



Proposta de índice da salinidade das águas superficiais de reservatórios do Ceará, Brasil

Salinity index approach of the surface water from reservoirs in Ceará, Brazil

**José Ribeiro de Araújo Neto^{1*}, Eunice Maia de Andrade², Ana Célia Maia Meireles³,
Maria João Simas Guerreiro⁴, Helba Araújo de Queiroz Palácio⁵**

Resumo - Objetivou-se com este estudo gerar um índice de salinidade (ISal) para classificar as águas dos reservatórios no Estado do Ceará, Brasil, empregando-se a técnica multivariada através análise de componentes principais (ACP). 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 807 coletas realizadas em 48 reservatórios georeferenciados. Os íons selecionados pela ACP e utilizados na elaboração do ISal foram: Cl⁻, Na⁺, Mg⁺² e a CE. Foram desenvolvidos mapas que identificam a escala de vulnerabilidade dos reservatórios e correspondentes sub-bacias quanto à salinidade. O íon que apresentou maiores restrições foi o Na⁺, seguido do Mg⁺², Cl⁻ e da CE. Os valores do ISal proposto variaram entre 40,6 e 95,3, que classificaram as águas entre moderada a alta restrição de uso. Distinguem-se três zonas geográficas no Estado com moderada a alta restrição quanto à salinidade das águas dos reservatórios. Uma região que apresenta alta restrição ao uso da água superficial de reservatórios para irrigação é composta por parte da bacia Metropolitana e do Médio Jaguaribe, região esta que apresenta maiores restrições em decorrência de altas salinidades. As outras duas regiões apresentam moderada restrição ao uso da água para irrigação, sendo que uma região envolve parte das bacias do Acaraú, Coreaú e Parnaíba e a outra é definida pela bacia do Salgado e parte do Alto Jaguaribe, sendo que as restrições moderadas são em virtude das baixas salinidades.

Palavras-chave - Irrigação. Índice de qualidade de água. Sais. Semiárido.

Abstract - This study aims to generate a salinity index (ISal) in order to classify the water storage of the reservoirs in Ceará, Brazil, using multivariate analysis by principal component analysis (PCA). The data were supplied by the Company of Water Resources Management of Ceará (COGERH) and cover the period of 1998/2009, with a total of 807 samples collected in 48 reservoirs spread throughout Ceará State. The ions selected by PCA and used in the preparation of ISal were: Cl⁻, Na⁺, Mg⁺² and EC. Maps were developed to identify which reservoirs and corresponding sub-basins were vulnerable to having high salinity levels. The ion which presented major restrictions was the Na⁺, followed by Mg⁺², Cl⁻ and EC. Values ranged from 40.6 ISal proposed and 95.3, which ranked the waters between moderate to high usage restriction. Three regions in the state are distinguished as having moderate to high restrictions because of the salinity levels in the reservoirs. The region with high restrictions on the use of surface water reservoirs for irrigation due to high salinity is the area formed by part of the Metropolitan basin and East Jaguaribe. The other two regions have only moderate restrictions on the use of water for irrigation because they have lower salinities. One is a region partially defined by the Acaraú, Coreau and Parnaíba basins, and the other is defined by the Salgado basin and Alto Jaguaribe.

Key words - Irrigation. Water quality index. Salts. Semi arid environment

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 27/08/2013 e aprovado em 09/06/2014

¹Mestre 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

²PhD, Profa. da Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC, eandrade@ufc.br

³Bolsista PNPd/CAPES, DENA/CCA/UFC, ameirole2003@yahoo.com.br

⁴Ph.D., Profa. da Faculdade de Ciências e Tecnologia, FCT/UFP, mariajoao@ufp.edu.pt

⁵Doutora em Engenharia Agrícola, DENA/CCA/UFC; Profa. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, *Campus* Iguatu, helbaraju23@yahoo.com.br

Introdução

O Nordeste do Brasil é marcado pela má distribuição das chuvas, que se concentram praticamente num único trimestre no ano. Deste modo, a utilização adequada e criteriosa dos recursos hídricos é primordial para o desenvolvimento da região. Nesse contexto, milhares de reservatórios foram construídos com a finalidade principal de armazenar água, especialmente, para os períodos de estiagem (CEARÁ, 2008). Durante o século XX, foram desenvolvidos no Nordeste projetos de irrigação, em decorrência da disponibilidade hídrica presente nos reservatórios, como um dos mecanismos de desenvolvimento da região, através da adoção da agricultura irrigada.

Embora os açúdes tenham contribuído significativamente para o abastecimento hídrico, um dos problemas mais graves dos reservatórios é a salinização. O conhecimento da composição iônica da água é primordial quando se deseja avaliar sua qualidade para fins agrônômicos e, mais especificamente, para uso na irrigação (MAIA *et al.*, 2001; ANDRADE *et al.*, 2006; MEIRELES, 2007). Segundo Ayers e Westcot (1999), um dos principais problemas de qualidade de água para irrigação é a salinidade, pois o excesso de sais no solo reduz a disponibilidade da água para as plantas.

Para se acompanhar a qualidade das águas é necessário o monitoramento, através de métodos simples, objetivos e interpretáveis que utilizem características peculiares de cada corpo hídrico. Nesse contexto, os índices de qualidade de água que indicam possíveis alterações (degradação ou recuperação) dos recursos hídricos no tempo e no espaço estão sendo bastante empregados (ANDRADE *et al.*, 2005; LOPES *et al.*, 2008; LOBATO *et al.*, 2008; MEIRELES *et al.*, 2010).

Índices de qualidade de água com base na opinião de especialistas e em métodos estatísticos são comumente citados na literatura, contemplando, no entanto, um certo grau de subjetividade, pois dependem da escolha das variáveis que constituirão os indicadores principais das alterações da qualidade de água. Por outro lado, como instrumentos de avaliação da evolução espacial e temporal da qualidade das águas para irrigação, estes índices permitem acompanhar as alterações ocorridas nos corpos hídricos de maneira direta através da conversão de informações variadas, em um único resultado numérico (ALMEIDA; SCHWARZBOLD, 2003; LOPES *et al.*, 2008; MEIRELES *et al.*, 2010).

