

Identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da bacia do Curu, Ceará¹

Identification of determinant ions of surface water electric conductivity in the Curu Basin, Ceará State

Francisco Dirceu Duarte Arraes^{2*}, Eunice Maia de Andrade³, Helba Araújo de Queiroz Palácio⁴, José Itamar Frota Junior⁵ e Julio César Neves dos Santos⁶

Resumo - Este trabalho teve como objetivo identificar os íons de maior contribuição da salinidade das águas superficiais, na parte alta e na parte baixa do trecho perenizado da bacia do Curu. As coletas foram realizadas mensalmente no período de out/2004 a set/2005, em 9 pontos distribuídos ao longo do trecho perenizado da bacia do Curu, perfazendo um total de 85 amostras. As análises físico-químicas da água foram realizadas no Laboratório de Solos e Água da Universidade Federal do Ceará, onde foram determinados a Condutividade Elétrica da água (CEa), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- e Cl^- . Posteriormente, foram desenvolvidos modelos de regressão múltiplas, relacionando a CEa aos íons estudados e a validação do modelo foi efetuada empregando-se o índice de Willmott. Os modelos estatísticos desenvolvidos, tanto para a parte alta como para a parte baixa apresentaram valores simulados bem próximos dos observados, indicando boa adequação e precisão dos modelos de melhor ajuste. O cloreto se fez presente nos dois modelos desenvolvidos, sendo que os principais íons responsáveis pela composição iônica da CE para as águas da parte alta foram Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- ; enquanto que para a parte baixa apenas os íons Cl^- e HCO_3^- foram significativos ao nível de 5%. Pelos índices aplicados, os modelos calibrados apresentaram excelente precisão, com índices de confiança (c) superiores a 0,90; e índices de Willmott (id) maiores que 0,98; indicando um ótimo desempenho dos modelos.

Palavras-chave - Qualidade de água. Salinidade. Irrigação.

Abstract - This work was carried out to identify the major contribution of ions to the surface water salinity to the upper and down perennialized segments of the Curu river watershed. Water samples were collected, monthly, from oct./2004 to sept./2005, in nine points spread out along the Curu river, totalizing 85 samples. Analyses were carried out in the Soil and Water Laboratory at the Federal University of Ceará State and the following parameters were appraised: Water Electric Conductivity (ECw), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- and Cl^- . Multiple regression models were considered to identify the relationship between EC and the studied ions. Willmott's index was used to validate the calibrated models. Developed models to the upland and low land regions showed a good agreement; pointing out that the developed models are good for prediction of Electric Conductivity. Results showed that both models were sensible to Cl^- . The ionic composition of EC in the upland region was defined by Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- , while in the low land region Cl^- e HCO_3^- ions were statistically significant (5%). According to the applied index, the calibrated models presented excellent precision, with the performance index (c) up to 0.90 and Willmott's index (id) higher than 0.98.

Key words - Water quality. Salinity. Irrigation.

* Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 31/10/2008; aprovado em 06/07/2009

Monografia do primeiro autor e parte integrante de projeto de pesquisa financiado pelo CT-HIDRO

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, CCA/UFC, Caixa Postal 12168, 60 455 970, Fortaleza-CE, Brasil, dirceutid@yahoo.com.br

³Departamento de Engenharia Agrícola, CCA/UFC, Fortaleza-CE, Brasil, eandrade@ufc.br

⁴Instituto Federal do Ceará, Campus de Iguatu-CE, Brasil, helbaraujo23@yahoo.com.br

⁵Empresa de Assistência Técnica Rural - Emater-Ceará, Brasil itamarfrota@yahoo.com.br

⁶Programa de graduação do Instituto Federal do Ceará, Campus de Iguatu-CE, Brasil, juliocearnds@yahoo.com.br

Introdução

Nos últimos anos, a importância da água e do solo se torna cada vez mais evidente, tanto pela sua escassez como pela larga demanda em decorrência do crescimento da população mundial (ANDRADE et al., 2002). Neste sentido a irrigação tem se configurado como um importante fator de segurança no contexto da agricultura, principalmente em regiões de clima semi-árido. Assim como a grande maioria das atividades humanas gera algum tipo de impacto negativo ao meio ambiente, a irrigação, se não for manejada racionalmente, pode acarretar sérios danos como a salinização do solo, reduzindo a produtividade das culturas sensíveis e, em longo prazo, a desertificação da área (D'ALMEIDA et al., 2005).

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). As águas na maioria das vezes apresentam uma composição química constituída de sais de cálcio, magnésio, sódio e potássio nas formas de cloretos, sulfato, carbonatos e bicarbonatos. Estes elementos podem apresentar diferentes proporções dependendo da fonte de água, de sua localização geográfica e da época de coleta, entres outros fatores (SILVA JÚNIOR et al., 1999). Segundo Ayers e Westcot (1999), um dos principais problemas de qualidade de água para irrigação é a salinidade, 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, ou a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo, 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 (RIBEIRO et al., 2005).

