



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ESTIAGEM PROLONGADA E CONTEÚDO IÔNICO DAS ÁGUAS DE DOIS RESERVATÓRIOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

* Ana Carolina de Oliveira Nobre Batista ¹
Stephanie de Oliveira Souza ¹
Maria Patrícia Sales Castro ¹
Fernando José Araújo da Silva ¹

PROLONGED DROUGHT AND IONIC CONTENT OF THE WATER OF TWO BRAZILIAN SEMIARID RESERVOIRS

Recibido el 26 de septiembre de 2018; Aceptado el 7 de octubre de 2019

Abstract

The main objective of this work is to investigate the hydrochemical behavior and the ionic content in two reservoirs in Ceará, Northeast Brazil, due to changes due to prolonged drought in the region. The study comprised the surface waters of the Banabuiú and Pedras Brancas reservoirs, with samples collected between 2005 and 2017. The parameters monitored were electrical conductivity, total hardness, higher ions, hydrogen potential, total dissolved solids and temperature. In addition, a hydrochemical approach was performed from the Piper, Gibbs and Chadha diagrams. The predominant cations were those of greater mobility for both dams, while bicarbonate anion was more incident in Banabuiú and chloride in Pedras Brancas. The surface waters of the Banabuiú reservoir were classified as bicarbonated mixed, while Pedras Brancas was predominantly chlorinated sodium. The Gibbs diagram was important to show the dominance of the action of the hydrological cycle on the interaction of the cations with the rocks and the interchange of the anions with the rocks prevailing the effect of the rains and the evaporation. For White Rocks, evaporation had a predominant effect in both cases, and the interaction between rocks and surface water occurred predominantly between cations. The Chadha diagram indicated that the waters of Banabuiú had greater interchange between the mobile cations and favored by surface runoff for bicarbonate. For White Stones, the reversals of the left inferior quadrant, referring to the dominance between Na^+ and Cl^- and indicating salinization, were emphasized.

Keywords: surface waters, water scarcity, ionic interaction.

¹ Universidade Federal do Ceará, Brasil.

* *Autor correspondente:* Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Bloco 713, Avenida Humberto Monte S/N, Campus do Pici, Fortaleza–CE. CEP 60451–970, Brasil. Email: carolnobre1404@gmail.com

Resumo

O objetivo principal desse trabalho é investigar o comportamento hidroquímico e o conteúdo iônico, em dois reservatórios no Ceará, Nordeste do Brasil, diante das modificações decorrentes da estiagem prolongada na região. O estudo compreende as águas superficiais dos reservatórios Banabuiú e Pedras Brancas, com amostras coletadas entre 2005 e 2017. Os parâmetros monitorados foram condutividade elétrica, dureza total, íons maiores, potencial hidrogeniônico, sólidos totais dissolvidos e temperatura. Além disso, foi realizada uma abordagem hidroquímica a partir dos diagramas de Piper, Gibbs e Chadha. Os cátions predominantes foram os de maior mobilidade para ambos os açudes, enquanto que o ânion bicarbonato foi mais incidente em Banabuiú e cloreto em Pedras Brancas. As águas superficiais do reservatório Banabuiú foram classificadas como mistas bicarbonatadas, enquanto que Pedras Brancas teve predominância para sódicas cloretadas. O diagrama de Gibbs foi importante para mostrar a dominância da ação do ciclo hidrológico sobre a interação dos cátions com as rochas e o intercâmbio dos ânions com as rochas prevalecendo o efeito das chuvas e da evaporação. Para Pedras Brancas, a evaporação teve efeito predominante nos dois casos, sendo que a interação entre rochas e águas superficiais ocorreu de forma predominante entre cátions. O diagrama de Chadha indicou que as águas de Banabuiú tiveram maior intercâmbio entre os cátions móveis e favorecimento por escoamento superficial para bicarbonato. Para Pedras Brancas, foram ressaltadas as trocas reversas do quadrante inferior esquerdo, referentes à dominância entre Na^+ e Cl^- e indicando salinização.

Palavras chave: águas superficiais, escassez hídrica, interação iônica.

Introdução

No semiárido brasileiro, as distribuições irregulares das chuvas, ao longo do tempo e do espaço, levaram à construção de reservatórios artificiais como recurso para captação e armazenamento das águas superficiais (Ferreira *et al.*, 2015). Essas intervenções hídricas alteram o ciclo hidrológico na região, a montante e a jusante do barramento, bem como a variabilidade pluviométrica, a intensa evaporação da região e a litologia com predominância de rochas cristalinas favoreceram a concepção de reservatórios rasos (altura h média de 10 m).

As condições supracitadas igualmente beneficiam o processo de salinização da água e isso pode limitar sua utilização (Fernandes *et al.*, 2016). A salinização está, ainda, associada à lixiviação do solo, que libera alguns íons para o meio aquoso ou mesmo reduz a concentração de outros, afetando os valores das razões iônicas. Os sedimentos de um sistema aquático também refletem a qualidade da água, bem como as variações temporárias de certos parâmetros hidrológicos e químicos (López *et al.*, 2014), tais como alterações nas concentrações dos íons em solução e suas interferências nos processos de transferência de massa.

Longos períodos de estiagem associados ao aumento da temperatura e da evapotranspiração causam desequilíbrios físico-químicos, ordenados por trocas entre os sedimentos e a água, alterações no ambiente terrestre e por atividades humanas. Portanto, a gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas é valiosa e requer o entendimento das evoluções hidrogeológicas (Prasanna *et al.*, 2011). Uma melhor compreensão do processo de salinização

de reservatórios do semiárido brasileiro pode subsidiar o controle da qualidade das águas, bem como lidar com sua vulnerabilidade.

Em estruturas lânticas, o intercâmbio entre água e sedimentos pode conferir diferentes concentrações de íons na coluna líquida, com resultados sobre as razões iônicas. Dessa forma é possível considerar os processos hidrogeoquímicos controladores nas variações da qualidade da água (Merchán *et al.*, 2015).

