



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS DO
AQUÍFERO BARREIRAS: ESTUDO DE CASO EM BENEVIDES -
PA**

Dissertação apresentada por:

VALMOR JOSÉ FREDDO FILHO

Orientador: Prof. Dr. Paulo Pontes Araújo

BELÉM

2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS**

**QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS DO
AQUÍFERO BARREIRAS: ESTUDO DE CASO EM BENEVIDES -
PA**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR:
VALMOR JOSÉ FREDDO FILHO**

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Recursos Hídricos

Data de Aprovação: 10/07/2018

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Paulo Pontes Araújo – Orientador
Doutor em Ciências Agrárias – UFRA**

**Prof. Dr. Francisco de Assis Oliveira - Membro
Doutor em Geociências – UFPA**

**Prof. Dr. Milton Antônio da Silva Matta - Membro
Doutor em Geoquímica Ambiental – UFPA**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F852q Freddo, Valmor José Freddo Filho
 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS DO AQUÍFERO BARREIRAS: ESTUDO DE
 CASO EM BENEVIDES - PA / Valmor José Freddo Filho Freddo. — 2018
 113 f. : il. color

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos (PPRH), Instituto de
 Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
 Orientação: Prof. Dr. Paulo Pontes Araújo Araújo

 1. hidroquímica. 2. águas subterrâneas rasas. 3. aquífero livre Barreiras. 4. nitrato. 5. contaminação
 antrópica. I. Araújo, Paulo Pontes Araújo, *orient.* II. Título

CDD 551.4903

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço primeiramente a Deus por me dar a força e saúde necessárias para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço também a minha família, em especial aos meus pais que me deram uma excelente educação e sempre me deram total apoio e estrutura nesses longos e árduos anos, fazendo com que eu me tornasse o que sou hoje.

Agradeço também as minhas irmãs, que acima de tudo são minhas amigas, sempre me dando bons conselhos e me orientando para que eu pudesse tomar os melhores caminhos e fazer as melhores escolhas.

Agradeço a minha parceira e companheira Loury, pois sem o seu amor e companheirismo nas horas mais difíceis eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao professor e orientador Paulo Pontes, pois além de orientador é um grande amigo que me incentivou e nunca me deixou desanimar diante dos obstáculos que me foram impostos.

Agradeço a CPRM – Serviço Geológico do Brasil, por tornar possível este trabalho através de toda sua estrutura e parceria na realização das atividades de campo. Em especial aos amigos, Almir Pacheco e Raimundo Sr. “Dico”, sempre prestativos e dispostos a me ajudar.

Agradeço também aos meus amigos Rodolfo Reis e Luiz Otávio, que sempre me deram apoio quando precisei.

Agradeço aos amigos da Geologia da UERJ, onde constituímos uma grande família sempre nos apoiando e ajudando, tanto nos momentos bons quanto nos momentos ruins.

Agradeço a UFPA e a SAEBE de Benevides, por prestar o apoio necessário para a execução deste trabalho.

Agradeço a Sessão de Meio Ambiente do Instituto de Pesquisas Evandro Chagas, em especial ao Bruno Carneiro pelo auxílio imprescindível dado a mim.

Agradeço a todos os meus familiares, que, mesmo de longe, sempre torceram por mim e torcem até hoje.

Por fim, agradeço a todos aqueles que me ajudaram nesta longa trajetória para que hoje eu conclua mais uma e importante etapa da minha vida.

RESUMO: O objetivo desta pesquisa foi estudar a qualidade das águas subterrâneas do aquífero livre Barreiras, por meio de caracterização hidroquímica e classificação do tipo químico das águas subterrâneas freáticas, hipoteticamente poluídas por atividades antrópicas, na sede municipal de Benevides - PA. As águas subterrâneas do município de Benevides se apresentam como recurso natural importante tanto para o abastecimento doméstico, como para uso industrial e comercial. O material e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho consistiu em: levantamento bibliográfico sobre a geologia local e regional da Bacia Sedimentar Amazônica e aquíferos regionais; organização e consistência dos dados disponíveis no projeto SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas); tratamento e análise das informações de poços já existentes (definição de padrões litológicos e hidrogeológicos); cadastramento de 43 novos poços, dos quais 30 poços foram utilizados como poços de monitoramento; monitoramento do nível estático, coleta e análise físico-química sistemática das águas subterrâneas rasas, durante os meses de março, junho, agosto, outubro e dezembro de 2017. As técnicas analíticas adotadas consistem em medições físico-químicas *in situ*, com o uso de sonda multiparâmetro e análises laboratoriais físico-químicas (pH, temperatura, condutividade elétrica, OD, sólidos totais dissolvidos, turbidez, fluoreto, ferro total, manganês, alumínio, bário, chumbo, cobre, cobalto, cromo, cádmio, níquel, zinco, NaCl, Ca⁺², Na⁺, K⁺, Mg⁺², Cl⁻, SO₄⁻², CO⁻³, HCO⁻³, NH₄⁺ e NO₃⁻), que foram realizadas no Instituto Evandro Chagas. Para a caracterização hidroquímica das águas, foram elaborados mapas de isotores dos elementos e gráficos de variações sazonais, além da análise do diagrama de Piper para classificação das águas subterrâneas. Para a avaliação da água para consumo humano foi utilizada a Portaria n° 2914/2011, do Ministério da Saúde. O pH variou de 4,33 a 5,84 durante o período chuvoso e 4,48 a 5,96 no período menos chuvoso. A variação de nível estático foi de 0,8 a 20,4 metros no período chuvoso e 1,7 a 25,34 no período menos chuvoso. O alumínio e o chumbo apresentaram valores máximos de 0,515 mg/L e 0,02 mg/L, respectivamente. A condutividade elétrica atingiu seu valor máximo de 195,8 µS/cm, acompanhando a elevação dos valores de sódio e cloreto. Os valores de amônio foram mais expressivos durante o período chuvoso, com valor médio de 0,175 mg/L. O maior índice de concentração de ferro total foi de 1,28 mg/L. Os teores de nitrato encontrados nas amostras alcançaram índices superiores ao permitido pela legislação em metade das amostras analisadas. A caracterização hidroquímica evidencia um caráter de natureza cloretada sódica. As elevadas concentrações de nitrato estão relacionadas a atividades antrópicas originadas pela ausência de saneamento básico local e caracterizada pela descarga de esgoto doméstico e utilização de fossas negras, próximas à maioria dos poços.

Palavras-chave: hidroquímica; águas subterrâneas rasas; aquífero livre Barreiras; nitrato; contaminação antrópica.

ABSTRACT: The objective of this research was to study the groundwater quality of the free aquifer Barreiras, by means of hydrochemical characterization and classification of the chemical type of groundwater, hypothetically polluted by anthropic activities, at the municipal headquarters of Benevides - PA. The groundwater of the municipality of Benevides is an important natural resource both for domestic supply and for industrial and commercial use. The material and methods used for the development of this work consisted of: a bibliographical survey on the local and regional geology of the Amazon Basin and regional aquifers; organization and consistency of data available in the SIAGAS (Groundwater Information System) project; treatment and analysis of existing well information (definition of lithological and hydrogeological standards); registration of 43 new wells, of which 30 wells were used as monitoring wells; and systematic physico-chemical analysis of shallow groundwater during the months of March, June, August, October and December 2017. The analytical techniques adopted consist of physical-chemical measurements *in situ*, with the use of (pH, temperature, electrical conductivity, OD, total dissolved solids, turbidity, fluoride, total iron, manganese, aluminum, barium, lead, copper, cobalt, chromium, cadmium, nickel, zinc, NaCl, Ca^{+2} , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , CO_3^- , HCO_3^- , NH_4^+ e NO_3^-), which were carried out at the Evandro Chagas Institute. For the hydrochemical characterization of the waters, maps of isotores of the elements and graphs of seasonal variations were elaborated, besides the analysis of the diagram of Piper for classification of groundwater. For the evaluation of water for human consumption was used Ordinance N° 2914/2011, Ministry of Health. The pH ranged from 4.33 to 5.84 during the rainy season and 4.48 to 5.96 in the least rainy period. The static level variation was 0.8 to 20.4 meters in the rainy season and 1.7 to 25.34 in the less rainy period. Aluminum and lead presented maximum values of 0.515 mg/L and 0.02 mg/L, respectively. The electrical conductivity reached its maximum value of 195.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, accompanying the elevation of sodium and chloride values. Ammonium values were more significant during the rainy season, with an average value of 0.175 mg/L. The highest total iron concentration index was 1.28 mg/L. The nitrate levels found in the samples reached indices higher than allowed by the legislation in half of the samples analyzed. The hydrochemical characterization evidences a character of chlorinated sodium nature. The high concentrations of nitrate are related to anthropic activities originated by the absence of local basic sanitation and characterized by the discharge of domestic sewage and the use of black cesspits, near most wells.

Keywords: hydrochemistry; shallow groundwater; free aquifer Barreiras; nitrate; anthropogenic contamination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1. Equações da oxidação de amônia a nitrito e a nitrato, sob atuação bacteriana.....	21
Figura 2. Localização da área de pesquisa (<i>Google Maps</i>).....	26
Figura 3. Distribuição média mensal da precipitação pluviométrica. Rede Hidrometeorológica Nacional (1972-2016).....	28
Figura 4. Distribuição anual da precipitação pluviométrica. Rede Hidrometeorológica Nacional (1972-2016).....	29
Figura 5. Mapa geológico do município de Benevides – PA.....	32
Figura 6. Perfil construtivo do poço representativo na área de estudo (Bairro Santos Dumont)....	35
Figura 7. Localização geográfica dos poços cadastrados na área de pesquisa.....	38
Figura 8. Coleta de amostra de água em um dos poços na área de pesquisa.....	40
Figura 9. Valores médios da variação sazonal de nível estático por períodos amostrados.....	48
Figura 10. Variação sazonal de pH das águas subterrâneas analisadas.....	50
Figura 11. Variação sazonal de STD das águas subterrâneas analisadas.....	51
Figura 12. Valores de CE das águas subterrâneas analisadas.....	53
Figura 13. Concentrações de Cloreto nas águas subterrâneas analisadas.....	55
Figura 14. Gráfico dos valores de Sulfato nas águas subterrâneas analisadas.....	56
Figura 15. Gráfico dos valores de Fosfato nas águas subterrâneas analisadas.....	58
Figura 16. Concentrações de Cálcio nas águas subterrâneas analisadas.....	59
Figura 17. Gráfico dos valores de Magnésio nas águas subterrâneas analisadas.....	60
Figura 18. Gráfico dos valores de Sódio nas águas subterrâneas analisadas.....	62
Figura 19. Valores de Potássio nas águas subterrâneas analisadas.....	63
Figura 20. Concentrações de Ferro nas águas subterrâneas analisadas.....	65
Figura 21. Concentrações de Manganês nas águas subterrâneas analisadas.....	66
Figura 22. Valores de Alumínio nas águas subterrâneas analisadas.....	68

Figura 23. Valores de Bário nas águas subterrâneas analisadas.....	69
Figura 24. Concentrações de Chumbo nas águas subterrâneas analisadas.....	71
Figura 25. Concentrações de Cobre nas águas subterrâneas analisadas.....	72
Figura 26. Gráfico dos valores de Cobalto nas águas subterrâneas analisadas.....	74
Figura 27. Teores de amônio (NH_4^+) das águas subterrâneas rasas analisadas (março/2017).....	79
Figura 28. Variação sazonal de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas.....	82
Figura 29. Distribuição de valores de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas na área de estudo no período chuvoso (março/2017).....	83
Figura 30. Distribuição de valores de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas na área de estudo no período menos chuvoso (agosto/2017).....	84
Figura 31. Mapa de sentido preferencial de fluxo das águas subterrâneas rasas no período chuvoso (março/2017).....	86
Figura 32. Mapa de sentido preferencial de fluxo das águas subterrâneas rasas no período menos chuvoso (agosto/2017).....	87
Figura 33. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.....	90
Figura 34. Mapa de vulnerabilidade à poluição (método GOD) da área de estudo.....	92
Figura 35. Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de março/2017 (período chuvoso).....	94
Figura 36. Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de agosto/2017 (período menos chuvoso).....	95
Figura 37. Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de outubro/2017 (período menos chuvoso).....	96
Figura 38. Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de dezembro/2017 (período chuvoso).....	97

QUADROS E TABELAS

Quadro 1. Padrões estabelecidos pela Portaria <u>nº</u> 2.914/11 do Ministério da Saúde.....=.....=.	23
Quadro 2. Poços/amostras na área de pesquisa (projeto SIAGAS Março/2017).....	37
Quadro 3. Localização/endereço dos pontos de amostragem na sede municipal de Benevides – PA.....	42
Quadro 4. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período chuvoso (Março/2017).....	43
Quadro 5. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período chuvoso (Dezembro/2017).....	44
Quadro 6. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (Junho/2017).....	45
Quadro 7. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (Agosto/2017).....	46
Quadro 8. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (Outubro/2017).....	47
Quadro 9. Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação.....	88
Quadro 10. Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.....	89
Quadro 11. Padrão de potabilidade de água para consumo humano no período chuvoso, conforme a Portaria nº 2.914/2011.....	98
Quadro 12. Padrão de potabilidade de água para consumo humano no período menos chuvoso, conforme a Portaria nº 2.914/2011.....	99

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	13
2. INTRODUÇÃO.....	13
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1. RECURSOS HÍDRICOS E CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	15
3.2. COMPOSTOS NITROGENADOS E SAÚDE HUMANA.....	19
3.3. NORMAS DE POTABILIDADE.....	22
4. OBJETIVOS.....	24
4.1. OBJETIVO GERAL.....	24
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	25
5.1. LOCALIZAÇÃO.....	25
5.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS.....	26
5.3. CLIMA.....	27
5.4. BALANÇO HÍDRICO.....	27
5.5. GEOMORFOLOGIA, VEGETAÇÃO E SOLO.....	30
5.6. HIDROGRAFIA.....	30
6. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA REGIONAL.....	30
6.1. SEDIMENTOS RECENTES E FORMAÇÃO PÓS BARREIRAS.....	33
6.2. GRUPO BARREIRAS.....	33
6.3. FORMAÇÃO PIRABAS.....	34
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
7.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO.....	36
7.2. SELEÇÃO DE POÇOS E UTILIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS SIAGAS/CPRM.....	36
7.3. TRABALHOS DE CAMPO E CADASTRAMENTO DE POÇOS.....	39
7.4. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS.....	40
8. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS.....	41

8.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	48
8.1.1. Potencial Hidrogeniônico (pH).....	49
8.1.2. Sólidos Totais Dissolvidos (STD).....	51
8.1.3. Condutividade Elétrica (CE).....	52
8.1.4. Turbidez (uT).....	53
8.1.5. Cloreto.....	54
8.1.6. Sulfato.....	55
8.1.7. Fosfato.....	57
8.1.8. Cálcio.....	58
8.1.9. Magnésio.....	59
8.1.10. Sódio.....	61
8.1.11. Potássio.....	62
8.2 PARÂMEROS RELATIVOS A SUBSTÂNCIAS INDESEJÁVEIS OU TÓXICAS.....	63
8.2.1. Ferro Total.....	63
8.2.2. Manganês.....	65
8.2.3. Alumínio.....	66
8.2.4. Bário.....	68
8.2.5. Chumbo.....	70
8.2.6. Cobre.....	71
8.2.7. Cobalto.....	73
8.2.8. Cromo.....	74
8.2.9. Cádmio.....	75
8.2.10. Níquel.....	76
8.2.11. Zinco.....	77
8.2.12. Amônio (N-NH ₄ ⁺).....	77
8.2.13. Nitrito (N-NO ₂ ⁻).....	79
8.2.14. Nitrato (N-NO ₃ ⁻).....	80
9. SENTIDO DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	85

10. VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO LIVRE BARREIRAS.....	88
11. ANÁLISE ESTATÍSTICA E CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	93
12. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
A N E X O S.....	107
ANEXO 1 – CADASTRAMENTO DE PROVÁVEIS FONTES DE CONTAMINAÇÃO.....	108
ANEXO 2 – FORMULÁRIO UTILIZADO PARA CADASTRO DE POÇOS.....	112

*“Faça o que puder, com
o que tiver, onde
estiver.”*

Theodore Roosevelt

1. APRESENTAÇÃO

Esta pesquisa foi desenvolvida na sede municipal de Benevides – PA, região de crescimento populacional desordenado, onde o consumo das águas subterrâneas rasas é intenso. Este estudo pretende fornecer subsídios para a gestão dos recursos hídricos na área de pesquisa, auxiliando novos projetos de desenvolvimento sustentável para a região e visando contribuir para o planejamento urbano e saneamento básico municipal pela ocupação do meio físico de forma ordenada e eficiente. Além disso, será feita a caracterização hidroquímica e da vulnerabilidade a poluentes, bem como a avaliação da qualidade das águas subterrâneas do aquífero livre Barreiras, por meio de resultados que serão mostrados em bases temáticas e da integração e discussão dos dados hidrogeológicos adquiridos.

Este trabalho é composto por uma breve introdução, seguida dos objetivos deste estudo, as características gerais da área, revisão bibliográfica da Geologia e Hidrogeologia regional e a metodologia empregada durante os trabalhos de campo e laboratório. Posteriormente, são apresentados os resultados e discussões, em que estão inseridas as informações sobre a caracterização e classificação hidroquímica da área de estudo, bem como os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos analisados, sendo eles: pH, temperatura, condutividade elétrica, OD, sólidos totais dissolvidos, turbidez, fluoreto, ferro total, manganês, alumínio, bário, chumbo, cobre, cobalto, cromo, cádmio, níquel, zinco, NaCl, Ca⁺², Na⁺, K⁺, Mg⁺², Cl⁻, SO₄⁻², CO⁻³, HCO⁻³, NH₄⁺ e NO₃⁻. Da mesma forma, é feita a interpretação de mapas do sentido de fluxo hídrico subterrâneo, a interpretação do mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero livre Barreiras e o resumo estatístico dos resultados. Por fim, foi realizada a classificação das águas subterrâneas estudadas, utilizando-se o diagrama de Piper e apresentação das conclusões e recomendações através da abordagem sobre a associação existente entre saneamento básico e doenças de veiculação hídrica, tendo como base o perfil socioeconômico e ambiental da área de estudo.

2. INTRODUÇÃO

A região nordeste do Estado do Pará, onde está situado o município de Benevides, é a considerada a de maior crescimento demográfico. Nesta área residem 3,7 milhões de habitantes (IBGE, 2014) e tem o abastecimento público de água realizado a partir dos sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas. O abastecimento de água, público e particular, provém, de forma fundamental, da captação a partir de poços tubulares, sobretudo com profundidades entre 50 e 300 metros (SIAGAS/CPRM).

Nas últimas décadas, vem ocorrendo um crescimento desordenado da perfuração de poços na Região Metropolitana de Belém (RMB), principalmente, nas áreas com elevadas concentrações populacionais, nas quais inexistem infraestrutura sanitária básica, configurada pela ausência no fornecimento de água potável e de esgoto sanitário. A maioria dos poços perfurados e cadastrados no projeto Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) não possui critérios técnicos e está quase sempre associada ao baixo custo de escavação de poços manuais ou tubulares rasos. Esta exposição ao risco, sobretudo dos aquíferos considerados livres, é um problema social, uma vez que a contaminação das águas subterrâneas rasas pode gerar riscos à saúde pública através de doenças de veiculação hídrica. A construção disseminada de fossas e o uso de agrotóxicos e fertilizantes na área rural contribuem para o crescente risco de contaminação das águas subterrâneas.

