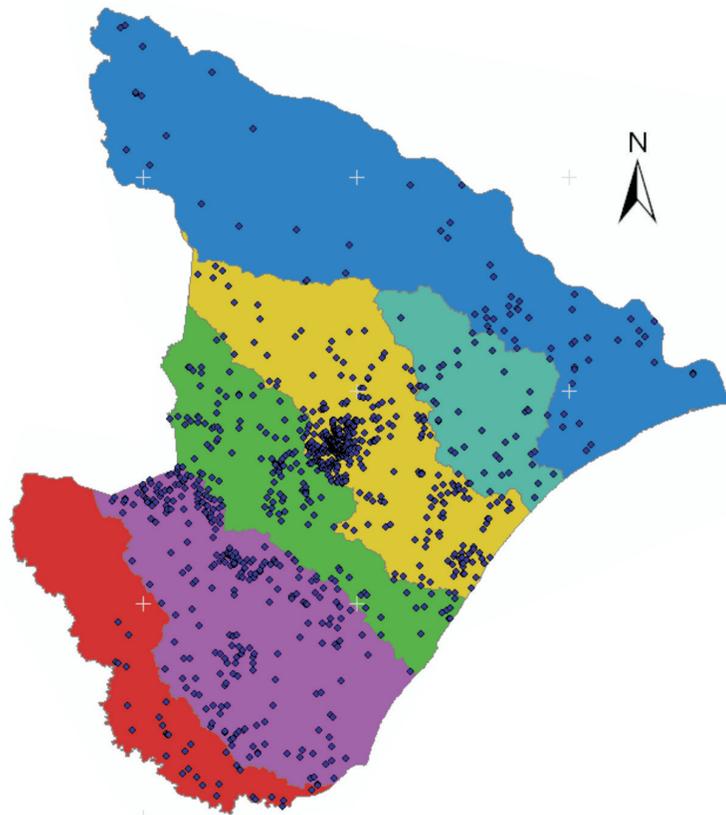


**Regionalização de parâmetros de
qualidade das águas
subterrâneas para irrigação
no Estado de Sergipe**





ISSN 1678-1961

Dezembro, 2008

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 36

Regionalização de parâmetros de qualidade das águas subterrâneas para irrigação no Estado de Sergipe

Marcus Aurélio Soares Cruz

Ronaldo Souza Resende

Julio Roberto Araujo de Amorim

Aracaju, SE
2008

Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline>

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Av. Beira Mar, 3250, Aracaju, SE, CEP 49025-040

Caixa Postal 44

Fone: (79) 4009-1344

Fax: (79) 4009-1399

www.cpatc.embrapa.br

sac@cpatc.embrapa.br

Comitê Local de Publicações

Presidente: Ronaldo Souza Resende

Secretária-Executiva: Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues

Membros: Semíramis Rabelo Ramalho Ramos, Julio Roberto Araujo de Amorim, Ana da Silva Lédo, Daniel Luis Mascia Vieira, Maria Geovânia Lima Manos, Ana Veruska Cruz da Silva Muniz, Hymerson Costa Azevedo.

Supervisora editorial: Raquel Fernandes de Araújo Rodrigues

Normalização bibliográfica: Josete Cunha Melo

Tratamento de ilustrações: Thamara Cristina Tojal Gomes

Editoração eletrônica: Thamara Cristina Tojal Gomes

1ª edição

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Tabuleiros Costeiros

Cruz, Marcus Aurélio Soares

Regionalização de parâmetros de qualidade das águas subterrâneas para irrigação no estado de Sergipe / Marcus Aurélio Soares Cruz, Ronaldo Souza Resende, Julio Roberto Araujo de Amorim. -- Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2008.

58 p. : il. - (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN1678-1961; 36).

Disponível em [//www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline](http://www.cpatc.embrapa.br/index.php?idpagina=fixas&pagina=publicacoesonline)

1. Recurso hídrico. 2. Água subterrânea. 3. Irrigação. 4. Água Salinização. 5. Água – Qualidade. 6. Água – Uso. 7. Sergipe. I. Resende, Ronaldo Souza. II. Amorim, Júlio Roberto Araujo. III. Título. IV. Série.

CDD 333.91

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	8
Material e Métodos	10
Resultados e Discussão	14
Conclusões	56
Referências Bibliográficas	57

Regionalização de parâmetros de qualidade das águas subterrâneas para irrigação no Estado de Sergipe

*Marcus Aurélio Soares Cruz¹, Ronaldo Souza Resende¹,
Julio Roberto Araujo de Amorim¹*

Resumo

Os recursos hídricos subterrâneos constituem-se em reserva estratégica de água para suprimento das demandas atuais e futuras, no entanto, os mecanismos de gestão da sua exploração ainda não estão definidos claramente no Brasil. O uso das águas subterrâneas para irrigação de culturas requer uma avaliação dos riscos potenciais associados à qualidade da água que poderão acarretar problemas relacionados, principalmente, à degradação dos solos pela salinização, toxicidade às culturas e ao entupimento em sistemas de irrigação localizada. A qualidade das águas subterrâneas no Estado de Sergipe apresenta grande variabilidade espacial e o seu potencial de uso ainda é pouco explorado devido principalmente à inexistência de informações organizadas. Este estudo objetiva caracterizar a distribuição espacial de alguns parâmetros de qualidade da água subterrânea que funcionem como indicadores dos potenciais riscos do uso deste recurso para irrigação no Estado de Sergipe por meio de técnicas de geoprocessamento, contribuindo assim com a organização de informações que sirvam de subsídio para um melhor planejamento do manejo das águas subterrâneas no Estado.

¹ Pesquisador Embrapa Tabuleiros Costeiros, Av Beira Mar, 3250 B. 13 de Julho 49025-040 Aracaju-SE
mascruz@cpatc.embrapa.br

6 Regionalização de parâmetros de qualidade das águas subterrâneas para irrigação no Estado de Sergipe

Regionalization of groundwater quality parameters for irrigation purposes in Sergipe State

Abstract

Underground water resources represent a strategic water stock supplying present and future water demands, however the control instruments for groundwater exploration are not clearly established in Brazil. Crop irrigation with groundwater require an evaluation of potential risks related to water quality, including soil salinization, crop toxicity and obstruction of localized irrigation systems. In Sergipe State, the groundwater presents high spatial variability in quality and quantity, and remains with little exploration, because the lack of organized information mainly. This study aims to analyze spatial distribution of groundwater quality parameters working like potential risks indicators to groundwater use for crops irrigation in Sergipe State. For this, GIS tools will be applied, producing organized data base of groundwater quality making possible to improve water management in Sergipe State.

Introdução

Os recursos hídricos subterrâneos constituem-se em reserva estratégica de água para suprimento das demandas atuais e futuras, uma vez que representam uma quantidade cerca de 100 vezes maior que as águas superficiais no mundo (Borghetti et. al, 2004). No entanto, a importância desse recurso não tem sido acompanhada por uma preocupação com a gestão da sua exploração, principalmente no que se refere às vazões exploradas e à qualidade das águas utilizadas.

O planejamento da gestão dos recursos hídricos no Brasil é realizado considerando como unidade a bacia hidrográfica (Porto & Porto, 2008). Desta forma, a espacialização por bacia das características físico-químicas das águas subterrâneas produz informações que podem subsidiar o processo de tomada de decisão relacionado à adoção de políticas de uso dos recursos hídricos e ao processo de outorga de água para projetos de irrigação, além de constituir diretriz para instituições de crédito agrícola (Resende et al., 2006).

Uma ferramenta para auxílio ao processo decisório em políticas de gestão de recursos hídricos são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs constituem-se em um conjunto harmônico composto por uma base de dados, um ou mais programas computacionais que permitam a manipulação de informações e uma interface gráfica para acesso do usuário (Câmara & Queiroz, 2008). Através dos SIGs é possível a manipulação de atributos georreferenciados de forma rápida, com a produção de mapas, gráficos e planilhas que possibilitem, por exemplo, a análise do comportamento espacial de variáveis indicadoras da qualidade da água ao longo de uma determinada região de interesse.

O uso das águas subterrâneas para irrigação de culturas requer uma avaliação dos riscos potenciais associados à qualidade da água que poderão acarretar problemas relacionados, principalmente, à degradação dos solos pela salinização e/ou ao entupimento em sistemas de irrigação localizada, se não forem adotadas medidas de correção ou mitigação (Medeiros et al., 2003; Rodrigues et al., 2007; Smith, 2008). Segundo Bot et al. (2000), o quadro atual dos solos afetados por sais em escala mundial – com uma estimativa de que quase 400 milhões de hectares de terras agricultáveis estejam afetadas, em algum grau, pela

salinização – vem aumentando progressivamente com a intensificação das práticas de irrigação.

O tipo de armazenamento das águas (aquéferos livres, confinados ou fraturados), o clima e a natureza geológica (influência litológica na composição química da água) são os principais fatores que interferem no processo de salinização causado pelo uso das águas subterrâneas no Nordeste brasileiro (Cruz & Melo, 1969). O processo de avaliação da adequação de determinada água para irrigação deve considerar os riscos de salinização, sodificação e alcalinização por carbonatos para o solo; aspectos tóxicos em relação a cloreto e sódio para as plantas e danos ao sistema de irrigação pela alta concentração de sais de baixa solubilidade (Andrade Júnior et al., 2006).

A água subterrânea no Estado de Sergipe apresenta grande potencial de uso. De acordo com cadastros realizados pelo Serviço Geológico do Brasil, contabilizam-se cerca de 3.900 poços tubulares no Estado, sendo que destes, 1.800 encontram-se em funcionamento (Bomfim et al., 2002).

Avaliando-se as densidades médias verifica-se que existem aproximadamente 0,18 poços por km² considerando todo o estado, no entanto esta densidade aumenta para 0,90 poços por km² ao se considerar os municípios da região central, como Itabaiana, Moita Bonita, Ribeirópolis e Campo do Brito. Somente em Itabaiana, por exemplo, existem 688 poços cadastrados, resultando em cerca de 2,0 poços por km².

Associada a uma distribuição irregular, existe uma grande variabilidade de usos para as águas provenientes de poços no Estado, destacando-se abastecimento doméstico, dessedentação de animais e irrigação, que apresentam intensidades de uso variáveis segundo as atividades predominantes e as características físico-químicas das águas em cada região. Observa-se que apenas cerca de 16% dos poços tubulares em funcionamento no Estado fornecem água que tem entre os seus usos a irrigação, embora a sua grande maioria, se restrinja a pequenas hortas (Bomfim et al., 2002). Isto pode ser resultado também da ausência de estudos de avaliação dos potenciais de exploração dos aquíferos existentes.

Este estudo objetiva caracterizar a distribuição espacial de alguns parâmetros de qualidade da água subterrânea que funcionem como indicadores dos potenciais riscos do uso deste recurso para irrigação no Estado de Sergipe por meio de

técnicas de geoprocessamento. Acrescente-se também que este trabalho pretende estruturar informações que sirvam de subsídio para um melhor planejamento do manejo das águas subterrâneas no Estado, atendendo, assim, às determinações da Política Nacional de Recursos Hídricos.

Material e Métodos

A metodologia de trabalho adotada consistiu do procedimento de consolidação das informações das bases de dados secundários, sintetização de um banco de dados único, tratamento estatístico e geoestatístico dos dados com a geração de produtos. Essas ações têm caráter consecutivo e são abaixo detalhadas:

1 - Obtenção e análise de consistência de dados secundários

Na obtenção dos mapas temáticos referentes aos diversos parâmetros de qualidade de água avaliados foram utilizados os bancos de dados existentes na Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe – Cohidro, vinculada à Secretaria de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Agrário – Seagril e na Superintendência de Recursos Hídricos – SRH, órgão vinculado à Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos – Semarh. Os bancos de dados da Cohidro e da SRH somam, aproximadamente, 1.200 análises físico-químicas de água de poços tubulares profundos, sendo estruturados em planilha de dados do “software” Excel®.

Inicialmente foi realizada a uniformização das unidades de concentração dos elementos das análises químicas, uma vez que parte das análises utilizavam a unidade miligrama por litro (mg L^{-1}), outra parte utilizava miliequivalente por litro (meq L^{-1} , o qual é equivalente à milimol de carga por litro, $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, sendo essa última a unidade considerada no trabalho), além de um grande número de análises sem unidade especificada. Para operacionalização da uniformização fez-se uso de processo de inferência, utilizando-se de ferramentas como gráficos de dispersão (os quais auxiliam na identificação de subgrupos de valores) e conhecimento de relações iônicas já estabelecidas, como relação cátions e ânions na composição química da água, relação CE/SDT e relação entre soma de íons (em mg L^{-1}) e SDT. Os poços nos quais os dados das variáveis das análises geravam um grau de incerteza no processo de inferência (relação CE/SDT = $1 \pm 0,1$) foram descartados para o presente trabalho.

Realizou-se também a uniformização do sistema de coordenadas utilizado no georreferenciamento dos poços: da mesma forma que nas análises químicas, as bases de dados apresentavam sistemas de georreferenciamento diversos, como utilização de coordenadas geográficas (a maior parte dos poços) e coordenadas UTM, além de falhas de anotação de coordenadas (poço cadastrado em um município quando o par de coordenadas resultava em sua localização em outro município, outro Estado, ou mesmo o mar) e, em grande parte, ausência de georreferenciamento. Os poços que apresentavam análise físico-química da água, mas não se encontravam georreferenciados não foram considerados nesse trabalho. Foi adotado como padrão o sistema de coordenadas UTM, utilizando-se o programa CoordTrans para a conversão de coordenadas geográficas em coordenadas UTM. Esta atividade possibilitou também a eliminação de dados duplicados.

Utilizou-se ainda uma análise exploratória dos dados. Esta análise foi realizada através da verificação dos parâmetros de tendência central e de dispersão dos valores amostrados, com a determinação da média, mediana, desvio padrão, valor máximo e mínimo, amplitude total, amplitude interquartilica, coeficiente de assimetria e de curtose, coeficiente de variação e variância. As medidas estatísticas permitiram uma visualização eficiente do conjunto de dados e a detecção prévia de inconsistências que por ventura tenham ocorrido nas etapas anteriores.

2 – Definição da base de dados e dos critérios de restrição ao uso das águas subterrâneas

A base de dados é composta pelas informações de georreferenciamento, dados cadastrais disponíveis além das variáveis de trabalho que foram utilizadas para a confecção dos mapas temáticos. Estas variáveis são aquelas componentes das análises físico-químicas de rotina: sólidos totais (105 °C), dureza total (EDTA) (expressa em CaCO_3), amônia livre (expressa em N), bicarbonatos (expressos em HCO_3^-), cálcio (expresso em Ca^{2+}), magnésio (expresso em Mg^{2+}), ferro total (expresso em Fe^{3+}), sulfatos (expressos em $\text{SO}_4^{=}$), sódio (expresso em Na +), cloreto (expresso em Cl⁻), pH e condutividade elétrica. Uma vez que as análises que compõem os bancos de dados foram obtidas em diferentes épocas, a variabilidade temporal da qualidade da água não se constituiu em restrição aos objetivos do trabalho. Foi considerada a hipótese de não-tendenciosidade dos dados em relação às épocas de amostragem, devendo as diferenças nos

resultados serem atribuídas somente à variabilidade espacial. Constituíram também variáveis de trabalho, além daquelas qualitativas, as características físicas do poço (vazão, profundidade, nível estático e nível dinâmico).