Atualmente, a regressão múltipla, linear ou não linear, entre outras técnicas, vem sendo empregada por diferentes pesquisadores para identificar as variáveis de maior peso nos processos multivariados (ARRIAZA et al., 2004; WANG et al., 2007). 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 (BATISTA et al., 2006; D'ALMEIDA et al., 2005; MAIA et al., 2001; RODRIGUES et al., 2007). O conhecimento das variáveis de maior peso permitirá identificar os elementos que determinam a maior ou menor alteração da condutividade elétrica da água. O presente trabalho teve como objetivo identificar os íons de maior contribuição na condutividade elétrica das partes alta e baixa do trecho perenizado da bacia do Curu pelo emprego da análise de regressão múltipla.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido ao longo da bacia hidrográfica do rio Curu, localizada entre as coordenadas geográficas 3°20' e 4°36' de latitude Sul e 38°55' e 39°50' de longitude Oeste. O clima da parte baixa da bacia é classificado como Aw' - quente e úmido, com chuvas de outono, alcançando valores máximos nos meses de março e abril. A precipitação anual média é de 1020 mm e o período seco se prolonga de julho a dezembro, ocorrendo menores precipitações nos meses de outubro e novembro. A temperatura média anual é de 26,3 °C, com máxima absoluta de 35 °C em fevereiro e mínima absoluta de 18 °C em julho. Já os terços médio e superior da bacia do Curu apresentam clima do tipo BSh'w', semi-árido quente com chuvas de outono, com temperaturas médias sempre superiores a 18 °C (FROTA JUNIOR et al., 2007).

A perenização do rio Curu é efetuada pela distribuição parcial das águas dos açudes General Sampaio, Pereira de Miranda e Caxitoré. Os solos predominantes na bacia em estudo são os Argissolos, os Neossolos Quartzarênicos, Neossolos Regolíticos, Luvisolos Crômicos ou Háplicos, Planossolos e os Neossolos Flúvicos. Inseridas na área de estudo estão as cidades de Pentecoste (33.300 habitantes), Paraipaba (21.615 habitantes), pequenos povoados e os perímetros irrigados Curu-Recuperação e o Curu-Paraipaba, com áreas irrigáveis de 1.180 e 8.000 hectares, respectivamente.

As coletas foram realizadas mensalmente no período de outubro de 2004 a setembro de 2005, em 9 pontos ao longo do trecho perenizado da bacia do Curu (Figura 1). A escolha dos pontos de amostragem de água no trecho perenizado da bacia do Curu fundamentou-se na representatividade do uso da terra e facilidade de acesso ao longo de todo o período estudado.

A identificação de cada ponto e a sua posição geográfica está contida na Tabela 1. Ressalta-se que para os meses de março, julho e agosto não foram realizadas as coletas nos pontos 2 e 3, devido a pequena lâmina de água no canal.

Durante as coletas, as águas foram armazenadas em recipientes de polipropileno de 1 litro devidamente esterilizados e conduzidas ao Laboratório de Água e Solo da Universidade Federal do Ceará. Após a coleta foram adicionadas 2 gotas de tolueno, solvente utilizado para estabilizar a amostra e minimizar a proliferação de microorganismos. Foram determinadas a condutividade elétrica com um condutivímetro e cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) e ânions (Cl^- , HCO_3^-) de acordo com a metodologia proposta por Richards (1954).

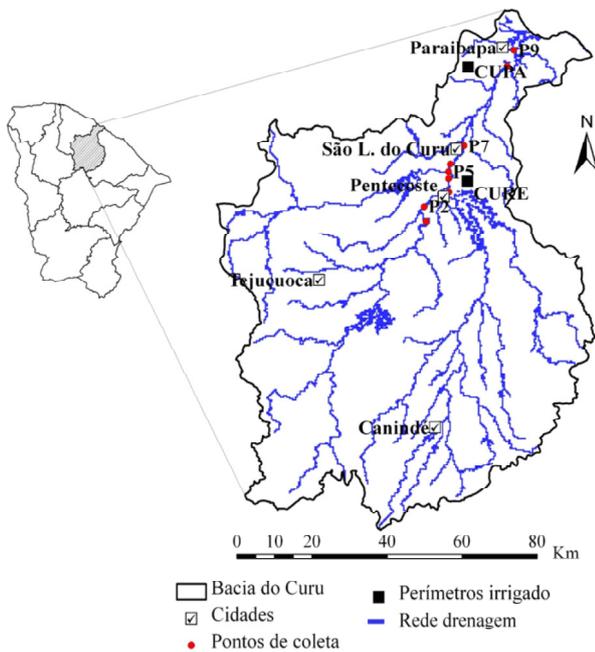


Figura 1 - Localização da bacia do Curu no estado do Ceará

Modelo estatístico e validação

Para uma análise da ação do uso da terra na qualidade da água da bacia Curu, dividiu-se a bacia em duas partes: alta e baixa. Consideraram-se os pontos P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5 como representativos da parte alta da bacia, e os demais pontos representativos da parte baixa (P_6 ; P_7 ; P_8 e P_9). Para definir os íons que apresentavam uma maior correlação com a CE, os dados obtidos no laboratório foram submetidos à análise de regressão múltipla através do software SPSS v.16. Utilizou-se a técnica de seleção por etapa, em que a variável dependente foi a condutividade elétrica e as independentes os íons Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- . Segundo Batista et al. (2006),

Maia et al. (2001) e Rodrigues et al. (2007), a equação de regressão tem a seguinte forma:

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + \dots + e_i \quad (1)$$

Onde:

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

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

a - constante de regressão;

b, c, d - coeficientes angulares da variável e

e_i - erro aleatório.