Atualmente existem 215 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) no município de Benevides, onde aproximadamente 90% destes poços, possuem menos que 60 metros de profundidade e estão captando água do aquífero Barreiras, ou seja, mais susceptíveis a contaminação antrópica.

Dentre as sedes municipais presentes na Região Metropolitana de Belém (RMB) com maior déficit de infraestrutura sanitária básica, configurada pela ausência no fornecimento de água potável e de esgoto sanitário, encontra-se a cidade de Benevides – PA. As águas subterrâneas rasas podem ser influenciadas por uma série de fontes de contaminação, o que pode comprometer a sua qualidade, quantidade e disponibilidade. Podem ser apontadas como fontes de contaminação das águas subterrâneas as seguintes causas: atividades de postos de combustíveis e derivados de petróleo; cemitérios; agrotóxicos e pesticidas; suinocultura; atividades minerárias; metais pesados; aterros, lixões, depósitos sanitários, lagoas de estabilização; construção irregular de poços; fossas sépticas; nitrato; radioatividade; atividades bélicas; aliados ainda a superexploração (SOUZA, 2010).

No que se refere às águas subterrâneas do aquífero livre Barreiras, na sede municipal de Benevides, podemos considerar esta problemática ainda mais grave se considerados fatores como: o alto índice pluviométrico eleva o grau de saturação da zona não saturada, aumentando assim a eficiência do transporte de poluentes durante os meses de maior pluviosidade; a elevada densidade demográfica aliada à ausência de saneamento básico faz com que a população utilize as fossas como forma de descarte do esgoto sanitário. Como grande parte desta população consome água através de poços rasos/cacimbas, isso pode levar a uma contaminação, mesmo que de forma involuntária, da água consumida. Segundo Matta (2002), esses valores anômalos de nitrato, apesar de não muito acima dos padrões de potabilidade utilizados, são suficientes para serem interpretados como contaminações por efluentes líquidos (principalmente esgotos domésticos) nas águas superficiais que interagem com as águas subterrâneas, somadas à presença

de fossas negras e ajudadas pela inexistência de saneamento básico. Tudo isso é somado a um nível estático muito raso nessas áreas, muitas vezes inferior a 5 metros e algumas vezes sub-aflorante.

Para compreender melhor a problemática da região, foram realizados estudos para avaliar a qualidade das águas subterrâneas que estão sendo utilizadas pela população para consumo, através da caracterização hidroquímica (análise físico-química) destas águas, buscando identificar as possíveis fontes de contaminação, sejam elas antrópicas ou não.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. RECURSOS HÍDRICOS E CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Segundo alguns especialistas, a crise da água no século XXI é muito mais de gerenciamento do que uma crise real de escassez e estresse (ROGERS, 2006). Entretanto, para outros especialistas, é resultado de um conjunto de problemas ambientais agravados com outros problemas relacionados à economia e ao desenvolvimento social (GLEICK, 2000). Para Somlyódy & Varis (2006), o agravamento e a complexidade da crise da água decorrem de problemas reais de disponibilidade e aumento da demanda, e de um processo de gestão ainda setorial e de resposta a crises e problemas sem atitude preditiva e abordagem sistêmica. Tundisi & Matsumura-Tundisi (2008) ressaltam a necessidade de uma abordagem sistêmica, integrada e preditiva na gestão das águas com uma descentralização para a bacia hidrográfica. Segundo esses autores, uma base de dados consolidada e transformada em instrumento de gestão pode ser uma das formas mais eficazes de enfrentar o problema de escassez de água, estresse de água e deterioração da qualidade.

Segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), as águas subterrâneas possuem distribuição bastante variável, assim como, as águas superficiais por estarem relacionadas ao ciclo hidrológico, dependendo das condições climáticas, porém as águas subterrâneas apresentam-se cerca de 100 vezes mais abundantes que águas superficiais de lagos e rios. A partir do momento em que os contaminantes atingem o solo, inicia-se a sua infiltração de forma lenta no meio poroso, tendo acesso às águas do lençol freático. Para a recuperação das águas subterrâneas, quando contaminadas ou poluídas, é necessário alto investimento financeiro e com resultados em longo prazo (ABAS, 2017).

Tundisi (2008) define que, no amplo contexto social, econômico e ambiental do século XXI, os seguintes principais problemas e processos são as causas principais da “crise da água”:

- Intensa urbanização, aumentando a demanda pela água, ampliando a descarga de recursos hídricos contaminados e com grandes demandas de água para abastecimento e desenvolvimento econômico e social (TUCCI, 2008).

- Estresse e escassez de água em muitas regiões do planeta em razão das alterações na disponibilidade e aumento de demanda.

- Infraestrutura pobre e em estado crítico, em muitas áreas urbanas com até 30% de perdas na rede após o tratamento das águas.

- Problemas de estresse e escassez em razão de mudanças globais com eventos hidrológicos extremos aumentando a vulnerabilidade da população humana e comprometendo a segurança alimentar (chuvas intensas e períodos intensos de seca).

- Problemas na falta de articulação e falta de ações consistentes na governabilidade de recursos hídricos e na sustentabilidade ambiental. Esse conjunto de problemas apresenta dimensões em âmbito local, regional, continental e planetário. Esses problemas contribuem para:

- Aumento e exacerbação das fontes de contaminação.

- A alteração das fontes de recursos hídricos – mananciais – com escassez e diminuição da disponibilidade.

- Aumento da vulnerabilidade da população humana em razão de contaminação e dificuldade de acesso à água de boa qualidade (potável e tratada).

- Esse conjunto de problemas está relacionado à qualidade e quantidade da água, e, em resposta a essas causas, há interferências na saúde humana e saúde pública, com deterioração da qualidade de vida e do desenvolvimento econômico e social (TUNDISI, 2008).

Segundo Feitosa (2008), as contaminações das águas subterrâneas podem ter origens diversas, sendo atualmente mais comuns aquelas relacionadas diretamente com atividades industriais, domésticas e agrícolas.

- Atividades Industriais - as indústrias podem produzir contaminação subterrânea através de:

- águas usadas, contendo compostos químicos, metais e/ou com alta temperatura;

- elementos radioativos;

- chorumes (infiltrações através de aterros sanitários, lixões etc);

- acidentes com produtos químicos.

- Atividades Domésticas - a atividade doméstica pode contaminar a água subterrânea das seguintes maneiras:

- chorumes de aterros sanitários, lixões;
- acidentes com rompimentos de fossas sépticas ou de redes de esgotos.

- Atividades Agrícolas - a agricultura pode contaminar a água subterrânea através de:

- solutos dissolvidos por chuva ou irrigação;
- fertilizantes minerais, naturais etc.;
- sais, herbicidas, pesticidas etc.

De acordo com a classificação estabelecida pelo *Office of Technology Assessment (OTA)* do Congresso dos Estados Unidos, modificada por Fetter (1993), é possível distinguir as seguintes fontes de contaminação:

(A) Fontes projetadas para recepção de substâncias:

- fossas sépticas (águas residuais e esgotos domésticos);
- poços de injeção (resíduos perigosos, *run-off* urbano, esgotos municipais);
- aplicações no solo como fertilizantes (lodos de estações de tratamento, esterco de animais em currais, aviários etc.); Nitrogênio, fósforo e metais pesados podem originar-se dessas fontes e contaminar as águas subterrâneas.

(B) Fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias:

- aterros sanitários (lixões urbanos, restos de demolições, lodos de estações de tratamento, materiais tóxicos e resíduos perigosos de fundições ou indústrias);
- valas clandestinas abertas (lixo doméstico queimado, cujas cinzas, diluídas pelas chuvas, podem produzir contaminações da água subterrânea);
- resíduos de mineração;
- vazamentos em tanques de armazenamento (produtos de petróleo, químicos agrícolas e outros).

(C) Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte:

- vazamentos em oleodutos, gasodutos, esgotos, entre outros;

- acidentes com caminhões e trens condutores de produtos químicos.

(D) Fontes produtoras de substâncias em virtude de outras atividades:

- irrigação (percolação do excesso de água de irrigação até o nível freático, levando pesticidas e fertilizantes dissolvidos);
- aplicações de pesticidas para controle de pragas (ervas daninhas, insetos, fungos etc.);
- aplicações de fertilizantes (nitrogênio, fósforo, potássio, dos quais apenas o nitrogênio pode se constituir em contaminante);
- *run-off* urbano (sólidos dissolvidos e em suspensão, oriundos das emissões dos veículos motorizados, resíduos de óleos e graxas, fezes);
- percolação de poluentes atmosféricos (emissões de automóveis, fumaças de indústrias, incinerações etc.). Os poluentes incluem hidrocarbonetos, químicos orgânicos sintéticos, químicos orgânicos naturais, metais pesados, compostos de enxofre e de nitrogênio.

(E) Fontes que podem atuar como condutoras da água contaminada:

- poços produtores (óleo, gás, energia geotérmica e água), nos quais os contaminantes podem ser introduzidos durante a perfuração;
- poços mal construídos, com cimentações deficientes, e/ou com revestimentos corroídos, podem constituir-se em vias de contaminação entre aquíferos;
- poços escavados (tipo amazonas), abandonados, podem ser usados como receptores de lixo.

(F) Fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana:

- Interações entre água superficial e subterrânea (indução da água de um rio contaminado em um aquífero);
- Lixiviação natural (minerais dissolvidos de rochas e solos em níveis que podem atingir de 10 a 100 g/L de sólidos totais dissolvidos);
- Intrusão de água do mar em aquíferos costeiros (avanço regional e ascensão do cone de água salgada pela base das estruturas de captação).

3.2. COMPOSTOS NITROGENADOS E SAÚDE HUMANA

Segundo Moraes (2002), a grande crise da água, prevista para o ano de 2020, tem preocupado cientistas das diversas áreas no mundo inteiro, e o caminho que poderá conduzir ao caos hídrico já é trilhado, representando, dentre outros, sério problema de saúde pública. Entende-se que as necessidades de saúde da população são muito mais amplas do que as que podem ser satisfeitas com a garantia de cobertura dos serviços de saúde. Sua dimensão pode ser estimada quando se examinam, por exemplo, a precariedade do sistema de água e de esgotos sanitários e industriais; o uso abusivo de defensivos agrícolas; a inadequação das soluções utilizadas para o destino do lixo; a ausência ou insuficiência de medidas de proteção contra enchentes, erosão e desproteção dos mananciais; e os níveis de poluição e contaminação hídrica, atmosférica, do solo, do subsolo e alimentar.

A rápida urbanização concentrou populações de baixo poder aquisitivo em periferias carentes de serviços essenciais de saneamento. Isto contribuiu para gerar poluição concentrada, sérios problemas de drenagem agravados pela inadequada deposição de lixo, assoreamento dos corpos d'água e consequente diminuição das velocidades de escoamento das águas. Com o aumento da população humana e de sua tecnologia, impactos, como os seguintes, diversificaram-se: a) produção de efluentes domésticos; b) erosão seguida de alteração da paisagem pela agricultura, pela urbanização e pelo reflorestamento; c) alteração de canais de rios e margens de lagos (por meio de diques, canalização, drenagem e inundações de áreas alagáveis), e dragagem para navegação; d) super colheita de recursos biológicos; e e) proliferação de agentes químicos tóxicos específicos ou não (MORAES, 2002).

Segundo Bovolato (2015), existem diferenças entre doenças de transmissão hídrica e doenças de origem hídrica:

- As doenças de transmissão hídrica são as transmitidas por águas contaminadas por agentes patogênicos que chegam às águas por dejetos humanos ou de outros animais, contaminados. Protozoários, vírus, bactérias e helmintos são agentes infecciosos que podem ser transmitidos pela água e causar doenças gastrointestinais.
- As doenças de origem hídrica ocorrem a partir da presença de substâncias químicas em águas que apresentam níveis acima dos estabelecidos pelo Ministério da Saúde.

As atividades agrícolas são consideradas potenciais fontes de contaminação por nitrato das águas subterrâneas devido ao maior uso de fertilizantes nitrogenados nas culturas/plantios. Segundo Feitosa (2008), os três principais nutrientes exigidos pelas culturas são: nitrogênio (N),

potássio (K) e fósforo (P). As quantidades anuais aplicadas desses elementos variam muito de um lugar para outro, de acordo com as colheitas. Para o nitrogênio, as aplicações variam na faixa de 100 a 500 kg/ha.ano. Como os fertilizantes são usados todos os anos, é de se esperar que em muitas áreas os excessos se infiltrem e alcancem o nível freático contaminando os aquíferos.

Dentre os fertilizantes, o principal contaminante é o nitrogênio (N) na forma de nitrato (NO_3^-). O nitrato move-se com a água subterrânea e pode atingir extensas áreas. Concentrações superiores aos limites permissíveis para água potável são encontradas em muitas regiões agrícolas do mundo. Em áreas onde existem componentes verticais de fluxo, a contaminação por nitrato pode atingir grandes profundidades (Feitosa, 2008). O nitrato ocorre naturalmente em solo contendo nitrogênio, fixação de bactérias, plantas em decomposição, efluentes (residenciais, industriais) e estrume animal. Outras fontes de nitrato incluem fertilizantes nitrogenados e compostos de nitrogênio emitidos pelas indústrias de automóveis. O nitrato penetra no solo e permanece nas águas subterrâneas durante décadas.

Segundo Feitosa (2008), o nitrogênio dissolvido na forma de íon nitrato (NO_3^-) é o contaminante mais comum encontrado na água subterrânea. A sua presença em concentrações excessivas é cada dia maior e está se ampliando e ameaçando muitos sistemas aquíferos em muitas partes do mundo. Isto é consequência das atividades agrícolas e do lançamento indiscriminado de esgotos sobre e abaixo da superfície do solo. Além da forma iônica de nitrato, que é a principal, o nitrogênio também ocorre na forma de amônio (NH_4^+), amônia (NH_3), nitrito (NO_2^-), nitrogênio gasoso (N_2), óxido nitroso (N_2O) e nitrogênio orgânico (N), ou seja, aquele existente nas substâncias orgânicas.

Fertilizantes minerais, esgotos e resíduos de plantas encontrados na superfície do solo, no próprio solo ou em zonas pouco profundas do subsolo, são as principais fontes diretas do nitrato presente nas águas subterrâneas. O nitrato também pode ser gerado por fontes indiretas, isto é, por conversão do nitrogênio orgânico (N) através de dois processos:

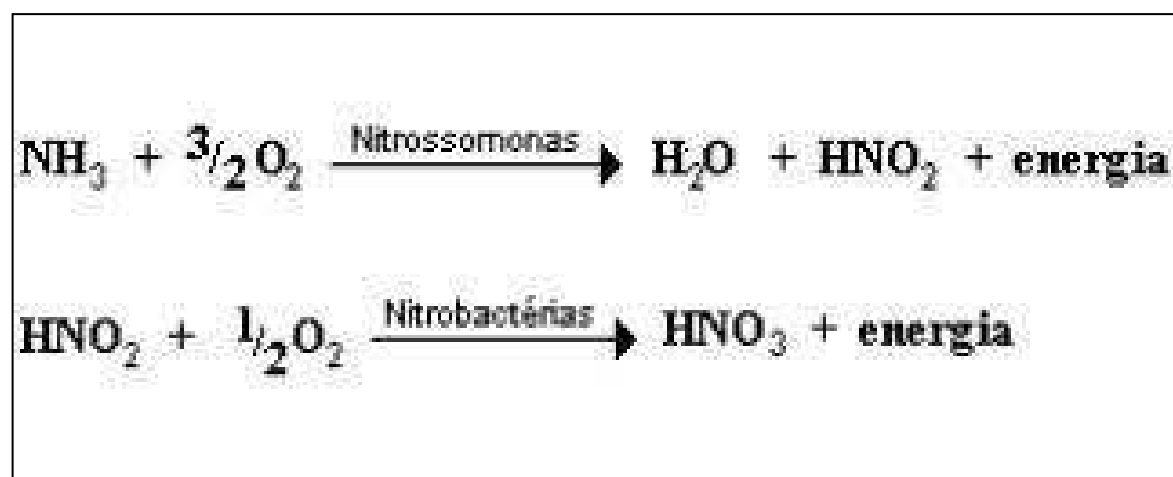
- amonificação, pelo qual o N é convertido em amônio (NH_4^+); e
- nitrificação, pelo qual o amônio (NH_4^+) é transformado em nitrito (NO_2^-) e daí em nitrato (NO_3^-).

Ainda, de acordo com Feitosa (2008) devido à sua forma aniônica, o NO_3^- move-se na água subterrânea praticamente sem retardamento, motivo pelo qual pode ser considerado como a forma estável do nitrogênio dissolvido. Isto acontece, principalmente, em ambientes fortemente oxidantes, como é o caso das águas subterrâneas muito pouco profundas, em sedimentos de alta

permeabilidade ou em rochas fraturadas, que possuem altos teores de oxigênio gasoso (O_2) dissolvido.

Existem duas formas isotópicas do nitrogênio: ^{14}N e ^{15}N , das quais o ^{14}N é o mais abundante na atmosfera. A abundância relativa do ^{15}N , isto é, a razão isotópica $^{15}N/^{14}N$, em nitrato, pode ser utilizada para distinguir o nitrato proveniente de dejetos humanos e animais do nitrato oriundo de fertilizantes minerais (FEITOSA, 2008).

Figura 1. Equações da oxidação de amônia a nitrito e a nitrato, sob atuação bacteriana.



Fonte: Crespim (2017, apud FERNANDES, 1997).

Segundo Bouchard (1992), a contaminação por compostos nitrogenados pode causar uma série de problemas de saúde como a metahemoglobinemia, uma doença caracterizada como uma síndrome clínica que se manifesta a partir de altas taxas de concentração de metemoglobina no sangue. Estas taxas altas têm como consequência a ocorrência de cianose, comumente conhecida como “síndrome do bebê azul”, assim chamada por ocorrer em crianças jovens. Os nitratos ingeridos pelo organismo são convertidos a nitritos (no estômago ou na saliva) ou absorvidos. Os nitritos podem resultar em seguida, a formação de metehemoglobina ou N-nitrosos. Se o nitrito for ingerido diretamente, pode ocasionar metahemoglobinemia independente da faixa etária do consumidor. Há registros de metahemoglobinemia tanto na forma congênita quanto na forma adquirida, porém, considera-se que casos adquiridos são mais comuns que os de origem congênita.

Além do consumo de água (que contribui com uma estimativa de 3 a 21%), a contaminação por nitrato se dá através da ingestão de outras fontes como legumes, carne e produtos à base de carne conservados com nitrito de sódio. Um dos principais fatores que

justificam a contaminação por nitrato através do consumo de água é a construção desordenada e sem critérios técnicos de poços rasos, que estão mais suscetíveis à contaminação antrópica (esgoto, áreas agrícolas). Geralmente, os poços privados são menos profundos e mais próximos das fontes de contaminação, considerando que os poços para abastecimento público são mais profundos e construídos para captação de aquíferos de águas onde a contaminação é menos provável (MANASSARAM, 2007).