A geração de mapas de risco relacionados aos processos de salinização e sodificação do solo, toxicidade às culturas e obstrução de sistemas de irrigação foi realizada conforme os critérios estabelecidos em Ayers & Westcot (1994). Esta classificação foi proposta pelo Comitê de Consultores da Universidade da Califórnia, de 1974, a qual foi referendada e recomendada pela FAO, para as demais regiões do mundo. As diretrizes de qualidade dessa classificação são definidas em três categorias, referentes a graus de restrição de uso para fins de irrigação: 1. Nenhuma Restrição, 2. Restrição Ligeira a Moderada e 3. Restrição Severa. No primeiro caso trata-se de águas onde não se apresentam problemas para a cultura ou para o solo; no segundo caso, já se exige um maior cuidado na seleção das culturas a serem irrigadas e no nível de manejo da irrigação e do solo; por fim, com grau de restrição Severa espera-se o aparecimento de problemas no solo e, ou nas culturas, exigindo-se um nível de manejo hábil e efetivo, no sentido de minimizar perda de produtividade (Ayers & Westcot, 1994). Os limites para as variáveis, de acordo com as suas respectivas classes, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Classes de restrição ao uso da água para irrigação segundo os riscos associados

Risco	Sistema de Irrigação	Variáveis	Classes de restrição		
			Nenhuma	Leve a Moderada	Severa
Salinização		CE (dS m ⁻¹)	< 0,7	0,7 a 3,0	> 3,0
		SDT (mg L ⁻¹)	< 450	450 a 2.000	> 2.000
		RAS (mmol L ⁻¹) ^N		Condutividade Elétrica (dS m ⁻¹)	
		0 a 3	> 0,7	0,7 a 0,2	< 0,2
Sodificação		3 a 6	> 1,2	1,2 a 0,3	< 0,3
		6 a 12	> 1,9	1,9 a 0,5	< 0,5
		12 a 20	> 2,9	2,9 a 1,3	< 1,3
		20 a 40	> 5,0	5,0 a 2,9	< 2,9
Toxicidade às culturas	Superfície	RAS (mmol L ⁻¹) ^N	< 3,0	3,0 a 9,0	> 9,0
	Aspersão	Na (mmol L ⁻¹)	< 3,0	> 3,0	
	Superfície	Cl (mmol L ⁻¹)	< 4,0	4,0 a 10,0	> 10,0
	Aspersão	Cl (mmol L ⁻¹)	< 3,0	> 3,0	
Obstrução em sistemas de irrigação localizada	Aspersão	HCO ₃ (mmol L ⁻¹)	< 1,5	1,5 a 8,5	> 8,5
		pH	< 7,0	7,0 a 8,0	> 8,0
		Fe (mg L ⁻¹)	< 0,1	0,1 a 1,5	> 1,5
		Índice de Langelier	< 0,0	> 0,0	

Fonte: Adaptado de Ayers & Westcot (1994)

3 - Aplicação de técnicas de estatística e geoestatística aos dados amostrais

Avaliadas as medidas estatísticas usuais, seguiu-se à verificação da existência e alcance da dependência espacial dos valores amostrais.

A avaliação do comportamento espacial das variáveis de qualidade da água subterrânea consolidadas partiu da elaboração dos semivariogramas experimentais. Estes permitiram a detecção do alcance da dependência espacial da variância e a seleção dos parâmetros das funções matemáticas para interpolação. Os procedimentos foram executados no programa ARCVIEW® (ESRI, 2008). O semivariograma ajustado fornece a função matemática que melhor representa o comportamento da variância segundo o deslocamento no espaço de estudo. Esta função permite a determinação dos ponderadores ou pesos a serem utilizados no processo de interpolação por krigagem ordinária. Através da aplicação da krigagem ordinária foram gerados mapas interpolados de variabilidade espacial dos parâmetros de qualidade da água subterrânea com minimização do erro e disponibilização de mapas de variância dos erros, possibilitando a visualização dos graus de confiabilidade das informações fornecidas.

4 - Elaboração do Atlas de Qualidade das Águas Subterrâneas para Irrigação em Sergipe

A conclusão do estudo consistiu da produção de um CD-ROM na forma de atlas que reúne as cartas georreferenciadas para o Estado de Sergipe a partir dos mapas temáticos gerados incluindo os limites das bacias hidrográficas do Estado, os critérios assumidos para o desenvolvimento dos produtos, as ressalvas ao uso das informações disponibilizadas além da análise dos possíveis fatores relacionados à variabilidade espacial observada nos resultados, incluindo a influência geológica e geomorfológica das formações predominantes no estado sobre os valores das variáveis de qualidade da água subterrânea. O Atlas de Qualidade das Águas Subterrâneas para Irrigação em Sergipe acompanha um programa para visualização de mapas na forma de um SIG gratuito que permite a realização de consultas à base de dados e sobreposição de camadas de informações.

Além dos mapas das variáveis definidas na atividade 2, também estão inseridos mapas temáticos para os parâmetros de RAS, índice de Langelier, risco de

salinização e risco de sodificação e outros, calculados a partir dos mapas resultantes para as variáveis das análises físico-químicas. Ao todo, o atlas agrega 14 mapas de variáveis de qualidade, 12 mapas de risco de uso da água para irrigação e quatro mapas de parâmetros quantitativos.

Resultados e Discussão

A análise exploratória realizada levou ao descarte de variáveis em alguns poços, e em alguns casos à exclusão do próprio poço. A Figura 1 apresenta a configuração final dos poços nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe, totalizando 1.094 poços, distribuídos de forma irregular ao longo de toda a superfície do Estado, com grandes concentrações na parte central e ausência de cobertura em algumas áreas junto aos limites sudoeste e norte. A seguir são apresentados os resultados para cada variável analisada, bem como os mapas produzidos a partir da aplicação da krigagem ordinária para análise espacial.

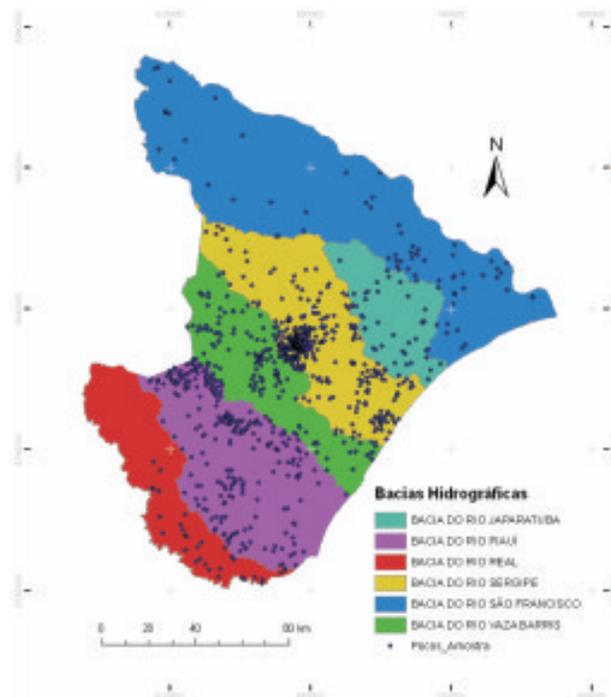


Figura 1 – Localização dos poços amostrados nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Variáveis Qualitativas

pH

O pH é um índice que caracteriza o grau de acidez ou de alcalinidade de um determinado ambiente (Ayers & Westcot, 1994). É medido em uma escala adimensional que varia de 0 a 14, sendo 7 considerado o valor correspondente à neutralidade e valores abaixo e acima desse valor correspondendo ao caráter ácido e básico, respectivamente.

Os valores médios de pH para as bacias do Estado variam de 7,3 a 7,8, sendo que a bacia do rio Real apresenta águas com valor médio mais elevado. Embora a variabilidade do valor médio entre as bacias se mostre baixa, ela é elevada quando se leva em conta cada bacia em particular, mesmo considerando que os dados são naturalmente normalizados, em função da escala logarítmica do pH. Os menores valores são observados nas bacias dos rios São Francisco e Sergipe enquanto os maiores valores estão nas bacias dos rios Vaza-Barris, Piauí e Real.

A análise de frequência evidencia que o caráter levemente alcalino predomina na água subterrânea do Estado, dado que, de modo geral, 75% dos poços apresentam pH acima de 7,0.

A análise espacial mostra que esse caráter alcalino corresponde a aproximadamente 91% da área do Estado sendo mais evidente na região oeste, onde os valores de pH se encontram na faixa de 7,5 a 8,0 (Figura 2). Um caráter levemente ácido se apresenta apenas 9% da área do estado, abrangendo parte dos municípios de Neópolis, Brejo Grande, Japoatã, Pacatuba, Japaratuba, Ilha das Flores, Pirambu, Santo Amaro da Brotas, São Cristóvão, Itaporanga D'Ajuda e Estância, onde o pH varia de 6,0 a 7,0. Verifica-se um crescimento de valores à medida que se desloca do litoral para o interior. A existência de águas com maior pH na região semi-árida pode ser reflexo da presença de rochas cársticas em determinados locais e predominância de aquíferos fraturados, com maior potencial de elevação da alcalinidade. Os valores mais baixos situaram-se na bacia do rio São Francisco próximo ao litoral e na porção intermediária da bacia do rio Vaza-Barris.

De um modo geral a águas subterrâneas se apresentam muito próximas da neutralidade, não constituindo problemas para a maioria das culturas, conforme

os critérios de qualidade estabelecidos na Tabela 1, como também com baixa probabilidade de causar problemas relacionados à corrosão, principalmente em tubulações ou estruturas hidráulicas de concreto.

Tabela 3. Estatística descritiva dos valores de pH em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	78	44	508	145	281	36	1092
Média	7,3	7,4	7,3	7,5	7,5	7,8	7,4
CV	13,4	10,8	10,0	9,5	9,2	6,7	10,0
Mínimo	4,1	5,2	4,6	4,4	4,6	6,6	4,1
Máximo	8,9	8,8	9,0	8,7	9,3	8,6	9,3
Quartil 1	7,0	6,9	6,8	7,1	7,1	7,6	7,0
Mediana	7,7	7,6	7,4	7,6	7,6	7,9	7,5
Quartil 3	8,0	8,0	7,9	7,9	7,9	8,1	7,9

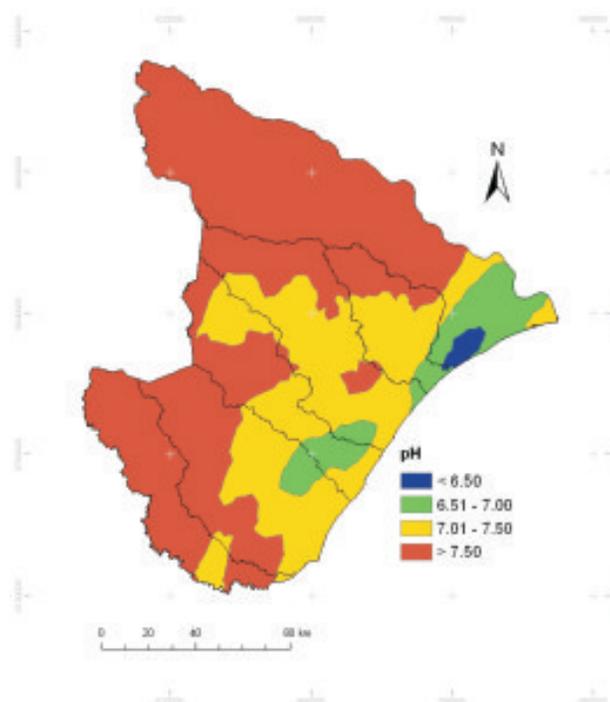


Figura 2 – Distribuição espacial da variável pH nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) está relacionada à facilidade que uma determinada água apresenta em conduzir uma corrente elétrica. Essa facilidade está diretamente vinculada tanto ao quantitativo de sais dissolvidos na água como à espécie salina predominante, sendo então a medida mais utilizada para estimar o teor total de sais contido nas águas. É medida em deciSiemens por metro (dS m^{-1}) a 25°C , sendo essa unidade o padrão atualmente adotado.

Em termos de valores médios, a bacia do rio Japarutuba apresenta águas subterrâneas com os menores valores de salinidade, com valor médio de $0,6 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto que a do rio São Francisco e a do rio Vaza-Barris apresentam os valores mais elevados de salinidade. A variabilidade dos valores de CE é elevada tanto entre as bacias como dentro de cada bacia, sendo que a variabilidade se apresenta notadamente no sentido Leste-Oeste (aumentando à medida que se afasta do litoral para o interior do Estado).

Se considerarmos em termos de valores médios, apenas a bacia do rio Japarutuba apresenta água subterrânea sem qualquer restrição de uso para irrigação de culturas sensíveis, como o tomate, o repolho e os citros (águas com valores de CE menor que $0,7 \text{ dS m}^{-1}$). No entanto, em função da elevada variabilidade dos dados, uma visão mais realística é dada quando se observa os valores correspondentes a cada Quartil dos dados. Nesse caso, observa-se que em todas as bacias, com exceção da do rio Vaza-Barris, 50% dos poços (mediana) apresentam valores de CE menores que $0,7 \text{ dS m}^{-1}$ (Tabela 4).

A distribuição espacial da variável CE mostrou-se de acordo com a tendência predominante de aumento no sentido litoral-interior do Estado, conforme se observa na Figura 3. Observa-se que as principais concentrações localizaram-se nas bacias dos rios Sergipe, Japarutuba e São Francisco, em suas porções norte-noroeste. A transição entre os domínios hidrogeológicos está bem caracterizada nesta variável, com mudança gradual de valores de CE ao passar da predominância de aquíferos granulares para fissurais e fissurais-cársticos. Observa-se neste caso também a influência de uma região intermediária, nas bacias dos rios Sergipe e Japarutuba, composta por aquífero do tipo fissural-cárstico, nos valores de CE mais altos na porção anterior à faixa litorânea destas bacias.

