



Alerta: Os artigos publicados nesta seção não são avaliados por pares e não são indexados. A intenção da seção ECNT é prover um espaço para divulgação de dados e estudos de interesse local, sem caráter científico. Sendo assim, a Revista Águas Subterrâneas não se responsabiliza pelo conteúdo publicado.

Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed. The intention of the ECNT section is to provide a space for the dissemination of data and studies of local interest, with no scientific character. Therefore, Revista Águas Subterrâneas is not responsible for this content.

Qualidade de águas subterrâneas sob embasamento cristalino em porção do sertão central cearense

Groundwater quality, under crystalline rock, at the central area of Ceará

Francisco Klayton Marques de Alencar¹, Gustavo Ross Ribeiro Lima¹, Stephanie de Oliveira Souza¹, Andrea Limaverde de Araújo¹, Fernando José Araújo da Silva¹

¹ Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

✉ klalencar@ufc.br, gustavo_ks4@hotmail.com, stephanie_souza@hotmail.com

Resumo

Este trabalho caracterizou, através da análise dos constituintes químicos e com o auxílio de índices de qualidade de água, as águas subterrâneas, sob embasamento cristalino, de parte do semiárido cearense, localizado entre os municípios de Banabuiú, Quixadá e Quixeramobim. Os índices de estabilidade mostraram uma forte tendência corrosiva das águas. Os índices de irrigação indicaram que parte das águas apresentam elevado risco de sodificação e salinização do solo, não sendo adequadas para o uso na agricultura. Os índices gerais de qualidade dividiram as águas em dois tipos: de boa qualidade e uso adequado e de qualidade inadequada e uso restrito.

Abstract

This research characterized the groundwater, under crystalline basement, of a portion of Ceará's semi-arid analyzing the ionic content of the groundwater and using water quality indices. All the stability indices indicated a strong corrosive tendency. Regarding irrigation purposes, part of the groundwater has a high risk of soil salinization and sodification. The water quality indices related to ionic content divided the groundwater in two, those with good quality and appropriate for general use and those with low quality and inappropriate for general use.

Palavras-chave:

Águas Subterrâneas.
Embasamento cristalino.
Índices de qualidade de água.

Keywords

Groundwater.
Crystalline rock.
Water quality indices.

DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29614>

1. INTRODUÇÃO

Diversos são os fatores que contribuem para um cenário de escassez hídrica no Ceará, quadros climáticos extremos, baixas e irregulares médias pluviométricas, assim como altas taxas de evaporação, constituem alguns fatores determinantes na quantidade e qualidade das águas da região (SANTOS et al., 2013).

Historicamente, a crise o desafio hídrico na região tem sido enfrentado através da construção de reservatórios superficiais, os açudes (SANTIAGO et al., 2002; INSA, 2012). Contudo, a região continua enfrentando problemas de acesso à água. Nesse cenário, as águas subterrâneas se apresentam como uma alternativa face a situação hídrica cearense.

Cerca de 70% do Ceará encontra-se sob o embasamento cristalino, ambiente que propicia um elevado aporte salino às águas subterrâneas, além de armazenar baixos volumes de água devido à descontinuidade de fendas e fraturas (ARAÚJO NETO et al., 2014).

Dessa forma, é importante determinar os perfis de qualidade das águas subterrâneas no semiárido cearense. Isso tem destacada relevância, pois o uso da água exige qualidade compatível com o fim, de forma que seja sustentável. Refere-se aqui ao fato de que a atividade consumidora não seja inviabilizada pela qualidade da água. Dessa forma, o estudo coteja analisar o conteúdo iônico das águas de substrato do semiárido cearense através de índices de qualidade de água..

2. MATERIAL E MÉTODOS

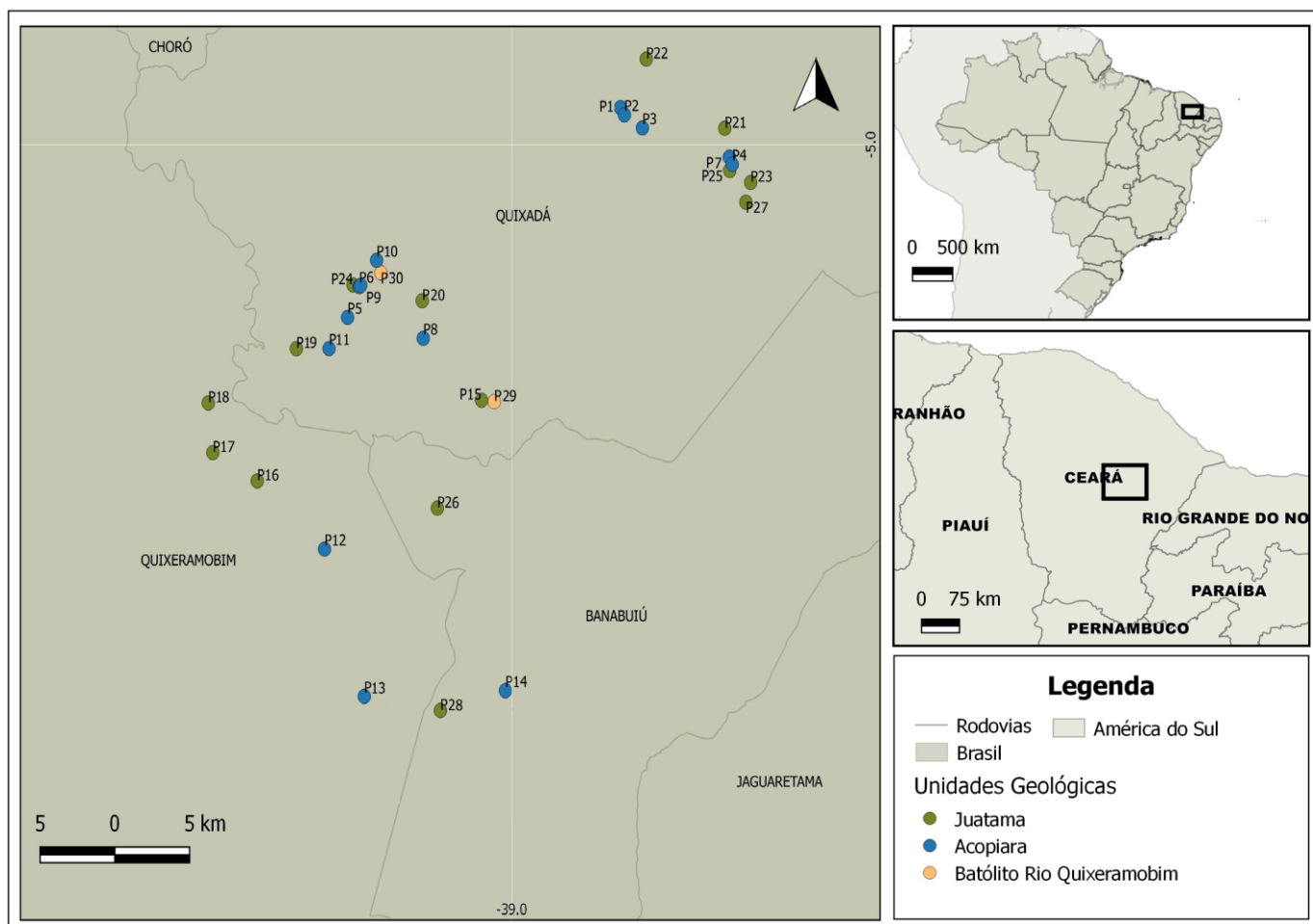
2.1 Localização e características da área de estudo

