



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Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed.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.

Hidroquímica das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na bacia do Rio Pirangi/RN

Hydrochemistry of Barreiras Aquifer System groundwater in the Pirangi River basin/RN

Janaína Medeiros da Silva¹, José Geraldo de Melo¹, Hélio Fernando Maziviero¹, Cleidejane Teles Xavier Lopes da Silva¹✉

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte

✉ jana_medeiros91@hotmail.com, jgmele2@gmail.com, hmaziviero@yahoo.com.br, cleidejane_teles14@hotmail.com

Resumo

Este trabalho objetiva avaliar o comportamento hidroquímico das águas do Sistema Aquífero Barreiras (SAB) na área da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi - Região Metropolitana de Natal, segundo os diferentes aspectos ambientais do uso e ocupação do solo, com destaque para a avaliação dos efeitos do desenvolvimento urbano na qualidade das águas subterrâneas. Inicialmente, foi definida uma rede de monitoramento com 30 poços seguido de uma campanha de coletas e análises físico-químicas de amostras de água. A interpretação dos resultados foi efetuada com base em mapas de isovalores e diagramas hidroquímicos (Piper, Durov Expandido e Gibbs), sendo possível classificar as águas de acordo com fácies hidroquímicas e avaliar as modificações hidrogeoquímicas nos diferentes contextos ambientais da área de estudo. Apesar das variações hidroquímicas observadas nos diferentes setores, de modo geral, as águas subterrâneas do SAB na área de estudo se caracterizam como levemente ácidas e de baixa salinidade, abrangendo predominantemente as fácies cloretadas sódicas magnesianas ($\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}$) e cloretadas sódicas ($\text{Na}^+ - \text{Cl}$). Foi identificada contaminação das águas subterrâneas por nitrato em 30% das amostras, com destaque para as regiões mais urbanizadas. O aspecto climático é o principal fator controlador da química dessas águas, com a influência de fatores antrópicos do desenvolvimento urbano e de atividades agrícolas.

Abstract

This study aims to evaluate the hydrochemical behavior of the Barreiras Aquifer System (SAB) waters in the Pirangi River Basin Area - Natal Metropolitan Area, according to the different environmental aspects of land use and occupation, highlighting the evaluation of the effects of the urban development in groundwater quality. Initially, a 30-well monitoring network was defined, followed by a campaign for collecting and analyzing physicochemical water samples. The interpretation of the results was based on isovalve maps and hydrochemical diagrams (Piper, Durov Expanded and Gibbs), and it is possible to classify the waters according to hydrochemical facies and to evaluate the hydrochemical changes in the different environmental contexts of the study area. Despite the hydrochemical variations observed in the different sectors, in general the SAB groundwater in the study area is characterized as slightly acidic and of low salinity, predominantly covering the magnesian sodium chloride ($\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}$) and chlorinated sodium facies. ($\text{Na}^+ - \text{Cl}$). Groundwater contamination by nitrate was identified in 30% of the samples, with emphasis on the most urbanized regions. The climatic aspect is the main controlling factor of the chemistry of these waters, with the influence of anthropogenic factors of urban development and agricultural activities.

DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v34i1.29785>

Palavras-chave:

Sistema Aquífero Barreiras, Bacia do Rio do Pirangi, Avaliação hidrogeoquímica, Contaminação de águas subterrâneas, Nitrato.

Keywords

Barrier Aquifer System, Pirangi River Basin, hydrochemical evaluation, groundwater contamination, nitrate.

1. INTRODUÇÃO

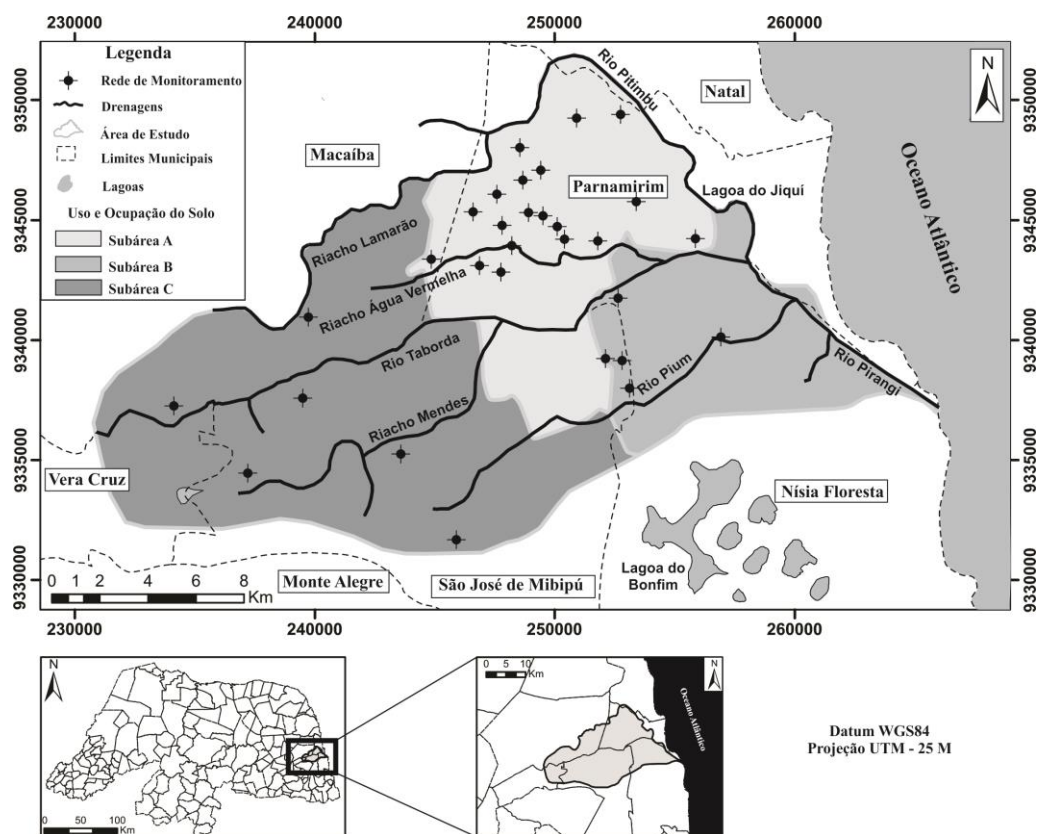
A Bacia hidrográfica do Rio Pirangi está localizada no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte, compondo área de 436 km² e abrangendo os municípios de Natal, Parnamirim, Macaíba, Nísia Floresta, São José de Mipibu e Vera Cruz, que com exceção do último, estão inclusos na Região Metropolitana do Natal. A área de estudo está inserida na Bacia hidrográfica do Rio Pirangi compreendendo superfície total de 370 km² (Figura 1).