A partir da aplicação de índices, a correlação de informação acerca da qualidade de água pode ser realizada utilizando-se Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na implementação e interpretação de dados para um

diagnóstico ambiental mais preciso, rápido e de menor custo (ANDRADE *et al.*, 2005; LEÃO *et al.*, 2004). O objetivo geral de um SIG é servir de instrumento eficiente para todas as áreas do conhecimento que fazem uso de mapas, possibilitando integrar em uma única base de dados, informação representando vários aspectos do estudo de uma região (LOPES *et al.*, 2008).

Nesse sentido, objetivou-se neste estudo gerar um índice de classificação da salinidade das águas superficiais (ISal), por meio da análise multivariada/análise de componentes principais para as águas superficiais de reservatórios do Estado do Ceará, Brasil.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado no Estado do Ceará, localizado entre as latitudes 02° 30' 00" e 08° 52' 00" S e as longitudes 37° 14' 00" e 41° 30' 00" W. Os 48 reservatórios (Figura 1) que foram suporte para esta pesquisa estão distribuídos em sub-bacias hidrográficas que compõem as 11 bacias hidrográficas do território cearense (CEARÁ, 2008).

Localizado na zona do "Polígono das secas", o Estado do Ceará é caracterizado por anos de baixos níveis pluviométricos anuais, sendo necessária, para assegurar uma produção agrícola em épocas de estiagem, a prática de irrigação. Com exceção do trecho ao longo da costa e das chapadas e pequenas serras, o clima em parte do território do Estado do Ceará é semiárido, com médias pluviométricas inferiores a 600 mm e irregularidade nas precipitações, o que ocasiona secas periódicas. Outra característica importante da região é a imprevisibilidade do início das estações chuvosas (PALÁCIO *et al.*, 2011).

A evapotranspiração potencial da região oscila entre 1.500 e 2.000 mm ano⁻¹ e as temperaturas médias anuais registram valores de 23 a 27 °C. A umidade relativa média é de 50% e o período de insolação chega a 2.800 h ano⁻¹. O Ceará pertence a duas províncias hidrogeológicas: o escudo oriental e a província costeira. Cerca de 70% da área do estado do Ceará é composta por embasamento cristalino, representando 21% do total do cristalino nordestino (500.000 km²), sendo caracterizada por solos de pequena espessura (≤ 2 m). Verificam-se bacias sedimentares no estado, como por exemplo as de Iguatu, do Apodi, do Araripe e da Ibiapaba. Para além dos aquíferos existentes nestas conformações, existem áreas de aluviões, e o sedimento costeiro, que é formado por sistemas de dunas, paleodunas e formação barreiras (SILVA *et al.*, 2007).