A área de estudo foi o sertão central do estado do Ceará, distando cerca de 190 km, em linha reta, de Fortaleza. Os poços do estavam em área que compreendeu um polígono com fronteiras nos municípios de Banabuiú, Quixadá e Quixeramobim (Figura 1).

A região, totalmente inserida no Polígono das Secas, apresenta clima Tropical Quente Semiárido, com temperaturas médias anuais variando de 26°C a 32°C. O regime pluviométrico é caracterizado por intensa irregularidade de chuvas, sendo a média pluviométrica anual cerca de 725,4 mm, concentradas no período chuvoso, de janeiro a junho, em especial nos meses de março e abril (INESP, 2009; CEARÁ, 2010; ANA, 2017).

A área em estudo encontra-se na depressão sertaneja, que apresenta solos rasos, fertilidade natural de baixa à média, além de forte tendência à erosão. Em meio à depressão sertaneja podem-se encontrar planícies aluviais, com solos mais profundos e de maior fertilidade, os batólitos dos rios Quixadá e Quixeramobim, além de inselbergs de até 700m de altitude (CPRM, 2014). O padrão geológico local compreende rochas sob embasamento cristalino e rochas sedimentares, em menor número (BRASIL, 2014).

Figura 1 – Região de estudo.



2.2 Metodologia

Os elementos de informação do estudo são os microdados do trabalho de Araújo (2017). A autora fez análises físico-químicas de 30 poços da região, poços sob embasamento cristalino. As amostras de água dos poços foram coletadas em dezembro de 2013 e setembro de 2014.

As amostras de águas subterrâneas obtidas na região de estudo foram retiradas de unidades três unidades geológicas diferentes: de Acopiara e do Batólito do Rio Quixeramobim, localizados inteiramente na zona plana da depressão sertaneja, e de Juatama, em inselbergs ou agrupamentos de inselbergs (ARAÚJO, 2017).

Os parâmetros determinados a partir das análises físico-químicas, e respectivos procedimentos analíticos, seguiram as recomendações de APHA (2005). Foram determinadas as seguintes variáveis: condutividade elétrica (CE), Dureza total, pH, Sódio (Na⁺), Potássio (K⁺), Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Cloreto (Cl⁻), Sulfato (SO₄²⁻), Fluoreto (F⁻), Bicarbonato (HCO₃⁻), Carbonato (CO₃²⁻) e Nitrato (NO₃⁻).

A análise da qualidade das águas subterrâneas da região de estudo foi feita através de índices de qualidade de água de estabilidade, de irrigação e de salinidade. Índices de qualidade de água são ferramentas de simples compreensão utilizadas por gestores de recursos hídricos para transmitir informações sobre a qualidade e os usos potenciais de um corpo d'água com base em vários critérios (DELGADO et al., 2010; CENTENO et al., 2019). Buscou-se, com o auxílio dos índices, avaliar o potencial corrosivo e incrustativo das águas, sua adequabilidade para irrigação e para diversos fins.

Utilizou-se também o software Excel para explorar os dados a fim de se determinar medidas estatísticas de tendência central e dispersão..

2.3 Índices Aplicados

O entendimento do estado das águas subterrâneas em relação à estabilidade (potencial corrosivo e incrustativo) foi feito através da utilização dos índices de saturação de Langelier (ISL), de Ryznar (IRy), de agressividade (IA) e de Larson-Skold (ILSk), como se pode ser visto na Tabela 1.

O índice de saturação de Langelier é uma medida do grau de saturação de carbonato de cálcio na água, seu cômputo indica a habilidade da água em promover a dissolução ou a precipitação de carbonato de cálcio (SHAH et al., 2019). O cálculo do índice é dado pela Equação 1.

O índice de estabilidade de Ryznar foi desenvolvido a partir de observações práticas de incrustações formadas em metais que mantiveram contato com soluções aquosas (SHANKAR, 2014). O equacionamento do índice é expresso pela Equação 6.

O índice de agressividade foi desenvolvido para verificar o potencial corrosivo da água em materiais não metálicos, em especial, em materiais de cimento e concreto (CHORAMIN et al., 2015). O índice está descrito na Equação 7.

O índice de Larson-Skold, descrito na Equação 8, incorpora no seu equacionamento os efeitos corrosivos dos íons cloreto e sulfato e os efeitos incrustativo dos íons carbonato e bicarbonato, a fim de determinar o potencial corrosivo ou incrustativo de águas (IMRAN et al., 2005).

Tabela 1 – Índices de estabilidade da água utilizados no trabalho.