O abastecimento hídrico da área é feito, quase em sua totalidade, por captações no Sistema Aquífero Barreiras (SAB), o qual se caracteriza por elevadas potencialidades hidrogeológicas, com destaque para o município de Parnamirim, cujas transmissividades atingem valores superiores a 1000 m²/dia e poços com capacidade de produção de até 100 m³/h, fornecendo águas, em geral, de boa qualidade para diversos fins, em suas condições naturais (MELO *et al*, 2017). Esse caráter hidrogeológico permitiu, nas últimas décadas, condições favoráveis para a expansão urbana, agrícola e industrial da região.

Apesar disso, o desenvolvimento urbano e rural, sem o planejamento ambiental adequado, tem afetado a qualidade das águas subterrâneas, principalmente devido à contaminação por nitrato. O nitrato é o poluente de ocorrência mais frequente nas águas subterrâneas e sua origem pode estar associada a diversos fatores como uso de fertilizantes agrícolas, criação de animais, má disposição de efluentes domésticos, dentre outros (VARNIER & HIRATA, 2002). O nitrato é utilizado mundialmente como indicador da contaminação das águas subterrâneas devido à sua alta mobilidade (REYNOLDS-VARGAS *et al*, 2006). O excesso do íon nitrato em água destinada ao consumo humano é preocupante por causar em recém-nascidos a síndrome do bebê azul e em adultos, pode ser responsável por causar câncer de estômago, e aumentar a probabilidade de câncer de mama em mulheres (BAIRD & CANN, 2011).

Este trabalho objetiva avaliar o comportamento hidroquímico das águas do SAB na área da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi, permitindo classificá-las conforme fácies hidroquímicas, investigar seus fatores controladores e avaliar os efeitos do desenvolvimento urbano e rural na qualidade das águas subterrâneas.

Figura 1 - Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi com delimitação das zonas de Uso de ocupação do solo e pontos de coleta de amostras de água.



2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia hidrográfica do Rio Pirangi é composta pelas sub-bacias dos rios Pitumbu, Taborda e Pium e está localizada na região nos vales úmidos, com transição climática para o semiárido no setor oeste da bacia. A denominação vales úmidos faz referência à característica perene dos rios e lagoas que ocorrem na área e ao elevado regime pluviométrico local, atingindo precipitações superiores a 1600 mm/ano (EMPARN, média 1992-2018) nos setores centro e leste da área. Na região oeste, as precipitações diminuem para valores próximos de 800 mm/ano (EMPARN, média 1992-2018). Além dos rios principais, a bacia hidrográfica é composta pelos riachos Mendes, Água Vermelha e Lamarão, afluentes do Rio Pirangi e pelas lagoas do Jiquí e do Pium.

A geologia da área é constituída estratigraficamente, da base para o topo, pelo embasamento cristalino Pré-cambriano, constituído por rochas ígneas e metamórficas, pela sequência sedimentar Cretácea, constituída por rochas carbonáticas e areníticas, e pelas unidades cenozoicas, constituída pelos arenitos do Grupo Barreiras, de idade Tércio - Quaternária (CORDOBA *et al*, 2007), capeados por

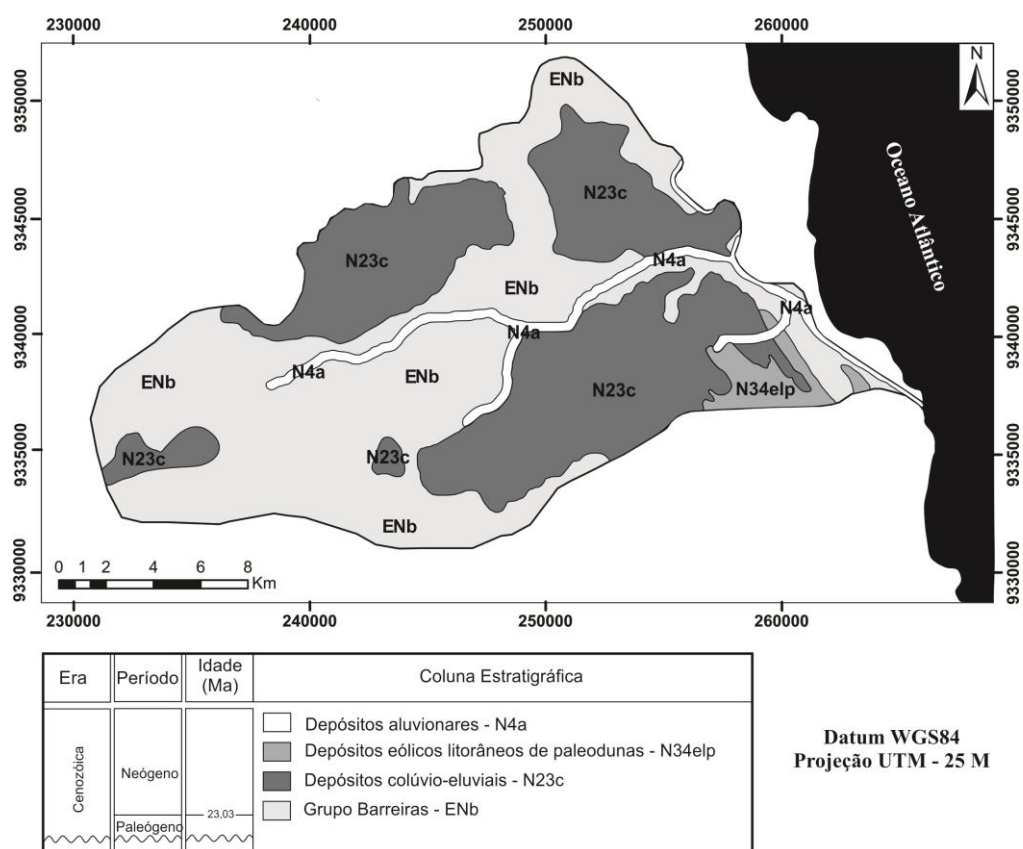
sedimentos recentes do Quaternário (depósitos aluvionares, depósitos colúvio-eluviais e depósitos eólicos de paleodunas), na qual apenas esses últimos são aflorantes na área de estudo (Figura 2).