Stumm e Wollast (1990) ressaltam que diferenças na composição da água de escoamento superficial, que ao final são reservadas em estruturas hídras, estão relacionadas à solubilidade dos minerais presentes na rocha mãe e na taxa de dissolução desses minerais. Também, reações de intemperismo ocorrem tanto no solo como nas rochas percoladas por água subterrânea (Stumm e Morgan, 1996). Nas rochas silicáticas, por exemplo, as transformações mineralógicas são mais difíceis de se detectar no solo, embora ocorram. Porém, o intemperismo de silicatos contribui com cerca de 45% da carga total dissolvida nos rios de todo o mundo (Stumm e Wollast, 1990). Bortolin *et al.* (2014) destacam que as razões iônicas evidenciam o fluxo da água por rochas, com dissolução de minerais. Mais que valores, as razões iônicas podem indicar não apenas os níveis de salinidade, mas também os mecanismos dominantes e suas variações no enriquecimento iônico das águas.

Investigações de caráter hidrogeoquímico usualmente tratam de águas subterrâneas, com destaque para as áreas de recarga e nascentes. Comparativamente, o comportamento hidroquímico das águas superficiais recebe pouca atenção, apesar do conhecimento da dinâmica das razões iônicas e sua relação com o processo de salinização ser muito importante. No semiárido brasileiro a perspectiva de ciclos de estiagem mais prolongados, sob cenário de mudança climática, indica a deterioração da qualidade da água. É relevante que se aborde tal tema, com o fim de melhor elucidar os mecanismos dominantes no processo de salinização de águas superficiais do trópico semiárido. Assim, o presente estudo contempla o assunto com base em achados em dois reservatórios no estado do Ceará, Nordeste do Brasil.

Metodologia

Área de estudo

O estado do Ceará é composto por doze bacias hidrográficas: Acaraú, Coreaú, Curu, Litoral, Metropolitana, Sertões do Crateús, Serra da Ibiapaba, Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Salgado e Banabuiú. Nessa última, no sertão central do estado, estão localizados os dois reservatórios objetos do presente estudo: o Banabuiú e o Pedras Brancas. O Banabuiú, localizado entre os municípios de Banabuiú e Quixeramobim, dista 180 km de Fortaleza, capital do Ceará, Brasil. O reservatório tem capacidade para 1601 hm³, vazão regularizada de 11.61 m³/s e ocupa uma bacia hidráulica de 10200 hectares. A barragem é do tipo Terra Zoneada, concluída

em 1966, intercepta o rio Banabuiú e está localizada a 5° 19' 46" sul e 35° 55' 23" oeste, com cota de coroamento de 132 m (a.n.m). A bacia hidrográfica do reservatório é de cerca de 14000 km² (COGERH, 2018; DNOCS, 2018).

Já a barragem do reservatório Pedras Brancas está localizada no município de Quixadá, distante 195 km da capital de Fortaleza, Ceará, Brasil. O reservatório tem capacidade de 434.1 hm³, com vazão regularizada de 2.21 m³/s, bacia hidrográfica de 1987.7 km² e bacia hidráulica de 7300 hectares. O rio barrado é o Sitiá, com cota de coroamento de 133 m (a.n.m). A obra foi concluída em 1978 e as coordenadas geográficas de localização do barramento são 5° 09' 02" sul e 38° 52' 43". Ambos os reservatórios possuem aplicações múltiplas, como: abastecimento humano e perenização de trechos de rios para irrigação e piscicultura em áreas de jusante e entorno. Os reservatórios pesquisados são mostrados na Figura 1.

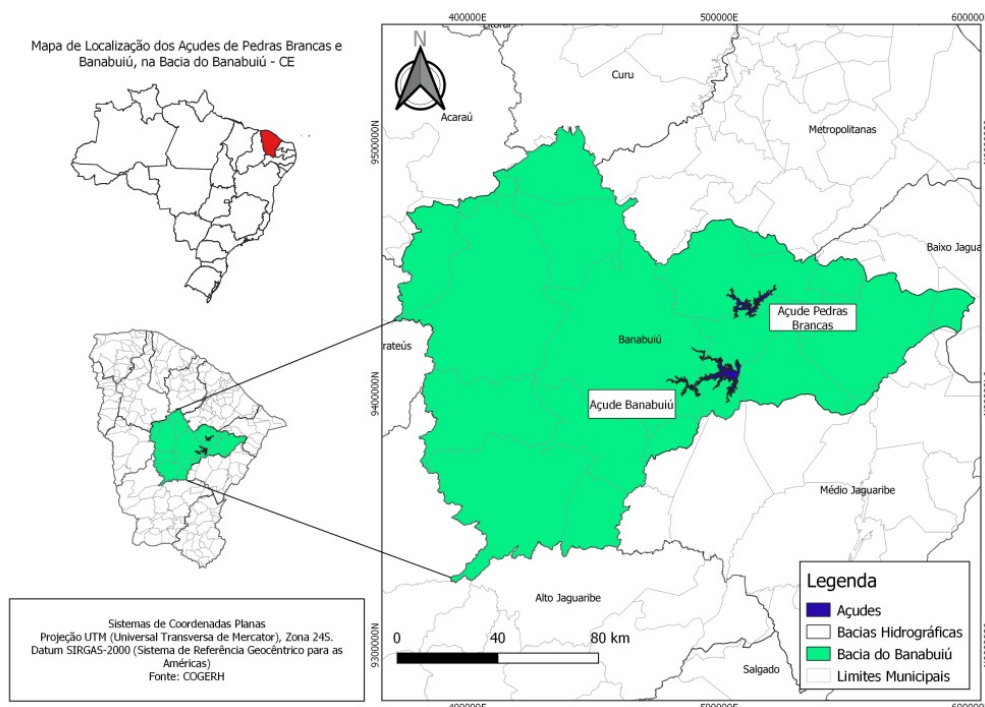


Figura 1. Localização geográfica dos açúdes Banabuiú e Pedras Brancas.

Parâmetros do estudo

As amostras de água foram coletadas com frequência trimestral, iniciando em fevereiro de 2005 até novembro de 2017. As coletas das amostras ocorreram no período da manhã (entre 9h e 10h30) na área de tomada de água dos reservatórios, a uma profundidade de 30 cm abaixo da superfície da coluna líquida. Foram determinados em campo os parâmetros: condutividade

elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH) e temperatura da água (T). Em laboratório, foram analisados os sólidos totais dissolvidos (STD), dureza total (DT) e os íons maiores: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), sódio (Na^+), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), cloreto (Cl^-), nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}). Os procedimentos analíticos seguiram os métodos descritos em APHA (1998).