Índice	Equação	Valor do Índice	Condição da Água
Índice de Saturação de Langelier (LSI) ¹	$LSI = pH - pH_s$ (1)	$LSI > 4$	Incrustação severa
	$pH_s = \log \left(\frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \right) + 6,35$ (2)	$4 \leq LSI < 3$	Incrustação moderada
	$pH_s = \log \left(\frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \right) + 6,35$ (3)	$3 \leq LSI < 1$	Incrustação suave
	$pH_s = \log \left(\frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \right) + 6,35$ (4)	$1 \leq LSI < 0,5$	Incrustação muito suave
	$pH_s = \log \left(\frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} \right) + 6,35$ (5)	$0,5 \leq LSI < -0,5$	Balanceado
Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) ²	$RSI = pH - pH_s$ (6)	$-0,5 \leq LSI < -2,0$	Corrosão suave
		$-2,0 \leq LSI < -5,0$	Corrosão moderada
		$RSI < 5$	Incrustação severa
		$5 \leq RSI < 6$	Incrustação média
		$6 \leq RSI < 7$	Pouca incrustação ou corrosão
Índice de Agressividade (IA) ³		$7 \leq RSI < 7,5$	Corrosão média
		$7,5 \leq RSI \leq 9$	Corrosão elevada
		$RSI > 9$	Corrosão severa
Índice de Larson-Skold (ILS) ⁴	$IA = \log \left(\frac{[Cl^-][SO_4^{2-}]}{[Ca^{2+}][Mg^{2+}]} \right) + 10$ (7)	$AI < 10$	Água agressiva
	$ILS = \frac{[Ca^{2+}][Mg^{2+}]}{[CO_3^{2-}][HCO_3^-]} \left(\frac{[Cl^-][SO_4^{2-}]}{[Ca^{2+}][Mg^{2+}]} \right)^2$ (8)	$10 \leq AI < 12$	Água moderadamente agressiva
		$AI \geq 12$	Água não agressiva
		$ILS < 0,8$	Corrosão baixa
		$0,8 \leq ILS \leq 1,2$	Corrosão significativa
		$ILS > 1,2$	Corrosão elevada

Fonte: ¹Cavazzana et al. (2012); ²Carrier (1965); ³Imran et al. (2005); ⁴Vasconcelos et al. (2015).

A avaliação da qualidade das águas subterrâneas para irrigação utilizou índices e razões iônicas que verificam o impacto do conteúdo iônico das águas no solo e em cultivos. Os índices utilizados foram a Razão de adsorção de sódio (RAS), o Carbonato de Sódio Residual (RCS), o Percentual de Sódio (%Na) e o Índice de Kelly (IKy), todos estão descritos na Tabela 2.

A RAS é um parâmetro efetivo na avaliação de águas para irrigação. Ela indica se há risco de sodificação do solo através de trocas iônicas entre o sódio presente na água e os íons de cálcio e magnésio presentes no solo (KHAN et al., 2013). A análise das águas utilizando a RAS foi feita através do diagrama do USSSL (United States Salinity Laboratory). O diagrama une a RAS com o a condutividade elétrica, permitindo avaliar conjuntamente o risco de sodificação e salinização do solo.

O efeito nocivo do sódio ao solo também foi verificado através do Percentual de Sódio (%Na), como mostra a Equação 10. O diagrama de Wilcox relaciona a %Na com a CE, posicionando a água em uma das cinco classificações adotadas e indicando sua adequação à irrigação.

O RCS é útil para indicar a possibilidade de precipitação de carbonatos de magnésio ou cálcio, fato que compromete a quantidade de matéria orgânica presente no solo, a infiltração de água e promove o aumento da RAS (JASMIN; MALLIKARJUNA, 2015). A equação 11 apresenta o equacionamento do índice.

O Índice de Kelly é voltado para avaliar como as trocas iônicas entre Na⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺ podem afetar cultivos (TALABI et al., 2017). A formulação matemática do índice está descrita na Equação 12.

Cabe ressaltar que foi utilizado o software diagramas para plotagem de gráficos e diagramas dos índices cuja avaliação é feita a partir de gráficos.

Tabela 2 – Legenda da tabela.

Índice	Equação	Valor do Índice	Condição da Água
Razão de Adsorção de Sódio (RAS) ¹	$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}} \quad (9)$	Avaliação gráfica	-
Percentual de Sódio (%Na) ²	$\%Na = \frac{[Na^+]}{[Na^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} \quad (10)$	Avaliação gráfica	-
Carbonato de Sódio Residual (RCS) ¹	$RCS = \frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] - [CO_3^{2-}] - [HCO_3^-]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} \quad (11)$	RCS < 1,25 1,25 ≤ RCS < 2,50 RCS > 2,50	Boa (Aceitável) Regular (Tolerável) Ruim (Inadequado)
Índice de Kelly (IKy) ⁴	$IKy = \frac{[Na^+]}{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]} \quad (12)$	IKy < 1 1 ≤ IKy < 2 IKy > 2	Uso Recomendado Uso Marginal Uso não Recomendado

Fonte: ¹Richards (1954); ²Wilcox (1955); ³Kelly (1940).

As águas subterrâneas da região também foram analisadas sob o ponto de vista de índices de qualidade de água baseados no conteúdo salino, aqui denominados como índices gerais de salinidade. Tais índices podem ser se adequar mais fielmente às características específicas do corpo hídrico para o qual foi designado dependendo das técnicas estatísticas utilizadas na sua formulação (MEIRELES et al., 2010).

Os índices abordados no presente estudo foram propostos por Oliveira et al. (2007), Yidana e Yidana (2010), Meireles et al. (2010) e Araújo Neto et al. (2014). A Tabela 4 apresenta o equacionamento, os parâmetros e os respectivos pesos de cada índice.

Tabela 3 – Índices de qualidade de água baseados no conteúdo iônico.

Autor	Equação	Parâmetro (q)	Peso (wi)
Oliveira et al. (2007) ¹	(13)	pH	0,05
		Cl ⁻ (mg/L)	0,26
		F ⁻ (mg/L)	0,16
		Dureza (mg CaCO ₃ /L)	0,16
		NO ₃ ⁻ (mg N/L)	0,15
		STD (mg/L)	0,22
		F ⁻ (mg/L)	0,17
		Na ⁺ (mg/L)	0,07
Yidana e Yidana (2010) ²	(14)	Dureza (mg CaCO ₃ /L)	0,07
		Fe (mg/L)	0,10
		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0,10
		Cl ⁻ (mg/L)	0,17
		pH	0,14
		NO ₃ ⁻ (mg N/L)	0,17
		CE (dS/cm)	0,211
Meireles et al. (2010) ³	(15)	Na ⁺ (meq/L)	0,204
		Cl ⁻ (meq/L)	0,194
		HCO ₃ ⁻ (meq/L)	0,202
		RAS ^o (meq/L) ^{1/2}	0,189
		CE (dS/m)	0,254
Araújo Neto et al. (2014) ⁴	(16)	Cl ⁻ (meq/L)	0,260
		Na ⁺ (meq/L)	0,243
		Mg ²⁺ (meq/L)	0,242

Fonte: ¹Oliveira et al. (2007); ²Yidana e Yidana (2010); ³Meireles et al. (2010); ⁴Araújo Neto et al. (2014).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Composição química das águas subterrâneas

Foi verificada grande variação na composição química das amostras das águas em estudo. Todos os parâmetros analisados, Tabela 5, apresentaram elevados valores de desvio-padrão e de coeficiente de variação indicando a grande variação na concentração dos componentes químicos de um poço para o outro. Praticamente todos os limites presentes na Portaria de Consolidação nº 05/2017 (BRASIL, 2017) foram ultrapassados.