Tabela 4. Estatística descritiva dos valores de CE, em dS m^{-1} , em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	77	44	512	144	272	36	1085
Média	3,6	0,6	1,6	2,3	1,3	1,6	1,7
CV	170,8	175,5	260,0	153,0	131,7	157,7	217,5
Mínimo	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0
Máximo	26,2	6,8	58,1	25,6	11,1	12,5	58,1
Quartil 1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3
Mediana	0,7	0,3	0,7	1,0	0,6	0,5	0,7
Quartil 3	3,7	0,6	1,7	2,8	1,7	1,7	1,6

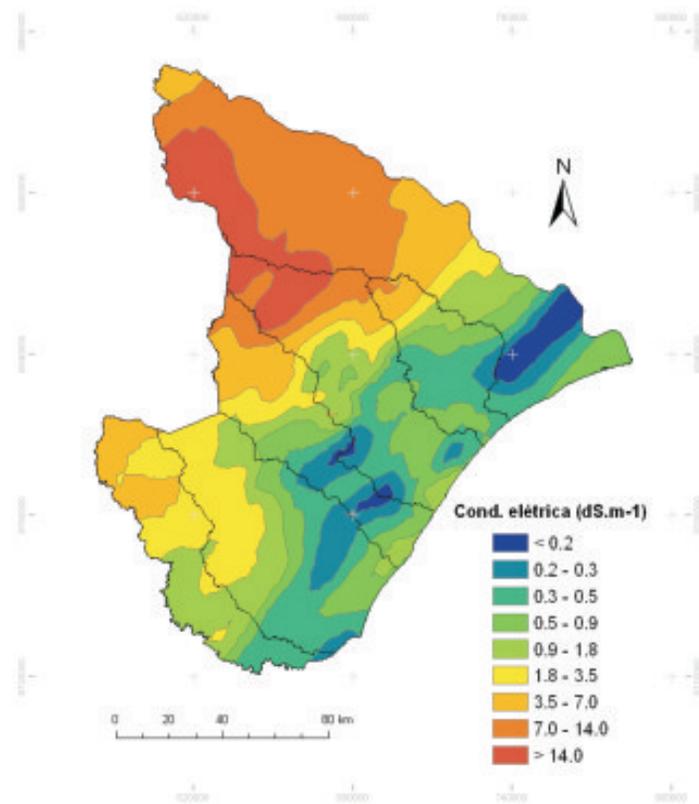


Figura 3 – Distribuição espacial da variável CE nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Cloreto

Em termos médios, a concentração do íon cloreto se mostra elevada, situando-se acima do limite de restrição severa de acordo com a classificação apresentada na Tabela 1, tanto para uso da água em sistemas de irrigação em que a água molhe toda a folhagem (irrigação por aspersão) como naqueles em que a água não tenha contato com a superfície foliar (irrigação por sulco ou gotejamento, p. ex.). Com exceção da bacia do rio Japarutuba, nas demais bacias 75% dos valores observados encontram-se acima de $10 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$, ou seja, com grau de restrição severa, mesmo para sistemas por gotejamento. Os valores mais elevados são observados nas bacias dos rios São Francisco e Vaza-Barris.

As concentrações do íon cloreto seguiram a tendência das variáveis anteriores, aumentando no sentido litoral-interior (Figura 4). Os valores mais altos situaram-se na região noroeste e centro-noroeste das bacias dos rios Sergipe e São Francisco respectivamente. Assim como nos casos anteriores a região das bacias inserida no Polígono Semi-árido, sendo composta em sua grande maioria por aquífero do tipo fissural, confirma a sua maior suscetibilidade à elevação da concentração de sais na água subterrânea. Já as menores concentrações localizaram-se próximo aos limites das bacias dos rios São Francisco, Piauí e Japarutuba com o oceano e na região intermediária entre o Semi-árido e o litoral, nas bacias dos rios Sergipe e Vaza-Barris. Verificou-se a ocorrência de valores médios a altos junto ao litoral nas bacias dos rios Sergipe e Vaza-Barris. Tal ocorrência pode ser justificada pela presença de contaminação de alguns poços por água marinha.

Tabela 5. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon cloreto, em $\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$, em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	78	44	512	145	279	36	1094
Média	35,4	5,1	14,4	21,9	9,8	12,9	15,3
CV	192,8	247,9	353,6	188,0	168,0	196,5	285,7
Mínimo	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1
Máximo	308,2	78,3	730,0	301,9	112,9	137,2	730,0
Quartil 1	1,2	1,2	1,4	1,7	1,0	1,0	1,2
Mediana	4,5	1,6	3,1	6,4	2,8	3,4	3,2
Quartil 3	27,9	3,3	12,0	24,4	11,9	12,4	11,1

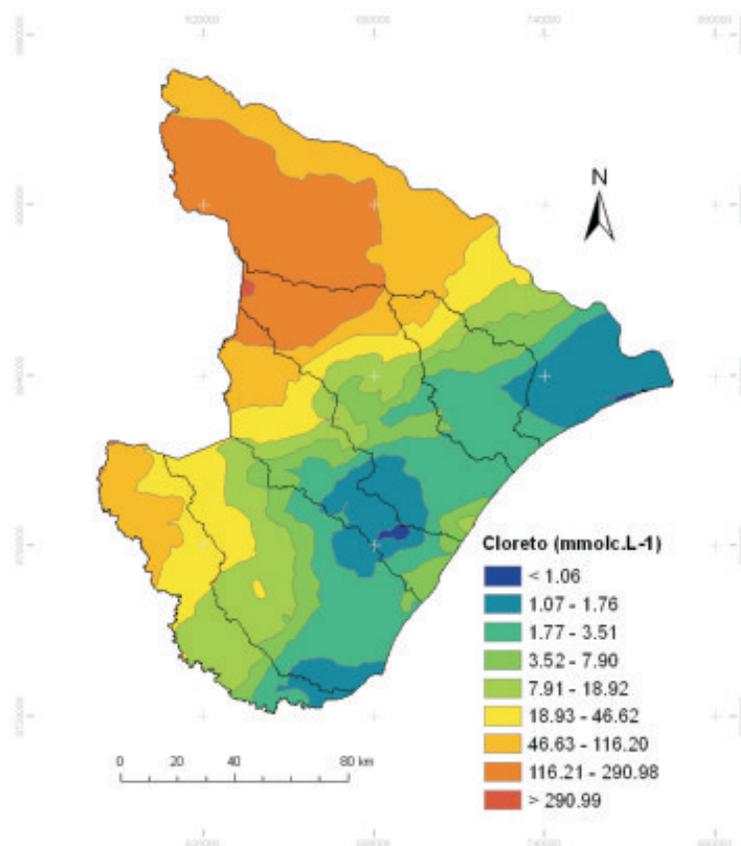


Figura 4 – Distribuição espacial da variável Cloreto nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Amônia

Verifica-se para Amônia que os maiores valores situaram-se junto ao litoral e na região no sul do estado, concentrando-se na bacia do São Francisco, em sua porção extremo leste (Figura 5). Tal comportamento pode ser reflexo da pouca cobertura de informações em algumas bacias, como São Francisco, Japaratuba e Real, o que pode levar o interpolador utilizado a considerar com maior peso valores extremos. Para esta variável sugere-se a realização de novas campanhas de medição.

Tabela 6. Estatística descritiva dos valores de concentração de amônia, em mg L^{-1} , em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	36	25	197	56	151	19	484
Média	0,476	0,068	0,093	0,317	0,164	1,049	0,204
CV	353,6	159,9	258,5	354,0	395,0	403,2	534,8
Mínimo	0,010	0,010	0,005	0,002	0,008	0,010	0,002
Máximo	9,000	0,500	2,000	7,500	5,460	18,000	18,000
Quartil 1	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Mediana	0,028	0,032	0,020	0,032	0,032	0,040	0,030
Quartil 3	0,065	0,054	0,076	0,069	0,06	0,08	0,06

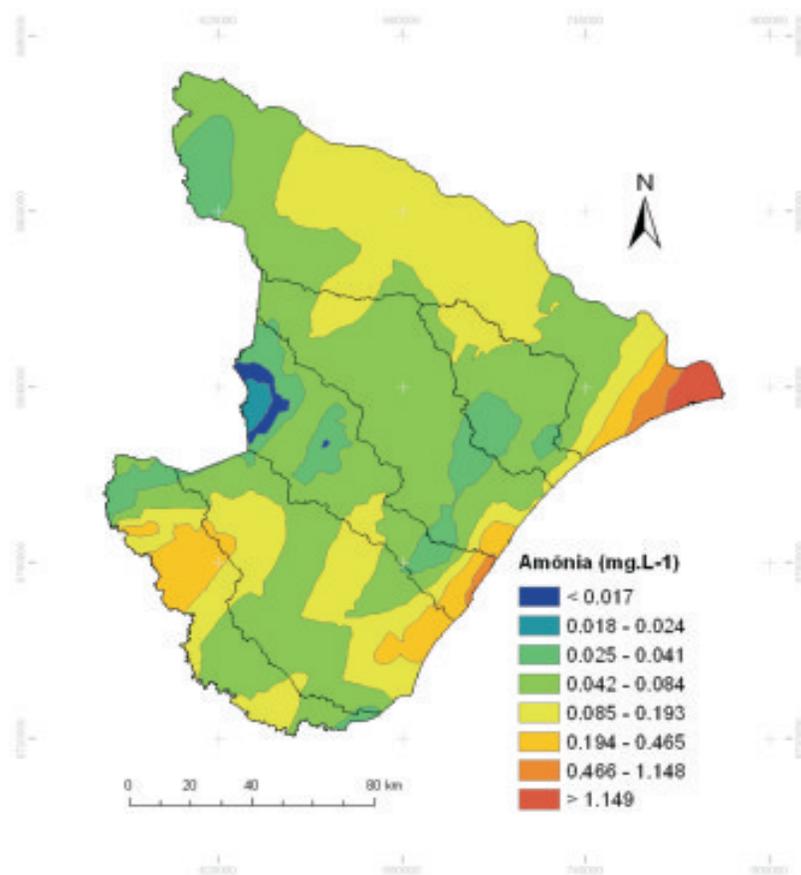


Figura 5 – Distribuição espacial da variável Amônia nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Bicarbonato e Sulfato

Os maiores teores de bicarbonato e sulfato são encontrados na bacia do rio São Francisco, com valor médio de 4,2 e 3,4 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente. Para o Estado de Sergipe, com exceção das águas da bacia do rio Japarutuba, apenas 25% dos poços, aproximadamente, apresentam teores de bicarbonato que podem ser considerados como de Nenhum Risco de causar fitotoxicidade, quando utilizando sistemas de irrigação por aspersão, conforme classificação da Tabela 1.

Assim como para cálcio, verifica-se pela Figura 6, que as concentrações de bicarbonato apresentam crescimento gradual do litoral para o interior do Estado, com valores mais altos na região Semi-árida. As bacias dos rios São Francisco e Sergipe apresentam em suas porções norte-noroeste as concentrações mais críticas. Os menores valores situaram-se junto ao litoral em praticamente todas as bacias. Ressalte-se a existência de uma região de valor intermediário-alto de concentração de bicarbonato próximo ao litoral na bacia do rio Sergipe. Esta região coincide com o aquífero cárstico ali predominante, isolado dentro do grande aquífero granular da região litorânea.

As concentrações de sulfato apresentaram aumentos significativos no sentido do litoral para o interior do Estado. Os maiores valores ficaram localizados na porção noroeste extrema da bacia do rio São Francisco, com registro dos menores valores junto ao litoral, avançando bastante para o interior até aproximadamente o limite da região semi-árida.

Tabela 7. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon bicarbonato, em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, em água subterrânea, nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	76	44	507	145	276	36	1084
Média	4,2	1,8	3,5	3,6	3,1	3,3	3,4
CV	132,5	121,7	79,6	73,6	82,1	98,1	88,9
Mínimo	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0
Máximo	40,6	11,8	18,4	11,9	14,0	13,0	40,8
Quartil 1	1,3	0,4	1,4	1,5	1,1	1,4	1,2
Mediana	2,2	1,1	2,7	3,2	2,4	2,4	2,5
Quartil 3	6,7	2,5	4,9	5,1	4,5	4,0	4,8

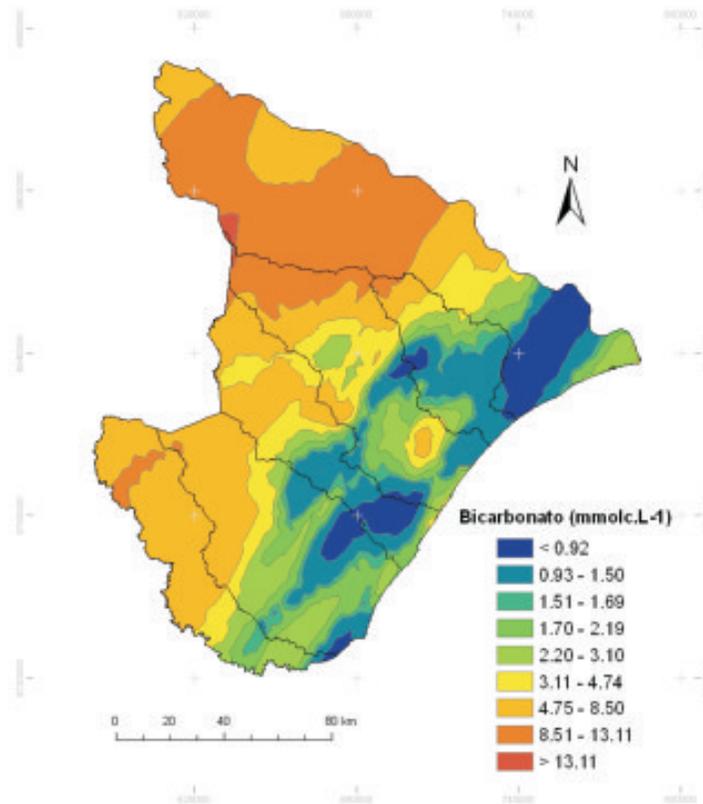


Figura 6 – Distribuição espacial da variável Bicarbonato nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Tabela 8. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon sulfato, em $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$, em água subterrânea, nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	78	44	507	145	271	36	1081
Média	3,4	0,4	1,0	1,9	1,0	1,0	1,3
CV	198,5	118,1	320,4	150,2	163,5	202,0	255,5
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	31,8	2,5	42,1	15,2	10,7	12,4	42,1
Quartil 1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2
Mediana	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3
Quartil 2	3,0	0,4	0,8	3,0	1,0	0,8	0,8

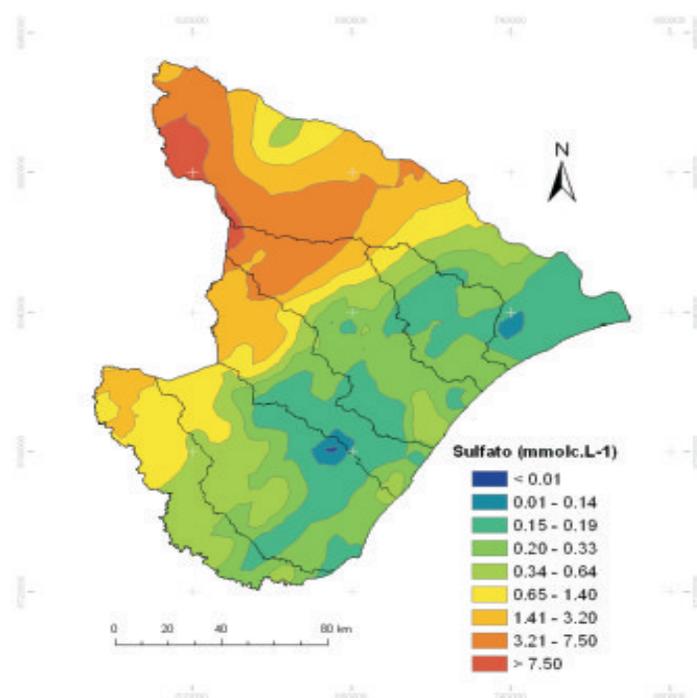


Figura 7 – Distribuição espacial da variável Sulfato nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Cálcio e Magnésio

Os íons cálcio e magnésio são analisados conjuntamente, uma vez que constituem um efeito balanceador em relação ao do íon sódio no solo e sua relação com os íons bicarbonato e sulfato no potencial de formação de precipitados na água que podem redundar em entupimento de tubulações, gotejadores e microaspersores.

A bacia do rio São Francisco apresenta águas com os níveis médios mais elevados tanto de cálcio como de magnésio. Da mesma forma que para os demais íons, a variabilidade do íon cálcio e magnésio é elevada nas bacias, com a principal direção da variação ocorrendo no sentido leste-oeste (Tabela 9).