A validação do modelo para as águas representativas da parte alta da bacia foi efetuada empregando-se os dados coletados para a parte baixa durante o mesmo período, em total de 40 amostras. Já para a parte baixa da bacia, a validação foi executada com os dados coletados na parte alta, em total de 45 amostras. Seguiu-se esse procedimento para eliminar o risco de auto-correlação, uma vez que cada modelo foi validado com dados não empregados na sua calibração. Esta metodologia foi empregada por Batista et al. (2006) em pesquisa realizada na bacia do Acaraú.

A análise dos resultados obtidos através dos modelos foi baseada no coeficiente de correlação (R), índice de Willmott (id) e no coeficiente de confiança ou desempenho (c) introduzido por Camargo e Sentelhas (1997) e apresentados na Tabela 2. O índice de Willmott foi calculado com base na Equação 2:

$$id = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (2)$$

Tabela 1 - Identificação e localização dos pontos de coleta, bacia do Curu, Datum WGS 84; Projeção UTM, Zona 24S

Postos	Pontos de coleta	Latitude	Longitude
P_1 - Serrota	Vertedouro	9573594	462977
P_2 - Canal da FEVC	FEVC	9577562	462437
P_3 - Canal Riacho da Porta	Próximo DNOCS	9585154	469041
P_4 - Rio Canindé	Próximo cemitério	9581404	469109
P_5 - Rio Caxitoré	P. Curu - Pentecoste	9586956	469007
P_6 - Rios Canindé, Caxitoré e Curu	Núcleos F e G do P. Curu - Pentecoste	9589068	469543
P_7 - Rio Curu	Ponte S. Luis do Curu	9593846	473122
P_8 - Rio Curu	Abaixo da ponte CE 085	9615376	484626
P_9 - Rio Curu	Fazenda Pedras	9619646	486433

Em que:

id = Índice de Willmontt;

Pi = valores previstos ou estimados;

Oi = valores observados e

O = representa a média dos valores observados.

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

O índice de concordância id, varia de 0 a 1, em que o valor de 1 significa uma concordância perfeita entre dados observados e estimados, enquanto que o valor 0 significa não haver concordância entre os valores analisados.

Variabilidade espacial dos íons

Para se conhecer as características e o comportamento das amostras, sua tendência central (mediana), a variabilidade de seus valores (amplitude, extremos, discrepantes) e percentil, desenvolveu-se uma análise exploratória dos parâmetros determinantes da condutividade elétrica, individualmente, para cada um dos 9 pontos amostrados pelo emprego da técnica de “*box-plot*”. As posições relativas da mediana, primeiro e terceiro quartil dão uma noção da assimetria da distribuição. Os comprimentos das caudas são dados pelas linhas que vão do retângulo aos valores discrepantes.

Resultados e discussão

Desenvolvimento do modelo

Os modelos de regressão linear desenvolvidos entre os valores da CE e dos íons analisados estão presentes na Tabela 3. Verifica-se que a dependência entre a CE e os íons analisados pode ser estimada com elevado grau de

confiabilidade, baseado não somente nos coeficientes de determinação R^2 , mas também nos valores de F (Tabela 3). 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 a muito forte ($R^2 > 0,90$) pela escala de Pearson (MILTON, 1992).

O modelo desenvolvido para a parte alta do trecho perenizado do rio Curu ajustou-se aos dados com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99, enquanto o modelo da parte baixa apresentou R^2 igual a 0,98. Os coeficientes de determinação mostraram que 99% e 98% das variabilidades da CE das águas da parte alta e baixa podem ser explicadas pelos modelos, respectivamente. Em ambas as áreas analisadas, as equações mostraram-se altamente significativas, com o valor de F igual 769 para parte alta e 1121 para a parte baixa. Resultados semelhantes foram observados por Batista et al. (2006) no desenvolvimento dos modelos nas águas das partes alta e baixa da bacia do Acaraú.

A análise da Tabela 4 mostra que os íons Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Cl^- apresentaram maior sensibilidade na determinação da CE para parte alta, enquanto, para a parte baixa da bacia do Curu, apenas os íons Cl^- e o HCO_3^- foram considerados significativos para explicar a variabilidade da condutividade elétrica. A sensibilidade da parte alta a esses elementos se deve principalmente a presença dos Luvissoles, que, de acordo com EMBRAPA (1999), podem colaborar na composição química das águas com os elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ . Já com relação ao íon cloreto, acredita-se que a sua contribuição seja decorrente da ação antrópica (deposição de esgotos domésticos e a lavagem de roupas presente nesta parte da bacia), uma vez que a geologia local não favorece para a contribuição de valores consideráveis do cloreto. Vale ressaltar que o ponto de amostragem P₄ encontra-se logo a jusante da cidade de Pentecoste, recebendo a influência da descarga de esgotos do município. Resultados semelhantes foram observados por Palácio (2004) em estudo realizado nas águas superficiais da bacia do rio Trussu.

No intuito de assegurar as informações geradas pela análise de regressão, realizou-se o teste do nível de significância dos parâmetros presentes em cada modelo proposto (Tabela 4). Pode-se observar que na parte alta da bacia do Curu o teor de sódio foi o parâmetro de maior expressão para a determinação da CE. Este comportamento pode ser explicado pela própria geologia local, ou seja, a presença de solos do tipo Luvissoles (FROTA JUNIOR et al., 2007). Outra fonte de influência do íon sódio nas águas da bacia está relacionada à existência de lixões localizados na região de drenagem dos principais afluentes da bacia Curu (GORAYEB, 2004).