O Aquífero Barreiras se destaca na área de estudo e é caracterizado pelo seu caráter livre, geometria tabular, com estratos praticamente horizontais arenosos e argilosos de espessuras variadas (ANA, 2012). Intercalações argilosas ocorrem com frequência, produzindo semiconfinamentos localizados e reduzindo as potencialidades hidrogeológicas, embora o caráter de aquífero livre seja dominante (SERHID, 1998). As dunas, as quais cobrem parte das rochas da Formação Barreiras, contribuem fortemente para a recarga do Aquífero Barreiras devido a sua elevada porosidade efetiva e elevada condutividade hidráulica, configurando o padrão regional de ocorrência de um sistema hidráulico único, denominado de Sistema Aquífero Barreiras (MELO, 1995).

A compartimentação estrutural do terreno exerce marcante influência sobre as espessuras saturadas do Sistema Aquífero Barreiras e suas potencialidades, o que se reflete na produtividade dos poços, visto que as maiores vazões exploráveis correspondem às maiores espessuras saturadas (BEZERRA *et al*, 1993; LUCENA *et al*, 2006).

Quanto ao uso e ocupação do solo, a Bacia hidrográfica do Rio Pirangi, pode ser subdividida em três domínios principais (MELO *et al*, 2017): subárea A, localizada no setor norte e central da bacia e caracterizada pela urbanização da cidade de Parnamirim e por áreas de expansão urbana (loteamentos habitacionais) que bordejam o limite oeste; subárea B, situada a sudeste da área de estudo, caracterizada pelo ecossistema de lagos e dunas, com características naturais bem preservadas; E por fim, a subárea C, situada no setor oeste, caracterizada pela atividade agropecuária, com destaque para o cultivo de feijão, batata e macaxeira, deste outras lavouras.

Figura 2 - Mapa Geológico da Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi. Adaptado de ANA (2012).



3. MATERIAIS E MÉTODOS

Após definição da rede de monitoramento com 30 poços tubulares (Figura 1), foi realizada uma campanha de amostragem em novembro de 2017. Os pontos de coleta foram prioritariamente definidos considerando a distribuição espacial na área de estudo e as zonas de uso e ocupação do solo. Dos 30 poços tubulares submetidos à amostragem, 7 são de uso particular, destinados ao abastecimento de pequenos produtores rurais (4), para envase de água mineral (1), para atividade agroindustrial (1) e para conjunto habitacional multifamiliar (1). Os demais poços tubulares pertencem à empresa concessionária de serviços públicos responsável pela captação e distribuição de água na área de estudo (CAERN).

Os procedimentos de coleta, preservação e transporte de amostras foram realizados conforme CETESB (2011), e encaminhadas para laboratório de análises físico-químicas para determinação dos parâmetros pH, CE, STD e dos íons sódio (Na⁺), potássio (K⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), ferro (Fe²⁺), cloreto (Cl⁻), bicarbonato (HCO₃⁻), sulfato (SO₄²⁻) e nitrato (NO₃⁻). Os resultados, em mEq/L, foram

submetidos ao balanço iônico, garantindo a confiabilidade dos dados (LOGAN, 1965). SCHOELLER (1962) admite que o erro do balanço iônico não deve ser superior a 5% para que a análise seja considerada aceitável. Este percentual relaciona a concentração total dos cátions e dos ânions, visto que em uma análise hidroquímica completa a concentração total dos cátions deve ser aproximadamente igual à concentração total dos ânions. Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva (média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão) e identificada contaminação por nitrato, conforme Anexo XX da Portaria de consolidação N° 5 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017). A matriz de correlação entre os parâmetros hidroquímicos foi elaborada utilizando o software Aquachem 3.7. A distribuição espacial de parâmetros químicos empregou a técnica vizinho natural como método de interpolação. A classificação das águas em fácies hidroquímicas ocorreu mediante plotagem dos resultados nos diagramas de Piper (PIPER, 1944) e Durov Expandido utilizando os softwares Aquachem 3.7 e Qualigraf 1.17. O diagrama de Gibbs (GIBBS, 1970) foi utilizado para avaliar fatores controladores da química das águas subterrâneas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O resultado do balanço iônico revelou que as análises realizadas são confiáveis (erros inferiores a 5%). O valor do erro calculado nas 30 amostras varia de 0,018% a 0,399%, com média de 0,235%. Dessa forma, todos os resultados provenientes das análises químicas foram utilizados na avaliação hidrogeoquímica. De modo geral, as águas do SAB na Bacia do Rio Pirangi são caracterizadas pelo pH levemente ácido, pouco mineralizadas e com predominância dos íons sódio e cloreto (Tabela 1). As águas subterrâneas cloretadas sódicas estão relacionadas ao processo de evaporação da água do mar e a provável presença desses elementos nas águas da precipitação pluviométrica, somado ao fato do SAB possuir caráter local predominantemente livre com capeamento superficial de corpos dunares. Em relação aos níveis de nitrato, foi verificado que 30% das amostras analisadas ultrapassam a concentração de 10 mg/L de N-NO₃, caracterizando águas contaminadas, conforme Anexo XX da Portaria de consolidação N° 5 do Ministério da Saúde.

Tabela 1 - Avaliação estatística dos resultados das análises físico químicas proveniente de 30 amostras, considerando as zonas de uso e ocupação do solo.