Para o mesmo período, foram obtidas informações no Portal Hidrológico da FUNCEME (2018) sobre o volume disponível (VD%) dos reservatórios no momento das coletas trimestrais e sobre precipitação (Pp) mensal na estação pluviométrica mais próxima ao barramento.

Abordagem hidroquímica

Os resultados dos íons quantificados foram plotados no gráfico trilinear de Piper (1944), usando o software *QualiGraf 2017*, disponibilizado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). O diagrama de Piper classifica a água com base nos cátions e ânions dominantes. Ademais, aponta a característica química da água, a distribuição iônica total e as semelhanças entre várias águas (Souza *et al.*, 2015). Em seguida, foi plotado o diagrama Gibbs, que permite avaliar a relevância dos mecanismos que controlam a composição química de sais dissolvidos na água. Segundo Gibbs (1970), os mecanismos naturais mais relevantes para o controle da composição química das águas superficiais são: (I) intemperismo das rochas, em áreas de precipitação intermediária, (II) precipitação atmosférica, responsável pela composição química dos mananciais e (III) evaporação-cristalização, processo de maior influência em regiões áridas e semiáridas. As razões iônicas são computadas com concentrações dadas em mg.L^{-1} . Por fim, também foi aplicado o diagrama de Chadha (1999), com o intuito de identificar os processos dominantes nas águas e as principais espécies químicas envolvidas. Para definir a classificação das águas, o diagrama de Chadha é composto por um campo retangular, dividido em oito subcampos, cada um representando o tipo de água (Tabela 1). Neste caso os cálculos são expressos em meq.L^{-1} .

Tabela 1. Descrições de cada subcampo para o Diagrama de Chadha

Subcampo	Descrição
1 ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{K}^+$)	Predominância de sedimentos alcalinos
2 ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$)	Predominância de metais alcalinos
3 ($\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$)	Predominância de ânions de menor mobilidade
4 ($\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^- - \text{Cl}^-$)	Predominância de ânions de maior mobilidade
5 ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$)	Predominância de sedimentos alcalinos e ânions móveis
6 ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$)	Predominância de sedimentos alcalinos e ânions pouco móveis
7 ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$)	Predominância de metais alcalinos e cátions móveis
8 ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{HCO}_3^-$)	Predominância de metais alcalinos e cátions pouco móveis

Fonte: Adaptado de Chadha, 1999.

Resultados e discussão

A partir das informações coletadas sobre precipitação da base mensal nas estações pluviométricas foi possível realizar o cálculo de precipitação média durante o período analisado. Precipitação média no período de estudo foi de 608 (± 245) e 585 (± 243) mm/ano nos postos próximos ao Banabuiú e ao Pedras Brancas, respectivamente. Em relação aos valores normais no período de 1974 a 2004, as médias observadas foram 23 e 15% inferiores. Cabe destacar que o ano de 2012 foi particularmente seco com precipitação média nos dois postos cerca de 75% abaixo do valor referido como média da normal. No período subsequente (2013 a 2017) o déficit se manteve cerca de 30% abaixo. Esse fato, associado às elevadas taxas de evaporação e aos usos consuntivos levaram ao rápido abatimento do volume disponível. No Banabuiú, o %VD foi de 45.6% (± 31.2) e no Pedras Brancas 37.5% (± 21.0). A Figura 2 mostra a variação semestral do %VD e da precipitação nos reservatórios.

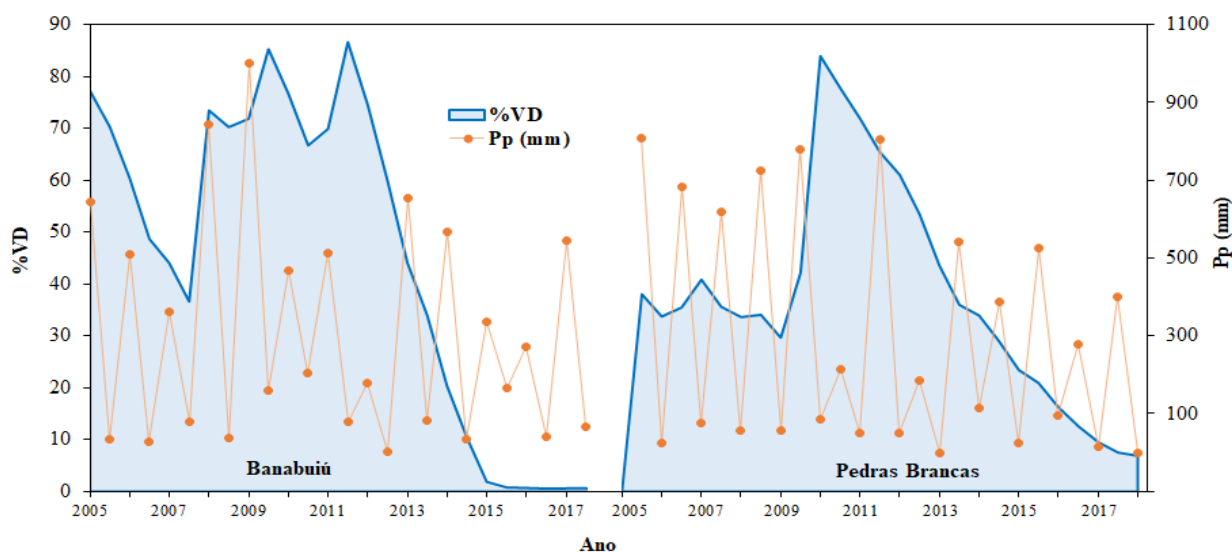


Figura 2. Variação semestral do volume disponível e da precipitação nos postos próximos aos açudes em estudo (janeiro de 2005 a dezembro de 2017).

Descritos na Tabela 2, os parâmetros avaliados foram representados em termos de concentrações mínimas, máximas e médias das análises físico-químicas nas águas de cada reservatório, durante o período de doze anos. Ambos os reservatórios apresentaram médias semelhantes de temperatura, em torno de 29°C (± 4). Foi observado que não houve diferença significativa (com base em ANOVA, $p > 0.05$) entre os resultados do primeiro e segundo semestres de cada ano. Entretanto, o açude Pedras Brancas apresentou conteúdo salino mais elevado em suas águas.