O pH das águas se mostrou relativamente baixo, revelando uma natureza moderadamente ácida das águas analisadas. Em ambos os períodos de estudo, 60% dos poços apresentaram pH abaixo de do limite mínimo determinado pela PRC 05/2017 (6,0). Nenhuma amostra apresentou pH superior ao limite máximo determinado pela portaria (9,5), havendo somente 10% dos poços com águas com pH superior a 7,0.

Os sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica das águas foram os parâmetros com as maiores amplitudes de variação. A média de STD para os poços cristalinos foi de 1856 mg/L e 1803 mg/L, nos dois períodos de coletas, dezembro de 2013 e setembro de 2014, respectivamente. Os resultados mostraram que 58% e 63% das águas dos poços estavam acima do limite da PRC 05/2017 (1000 mg/L). Já a CE, que é uma medida indireta da quantidade de substâncias ionizáveis na água, apresentou, como esperado, a mesma variação do STD. Cabe ressaltar que as características naturais do semiárido favorecem a acumulação de sólidos na água, pois o clima e o intemperismo das rochas que constituem os aquíferos podem contribuir fortemente para isso (ANDRADE et al., 2012; CERQUEIRA, 2015).

A região apresenta águas ricas em cloreto e sódio. Estes íons são comuns em regiões semiáridas, no entanto, elevadas concentrações de ambos podem ser prejudiciais em águas para consumo humano e para irrigação (EMBRAPA, 2001; SARNO et al., 2013).

O cátion apresentou variações entre 14,9 – 3345,0 mg/L e 8,2 – 1340,0 mg/L, para os períodos de dezembro de 2013 e setembro de 2014, respectivamente. Já o ânion variou de 9,6 a 6548,0 mg/L e de 14,9 a 4485,8 mg/L, para os respectivos períodos. Cerca de 60% dos poços, em ambos os períodos analisados, apresentam-se fora dos padrões de potabilidade da PRC 05/2017 (limite de 250 mg Cl⁻/L). Em comparação ao cloreto, o íon sulfato apresentou valores mais moderados nas águas subterrâneas estudadas. Somente um poço, P20, apresentou valores acima do permitido, de acordo com a PRC 05/2017, em ambos os períodos de estudo. Águas com elevadas concentrações de sulfato devem ser evitadas em indústrias, devido ao potencial corrosivo desse íon (SHARMA et al, 2013).

Os resultados também indicaram elevadas concentrações de nitrato nas águas subterrâneas da região. Cerca de 80% e 40% dos poços, em ambos os períodos de estudo, apresentaram concentração de nitrato superior ao limite estabelecido na legislação (10 mg/L). De acordo com CETESB (2005), concentrações de nitrato superiores a 5,0 mg/L indicam possível contaminação de origem antropogênica.

Os demais íons apresentaram menores variações comparando-se às do cloreto e sódio, contudo, as moderadas amplitudes de variação indicam que diferentes processos hidroquímicos contribuem diretamente na composição das águas (AHMED et al., 2012).

Tabela 4 – Descrição estatística dos parâmetros avaliados das águas subterrâneas em estudo.

Parâmetro	Dezembro/2013				Setembro/2014				Padrão ^a
	□	Mín.	Máx.	σ	□	Mín.	Máx.	σ	
pH	6,3	4,1	6,9	0,6	6,1	4,3	8,7	0,7	6 – 9,5
CE	4556	87	22000	2427,1	4427	59	13230	2118,6	-
STD	1855,5	34,5	8962,5	1064,1	1802,9	23,45	5389,4	1138,5	1000,0
Na ⁺	504,2	14,9	3345,0	327,9	434,4	8,2	1340,0	368,1	200,0
K ⁺	17,2	1,3	99,7	18,7	19,2	1,8	96,0	74,8	-
Ca ²⁺	162,8	4,8	672,0	197,3	188,1	4,0	724,0	203,4	-
Mg ²⁺	139,5	1,0	549,2	138,6	148,2	2,4	716,9	141,2	-
Cl ⁻	1282,3	9,6	6458,0	1298,5	1243,0	14,9	4485,8	1007,8	250,0
SO ₄ ²⁻	48,5	0,3	248,3	60,8	33,1	2,8	265,5	47,4	250,0
HCO ₃ ⁻	275,5	30,1	727,0	215,3	265,8	37,6	664,8	121,7	-
CO ₃ ²⁻	0,2	0,0	0,2	0,0	0,5	0,0	6,0	0,2	-
NO ₃ ⁻	35,3	1,4	91,7	23,6	14,6	0,1	31,7	8,9	10,0

Todos os parâmetros estão em mg/L, exceto pH (unidades) e CE (µS/cm). a – PRC nº05/2017.

Analisando separadamente as águas das diferentes unidades que compõem a região de estudo, percebe-se que Juatama apresenta uma homogeneidade maior nos parâmetros analisados, apresentando as menores médias, enquanto as unidades de Acopiara e do Batólito do Rio Quixeramobim apresentam elevadas variações em todos os parâmetros de estudo, como indicam as Tabelas 6 e 7.

De acordo com as Tabelas citadas, Juatama é a unidade com águas que mais se enquadram nos padrões exigidos pela PRC 05/2017. 60% dos poços desta unidade apresentam todos os parâmetros da PRC 05/2017 dentro dos limites estabelecido. Por outro lado, as demais unidades não apresentam um só poço com todos os parâmetros dentro dos limites da legislação.

Tabela 5 – Descrição estatística dos parâmetros avaliados das diferentes unidades para o período de dezembro de 2013.