A relação entre os valores de cálcio e magnésio é considerada como de elevada

influência nos problemas de infiltração da água no solo causados pelo íon sódio. Em termos de valores médios, essa relação é 0,49; 0,80; 0,61; 1,18; 1,10; 0,75 e 0,79, para as bacias dos rios S. Francisco, Japarutuba, Sergipe, Vaza-Barris, Piauí, Real e para o Estado de Sergipe, como um todo. Considera-se que uma determinada RAS pode ser mais prejudicial ao solo se a relação Ca/Mg for menor que a unidade (Ayers e Westcott, 1994); nesse sentido, Szabolcs & Darab (1964), citado por Kovda et al. (1973), consideram que um elevado nível de dano ocorre quando essa relação atinge 0,5. Sintomas de deficiência de cálcio podem também ocorrer em plantas, dado a mais alta adsorção preferencial do magnésio em relação ao cálcio. Vê-se que apenas nas bacias dos rios Vaza-Barris e Piauí a relação supera a unidade, devendo-se monitorar com mais atenção a nutrição da planta com relação ao cálcio, quando do uso da água subterrânea para irrigação nas bacias onde a relação Ca/Mg se apresenta menor que a unidade. Essa atenção deve ser redobrada no caso da bacia do rio S. Francisco.

Em regiões áridas, o cálcio constitui o principal responsável por entupimento de emissores (em irrigação localizada) e tubulações. A precipitação de carbonato de cálcio mostra-se freqüente em águas ricas em cálcio e bicarbonato (Gilbert & Ford, 1986).

Observa-se uma tendência clara de aumento nas concentrações do íon cálcio no sentido litoral-interior do Estado, com os valores mais altos ocorrendo na região semi-árida (Figura 8). As concentrações mais críticas ocorrem nas porções de extremo noroeste nas bacias dos rios Sergipe e Vaza-Barris e centro-noroeste da bacia do rio São Francisco. As menores concentrações situaram-se na região próxima à foz do rio São Francisco. Percebe-se claramente uma correlação entre o mapa de distribuição espacial das concentrações de cálcio e a formação hidrogeológica do estado, uma vez que ocorre um aumento gradual nos valores das concentrações à medida que ocorre a transição do aquífero tipo granular, predominante no litoral, para o fissural e fissural-cárstico, dominante no interior.

O íon magnésio apresenta comportamento semelhante ao cálcio, apenas com valores menores por ser originado de minerais de mais difícil intemperismo que o cálcio (Figura 9). As maiores concentrações localizam-se nas porções noroeste da bacia do rio Sergipe e oeste da bacia do rio São Francisco. Os menores valores de concentração de Magnésio ocorreram na porção próxima ao litoral da bacia do rio São Francisco e na porção intermediária das bacias dos rios Sergipe

e Vaza-Barris. Observa-se que ocorre também para Magnésio a elevação das concentrações em uma região próxima ao litoral nas bacias Japarutuba e Sergipe, provavelmente resultado da existência de um aquífero fissural-cárstico neste local e também por intrusão salina nos poços amostrados.

Tabela 9. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon cálcio, em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	78	44	512	145	277	36	1092
Média	5,3	1,2	3,0	8,2	3,3	2,7	3,9
CV	215,0	124,9	252,8	193,2	143,9	131,7	230,4
Mínimo	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
Máximo	80,2	7,9	116,4	102,7	35,3	15,8	116,4
Quartil 1	0,6	0,4	0,6	0,8	0,6	0,7	0,6
Mediana	1,0	0,7	1,2	1,5	1,5	1,3	1,2
Quartil 3	4,2	1,1	3,6	6,2	4,0	3,3	3,2

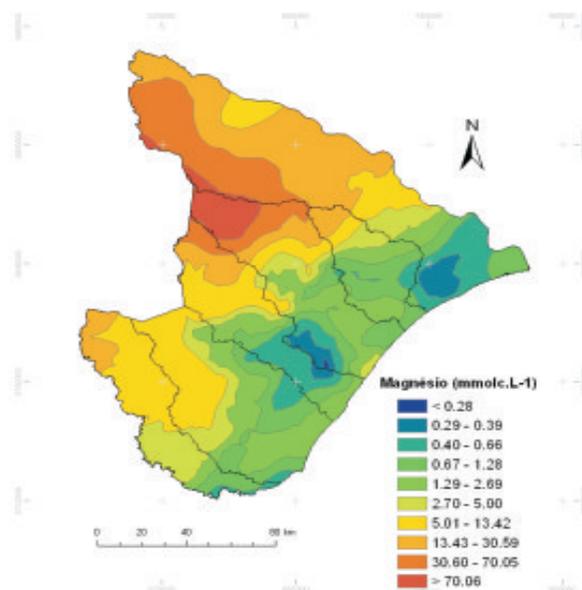


Figura 8 – Distribuição espacial da variável Cálcio nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Tabela 10. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon magnésio, em $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$, em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	77	44	513	145	276	36	1091
Média	10,9	1,5	4,9	6,9	3,0	3,6	4,9
CV	213,0	218,4	297,2	238,3	153,2	189,3	275,9
Mínimo	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Máximo	143,3	21,2	180,5	180,7	42,7	36,4	180,7
Quartil 1	0,5	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3	0,5
Mediana	0,9	0,5	1,3	2,7	1,2	1,1	1,3
Quartil 3	7,7	1,3	4,5	7,0	3,5	3,4	4,0

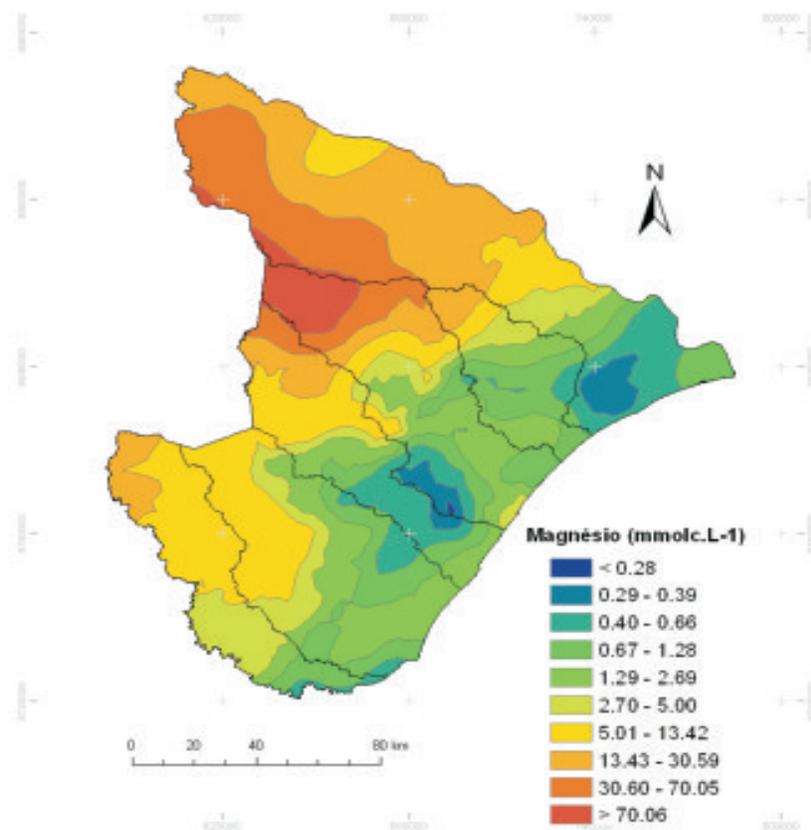


Figura 9 – Distribuição espacial da variável Magnésio nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

Sódio e RAS

Devido ao seu efeito no solo e na planta, o sódio é considerado como um dos principais fatores determinantes da qualidade de água para irrigação (Kovda et al., 1973). No solo, o efeito do sódio se dá principalmente como dispersante das partículas coloidais, afetando sua estrutura e, em conseqüência, a capacidade de infiltração da água. Na planta, os sintomas de toxicidade aparecem nas folhas em forma de queimaduras ou necroses ao longo das bordas, aparecendo primeiro nas das mais velhas, progredindo até o centro da folha (Ayers e Westcott, 1979).

O comportamento espacial do íon sódio acompanha o de cálcio e magnésio, com concentrações mais altas na região do Semi-árido sergipano que no litoral. As maiores concentrações localizaram-se nas regiões noroeste das bacias dos rios São Francisco e Sergipe e as mais baixas junto ao litoral nas bacias dos rios São Francisco, Japarutuba e Real. Nesta variável repete-se o aumento de concentração na porção intermediária das bacias dos rios Sergipe e Vaza-Barris, decorrência da formação fissural-cárstica localizada e junto à faixa litorânea destas bacias, com provável contaminação de poços por água marinha (Figura 10).

Por refletir a relação entre sódio, cálcio e magnésio, a RAS apresenta comportamento compatível com o destas variáveis, com crescimento no sentido do litoral para o interior do Estado (Figura 11). Os maiores valores para RAS ocorreram na porção noroeste das bacias do rio São Francisco e Sergipe, e os menores junto ao litoral nas bacias dos rios Japarutuba, São Francisco, Real e Piauí e na porção intermediária das bacias dos rios Sergipe e Vaza-Barris. Próximo à foz destas duas bacias ocorre uma elevação dos valores de RAS que pode ser devida à presença de água marinha em alguns poços amostrados.

Tabela 11. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon sódio, em $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$, em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	77	44	506	145	268	36	1076
Média	25,7	4,08	10,6	11,8	7,3	10,5	10,8
CV	180,9	227,83	339,3	140,0	141,9	188,6	273,3
Mínimo	0,2	0,33	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1
Máximo	208,8	56,55	604,6	104,4	69,6	106,6	604,6
Quartil 1	1,5	1,07	1,9	1,7	1,3	1,4	1,5
Mediana	4,0	1,49	3,6	6,7	2,9	3,7	3,4
Quartil 3	25,7	3,05	9,9	15,2	9,8	10,1	9,4

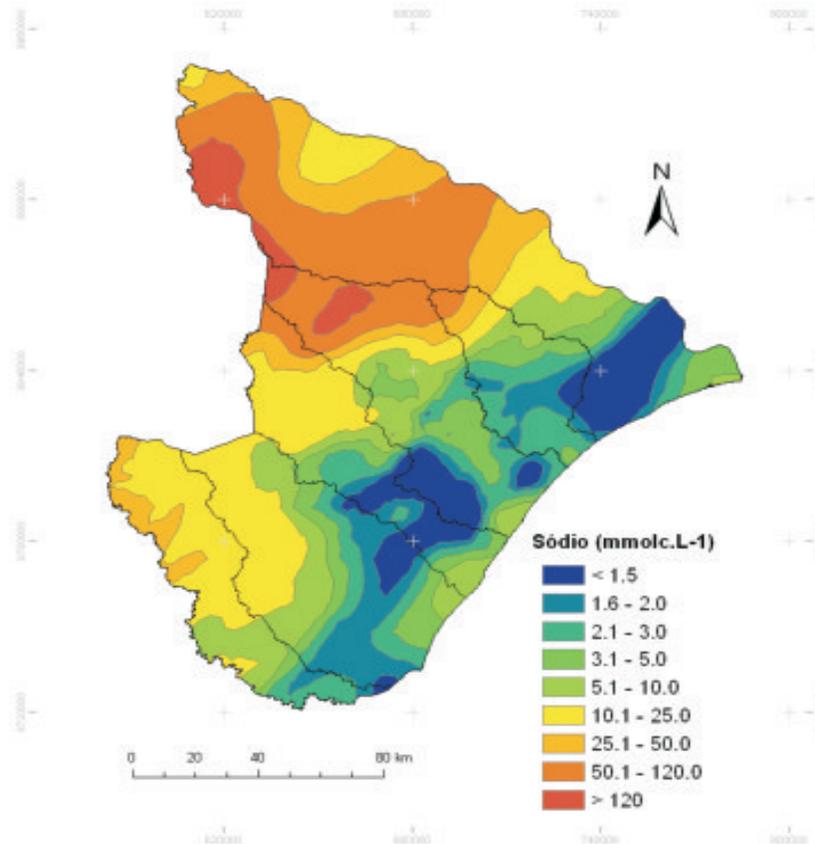


Figura 10 – Distribuição espacial da variável Sódio nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

Tabela 12. Estatística descritiva dos valores de RAS, em $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{1/2}$, em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	75	42	432	137	264	36	986
Média	7,2	2,95	5,0	4,4	3,8	5,1	4,7
CV	107,7	93,86	180,0	72,6	87,0	101,2	145,7
Mínimo	0,2	0,50	0,1	0,4	0,4	0,4	0,1
Máximo	35,3	14,83	138,3	15,8	18,8	21,5	138,3
Quartil 1	1,8	1,63	2,1	2,0	1,6	2,2	1,8
Mediana	3,0	2,27	3,0	3,3	2,5	3,6	2,9
Quartil 3	10,4	3,01	5,7	6,2	4,9	5,9	5,5

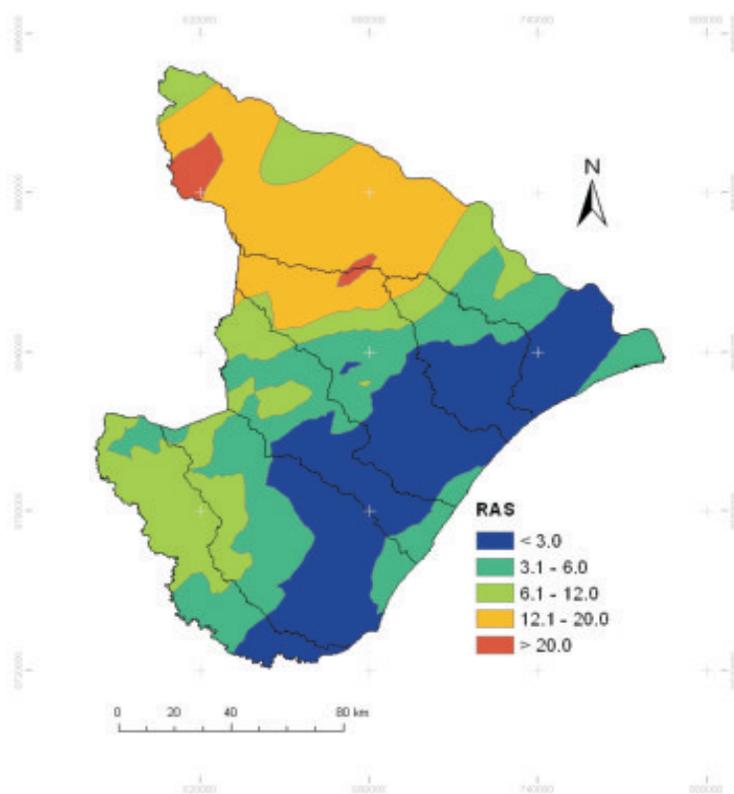


Figura 11 – Distribuição espacial da Razão de Adsorção de Sódio nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Índice de Saturação de Cálcio

Com relação ao risco de obstrução de emissores e tubulações devido ao teor de cálcio na água de irrigação, Nakayama(1986) sugere a utilização do Índice de Saturação de Cálcio, também conhecido como Índice de Langelier, no sentido de prover uma aproximação sistemática para a determinação do risco de formação de precipitados de carbonato de cálcio (CaCO_3). Esse Índice é baseado na diferença entre o pH medido e o pH calculado da água utilizada, este último relacionado com os teores de carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), Cálcio(Ca^{2+}), concentração total de sais dissolvidos (SDT) e temperatura da água. Valores positivos indicam a possibilidade de ocorrência de formação de precipitados e a conseqüente obstrução de emissores (USDA, 1965)

Para todas as bacias do Estado de Sergipe, em termos de valores médios (Tabela 13) o Índice de Langelier mostra não haver tendência de ocorrência de precipitação de carbonato de cálcio. Contudo, foi observado um aumento no seu valor, ou seja crescimento da probabilidade de ocorrência da precipitação de CaCO_3 no sentido do litoral para o interior do Estado. Observa-se assim que os maiores valores do índice ocorrem nas porções noroeste das bacias do rio São Francisco, Sergipe e Vaza-Barris e que o crescimento está relacionado à transição do litoral para o semi-árido. Observa-se também o reflexo da ocorrência da zona de alta concentração de sais na região intermediária das bacias dos rios Sergipe e Japaratuba resultado da presença de uma região confinada de aquífero fissural-cárstico (Figura 12).