Tabela 2. Parâmetros de qualidade da água analisados e estatística descritiva

Parâmetros ^a	Banabuiú				Pedras Brancas			
	μ	σ	Min	Max	μ	σ	Min	Max
Temp.	28.7	1.0	26.7	31.1	28.7	1.1	26.6	30.4
pH	8.08	0.38	7.26	8.97	8.37	0.31	7.73	8.96
CE	513	262	290	1203	1254	845	275	3421
STD	336	164	197	771	806	522	195	2120
HCO ₃ ⁻	134.3	14.0	112.8	181.8	93.4	26.8	60.8	157.3
CO ₃ ²⁻	9.8	2.6	5.4	16.0	26.7	22.2	0.0	78.0
Cl ⁻	80.8	36.7	31.7	168.5	330.7	252.3	38.2	1007.7
SO ₄ ²⁻	10.9	5.5	4.6	24.6	3.3	2.9	0.3	7.7
NO ₃ ⁻	0.55	0.39	0.06	1.50	0.41	0.11	0.09	0.64
Na ⁺	52.8	19	25	88.4	156.0	98.5	29.0	395.0
K ⁺	11.5	3.4	6.2	18.2	25.7	11.1	5.6	49.0
Ca ²⁺	26.7	6.3	19.2	48.2	31.5	8.0	16.5	47.7
Mg ²⁺	20.4	8.4	13.1	41.6	38.7	28.2	10.0	115.7
DT	150.5	47.7	119.9	291.1	237.8	127.9	94.2	577.9

^aUnidades: mg/L, exceto temperatura (°C), pH (adimensional), CE ($\mu\text{S/cm}$) e dureza total (mg CaCO₃/L).

Os valores de pH foram de caráter alcalino, sendo maior no Pedras Brancas. Nesse caso, a redução do volume acumulado em relação à capacidade foi mais acentuada. Tal fato é destacado pela correlação positiva com CE ($r = 0.763$) e STD ($r = 0.752$) e negativa %VD ($r = -0.559$). No Banabuiú tais correlações foram menores: 0.594, 0.599 e -0.387 , para CE, STD e %VD, respetivamente. Entende-se assim, que os mecanismos dominantes que resultam em elevação de pH nos reservatórios podem ser diferentes. A despeito disto, cabe o destaque de O’Neil *et al.* (2012) e Visser *et al.* (2016), de que mudanças no clima trazem a perspectiva de que a hidrólise do carbonato e do bicarbonato, bem como a liberação de hidroxila no meio aquoso podem co-ocorrer tanto com mediação química quanto biótica. Comparativamente, os dados apresentados corroboram com o comportamento espacial e sazonal da bacia estudada por Liu e Chan (2016), localizada no norte do Taiwan, região onde as constantes alterações climáticas deterioram continuamente a qualidade da água. Os autores obtiveram pH máximo de 8.80 – por ocorrência de hidrólise do carbonato e bicarbonato, com liberação de hidroxila no meio aquoso.

Os dois reservatórios apresentaram amostras com valores de sólidos totais dissolvidos (STD) acima do limite referido pela Resolução CONAMA 357/2005, que é 500 mg/L. Esse valor corresponde ao limite superior de salinidade (0.5‰) para classificação de água superficial como doce. Enquanto no Banabuiú isto ocorreu com 15.4% das amostras, no Pedras Brancas alcançou

69.2%. Quando considerada a Portaria de Consolidação MS nº 05/17, todas amostras coletadas no Banabuiú atenderam ao limite estabelecido para potabilidade (1000 mg/L), enquanto no Pedras Brancas o grau de falha alcançou 23.1% das amostras.

Os valores de STD foram refletidos na condutividade elétrica (CE), sendo também maior nas águas do Pedras Brancas. Entretanto, a razão STD/CE apresentou média de 0.66 (± 0.10), sem diferença significativa entre os reservatórios, com base em teste de ANOVA ($p = 0.719$). O incremento de STD nos reservatórios, bem como da CE, correlacionou negativamente com o volume disponível nos reservatórios (%VD). Com nível de significância de 0.05 os valores de r foram -0.807 e -0.826, para STD e CE no Banabuiú e -0.733 e -0.717 no Pedras Brancas.

A redução acentuada do volume disponível no decorrer do período de estiagem resulta em menor profundidade, com elevação dos níveis de sedimentos em água. Assim, há aumento nas concentrações de sólidos suspensos e dissolvidos. Tal destaque tem corroboração a partir do estudo de Hesse e Krysanova (2016), que realizaram investigação na Alemanha, com simulação de cenários de mudança climática. Em estudo de caráter revisional, Havens e Jeppesen (2018) ressaltam que a elevação da salinidade, bem como um maior estresse osmótico afetam a composição e diversidade da biota, assim como a estrutura e hidrodinâmica de corpos lânticos.

Em termos de dominância iônica, o Banabuiú apresentou a seguinte relação entre os cátions: $rNa^+ > rMg^{2+} > rCa^{2+} > rK^+$ (40.4; 29.5; 24.6 e 5.6%, respectivamente) e Pedras Brancas: $rNa^+ > rMg^{2+} > rCa^{2+} > rK^+$ (53.8; 24.8; 15.7 e 5.8%, respectivamente). Conforme ressaltam Kaushal *et al.* (2017), o intemperismo químico que é ocasionado por reações de troca iônica em resposta à salinização libera mais cátions móveis, como Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} . Outros íons (Si e K^+) apresentam menor representatividade devido à oxidação da matéria orgânica, havendo remineralização subsequente por algas e outros organismos, o que não permite a ressuspensão dessas espécies em meio aquoso. A caracterização da hidroquímica em açudes deve partir também do comportamento sazonal, alterado com a interferência climática (Silva Júnior *et al.*, 1999). Mananciais com condutividade elétrica (CE) baixa ($CE \leq 750 \mu S/cm$) podem ter predominância de Na^+ sobre Ca^{2+} e Mg^{2+} durante o período chuvoso (por ter maior solubilidade aquosa), além de Mg^{2+} e Cl^- sobre Ca^{2+} em épocas com maior estiagem.