Parâmetro	Acopiara				Juatama				Batólito R. Q.			
	□	Mín.	Máx.	σ	□	Mín.	Máx.	σ	□	Mín.	Máx.	σ
pH	6,1	4,1	6,6	0,8	6,3	5,6	6,9	0,3	6,7	6,7	6,7	0,0
CE	6419	3290	9810	2370,8	1683	87	8210	2688,0	12980	3960	22000	12756
STD	2614,4	1339,7	3996,1	965,9	685,2	34,5	3344,2	1095,2	5287,6	1612,8	8962,5	5197,2
Na ⁺	607,2	300,6	982,9	271,6	197,1	14,9	897,3	309,1	1933,5	522,0	3345,0	1996,1
K ⁺	30,1	8,4	99,7	25,1	7,3	1,3	24,6	7,5	11,1	6,3	16,0	6,8
Ca ²⁺	250,18	28,8	672,0	213,7	98,4	4,8	549,1	150,7	100,0	64,0	136,0	50,9
Mg ²⁺	201,3	9,7	374,2	130,4	94,2	1,0	549,2	155,2	94,77	87,4	102,6	10,3
Cl ⁻	1730,9	100,1	6458,0	1764,1	999,2	9,6	2964,8	969,6	654,6	365,7	943,3	408,4
SO ₄ ²⁻	41,4	1,4	56,8	25,7	49,6	0,3	248,3	85,7	82,11	38,3	125,9	61,9
HCO ₃ ⁻	290,3	80,2	300,8	192,7	216,0	30,1	727,0	237,1	576,5	526,3	626,6	70,7
CO ₃ ²⁻	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
NO ₃ ⁻	27,4	4,6	48,4	23,6	21,5	1,3	61,9	13,1	19,6	19,6	19,6	0,0

Tabela 6 – Descrição estatística dos parâmetros avaliados das diferentes unidades para o período de dezembro de 2013.

Parâmetro	Acopiara				Juatama				Batólito R. Q.			
	□	Mín.	Máx.	σ	□	Mín.	Máx.	σ	□	Mín.	Máx.	σ
pH	5,7	5,2	6,7	0,8	6,3	4,3	6,9	1,1	6,3	6,1	6,6	0,4
CE	7100	3840	10790	3112	2774	59	7800	2686	4011	3950	4072	86,2
STD	2906,2	1274,5	5389,2	1252,7	1142,1	23,4	3177,7	1105,4	1705,7	1608,6	1802,8	137,4
Na ⁺	588,4	54,2	1340,0	372,4	307,1	8,2	1013,4	332,4	351,0	189,0	513,0	229,1
K ⁺	26,8	5,3	96,0	22,84	13,6	1,8	256,0	189,7	12,4	8,1	16,8	6,1
Ca ²⁺	227,9	208,0	724,0	212,3	98,4	4,0	580,0	189,9	118,0	72,0	164,0	65,1
Mg ²⁺	161,7	12,9	345,0	108,5	128,9	2,4	716,8	198,7	91,1	65,6	116,6	36,1
Cl ⁻	1539,7	192,5	4485,8	1022,61	940,2	14,9	3022,6	1015,7	630,5	404,3	856,7	319,9
SO ₄ ²⁻	29,3	3,5	62,6	17,4	31,3	2,8	265,3	65,0	46,1	24,6	67,7	30,5
HCO ₃ ⁻	287,4	150,4	664,7	155,5	197,8	37,6	451,3	127,1	557,7	488,9	626,6	97,34
CO ₃ ²⁻	0,1	0,0	0,2	0,0	0,7	0,0	6,0	2,0	0,1	0,0	0,1	0,1
NO ₃ ⁻	18,8	9,2	31,7	6,1	10,8	0,1	18,8	8,5	11,1	8,4	13,7	3,7

3.2 Índices de estabilidade

De acordo com os resultados obtidos, para o período de dezembro de 2013, os poços cristalinos obtiveram valores médios do ISL, IRy, IA e ILSk de, respectivamente, -1,63 ($\sigma = 1,25$), 9,53 ($\sigma = 2,20$), 10,70 ($\sigma = 1,29$), 8,20 ($\sigma = 8,35$). No período subsequente, setembro de 2014, os valores médios dos índices foram de -1,67 ($\sigma = 1,49$), 9,39 ($\sigma = 2,21$), 10,7 ($\sigma = 1,29$), 8,20 ($\sigma = 8,37$).

Conforme o apresentado, todos os índices indicaram elevado potencial corrosivo das águas, nenhum poço analisado apresentou águas com potencial incrustativo. Cabe ressaltar que não foram verificadas variações temporais significantes, todos os índices apresentam valores próximos em todos os períodos estudados.

Segundo o ISL e o IRy, as águas da unidade de Juatama são as que apresentam maior potencial corrosivo, embora, sejam as que apresentam a menor carga de constituintes químicos. Isso decorre da formulação dos índices, os termos C e D no equacionamento de ambos correspondem, respectivamente, à dureza de cálcio e à alcalinidade. Baixos valores de dureza e alcalinidade indicam baixa capacidade de formação de depósitos de carbonato de cálcio e, por conseguinte, maior possibilidade da ocorrência de fenômenos corrosivos (ALSAQQAR et al., 2014; SHAH et al., 2019).

Conforme o IA, as águas da região são muito agressivas a materiais não metálicos. Isso indica que um possível contato entre as águas e materiais de cimento e amianto pode ocasionar a corrosão destes, liberando resíduos prejudiciais ao homem e ao meio ambiente.

Ao contrário da tendência observada com o ISL e o IRy, o ILSk indicou um menor potencial corrosivo nas águas de Juatama, muito embora, estas também sejam classificadas como corrosivas. Cabe ressaltar que o ISL e o IRy trabalham de forma indireta para indicar o potencial corrosivo, já o ILSk é equacionado na forma de uma razão de íons corrosivos (Cl⁻ e SO₄²⁻) e incrustativos (HCO₃⁻ e CO₃²⁻) (YOUSEFI et al., 2016). Foi verificado que o aumento da concentração de metais em águas de distribuição devido à corrosão de tubulações de distribuição de água com excesso de cloretos e sulfatos (SASHIDAR; KUMAR, 2008).

3.3 Índices de irrigação

Em geral, os principais parâmetros na verificação da adequabilidade de águas para irrigação incluem a análise da condutividade elétrica, do risco de salinização e de sodificação do solo, além da precipitação de carbonatos (VARDANJANI et al., 2015).

A RAS e a %Na permitiram a diferenciação das águas analisadas quanto ao risco de salinização e sodificação do solo, como mostram a Figura 2 e a Figura 3. Destaca-se que nas referidas figuras há pontos fora dos limites dos gráficos, pontos os quais são representados por CE inferior à 100 ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou superior a 5000 ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Cabe ressaltar também que há pontos faltosos nos gráficos devido à elevada condutividade elétrica.