Tabela 13. Estatística descritiva dos valores de Índice de Langelier em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	76	44	509	145	276	36	1066
Média	-0,8	-1,4	-0,8	-0,4	-0,5	-0,3	-0,7
CV	240,2	116,6	186,9	338,1	240,8	345,8	213,4
Mínimo	-37,3	-5,5	-9,9	-6,8	-6,0	-3,4	-9,9
Máximo	1,8	1,0	1,6	1,7	1,5	1,2	1,8
Quartil 1	-1,8	-2,4	-1,6	-0,8	-1,0	-0,9	-1,3
Mediana	-0,3	-1,0	-0,5	-0,1	-0,3	-0,1	-0,4
Quartil 3	0,6	-0,2	0,2	0,5	0,4	0,4	0,3

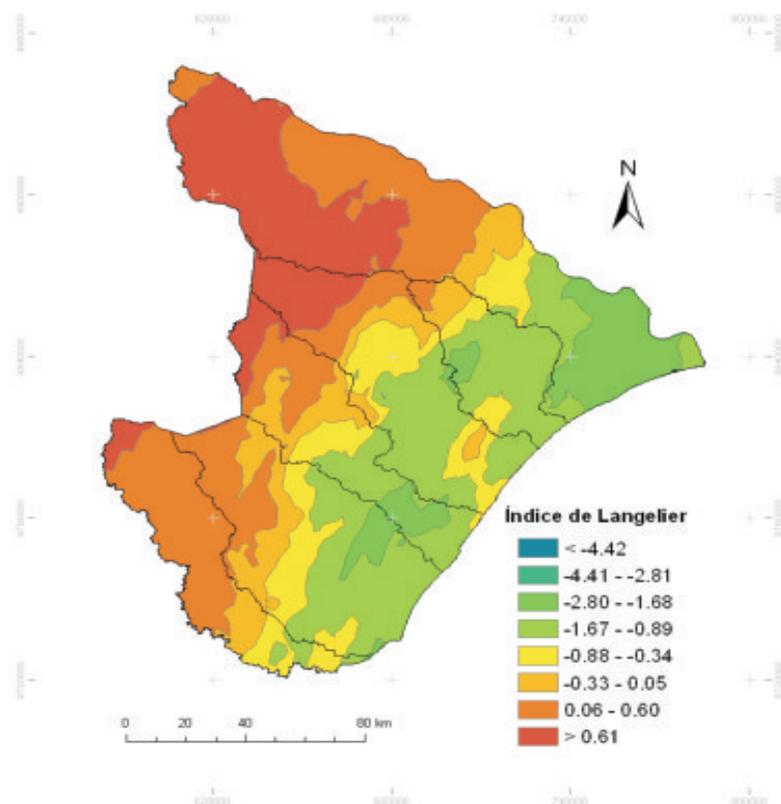


Figura 12 – Distribuição espacial do índice de Langelier nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Ferro Total

O ferro se apresenta na água de irrigação predominantemente na forma de Fe^{+2} e Fe^{+3} . Na primeira forma o mesmo se encontra solúvel na água; quando sofre um processo de oxidação passa à segunda forma, precipitando-se.

De modo geral, o ferro não apresenta risco de toxicidade às plantas ou danos ao solo, uma vez que logo após sua aplicação via água oxida-se, passando ao estado de Fe^{+3} . No entanto, esse íon se constitui em um dos principais

causadores de entupimento em sistemas de irrigação localizada. Pela Tabela 1, observa-se que concentrações acima de $0,1 \text{ mg L}^{-1}$ já se constituem em grau de risco moderado de causar entupimento. O ferro precipitado forma uma incrustação vermelha, a qual pode aderir ao PVC ou nos tubos de polietileno como também entupir completamente emissores.

Através da Tabela 14, observa-se que, em termos de valores médios, apenas as bacias dos rios Japarutuba, Vaza-barris e Real se apresentam com grau de risco "Nenhum" de entupimento, com base nas diretrizes da Tabela 1.

Ao contrário dos demais íons apresentados anteriormente, o ferro não apresentou uma tendência de crescimento gradual em suas concentrações do litoral para o interior do Estado, mas sim uma distribuição quase aleatória de regiões com maior concentração, ocorrendo na porção central da bacia do rio Piauí, noroeste da bacia do rio Sergipe e centro-noroeste e leste da bacia do rio São Francisco. As regiões com menores concentrações ficaram localizadas nas porções noroeste das bacias dos rios Piauí e Vaza-Barris, além de em grande parte da bacia do rio Real (Figura 13).

Tabela 14. Estatística descritiva dos valores de concentração do íon ferro, em mg.L^{-1} , em água subterrânea nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	65	40	491	112	192	24	924
Média	0,856	0,117	0,402	0,072	0,584	0,036	0,410
CV	160,678	433,014	282,251	282,012	189,902	161,422	256,902
Mínimo	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Máximo	8,370	3,210	15,240	1,830	4,185	0,165	15,240
Quartil 1	0,004	0,003	0,000	0,003	0,010	0,006	0,004
Mediana	0,390	0,010	0,050	0,010	0,095	0,010	0,040
Quartil 3	1,116	0,045	0,279	0,060	0,558	0,015	0,265

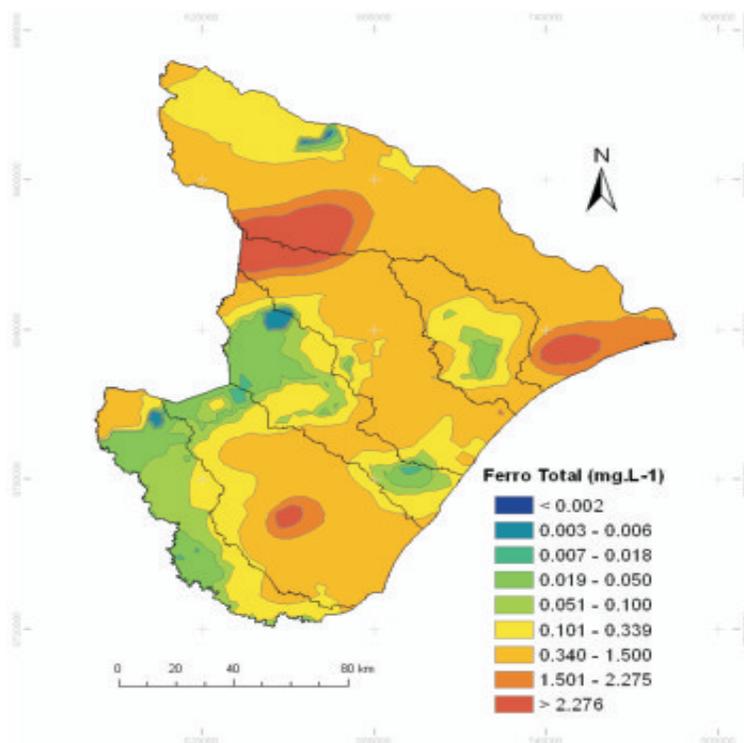


Figura 13 – Distribuição espacial da variável Ferro Total nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Dureza e Sólidos Dissolvidos Totais

Para dureza, o mapa de distribuição espacial para o Estado também retrata a crescimento das concentrações de sais no sentido do litoral para o interior. Os maiores valores situaram-se na região semi-árida do Estado para todas as bacias. A influência da geologia sobre os valores de dureza pode ser confirmada com a ocorrência de valores médios-altos próximos ao litoral na porção correspondente ao aquífero fissural-cárstico nas bacias dos rios Sergipe e Japaratuba (Figura 14).

Seguindo o comportamento espacial da variável CE, os valores de concentração de sólidos dissolvidos cresceram no sentido litoral-interior do Estado, conforme mostra a Figura 15, com a região noroeste das bacias São Francisco e Sergipe contendo os maiores valores. Percebe-se aqui também a coincidência entre a localização de valores mais baixos para a variável e a predominância de aquíferos granulares. Novamente ocorre alta correlação espacial entre o aumento localizado das concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT) em uma região próxima ao litoral e a presença do aquífero fissural-cárstico.

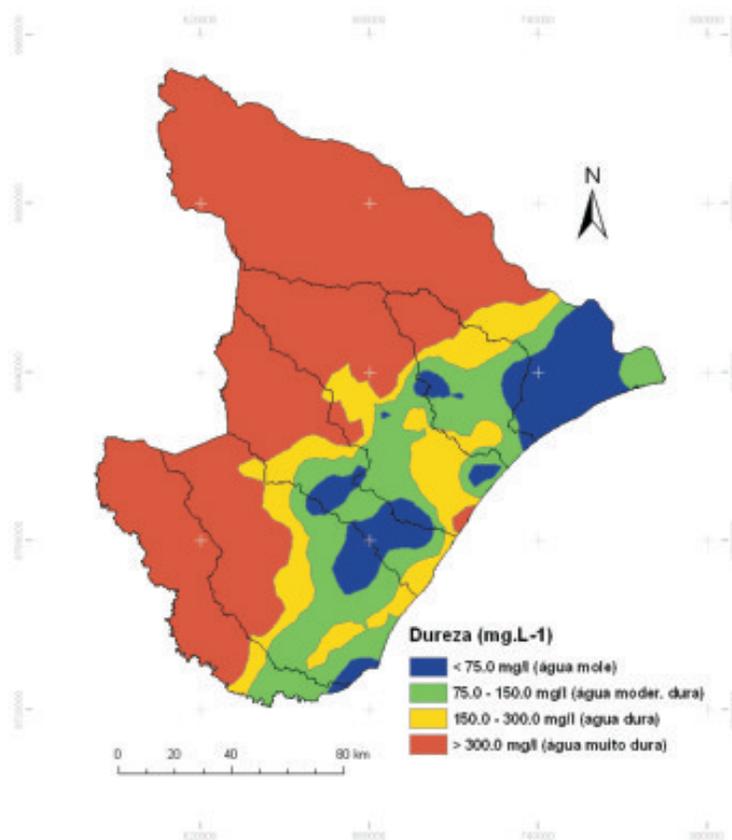


Figura 14 – Distribuição espacial da variável Dureza nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

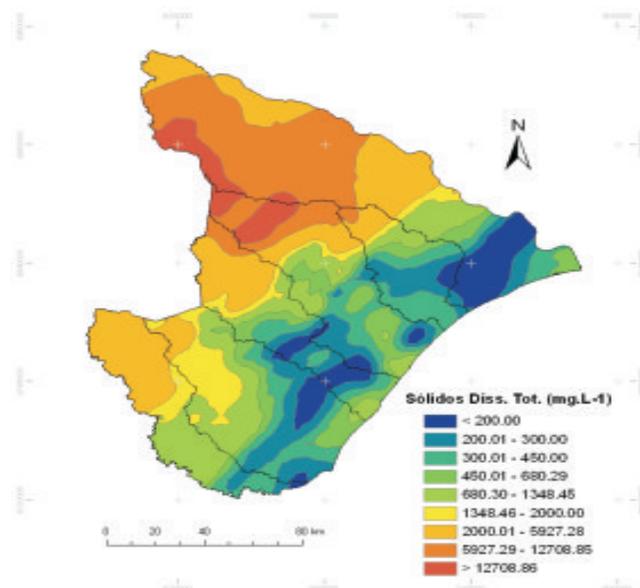


Figura 15 – Distribuição espacial da variável Sólidos Dissolvidos Totais nas águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Variáveis Quantitativas

Vazão, Profundidade, Nível estático e Nível Dinâmico

As regiões com maiores vazões exploradas situam-se, principalmente, em zonas de aquíferos granulares em direção ao litoral das bacias do rio São Francisco, Japaratuba e Sergipe. Os valores mais baixos de vazão foram localizados na porção intermediária da bacia São Francisco, limite noroeste das bacias Japaratuba e Sergipe além da porção sul da bacia do rio Real. Em geral estas áreas se localizaram sobre formações cristalinas com predominância de aquíferos do tipo fissural. Ressalte-se, no entanto, que alguns poços localizados no cristalino apresentaram vazões elevadas, como pode ser observado nas bacias dos rios Sergipe, Vaza-Barris e Piauí (Figura 16).

Para a variável Profundidade observa-se uma predominância dos valores em

torno da mediana no Estado (60,0m) apenas com registro dos menores valores mais próximos ao litoral das bacias dos rios Sergipe, Vaza-Barris e Piauí e das máximas profundidades na parte intermediária-litoral da bacia do rio São Francisco (Figura 17).

A variável Nível Estático mostrou-se também predominante em valores abaixo da média para o Estado, registrando-se apenas pequenas áreas com valores elevados na bacia do São Francisco e noroeste do Vaza-barris (Figura 18).

Com relação à variável Nível Dinâmico verificou-se que existe pouca variabilidade para o Estado, pois apresentou apenas algumas regiões junto ao litoral das bacias Sergipe, Vaza-Barris e Piauí, com picos ocorrendo na porção intermediária da bacia do São Francisco (Figura 19).