No Banabuiú a relação de dominância aniônica foi: $rHCO_3^- > rCl^- > rCO_3^{2-} > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$ (45.2; 43.4; 6.7; 4.5; 0.2%, respectivamente), enquanto que no Pedras Brancas: $rCl^- > rHCO_3^- > rCO_3^{2-} > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$ (75.3; 16.4; 7.6; 0.6; 0.2%, respectivamente). Os resultados elevados de bicarbonato para o Banabuiú podem ter relação não apenas com o caráter químico litológico e pedológico, mas também com um processo de mediação biótica na ciclagem do carbono (Al-Hosney e Grassian, 2004). No Pedras Brancas, a dominância do cloreto indica a ocorrência de salinização. Isso contribui para a redução de biodiversidade com elevação da turbidez abiótica e da mistura completa dos sedimentos, causando ressuspensão pelo vento (Jeppesen *et al.*, 2015).

Classificação hidroquímica

Os resultados mostram predominância de águas bicarbonatadas (cálcicas ou magnesianas) no Banabuiú (54%) e sódicas cloretadas no Pedras Brancas (88%). Quanto aos cátions, as águas do Banabuiú foram classificadas como mistas (69%) e sódicas (31%). No Pedras Brancas, as águas sódicas responderam por 92% das amostras. Em relação aos ânions, no Banabuiú, 19% das amostras foram classificadas com cloretadas e o restante (81%) como bicarbonatadas. Já no Pedras Brancas, 96% foram classificadas como cloretadas.

O predomínio de águas sódicas cloretadas no Pedras Brancas aponta um efeito mais pronunciado de longos períodos de estiagem característicos na região, agravado como processo recorrente. De acordo com Araújo Neto *et al.* (2014), que estudaram a bacia metropolitana no Ceará, a presença de águas cloretadas na estação chuvosa deve estar relacionada aos resquícios de fertilizantes cloretados e cargas de efluentes domésticos oriundas da contribuição do escoamento neste período. Foram detectados baixos percentuais (4%) de águas bicarbonatadas no Pedras Brancas. Em geral, águas superficiais apresentam menos risco em relação à salinidade, por não terem interações de troca iônica com o solo como as águas subterrâneas. Tal fato é demonstrado no estudo de Souza *et al.* (2016), também em território cearense, ao investigar as águas de poços e do açude Trussu e de poços localizados na bacia do rio Jaguaribe, Ceará, Brasil. Os autores classificaram estas águas superficiais como cloretada cálcica e bicarbonatada cálcica. As águas subterrâneas em poços próximos do açude Trussu apresentaram riscos médios a elevados de causar salinidade no solo, especialmente pelo elevado percentual de sódio encontrado. Os diagramas de Piper para os reservatórios em estudo estão representados na Figura 3.

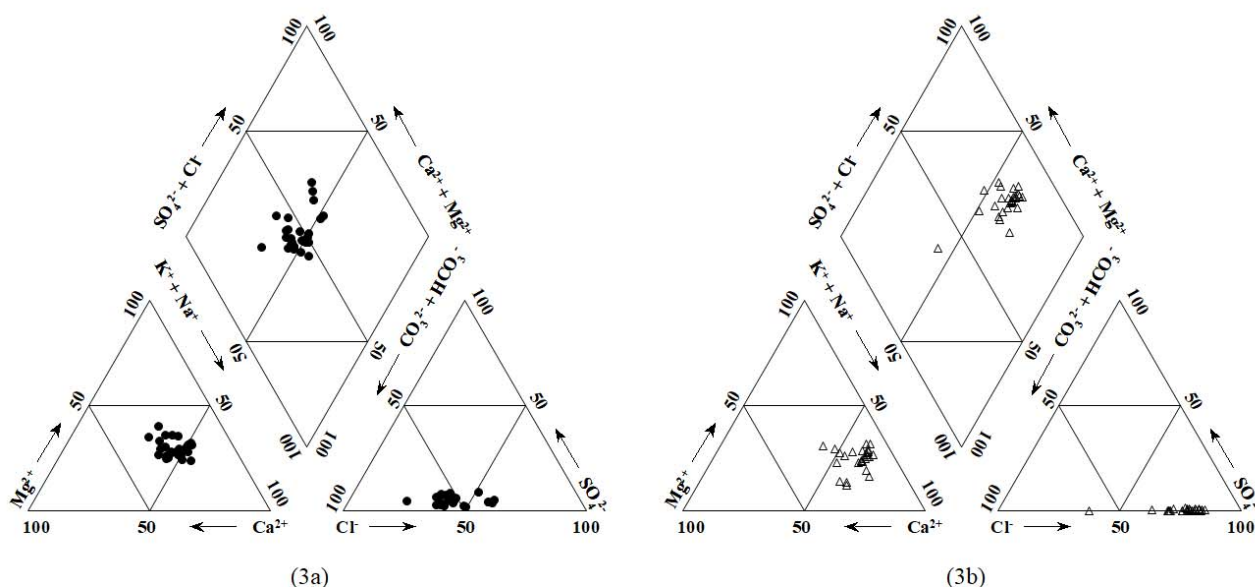


Figura 3. Diagrama de Piper nas águas do Banabuiú (3a) e do Pedras Brancas (3b).

O diagrama catiônico de Gibbs para as águas do Banabuiú (Figura 4a) mostra que o efeito da pluviometria coexiste com o mecanismo de interação com rochas. Há, porém, um discreto deslocamento da razão catiônica em direção à zona de evaporação. Apesar de alta, característica do clima da região, o efeito da evaporação depende da ocorrência de eventos de chuva. Ao analisar o diagrama aniônico (Figura 4b), vê-se maior interação dos ânions com as rochas do que a incidência pluviométrica sobre essas espécies químicas. O mecanismo de evaporação, resultante de déficit hídrico contínuo, é característico na região, especialmente com o agravamento em função da estiagem prolongada. Entretanto, é menos representativo que o intercâmbio litológico.