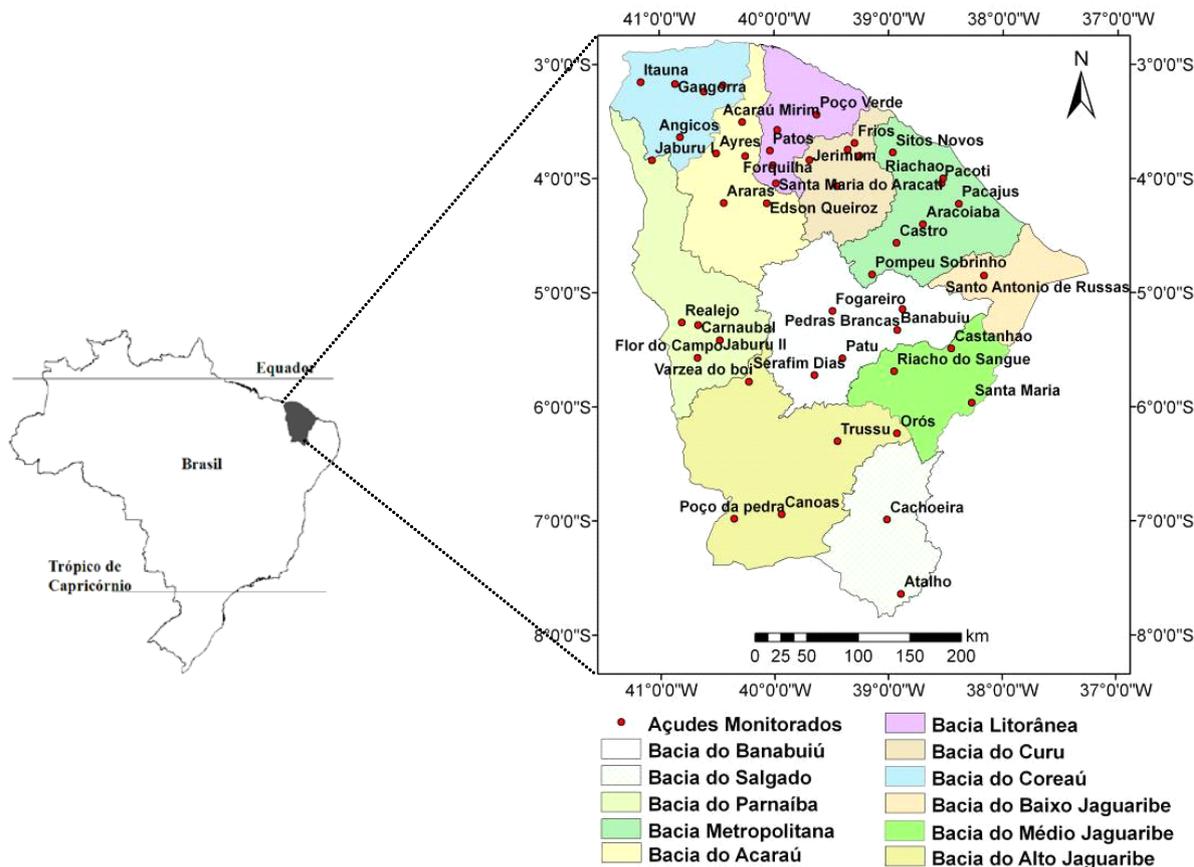


Figura 1 - Localização dos reservatórios estudados, inseridos no Estado do Ceará

Figure 1 - Location of the reservoirs, inserted in Ceará

Dados de qualidade da água

Os dados das concentrações químicas das águas dos açudes, para o período de 1998/2009, num total de 807 amostras utilizados no presente estudo, foram provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) disponibilizados ao Instituto Nacional Científico Tecnológico em Salinidade/ UFC - INCTSal. Os atributos químicos considerados nesse estudo foram os teores de: cloreto (Cl⁻), cálcio (Ca⁺²), magnésio (Mg⁺²), sódio (Na⁺), bicarbonato (HCO₃⁻) e a condutividade elétrica (CE). Os açudes monitorados na área do estudo foram georeferenciados por intermédio de GPS de Navegação.

Índice de Salinidade de Água (ISal)

A salinidade das águas de reservatório foi avaliada com base no índice proposto por Meireles *et al.* (2010). Este índice identifica os parâmetros que contribuíram para a maior explicabilidade na salinidade da água por meio da Análise Multivariada/Análise de Componentes Principais (APC) e posteriormente pondera o valor de cada parâmetro (q_i) através do seu peso correspondente de agregação (w_i). Portanto, na primeira etapa, identificou-se os

parâmetros que contribuíram para a maior explicabilidade na salinidade da água de irrigação por meio da Análise Multivariada/Análise de Componentes Principais (APC) e na segunda etapa, os valores de medidas da qualidade para cada parâmetro (q_i) e os pesos de agregação (w_i) foram determinados, seguindo a metodologia proposta por Meireles *et al.* (2010) em classificação para irrigação das águas superficiais da bacia do Acaraú, Ceará.

O índice de salinidade das águas dos reservatórios foi calculado através da Equação (1).

$$ISal = \sum_{i=1}^n q_i w_i \tag{1}$$

ISal: índice de salinidade das águas, um número adimensional entre 0 e 100; q_i: qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, em função de sua concentração ou medida; w_i: peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, atribuído em função da sua importância para a explicação da variação global da qualidade, isto é, um número entre 0 e 1.

O índice de salinidade de água (ISal), foi dividido em 5 classes, indicado na Tabela 1. Os limites foram baseados em estudos de índices de qualidade de água

Tabela 1 – Limites e restrições das classes do ISal para os reservatórios do Ceará**Table 1** - Limits and restrictions of the Class Isal for reservoirs to Ceará

Faixa	Classificação da Salinidade	Cor/Mapas
$100 \leq \text{ISal} \leq 85$	Sem restrição	
$85 < \text{ISal} \leq 70$	Baixa restrição	
$70 < \text{ISal} \leq 55$	Moderada restrição	
$55 < \text{ISal} \leq 40$	Alta restrição	
$40 < \text{ISal} \leq 0$	Restrição Severa	

existentes, e as classes foram definidas considerando o risco de salinidade e a toxidez às plantas, semelhante à classificação apresentada por Meireles *et al.* (2010).

Aplicação do SIG para geração dos Mapas

Através de técnicas de geoprocessamento e com base nos valores de qualidade (q_i) gerados, desenvolveram-se as matrizes de q_i através do método de interpolação por krigagem e variograma linear utilizando o software surfer v. 8.0. Adotou-se este método uma vez que os coeficientes de correlações foram superiores a 0,6 expressando a veracidade dos modelos. De posse das matrizes de pontos, foram construídos mapas relativos ao q_i de cada variável no software ArcGIS 9.3. Os mapas do ISal para o Estado do Ceará foram desenvolvidos a partir da Equação 1 em processo interativo com o software ArcGIS 9.3 através da ferramenta ArcToolbox, Analyst Tools e Map Álgebra. Processo semelhante foi empregado por Andrade *et al.* (2006) e por Lopes *et al.* (2008).

Resultados e discussões

Análise Multivariada/Análise de Componentes Principais

A matriz de correlação composta pelas variáveis analisadas pode ser vista na Tabela 2. Da referida matriz observa-se que as variáveis estudadas, à exceção do Ca^{2+} , apresentaram correlação superior a 0,5 com pelo menos três outras variáveis, expressando uma forte relação, como indicado por Helena *et al.* (2000) e Andrade *et al.* (2007).

Quando da extração dos fatores, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi aquele composto por dois fatores com as raízes características superiores à uma unidade. Esses fatores comuns e independentes (componente principal) reduzem a dimensão de variáveis interrelacionadas para dimensões menores, de modo a

explicar a variabilidade dos dados originais (ANDRADE *et al.*, 2007; MEIRELES *et al.*, 2010). Os pesos fatoriais atribuídos a cada componente, as comunalidades de cada variável e a variância explicada após a aplicação do algoritmo podem ser observados na Tabela 3. Verifica-se que o primeiro componente (CP1) e o segundo componente (CP2) explicaram, respectivamente, 57,28 e 26,77% da variância total dos dados, concentrando, em duas dimensões, 84,04% da informação antes observada em sete dimensões. Cada uma das variáveis selecionadas contribuem em pelo menos com 72% na explicabilidade das componentes, uma vez que o menor valor da comunalidade foi de 0,723 para o Cálcio. Maiores detalhes da aplicação e resultado da Análise Multivariada/Análise de Componentes Principais (APC) em salinidade de águas superficiais podem ser verificados em Palácio *et al.* (2011).