Tabela 3 - Regressão linear, coeficiente de determinação e valores do teste F para a parte alta e baixa da bacia do Curu

Local	Equação	R ²	F	Sig
Bacia do Curu				
Parte Alta	$CE = 0,0081 + 0,0932Na^+ + 0,0960Ca^{2+} + 0,0888Mg^{2+} + 0,0130Cl^-$	0,99	769,92	0,000
Parte Baixa	$CE = 0,0297 + 0,0969Cl^- + 0,0903HCO_3^-$	0,98	1121,13	0,000

O sódio é um importante parâmetro de qualidade de água que indica a permeabilidade do solo. A adsorção dos íons de sódio às partículas do solo leva à dispersão coloidal, com o conseqüente bloqueio dos poros do solo, reduzindo a infiltração. Outro efeito do sódio é sua toxicidade sobre as plantas, provocando queimaduras e necroses quando absorvidas em altas concentrações (AYERS; WESTCOT, 1999).

Já para a parte baixa da bacia do Curu, a CE da água apresentou uma maior sensibilidade ao cloreto (Tabela 4), quando comparada com as águas da parte alta da referida bacia hidrográfica ($t > 47$). Este comportamento pode ser explicado pelos valores médios da CE estarem próximo a $0,75 \text{ dS m}^{-1}$. Costa e Gheyi (1984) comentam que águas que apresentam $CE > 0,75 \text{ dS m}^{-1}$ podem apresentar concentrações do cloreto superiores a do bicarbonato. Este comportamento foi confirmado no presente estudo. Resultados semelhantes foram encontrados em estudos de águas superficiais no semi-árido nordestino por Maia et al. (2001) e Batista et al. (2006).

A correlação entre CE e os íons foi de forte a muito forte, uma vez que as equações obtidas foram significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste t. 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), Lopes et al. (2007) e Andrade et al. (2004). Verifica-se que os elementos de maior expressão para a determinação da CE encontram-se na seguinte ordem:

$Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > Cl^-$ parte alta; enquanto que $Cl^- > HCO_3^-$ para a parte baixa da bacia do Curu.

Validação dos modelos

Os valores da condutividade elétrica obtidos em laboratório e aqueles estimados pelo modelo, ao longo de todo o período de coleta, estão apresentados nas Figuras 2 e 3 para a parte alta e parte baixa da bacia do rio Curu, respectivamente. Observa-se que os valores estimados da CE apresentam-se bem próximos daqueles determinados em laboratório, indicando que os íons selecionados como variáveis independentes mostram uma alta correlação com a CE. Resultados semelhantes foram observados por Andrade et al. (2002) na modelagem da concentração de íons no extrato de saturação do solo, na região do Apodi.

Para a parte alta da bacia, Figura 2, a reta ajustada se confunde com a reta 1:1, tanto para os menores como para os maiores valores da CE, expressando a condição ideal na simulação de um modelo. Em análise visual da Figura 2 pode-se perceber que o modelo expressou uma melhor simulação para os valores mais elevados, uma vez que para $CE < 0,75 \text{ dS m}^{-1}$ os valores estimados começam a se distanciar da reta 1:1. Estudos desenvolvidos por Rodrigues et al. (2007) com as águas do lençol freático do Baixo Acaraú, observaram uma tendência de sobreposição da reta 1:1 com os pontos estimados pelo modelo.

A simulação do modelo desenvolvido para a parte baixa (Figura 3) apresentou comportamento semelhante ao

Tabela 4 - Análise de significância dos parâmetros da regressão

Local	Parâmetro	Sig.	t	Intervalo
Parte Alta	Ca^{2+}	0,000	11,295	0,076 - 0,108
	Mg^{2+}	0,000	10,282	0,072 - 0,101
	Na^+	0,000	15,662	0,081 - 0,102
	Cl^-	0,074	1,928	0,004 - 0,027
	Constante	0,284	0,618	-0,012 - 0,038
Parte Baixa	Cl^-	0,000	47,097	0,093 - 0,101
	HCO_3^-	0,000	11,659	0,075 - 0,106
	Constante	0,141	1,503	0,010 - 0,070

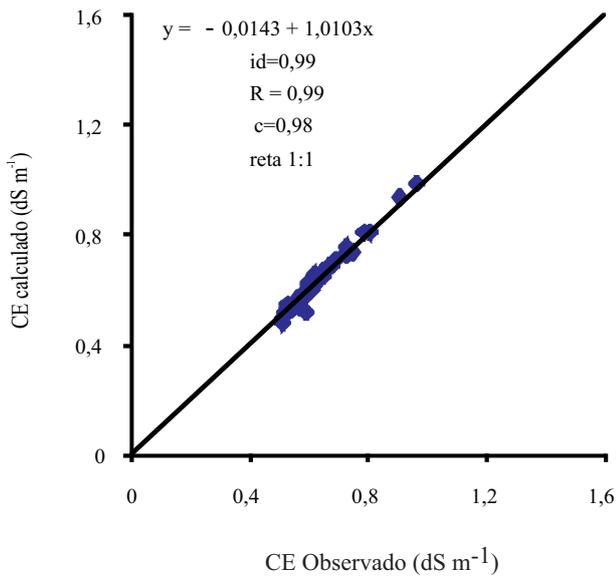


Figura 2 - Valores observados e calculados da CE para a parte alta da bacia do Curu