Segundo Manassaram (2007), a toxicidade do nitrato está relacionada principalmente a sua conversão em nitrito. O perigo para a saúde humana pelo consumo de água com nitrato está relacionado à sua capacidade de oxidar diretamente a hemoglobina, alterando para a metahemoglobina. A acumulação de metahemoglobina (hemoglobinemia) ocorre se o processo de oxidação supera a capacidade de redução protetora das células. O padrão de uso de nitratos na água potável é baseado em estudos retrospectivos e leva em conta níveis que protegem os bebês contra a metemoglobinemia, porém nenhum fator de segurança foi construído a partir desse padrão, sendo que os níveis atuais foram construídos e exigidos apenas para os sistemas públicos de distribuição de água.

3.3. NORMAS DE POTABILIDADE

Segundo Freitas (2013), a qualidade da água é definida por sua composição e pelo conhecimento dos efeitos que podem causar seus constituintes. O conjunto destes constituintes permite que se estabeleçam padrões de qualidade, classificando-os, de acordo com seus usos (consumo humano, dessedentação animal, irrigação, industrial, piscicultura, aquicultura, recreação e urbano). A disponibilidade dos recursos subterrâneos para determinado tipo de uso depende, fundamentalmente, da qualidade físico-química e bacteriológica da água.

Físico-química: analisa o grau de presença de substâncias químicas na água bem como suas características organolépticas.

Microbiológica: detecta a presença de microrganismos. As análises bacteriológicas têm como foco principal a identificação de *Escherichia coli*, principal indicador de contaminação e de bactérias que fazem parte do grupo de coliformes totais.

No Brasil, o padrão de qualidade da água destinada ao consumo humano é definido pela Portaria nº 2.914/11 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011). Esta Portaria visa à proteção da saúde pública e o controle de substâncias potencialmente prejudiciais à saúde, como microrganismos patogênicos, substâncias tóxicas ou venenosas e elementos radioativos, aplica à água

destinada ao consumo humano proveniente de sistema e solução alternativa, coletiva ou individual de abastecimento de água. Os parâmetros são dispostos com seus respectivos valores máximos permitidos (VMP).

Quadro 1 - Padrões estabelecidos pela Portaria nº 2.914/11 do Ministério da Saúde.

PARÂMETROS	UNIDADE	PORTARIA 2.914/11	
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E ORGANOLÉPTICAS			
Cor	Pt/L	5	
Odor	-	Não objetável	
Sabor	-	Não objetável	
Turbidez	UNT	5	
Temperatura	°C	-	
pH	-	6,0 - 9,5	
PARÂMETROS QUÍMICOS INORGÂNICOS			
Arsênio	mg/L	0,01	
Bário		0,7	
Cádmio		0,005	
Chumbo		0,01	
Cromo		0,05	
Fluoretos		1,5	
Mercúrio		0,001	
N-NO ₃		10	
Nitritos		1	
Selênio		0,01	
PARÂMETROS QUÍMICOS QUE AFETAM A QUALIDADE ORGANOLÉPTICA			
Alumínio	mg/L	0,2	
Surfactante		0,5	
Cloretos		250	
Cobre		2	
Dureza total		500	
Ferro total		0,3	
Manganês		0,1	
Sódio		200	
STD		1000	
Sulfatos		250	
Sulfeto de H		0,1	
Zinco		5	
<i>Escherichia coli</i>		nº/100 ml	0
Coliformes totais			0

Fonte: Brasil (2011).

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GERAL

Caracterizar a qualidade e classificar o tipo químico das águas subterrâneas do aquífero livre Barreiras identificando os principais contaminantes e os potenciais riscos de contaminação do aquífero e associando estas informações aos riscos para a saúde pública. Os resultados serão mostrados em bases temáticas e da integração e discussão dos dados hidrogeológicos adquiridos.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a qualidade das águas subterrâneas rasas, por meio de caracterização bacteriológica e físico-química, hipoteticamente poluídas por atividades antrópicas;
- Mapear as possíveis fontes de contaminação presentes na sede municipal de Benevides;
- Elaborar diagramas, histogramas, mapas de isovalores e gráficos para integração, interpretação e discussão dos dados hidrogeológicos adquiridos;
- Comparar os resultados físico-químicos e bacteriológicos das amostras de águas com as determinações da Portaria 2.914/11 do Ministério da Saúde;
- Definir a classificação iônica das águas, classificação de potabilidade e uso das águas para consumo humano e industrial;
- Definir mapa de vulnerabilidade à poluição do aquífero livre Barreiras, através do método GOD;
- Definir o sentido de fluxo, recarga e descarga através da elaboração de mapa de potenciometria hidráulica das águas subterrâneas rasas do aquífero Barreiras;
- Avaliar as variações sazonais dos componentes nitrogenados nas águas subterrâneas rasas, durante o ano de 2017;
- Analisar os efeitos da sazonalidade pluvial nas águas subterrâneas rasas;
- Realizar coleta de água para análise química *in situ* (sonda oakton 600 series waterproof portable meter kit) e em laboratório (Instituto Evandro Chagas);

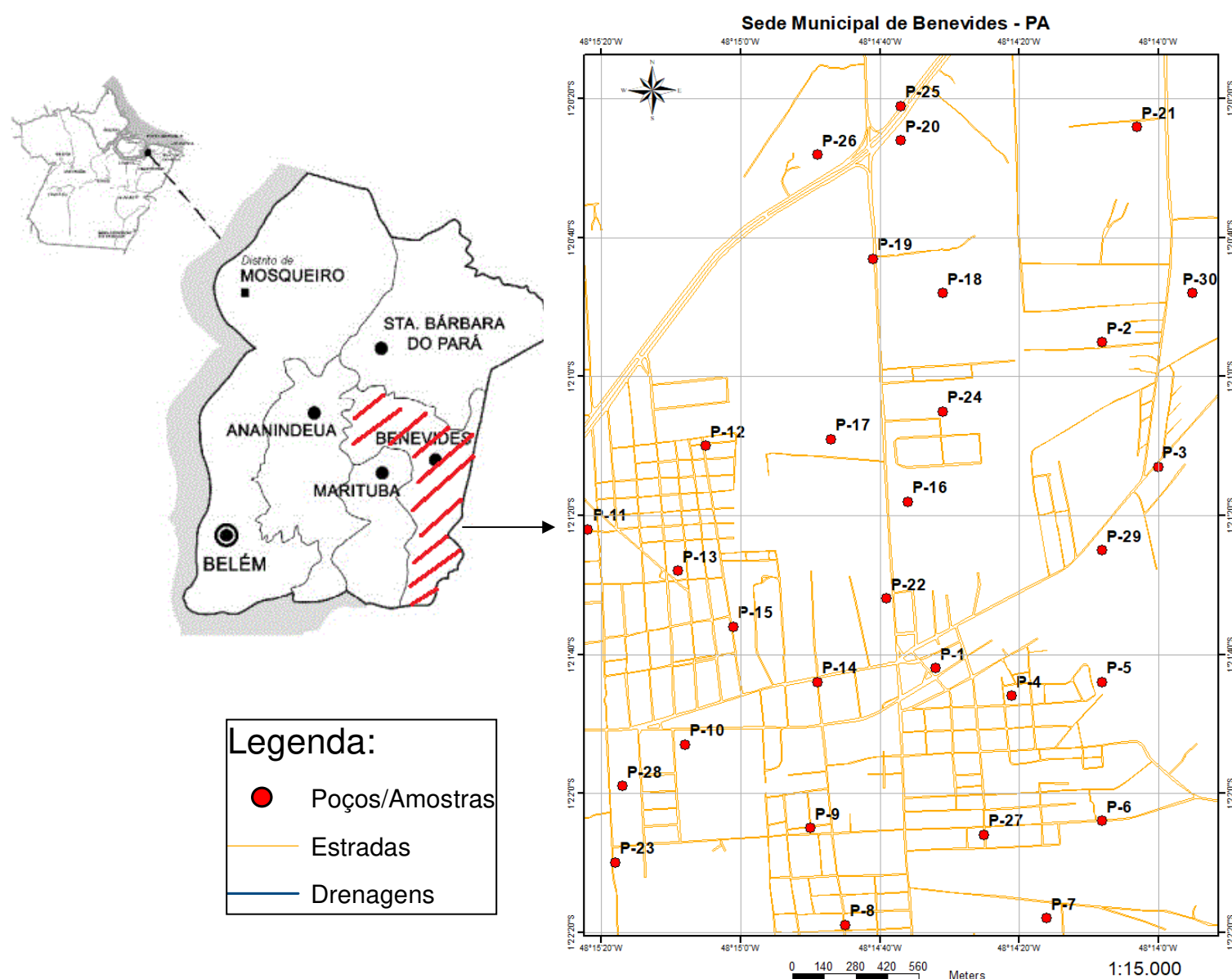
- Cadastrar e georreferenciar poços para estabelecer uma configuração espacial que possibilite uma melhor distribuição entre as amostras;
- Ampliar o número de poços do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e contornar problemas relacionados à acessibilidade na área de estudo;

5. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.1. LOCALIZAÇÃO

A área de estudo situa-se na sede municipal de Benevides (entre os meridianos 48°15'20" WGr a 48°14'0" WGr e paralelos 1°21'0" S a 01°22'40" S) onde residem 57.393 habitantes (IBGE, 2014). O município (Figura 1) faz fronteira com os municípios de Marituba, Ananindeua e Santa Isabel do Pará, se estende por 187,8 km² e a densidade demográfica é de 275,1 habitantes por km². Situado a 21 metros de altitude, suas coordenadas geográficas são: 1° 21' 41" S e 48° 14' 43" W.

Figura 2. Localização da área de pesquisa.



Fonte: Google Maps.

5.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

O município de Benevides foi criado em 29 de dezembro de 1961. Seu território pertenceu ao município de Belém e hoje faz parte da Região Metropolitana de Belém. As origens de Benevides são encontradas na política administrativa, ainda no tempo do Império, com sua formação datada de 13 de junho de 1875, com a criação da Colônia de Benevides, com a finalidade de colonizar a então Zona Bragantina, criando núcleos agrícolas, tendo sido o primeiro núcleo colonial da antiga Estrada de Ferro de Bragança, extinta no ano 1964 por determinação

do Governo Federal. Benevides possui um papel histórico relevante, sendo conhecido como a "O berço da Liberdade", visto ter sido a cidade pioneira do Estado do Pará a libertar escravos e a segunda do Brasil. Atualmente o município, devido aos incentivos fiscais, vem apresentando crescimento na área industrial com destaque para a indústria do beneficiamento do açaí, a implantação de uma grande indústria de bebidas e uma fábrica de tintas.

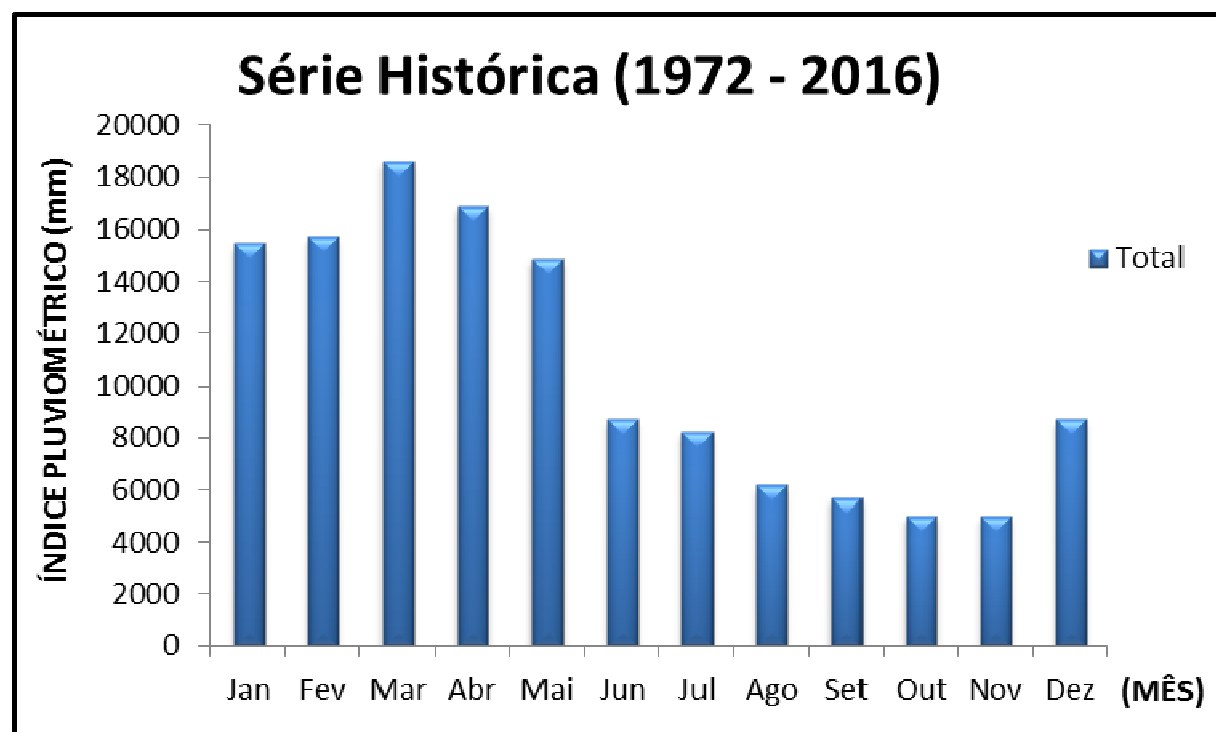
5.3. CLIMA

O clima predominante na área de pesquisa é o equatorial (classificação climática de *Köppen-Geiger: Af*), caracterizado por ser quente e úmido apresentando temperatura elevada durante todo o ano (média de 26°C) e pequena amplitude térmica, como em toda a região nordeste do Pará. Possui sazonalidade bem definida, com período seco entre os meses de julho a novembro (verão) e uma estação chuvosa nos meses de janeiro a junho (inverno). Os meses mais quentes ocorrem no intervalo de setembro a dezembro, com a média da temperatura máxima de 32°C. Possui regime pluviométrico elevado de, aproximadamente, 2.500 mm/ano. A umidade relativa é próxima de 85%.

5.4. BALANÇO HÍDRICO

Para a caracterização do balanço hídrico foram utilizados dados mensais e anuais de precipitação pluviométrica, referentes ao período de 1972 a 2016, obtidos na estação da Rede Hidrometeorológica Nacional (ANA/CPRM) na cidade de Santa Isabel do Pará. Esta estação dista 11 km em linha reta da sede municipal de Benevides.

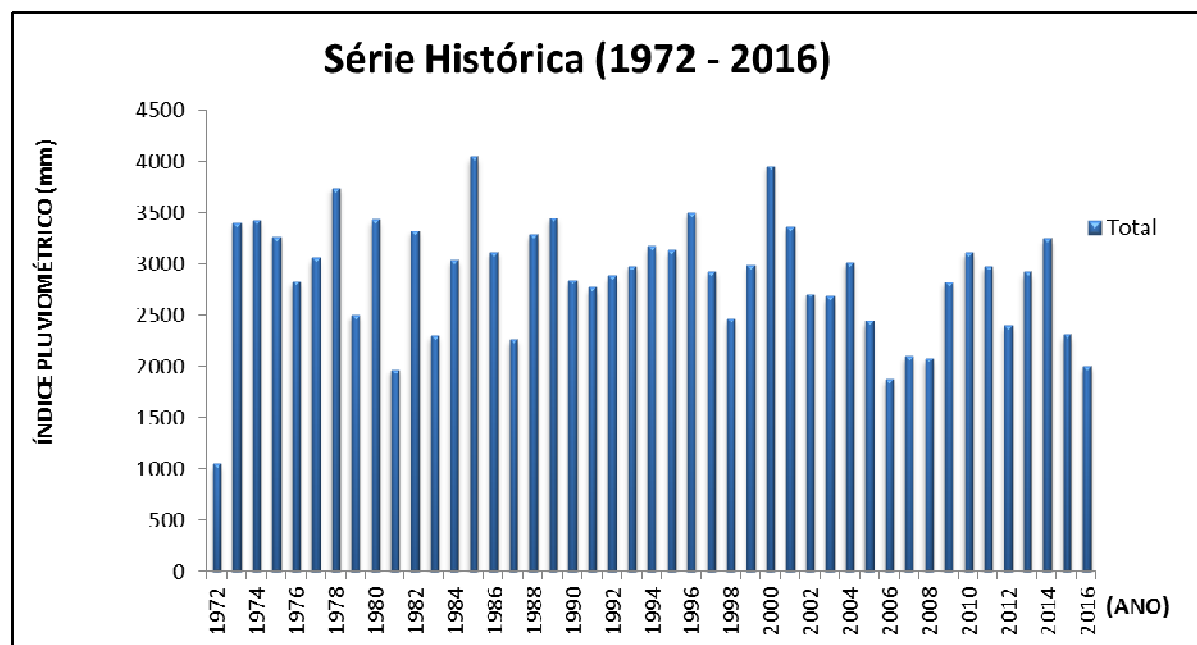
Figura 3. Distribuição média mensal da precipitação pluviométrica. Rede Hidrometeorológica Nacional (1972-2016).



Fonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Através da análise da série histórica, é possível observar os efeitos da sazonalidade durante o ciclo hidrológico. O período mais chuvoso foi de janeiro a maio (verão amazônico), enquanto que o período de maior estiagem se estende de junho a dezembro (verão amazônico), com déficit de água nos meses de agosto a novembro. O mês com maior média de índice pluviométrico é março (19.000 mm/mês) e o mês com menor média de índice pluviométrico é novembro (4.000 mm/mês). A ocorrência de chuva durante todo o ano condiciona o tipo de vegetação conhecida como floresta tropical úmida, visto que o mês de menor cota pluviométrica é superior a 30 mm.

Figura 4. Distribuição anual da precipitação pluviométrica. Rede Hidrometeorológica Nacional (1972-2016).



Fonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

Para o período de 1972 a 2016, a média anual de índice pluviométrico foi de 2.800 mm, com uma variação máxima em torno de 1.500 mm e mínima de 100 mm, de ano em ano. O ano com menor índice pluviométrico foi 2006 com índice pluviométrico de 1.750 mm/ano. Já o ano com maior ocorrência de chuva foi 1985 com, aproximadamente, 4.100 mm/ano.

5.5. GEOMORFOLOGIA, VEGETAÇÃO E SOLO

O contexto ambiental é composto por elevado índice pluviométrico, relevo plano a suavemente ondulado e solos predominantemente arenosos com expressivas taxas de infiltração.

A topografia do município caracteriza-se por apresentar uma altimetria de cotas baixas e de variação inexpressiva, sendo a altitude, na sede municipal, em torno de 45 metros, enquanto que as partes mais elevadas chegam a atingir 57 metros.

Os solos do município são representados, em sua maior parte, em associações pelo Concrecionário Laterítico (indiscriminado distrófico e textura indiscriminada) e pelo Latossolo Amarelo (distrófico e textura média). Outras ocorrências menores são o Latossolo Amarelo (distrófico e textura argilosa) e Grey húmico (distrófico e textura argilosa).

A vegetação da área é representada, predominantemente, pela floresta secundária, proveniente da remoção da cobertura florestal primária (floresta densa dos baixos platôs, para a implantação de cultivo de subsistência e implantação de pastagens artificiais). Ao longo das margens dos rios encontram-se, ainda, preservadas: a mata de galeria, a floresta de várzea e, no baixo curso do rio Tauá, a floresta de mangue.