Pesos w_i para avaliação do ISal

Com os resultados obtidos pela Análise Multivariada/Análise de Componentes Principais (APC) foram definidos os pesos de cada variável (w_i), sendo extraídos do primeiro fator/componente da matriz transformada (*varimax*) (ANDRADE *et al.*, 2007). O valor do peso foi, então, ponderado em função da variância do primeiro fator associado à explicabilidade de cada parâmetro, em relação à este fator. Em seguida, foi calculado o valor de w_i para cada parâmetro, de forma a que a soma de todos os w_i fosse igual a 1,0 (Tabela 4). A variável de maior peso foi o Cl⁻ seguido da CE, Na⁺ e Mg⁺². Estes ions apresentam a maior carga fatorial, ou seja, são os elementos determinantes da qualidade de água. A presença dos parâmetros Cl⁻ e Na⁺, com o Cl⁻ apresentando o maior peso w_i , aponta para o carreamento de sais de Na⁺ e Cl⁻ típico do embasamento cristalino, estrutura geológica que conglomerada 70% do estado do Ceará (PALÁCIO *et al.*, 2011). 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

Tabela 2- Matriz de correlação de Pearson das variáveis analisadas nas águas dos açudes do Ceará**Table 2 -** Pearson correlation matrix of the variables in the waters of the dams of Ceará

Cl ⁻	Mg ⁺²	Na ⁺	CE	Ca ⁺²	HCO ³⁻	
Cl ⁻	1					
Mg ⁺²	<u>0,831</u>	1				
Na ⁺	<u>0,883</u>	<u>0,711</u>	1			
CE	<u>0,916</u>	<u>0,839</u>	<u>0,859</u>	1		
Ca ⁺²	0,418	0,367	0,390	0,454	1	
HCO ³⁻	0,281	0,260	0,335	0,342	<u>0,505</u>	1

¹ Os valores sublinhados correspondem aos coeficientes de correlações entre as variáveis superiores a 0,5

¹ The underlined values correspond to the correlation coefficients between the variables higher than 0.5

Tabela 3- Valores das comunalidades e fatores das componentes das matrizes na extração após a rotação pelo algoritmo varimax**Table 3 -** Values of the commonalities of factors and components of the matrices extraction after rotation by varimax algorithm

Variáveis	CP1	CP2	Comunalidades
Cl ⁻	<u>0,950</u>	0,191	0,939
Mg ⁺²	<u>0,888</u>	0,155	0,813
Na ⁺	<u>0,889</u>	0,230	0,843
CE	<u>0,929</u>	0,258	0,930
Ca ⁺²	0,277	<u>0,804</u>	0,723
HCO ³⁻	0,119	<u>0,883</u>	0,794
Autovalor	3,44	1,61	
Variância Explicada %	57,28	26,77	
Variância Acumulada %	57,28	84,04	

¹ Os valores sublinhados correspondem a qual componente está o maior peso fatorial de cada variável

¹ Underlined values correspond to which component is the biggest factor weight of each variable

Tabela 4 - Pesos para os respectivos valores dos parâmetros selecionados para o ISal**Table 4 -** Weights for the respective values of the parameters selected for the ISal

Variáveis	wi
Cl ⁻	0,260
CE	0,254
Na ⁺	0,243
Mg ⁺²	0,242
Total	1,000

de origem. Por se tratar de um Estado com considerável área litorânea, não se deve descartar, também, a influência 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).

Qualidade q_i para avaliação do ISal

Os limites para o enquadramento dos valores de medida de cada parâmetro de qualidade q_i (qualidade do i -ésimo parâmetro) estão apresentados na Tabela 5 e foram determinados com base nos padrões de qualidade de água para irrigação proposto pelo University of California

Tabela 5 - Valores limites definidos para os parâmetros utilizados no cálculo de q_i **Table 5** - Limit values set for the parameters used in the calculation of q_i

q_i	CE (dS m ⁻¹)	Cl ⁻ (mmol _c L ⁻¹)	Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	Mg ⁺² (mmol _c L ⁻¹)
85-100	0,200 ≤ CE < 0,750	1 ≤ Cl ⁻ < 4	2 ≤ Na ⁺ < 3	1 ≤ Mg ⁺² < 9
60-85	0,750 ≤ CE < 1,500	4 ≤ Cl ⁻ < 7	3 ≤ Na ⁺ < 6	9 ≤ Mg ⁺² < 12
35-60	1,500 ≤ CE < 3,000	7 ≤ Cl ⁻ < 10	6 ≤ Na ⁺ < 12	12 ≤ Mg ⁺² < 15
0-35	CE < 0,200 ou CE ≥ 3,000	Cl ⁻ < 1 ou Cl ⁻ ≥ 10	Na ⁺ < 2 ou Na ⁺ ≥ 9	Mg ⁺² < 1 ou Mg ⁺² ≥ 15

Committee of Consultants – UCCC e nos critérios estabelecidos por Ayers e Westcot (1999). A qualidade da água para cada parâmetro foi representada por um número adimensional que variou de 0 a 100, de modo que quanto maior o valor, melhor a qualidade da água para aquele parâmetro. Critérios similares para desenvolvimento dos q_i foram utilizados por Meireles *et al.* (2010) nas águas superficiais da bacia do Acaraú, Ceará.

Mapas de q_i

Na Figura 2 verifica-se os mapas dos q_i para o Estado do Ceará dos indicadores Cloreto (Figura 2A) e Sódio (Figura 2B).

Os valores de q_i para o Cl⁻, calculados a partir dos resultados de suas concentrações nos reservatórios estudados, variaram de 10 à 99,8 (Figura 2A), apresentando 67,8% dos valores de q_i entre 85 e 100. Tais resultados mostram menores riscos de uso da água para irrigação em comparação com os valores de q_i para o Na⁺, uma vez que os valores variaram entre 16 e 99,3 (Figura 2B).