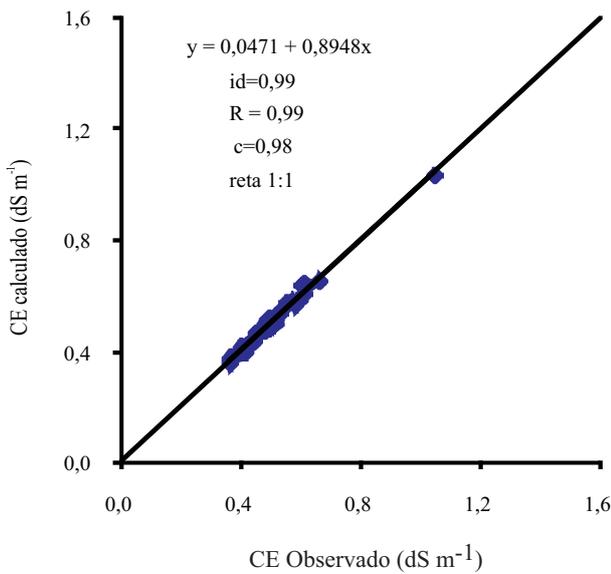


Figura 3 - Valores observados e calculados da CE para a parte baixa da bacia do Curu

da parte alta, ou seja, a reta de melhor ajuste se sobrepõe à reta 1:1, indicando a alta correlação entre as variáveis independentes e a dependente.

Pelos índices aplicados, os modelos desenvolvidos apresentaram excelente precisão, com coeficiente de correlação (R) e índice de Willmott (id) maiores que 0,98, indicando um ótimo desempenho do modelo ($c = 0,98$)

para as respectivas áreas. Tais parâmetros demonstram uma alta precisão e acurácia, indicando que o modelo não é tendencioso, ou seja, estima valores bem próximos do real, quer para as maiores ou menores concentrações testadas. Os modelos apresentados, tanto para a parte alta como para a parte baixa da bacia, apresentaram comportamentos excelentes quanto à linearidade dos dados observados em relação aos calculados ($R = 0,98$), expressando a sensibilidade da CE com os parâmetros selecionados (Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , Ca^{2+} e Mg^{2+}), sendo estes determinantes da condição salina das águas superficiais da bacia do Curu.

Variabilidade espacial dos íons

Cloreto (Cl)

Verifica-se na Figura 4 um efeito acumulativo do cloreto ao longo da bacia, tendo em vista que as maiores concentrações do Cl^- foram observadas na parte baixa. O efeito acumulativo do íon cloro nas águas do rio Curu pode ser, em parte, explicado pelo aporte de esgotos domésticos, lavagem de roupas ao longo da bacia e áreas agrícolas, caracterizando a ação antrópica descrita por Frota Junior et al. (2007). As maiores concentrações do cloreto registradas a partir da estação P_6 podem ser explicadas, principalmente, pela influência da lixiviação e drenagem dos sais oriundos dos perímetros irrigados Curu-Recuperação e Curu-Paraipaba que, segundo Lopes et al. (2007), emprega cloreto de potássio como a principal fonte de potássio para a cultura do coco, uma

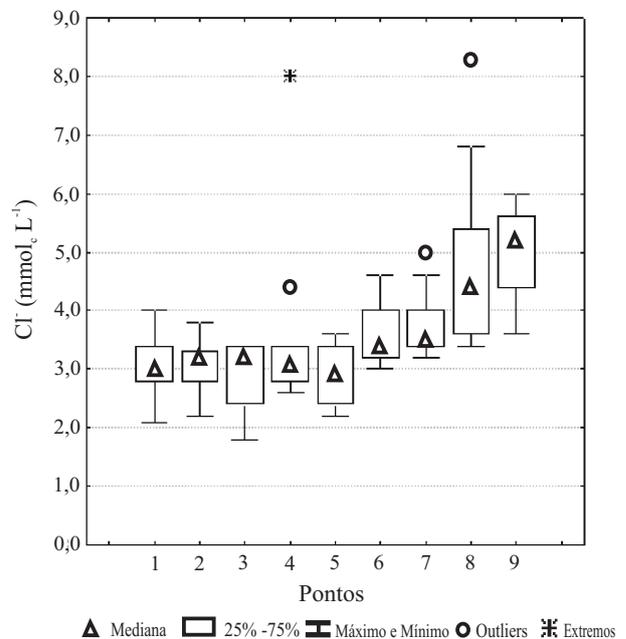


Figura 4 - Variabilidade temporal do teor de cloreto ao longo da bacia do Curu

vez que esse ponto amostral situa-se imediatamente a jusante destes perímetros. Para estação P₉, a proximidade do litoral pode explicar o valor elevado das concentrações do Cl⁻ pois, segundo Santiago (1984), nas regiões próximas ao litoral deve-se considerar a atmosfera como fonte de sais.

Ainda em relação à Figura 4, pode-se notar que no intervalo interquartilico para os cinco primeiros pontos de coleta existe uma tendência de a mediana ficar mais próxima da linha do terceiro quartil, indicando a existência de menores valores observados ao longo da pesquisa, exceto para o P₄, onde se verifica valores discrepantes altamente significativos na concentração do Cl⁻. Tal comportamento se deve ao fato da estação amostral estar localizada logo abaixo da cidade de Pentecoste e sofrer influência da deposição de esgoto doméstico. Já os pontos (P₆, P₇, P₈ e P₉) localizados na parte baixa da bacia apresentaram um comportamento contrário aos cinco primeiros pontos amostrais, uma vez que a mediana localizou-se mais próxima do primeiro quartil, o que indica valores mais elevados do referido íon. Verifica-se que todos os pontos analisados apresentaram valores acima do limite para o uso na irrigação, 3 mmol_c L⁻¹, estabelecido por Ayers e Westcot (1999). Já com relação ao consumo humano, os valores observados mostram restrições nas estações P₈ e P₄, acima dos 7 mmol_c L⁻¹ (250 mg L⁻¹) estabelecidos pela resolução 357/05 do CONAMA.