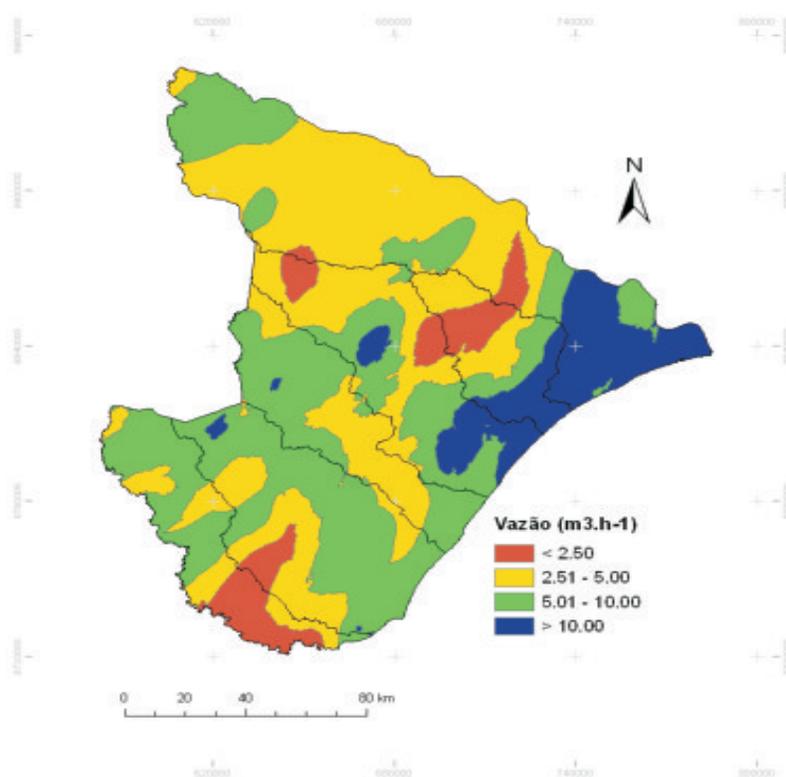


Figura 16 – Distribuição espacial da variável Vazão em poços para as águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

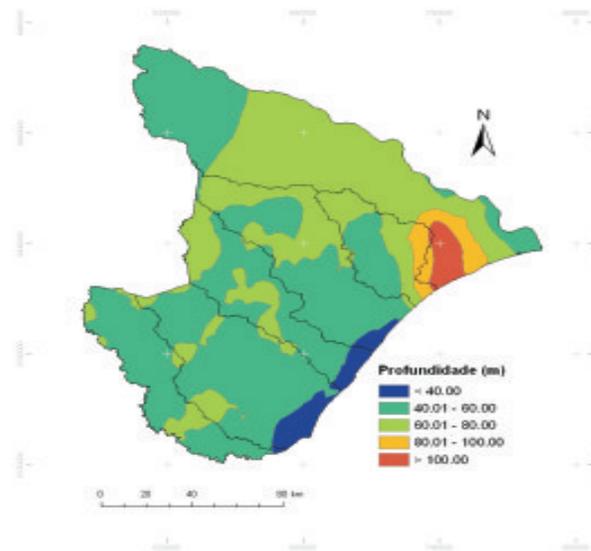


Figura 17 – Distribuição espacial da variável Profundidade em poços para as águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

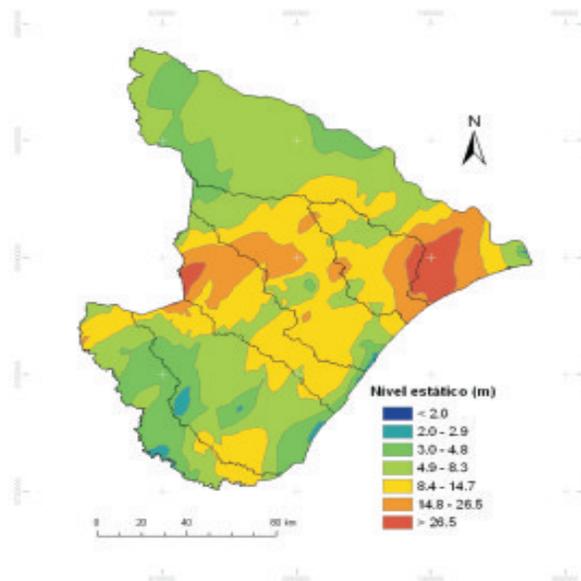


Figura 18 – Distribuição espacial da variável Nível Estático em poços para as águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

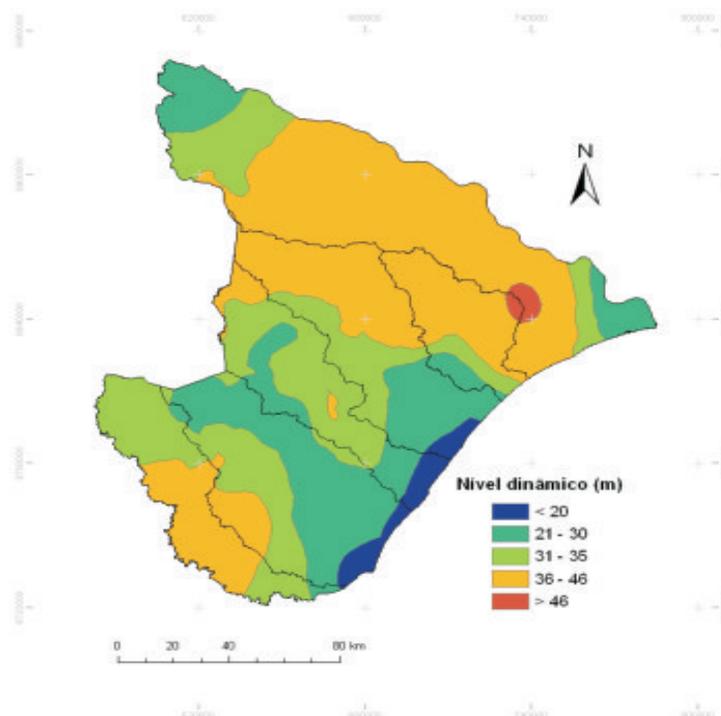


Figura 19 – Distribuição espacial da variável Nível Dinâmico em poços para as águas subterrâneas das bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Tabela 15. Estatística descritiva dos valores de profundidade de poços tubulares profundos nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	79	44	502	145	278	34	1082
Média	75,1	60,7	55,4	56,4	55,2	54,1	57,1
CV	41,3	47,8	25,0	32,0	27,7	28,3	31,8
Mínimo	28,0	28,0	14,0	15,5	16,0	18,0	14,0
Máximo	172,7	148,0	105,0	158,0	158,0	100,0	172,7
Quartil 1	50,0	41,0	50,0	49,0	50,0	50,0	50,0
Mediana	60,0	54,5	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Quartil 3	91,0	66,8	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0

Tabela 16. Estatística descritiva dos valores de nível estático de poços tubulares profundos nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	79	39	496	133	276	29	1052
Média	15,1	13,2	9,5	12,0	8,8	6,5	10,1
CV	111,2	128,6	97,8	107,0	115,6	131,1	110,8
Mínimo	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0	0,3	0,0
Máximo	65,1	88,0	55,1	67,5	71,0	40,6	88,0
Quartil 1	2,8	3,9	2,8	3,5	2,0	1,0	2,8
Mediana	7,6	10,0	7,2	7,1	5,5	2,9	6,8
Quartil 3	21,3	14,2	13,9	14,4	13,2	9,0	13,8

Tabela 17. Estatística descritiva dos valores de nível dinâmico de poços tubulares profundos nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	79	43	501	145	278	34	1080
Média	40,5	34,4	31,0	32,2	28,8	38,4	31,7
CV	45,2	59,0	47,1	48,0	51,4	32,5	49,1
Mínimo	7,8	8,1	0,0	4,8	0,3	7,0	0,0
Máximo	81,6	105,4	76,1	77,1	80,7	63,3	105,4
Quartil 1	19,5	22,3	19,7	18,8	17,5	34,2	19,5
Mediana	43,4	31,4	30,3	33,4	28,3	42,5	31,6
Quartil 3	54,9	44,2	43,4	44,1	40,0	46,6	43,4

Tabela 18. Estatística descritiva dos valores de vazão de poços tubulares profundos nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe.

	SF	JP	SE	VB	PI	RE	Sergipe
N	79	42	496	145	277	34	1073
Média	9,1	8,8	6,8	5,5	6,4	3,8	6,7
CV	141,9	275,7	136,4	94,8	92,3	221,6	142,3
Mínimo	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Máximo	60,9	158,8	99,0	23,3	34,4	36,3	158,8
Quartil 1	1,6	1,0	1,9	1,2	1,9	0,5	1,6
Mediana	4,0	3,0	4,5	4,0	4,4	1,3	4,1
Quartil 3	10,9	8,6	9,1	8,6	9,1	2,3	8,8

Mapas de Avaliação de Riscos

Os mapas de avaliação de risco de uso das águas subterrâneas com fins agrícolas foram gerados a partir da classificação dos mapas de variáveis apresentados anteriormente, com base nos limites de uso com restrição para irrigação adotados pela FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (Ayers & Westcot, 1994).

Salinidade - Condutividade Elétrica

Por estimar a quantidade total de sais dissolvidos na água de irrigação e por sua simplicidade de determinação, a CE se constitui em um dos principais indicadores de qualidade para irrigação. Comumente se observa uma relação direta entre o teor de sais na água de irrigação com o da água na zona radicular e no extrato de saturação do solo. Os efeitos dos sais na planta estão relacionados a elevação do potencial osmótico da solução do solo, o que redundará em um maior gasto de energia por parte da planta para o processo de absorção de água e nutrientes, em detrimento da sua produção. A FAO determina para CE três níveis de restrição ao uso da água devido à salinidade: sem restrição, para CE menor que $0,7 \text{ dS m}^{-1}$; com restrição moderada, para CE com valores entre $0,7$ e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ e restrição severa para CE superior a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. Com estes limites, verifica-se, pela Figura 20, que as porções noroeste das bacias hidrográficas do Estado situam-se nas classes de moderada e severa, coincidindo com o Polígono das Secas do Estado. Esta classe é verificada ainda em algumas regiões próximas ao litoral das bacias dos rios Piauí, Vaza-Barris, Sergipe e São Francisco. Observa-se que para o Estado como um todo, cerca de 40% de sua área encontra-se classificada como severa restrição de uso para irrigação, e aproximadamente 32% sem restrição nenhuma. Nas áreas com indicação de restrição severa, os maiores valores encontram-se nos municípios de Nossa Senhora da Glória, Poço Redondo, Canindé do São Francisco, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora Aparecida e Carira. Os valores mais baixos situaram-se em áreas dos municípios de Neópolis, Japoatã, Japaratuba, Areia Branca e São Cristóvão.

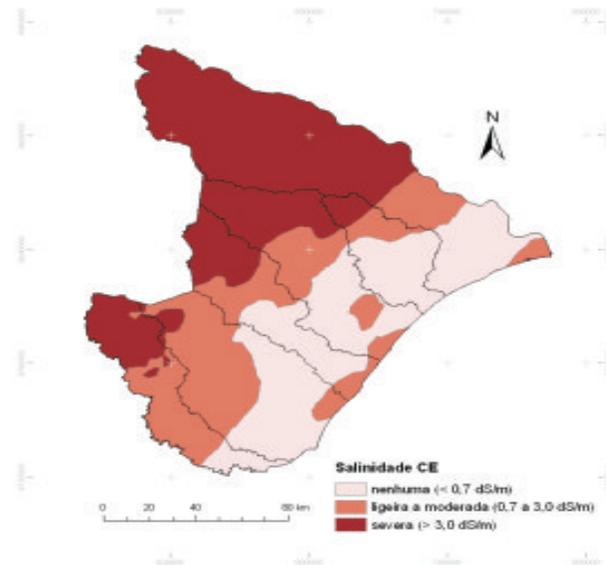


Figura 20 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Salinidade para Condutividade Elétrica nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Toxicidade - Cloreto

O íon cloreto não apresenta efeito significativo nas propriedades físicas do solo e não é adsorvido no complexo do solo (Kovda et al., 1973), sendo seu efeito mais relacionado com o potencial de causar toxidez em plantas mais sensíveis. Tal toxidez se apresenta como queimaduras nas bordas das folhas e valores limites se situam em torno de 3-5 mmolc L⁻¹ para plantas mais sensíveis, como o morangueiro e de 10 mmolc L⁻¹ para os porta-enxertos de citros.

Esse íon é avaliado pela FAO considerando as duas principais formas de irrigação: por aspersão e superficial. Tal diferenciação se deve ao risco de toxicidade às plantas associado ao excesso deste sal, considerando também as folhas ou apenas as raízes. Para irrigação por aspersão, o limite de restrição de uso da água é de 3 mmolc/L. Assim verifica-se que a região semi-árida do estado está toda situada na classe de restrição moderada a severa, em todas as bacias hidrográficas do estado, incluindo ainda toda parte litorânea da bacia do rio

Vaza-Barris, e parte do litoral dos rios Piauí e Sergipe (Figura 21). Neste caso, apenas cerca de 27% da área do Estado não apresenta restrição para o uso da água subterrânea para irrigação por aspersão. Considerando a irrigação do tipo superficial, FAO sugere três classes de restrição de uso por toxicidade: nenhuma restrição, para valores de Cloreto inferiores a 4 mmolc/L; restrição ligeira a moderada, no intervalo entre 4 e 10 mmolc/L e severa acima de 10 mmolc/L. Observa-se pequena diferença entre os mapas, uma vez que o limite para nenhuma restrição de uso sofre um pequeno aumento. A principal diferença se observa no litoral das bacias Vaza-Barris e Piauí, que neste caso passam a estar classificadas como sem restrição de uso (Figura 22). Para irrigação superficial, cerca de 33% da área do estado apresenta-se sem restrição de uso da água subterrânea por cloretos. Os municípios de Carira, Nossa Senhora da Glória e Monte alegre de Sergipe, Poço Redondo, Porto da Folha e Canindé do São Francisco, apresentaram as áreas com maiores concentrações de cloreto. As regiões de menores concentrações situaram-se nos municípios de São Cristóvão, Itaporanga d'Ajuda, Pacatuba, Neópolis e Japoatã.

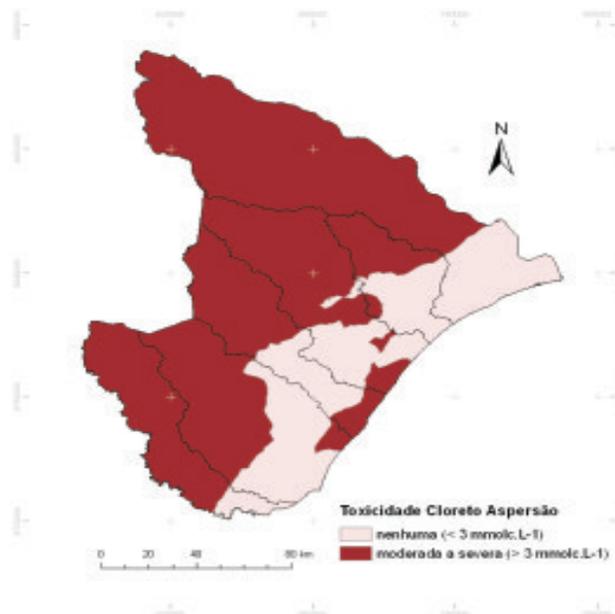


Figura 21 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Toxicidade por Cloreto em sistemas de irrigação por aspersão nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

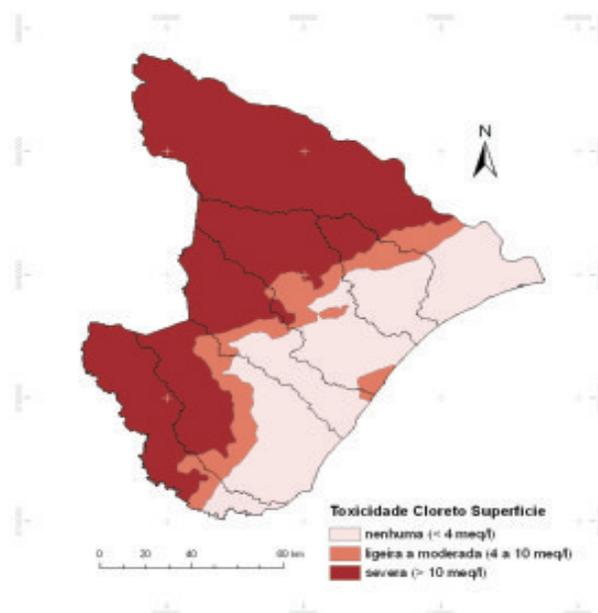


Figura 22 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Toxicidade por Cloreto em sistemas de irrigação por superfície nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Obstrução de sistemas de irrigação localizada – Ferro Total

A restrição de uso de água para irrigação com teores de ferro elevados está relacionada principalmente ao processo de obstrução dos sistemas de irrigação. Da mesma forma que nas precipitações de cálcio, as de ferro afetam, principalmente métodos de irrigação localizados (gotejamento e microaspersão), ocasionando entupimentos nos orifícios de saída de água dos gotejadores e microaspersores. Em casos mais graves, podem afetar, também, as tubulações de PVC, reduzindo drasticamente a capacidade de condução de água das mesmas. Nesses casos, um rígido programa de monitoramento e controle deve ser associado ao manejo da irrigação. Tal controle é feito, usualmente, utilizando medidas que oxidam o ferro, transformando-o da sua forma solúvel (Fe^{2+}) para a precipitável (Fe^{3+}), antes que ele entre no sistema de irrigação. Para FAO, as classes de restrição para ferro estão assim definidas: concentrações inferiores a

0,10mg/l não apresentam restrição de uso; existe restrição leve a moderada para concentrações entre 0,10 e 1,50 mg/l e acima deste valor a restrição é severa. Para o mapa gerado para o estado de Sergipe (Figura 23) verificou-se que áreas na porção oeste da bacia do rio Real e noroeste dos rios Piauí e Vaza-Barris, além de pequenas áreas isoladas na bacia do Japarutuba e Vaza-Barris não apresentam restrição de uso. Áreas de restrição severa por ferro foram identificadas próximas ao litoral e no extremo noroeste na bacia do rio São Francisco, centro da bacia do rio Piauí e próximo ao limite noroeste da bacia do rio Sergipe. Pelos mapas gerados verifica-se que apenas 15% da área do Estado estaria classificada como sem restrição para uso da água subterrânea considerando o risco de obstrução de sistemas por ferro. Verifica-se pela distribuição espacial obtida que as maiores concentrações de ferro localizaram-se nos municípios de Boquim, Pedrinhas, Arauá, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Pacatuba e Japoatã. Os municípios de Frei Paulo, Macambira, Pinhão, Pedra Mole, Capela e São Cristóvão, apresentaram as áreas com menores concentrações de ferro.