Quanto ao parâmetro Cl⁻, observa-se na Figura 2A a existência de duas regiões com alta restrição ao uso da água na irrigação. Uma engloba parte das bacias Metropolitana, Banabuiú e Baixo e Médio Jaguaribe e, a outra, engloba a bacia do rio Salgado. A primeira zona de alta restrição quanto ao Cl⁻ é caracterizada por apresentar baixos valores do q_i em decorrências de elevadas concentrações desse parâmetro, principalmente nos reservatórios Pompeu Sobrinho, Castro, Forrageiro e Pedras Brancas. Altas concentrações de cloreto também foram observadas por Andrade *et al.* (2010). Concentrações de cloreto (Cl⁻ > 3 mmol_c L⁻¹) podem ocasionar toxidez à maioria das culturas, bem como gerar problemas de salinização do solo. Espécies iônicas como o cloreto, quando presentes em concentrações elevadas na água, podem causar danos às culturas reduzindo a produtividade. A intensidade do dano depende, basicamente, da concentração do íon, do tempo de exposição, da sensibilidade das plantas e do uso da água pelas culturas (AYERS; WESTCOT, 1999). De acordo com Ayers e Westcot (1999), elevados teores de Cl⁻ podem ser tóxicos para diversas culturas, e que a irrigação por aspersão pode ocasionar problemas de

queima das folhas e consequentes perdas de produtividade. É necessário, pois, analisar se tais problemas poderão ser agravados no semiárido pelas elevadas temperaturas e baixa umidade do ar durante o período seco, quando ocorrem elevadas taxas de evapotranspiração das plantas, resultando em uma maior concentração estes elementos na superfície foliar.

Já a segunda zona de restrição quanto ao Cl⁻, é consequência das baixas concentrações de Cl⁻ para os reservatórios Atalho e Cachoeira que fazem parte da bacia do Salgado. Baixas concentrações de sais podem afetar o balanço de sais e a estabilidade dos agregados do solo, podendo levar a problemas de redução da infiltração, redução da condutividade hidráulica e/ou presença de crosta superficial (PEARSON, 2003).

Considerando-se o mapa do Na⁺ (Figura 2B), observa-se que baixos valores de q_i foram verificados em grande parte do Estado. Esse fato é atribuído as baixas concentrações de Na⁺, notadamente < 2 mmol_c L⁻¹ que gera baixos valores dos pesos q_i (Tabela 5). Esses valores de concentrações foram verificados principalmente nas regiões de drenagem de água em estruturas geológicas sedimentares como as meso-regiões da Ibiapaba, Apodi, Araripe e Costeiras. Baixas concentrações de Na⁺ quando associados a baixas salinidades podem provocar problemas severos de sodificação dos solos (ANDRADE *et al.*, 2006). Limitações de uso para irrigação em águas superficiais quanto aos íons cloreto e sódio de acordo com os limites estabelecidos por Ayers e Westcot (1999) foram observados por Lobato *et al.* (2008) avaliando a sazonalidade na qualidade da água do Distrito Irrigado Baixo Acaraú, Ceará.

Pelos mapas de q_i para os parâmetros Mg⁺² e CE (Figura 3), observa-se que os pesos de q_i para Mg⁺² variaram entre 9,8 a 99,7 e duas regiões de restrições distintas são detectadas no Ceará, uma que contempla reservatórios das bacias do Acaraú, Parnaíba e Coreau e outra com reservatórios das bacias do Salgado e Alto Jaguaribe (Figura 3A). Essas áreas estão marcadas da cor vermelha e representam 29,7% do Estado. Ambas se caracterizam por apresentarem baixas concentrações de

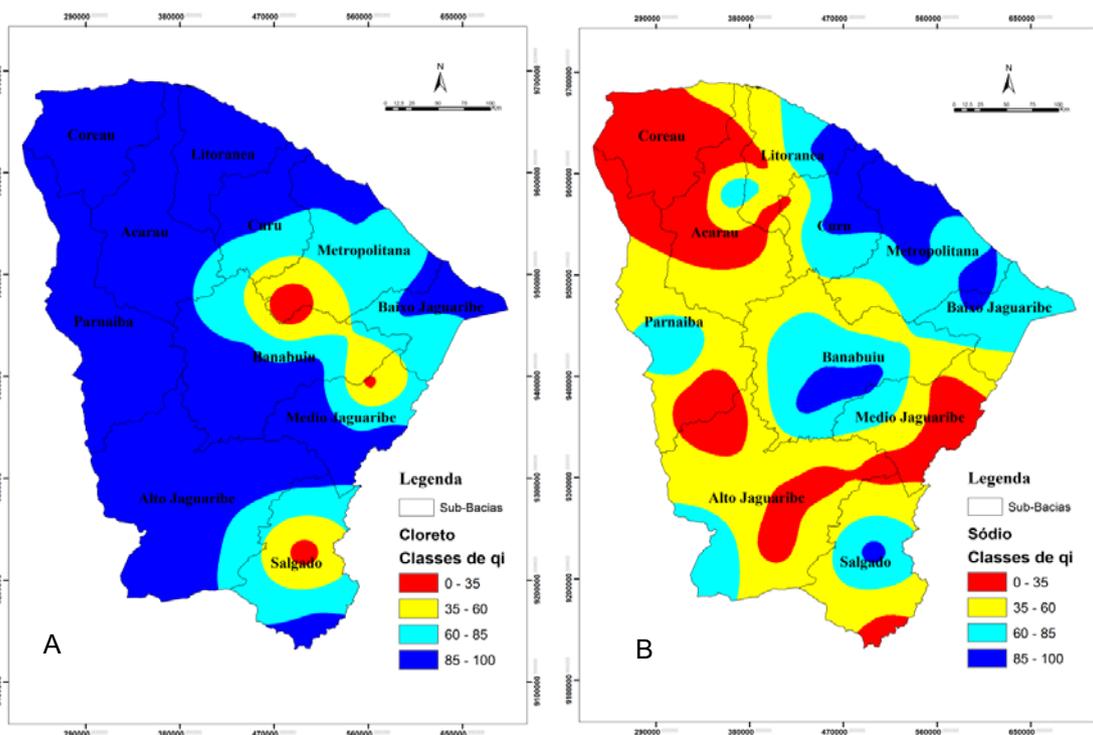


Figura 2 - Mapas dos q_i para o Estado do Ceará, (A) Cloreto e (B) Sódio
Figure 2 - Maps of q_i to the state of Ceará, (A) Chloride and (B) Sodium