A classificação das águas de Acopiara e do Batólito do Rio Quixeramobim, em sua maioria, como C₄S₄, gráfico da USSL, e como inadequadas, diagrama de Wilcox, indica que seu uso na irrigação deve ser evitado ou devem ser tomadas medidas de correção de salinidade e de drenagem do solo. Segundo Ayers e Westcot (1999) e Almeida (2010), águas de classe C₃S₃ e classe C₄S₄, são adequados somente a culturas resistentes ao conteúdo salino e sódico das águas, e só devem ser utilizadas em solos cuja drenagem seja eficiente e cuja permeabilidade seja elevada.

As águas de Juatama, por sua vez, apresentaram de baixo risco de salinização e baixo ou médio risco de sodificação do solo, conforme o gráfico da USSL. De acordo com o diagrama de Wilcox, esta unidade apresenta mais de 50% dos poços classificados como de excelente qualidade, estando somente 10% dos poços caracterizados como inadequados, em ambos os períodos analisados. Conforme o proposto por Ayers e Westcot (1999) e Almeida (2010), águas de classe C₁S₁, não apresentam restrição de uso com relação a culturas e pouco provavelmente ocasionarão aumento da salinidade ou sodificação do solo, desde que não apresentem níveis muito baixos de CE.

Figura 2 – Diagrama do USSL. a) Dezembro/2013; b) Setembro/2014.

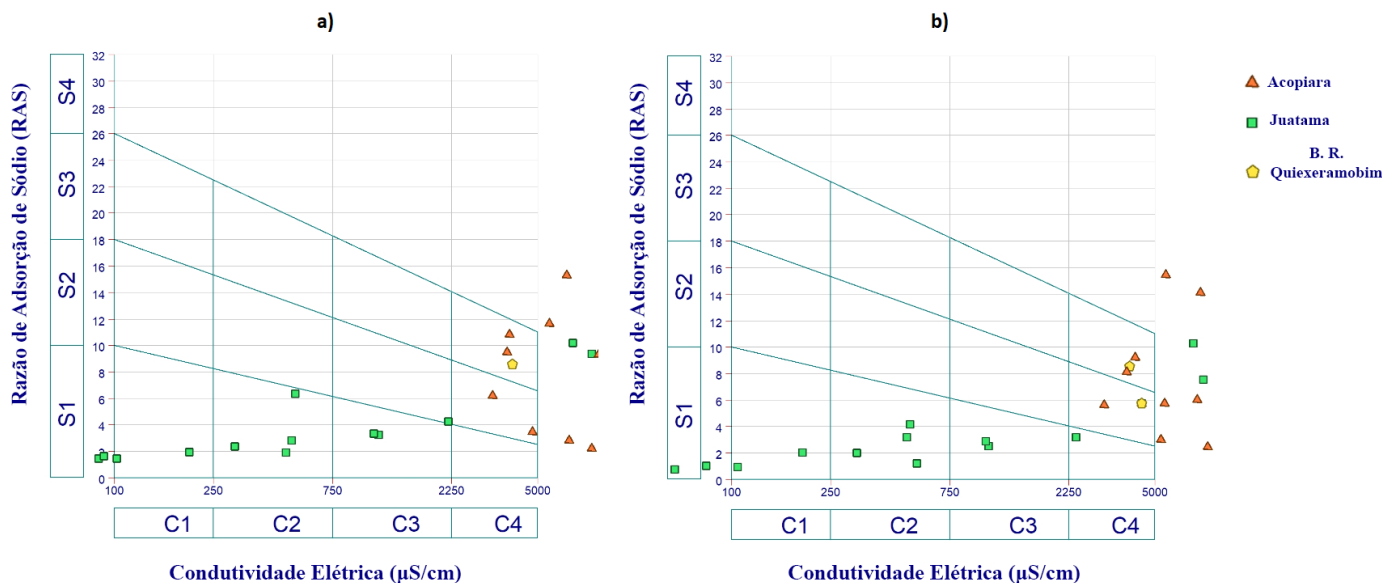
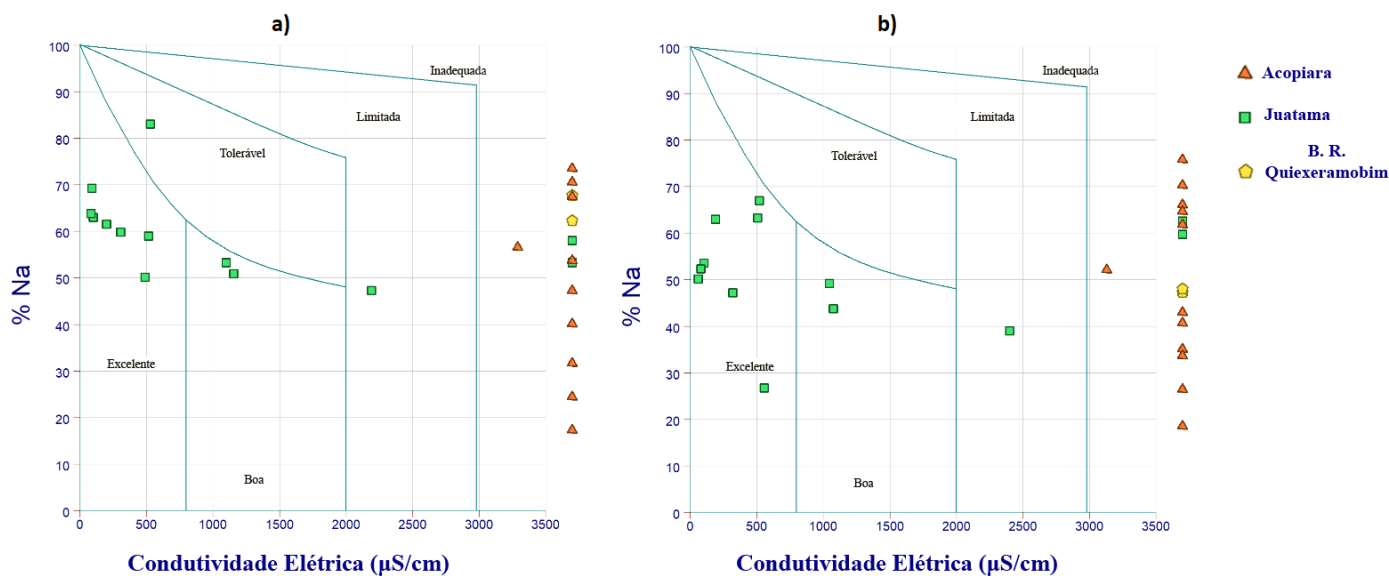


Figura 3 – Diagrama de Wilcox. a) Dezembro/2013; b) Setembro/2014.