Zonas de Uso e Ocupação do Solo	Parâmetros	pH	CE	STD	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
	Unidade	-	µS/cm a 25C	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L de N
Subárea A (Zona Urbana)	Média	5,68	226,58	131,50	13,12	2,39	5,92	5,67	0,04	35,54	2,15	10,23	11,70
	Mediana	5,84	209,00	117,50	10,39	2,81	5,30	4,49	0,01	31,99	0,00	8,71	9,08
	Mínimo	4,11	62,50	37,00	2,24	0,49	2,89	1,63	0,00	11,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	7,11	600,00	356,00	46,52	5,11	9,16	13,87	0,43	97,96	36,88	32,35	23,95
	Desvio Padrão	0,79	130,49	77,33	10,85	1,28	1,71	3,65	0,10	21,06	8,43	8,49	7,70
Subárea B (Zona Lagoas)	Média	6,61	120,26	73,82	6,07	0,75	2,31	4,08	0,03	14,20	0,39	16,42	0,08
	Mediana	6,30	146,30	85,00	4,07	0,34	1,45	2,45	0,01	16,00	0,00	17,42	0,10
	Mínimo	6,00	60,00	38,40	3,82	0,17	0,96	0,82	0,01	10,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	7,33	151,70	97,08	10,35	1,71	5,78	8,16	0,09	16,99	0,98	37,33	0,16
	Desvio Padrão	0,55	36,49	23,09	2,67	0,60	1,81	3,38	0,03	3,06	0,48	14,81	0,06
Subárea C (Zona Agrícola)	Média	5,12	157,57	93,00	17,55	2,94	3,44	1,28	0,01	37,13	0,23	4,44	3,79
	Mediana	4,70	124,50	73,00	13,70	1,87	3,85	1,63	0,01	29,99	0,00	4,97	1,86
	Mínimo	4,39	71,40	43,00	6,73	1,70	0,48	0,00	0,00	18,99	0,00	1,24	0,10
	Máximo	6,32	398,00	235,00	48,17	6,80	4,82	2,45	0,01	85,97	1,17	9,95	13,50
	Desvio Padrão	0,75	102,89	60,62	12,87	1,73	1,30	0,74	0,00	20,71	0,40	2,65	4,34
Todas as amostras	Média	5,70	192,76	112,90	12,98	2,25	4,74	4,38	0,03	32,36	1,41	9,91	7,91
	Mediana	5,86	149,30	89,50	10,39	1,72	4,58	2,86	0,01	27,99	0,00	6,22	6,85
	Mínimo	4,11	60,00	37,00	2,24	0,17	0,48	0,00	0,00	10,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	7,33	600,00	356,00	48,17	6,80	9,16	13,87	0,43	97,96	36,88	37,33	23,95
	Desvio Padrão	0,88	121,49	71,33	11,10	1,50	2,22	3,65	0,08	20,84	6,60	9,77	7,92

Considerando as zonas de uso e ocupação do solo estabelecidas, as águas provenientes da subárea A (setor norte da bacia) apresentam, salinidade mais elevada, com valores de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, atingindo médias de 226,58 µS/cm e 131,50 mg/L, respectivamente, as quais são maiores que as médias obtidas nas subáreas B e C. As concentrações dos íons sódio, magnésio e cloreto nessas águas merecem destaque, atingindo médias de 13,12 mg/L; 5,92 mg/L e 35,54 mg/L, respectivamente.

A ocorrência de magnésio nas águas subterrâneas, de modo geral, pode ser influência da dissolução de rochas carbonáticas, o que não pode ser aplicado nesse estudo devido à ausência dessa litologia na área. SANTOS *et al* (2004) atribuíram o aumento do íon magnésio em águas subterrâneas de regiões urbanizadas à lixiviação de compostos provenientes da má disposição de resíduos sólidos domésticos. Ainda na subárea A, constatou-se que 44% das amostras estão contaminadas por nitrato, conforme a normativa citada. A subárea A compreende a zona urbana de Parnamirim/RN, a qual conta com sistemas de esgotamento sanitário individuais e majoritariamente baseado na infiltração de efluentes no solo (fossas negras escavadas até o nível freático, fossas sépticas e sumidouros), pois menos de 10% da população conta com saneamento básico (FIGUEREDO & FERREIRA, 2017). Tais efluentes são quimicamente ricos em substâncias orgânicas nitrogenadas, as quais, a partir da degradação microbiana, são convertidas em nitrato. Dessa maneira, é sugestivo afirmar que a má disposição de efluentes domésticos está modificando a química das águas subterrâneas.

As águas oriundas da subárea B (setor leste da bacia) se caracterizam pela baixa salinidade (tendendo à neutralidade). Os valores médios de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos constatados nesta subárea são, respectivamente, 146,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 85,00 mg/L, sendo inferiores aos resultados obtidos nas subáreas A e C. Tratam-se de águas compostas predominantemente, pelos íons sódio, cloreto e bicarbonato. A concentração dos íons sódio e cloreto são consideravelmente menores do que as encontradas nas demais subáreas e não foi constatado contaminação das águas por nitrato. Os valores médios de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos na subárea C são de 157,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 93,00 mg/L, respectivamente, constatando salinidade inferior em relação à subárea A, no entanto elevada em comparação à subárea B. Nesta subárea, as águas são concentradas nos íons sódio e cloro, sendo pouco expressivo o teor dos demais íons. Além disso, constatou-se contaminação por nitrato apenas em uma amostra, a qual atingiu concentração de nitrato de 13,50 mg/L de N-NO_3^- .

A Tabela 2 mostra a matriz de correlação entre os parâmetros químicos analisadas. Os coeficientes de correlação entre a condutividade elétrica e os íons sódio (0,860) e cloreto (0,924) são elevados em relação aos demais íons, demonstrando que esses íons exercem forte controle hidroquímico. Em relação ao íon nitrato, o fator de correlação deste com a condutividade elétrica também merece destaque (0,552), inferindo que tal íon exerce influência na salinidade das águas subterrâneas.

Tabela 2 - Matriz de correlação entre os parâmetros químicos.

	CE	STD	Na+	K+	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl-	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
CE	1,00	0,992	0,860	0,731	0,675	0,610	0,924	0,615	-0,126	0,552
STD		1,00	0,716	0,992	0,629	0,232	0,922	0,626	-0,135	0,516
Na+			1,000	0,794	0,399	0,291	0,964	0,568	-0,275	0,298
K+				1,000	0,506	0,224	0,805	0,139	-0,090	0,608
Mg ²⁺					1,000	0,492	0,595	0,353	0,073	0,582
Ca ²⁺						1,000	0,403	0,474	0,495	0,315
Cl-							1,000	0,584	-0,269	0,420
SO ₄ ²⁻								1,000	-0,163	-0,192
HCO ₃ ⁻									1,000	-0,101
NO ₃ ⁻										1,000

Entre os íons, constata-se correlação elevada entre o sódio e o cloreto (0,964), corroborando que esses íons provêm da mesma fonte. As correlações entre o magnésio e os íons cloreto e nitrato são fortes, atingindo quase 60%. O íon magnésio é muito raro nas águas subterrâneas devido a sua escassez geoquímica e sua mobilidade na zona vadosa depende da existência de outros ânions, particularmente do NO_3^- e do Cl^- , oriundos da mineralização da matéria orgânica, tendo como fonte principal o lançamento de esgoto não tratado na área (PEARSON et al, 1962; GONZALEZ-ERICO et al, 1979).