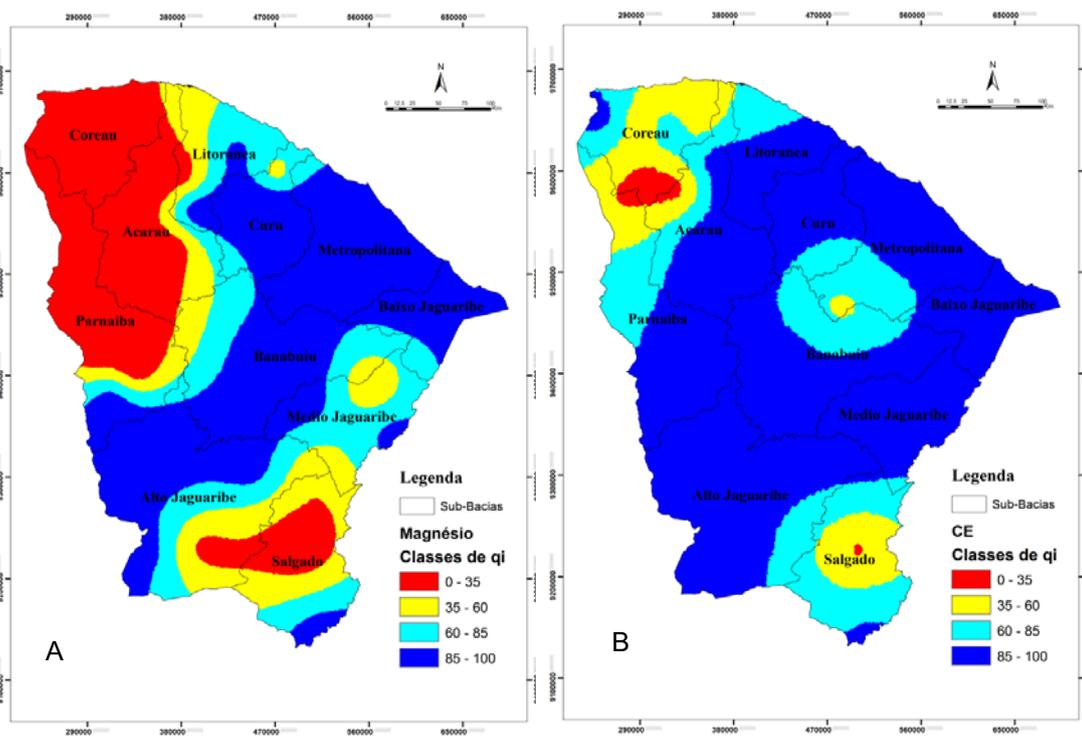


Figura 3 – Mapas dos q_i para o Estado do Ceará, (A) Magnésio e (B) CE
Figure 3 - Maps of q_i to the state of Ceará (A) Magnesium and (B) EC

Mg^{+2} que, em termos de salinidade, pode ser um grave risco para uso na irrigação pelo fato de comprometer a relação $Na/Ca+Mg$, sendo que baixas concentrações de Mg^{+2} pode potencializar o efeito dispersante do sódio.

Os valores de q_i para a CE variaram de 27,8 a 99,8 (Figura 3B) com 40 reservatórios apresentando valores de q_i entre 85-100, no entanto, áreas com águas de altas restrições quanto a condutividade elétrica foram verificadas em áreas da parte alta da bacia metropolitana e estão associadas aos elevados valores de CE para os açudes Pompeu Sobrinho ($CE = 2,15 \text{ dS m}^{-1}$) e Castro ($CE = 1,07 \text{ dS m}^{-1}$). A alta evaporação potencial do semiárido favorece a concentração de sais e junto com o superdimensionamento do reservatório Pompeu Sobrinho, que ocasiona longos períodos sem renovação das águas por extravasamento, sendo a última ocorrida em 1974, o que proporciona o acúmulo de sais (PALÁCIO *et al.*, 2011).

Além de áreas da bacia Metropolitana, elevadas restrições quanto a CE também foram observadas em áreas das bacias ao norte do Estado: Coreaú, Acaraú, Parnaíba e em pequenas áreas na bacia do Salgado. Para essas bacias as elevadas restrições são decorrentes dos baixos valores de CE da água ($< 0,200 \text{ dS m}^{-1}$) o que gera valores dos pesos $q_i < 35$ sendo considerado alta restrição devido ao fato das águas com baixa salinidade promoverem a lixiviação de sais. Condições observadas neste ponto concordam com Scaloppi e Britto (1986) quando afirmam que as águas com CE inferior a $0,500 \text{ dS m}^{-1}$ e, particularmente, abaixo de $0,200 \text{ dS m}^{-1}$ tendem a lixiviar os sais e minerais solúveis, reduzindo sua influência sobre a estabilidade dos agregados e estrutura do solo. Assim, problemas relativos à infiltração presente em áreas irrigadas não são causados pelo efeito da RAS elevada, invariavelmente, podem ser decorrentes de águas com salinidade muito baixa, como relatados por Maia *et al.* (2001); Meireles *et al.* (2007) e Arraes *et al.* (2009).