5.6. HIDROGRAFIA

No que se refere aos aspectos hidrográficos, o rio mais importante é o Guamá, que limita ao sul com os municípios de Acará e Bujaru; o rio Guajará, seu afluente pela margem direita, é o limite natural a sudeste com Santa Isabel do Pará e o igarapé Oriboquinha, que também é afluente pela margem direita, fazendo limite parcial com Ananindeua a sudoeste. À oeste encontra-se o rio Benfica e o furo do Mutum, que fazem limite com Ananindeua e recebem diversos furos e igarapés tais como: furo da Fumaça, do Rocha, Sirituba e os igarapés Mutuí, Itapepucu, Tucunarequara, Maritubinha, entre outros. À noroeste, fazendo limite com Belém, encontra-se o furo de Mosqueiro ou das Marinhas que recebe rios como: rio Paricatuba, Santa Bárbara, Araci e o Tauá, este último limitando o município ao norte com Santo Antônio do Tauá.

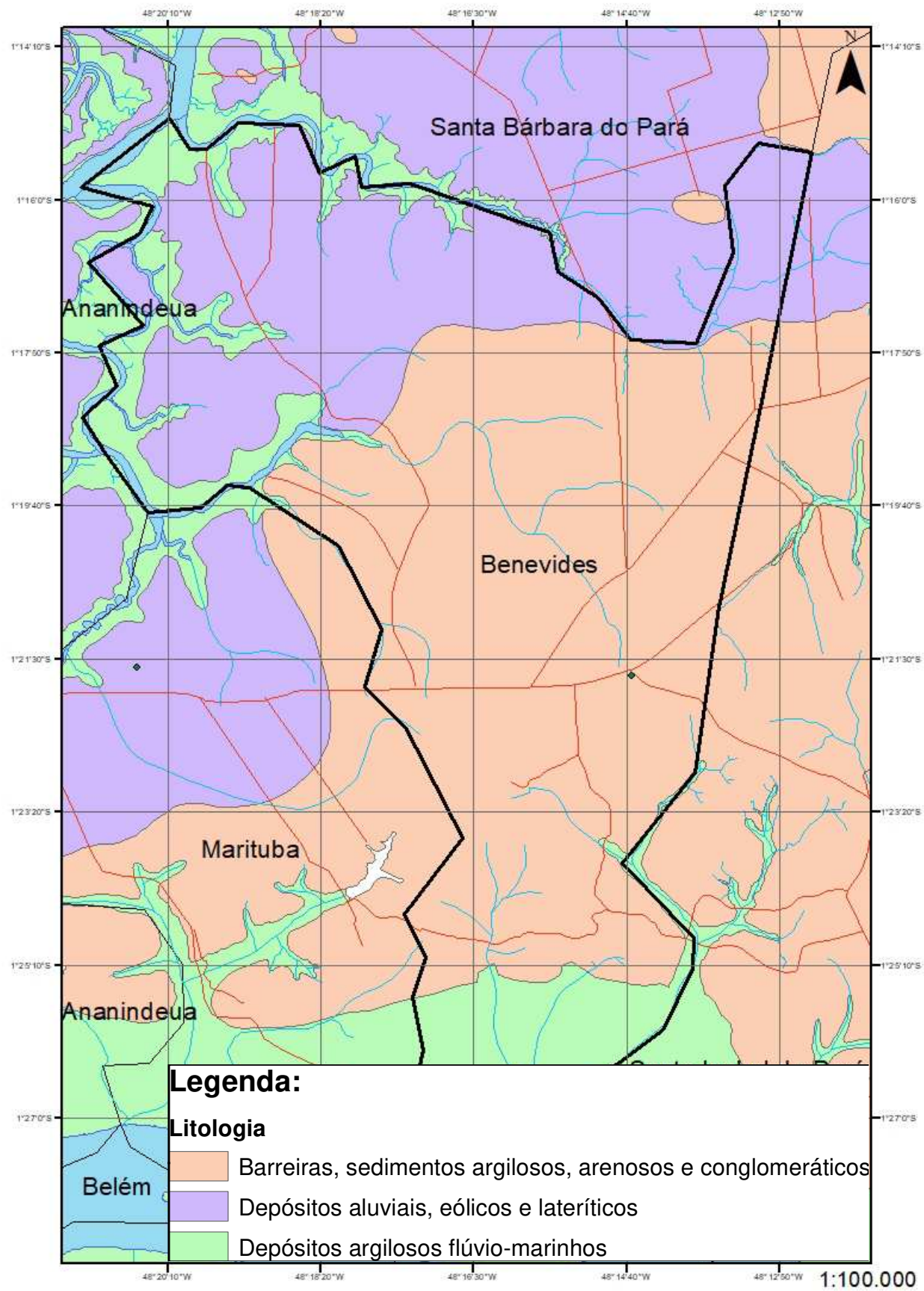
6. GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA REGIONAL

A geologia da região Nordeste do Pará, onde a área de estudo está inserida, é representada por unidades Cenozóicas, do Mioceno Inferior ao Quaternário Recente, composta pelos Sedimentos Recentes, Pós-Barreiras e pelo Grupo Barreiras, que recobrem irregularmente a Formação Pirabas. Segundo Araújo (1998), a geologia regional do município de Benevides é definida por unidades litológicas de idade paleozóica que englobam rochas provenientes de sedimentação marinha da Formação Pirabas e rochas de sedimentação continental e transicional do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras. Estas formações ocorrem por toda a zona litorânea e nordeste paraense, assim como na Região Metropolitana de Belém.

Os sistemas aquíferos explorados pertencem a duas unidades litoestratigráficas de distribuição regional. A superior é o Grupo Barreiras e a inferior é a Formação Pirabas, em profundidades em média a partir de, aproximadamente, 70 metros. Esses aquíferos, quando livres, apresentam elevada tendência à contaminação, principalmente por agrotóxicos e fertilizantes, nas áreas rurais, e por postos de combustível, fossas, efluentes domésticos e industriais, em zonas urbanas, devido sua composição litológica e a sua proximidade da superfície, potencializados pela alta pluviosidade regional (ARAÚJO, 2001).

O projeto de construção de poços tubulares deve considerar o aquífero Pirabas como fonte de exploração prioritária de água subterrânea, visto que este possui maiores vazões e não necessita de grandes investimentos em tratamento de água se comparado ao aquífero Barreiras, pois a qualidade da água se enquadra nos parâmetros de potabilidade do Ministério da Saúde.

Figura 5. Mapa geológico do município de Benevides – PA.



Fonte: Folha Belém 1:100.000 – CPRM – Serviço Geológico.

6.1. SEDIMENTOS RECENTES E FORMAÇÃO PÓS-BARREIRAS

Os Sedimentos Recentes ocorrem ao longo das planícies fluviais, situados nos vales dos rios e igarapés, possuem composição argilosa de coloração cinza esbranquiçada, com leves manchas avermelhadas e amareladas devido à oxidação de ferro.

A Formação Pós-Barreiras é representada, predominantemente, por sedimentos inconsolidados e arenosos alaranjados, amarelados a brancos, formados pela desestruturação do Grupo Barreiras.

Os Sedimentos Recentes e do Pós-Barreiras constituem aquíferos livres, com espessuras que atingem até um pouco mais de 20 metros. As suas características hidrodinâmicas indicam capacidade específica de 2,4 m³/h/m com 8 horas de bombeamento contínuo, para um poço que capta um aquífero de 7 a 16 metros de profundidade (ARAÚJO, 2016).

6.2. GRUPO BARREIRAS

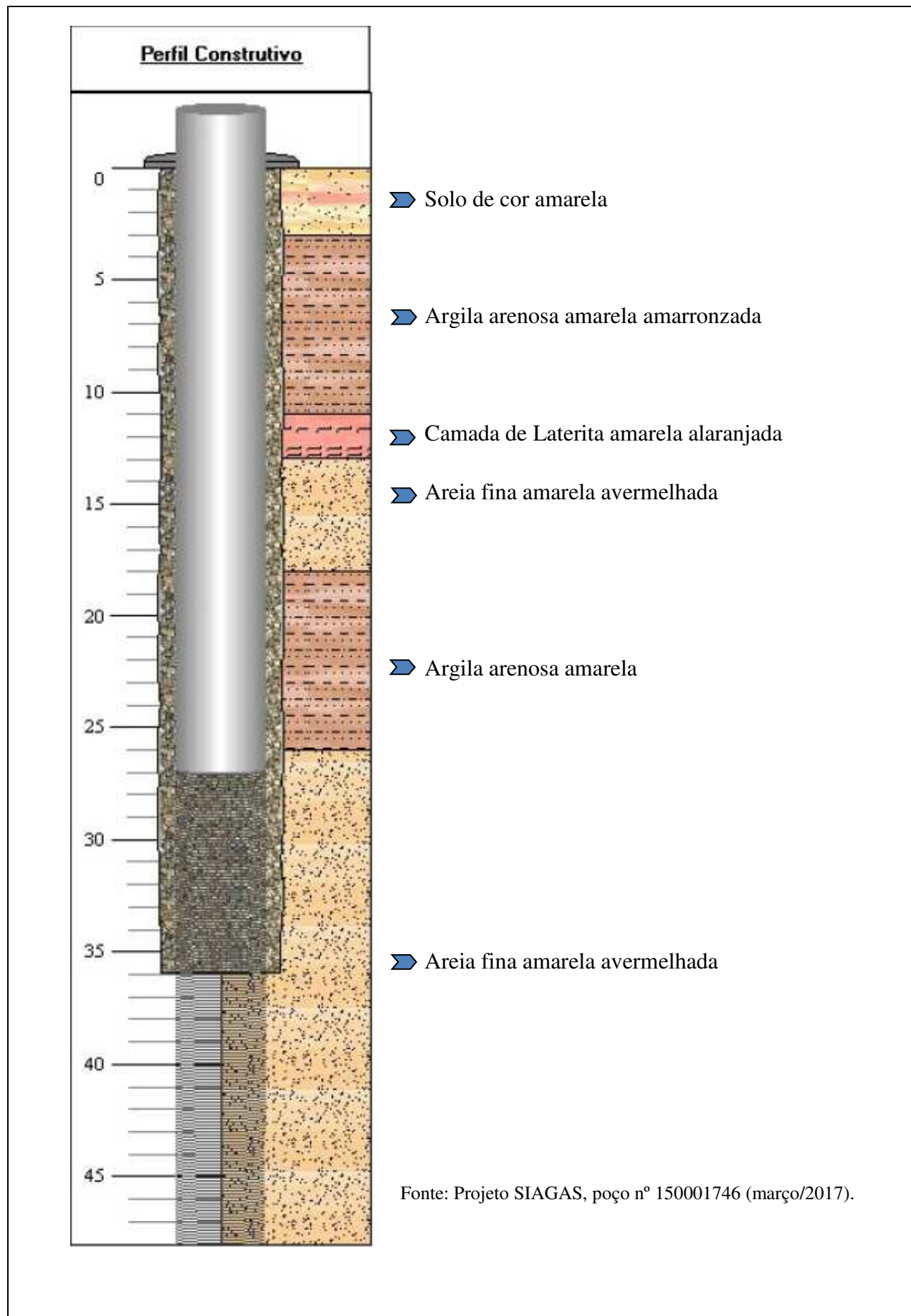
O Grupo Barreiras é constituído por uma cobertura sedimentar continental, depositada por sistemas fluviais entrelaçados, associados a leques aluviais, planícies de areia, planícies de lama, sendo provável a influência de marés (ROSSETTI, 1989). O termo “Barreiras” é utilizado com conotação fisiográfica para designar sedimentos cenozóicos terrígenos, que formam falésias em certos trechos do litoral que se estende do Rio de Janeiro ao Amazonas. O Grupo Barreiras é constituído por uma sequência mais superficial, sedimentar siliciclástica, variando desde argilas multicoloridas e sedimentos inconsolidados argilo-arenosos e areno-argilosos, geralmente nas cores amareladas, avermelhadas e acinzentadas, às vezes com leitos de material conglomerático e também, frequentemente com níveis descontínuos de um arenito ferruginoso (Grês do Pará) em blocos soltos, irregulares e de tamanhos variados. Segundo Araújo (2016), o nível estático dos aquíferos do Grupo Barreiras varia de 0,80 até 24 metros. Poços captando águas desses aquíferos apresentam capacidade específica de 02 m³/h/m, para um tempo de bombeamento de 4 a 8 horas e até 17 m³/h/m para 24 horas de bombeamento.

Os teores altos de ferro, típicos do sistema Barreiras, acarretam diversos problemas, bastante conhecidos entre o meio técnico local: gosto metálico nas águas produzidas, manchas em roupas e manchas em instalações hidráulicas, incrustações nas bombas, nos filtros dos poços e nos materiais de revestimento, provocando diminuição de vazões e redução da vida útil dos poços (MATTA, 2002).

6.3. FORMAÇÃO PIRABAS

A Formação Pirabas, formada durante o Período Terciário, é um dos maiores aquíferos da região e é caracterizada pela presença de uma seção carbonática, sendo constituída por margas e calcários (micritos, bioclásticos, biohémicos e dolmicritos), com restos fósseis e moldes bem preservados, intercalados com argilas carbonáticas negras/cinza escuras a esverdeadas, folhelhos rítmicos, areias e arenitos calcíferos (“*beach rocks*”) e conglomerados oligomíticos. Segundo Ferreira (1982), a Formação Pirabas tem sua ocorrência sobre toda a Plataforma Continental Norte Brasileira, abrangendo todo o litoral do Estado do Pará. Estendendo-se também ao longo da Plataforma Maranhão, Piauí e Amapá. Suas melhores ocorrências em subsuperfície estão localizadas ao longo da faixa costeira do Pará (Salinópolis, Maracanã, São João de Pirabas, Ilha de Fortaleza, Curuça, por exemplo). Esta formação encontra-se sobreposta ao embasamento (rocha cristalina) e abaixo do Grupo Barreiras (Ferreira, 1982). Segundo Araújo (2016), o aquífero Pirabas, quando confinado, está posicionado entre 10 e 70 metros de profundidade, com relação ao nível do mar. Essas camadas aquíferas, quando confinadas, são separadas por argilitos, folhelhos e margas, razão pela qual são naturalmente pouco susceptíveis à contaminação de origem química e/ou biológica.

Figura 6. Perfil construtivo do poço representativo na área de estudo (Bairro Santos Dumont).



7. MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaborar e obter as informações e resultados desejados, foram necessárias basicamente três etapas de atividade: escritório, campo e análise de laboratório.

7.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico consistiu na pesquisa de dados relacionados ao tema deste estudo com o intuito de dar embasamento ao trabalho, como: contaminação de águas subterrâneas rasas, potabilidade de águas subterrâneas segundo a Portaria nº 2.914/11 do Ministério da Saúde, saneamento básico, saúde pública, dados socioeconômicos e informações da área de estudo e características físico-químicas das águas subterrâneas rasas.

7.2. SELEÇÃO DE POÇOS E UTILIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS SIAGAS/CPRM

O banco de dados que sustenta essa pesquisa teve como base as informações de 215 poços no município de Benevides – PA (março/2017), cadastramento efetivado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), através do projeto Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, captando águas do aquífero livre Barreiras.

Além disso, foi executado o reconhecimento da área de estudo que resultou no cadastro de 43 poços novos através de trabalho de campo e realizada a coleta de amostras de água e informações através da execução de trabalhos de campo periódicos, com o objetivo de adensar e refinar as informações já existentes. Deste cadastro inicial, foram selecionados na área de interesse 30 poços tubulares com informações e dados consistentes de cotas topográficas, coordenadas geográficas, medidas de nível estático e nível dinâmico, perfis litológicos, análises químicas, vazões de estabilização, carga hidráulica e profundidade dos poços (Quadro 1).

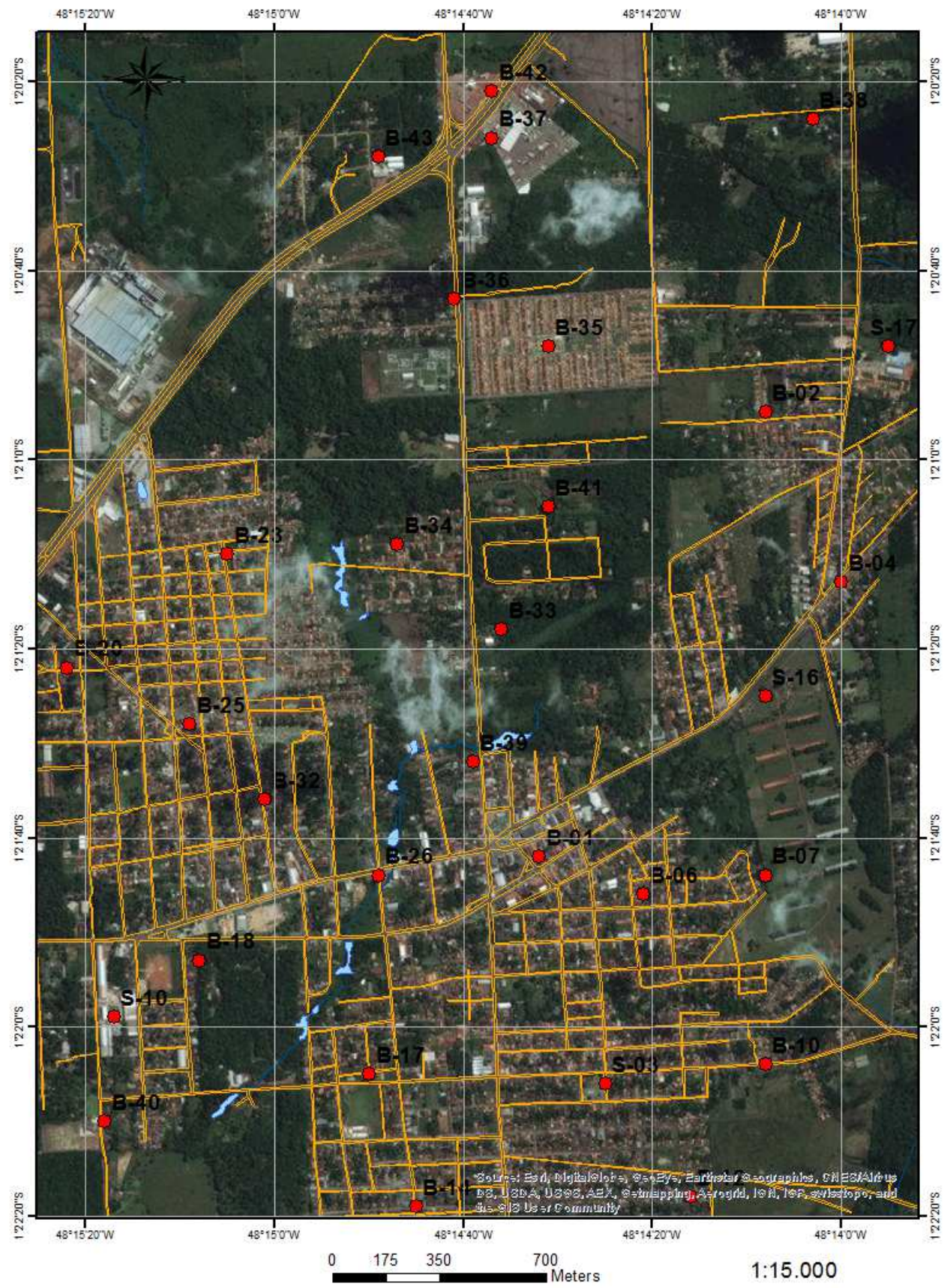
A realização de coletas e análises foi feita nestes 30 poços, sendo 15 poços para abastecimento público (Sistema de Água e Esgoto de Benevides - SAEBE), oito poços residenciais, seis poços industriais e um poço tubular utilizado em uma creche municipal de educação infantil. A seleção dos poços foi feita de acordo com a facilidade de acesso e distribuição na área de pesquisa.