As variações espaciais na química das águas subterrâneas na área de estudo foram avaliadas a partir dos valores de condutividade elétrica (Figura 3) e do íon nitrato (Figura 4). O comportamento hidroquímico desses dois parâmetros é similar, haja vista grau de correlação entre eles: ao norte da área (subárea A) são constatados valores relativamente elevados, atingindo 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade elétrica e 23,95 mg/L de N-NO_3^- de concentração de nitrato; ao leste e ao sul (subárea B), esses parâmetros resultam índices relativamente baixos, com condutividade elétrica geralmente inferior a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e níveis de nitrato predominantemente nulos; a oeste (subárea C), são verificados valores intermediários com um ponto de coleta apresentando índices de condutividade elétrica e nitrato elevados em relação aos demais da mesma subárea.

As variações hidroquímicas ao longo do fluxo subterrâneo podem derivar de vários fatores. Inicialmente, as concentrações e os tipos de sais presentes nos mananciais subterrâneos dependem da recarga e, em seguida, da interação água-rocha ao longo de fluxo subterrâneo. Entretanto, além de elementos naturais, a química das águas pode ser condicionada a causas antrópicas (contaminação). No caso do SAB, o caráter predominantemente livre e a composição mineralógica pouco reativa (arenitos quartzosos) coloca a precipitação pluviométrica como um fator controlador importante na química das águas.

Na área de estudo, o fluxo subterrâneo ocorre, de modo geral, de oeste para leste, sendo o Oceano Atlântico a principal frente de descarga. Embora a tendência seja salinização ao longo do fluxo subterrâneo, esse comportamento não é totalmente expressado. Os índices de condutividade elétrica e nitrato aumentam no sentido W-NE (subárea C para subárea A), mas diminuem no sentido W-SE (subárea C para subárea B). Essa constatação infere que outros fatores devem influenciar nas características químicas das águas subterrâneas.

Figura 3 – Distribuição espacial de Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) na Bacia do Rio Pirangi considerando as zonas de uso e ocupação do solo.

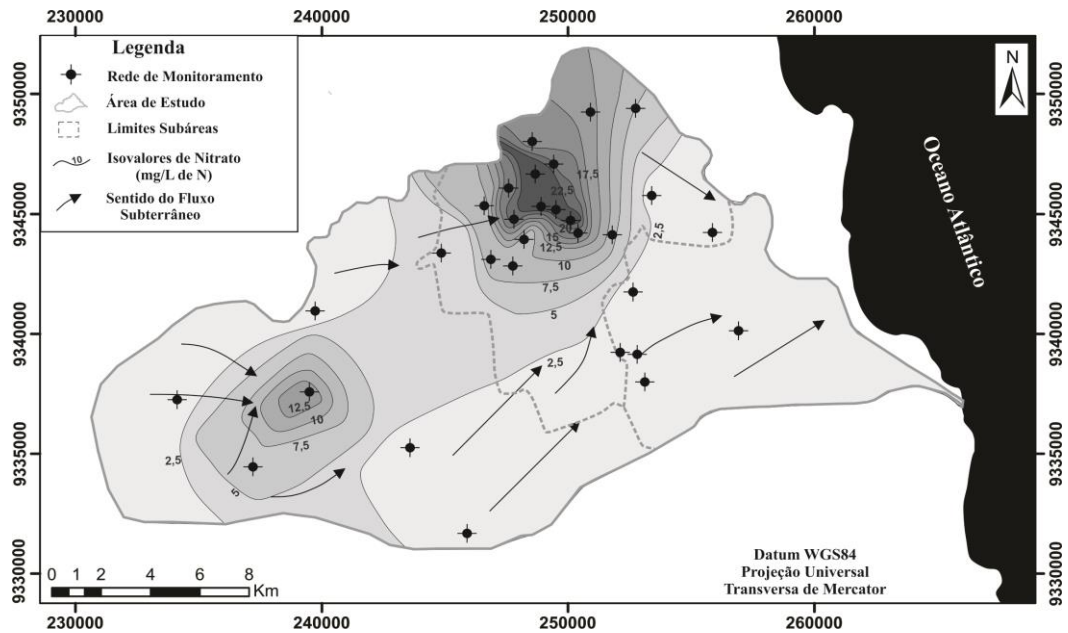
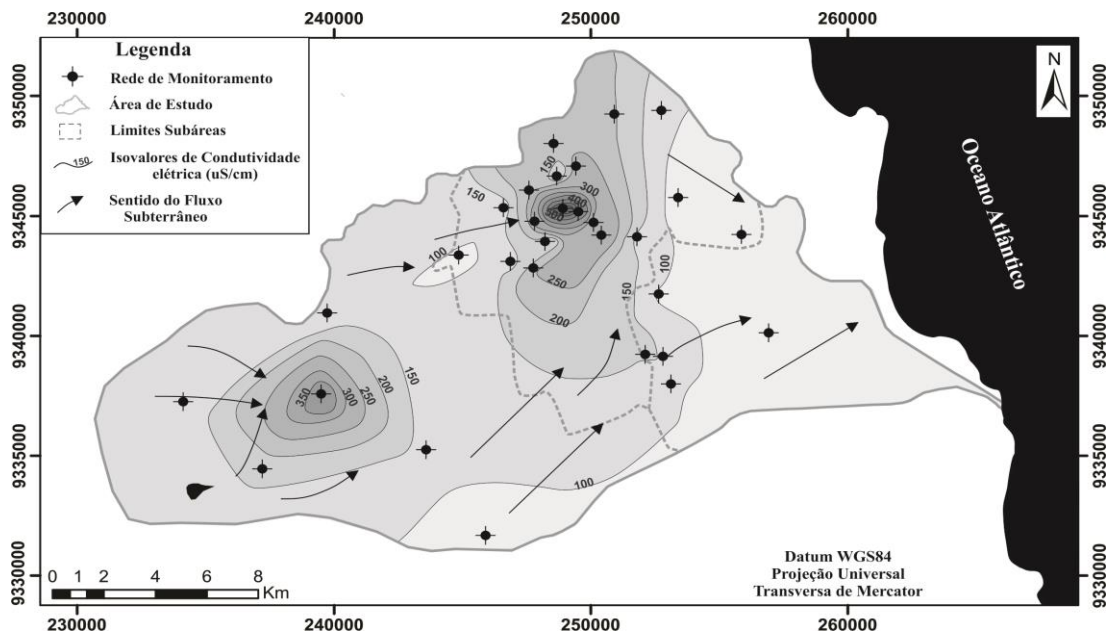


Figura 4 – Distribuição espacial da concentração do íon nitrato (mg/L de $\text{N}-\text{NO}_3$) na Bacia do Rio Pirangi considerando as zonas de uso e ocupação do solo.