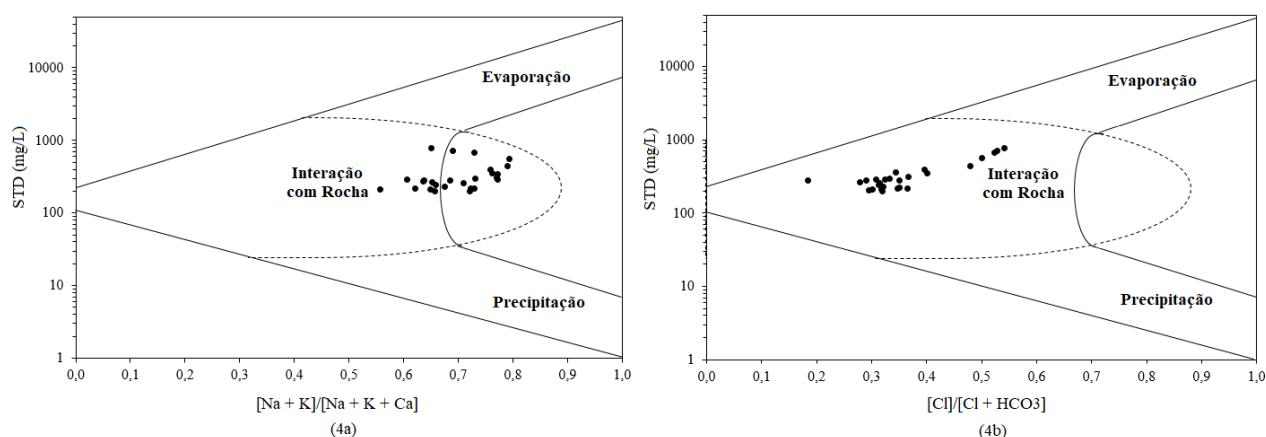


Figura 4. Diagramas catiônico (4a) e aniônico (4b) de Gibbs para as águas do Banabuiú.

As razões catiônicas e aniônicas nas amostras de águas do açude Pedras Brancas apontam de forma mais acentuada o impacto da pluviometria. A Figura 5 aponta que o mecanismo de evaporação teve efeito mais acentuado que no Banabuiú, de forma que as chuvas abaixo da média influenciaram mais as razões iônicas. Apesar da interação litológica ser clara, deve ser dada atenção para o deslocamento das razões em direção à zona de evaporação. Os resultados sugerem que a interação entre as rochas e as águas superficiais foi mais destacada devido aos elevados índices de sódio. Isso é semelhante aos achados de Lima *et al.* (2017), que estudaram as águas de um rio em outra bacia do semiárido brasileiro.

O diagrama de Chadha do Banabuiú (Figura 6a) mostrou maior incidência de pontos no quadrante superior direito (5), formando uma água de recarga com escoamento superficial de CO_3^{2-} ou HCO_3^- até a superfície, assim como de cátions geoquimicamente móveis como Mg^{2+} ou Ca^{2+} . Tem, portanto, caráter alcalino na composição do sedimento que contribui para a coluna líquida.

Herojeet *et al.* (2017), ao avaliarem a qualidade da água de Nalagarh, Índia, por processos de evolução hidroquímica, também encontraram mecanismos marcantes de trocas iônicas por esses íons listados, caracterizando as águas como de dureza temporária. Ainda analisando o diagrama para as águas do Banabuiú, há co-ocorrência de águas do tipo 2 e 3, junto ao quadrante esquerdo superior, porém com percentuais $\leq 10\%$. No quadrante inferior esquerdo há influência de mecanismos de trocas iônicas entre bases contendo Na^+ e HCO_3^- , o que corrobora com o diagrama de Piper, que as classifica como bicarbonatadas.

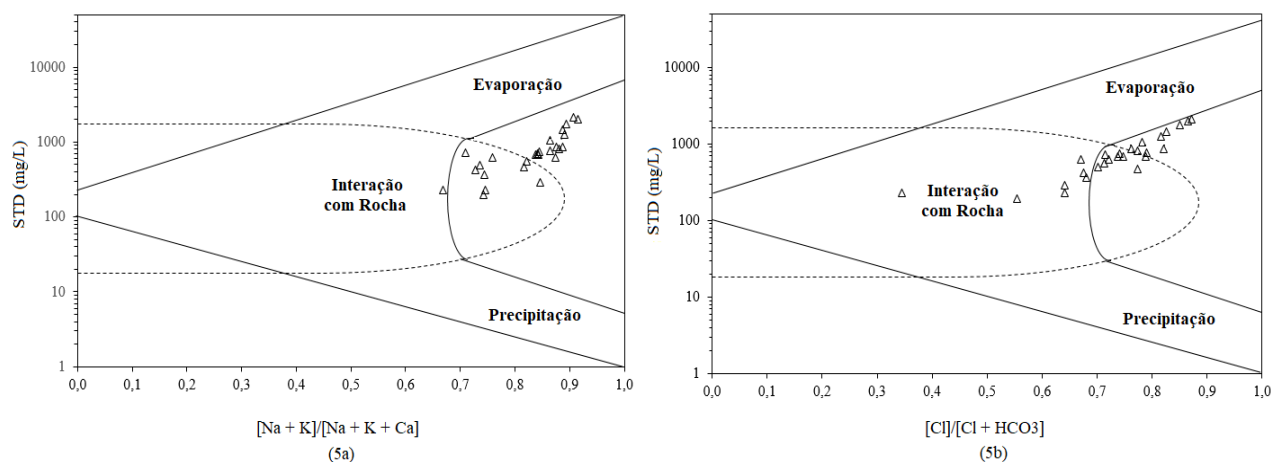


Figura 5. Diagramas catiônico (5a) e aniônico (5a) de Gibbs para as águas do Pedras Brancas.