Sódio (Na⁺)

Observa-se um aumento gradativo na concentração e amplitude de variação do teor de sódio na medida em que se aproxima das áreas baixas da bacia do Curu, onde se encontram os maiores aglomerados humanos e as maiores extensões da agricultura irrigada (Figura 5). Resultados semelhantes foram identificados por Magalhães et al. (2002), em estudo sobre a qualidade das águas do rio Bodocongó-PB, onde as concentrações do teor de sódio aumentaram na proximidade dos centros urbanos. Frota Junior et al. (2007) atribuíram a presença do sódio nas águas da bacia do Curu à própria geologia local e esgotos domésticos provenientes principalmente do município de Pentecoste.

Nota-se que no intervalo interquartilico (dentro do retângulo) a mediana se encontra mais próxima da linha do primeiro quartil. Tal fato deixa evidente a existência de valores mais elevados de sódio. Exceto para os pontos P₃ e P₅, em que no primeiro não houve variação do Na⁺ e no segundo (rio Caxistoré) apresentou-se uma leve tendência à existência de menores valores, por ser um trecho que ainda apresenta uma mata ciliar bem densa e sem exploração de agricultura irrigada e aglomerados

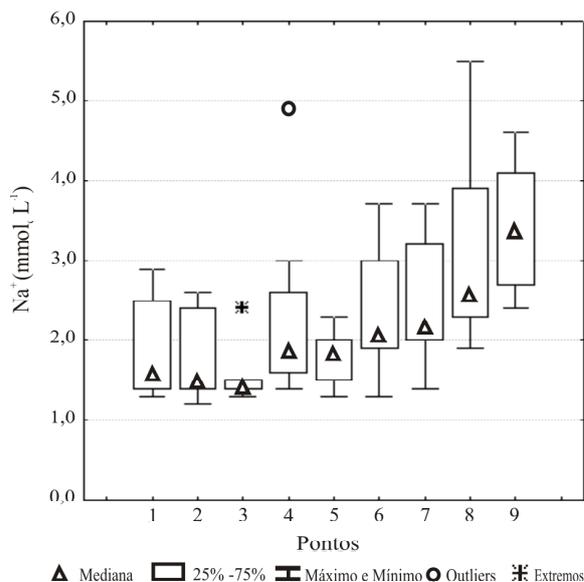


Figura 5 - Variabilidade espacial do teor de sódio ao longo da bacia do Curu

rurais. Outra possível fonte de sódio é proveniente da lavagem de roupas ao longo da bacia. Palácio (2004) comenta a influência do sabão utilizado para a lavagem das roupas como fonte de sódio, considerando que os moradores das áreas rurais costumam lavar suas roupas na margem dos corpos hídricos e os sabões são constituídos essencialmente por uma mistura de sais de sódio e ácidos gordos de cadeia longa. Os maiores valores do Na⁺ ocorreram a partir da estação P₆, o que pode ser explicado pela presença dos perímetros irrigados Curu-Recuperação e Curu-Paraipaba presentes nesta parte da bacia. O ponto P₉ pode receber, também, a influência das águas do mar, uma vez que se encontra a apenas 7 km do litoral.

Embora apresentando grande variabilidade nos teores do sódio, todas as estações sempre se mantiveram abaixo dos limites recomendados para as águas destinadas ao consumo humano, 8,60 mmol_c L⁻¹ (200 mg L⁻¹), segundo os limites estabelecidos pela portaria 518/2004 do Ministério da Saúde. Com relação à utilização destas águas para irrigação percebe-se que alguns valores ficaram acima do limite de toxidez (3,0 mmol_c L⁻¹) estabelecido pela University of Califórnia Committee of Consultants (AYERS; WESTCOT, 1999).

Bicarbonato (HCO₃⁻)

A variação espacial do teor de bicarbonato pode ser vista na Figura 6, onde se pode constatar que não ocorreu efeito acumulativo nas águas do trecho perenizado da bacia em estudo. Os maiores valores do HCO₃⁻ foram registrados nas

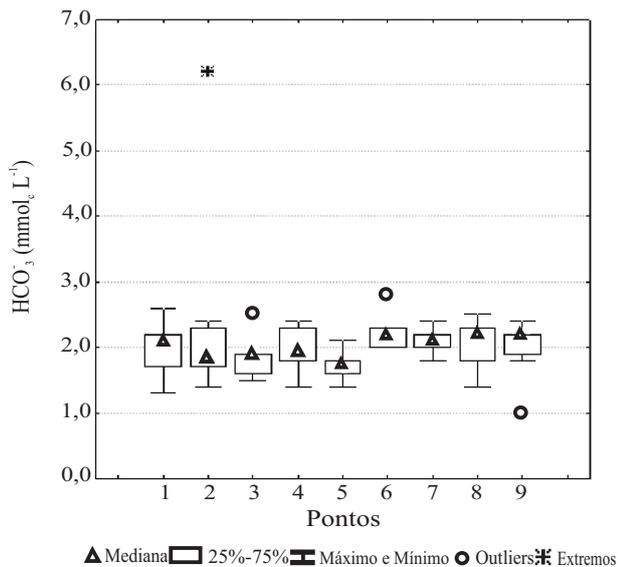


Figura 6 - Variabilidade espacial do teor do bicarbonato ao longo da bacia do Curu