Na subárea A, como já retratado anteriormente, é sugestivo que o referido aumento de salinidade e do teor de nitrato venha a ser causado pela má disposição de efluentes domésticos. VARNIER *et al* (2010) apontam estudos que demonstram a relação direta entre os padrões de concentração de nitrato nas águas subterrâneas e os de ocupação urbana (LOWE *et al* 2000, CAGNON & HIRATA 2004, GODOY *et al* 2004, DRAKE & BAUDER 2005, SANIOTTI 2005, REYNOLDS-VARGAS *et al* 2006, XU *et al* 2007, PROCEL 2011), mediante o uso de diferentes ferramentas (análises químicas, isotópicas, métodos estatísticos, uso de sistema de informação geográfica, dentre outros). Os estudos indicam que a expansão da ocupação urbana sem sistema adequado de esgotamento sanitário gera uma carga contaminante de nitrato significativa, que atinge os aquíferos e ameaça a qualidade das águas subterrâneas.

Na subárea B, é esperado que as águas apresentem as maiores concentrações de íons, visto que se trata de uma área a jusante (fluxo subterrâneo W-E), no entanto, oposto é observado. Esse comportamento pode ser justificado pela forte recarga subterrânea na região

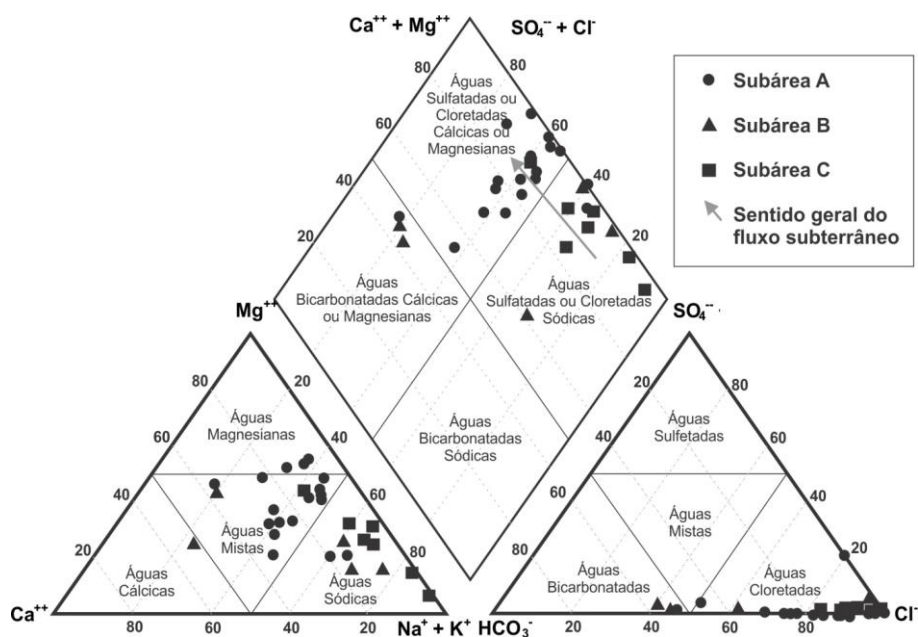
combinado com interferência antrópica inexpressiva, compondo águas mais diluídas e sem contaminantes. Nesse domínio, o regime pluviométrico intenso combinado com a presença de campos dunares que propiciam a infiltração, a recarga é favorecida.

Na subárea C, a salinização das águas pode está vinculada à transição climática para o semiárido, concentrando os sais em virtude das baixas precipitações pluviométricas e o efeito da evaporação (capilaridade). Ou seja, na subárea C ocorrem as menores taxas de precipitação da bacia, o que implica uma baixa taxa de recarga e, portanto, menor diluição das águas. Esse processo resulta em águas naturalmente mais salinizadas. Embora o efeito climático seja a principal condicionante sobre a salinidade das águas subterrâneas na subárea C, é importante considerar a influência da compartimentação estrutural do SAB na salinidade das águas. Nessa subárea constatou-se contaminação por nitrato apenas em uma amostra, o que pode ser ocasionado por práticas agrícolas inadequadas com o uso excessivo de fertilizantes.

O termo 'fácies hidroquímicas' é utilizado para classificar as águas subterrâneas com base em seus íons dominantes. Dessa forma, a fim de identificar as fácies hidroquímicas das águas subterrâneas na área de estudo, respeitando as zonas de uso e ocupação do solo, utilizou-se o Diagrama de Piper (Figura 5). Diagramas trilineares, como o Diagrama de Piper, apresentam graficamente as concentrações em porcentagem para cada íon analisado, em diagramas triangulares, constituindo-se numa das mais utilizadas representações gráficas para a classificação de um conjunto de dados hidroquímicos (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1983).

Os tipos predominantes de águas subterrâneas na área de estudo são cloretadas sódicas mistas (43,33%) e cloretadas sódicas (36,67%). Observa-se predominância de águas cloretadas sódicas magnesianas na subárea A e águas cloretadas sódicas nas subáreas B e C. A seta cinza no diagrama indica o sentido do fluxo subterrâneo, marcando transição hidroquímica de cloretadas sódicas para cloretadas mistas devido ao aumento da concentração do íon magnésio.

Figura 5 - Diagrama de Piper classificando as águas subterrâneas da área de estudo.



Os resultados obtidos também foram plotados no Diagrama de Durov Expandido (Figura 6). Esse diagrama tem uma distinta vantagem sobre o diagrama de Piper porque ele fornece mais informações sobre os tipos hidroquímicos e sobre a evolução da qualidade das águas (HUSSEIN, 2004), sendo uma combinação dos diagramas de Piper e Durov. O Diagrama de Durov Expandido revela que as águas subterrâneas do SAB na área de estudo se classificam como cloretadas sódicas magnesianas (campo 8) e cloretadas sódicas (campo 9), corroborando com os resultados obtidos a partir do Diagrama de Piper. É possível constatar ainda, que há modificação hidroquímica das águas do campo 9 em direção ao campo 8, sugerindo troca de íon reversa.

O Diagrama de Gibbs avalia os fatores controladores da hidrogeoquímica das águas subterrâneas a partir da correlação das razões catiônicas e aniônicas com o valor de sólidos totais dissolvidos. A hidrogeoquímica das águas subterrâneas do SAB na Bacia do Rio Pirangi é controlada predominantemente pelo fator precipitação (Figura 7). A maior parte das amostras foram plotadas fora dos limites do bumerangue, o que pode representar influência de fatores antrópicos na química das águas analisadas (SELVAKUMAR et al, 2017).