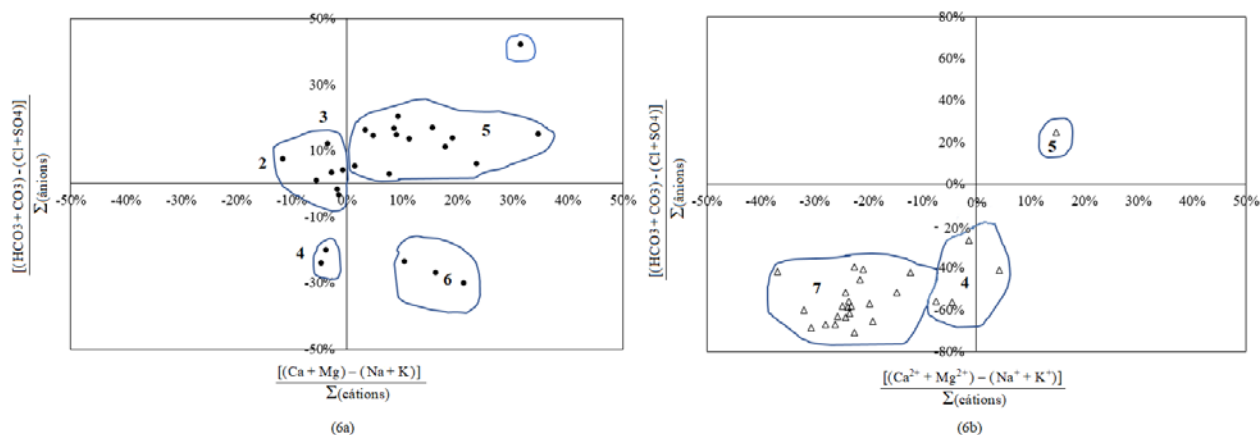


Figura 6. Diagrama de Chadha para os reservatórios Banabuiú (6a) e Pedras Brancas (6a).

Ao analisar o diagrama de Chadha nas águas do Pedras Brancas (Figura 6b), verifica-se que o enquadramento dos processos iônicos foi determinante entre as trocas dos íons Na^+ e Cl^- , característicos de processos de águas salinas e sódicas cloretadas, conforme já mostrado no diagrama de Piper. Em estudo realizado por Shemsanga *et al.* (2017) foi verificada a origem da elevada salinidade em um reservatório raso, na Tanzânia central. Os autores concluíram que a influência dos fatores climáticos como redução na precipitação e o aumento do aquecimento no clima regional favoreceram à maior concentração de Na^+ e Cl^- . Tratam-se, portanto, de águas sódicas cloretadas.

Interações hidroquímicas do tipo Ca-Mg-Cl, Ca-Cl e Ca- HCO_3 favoreceram a ocorrência de águas do tipo 4, como evento anterior às águas do tipo 7. Isto pode ser visto em Selvakumar *et al.* (2017), que, analisando um corpo aquático na Índia, empregaram análise multivariada e inferiram que as águas eram caracterizadas como alcalinas, por apresentarem abundância dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , seguidos de Na^+ e Cl^- e HCO_3^- . Além disso, é possível observar a predominância dos cátions móveis no Pedras Brancas, da mesma forma que no açude Banabuiú.

Conclusões

A síntese descritiva dos parâmetros iônicos permitiu concluir sobre o evento de salinização nos reservatórios, a partir dos valores elevados de CE e STD. Cátions móveis (Na^+ e Mg^{2+}) foram dominantes para os dois reservatórios, devido ao intemperismo químico característico nas reações de troca iônica entre os sedimentos. Entre os ânions, o HCO_3^- teve predominância para o Banabuiú, devido à disponibilização química de carbono inorgânico dissolvido, enquanto que para Pedras Brancas a incidência de salinização conferiu maiores concentrações de Cl^- , com mistura dos sedimentos.

As águas superficiais dos reservatórios apresentaram caráter de mista bicarbonatada para o Banabuiú e de sódica cloretada para o Pedras Brancas. No diagrama catiônico de Gibbs do Banabuiú, observou-se o efeito da baixa pluviometria, bem como o conteúdo iônico a partir de interação litológica. No caso dos ânions, o intercâmbio destes com as rochas prevaleceu, porém foi possível observar discreta tendência do efeito da baixa pluviometria e respectiva evaporação. No Pedras Brancas, apesar de uma aparente dominância do mecanismo de interação litológica, o que ficou destacado foi o deslocamento das razões iônicas em direção à zona de evaporação, com um claro processo de salinização.

O diagrama de Chadha foi importante para determinar a influência da força dos cátions e ânions na evolução dos processos hidroquímicos. As águas do açude Banabuiú indicaram maior intercâmbio entre os cátions móveis e favorecimento por escoamento superficial para bicarbonato.

Para Pedras Brancas, foram ressaltadas as trocas reversas do quadrante inferior esquerdo, referentes à dominância entre Na^+ e Cl^- e indicando salinização. Pesquisas norteadoras nesse campo são essenciais ao fortalecimento do sistema de gestão das águas através da origem e evolução dos processos hidrogeoquímicos.

Referências bibliográficas

- Al-Hosney, H. A., Grassian, V. H. (2004) Carbonic Acid: An Important Intermediate in the Surface Chemistry of Calcium Carbonate. *Journal of the American Chemical Society*, **126**(26), 8068-8069. doi: <http://dx.doi.org/10.1021/ja0490774>
- APHA (1998) *Standard Methods for the examination of water and wastewater*, 20th ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, Washington, 937 pp.
- Araújo Neto, J.R., Sales, M. M., Meireles, A. C. M., Palácio, H. A. Q., Chaves, L.C.C. (2014) Modelagem da estrutura iônica das águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará, Brasil usando regressão linear múltipla, *Revista Agroambiente On-line*, **8**(1), 29-38. doi: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i1.1635>
- Boyd, C. E., Tucker, C. S., Somridhivej, B. (2016) Alkalinity and Hardness: Critical but elusive concepts in aquaculture. *Journal of the world aquaculture society*, **47**(1), 6-41. doi: <http://dx.doi.org/10.1111/jwas.12241>
- Bortolin, T. A., Reginato, P. A. R., Leão, M. I.; SCHNEIDER, V. E. (2014) Hidrogeologia e hidroquímica dos aquíferos fraturados associados às rochas vulcânicas ácidas no Município de Carlos Barbosa (RS) *Ambiente e Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, **9**(1), 56-67. doi: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1270>
- Chadha, D. K. (1999) A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data, *Hidrogeology Journal*, **7**, 431-439. doi: <https://doi.org/10.1007/s100400050216>
- COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (2018) *Reservatórios*, Acesso em 15 de julho de 2018, disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br>
- Conceição, F. T., Bonotto, D. M. (2002) Relações hidroquímicas aplicadas na avaliação da qualidade da água e diagnóstico ambiental na bacia do Rio Corumbataí (SP), *Geochimica Brasiliensis*, **16**(1), 1-21. doi: <https://doi.org/10.21715/gb.v16i1.495>
- DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (2018) *Mapa de barragens*, Acesso em 15 de julho de 2018, disponível em: <http://www2.dnocs.gov.br>
- Fernandes, W. S., Filho, F.A.S., Studart, T.M., Silveira, CL.S. (2016) Avaliação do impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico na bacia do Orós usando os modelos de mudanças climáticas do IPCC-AR₄ para o cenário A₁B, *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **9**(1), 28-48. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2016.9.1.49791>
- Ferreira K. C. D., Lopes F. B., Andrade E. M., Meireles A. C. M., Silva G. S. (2015) Adaptação do índice de qualidade de água da National Sanitation Foundation ao semiárido brasileiro, *Revista Ciência Agronômica*, **46**(2), 277-286. doi: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20150007>
- FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2018) *Volume armazenado – reservatórios*, Acesso em 16 de julho de 2018, disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br>
- Gibbs, R. J. (1970) Mechanisms Controlling World Water Chemistry, *Science*, **170**(3962), 1088-1090.
- Havens, K., Jeppesen, E. (2018) Ecological responses of lakes to climate change, *Journal Water*, **10** (917), 1-9. doi: <https://doi.org/10.3390/w10070917>
- Herojeet, R., Rishi, M. S., Lata, R., Dolma, K. (2017) Quality characterization and pollution source identification of surface water using multivariate statistical techniques, Nalagarh Valley, Himachal Pradesh, India, *Appl Water Sci*, **7**, 2137-2156. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-017-0600-y>