Mapa do Índice de Salinidade (ISal)

A qualidade da água em forma de um índice apresenta grande vantagem de ser facilmente assimilável pela comunidade, pois os resultados são expressos em forma de números adimensionais entre zero (qualidade muito ruim, ou seja, inadequada) e 100 (água excelente, ou seja, água sem e/ou com baixa restrição de uso). O Índice de Salinidade proposto para as águas dos reservatórios do Estado do Ceará apresentou valores variando entre 40,6 e 95,3 (Figura 4), com percentuais para as classes salinidade (Tabela 1) de: 23,1% sem restrição, 33,4% baixa restrição, 28,9% moderada restrição, 14,6% alta restrição e 0% severa restrição. Lopes *et al.* (2008) estudando o Índice de Qualidade de Água para a bacia do Acaraú, Ceará observou índice variando entre 60,79 e 80,28. Já Melo Júnior *et al.*

(2003), estudando a hidroquímica e a qualidade das águas de um trecho do rio Açu, Rio Grande do Norte, encontraram valores de IQA variando de 59 a 85. Valores mais baixos do ISal e restrições de alta a moderada foram verificadas em 3 áreas distintas do Estado do Ceará marcadas da cor verde e amarela: a primeira zona engloba parte das bacias Metropolitana e Médio Jaguaribe; a segunda zona envolve as bacias do Acaraú, Coreaú e Parnaíba e a terceira corresponde a praticamente toda a bacia do Salgado e parte do Alto Jaguaribe (Figura 4).

Restrições moderadas a alta, de acordo com as classes da Tabela 1, verificadas para parte da bacia Metropolitana e do Médio Jaguaribe devem-se aos elevados valores de sais verificados, principalmente o Cl^- ($7,8 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$), Na^+ ($4,7 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$) e a CE ($0,91 \text{ dS m}^{-1}$) o que definem os baixos valores dos pesos q_i e consequentemente do ISal. Elevadas concentrações de sais verificadas nessa zona dá-se devido às características dos reservatórios Castro, Perdas Branca e Pompeu Sobrinho. As altas salinidades para o açude Castro ($CE = 1,07 \text{ dS m}^{-1}$) pode estar associada a pressão da cidade de Itapiúna que aliado às águas novas nas primeiras coletas, pois o reservatório foi concluído em 1997, pouco tempo antes do início do monitoramento, pode agravar a concentração de sais pela ação antrópica Frota Junior *et al.* (2007). Para o açude Pedras Brancas ($CE = 1,08 \text{ dS m}^{-1}$), as elevadas concentrações deve estar associadas ao modo de operação do reservatório que, aliado à elevada taxa de evaporação potencial das águas no semiárido no período de estiagem ($1.500 \text{ a } 2.000 \text{ mm ano}^{-1}$), promovem a concentração dos sais. Já o Pompeu Sobrinho ($CE = 2,15 \text{ dS m}^{-1}$) é o de maior problema de salinidade no Estado, devendo-se ao fato do superdimensionamento do açude, que ocasiona longos períodos sem renovação das águas, agravando o processo de acumulação de sais ao longo do tempo proporcionado pela evaporação (PALÁCIO *et al.*, 2011).

Restrições moderadas a alta, verificadas para as bacias do Acaraú, Coreaú e Parnaíba ao Norte do Estado e para as bacias do Salgado e parte do Alto Jaguaribe ao Sul do Estado, devem-se as baixas salinidades verificadas nessas zonas. Baixos valores de salinidade podem resultar em lixiviação dos sais, o que torna um risco para o uso na irrigação. Essas baixas salinidades nessas zonas: Acaraú ($CE = 0,20 \text{ dS m}^{-1}$), Coreaú ($CE = 0,18 \text{ dS m}^{-1}$), Parnaíba ($CE = 0,28 \text{ dS m}^{-1}$), Salgado ($CE = 0,27 \text{ dS m}^{-1}$) e Alto Jaguaribe ($CE = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$) deve-se ao fato da maior diluição dos sais nessas regiões, que são de acordo com Caitano *et al.* (2011) regiões de maiores precipitações no Estado. A diluição dos sais para níveis de $CE < 0,200 \text{ ds m}^{-1}$, Cl^- e $Mg^{+2} < 1 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ e $Na^+ < 2 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ provocam baixos valores dos pesos q_i (Tabela 5), ocasionando uma moderada a alta restrição. Autores como Freire *et al.* (2003), Andrade *et al.* (2006) e Meireles *et al.* (2007)

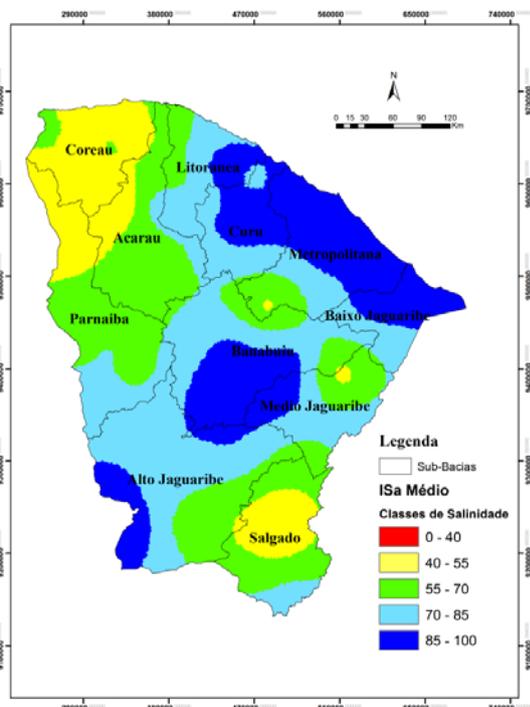


Figura 4 – Índice de Salinidade das águas superficiais dos reservatórios do Estado do Ceará enquadrado na classificação da Tabela 1

Figure 4 - Index of Salinity of surface water reservoirs of the State of Ceará framed in the classification of Table 1

apontam a necessidade de um controle criterioso da água usada na irrigação quando a CE apresentam valores inferior a (0,2 dS m⁻¹).