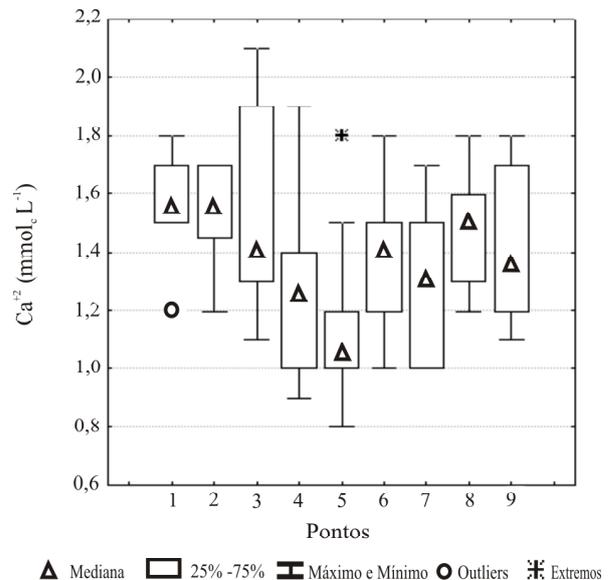


Figura 7 - Variabilidade espacial do teor de cálcio ao longo da bacia do Curu

estações P_2 e P_6 . Em uma análise conjunta do comportamento do bicarbonato e do cloreto (Figuras 6 e 4) nota-se que o ponto P_2 apresentou os menores valores para o cloreto e o maior do bicarbonato. Esse resultado concorda com aqueles obtidos por Silva Junior et al. (1999). Os referidos autores observaram que em água com concentração de HCO_3^- ocorre uma diminuição nos teores de Cl^- .

Os valores encontrados ao longo da bacia do Curu para o bicarbonato apresentaram um valor médio de $2,04 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$, o que, segundo Ayers e Westcot (1999), expressam um grau de restrição ligeira a moderada para o uso na irrigação ($>1,5 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$). Ainda de acordo com os autores supracitados, quando são utilizadas águas para irrigação com elevados teores de bicarbonatos pode ocorrer a precipitação de cálcio, na forma de carbonato de cálcio, facilitando um suposto processo de sodificação do solo.

Cálcio (Ca^{2+})

Os maiores valores do íon cálcio foram registrados nas três primeiras estações amostrais (Figura 7). Tal fato pode ser justificado em virtude da presença de Luvisolos nesta parte da bacia. De acordo com a EMBRAPA (1999) este tipo de solo pode colaborar na composição química das águas com o elemento Ca^{2+} . Os valores das concentrações de cálcio nas águas da bacia do Curu variaram de $0,8 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$ a $2,1 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$. Segundo Ayres e Westcot (1999) os valores normais de cálcio na água destinado à irrigação é de 0 a $20 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$, portanto as águas analisadas estão dentro do limite. Os referidos autores afirmam que a função do cálcio no solo não está completamente

estabelecida e, ao que parece, ele reduz os efeitos tóxicos dos íons Na^+ e Mg^{2+} quando são absorvidos pelas raízes. O cálcio também confere a dureza da água, podendo formar incrustações nas tubulações de irrigação.

Ainda em relação à Figura 7, observa-se que o ponto P_5 apresentou os menores valores dos parâmetros estatísticos analisados. Em virtude desse comportamento pode-se observar a existência de um valor discrepante em relação ao espaço amostral. Esse fato deve estar relacionado ao solo drenado. Esse ponto representa o rio Caxitoré, o qual é menos explorado e a mata ciliar ainda se faz presente.

Magnésio (Mg^{2+})

Observa-se que as águas do rio Curu recebem descargas que promovem um efeito acumulativo do teor de magnésio ao longo do trecho perenizado, sendo os maiores valores encontrados nas estações P_8 e P_9 (Figura 8). O P_8 fica localizado logo após o perímetro Curu-Paraipaba, podendo este valor ser um indicativo da lixiviação de corretivos dos solos do referido perímetro que são predominantemente arenosos (PEREIRA et al., 1983).

Os valores de Mg^{2+} variaram de $0,6$ a $2,70 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$, abaixo do limite estabelecido por Ayers e Westcot (1999) que recomendam o uso de águas na irrigação com concentrações abaixo de $5,00 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$. Com relação à utilização das águas da bacia para irrigação, as estações amostrais podem ser divididas em dois grupos: um formado pelos os pontos