Figura 6 - Diagrama de Durov Expandido classificando as águas subterrâneas da área de estudo.

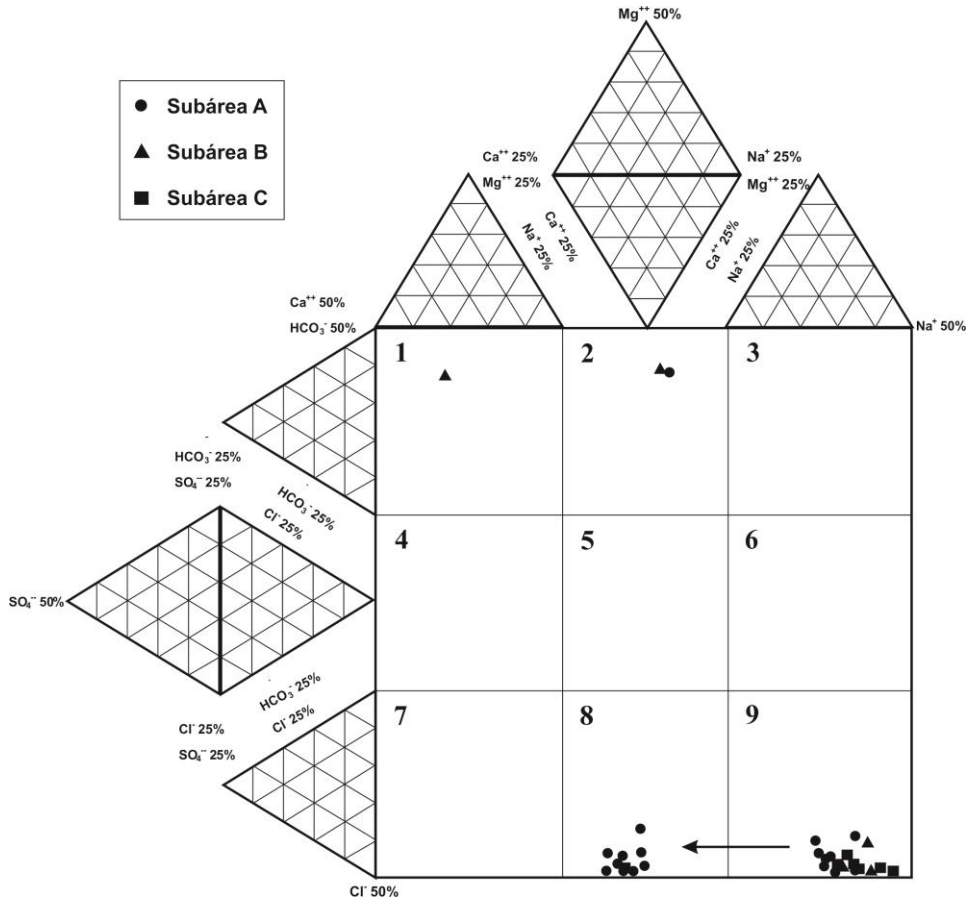
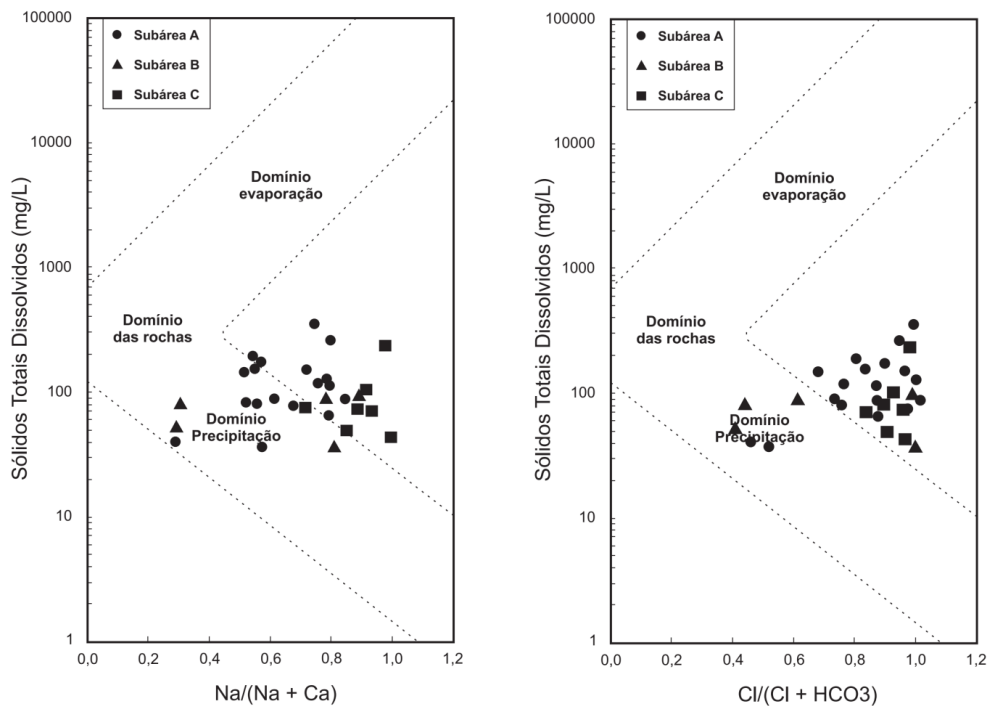


Figura 7 - Diagrama de Gibbs representando os fatores controladores das águas subterrâneas da área de estudo.



5. CONCLUSÃO

As águas do SAB na Região da Bacia do Rio Pirangi foram caracterizadas, de modo geral, como levemente ácidas, de baixa salinidade e predominantemente dos tipos cloretadas-sódicas-magnesianas e cloretadas-sódicas. A precipitação se mostra como o principal fator condicionante da química das águas subterrâneas do SAB na área de estudo. Entretanto, considerando as zonas de uso e ocupação do solo aplicadas neste trabalho, foi possível avaliar e sugerir outros fatores que controlam as características dessas águas.

As águas provenientes das áreas urbana consolidada e de expansão urbana são predominantes do tipo cloretadas-sódicas-magnesianas. Constatou-se presença significativa do íon nitrato, caracterizando em alguns casos, águas impróprias para o consumo humano. Sugere-se que a disposição inadequada de efluentes sanitários, produto da urbanização sem o satisfatório planejamento ambiental, está modificando as características naturais das águas.