Quadro 2. Poços/amostras na área de pesquisa.

Amostra	Nº SIAGAS	Localidade	LAT.	LONG.	Prof. (m)	Fonte
B-01	150008146	SAEBE/SEDE	1°21'42"	48°14'32"	48	CAMPO
B-02	150008147	SAEBE/MAGUARY	1°20'55"	48°14'08"	42	CAMPO
B-04	150008149	SAEBE/PÇ. JARDIM DE PARIS	1°21'13"	48°14'00"	48	CAMPO
B-06	150008151	SAEBE/E.M.E.F. PIRILAMPO	1°21'46"	48°14'21"	48	CAMPO
B-07	150008152	SAEBE/RUA SENADOR LEMOS	1°21'44"	48°14'08"	42	CAMPO
B-10	150008155	SAEBE/PERIMETRAL SUL	1°22'04"	48°14'08"	42	CAMPO
B-12	150008157	SAEBE/MADRE TEREZA	1°22'18"	48°14'16"	42	CAMPO
B-14	150008158	SAEBE/UNIDADE SAÚDE FLORES	1°22'19"	48°14'45"	60	CAMPO
B-17	150008161	SAEBE/ESCOLA ALICE FANJAS	1°22'05"	48°14'50"	42	CAMPO
B-18	150001748	SAEBE/BEGOLÂNDIA	1°21'56"	48°15'09"	30	SIAGAS
B-20	150001752	SAEBE/SANTA ROSA	1°21'21"	48°15'24"	42	SIAGAS
B-23	150008165	SAEBE/RUA ALACIDE NUNES	1°21'10"	48°15'05"	36	CAMPO
B-25	150001751	SAEBE/MÉDICE II	1°21'30"	48°15'08"	36	SIAGAS
B-26	150008167	SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL	1°21'44"	48°14'49"	48	CAMPO
B-32	150007813	MERCADINHO DO CURIÓ	1°21'36"	48°15'01"	24	CAMPO
B-33	150008172	FÁBRICA DE DOCES E GELÉIAS	1°21'18"	48°14'36"	45	CAMPO
B-34	150008173	CONDOMÍNIO BELO JARDIM 1 (Manoel)	1°21'09"	48°14'47"	18	CAMPO
B-35	150008174	CRECHE JARDIM DAS JURUTIS	1°20'48"	48°14'31"	40	CAMPO
B-36	150008175	COM. NOSSA SENHORA DO CARMO	1°20'43"	48°14'41"	24	CAMPO
B-37	150008176	RESTAURANTE O JAPONÊS	1°20'26"	48°14'37"	36	CAMPO
B-38	150008177	CHÁCARA FILHOS DO SOL	1°20'24"	48°14'03"	54	CAMPO
B-39	150008178	GARAGEM DA PREFEITURA	1°21'32"	48°14'39"	30	CAMPO
B-40	150008179	CLUB BARCELONA	1°22'10"	48°15'18"	60	CAMPO
B-41	150008180	CENTRO MARIÁPOLIS GLÓRIA	1°21'05"	48°14'31"	30	CAMPO
B-42	150008181	POSTO DE GASOLINA PETROBRÁS	1°20'21"	48°14'37"	30	CAMPO
B-43	150006146	ISO AMAZON FÁBRICA DE ISOPOR	1°20'28"	48°14'49"	60	CAMPO
S-03	150001746	SAEBE/SANTOS DUMONT	1°22'06"	48°14'25"	48	SIAGAS
S-10	150005965	VELOZ QUÍMICA LTDA.	1°21'59"	48°15'17"	32	SIAGAS
S-16	150007091	FAZENDA Y WATANABE	1°21'25"	48°14'08"	24	SIAGAS
S-17	150007288	BENEVIDES INDÚSTRIA DE PISCINAS	1°20'48"	48°13'55"	30	SIAGAS

Fonte: Projeto SIAGAS (março/2017).

Figura 7. Localização geográfica dos poços cadastrados na área de pesquisa.



Fonte: Do autor (2017).

7.3. TRABALHOS DE CAMPO E CADASTRAMENTO DE POÇOS

A primeira etapa de campo foi realizada com o objetivo de cadastrar novos poços na área de interesse para que o levantamento e espaçamento geográfico dos poços sejam o mais regular e homogêneo possível, de modo que não interfira nos resultados e na construção dos mapas temáticos, já que estes são gerados através da interpolação dos dados obtidos. Além disso, foi feito o controle de qualidade das informações e dados dos poços já existentes. A coleta das informações técnicas foi realizada em poços residenciais, particulares, públicos e industriais. Ao final desta etapa, foram cadastrados 43 novos poços, dos quais 23 serão utilizados neste trabalho e os outros sete são provenientes do banco de dados SIAGAS/CPRM.

Posteriormente, foram realizadas etapas de campo bimestrais (em períodos distintos, verão e inverno) para a coleta de amostras de água subterrânea rasa e realização de análise físico-química e bacteriológica, em laboratório. As etapas de campo foram executadas tanto nos períodos chuvosos, quanto nos de estiagem, objetivando avaliar possíveis efeitos de sazonalidade, durante um ciclo hidrológico, visando adquirir os parâmetros hidráulicos do aquífero livre, definir a potenciométrica e o sentido preferencial do fluxo das águas. As coletas foram realizadas nos meses de março, junho, agosto, outubro e dezembro. Todas as análises químicas foram realizadas no laboratório do Instituto Evandro Chagas.

Durante os trabalhos de campo foram medidos o nível estático, a altura, o diâmetro da boca do poço e a distância entre poços e fossas, sendo estas consideradas como fontes potenciais de contaminação, no local de estudo. Foi utilizado um frasco de 1.000 mL, devidamente ambientado, para a coleta de águas nos poços tubulares. Quando havia impossibilidade de retirada da água na boca do poço, as coletas foram feitas em torneiras mais próximas.

A coleta das amostras foi realizada em frascos de polipropileno de 1.000 mL previamente desinfetados, onde o recipiente foi lavado por várias vezes com a própria água do ponto amostrado, seguindo-se o acondicionamento em isopor à temperatura ambiente para conservação e envio do material amostrado para o laboratório do Instituto Evandro Chagas, em prazo de 24 a 48 horas após a realização da coleta. Cada amostra foi identificada através da ficha de campo com informações sobre: local, data, município, hora de coleta, interessado, pH, temperatura, condutividade elétrica.

Figura 8. Coleta de amostra de água em um dos poços na área de pesquisa.



Fonte: Do autor (2017).

7.4. ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS

Os trabalhos de escritório consistiram em: levantamento bibliográfico sobre a geologia local e regional da Bacia Sedimentar Amazônica e aquíferos regionais; produção e digitalização de mapas; organização e consistência dos dados disponíveis no projeto SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas); obtenção de dados preliminares; tratamento e análise das informações de poços já existentes (definição de padrões litológicos e hidrogeológicos, através da escolha de poços mais profundos e representativos, que sejam utilizados como referência), interpretação dos resultados; confecção de mapas temáticos em SIG (*ArcGIS 10.2* e *Surfer 10.0*) e redação final.

Para as análises físico químicas, foram realizadas medidas de alguns parâmetros in loco (pH, temperatura, resistividade, condutividade elétrica, salinidade, STD, DBO, OD, nível estático) através da sonda *oakton 600 series waterproof portable meter kit*, que foi previamente calibrada utilizando-se uma solução tampão (pH 7 a 25°C).

Para a elaboração de mapas de fluxo hídrico, isoteores/isovalores, foi utilizado o software *Surfer 10.0* (Golden Software). Para a confecção de mapas temáticos em SIG, foi utilizado o software *ArcGIS 10.2* (ESRI). O programa utilizado para a confecção de diagramas de Piper, análise/interpretação dos dados físico-químicos e representar a classificação das águas subterrâneas rasas coletadas foi o *QUALIGRAF 1.17* (FUNCEME). Além disso, para gerar os gráficos de variação sazonal dos parâmetros e organização dos dados, foi utilizado o *Microsoft Excel 2010*.

8. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS

Os resultados adquiridos em campo (através de sonda multiparamétrica) das análises das águas subterrâneas estudadas nos períodos chuvoso (Março/2017 e Dezembro/2017) e menos chuvoso (Junho/2017, Agosto/2017 e Outubro/2017) estão expostos nos Quadros 4, 5, 6, 7 e 8.

Os endereços dos poços estudados estão expressos a seguir (Quadro 3).

Quadro 3. Localização/endereço dos pontos de amostragem na sede municipal de Benevides – PA.

Nº POÇO	Localidade
P-1	SAEBE/SEDE
P-2	SAEBE/MAGUARY
P-3	SAEBE/PÇ. JARDIM DE PARIS
P-4	SAEBE/E.M.E.F. PIRILAMPO
P-5	SAEBE/RUA SENADOR LEMOS
P-6	SAEBE/PERIMETRAL SUL
P-7	SAEBE/MADRE TEREZA
P-8	SAEBE/UNIDADE SAÚDE FLORES
P-9	SAEBE/ESCOLA ALICE FANJAS
P-10	SAEBE/BEGOLÂNDIA
P-11	SAEBE/SANTA ROSA
P-12	SAEBE/RUA ALACIDE NUNES
P-13	SAEBE/MÉDICE II
P-14	SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL
P-15	MERCADINHO DO CURIÓ
P-16	FÁBRICA DE DOCES E GELÉIAS
P-17	CONDOMÍNIO BELO JARDIM 1 (Manoel)
P-18	CRECHE JARDIM DAS JURUTIS
P-19	COM. NOSSA SENHORA DO CARMO
P-20	RESTAURANTE O JAPONÊS
P-21	CHÁCARA FILHOS DO SOL
P-22	GARAGEM DA PREFEITURA
P-23	CLUB BARCELONA
P-24	CENTRO MARIÁPOLIS GLÓRIA
P-25	POSTO DE GASOLINA PETROBRÁS
P-26	ISO AMAZON FÁBRICA DE ISOPOR
P-27	SAEBE/SANTOS DUMONT
P-28	VELOZ QUÍMICA LTDA.
P-29	FAZENDA Y WATANABE
P-30	BENEVIDES INDÚSTRIA DE PISCINAS

Fonte: Do autor (2017).

Quadro 4. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período chuvoso (março/2017).

Nº POÇO	pH	T (°C)	NaCl (mg/L)	Condutividade (uS/cm)	Resistividade (KΩ)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
P-1	5.11	27.8	157.4	136.8	2723	2.87	183.7	73
P-2	5	27.3	87.24	74.16	5171	6.87	96.69	75.1
P-3	4.91	27.6	79.12	66.32	5718	3.18	87.63	84.7
P-4	4.84	24.6	123.7	106.4	4021	6.73	124.4	88.4
P-5	4.95	27.2	61.31	50.06	7680	6.92	65.22	82.4
P-6	4.76	27.3	130.2	111.6	3408	5.43	146.5	95.2
P-7	4.93	27	92.34	78.63	4910	4.32	102	81.3
P-8	5.32	26	60	50.45	8300	5.86	61.8	53.4
P-9	5.05	27.7	88.58	74.49	5046	2.15	99.36	75.6
P-10	5.11	28.3	102.2	87.28	4194	4.05	119.1	74.6
P-11	5.06	28.5	205.9	175.9	2133	5.51	234.1	83.9
P-12	4.84	28.5	239.4	205.5	1772	0.78	282	89.5
P-13	4.82	28.8	230.9	197.4	1825	4.54	274	92
P-14	4.93	28	89.85	76.65	4855	4.6	103.2	84.9
P-15	5.36	26.7	47.75	39.39	1056	5.29	48.65	65.5
P-16	5.23	26.4	47.12	37.39	1063	5.56	46.85	59
P-17	5.73	27.6	78.83	66	5735	6.87		20.8
P-18	5.2	28.1	40.45	30.67	1214	5.79	41.21	64.1
P-19	4.96	28.2	143	123.1	3003	5.4	166	81.1
P-20	4.95	28	71.27	52.58	6169	5.05	80.2	88.9
P-21	5.07	27.9	51.41	45.62	9318	3.41	61.34	71.7
P-22	4.86	29	73.03	61.14	5866	4.49	85.41	90.6
P-23	5.73	27.9	58.73	47.68	7919	4.41	63.14	42
P-24	5.26	26.2	47.6	37.67	1055	5.42	47.4	67
P-25	4.84	28.4	71.81	59.85	6107	5.99	67.95	90.4
P-26	5.01	27.5	101	85.73	4412	3.3	112.8	78.4
P-27	5.29	27.3	93.05	79.08	4813	3.47	103.7	71.2
P-28	5.2	27.6	52.07	41.45	9050	6.01	54.79	63.7
P-29	5.84	27.1	52.96	52.06	7409	4.69	67.48	19.9
P-30	4.86	28.2	163.3	141.3	2613	4.46	171.4	88.9

Fonte: Do autor (2017).

O nível estático dos poços de interesse foi obtido através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst Model 122*, e apresentou valores entre 0,8 e 12 metros (média de 3,75 metros). A coleta e medida de nível d'água foram realizadas em 15, 16 e 17 de março de 2017. Cabe ressaltar que em alguns poços não foi realizada a medida de nível d'água devido à utilização/bombeamento do poço ou pelo fato deste estar lacrado.

Quadro 5. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período chuvoso (dezembro/2017).

Nº POÇO	pH	T (°C)	NaCl (mg/L)	Condutividade (uS/cm)	Resistividade (KΩ)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
P-1	5.16	28.1	59.31	48.45	7.647	45.8	65.37	64.3
P-2	4.58	27.5	82.14	69.25	5.5	56.37	90.84	108.2
P-3	4.7	27.9	87.11	73.15	5.128	79.65	97.5	100
P-4	5.69	27.3	42.81	33.03	11.63	129.4	42.98	45
P-5	5.31	28.4	28.63	18.8	19.39	115	25.76	64.4
P-6	5.4	27.7	49.78	39.17	9.59	159.8	52.06	76.6
P-7	4.56	27.4	88.83	75.44	5.073	55	98.57	110.3
P-8	5.1	28.7	64.17	52.29	6.89	51	72.48	77.3
P-9	5.24	27.9	36.1	26.2	14.3	164.8	34.95	67.1
P-10	5.23	28.1	104.6	90.01	4.135	50.5	120.9	68.8
P-11	4.73	29.2	152.2	131.9	2.705	43	185	102.4
P-12	4.33	28.5	215.1	186.1	1.975	44.7	253.4	126.7
P-13	4.54	28.3	171.3	148.6	2.496	74.3	200.7	111.5
P-14	4.68	28.4	83.23	70.08	5.238	41.6	95.65	102
P-15	4.67	28.1	34.16	24.75	12.01	65.3	33.02	102.2
P-16	4.87	26.5	45.82	35.97	11.03	60.7	45.31	87.3
P-17	4.97	27.7	69.39	57.31	6.559	31.7	76.24	80
P-18	4.56	27.3	42.05	29.81	11.87	42.9	42.44	108.9
P-19	4.59	27.6	49.92	39.59	9.597	26.6	52.06	107.1
P-20	4.87	28.8	58.99	47.62	7.604	176.1	65.76	93.4
P-21	4.7	28.3	58.37	47.42	7.75	56.8	64.47	100.3
P-22	4.86	28.2	70.37	58.86	6.3	28.2	79.37	89.1
P-23	5.67	28.5	22.9	12.93	28.14	102.4	17.74	34.8
P-24	4.64	27.6	49.19	38.85	9.751	59.8	51.17	103.6
P-25	4.76	32.5	69.67	57.22	5.52	72.1	90.71	101.5
P-26	4.88	29.5	64.11	52.37	6.714	93.8	74.43	88.1
P-27	5.55	28	42.05	31.82	11.73	158.9	42.62	55.7
P-28	5.7	32.4	23.41	34.11	9.273	92.8	46.34	31.6
P-29	5.1	29.3	48.64	38.17	9.312	79.8	53.74	70.5
P-30	4.54	29.5	169.3	145.7	2.416	76.9	207.5	112.5

Fonte: Do autor (2017).

O nível estático dos poços de interesse foi obtido através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst Model 122*, e apresentou valores entre 1,4 e 20,4 metros (média de 5,22 metros). A coleta e medida de nível d'água foram realizadas em 6 e 7 de dezembro de 2017. Cabe ressaltar que em alguns poços não foi realizada a medida de nível d'água devido à utilização/bombeamento do poço ou pelo fato deste estar lacrado.

Quadro 6. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (junho/2017).

Nº POÇO	pH	T (°C)	NaCl (mg/L)	Condutividade (uS/cm)	Resistividade (KΩ)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
P-1	4.91	28	156.1	135.1	2734	2.02	182.9	84
P-2	4.88	27.5	89.45	75.84	5025	2.72	99.49	84.5
P-3	4.92	28	106.6	90.25	4140	2.63	120.8	84.5
P-4	4.87	28.4	151.5	130.8	2811	2.24	177.8	87.7
P-5	4.87	28.7	60.54	49.15	7396	2.3	67.6	87.5
P-6	4.85	27.7	123.6	105.8	3573	2.36	140	88.9
P-7	4.92	27.9	94.02	79.32	4730	2.36	105.7	83.4
P-8	5.11	27.8	63.12	52.54	7198	2.68	69.2	70.9
P-9	4.92	27.7	86.99	73.05	5135	2.74	97.36	83.9
P-10	4.89	27.9	95.06	81.21	4565	2.69	109.5	85.4
P-11	4.82	27.9	166.1	144.4	2578	2.71	194	91.3
P-12	4.84	28.4	221	190.8	1929	2.68	259.3	90.4
P-13	4.82	28.6	228.5	197	1863	2.59	268.6	91.8
P-14	5	28.4	95.25	81.06	4546	2.82	110	78.4
P-15	4.87	28.4	43	32.81	1114	2.25	44.86	75.4
P-16	5.05	26.8	47.4	37.2	1051	0.33	44.4	73.7
P-17	4.94	27.6	104.9	89.13	4225	2.04	118.3	83.2
P-18	5.12	29	46.1	35.56	1017	2.19	49.25	71
P-19	4.98	28	96.53	82.54	4491	2.3	111.3	78.8
P-20	4.85	29	62.65	51.22	6907	0.38	72.4	89
P-21	4.94	28	56.62	45.97	8064	0.56	62	81.6
P-22	4.78	28.1	70.95	33.13		0.29		95.4
P-23	5.33	27.5	43.6	33.8	1134	0.39	44.4	51.7
P-24	5.14	27.5	48.39	38.03	9966	2.05	50.19	68.6
P-25	4.96	29	85.16	70.99	5041	0.45	98.99	80.7
P-26	5	27.7	91	76.94	4925	0.62	101.7	78.2
P-27	4.87	27.6	94.01	79.56	4753	2.38	105.2	87.9
P-28	4.98	27.6	45.6	35.16	1063	0.36	46.98	78.5
P-29	5.41	29	65.96	54.18	6504	2.05	76.87	47.3
P-30	4.95	29	173.7	148.3	2336	0.35	214.1	82.6

Fonte: Do autor (2017).

