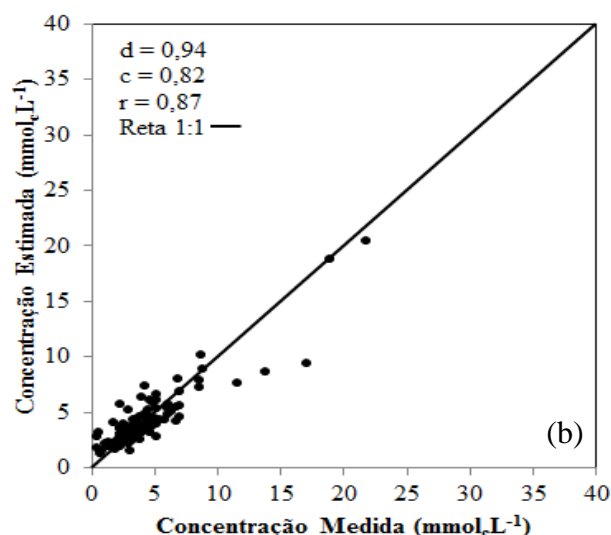
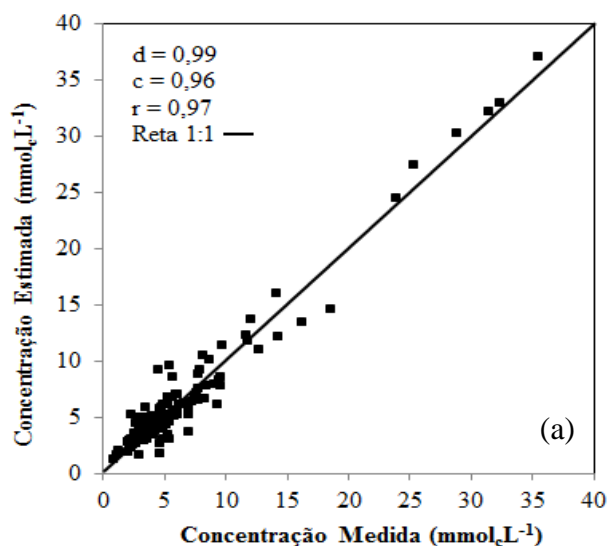


Figura 4. Relação entre as concentrações dos íons Cl^- (a) e Na^+ (b) medidas e estimadas.

Estudando os valores da acuracidade do modelo para o íon Cl^- os índices foram: $d = 0,99$; $c = 0,96$; $r = 0,97$ e para o íon Na^+ foram: $d = 0,94$; $c = 0,82$; $r = 0,87$. Os respectivos índices indicam que os modelos podem ser empregados na estimativa da concentração dos íons em análise com elevado nível de confiabilidade, expressando ótimo desempenho. Resultados semelhantes no Ceará foram apresentados por Araújo Neto et al. (2010) estudando o cloreto nas águas dos açudes Poço da Pedra e Favelas, os quais obtiveram para os índices ($d = 0,990$; $r = 0,982$; $c = 0,972$) e Santos et al. (2009) estudando concentração de sódio, nas águas superficiais da bacia do rio Acaraú, encontrando para os índices ($d = 0,95$; $r = 0,91$; $c = 0,86$) ambos indicando um ótimo desempenho dos modelos.

CONCLUSÕES

1. As águas superficiais dos reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará apresentam riscos moderados e severos de salinidade;
2. Foram observados dois grupos de açudes quanto a salinidade das águas na bacia metropolitana. O primeiro grupo com águas de baixa

VARIAÇÃO ESPACIAL E MODELAGEM DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE RESERVATÓRIOS DA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

salinidade foi formado pelos açudes Pacajus, Sítios Novos, Riachão, Pacoti, e o segundo grupo, composto pelos açudes Castro e Pompeu Sobrinho, apresentaram águas com elevada concentração de sais;

3. As concentrações de Na^+ e Cl^- dos reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho são excessivamente elevados para uso na irrigação e consumo humano.

4. Pelos índices aplicados, os modelos desenvolvidos para estimativa dos íons Na^+ e Cl^- apresentaram um ótimo desempenho permitindo inferir sobre estes íons com base na CE.

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.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; SOUZA, I. H.; CRISÓSTOMO, L. A. Modelagem da concentração de íons nas águas do vale perenizado do rio Trussu, Iguatu-CE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. **Anais...** Porto Alegre: ABRH. 1 CD.

ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; PAULINO, W. D. Modelagem da concentração de cloreto nas águas dos açudes poço da pedra e favelas. In: Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação – WINOTEC, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza - CE, 2010.

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, n. 3, 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.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Portaria n. 518**, de 25 de março de 2004. “Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências”. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 26 de março de 2004. seção 1.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas de evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAVALCANTE, L. F.; OLIVEIRA, F. A.; GHEYI, H. R.; CAVALCANTE, I. H. L.; SANTOS, P. D. Água para agricultura: irrigação com água de boa qualidade e água salina. In: CCAVALCANTE, L. F. (Ed.). **O maracujazeiro amarelo e a salinidade da água**. João Pessoa: Sal da Terra, Cap. 1, p. 1-31, 2012.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; FERREIRA, J. R.; FERNANDES, C. N. V.; ANDRADE, A. C.; AZEVEDO, B. M.; SARAIVA, K. R. Avaliação da qualidade da água do distrito de irrigação Tabuleiros Litorâneos do Piauí – DITALPI. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 7, n. 3, p. 213 - 223, 2013.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T. Qualidade da água para irrigação na microbacia do Coqueiro, Estado de São Paulo. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 772-780, 2009.

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. 2, p. 142-148, 2007.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME. **Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia Metropolitana**. v. 1. SRH/FUNCEME/PROURB-RH. Fortaleza, 2002. 142 p.

GRATTAN, S.R. **Irrigation water salinity and crop production**. Disponível em: <<http://anrcatalog.ucdavis.edu/pdf/8066.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2005.

LEMOS, M.; FERREIRA NETO, M.; DIAS, N. DA S. Sazonalidade e variabilidade espacial da qualidade da água na Lagoa do Apodi, RN. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 155-164, 2010.

LOBATO, F. A. O.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; CRISÓSTOMO, L. A. Sazonalidade na qualidade da água de irrigação do Distrito Irrigado Baixo Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 1, p. 167-172, 2008.

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, n. 1, p. 25-31, 2007.

MENDES, J. S.; CHAVES, L. H. G.; CHAVES, I. B. Qualidade de águas para fins

de irrigação da região do Congo, PB. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 2, p.131-138, 2008.

MILTON, J.S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2nd ed. Washington: Library of Congress, 1992. 156 p. MOLINA, M. D. B.; CUNHA, R. S.; HERKENHO, L. F.; MILL, J. G. Hipertensão arterial e consumo de sal em população urbana. **Revista de Saúde Pública**, v. 37, n. 6, p. 743-750, 2003.

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.

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 Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 4, p. 360-365, 2007.

SANTOS, J. C. N.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; ARAUJO NETO, J. R. Modelagem da concentração de sódio, cálcio e magnésio nas águas superficiais da bacia do rio Acaraú. In: XIX Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem – CONIRD, Montes Claro. **Anais...** Montes Claros – MG, 2009.

SILVA JÚNIOR, J. N.; SOUSA, A. R.; 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. 2, p. 189-193, 2000.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.