Os poços cristalinos obtiveram valores médios de RCS e de I_{Ky}, respectivamente, de -15,1 ($\sigma = 19,2$) e 1,5 ($\sigma = 0,9$). No período subsequente, setembro de 2014, os valores médios dos índices foram de -17,2 ($\sigma = 21,0$) e 1,1 ($\sigma = 0,6$).

O RCS informa que é baixa a probabilidade da precipitação de sais carbonatados na região, uma vez que 100% dos poços apresentam RCS inferior a 1,25, de modo que as águas são seguras para irrigação levando em conta este parâmetro. De acordo com Barik et al. (2019), precipitados carbonatados empobrecem o solo, afetando a disponibilidade de matéria orgânica nele contida.

A tendência vista nos demais índices de irrigação também foi verificada no I_{Ky}, as águas de Acopiara e do Batólito do Rio Quixeramobim foram classificadas como de uso não recomendado ou de uso marginal, enquanto as águas de Juatama, como de uso recomendado ou marginal. De acordo com KHAN et al. (2013), I_{Ky} superior a 1 indica que a possibilidade de desequilíbrios nos íons do solo, os quais podem alterar o rendimento de culturas.

3.4 Índices gerais de salinidade

De acordo com os resultados obtidos, para o período de dezembro de 2013, os poços cristalinos obtiveram valores médios de IQNAS, IQAY, IQAM e IQAA de, respectivamente, 36,5 ($\sigma = 32,53$), 77,2 ($\sigma = 49,78$), 29,0 ($\sigma = 31,37$), 26,1 ($\sigma = 26,40$). No período subsequente, setembro de 2014, os valores médios dos índices foram de 42,9 ($\sigma = 38,25$), 84,1 ($\sigma = 46,36$), 27,5 ($\sigma = 29,90$), 29,1 ($\sigma = 31,50$).

O IQNAS e o IQAY, índices desenvolvidos com foco na qualidade de águas subterrâneas, apontaram diferenças entre as águas analisadas. De acordo com os referidos índices, Juatama apresentou águas de boa e excelente qualidade, por outro lado, as demais unidades apre-

sentam qualidade ruim ou péssima. Os resultados refletem o conteúdo salino das águas, visto que Juatama foi a unidade que apresentou a menor carga de constituintes químicos.

Os índices propostos por Meireles (2010) e Araújo Neto (2014), índices destinados a avaliar a qualidade de águas superficiais, enquadraram as águas da região de estudo como de baixa qualidade e severa restrição de uso. Apenas alguns poços de Juatama apresentaram moderada qualidade e baixa restrição de uso.

Praticamente todos os parâmetros de qualidade de ambos os índices apresentaram valores fora dos limites estipulados pelos autores, indicando a inadequação dos índices para classificar as águas subterrâneas da região estudada.

Ademais, a formulação de ambos os índices leva em consideração a CE e a concentração de Na⁺ e de Cl⁻, contudo, diferentes estudos já mostraram correlações existentes entre a CE e os íons citados, como é o caso dos trabalhos de Lima et al. (2014) e de Nunes Filho et al. (2000). Portanto, a utilização combinada de tais parâmetros pode reforçar as classificações negativas das águas subterrâneas do semiárido, distorcendo a real classificação destas.

4. CONCLUSÕES

A análise dos componentes químicos apontou indicou águas com elevado teor salino na região. Vários parâmetros exigidos na PRC nº 05/2017 foram encontrados fora dos limites estabelecidos.

De acordo com os índices de estabilidade, toda a região apresenta águas com potencial corrosivo, todos os índices apontaram esta tendência.

Em relação ao uso na agricultura, as águas da unidade de Juatama apresentaram melhor qualidade em todos os índices aplicados. Elas apresentam baixo potencial de salinização e sodificação do solo e ainda baixo I_{Ky}, sendo propícias para uso na irrigação de cultivos. Por sua vez, as águas de Acopiara e do Batólito do rio Quixeramobim apresentam elevado risco de salinização e sodificação do solo, além do elevado I_{Ky}. De acordo com o RCS, é baixa a probabilidade de precipitação de sais carbonatados prejudiciais ao solo e a cultivos.

O IQ_{NAS} e o IQ_{AV} indicaram qualidade boa e excelente para as águas de Juatama. Por outro lado, o IQ_{AM} e o IQ_{AA} apontaram elevada restrição a todas as águas da região de estudo.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelas bolsas de mestrado concedida aos autores.

REFERÊNCIAS

AHMED, M.A.; SAMIE, S.G.A.; BADAWY, H.A. Factors controlling mechanisms of groundwater salinization and hydrogeochemical processes in the Quaternary aquifer of the Eastern Nile Delta, Egypt. **Environmental Earth Sciences**, v. 68, p. 369 – 394, 2012.

ALMEIDA, O.A. **Qualidade de água para irrigação**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Brasil). Cruz das Almas, BA, 2010. 227 p.

ALSAQQAR, A.S.; KHUDAIR, B.H.; ALI, S.K. Evaluating water stability indices from water treatment plants in Baghdad city. **Journal of Water Resources and Protection**, v. 6, p. 1344 – 1351, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Reservatórios do semiárido brasileiro: Hidrologia, balanço hídrico e operação**, 86 p., Brasília, 2017.

ANDRADE, T.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; RODRIGUES, D.F.B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 496 – 504, 2012.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st Edition, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC. 2005.

ARAÚJO NETO, J.R.; ANDRADE, E.M.; MEIRELES, A.C.M.; GUERREIRO, M.J.S.; PALÁCIO, H.A.Q. Proposta de índice da salinidade das águas superficiais de reservatórios do Ceará, Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 8, n. 2, p. 184-193, 2014.

ARAÚJO, A.L. **Mecanismos dominantes na salinização de água em rochas anisotrópicas com base em razões iônicas e número fuzzy, em área do sertão central no Ceará**. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental. Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2017. 181 p + Apêndice.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande - PB: UFPB, 1999. 153p.

BARIK, R.; PATTANAYAK, S.K. Assessment of groundwater quality for the green space in the Rourkela city of Odisha, India. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, p. 428-438, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação nº 5 – Anexo XX**, de 28 de setembro de 2017. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2017/prc00_05_03_10_2017.html>. Acesso em: 10 fev. 2019.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais do Brasil – Serviço Geológico do Brasil. **Geodiversidade do Estado do**

Ceará. Fortaleza, 216 p., 2014.

CARRIER. **Handbook of air conditioning system design**. Carrier air conditioning company. McGraw-Hill Books. New York, 1965.