O nível estático dos poços de interesse foi obtido através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst Model 122*, e apresentou valores entre 1,06 e 20,12 metros (média de 4,68 metros). A coleta e medida de nível d'água foram realizadas em 7 e 8 de junho de 2017. Cabe ressaltar que em alguns poços não foi realizada a medida de nível d'água devido à utilização/bombeamento do poço ou pelo fato deste estar lacrado.

Quadro 7. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (agosto/2017).

Nº POÇO	pH	T (°C)	NaCl (mg/L)	Condutividade (uS/cm)	Resistividade (KΩ)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
P-1	5.27	28.6	133	115	3210	1.28	156.4	69.4
P-2	4.92	27.6	88.11	74.64	5106	1.72	97.92	84.7
P-3	4.93	28.1	103.3	87.54	4312	2.73	116.7	87.9
P-4	5.18	27.8	114.7	97.78	3852	4.46	129.8	73.9
P-5	5.07	28.5	58.53	47.47	7734	3.22	64.79	73.8
P-6	4.98	27.7	130.1	111.5	3391	2.58	147.4	79.4
P-7	5.09	27.6	93.39	79.52	4804	3.26	104	77.4
P-8	5.07	27.9	63.16	51.42	7281	2.29	68.81	73.5
P-9	5.11	28.1	86.63	72.28	5150	2.22	96.92	75.5
P-10	4.92	28.2	94.41	80.83	4606	2.31	108.6	84.3
P-11	4.89	27.6	164.8	142.6	2684	3.1	186.3	88.2
P-12	4.82	28.3	211.4	183	2021	4.11	247.8	92.3
P-13	4.78	28.2	193.3	167.7	2213	5.1	226.8	96
P-14	4.77	28.7	92.98	78.9	4647	5.1	107.9	94.9
P-15	5.14	28.9	43.21	32.83	11.04	4.56	45.42	70.1
P-16	4.94	27.2	45.53	35.3	11.05	5.31	45.28	53.5
P-17	4.73	28.5	93.01	78.11	4774	2.15	104.7	97
P-18	4.7	28.8	40.34	30.08	12.02	3.87	41.71	100.1
P-19	4.59	29.6	62.81	51.07	6847	3.89	73.02	108.8
P-20	5.18	29.2	62.96	51.86	6885	4.52	72.5	76.6
P-21	5.07	29.3	52.45	41.71	8499	3.64	58.95	72.4
P-22	4.79	28.7	71.87	59.41	6106	1.72	81.88	94.6
P-23	5.25	27.2	37.88	28.26	13.5	5.43	37.14	49.6
P-24	4.58	27.7	51.04	40.6	9351	5.2	53.47	109
P-25	4.72	29.5	76	63.5	5560	4.79	90.1	99.2
P-26	4.64	27.9	98.33	83.31	4521	2.65	110.6	103.8
P-27	5.04	27.6	94.39	79.96	4738	2.52	105.5	74.9
P-28	4.97	27.4	47.74	37.79	10.22	4.93	49.21	62.6
P-29	5.39	29.9	66.3	53.87	6420	4.32	78.06	54.1
P-30	4.9	30.4	170.7	147.5	2316	3.86	215.7	89.5

Fonte: Do autor (2017).

O nível estático dos poços de interesse foi obtido através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst Model 122*, e apresentou valores entre 1,7 e 23,34 metros (média de 6,45 metros). A coleta e medida de nível d'água foram realizadas em 16 e 17 de agosto de 2017. Cabe ressaltar que em alguns poços não foi realizada a medida de nível d'água devido à utilização/bombeamento do poço ou pelo fato deste estar lacrado.

Quadro 8. Resultados dos parâmetros físico-químicos analisados no período menos chuvoso (outubro/2017).

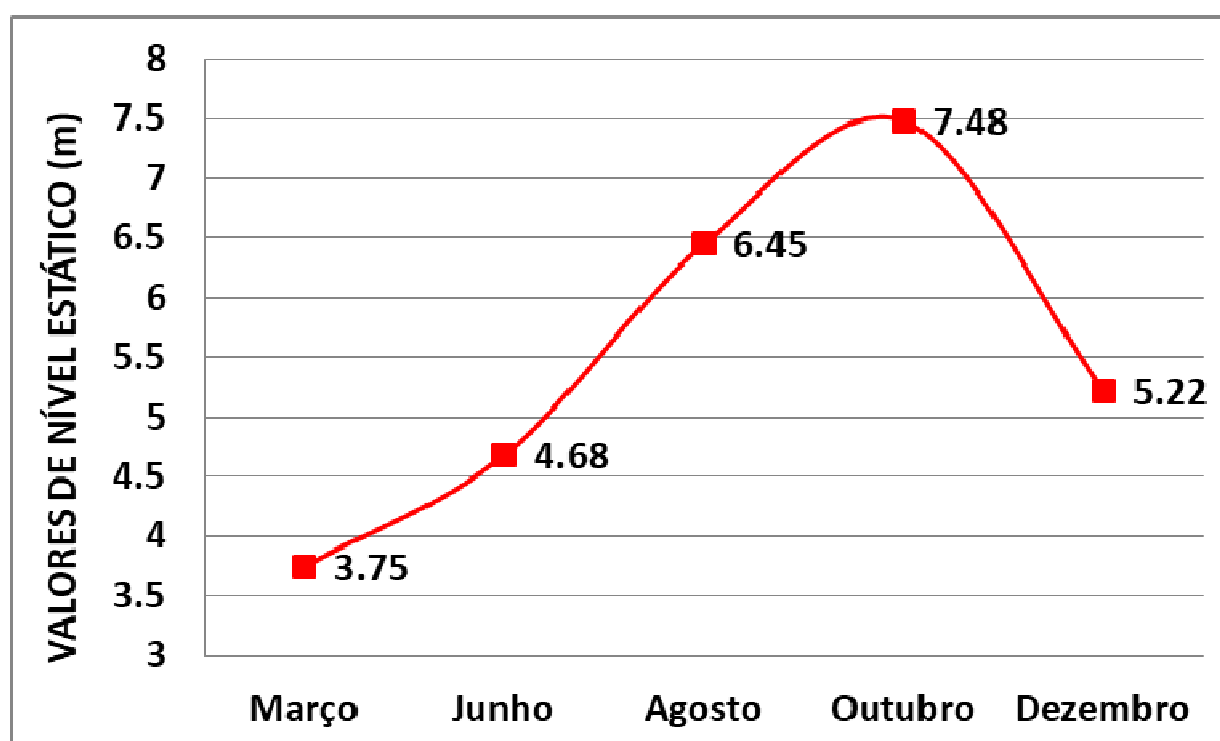
Nº POÇO	pH	T (°C)	NaCl (mg/L)	Condutividade (uS/cm)	Resistividade (KΩ)	OD (mg/L)	TDS (mg/L)	ORP (mV)
P-1	4.95	28.2	127.0	109.2	3,362	1.97	147.8	82.3
P-2	5.16	27.5	87.58	70.70	5,126	1.92	93.37	73.9
P-3	5.12	27.9	90.33	75.57	4,933	3.29	101.2	74.8
P-4	4.71	29.9	109.4	92.35	3,737	4.69	133.8	103.4
P-5	4.63	28.3	58.56	47.53	7,727	3.53	64.71	107.8
P-6	4.48	27.6	131.2	112.7	3,368	3.19	148.5	116.10
P-7	4.62	27.3	90.89	77.45	4,961	4.88	100.8	107.1
P-8	4.72	29.6	68.37	56.27	6,238	2.48	80.45	99.7
P-9	4.70	27.8	82.82	69.32	5,422	4.81	92.39	101.8
P-10	4.57	28.1	103.9	89.24	4,158	2.99	120.2	110.7
P-11	4.48	27.2	162.1	140.9	2,732	3.63	183.4	116.4
P-12	4.52	28.3	214.0	185.1	1,992	3.29	251.4	116.2
P-13	4.48	28.2	177.4	154.1	2,403	5.70	207.9	117.2
P-14	5.30	28.0	86.64	74.43	5,060	4.44	99.09	66.20
P-15	4.77	26.4	41.39	31.82	12.52	6.47	39.93	95.3
P-16	4.76	26.6	46.30	36.32	10.87	5.03	45.96	95.9
P-17	5.33	27.6	97.91	83.27	4,559	1.91	109.7	52.8
P-18	4.84	28.4	38.35	28.21	12.87	4.38	38.65	90.7
P-19	4.87	29.4	44.66	34.33	10.32	4.48	48.61	91.6
P-20	4.67	28.5	61.02	49.79	7,359	4.58	67.95	104.8
P-21	5.96	27.3	51.30	41.30	9,364	4.22	53.56	8.20
P-22	4.56	27.9	71.62	59.23	6,334	1.68	78.94	112.5
P-23	5.58	28	35.98	28.7	12.69	5.55	36.02	59
P-24	4.65	27.6	56.16	45.27	8,352	3.14	59.87	104.1
P-25	4.57	29.0	76.62	64.43	5,564	4.45	90.02	111.0
P-26	4.63	27.6	94.27	80.02	4,735	2.42	105.4	107.5
P-27	4.64	27.8	85.85	72.32	5,229	4.52	95.63	106.8
P-28	5.02	27.5	47.43	36.61	10.30	4.69	47.60	82.20
P-29	5.53	28.8	62.51	50.77	7,105	4.13	70.37	51.00
P-30	5.08	27.5	175.00	150.5	2,515	5.00	198.4	76.00

Fonte: Do autor (2017).

O nível estático dos poços de interesse foi obtido através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst Model 122*, e apresentou valores entre 2,3 e 25,34 metros (média de 7,48 metros). A coleta e medida de nível d'água foram realizadas em 10 e 11 de outubro de 2017. Cabe ressaltar que em alguns poços não foi realizada a medida de nível d'água devido à utilização/bombeamento do poço ou pelo fato deste estar lacrado.

Através dos valores das médias dos níveis estáticos dos poços estudados (em cada coleta de campo), foi feito um gráfico para verificar o comportamento durante um ciclo hidrológico (Figura 9). Os valores médios variaram entre 3,75 e 5,22 metros, no período chuvoso (março e dezembro) e de 4,68 a 7,48 metros, durante o período menos chuvoso (junho, agosto e outubro).

Figura 9. Valores médios da variação sazonal de nível estático por períodos amostrados.



Fonte: Do autor (2017).

8.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Segundo Parron (2011), as caracterizações físico-químicas da água e de soluções aquosas têm como objetivo identificar e quantificar os elementos e espécies iônicas presentes nesses compostos e associar os efeitos de suas propriedades às questões ambientais, permitindo a compreensão dos processos naturais ou alterações no meio ambiente. Os teores determinados nas amostras analisadas são comparados aos padrões conhecidos, os quais são especificados em portarias e resoluções legais, que dão subsídios aos laboratórios na expedição de seus laudos (PARRON, 2011).

Os resultados das análises físico-químicas foram sistematizados em planilha Excel (média sazonal obtida através da coleta bimestral) com o objetivo de fornecer elementos para a construção de gráficos de concentração iônica e a confecção de mapas contendo a distribuição espacial de cada variável nas águas subterrâneas da área de estudo. Deste modo, torna-se possível analisar a evolução hidrogeoquímica dos compostos analisados e estabelecer uma fácil visualização da ocorrência de cada um dos parâmetros analisados a seguir.

8.1.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

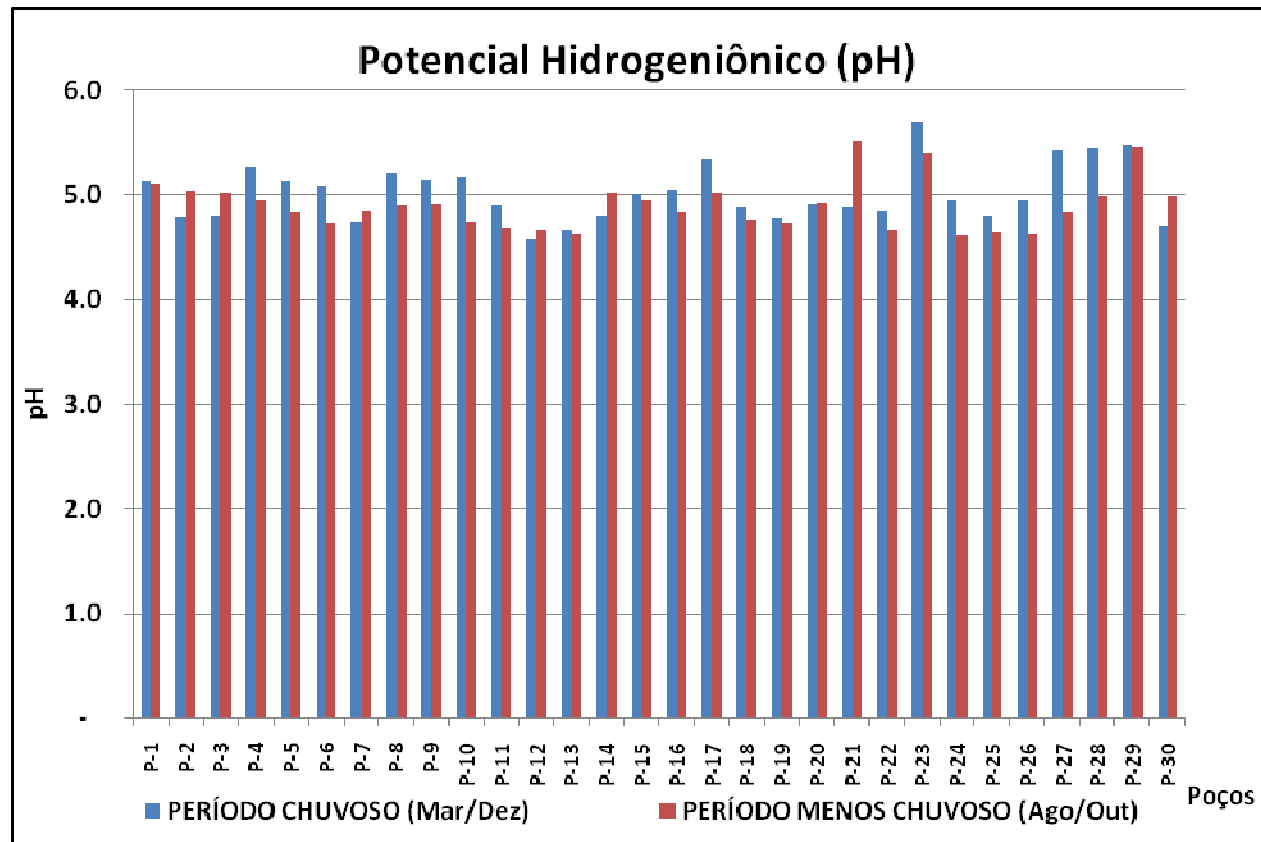
É a medida da concentração hidrogeniônica da água ou solução, sendo controlado pelas reações químicas e pelo equilíbrio entre os íons presentes. O pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido e da alcalinidade da água. É calculado em escala antilogarítmica e para temperaturas de 25°C são considerados os valores de 1 a 14, onde aqueles inferiores a 7 são denominados de ácidos, superiores a 7 são básicos ou alcalinos e 7 é considerado valor neutro.

O pH das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 4,33 (poço 12) a 5,84 (poço 29), e uma média de 5. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de pH variaram de 4,48 (poços 7, 11 e 13) a 5,96 (poço 21), com média de 4,9. Enquanto o período chuvoso apresentou valores maiores de pH, o período menos chuvoso teve valores menores (Figura 10).

Na área de pesquisa, são observados valores de pH ligeiramente ácidos, em grande parte dos poços. Estes valores refletem o pH ácido típico das águas amazônicas e isto se dá pela cobertura vegetal densa que, a partir de sua decomposição nos solos, gera ácidos orgânicos que apresentam grupos carboxílicos (-COOH), que dissociam, liberando H⁺, e reduzindo o pH das águas. Outro fator a ser considerado e que foi verificado em campo, é de que nestes poços há existência de atividades antrópicas com potencial significativo para acidificar a água.

A Portaria nº 2.914/2011, do Ministério da Saúde, estabelece como padrão de potabilidade para o pH, uma faixa de valores que vai de 6,0 a 9,5. Para a Organização Mundial de saúde essa faixa é alterada para 6,5 a 8,5. A maioria das águas subterrâneas, em seu estado natural, possui pH entre 5,5 e 8,5.

Figura 10. Variação sazonal de pH das águas subterrâneas analisadas.



Fonte: Do autor (2017).

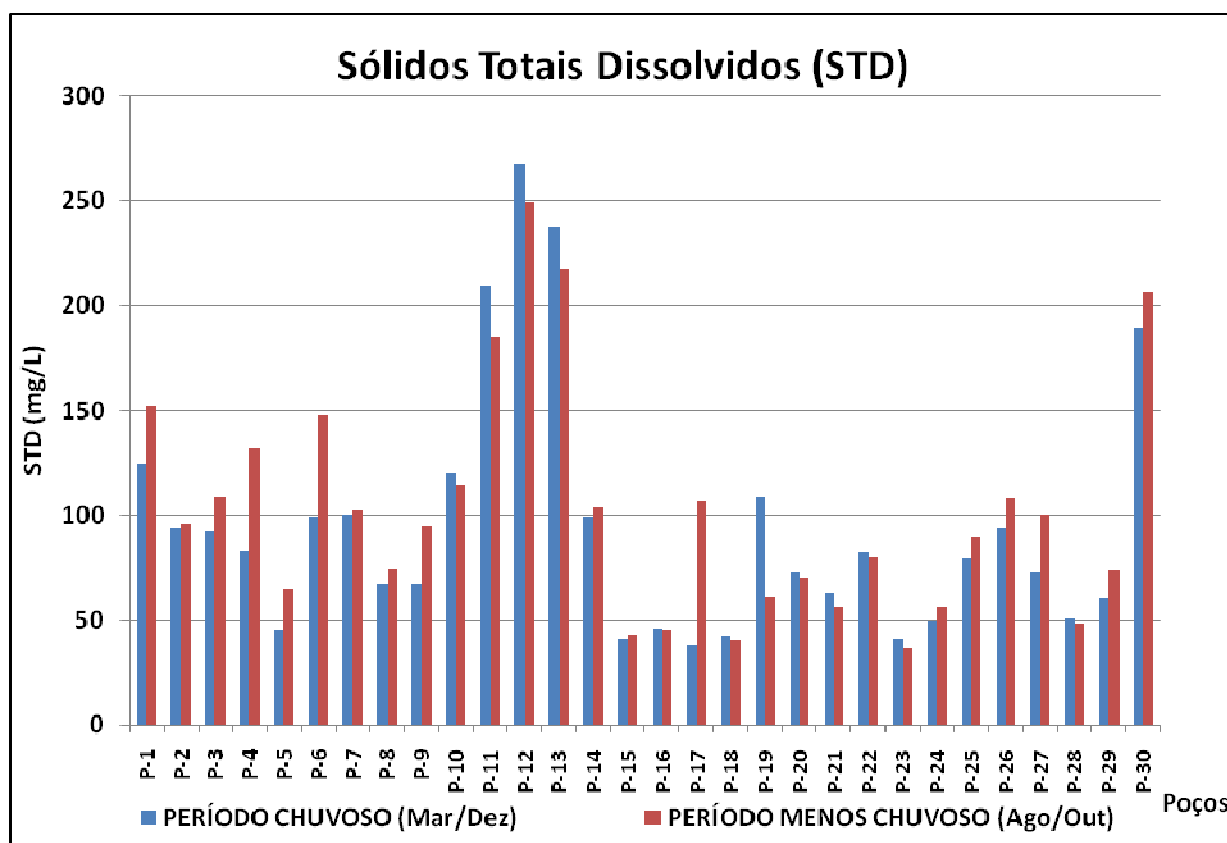
8.1.2. Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

Os sólidos totais dissolvidos (STD) representam a soma de todos os constituintes químicos dissolvidos na água. A principal aplicação da determinação dos STD é de qualidade estética da água potável e com um indicador agregado da presença de produtos químicos contaminantes. Os teores de STD possuem relação direta com a composição mineralógica da rocha reservatório e com o tempo de percolação das águas subterrâneas no interior de um aquífero (PARRON, 2011).