As águas provenientes da área de ecossistema de dunas e lagoas são predominantemente do tipo cloretadas sódicas, embora ocorram águas bicarbonatadas cálcicas e mistas. Trata-se de uma área não urbanizada, com características naturais preservadas, e sugere que a baixa mineralização das águas ocorre devido à recarga subterrânea relativamente expressiva nessa porção da área.

Na zona agrícola, as águas são do tipo cloretadas sódicas. Nesta subárea aponta-se o efeito climático como principal condicionante da salinização natural das águas. Sugere-se também influência da compartimentação estrutural do aquífero. Considerando uso e ocupação do solo, é indicado ainda alteração da composição química das águas devido ao uso inadequado de fertilizantes e atividades agroindustriais desenvolvidas nessa subárea.

Indubitavelmente, o uso das águas do SAB é essencial para o contínuo desenvolvimento urbano, agrícola e industrial na área da Bacia do Rio Pirangi, com destaque para o município de Parnamirim. Contudo, é exposto que o manejo desse manancial subterrâneo não está sendo realizado de modo adequado conforme os preceitos do desenvolvimento sustentável. Diante disso, é recomendado planejamento e execução de atividades de gestão sustentável para a garantia do suprimento hídrico das populações atuais e futuras, como a avaliação periódica da qualidade das águas, o controle na perfuração e cadastro dos poços, o tratamento adequado das águas já contaminadas, o controle do uso de fertilizantes e pesticidas, a ampliação da rede de saneamento básico e a gestão apropriada dos resíduos sólidos, dentre outras medidas possíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – pelo apoio no desenvolvimento do projeto da Rede FINEP/CNPq – CT – Hidro sob o título “Potencialidades e definição de estratégias de manejo das águas subterrâneas da região de Parnamirim/RN”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. NASCIMENTO, F. S.; FERREIRA, A. N. P.; STEIN, P.; CABRAL, N. M. T.; MARTINS, C. A.; FIGUEREDO, E. M. Estudo Hidrogeológico para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal/RN. Volume 1 – Avaliação Hidrogeológica. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2012. 285 p.
- BAIRD, C.; CANN, M. *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- BEZERRA, F. H. R.; LUCENA, L. R. F. DE; SAAD, A.; MOREIRA, J. A. M.; LINS, F. A. P. L.; NOGUEIRA, A. M. B.; MACEDO, J. W. P.; NAZARÉ JR. D. 1993. Estruturação neotectônica do litoral de Natal-RN, com base na correlação entre dados geológicos, geomorfológicos e gravimétricos. In: Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos, IV. 1993, Belo Horizonte. *Anais*. Belo Horizonte - MG. SBG, Núcleo MG. Bol. 12: p. 317-321.
- BRASIL - Ministério da Saúde, 2017. PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO Nº 5, de 28 de setembro de 2017. Anexo XX. Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos / Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Organizadores: Carlos Jesus Brandão ... [et al.]. – São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.
- CÓRDOBA, V. C.; JARDIM DE SÁ, E. F.; SOUSA, D. C.; ANTUNES, A. F.. Bacia de Pernambuco-Paraíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 2, p. 391– 403, 2007.
- CUSTODIO E. & LLAMAS M.R. 1983. *Hidrologia Subterrânea*. Barcelona, Ômega, v. 2.
- Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN). Monitoramento pluviométrico. Disponível em: <<http://189.124.130.5:8181/monitoramento/monitoramento.php>>. Acesso em 04 de setembro de 2019.
- FIGUEIREDO, F. F.; FERREIRA, J. G. O saneamento básico no Nordeste e no Rio Grande do Norte: avanços e constrangimentos. XVII ENAMPUR. Sessão Temática 4: Meio Ambiente e Políticas Públicas. *Anais*. São Paulo, 20 p. 2017.
- GIBBS, R.J. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, v.17, p.1088-1090, 1970.
- GONZALEZ-ERICO E., KAMPRATH, E. J., NADERMAN, G. C., SOARES, W. V. 1979. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an oxisol of central Brazil. *Soil Science Society of America Journal*, v.43, p.1155-1158.
- HUSSEIN, M. T. Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques. *Hydrogeology Journal*, v. 12, n. 2, p. 144-158, 2004.
- LOGAN, J. 1965. Interpretação de análises químicas de água. Recife: U.S. Agency for International Development. 67 p.
- LUCENA, L. R. F.; ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C. O controle estrutural no Aquífero Barreiras - área da Bacia do Rio Pirangi-RN. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 20, n. 1, p. 83–98, 2006.
- MELO, J. G. Potencialidades e definição de estratégias de manejo das águas subterrâneas da região de Parnamirim, RN. Relatório Final de Pesquisa. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. MCT/CNPq - FINEP/CTHIDRO, 2017.
- MELO, J.G. *Impactos de Desenvolvimento Urbano nas Águas Subterrâneas de Natal/RN*. São Paulo/SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995. 196p.
- PEARSON, R. W.; ABRUNA, F.; VICENT CHANDLER, J. E. 1962. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soil of Puerto Rico. *Soil Science*, Baltimore, v. 93, p. 77– 82.
- PIPER, A.M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophysical Union*, vol. 25: 914-928.

- REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE-MERINO, J.; HIRATA, R. 2006. Trends in nitrate concentrations and determination of their origin using stable isotopes (^{18}O and ^{15}N) in groundwater of the western Central Valley, Costa Rica. **Ambio: A Journal of the Human Environment**, 35(5): 229–236.
- SANTOS, C. B.; LEAL, L. R. B.; LUZ, J. A. G.; MELLO, J. C. Caracterização do impacto na qualidade das águas subterrâneas causado pela disposição dos resíduos sólidos urbanos no Aterro Municipal da cidade de Feira de Santana – BA. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004. Cuiabá. **Anais**. Cuiabá – MT.
- SCHOELLER, H. **Geochemie des eaux Souterraines**. Revue de L'Institute Francais du Petrole. N. 10, p. 230 – 244. 1955. Les eaux Souterraines. Paris: Mason et Cie, 1962. Cap 7.
- SELVAKUMAR, S., CHANDRASEKAR, N., KUMAR, G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. **Water Resources and Industry**, v. 17, p. 26-33, 2017.
- SERHID. Secretaria de Recursos Hidricos do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Relatório Técnico. HIDRO-SERVICE/SERHID. Natal, 1998.
- VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no Parque Ecológico do Tietê - São Paulo, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas** n. 16/ Maio 2002.
- VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do Município de Marília (SP). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, n 31, 2010.