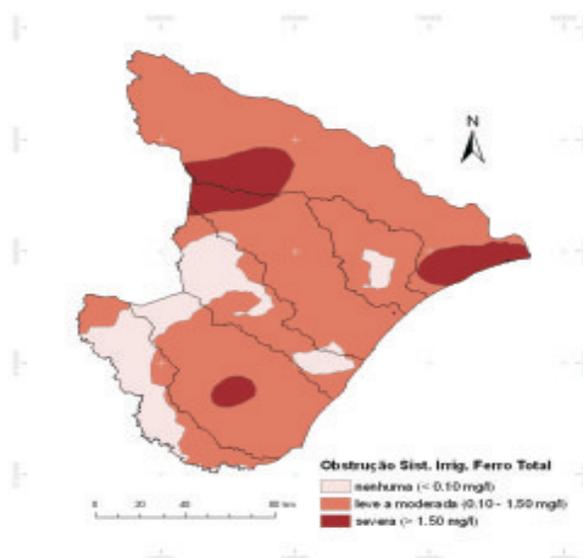


Figura 23 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Obstrução de sistemas de irrigação por Ferro Total nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Toxicidade - Bicarbonato

No caso do ion bicarbonato, mais que um efeito fitotóxico, sua presença em teores elevados nas águas de irrigação aumentam o risco de formação de incrustações brancas na folhagem e frutos, que podem comprometer o valor comercial dos mesmos. Essas incrustações são formadas pela reação do bicarbonato com os íons de cálcio, resultando em precipitados de carbonato de cálcio. Esse risco está mais relacionado a sistemas de irrigação que molhem toda a folhagem da cultura (irrigação por aspersão convencional, pivô-central, etc.).

Para os sistemas de irrigação, a importância do ion bicarbonato na água está relacionada à sua influência no potencial de precipitação de cálcio e, em menor grau, de magnésio (Kovda et al., 1973), sendo esse fator particularmente importante em sistemas de irrigação localizada, devido à sua capacidade de causar entupimento de tubulações, gotejadores e microaspersores.

Para bicarbonato a FAO estabelece a seguinte classificação, considerando as restrições associadas a toxicidade de culturas: nenhuma, para concentrações inferiores a 1,5 mmolc/L; ligeira a moderada, entre 1,5 e 8,5 mmolc/L e severa acima de 8,5 mmolc/L. O estudo realizado mostrou através da Figura 24, que as regiões mais próximas ao litoral nas bacias dos rios Japarutuba, São Francisco e Sergipe, além de áreas intermediárias nas bacias Vaza-Barris e Piauí apresentam-se como sem restrição de uso para suas águas subterrâneas, totalizando cerca de 18% da área do Estado. A maior parte da área do estado classifica-se com de restrição moderada (61%) e áreas de restrição do tipo severa restringem-se à porção extremo noroeste da bacia do rio Sergipe, centro-noroeste no rio São Francisco e pequena área no limite noroeste da bacia do rio Real. As maiores concentrações de bicarbonato foram detectadas nas áreas dos municípios de Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Porto da Folha, Poço Redondo, Gararu, Canindé do São Francisco, Laranjeiras e Maruim. As concentrações mais baixas foram obtidas em regiões dos municípios de São Cristóvão, Itaporanga d'Ajuda, Nossa Senhora das Dores, Siriri, Neópolis, Japoatã e Pacatuba.

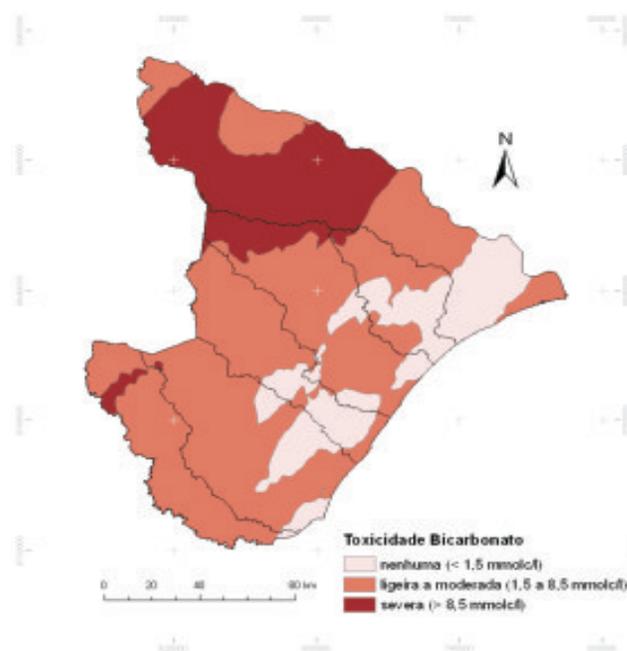


Figura 24 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Toxicidade por Bicarbonato nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Toxicidade - Sódio

Para toxicidade de Sódio, assim como para Cloretos, a FAO distingue a restrição de uso da água subterrânea segundo os métodos de irrigação por aspersão e superficial. Para aspersão, são estabelecidas duas classes: para concentrações de Sódio inferiores a 3 mmol/L não há restrição e acima deste patamar passa a ser moderada a severa. Com isso, observa-se que toda a região do estado correspondente ao clima semi-árido apresenta restrição de uso, além de uma parcela litorânea nas bacias dos rios Piauí, Vaza-Barris, Sergipe e Japarutuba, contabilizando, aproximadamente, 73% da área do estado com restrição de uso da água subterrânea. Para sistemas de irrigação do tipo superficial a FAO utiliza limites de restrição baseados na RAS (Razão de Adsorção de Sódio) calculada para a água subterrânea, tais como seguem: para valores de RAS inferiores a 3,0 não há restrição de uso; valores entre 3,0 e 9,0 apresentam restrição de uso

moderada e superiores a 9,0, severa. Observa-se nas Figuras 25 e 26, bastante similaridade entre os mapas para sistemas de irrigação por aspersão e superficial, neste último caso existe um pequeno aumento em área sem restrição de uso, localizada na porção intermediária das bacias hidrográficas do Estado. Esta região contabiliza cerca de 31% de toda a superfície do Estado. Destaque-se a concentração da região com classificação como severa no limite noroeste das bacias dos rios Sergipe e Japarutuba e centro-noroeste na bacia do rio São Francisco. Com relação aos municípios observou-se que as áreas de maior concentração de sódio localizaram-se nos municípios de Canindé do São Francisco, Poço Redondo, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Carira e Nossa Senhora Aparecida. As menores concentrações situaram-se nos municípios de Neópolis, Japoatã, Pacatuba, Japarutuba, Pirambu, Santo Amaro de Brotas, São Cristóvão, Areia Branca e Itaporanga d'Ajuda.

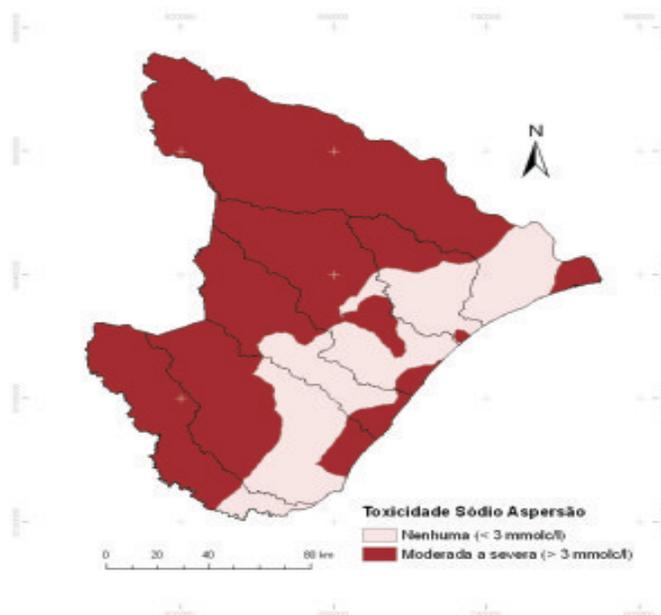


Figura 25 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Toxicidade por Sódio em sistemas de irrigação por aspersão nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

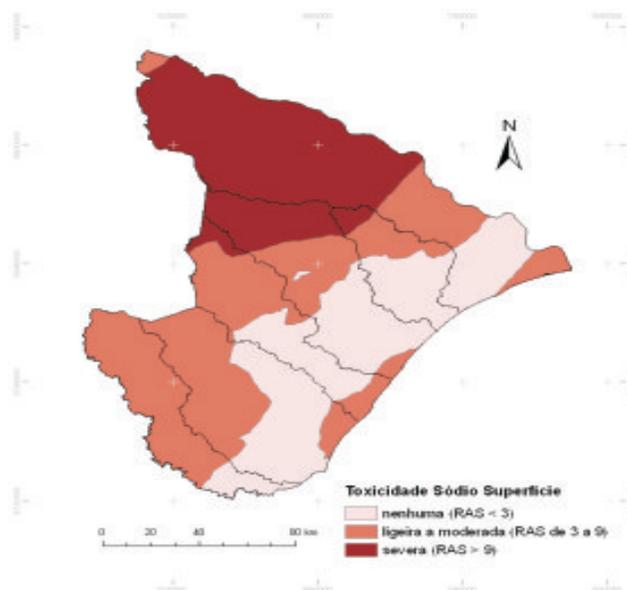


Figura 26 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Toxicidade por Sódio em sistemas de irrigação por superfície nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Salinidade - Sólidos Dissolvidos Totais

A divisão em classes de restrição de uso realizada pela FAO com relação a salinidade resultante dos SDT considera como águas sem restrição de uso aquelas que apresentem concentração de sais dissolvidos inferior a 450mg/l; com restrição moderada para valores entre 450 e 2000 mg/l e restrição considerada severa para concentrações acima de 2000 mg/l. O mapa resultante (Figura 27) mostra que a região com restrição de uso classificada com o severa localiza-se na região semi-árida compreendendo a porção intermediária-noroeste da bacia do rio São Francisco e limites noroeste nas bacias Japaratuba, Sergipe, Vaza-Barris e Real. A maior parte da região intermediária-litorânea das bacias hidrográficas foi classificada como sem restrição de uso, no entanto nas bacias dos rios Sergipe, Vaza-Barris e parcialmente, Piauí e São Francisco existem parcelas com restrição moderada. Observa-se que cerca de 30% da área do

Estado foi classificada como sem restrição de uso por SDT; 29% como restrição moderada e 41% como severa restrição. Comente-se a grande similaridade entre este mapa e aquele relacionado à restrição de uso por avaliação da Condutividade Elétrica da água subterrânea, como era esperado. Os municípios de Canindé do São Francisco, Poço Redondo, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Carira e Nossa Senhora Aparecida apresentaram os valores mais altos de concentração de SDT, enquanto que os menores valores foram obtidos nos municípios de Neópolis, Japoatã, Pacatuba, Japaratuba, Pirambu, Santo Amaro de Brotas, São Cristóvão, Areia Branca e Itaporanga d'Ajuda.

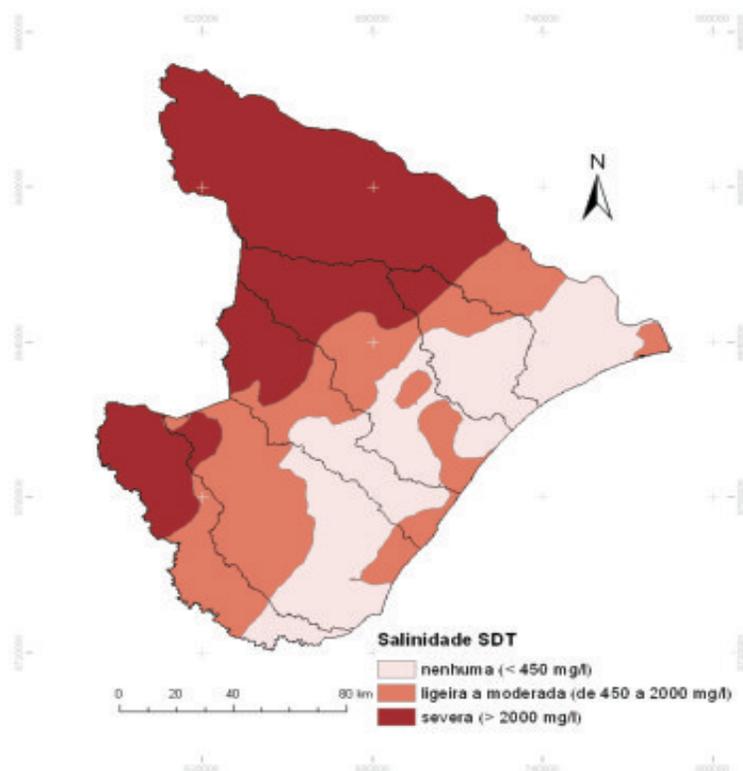


Figura 27 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Salinidade por Sólidos Dissolvidos Totais nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Sodicidade - Condutividade elétrica e RAS

A Razão de Adsorção do Sódio (RAS) exprime a relação entre os íons sódio, cálcio e magnésio da água de irrigação. Dada sua elevada correlação com a Porcentagem de Sódio Trocável no solo (PST), nas diretrizes da Tabela 1, a RAS é utilizada, juntamente com a condutividade elétrica, como indicador do potencial do sódio em causar problemas de infiltração da água no solo. A RAS se constitui em um parâmetro que integra o efeito dispersante das partículas do solo promovido pelo íon sódio, com o efeito floculante dos demais sais, notadamente do cálcio e do magnésio. A dispersão das partículas de argila e matéria orgânica constituintes do solo ocasiona a perda da estrutura do solo, resultando em uma maior dificuldade de infiltração da água da chuva e ou irrigação. Assim, a presença de sais na solução do solo constitui um fator que contrabalança o efeito dispersante do íon sódio. Para avaliação da restrição de uso da água subterrânea para irrigação considerando a possibilidade de alteração da capacidade de infiltração do solo por ação de sais depositados, a FAO estabelece um critério de classificação baseado na relação entre RAS e condutividade elétrica, conforme apresentado na Tabela 1. Segundo os limites de classes de restrição definidos pela FAO, observa-se na Figura 28, características bem diversas das apresentadas até o momento. Pode-se verificar que a região contida no Semi-árido sergipano é apresentada como sem restrição de uso, com concentração das regiões de restrição moderada a severa na porção intermediária-litorânea das bacias hidrográficas. Isto se justifica pela capacidade de ação inversa de alguns sais com relação à ação de sodificação do solo, agindo como floculantes e promovendo o aumento da infiltração do solo. Assim, quanto maior a salinidade da água, maior a ação de outros sais neutralizando a capacidade dispersante do sódio. Ressalte-se que esta análise é válida apenas para a restrição de uso da água considerando os efeitos sobre a infiltração do solo, uma vez que outras restrições estão presentes no uso de águas com elevada salinidade, como foram apresentadas anteriormente. Regiões dos municípios de Japoatã, Neópolis, Pacatuba, Japaratumã, São Cristóvão e Areia Branca mostram-se com severa restrição de uso.