O STD das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 40,4 mg/L (poço 23) a 267,7 mg/L (poço 29), e uma média de 96,5 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de STD variaram de 36,6 mg/L (poço 23) a 249,6 mg/L (poço 12), com média de 102,3 mg/L. Enquanto o período menos chuvoso apresentou valores maiores de STD, o período chuvoso teve valores menores (Figura 12).

O STD mede a concentração de substâncias iônicas e é expressa em mg/L. O limite máximo permitido de STD na água para consumo humano é de 1.000 mg/L. Todas as amostras estão de acordo com os padrões aceitos pela Portaria nº 2.914/2011, que estabelece o Valor Máximo Permitido (VMP) para STD de 1.000 mg/L para água potável.

Figura 11. Variação sazonal de STD das águas subterrâneas analisadas



8.1.3. Condutividade Elétrica (CE)

A condutividade elétrica é a capacidade que uma solução aquosa possui em conduzir corrente elétrica, refletindo a facilidade da água na transmissão da corrente elétrica. Está relacionada à presença de cátions e ânions provenientes de sais diversos que se encontram dissolvidos na água. Soluções ácidas, básicas e sais inorgânicos são relativamente boas condutoras. Já as moléculas de compostos orgânicos que não dissociam em solução aquosa conduzem pouca corrente elétrica. Esses sais se acumulam no corpo hídrico, em função da movimentação e transporte de material de solos.

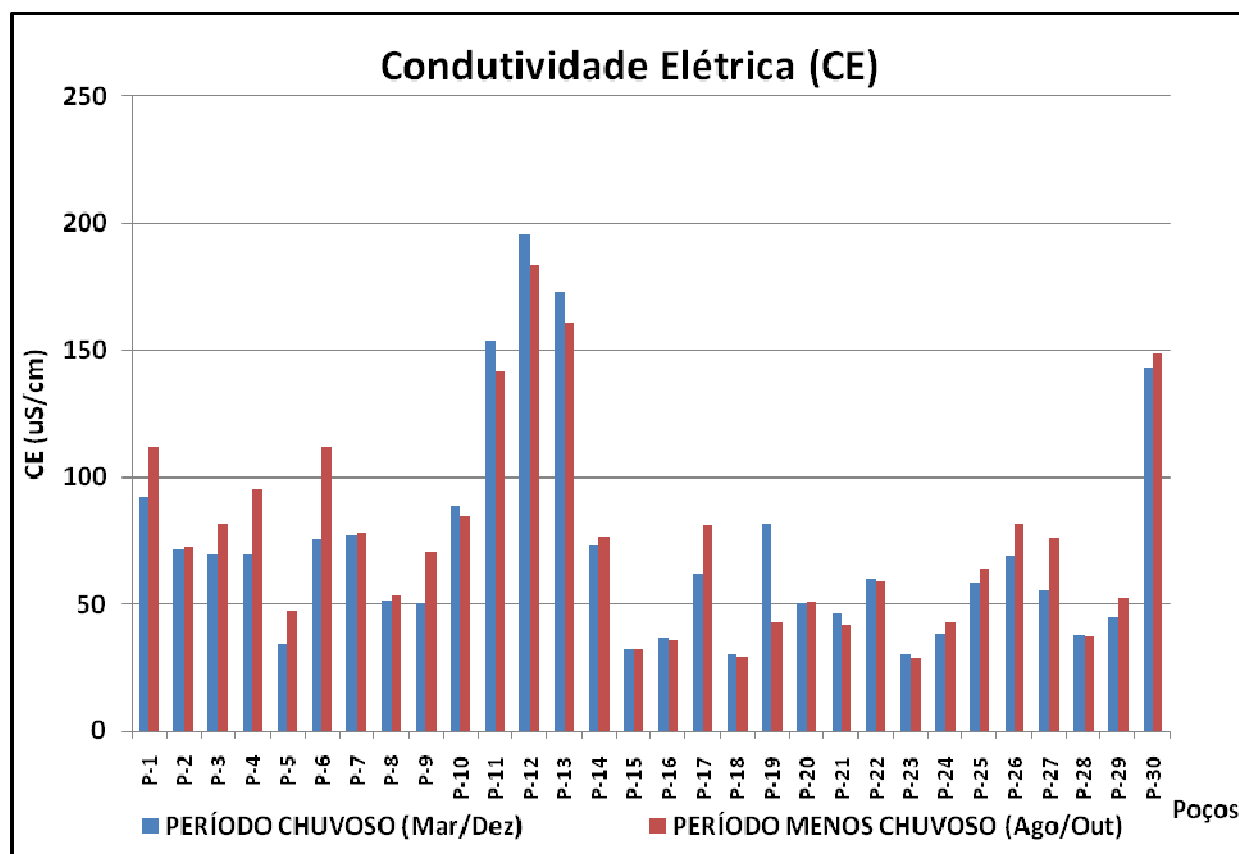
A condutividade elétrica tem o papel de medir o grau de mineralização iônica das águas que, por sua vez, está diretamente associada à potabilidade para consumo humano. É medida por condutivímetro e é expressa em uS/cm.

A condutividade elétrica das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 30,2 uS/cm (poço 18) a 195,8 uS/cm (poço 12), e uma média de 71,8 uS/cm. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de STD variaram de 28,2 uS/cm (poço 18) a 184,1 uS/cm (poço 12), com média de 75,9 uS/cm. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de condutividade elétrica (Figura 12). O aumento dos valores de condutividade elétrica durante o período menos chuvoso pode estar associado à concentração de sais dissolvidos nas águas amostradas. Observa-se que o poço 12 e o poço 18, representam os valores máximos e mínimos de condutividade elétrica, respectivamente.

O poço 12 (SAEBE/MADRE TEREZA) apresenta os valores máximos de condutividade elétrica em ambos os períodos (chuvoso e menos chuvoso), destacando-se dos demais poços analisados. O aumento da condutividade elétrica associado a elevadas quantidades de sódio e cloreto podem estar relacionados ao processo de contaminação por efluentes domésticos (Cabral, 2006). Por se tratar de um poço relativamente raso (36 metros) e construído sem os critérios construtivos apropriados, essas características tornam-no mais propício a contaminação antrópica, principalmente pela ocorrência de fossas negras identificadas na região.

A legislação brasileira não estipula valores quanto à condutividade elétrica pela Portaria nº 2.914/2011, mas valores que ultrapassem 150 uS/cm podem estar relacionados a ambientes impactados negativamente. Valores superiores a este podem gerar sabor desagradável à água, afetando diretamente sua potabilidade e capacidade para consumo.

Figura 12. Valores de CE das águas subterrâneas analisadas.



8.1.4. Turbidez (uT)

É definida pela dificuldade da emissão de luz pela água, provocada pelos sólidos em suspensão que sujam a água dificultando a passagem de luz. A turbidez na água é causada por materiais em suspensão como: argila, silte, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida, compostos orgânicos solúveis coloridos, plâncton e outros organismos microscópicos. A clareza de um corpo d'água natural é um dos principais determinantes da sua condição e produtividade (Parron, 2011).

A turbidez é medida através do turbidímetro e a Portaria nº 2.914/2011, do Ministério da Saúde e da Organização Mundial de Saúde (OMS), estabelecem como padrão de potabilidade para a Turbidez um limite de 5 UNT (unidade nefelométrica).

A turbidez das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,5 UNT (poços 4, 6, 15 e 27) a 5,5 UNT (poço 3), e uma média de 1,8 UNT. No

período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de turbidez variaram de 1 UNT (poço 13) a 4 UNT (poço 14), com média de 2,4 UNT.

8.1.5. Cloreto

O cloreto é um dos principais ânions inorgânicos e está presente em todas as águas naturais, com valores situados entre 10 e 250 mg/L nas águas doces e valores entre 18.000 e 21.000 mg/L em águas marinhas (FEITOSA, 2008). É proveniente da lixiviação de minerais ferro-magnesianos de rochas ígneas e de rochas evaporíticas.

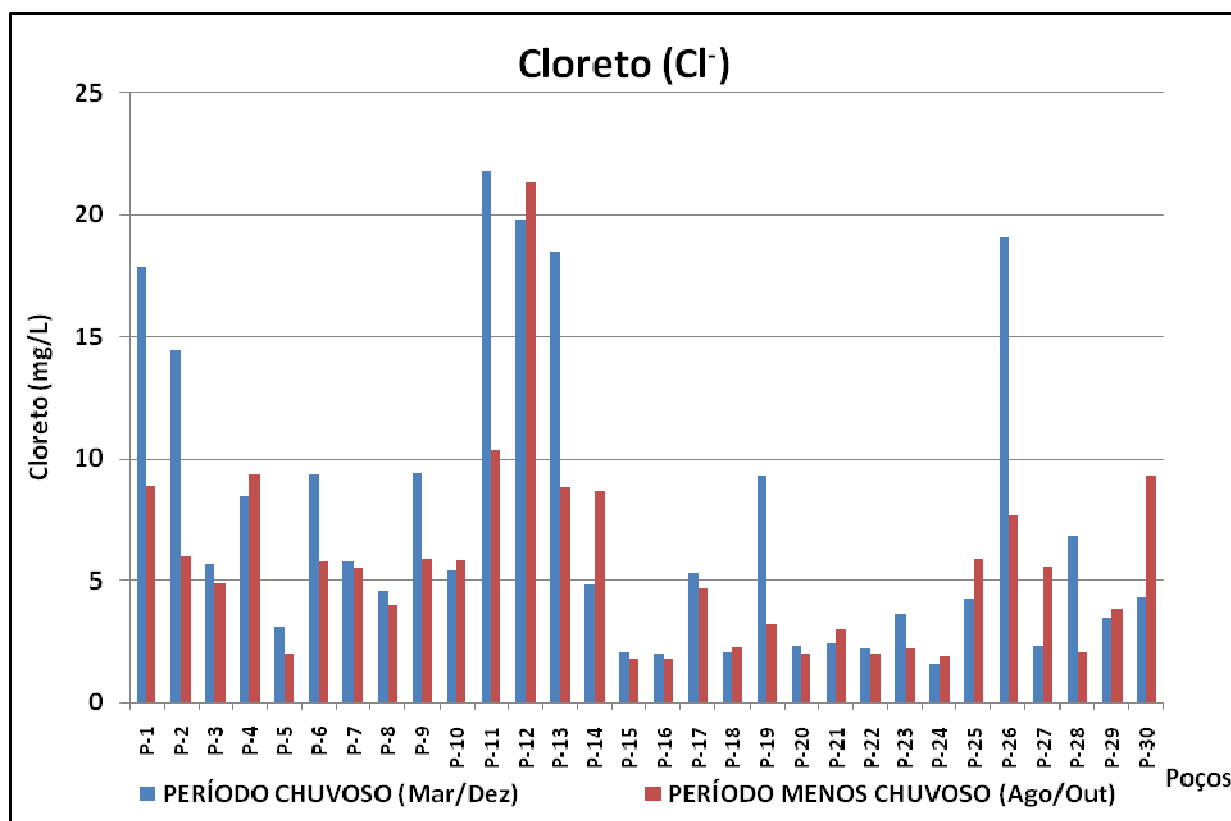
As águas subterrâneas apresentam, geralmente, teores de cloreto inferiores a 100 mg/L. As diversas interações naturais experimentadas pelas águas subterrâneas geralmente não influenciam no aumento desse fator. Portanto, o aumento desse fator nas águas subterrâneas é de origem antrópica, especialmente nas águas residuais (resíduos industriais e esgotos sanitários) e lixões e aterros. Trata-se de um bom indicador de poluição para aterros sanitários e lixões, uma vez que um alto teor provoca mudança de sabor na água (SANTOS, 2011).

O teor de cloreto das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 1,6 mg/L (poço 24) a 21,8 mg/L (poço 11), e uma média de 7,4 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de cloreto variaram de 1,8 mg/L (poços 15 e 16) a 21,4 mg/L (poço 12), com média de 5,6 mg/L. Enquanto o período chuvoso apresentou valores maiores de teor dos cloretos, o período menos chuvoso teve valores menores (Figura 13).

Observa-se que os poços 11 e 12 (SAEBE/SANTA ROSA e SAEBE/ALACIDE NUNES) apresentam os teores mais elevados de cloreto, tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem. Isto pode estar relacionado à proximidade destes poços a residências que influenciam as águas subterrâneas rasas na ocorrência de anomalia de cloreto, através da emissão de esgoto doméstico.

Os resultados obtidos mostram que todas as amostras analisadas estão dentro dos padrões de aceitação para o consumo humano. A Portaria nº 2.914/2011, do Ministério Brasileiro de Saúde, estabelece como padrão de potabilidade para o cloreto de 250 mg/L.

Figura 13. Concentrações de Cloreto nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.6. Sulfato

Os sulfatos são espécies químicas iônicas, de valência ou estado de oxidação 2-, que se originam a partir do ácido sulfúrico, tratando-se de um átomo de enxofre central ligado a quatro átomos de oxigênio por meio de ligações covalentes, de fórmula molecular SO_4^{2-} . Dessa forma, o mais conhecido ácido do íon sulfato é o ácido sulfúrico (H_2SO_4), sendo também utilizada a denominação de óxido sulfúrico para os sulfatos. Os sulfatos podem ser dissolvidos dos minerais gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anidrita (CaSO_4), barita (BaSO_4), entre outros. Altas concentrações de sulfato em águas naturais são mais comuns associadas à presença desses minerais (PARRON, 2011).

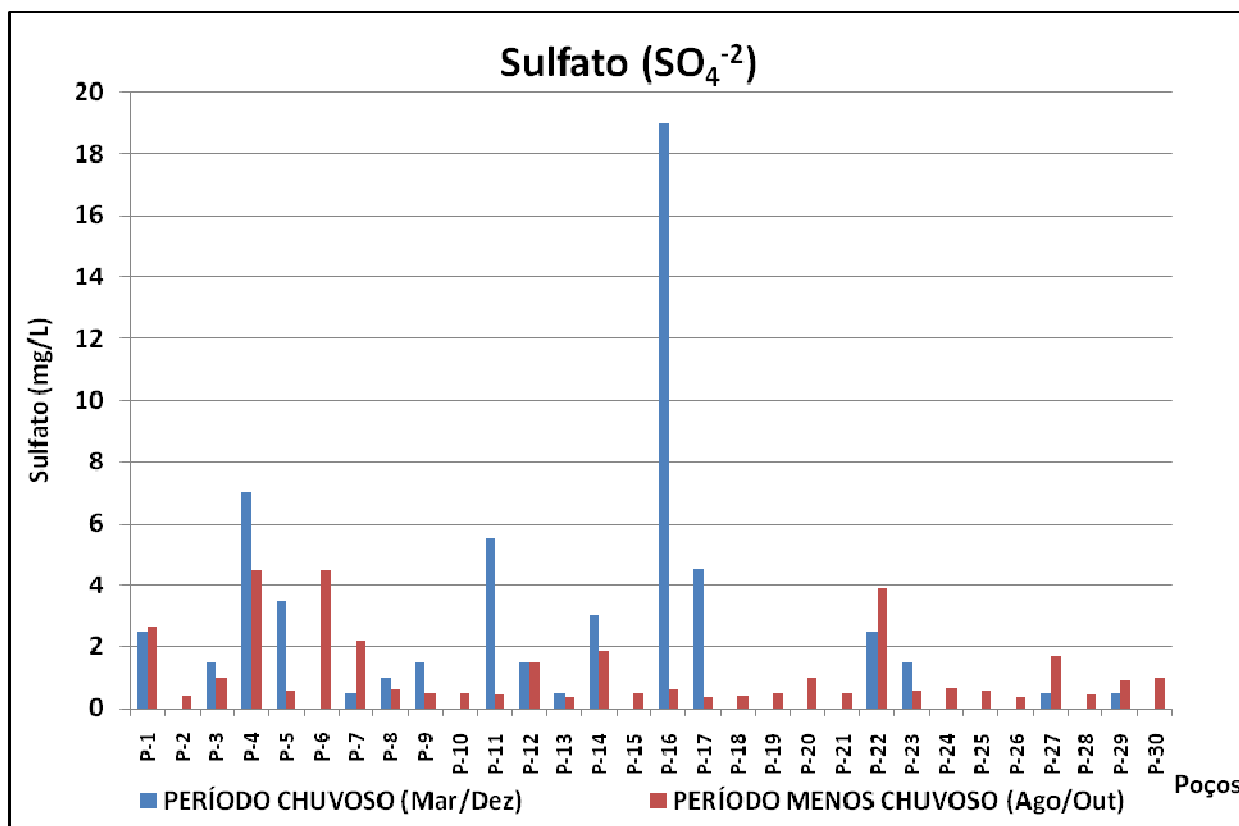
O sulfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois é encontrado sob a forma de enxofre, nas plantas, no solo e em águas pluviais. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo sulfato, em aquíferos, podem prejudicar a qualidade das águas e interferir no ciclo natural do enxofre. Apresentam importância que vai desde o laboratório, passa pela indústria e chega aos sistemas vivos.

O teor de sulfato das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (em quase metade dos poços analisados) a 19 mg/L (poço 16), e uma média de 4,7 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de sulfato variaram de 0,4 mg/L (poços 2, 13, 17, 18 e 26) a 6,9 mg/L (poço 4), com média de 2,1 mg/L. Enquanto o período chuvoso apresentou valores maiores de teor dos sulfatos, o período menos chuvoso teve valores menores (Figura 14).

Observa-se que o poço 19 (COMUNIDADE NOSSA SENHORA DO CARMO) apresenta o teor mais elevado de sulfato, durante o período chuvoso. Isto pode estar relacionado à ocorrência de dissolução de sulfetos metálicos (pirita, esfarelita e galena), que ocorrem localmente disseminados na Formação Barreiras.

De uma forma geral, os resultados obtidos mostram valores baixos para concentração de sulfato nas águas analisadas e todas as amostras analisadas estão dentro dos padrões de aceitação para o consumo humano. A Portaria nº 2.914/2011, do Ministério Brasileiro de Saúde, estabelece como padrão de potabilidade para o sulfato de 250 mg/L.