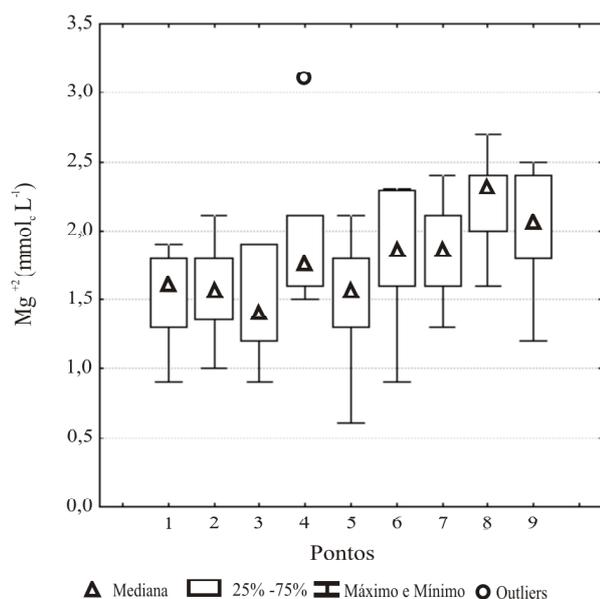


Figura 8 - Variabilidade espacial do teor de magnésio ao longo da bacia do Curu

P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5 , parte alta da bacia, onde temos todos os valores observados abaixo do limite de restrição para uso na irrigação, estabelecido por Ayers e Westcot (1999), exceto para um valor discrepante localizado no ponto P_4 , o qual foi superior ao limite máximo de uso sem restrição das águas para irrigação com relação ao sódio e ao cloreto; e o segundo grupo formado pelas demais estações (parte baixa), as quais apresentaram concentrações de sódio e de cloreto superior a $3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$. Os pontos P_8 e P_9 apontam para uma limitação de uso da água do rio Curu na irrigação de culturas sensíveis, uma vez que os mesmos estão acima do limite de toxidez ($3,0 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$).

Conclusões

1. Existe uma grande variabilidade espacial na composição iônica da água entre os pontos estudados, para as variáveis analisadas, sendo o sódio e o cloreto com teores acumulativo ao longo da bacia, causado pelo efeito da ação antrópica na qualidade da água;
2. O emprego da regressão linear múltipla permitiu conhecer a influência e a contribuição dos íons para determinação da CE;
3. Os elementos que apresentaram maior peso na determinação da condutividade foram os íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e o Cl^- para parte alta, enquanto que a parte baixa apenas os íons Cl^- e o HCO_3^- ;
4. Pelos índices aplicados, o modelo desenvolvido para

cada parte da bacia (alta e baixa) apresentou excelente precisão, com coeficiente de determinação (r^2) e índice de Willmott (id) maiores que 0,98; indicando um ótimo desempenho do modelo, enquanto o índice de confiança ($c > 0,90$) indica uma ótima precisão.

5. As estações amostrais podem ser divididas em dois grupos: um formado pelo os pontos (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 e P_5) parte alta da bacia, onde os valores observados para os íons sódio e cloreto se encontram abaixo do limite de restrição para uso na irrigação ($3 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$); e o outro composto pelos demais pontos amostrais (parte baixa), os quais apresentaram concentrações de sódio e de cloreto superiores ao limite para restrição de uso na irrigação.

Referências

- ANDRADE, E. M. et al. Modelagem da concentração de íons no extrato de saturação do solo, na região do Apodi. **Revista Ciência Agronômica**, v. 33, n. 02, p. 25-32, 2002.
- ANDRADE, E. M. et al. 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...** São Luís: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2004. 1 CD-ROM.
- ARRIAZA, M. et al. Assessing the visual quality of rural landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 69, n. 01, p. 115-125, 2004.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (FAO, Irrigação e Drenagem, 29)
- BATISTA, T. M. et al. Modelagem da estrutura iônica das águas da bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 01, p.1-6, 2006.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de estimativa da evapotranspiração potencial do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 05, n. 01, p. 89-97, 1997.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.crq4.org.br/downloads/resolucao357.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2008.
- COSTA, R. G.; GHEYI, H. R. Variação da qualidade da água de irrigação da microrregião homogênea de Catolé do Rocha, PB. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v. 19, n. 08, p. 1021-1025, 1984.
- D'ALMEIDA, D. B. A. et al. Importância relativa dos íons na salinidade de um cambissolo na Chapada do Apodi, Ceará. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 03, p. 615-621, 2005.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- FROTA JÚNIOR, J. J. et al. Influência antrópica na adição de sais no trecho perenizado da bacia hidrográfica do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 02, p. 142-148, 2007.
- GORAYEB, A. **Análise Geoambiental e dos Impactos na Bacia Hidrográfica do Rio Curu - Ceará - Brasil**. 2004. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza.
- LOPES, J. F. B. et al. Comparação de modelagens da composição iônica das águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: CBESA, 2007.
- MAGALHÃES, F. N. et al. Principais impactos nas margens do rio Bodoncoçó-PB, decorrentes da irrigação com águas poluídas com esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 71-75, 2002.
- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. Classificação da composição iônica de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 05, n. 01, p. 55-59, 2001.
- MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 526 p.
- PALÁCIO, H. A. Q. **Índice de qualidade de água na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu – Ce**. 2004, 95 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- PEREIRA, O. J. et al. Qualidade da água de irrigação dos perímetros irrigados do vale Curu e Morada Nova (de outubro de 1978 a 1980). **Revista de Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 14, n. (1/2), p. 69-89, 1983.
- RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 09, n. 01, p. 15-22, 2005.
- RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (Agricultural Handbook, 60).
- RODRIGUES, J. O. et al. Modelos da concentração iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 04, p. 360-365, 2007.
- SANTIAGO, M. M. F. Mecanismos de salinização em regiões áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré. 1984. 176 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade de São Paulo, São Paulo.
- 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**, v. 04, n. 01, p. 11-17, 1999.
- WANG, T. et al. Quantifying the availability and the stability of trace cationic elements in fly ash, **Waste Management**, v. 27, n. 10, p. 1345-1355, 2007.