- Hesse, C., Krysanova, V. (2016) Modeling Climate and Management Change Impacts on Water Quality and In-Stream Processes in the Elbe River Basin, *Journal Water*, **40**(8), 1-31. doi: <https://doi.org/10.3390/w8020040>
- Jeppesen, E., Brucet, S., Naselli-Flores, L., Papastergiadou, E., Stefanidis, K., Nöges, T., Nöges, P., Attayde, J. L., Zohary, T., Coppens, J., Bucak, T., Menezes, R. F., Freitas, F. R. S., Kernan, M., Sørdergaard, M., Beklioglu, M. (2015) Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity, *Hydrobiologia*, **750**, 201-227. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>
- Kaushal, S. S., Duan, S., Doody, T. R., Haq, S., Smith, R. M., Newcomer Johnson, T. A., Newcomb, K. D., Gorman, J., Bowman, N., Mayer, P.M., Wood, K.L., Belt, K.T., Stack, W.P. (2017) Human-accelerated weathering increases salinization, major ions, and alkalization in fresh water across land use, *Applied Geochemistry*, **83**, 121-135. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.02.006>
- Lima A. O., Lima-Filho F. P., Dias N. S., Rego P. R. A., Blanco F.F., Neto M.F. (2017) Mechanisms controlling surface water quality in the Cobras river sub-basin, northeastern Brazil, *Rev. Caatinga*, **30**(1), 181-189. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252017v30n120rc>
- Liu, W-C., Chan, W-T. (2016) Assessment of Climate Change Impacts on Water Quality in a Tidal Estuarine System Using a Three-Dimensional Model, *Journal Water*, **8**(60), 2-22. doi: <https://doi.org/10.3390/w8020060>
- López, Y.C., Ruiz-Marin, A., Chi-Ayil, J. (2014) Diagnóstico de la contaminación por metales pesados em sedimento superficial de la laguna de términos, Campeche: una aproximación estadística, *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica*, **7**(2), 95-104. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2014.7.2.46786>
- Merchán, D., Auqué, L. F., Acero, P., Gimeno, M. J., Causapé, J. (2015) Geochemical processes controlling water salinization in an irrigated basin in Spain: Identification of natural and anthropogenic influence, *Science of The Total Environment*, **502**, 330-343. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.041>
- O'Neil, J.; Davis, T. W.; Burford, M. A. Gobler, C. J. (2012) The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae* **14** (2012) 313–334. doi: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.027>
- Piper, A. M. (1944) A graphic procedure in geochemical interpretation of water analyses. *Transactions of the American Geophysical Union* **25**, 914–923. doi: <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Prasanna, M. V., Chidambaram S., Gireesh T. V., Ali, T. J. (2011) A study on hydrochemical characteristics of surface and sub-surface water in and around Perumal Lake, Cuddalore district, Tamil Nadu, South India, *Environ Earth Sci*, **63**(1), 31–47. doi: <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0664-6>
- Selvakumar, S., Chandrasekar, N., Kumar, G. (2017) Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*, **17**, 26-33. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2017.02.002>
- Shemsanga, C., Muzuka, A. N. N., Martz, L., Komakech, H. C., Elisante, E., Kisaka, M., Ntuza, C. (2017) Origin and mechanisms of high salinity in Hombolo Dam and groundwater in Dodoma municipality Tanzania, revealed, *Appl Water Sci*, **7**, p. 2883-2905. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-017-0569-6>
- Silva Junior, L. G. A., Gheyi, H. R., Medeiros, J. F. (1999) Composição química de águas do cristalino do nordeste brasileiro, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **3**(1), 11-17.
- Souza, C. A., Araujo, Y. R., Neto, J. R. A., Palácio, H. A. Q., Barros, B.E.A. (2015) *Caracterização hidroquímica e dinâmica qualitativa das águas para irrigação no vale perenizado do Rio Trussu*. Anais do III Inovagri International Meeting – 2015, 2015.
- Souza, C. A., Araujo, Y. R., Neto, J. R. A., Palácio, H. A. Q., Barros, B. E. A. (2016) Análise comparativa da qualidade da água para irrigação em três sistemas hídricos conectados no semiárido, *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, **10**(6), 1011-1022. doi: <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v10n600481>



- Stumm, W., Morgan, J. J. (1995) *Aquatic Chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*, 3rd ed., Kindle Edition, 1040 pp.
- Stumm, W., Wollast, R. (1990) Coordination chemistry of weathering: kinetics of the surface-controlled dissolution of oxide minerals, *Reviews of Geophysics*, **28** (1), 53-69. doi: <http://dx.doi.org/10.1029/RG028i001p00053>
- Visser, P. M., Verspagen, J. M. H., Sandrini, G., Stal, L. J., Matthijs, H. C. P., Davis, T. W., Hans, W., Paerl, H. A., Huisman, J. (2016), How rising CO₂ and global warming may stimulate cyanobacterial blooms. *Harmful Algae* **54**, 145-159. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hal.2015.12.006>