CAVAZZANA, G.H.; LASTORIA, G.; GABAS, S.G.; BEZERRA, C.M.P. Análise de agressividade e incrustação das águas subterrâneas na região urbana de Campo Grande – MS. **Águas Subterrâneas**, v. 26, p. 83 – 97, 2012.

CEARÁ. **Plano territorial de desenvolvimento rural e sustentável: território sertão central**. 2010.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Decisão de Diretoria nº 195-2005**, São Paulo, 2005.

CENTENO, L. N.; CECCONELLO, S. T.; SIQUEIRA, T. Creation of a groundwater quality index for na aquifer belonging to the São Francisco river basin. **Águas subterrâneas**, v. 33, p. 238 – 246, 2019.

CHORAMIN, M.; HAJAVI, S.; HAMID, H.; ZAHEDASL, E.; TANHA, M.H.T. Evaluation of water resources in terms of corrosion and deposition potential on the aqueous structures by five common indicators (Case of study: Bahmanshir River). **WALIA Journal**, v. 34, p. 11-16, 2015.

CPRM. **Atlas Digital de Geologia e Recursos Minerais do Ceará**. Fortaleza, 142 p., 2003.

DELGADO, C.; PACHECO, J.; CABRERA, A.; BATLLORI, E. ORELLANA, R.; BAUTISTA, F. Quality of groundwater for irrigation in karst environment: the case of Yucútan, México. **Agricultural water management**, v. 97, p. 1423 – 1433, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Qualidade de Água para fins de Irrigação: Conceitos Básicos e Práticos**. Petrolina, PE, 2001. 32p.

IMRAN, S.A.; DIETZ, J.D.; MUTOTI, G.; TAYLOR, J.S.; RANDALL, A.A. Modified Larsons ratio incorporating temperature, water age, and electroneutrality effects on red water release. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 11, p. 1514-1520, 2005.

INESP – Instituto de Estudos e Pesquisa para o Desenvolvimento do Ceará. **Caderno Regional da Sub-Bacia do Banabuiú**. Vol. 2, 116 p., 2009.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Recursos Hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. Campina Grande, 260 p., 2012.

JASMIN, I.; MALLIKARJUNA, P. Evaluation of groundwater suitability for irrigation in the Araniar river basin, South India – a case study using GIS approach. **Irrigation and Drainage**, 2015.

KELLY, W.P. **Permissible composition and concentration of irrigated waters**. Proceedings of the ASCE, v. 607, 1940.

KHAN, T.A.; ADIL, A.M. Synthesis of parameters used to check the suitability of water for irrigation purposes. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 3, 2013.

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

MOURA, I.B.M. **Estudos das águas da bacia hidrográfica do rio Banabuiú no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú – Ceará, Brasil**. Programa de Pós-Graduação em Geologia. Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental. Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2013. 218 p + Anexo.

OLIVEIRA, I.B.; NEGRÃO, F.I.; SILVA, A.G.L.S. Mapeamento dos aquíferos do Estado da Bahia utilizando o índice de qualidade natural das águas subterrâneas – IQNAS. **Águas Subterrâneas**, v. 21, n. 1, p.123-137, 2007.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Agriculture Handbook. United States Department of Agriculture. Washington, DC, February, 1954. 159p.

SANTIAGO, M.M.F.; TEIXEIRA, Z.A.; FRISCHKORN, H. As águas subterrâneas no cristalino do semiárido no Ceará-Brasil: o município de Tauá. **Groundwater and Human Development**, p. 294 – 299, 2002.

SANTOS, J.; JOSÉ, A.; BARROS, J.; GENIVAL, L.S.; KAROLINA, J.F.S.B.; TAIUSKY, E. Uso racional da água: ações interdisciplinares em escola rural do semiárido brasileiro. **Ambiente & Água - an interdisciplinary journal of applied science**, 2013, 8 p.

SARNO, F.; CLARO, R.M.; LEVY, R.B.; BANDONI, D.H.; MONTEIRO, C.A. Estimated sodium intake for the brazilian population (2008 – 2009). **Revista Saúde Pública**, v. 47, p. 1 – 7, 2013.

SASHIDAR, P.; KUMAR, S.B.V. Assessment of groundwater corrosiveness for unconfined aquifer system at Kalpakkam. **Environmental Monitoring Assessment**, v. 145, p. 445 – 452, 2008.

SHAH, S.M.; MISTRY, N.J. Groundwater quality assessment for irrigation use in Vadodara District, Gujarat, India. **International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering**, v. 7, p. 719 -724, 2013.

SHANKAR, B.S. Determination of scaling and corrosion tendencies of water through the use of Langelier and Ryznar indices. **Scholars Journal of Engineering and Technology**, v. 2, p. 123 – 127, 2014.

SHARMA, M.; CHAUDHRY, S. Assessment of ground water quality in vicinity of industries and along Yamuna river in Yamuna Nagar, Haryana, India. **Asian Journal Of science and technology**, v. 4, p. 54 – 61, 2013.

TALABI, A. O.; AFOLAGBOYE, L. O.; ATURAMU, A. O.; OLOFINLADE, S. W. Suitability Evaluation of River Owan Water for irrigation. **Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology**, v. 11, p. 74 – 80, 2017.

VARDANJANI, M.E.; RASA, I.; AMIRI, V.; YAZDI, M. Evaluation of groundwater quality and assessment of scaling potencial and corrosiveness of water samples in Kadkan aquifer, Khorasan-e-Razavi Province, Iran. **Environmental Monitoring Assessment**, v. 53, p. 2- 18, 2015.

VASCONCELOS, H.C.; FERNÁNDEZ-PÉREZ, B.M.; GONZÁLEZ, S.; SOUTO, R.M.; SANTANA, J.J. Characterization of the corrosive action of mineral waters from thermal sources: a case study at Azores Archipelago, Portugal. **Water**, v. 7, p. 3515-3530, 2015.

WILCOX, L.V. **Classification and use of irrigation water. United States Salinity Laboratory.** US department of agriculture, circular No. 969. Washington, DC, November, 1955. 19p.

YIDANA, S.A.; YIDANA, A. Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. **Environmental Earth Sciences**, v. 59, n. 7, 1461-1473, 2010.

YOUSEFI, Z.; KAZEMI, F.; MOHAMMADPOUR, R. A. Assessment of scale formation and corrosion of drinking water supplies in Ilam city (Iran). **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v. 3, n. 2, p. 75 - 80, 2016..