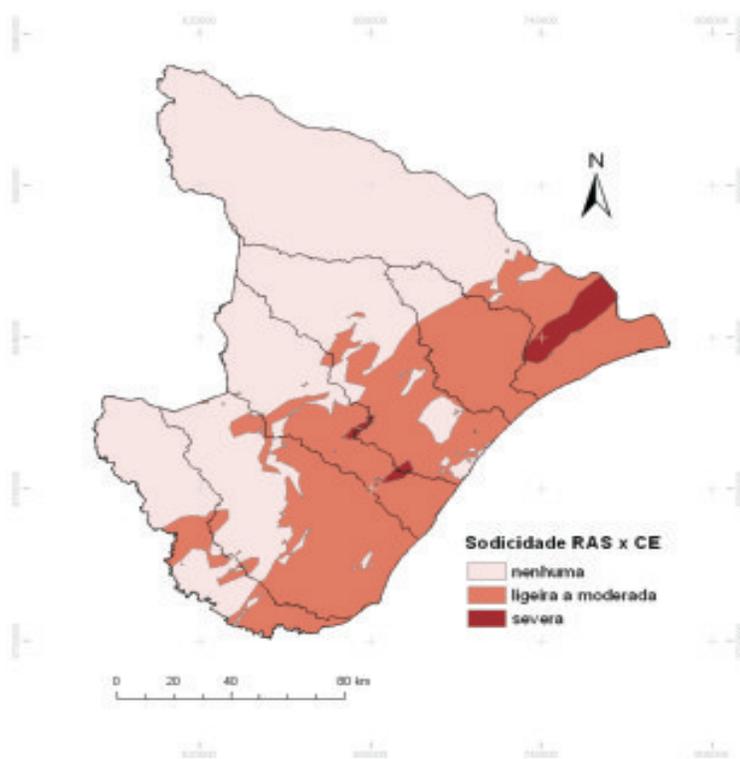


Figura 28 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Sodicidade por RAS e CE nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Obstrução de sistemas de irrigação localizada - Índice de Saturação de Cálcio

A consideração da restrição de uso das águas subterrâneas por riscos de obstrução dos sistemas de irrigação resultante da precipitação de CaCO_3 , é realizada pela FAO através do Índice de Langelier. Este determina que apresentando valores negativos não há risco de precipitação e valores positivos indicam a existência de tal risco. Assim, o mapa gerado (Figura 29) mostra que a maior parte da área das bacias hidrográficas, excetuando-se as bacias dos rios São Francisco e Real, não apresentam restrição de uso das águas de seus poços.

Esta região situa-se na porção intermediária das bacias até o litoral do Estado, contabilizando cerca de 55% da área do Estado. Dentro desta região sem restrição, destacam-se áreas nos municípios de Pacatuba, Neópolis, Própria, Japoatã, Siriri, Itaporanga d'Ajuda, São Cristóvão e Estância. Para os municípios de Canindé do São Francisco, Poço Redondo, Monte Alegre de Sergipe, Nossa Senhora da Glória, Carira e Nossa Senhora Aparecida os valores de Langelier apresentaram valores positivos mais elevados.

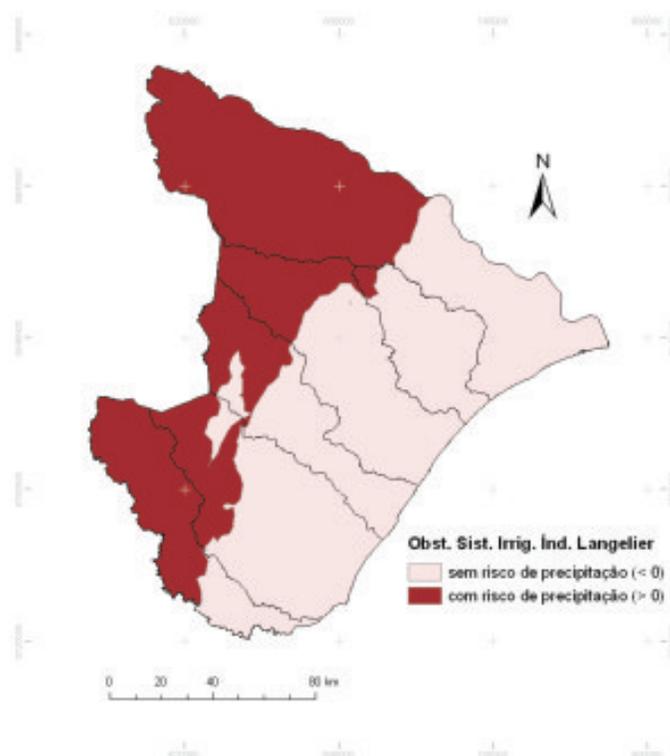


Figura 29 – Restrição ao uso das águas subterrâneas pelo risco de Obstrução de sistemas de irrigação pelo Índice de Langelier nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Graus de restrição

A partir dos mapas gerados anteriormente, considerando as restrições relacionadas às variáveis Condutividade Elétrica, Cloretos, Ferro, Carbonatos, Sódio e Índice de Langelier, foram gerados dois mapas de graus de restrição, levando em conta as diferenças que a FAO estabelece entre os sistemas de irrigação por aspersão e superficial. Os mapas apresentam a classificação das áreas nas bacias hidrográficas de acordo com o número de variáveis que apresentem restrição, variando de não existir restrição relacionada a alguma das variáveis até a ocorrência de restrição às seis variáveis selecionadas. Ressalte-se que estes mapas não estabelecem a qual variável está relacionada à restrição de uso, chamada também de risco aqui, apenas se a área em questão apresenta alguma restrição e o número de variáveis desta. Para conhecer a quais variáveis se refere, deve ser consultado o mapa referente a cada uma delas. Para irrigação por aspersão (Figura 30) observa-se que as áreas sem risco de uso da água subterrânea localizam-se na parte central da bacia do rio Japarutuba e próximo ao litoral na bacia do rio Vaza-Barris. As regiões com grau de risco 6, ou seja, que todas as variáveis representam restrição de uso localizam-se na porção extremo-noroeste das bacias dos rios Real, Vaza-Barris, Sergipe e Japarutuba e centro-noroeste das bacias dos rios Piauí e São Francisco. Os resultados são bastante semelhantes ao considerar o mapa para irrigação superficial (Figura 31), apenas observa-se uma redução no grau de risco na parte intermediária-litoral na bacia do rio Sergipe, passando de grau 5 para grau 3. Verifica-se também uma redução de risco no litoral da bacia do rio Vaza-Barris, passando de grau 5 para grau 4. Estas mudanças devem-se aos limites que a FAO considera para restrição devida a Cloretos, avaliando sistemas de irrigação por aspersão e superficial.

As regiões onde não foram detectadas restrições localizaram-se nos municípios de São Cristóvão, Itaporanga d'Ajuda, Capela e Japarutuba, para os dois sistemas de irrigação, com pouca diferença entre ambos.

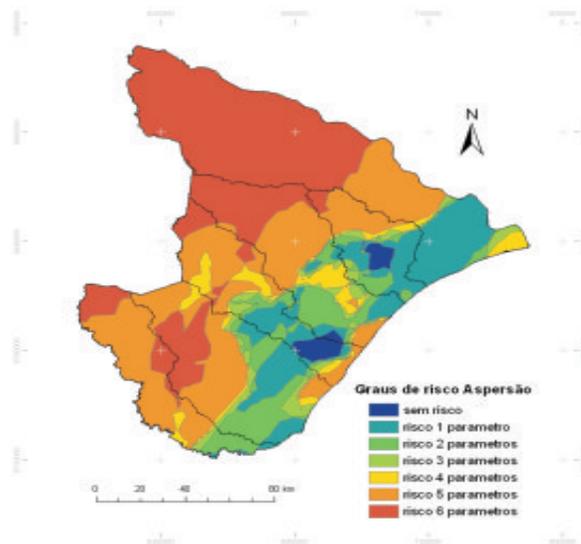


Figura 30 – Grau de risco para uso das águas subterrâneas em sistemas de irrigação por aspersão nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

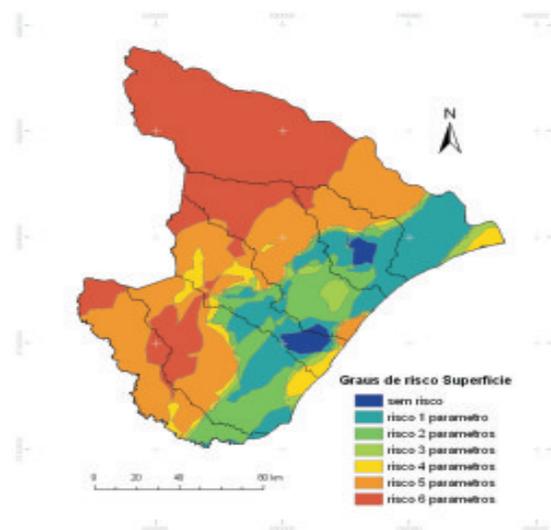


Figura 31 – Grau de risco para uso das águas subterrâneas em sistemas de irrigação por superfície nas bacias hidrográficas do Estado de Sergipe

Conclusões

1. Os resultados demonstraram o potencial do uso de ferramentas de geoestatística para a obtenção de informações com grau de confiabilidade mensurável em regiões não amostradas.
2. Observou-se uma elevada correlação entre as características físico-químicas da água subterrânea no Estado e as formações hidrogeológicas dominantes,
3. Verificou-se para a grande maioria das variáveis qualitativas, excetuando-se ferro total e amônia, a redução nas concentrações no sentido interior-litoral do Estado, segundo a transição de formações aquíferas fissurais para granulares;
4. Os mapas de risco de uso das águas subterrâneas para irrigação mostraram a predominância de áreas com restrições moderadas a severas.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE JÚNIOR., A. S. de, SILVA, E. F. F., BASTOS, E. A., MELO, F. B., LEAL, C. M. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no Semi-árido piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Vol. 10, n. 4, Campina Grande, PB. DEAg/UFCEG. 2006.
- AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture**. 3rd. ed. Rome: FAO, 1994. 174p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 29).
- BOMFIM, L.F.C.; da COSTA, I.V.G; BENVENUTI, S.M.P. **Projeto cadastro da infra-estrutura hídrica do Nordeste: Estado de Sergipe**. Aracaju, SE, CPRM, 2002.
- BORGHETTI, M.R.B.; BORGHETTI, J.R.; FILHO, E.F.R. **Aqüífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba: Fundação Roberto Marinho/Itaipu Binacional, 2004.
- BOT, A.; NACHTERGAELE, F.; YOUNG, A. **Land resource potential and constraints at regional and country levels**. Rome: FAO, 2000. (FAO. World Soil Resources Report, 90).)
- CÂMARA, G.; QUEIROZ, G.R. Arquitetura de sistemas de informações geográficas. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à ciência da geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 4 jul. 2008.
- CRUZ, W.B.; MELO, F.A.C.F. de. Zoneamento químico e salinização das águas subterrâneas do Nordeste do Brasil. **Boletim de Recursos Naturais**, Recife. v.7, n.1/4, p.7-40, 1969.
- ESRI. **ArcGIS desktop help. v. 9.1**. Disponível em: <<http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.1/index.cfm>>. Acesso em: 20 jun. 2008.
- USDA. Department of Agriculture. An index of the tendency of CaCO₃ to precipitate from irrigation waters. U.S. Salinity Laboratories. **Soil Science Society**

of **America Proceedings**, v. 29, p. 91-92, 1965

GILBERT, R.G.; FORD, H.W. Operational principles/emitter clogging. In: NAKAYAMA, F.S.; BULKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam:Elsevier, 1986. cap.3. p. 142-163.

GONÇALVES, A.C.A. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo da irrigação. Piracicaba, 1997. 118p. **Tese** (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MEDEIROS, J.F. DE; LISBOA, R. DE A.; OLIVEIRA, M. DE; SILVA JÚNIOR, M.J. DA; ALVES, L.P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.3, p.469-472, 2003.

NAKAYAMA, F. S. Operational principles/water treatment. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. cap. 3. p. 164-187.

OLIVEIRA, M. Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais. In: Gheyi, H.R.; Queiroz; J.E.; Medeiros, J.F. (1997). **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Campina Grande: UFPB, 1997. p.1-35.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Revista Estudos Avançados**, v.22, n.63, p. 43-60, 2008.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, n.1, p.1-6, 1986.

RESENDE, R. S., AMORIM, J. R. A., SIQUEIRA, O. J. W., COSTA, J. C. S., SANTOS JÚNIOR, J. B.O. Diagnóstico preliminar da qualidade da água subterrânea para fins de irrigação na bacia hidrográfica do rio Piauí, em Sergipe. In: SILVA, M. III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, 1., 2006, Aracaju. **Anais**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2006. 1 CD-ROM.

RODRIGUES, J.O., ANDRADE, E.M. DE; CRISÓSTOMO, L.A.; TEIXEIRA, A. DOS 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, out./dez. 2007.

SMITH, A. J. Rainfall and irrigation controls on groundwater rise and salinity risk in the Ord River Irrigation Area, northern Australia. **Hydrogeology Journal**, v.16, p. 1159-1175, 2008.

SOUZA, L. C. de. Variabilidade espacial da salinidade de um solo aluvial no semi-árido paraibano. Campina Grande, 1999. 77p. **Dissertação** (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba.

Embrapa

Tabuleiros Costeiros

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