Na Tabela 6, são apresentados os dados estatísticos da variação nas estações secas e chuvosas das médias do ISal para o Estado do Ceará. Observa-se que não houve diferença significativa ao nível de 1% entre as estações. No entanto, o valor médio do ISal da estação seca foi inferior o valor médio da estação chuvosa, quanto menor o ISal maior a restrição. Na época de estiagem os açudes estão em seu nível mais baixo, resultando em uma maior concentração dos sais em decorrência do processo de evaporação (MEIRELES *et al.*, 2007; LOBATO *et al.*, 2008). Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade *et al.* (2005) elaborando um índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará, Lopes *et al.* (2008) na bacia do rio Acaraú, Ceará, que observaram o pior IQA na estação seca e por Lobato *et al.* (2008) avaliando a sazonalidade na qualidade da água de irrigação do Distrito Irrigado Baixo Acaraú, Ceará. A variação sazonal das águas dos reservatórios do Ceará

Tabela 6 - Comparação de médias do ISal entre a estação chuvosa e a seca para o Ceará

Table 6 - Comparison of averages Isal between rainy season and dry for Ceará

Estação	n	Média do ISAL	Desvio Padrão	t	Sig.
Chuvosa	48	71,2 (a)	14,1	0,124	0,189
Seca	48	70,3 (a)	16,9		

Nível de significância a 1%.

Significance level of 1%.

apresenta valor do ISal de 70,3 e 71,2 para as estações seca e chuvosa, respectivamente. Ambos os valores do ISal são classificados como baixa restrição para uso na irrigação.

Conclusões

O íon Na⁺ determinou mais áreas de restrições em todo o Estado em decorrência de baixas concentrações que quando associados a baixas salinidades podem provocar problemas severos de sodificação dos solos, seguidos na ordem de restrição por Mg, Cl e CE;

A aplicação do ISal proposto variou entre 40,6 e 95,3 mostrando que as águas do Estado do Ceará enquadram-se em classes que variam de sem restrição a alta restrição;

Três zonas geográficas no Estado do Ceará de restrição quanto a salinidade foram observadas: a primeira com alta restrição englobando parte das bacias Metropolitana e Médio Jaguaribe em decorrência de altas salinidades; a segunda com moderada restrição que envolve as bacias do Acaraú, Coreaú e Parnaíba e a terceira também com moderada restrição a do Salgado e parte do Alto Jaguaribe em virtude das baixas salinidades;

Não houve diferença significativa na avaliação sazonal no Índice de Salinidade (ISal) das águas superficiais dos reservatórios do Ceará.

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

- ALMEIDA, M. B.; SCHWARZBOLD, A. Avaliação sazonal da qualidade das águas do Arroí da Cria Montenegro, RS com aplicação de um índice de qualidade de água (IQA). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1 p. 81-97, 2003.
- ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; CRISÓSTOMO, L. A.; SOUZA, I. H.; TEIXEIRA, A. S. Índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 36, n. 2, p. 135-142, 2005.
- ANDRADE, E. M.; BATISTA, T. M.; TEIXEIRA, A. S.; MEIRELES, M.; SOUSA, B. F. S. Mapa de vulnerabilidade da bacia do Acaraú, Ceará, à qualidade das águas de irrigação, pelo emprego do GIS. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 37, n. 03, p. 279-286, 2006.
- ANDRADE, E. M.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. O. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, v. 37, n. 6, p. 1791-1797, 2007.
- ANDRADE, E. A.; AQUINO, D. N.; CRISÓSTOMO, 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@ambiente On-line**, v. 4, n. 1, p. 11-19, 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 Agrônômica**, v. 40, n. 03, p. 346-355, 2009.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura: estudos, irrigação e drenagem**. Manual FAO 29. 2 ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.
- CAITANO, R. F.; LOPES, F. B.; TEIXEIRA, A. S. Estimativa da aridez no Estado do Ceará usando Sistemas de Informação Geográfica. In: **Anais... XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, Curitiba-PR, INPE p. 8904. 30 de abril a 05 de maio de 2011.
- CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. **Cenário Atual dos recursos hídricos do Ceará**. Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos (Coleção Pacto das Águas); Eudoro Walter de Santana (Coordenador) – Fortaleza: INESP, 174 p., 2008.
- FREIRE, M. B. G. S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 227-232, 2003.
- 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, Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 2, p. 142-148, 2007.
- HELENA, B.; PARDO, R.; VEGA, M.; BARRADO, E.; FERNANDEZ, J. M. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. **Water Research**, v.34, n.3, p.807-816, 2000.
- LEÃO, R. A. O. Identificação de bacias hidrográfica com características físicas similares no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 35, n. 1, p. 26-35, 2004.
- 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 Agrônômica**, v. 39, n. 1, p. 167-172, 2008.
- LOPES, L. B.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; AQUINO, D. N.; ARAÚJO, L. F. P. Mapa da qualidade das águas do rio Acaraú, pelo emprego do IQA e Geoprocessamento. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 3, p. 392-402, 2008.
- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA M. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 55-59, 2001.
- MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; CHAVES, L. C. G.; FRISCHKORN, H.; CRISÓSTOMO, L. A. A new proposal of the classification of irrigation water. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 41, n. 3, p. 349-357, 2010.
- 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 Agrônômica**, v. 38, n. 1, p. 25-31, 2007.
- MELO JUNIOR, G.; COSTA, C. E. F. S.; CABRAL NETO, I. Avaliação hidroquímica e da qualidade das águas de um trecho do rio Açú, Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, v. 16, n. 2, p. 27-37, 2003.
- PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; SANTOS, J. C. N.; 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**, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.
- PEARSON, K. E. **The basics of salinity and sodicity effects on soil physical properties**. Disponível em: <http://waterquality.montana.edu/docs/methane/basics_highlight.shtml>. Acesso em: 14 de out 2006.
- QUEIROZ, G. H. **Salinização em açudes no município de Tauá-CE**. 2000. 118f. Dissertação (Mestrado - Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2000.
- SCALOPPI, E. D.; BRITTO, R. A. L. **Qualidade da água e do solo para irrigação**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 139, p. 80-94, 1986.
- SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L.; SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. **Revista Tecnologia**, v. 28, n. 2, p. 136-159, 2007.
- SILVA JÚNIOR, J. N.; SOUSA, A. R.; SÁ, V. A. L. 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**, v. 4, n. 2, p.189-193, 2000.