Figura 14. Gráfico dos valores de Sulfato nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.7. Fosfato

Segundo Parron (2011), o fósforo é um elemento essencial para o crescimento dos organismos, principalmente pelo fato de ser o nutriente que limita a produtividade de um corpo d'água. Pode ser encontrado na forma orgânica e inorgânica e a forma mais comum de ocorrência são os fosfatos solúveis, classificados em ortofosfatos, fosfatos orgânicos e fosfatos condensados.

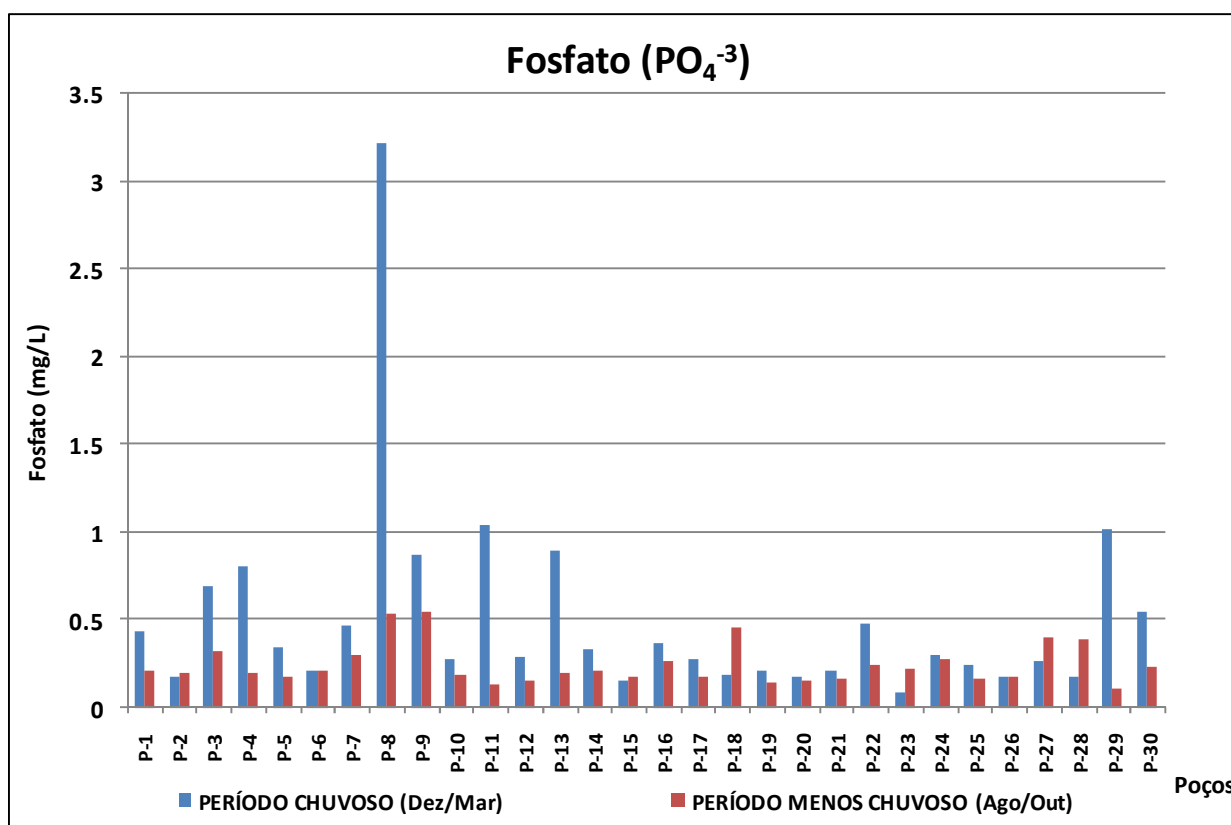
O fosfato pode ocorrer naturalmente em águas subterrâneas, pois está relacionado a processos naturais como a dissolução de rochas, decomposição de matéria orgânica e carreamento dos solos. Porém, pode também estar relacionado a processos antrópicos como lançamento de esgoto sanitário, fertilizantes, detergentes e pesticidas. As descargas diretas ou indiretas de águas residuais contendo fosfato podem prejudicar a qualidade das águas residuais, principalmente através do lançamento de detergentes fosfatados empregados no uso doméstico em larga escala (SANTOS, 2011).

O teor de fosfato das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,085 mg/L (poço 23) a 3,215 mg/L (poço 8), e uma média de 0,5 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de fosfato variaram de 0,11 mg/L (poço 29) a 0,555 mg/L (poço 9), com média de 0,2 mg/L. Enquanto o período chuvoso apresentou valores maiores de teor dos fosfatos, o período menos chuvoso teve valores menores (Figura 15).

Observa-se que o poço 8 (SAEBE/UNIDADE SAÚDE FLORES) apresenta o teor mais elevado de fosfato, durante o período chuvoso. Isto pode estar relacionado à ausência de saneamento básico local. Aliado a isto, a ausência de um sistema complementar para tratamento dos efluentes domésticos em toda a área de estudo, como caixas de gorduras, pode estar influenciando estas elevadas concentrações de fosfato. Quando há elevada concentração de fosfato nas águas, pode ocorrer o processo de eutrofização, isto é, crescimento acumulado de algas e bactérias heterótrofas, modificadoras do caráter físico-químico da água, diminuindo a quantidade de oxigênio dissolvido e gerando a precipitação de metais pesados como o ferro.

De uma forma geral, os resultados obtidos mostram valores altos para concentração de fosfato nas águas analisadas, porém a legislação brasileira não estipula valores quanto à concentração de fosfato pela Portaria nº 2.914/2011, mas a legislação holandesa determina que o nível de fosfatos em águas subterrâneas não gera problemas quando sua concentração é igual ou menor a 0,05 mg/L. Valores superiores a este podem gerar sabor desagradável à água, afetando diretamente sua potabilidade e capacidade para consumo.

Figura 15. Gráfico dos valores de Fosfato nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.8. Cálcio

O cálcio é um dos elementos mais abundantes existentes na maioria das águas, solos e rochas. A presença de cálcio na água resulta do contato do corpo hídrico com minerais mais solúveis, sendo controlado pela presença de depósitos de calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

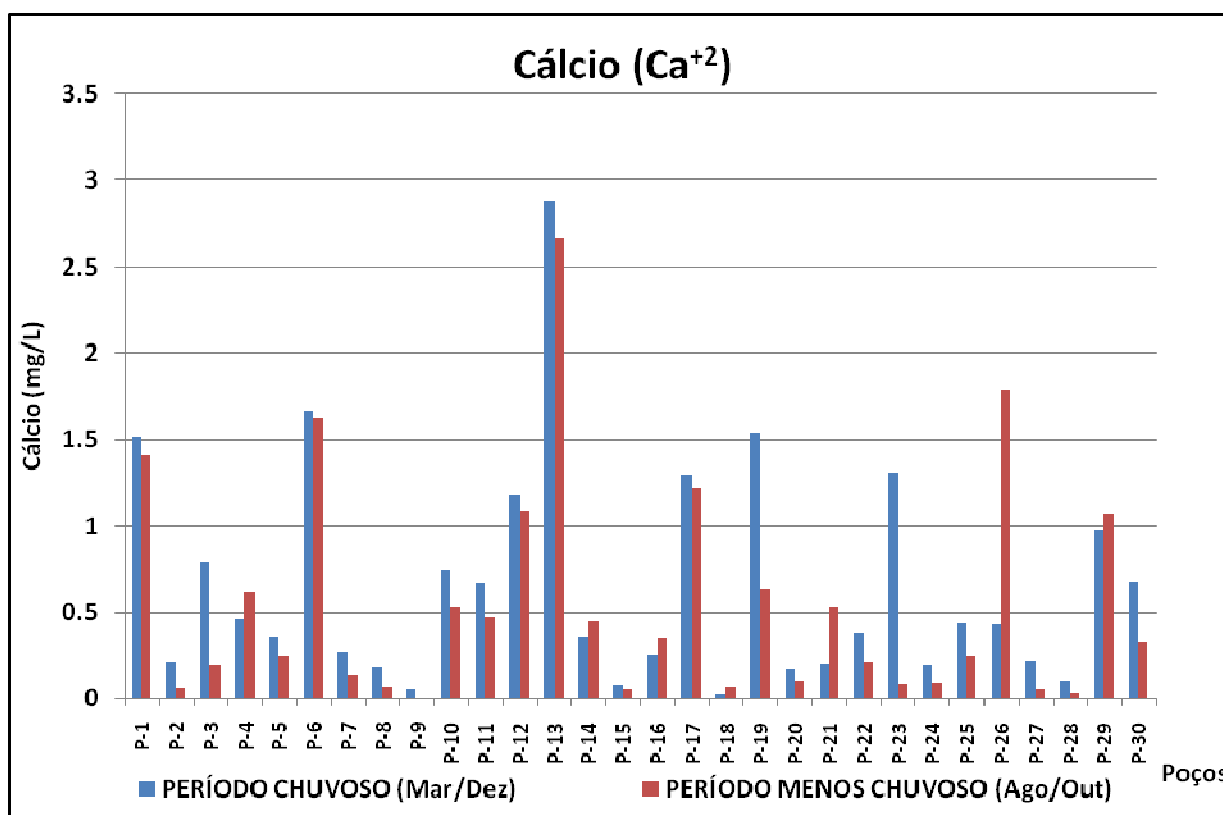
O valor de cálcio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (poço 18) a 2,9 mg/L (poço 13), e uma média de 0,7 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de cálcio variaram de 0,00 mg/L (poço 28) a 2,7 mg/L (poço 13), com média de 0,7 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de cálcio (Figura 16).

Observa-se que o poço 13 (SAEBE/MÉDICE II) apresenta o teor mais elevado de cálcio, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. O cálcio é um elemento fundamental para o ser humano, pois tem um papel significativo na estruturação de ossos e dentes, por isso o

excesso de cálcio não é tratado como um fator negativo na utilização das águas subterrâneas para consumo doméstico.

A legislação brasileira não estipula valores quanto ao teor de cálcio pela Portaria nº 2.914/2011, mas sabe-se que o cálcio pode ser encontrado em corpos d'água em concentrações em torno de 15 mg/L e, em águas subterrâneas, em concentrações que variam de 10 a 100 mg/L (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

Figura 16. Concentrações de Cálcio nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.9. Magnésio

O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é muito similar ao do cálcio e, em linhas gerais, acompanha este elemento, sendo, porém, mais solúvel do que o cálcio. Juntamente com o cálcio, são os cátions que mais contribuem para a dureza total da água. Ocorre geralmente em minerais como a magnesita ($MgCO_3$) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). As reações de equilíbrio do

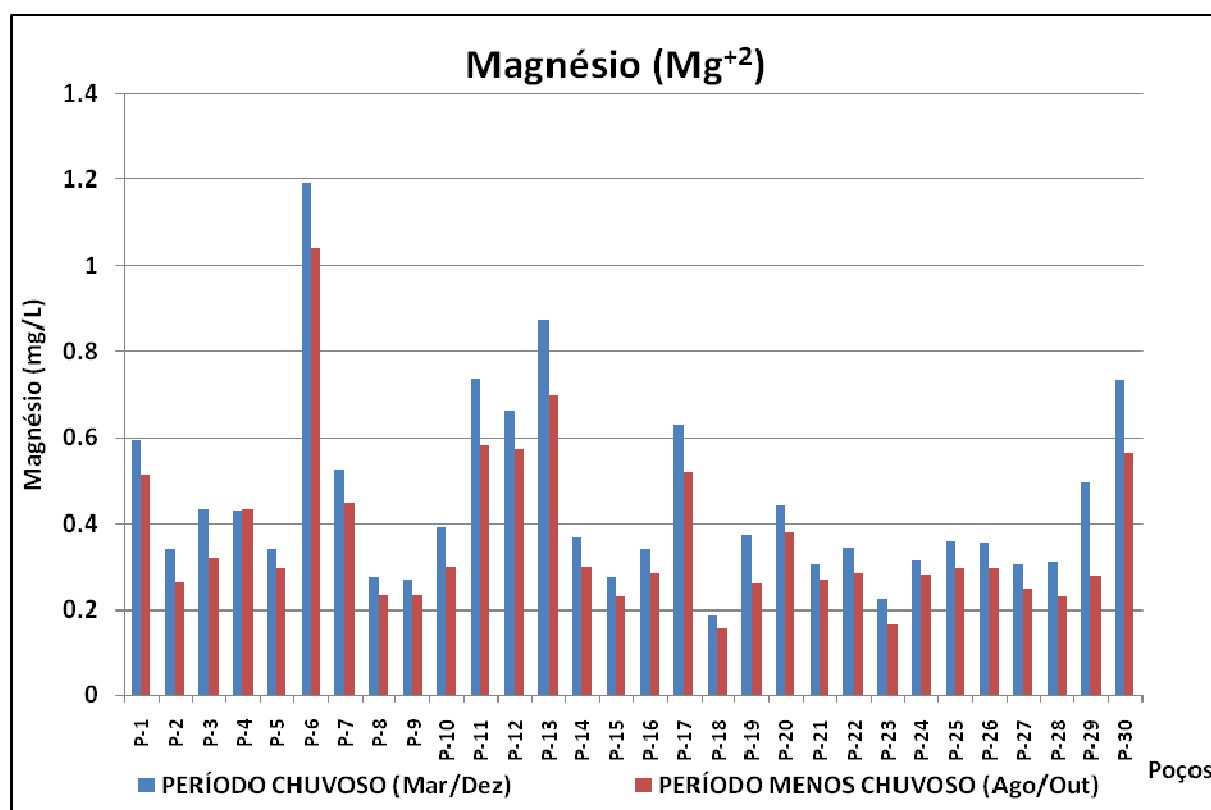
carbonato para o magnésio são mais complicadas do que para o cálcio, e as condições para precipitação direta da dolomita em águas naturais não são comuns (PARRON, 2011).

O valor de magnésio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,2 mg/L (poços 18 e 23) a 1,2 mg/L (poço 6), e uma média de 0,4 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de magnésio variaram de 0,2 mg/L (poços 8, 9, 15, 18, 23, 27 e 28) a 1 mg/L (poço 6), com média de 0,4 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 17).

Observa-se que o poço 6 (SAEBE/PERIMETRAL SUL) apresenta o teor mais elevado de magnésio, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. O magnésio é um elemento importante para o ser humano, uma vez que nem sempre sua concentração é adquirida através de alimentação com ingestão de sólidos. Porém, se consumido em excesso (mais que 150 mg/L) pode causar distúrbios intestinais e náuseas, além de produzir um gosto “salobro” a água.

A legislação brasileira não estipula valores quanto ao teor de magnésio pela Portaria nº 2.914/2011, mas sabe-se que este pode ser encontrado em águas naturais em concentrações próximas de 4 mg/L e, em águas subterrâneas, em concentrações próximas de 5 mg/L (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

Figura 17. Gráfico dos valores de Magnésio nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.10. Sódio

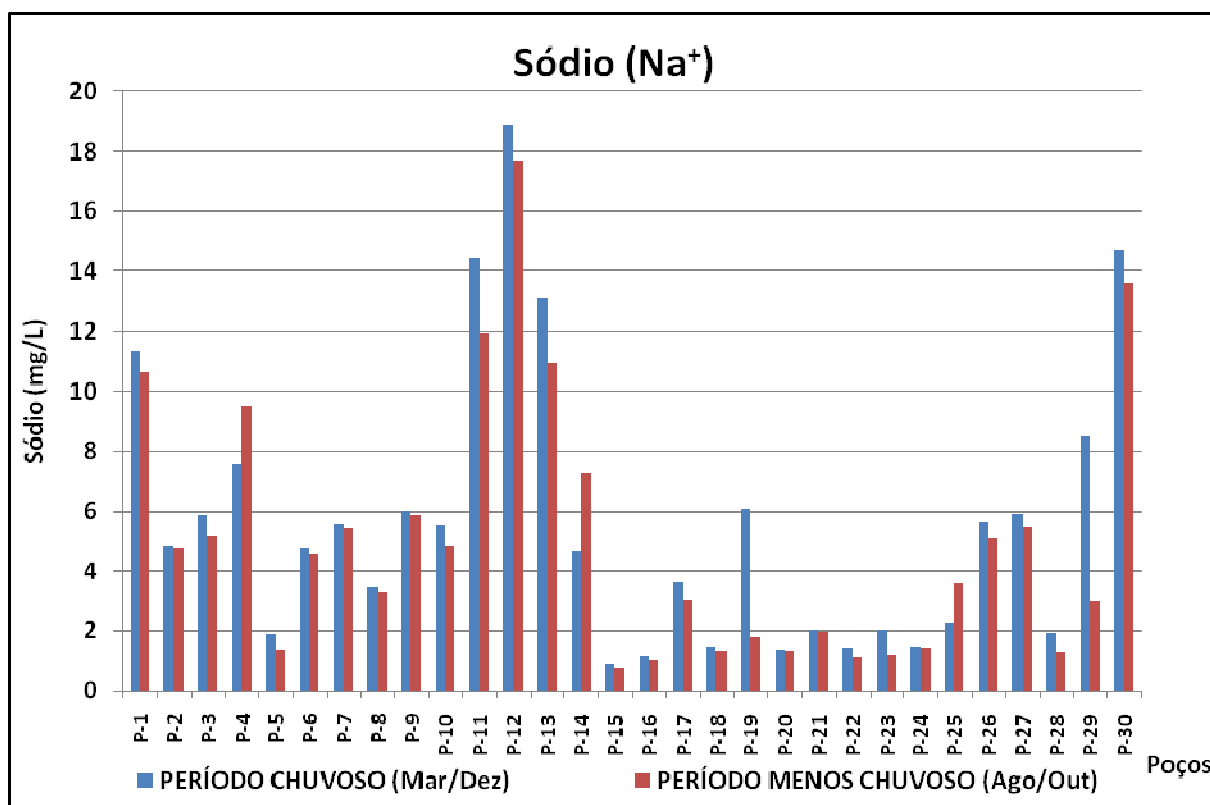
O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas, sendo o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico. Ocorre, principalmente, sob a forma de cloretos. Concentrações de sódio em corpos d'água variam consideravelmente, dependendo das condições geológicas do local e das descargas de efluentes (SANTOS, 2011).

O teor de sódio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,9 mg/L (poço 15) a 18,9 mg/L (poço 12), e uma média de 5,6 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de sódio variaram de 0,2 mg/L (poço 15) a 17,7 mg/L (poço 12), com média de 5 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 18).

Observa-se que o poço 12 (SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) apresenta o teor mais elevado de sódio, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Isto pode estar relacionado à contaminação antrópica através de efluentes domésticos, uma vez que valores anômalos de sódio podem ser indicativos de contaminação por efluentes residuais domésticos, pois este é encontrado comumente nas excreções humanas. Além disto, altas concentrações de sódio podem causar gosto “salobro” e desagradável às águas consumidas.

A legislação brasileira não estipula valores quanto ao teor de sódio pela Portaria nº 2.914/2011, geralmente as águas superficiais possuem teores de sódio inferiores a 50 mg/L e, em águas subterrâneas, podem exceder este valor (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

Figura 18. Gráfico dos valores de Sódio nas águas subterrâneas analisadas.



8.1.11. Potássio

O potássio é um elemento importante na nutrição das plantas e dos humanos, e ocorre em águas subterrâneas como resultado da dissolução mineral de material vegetal em decomposição, e escoamento agrícola. Além disto, é um metal alcalino abundante na natureza, proveniente de minerais como os feldspatos e micas.

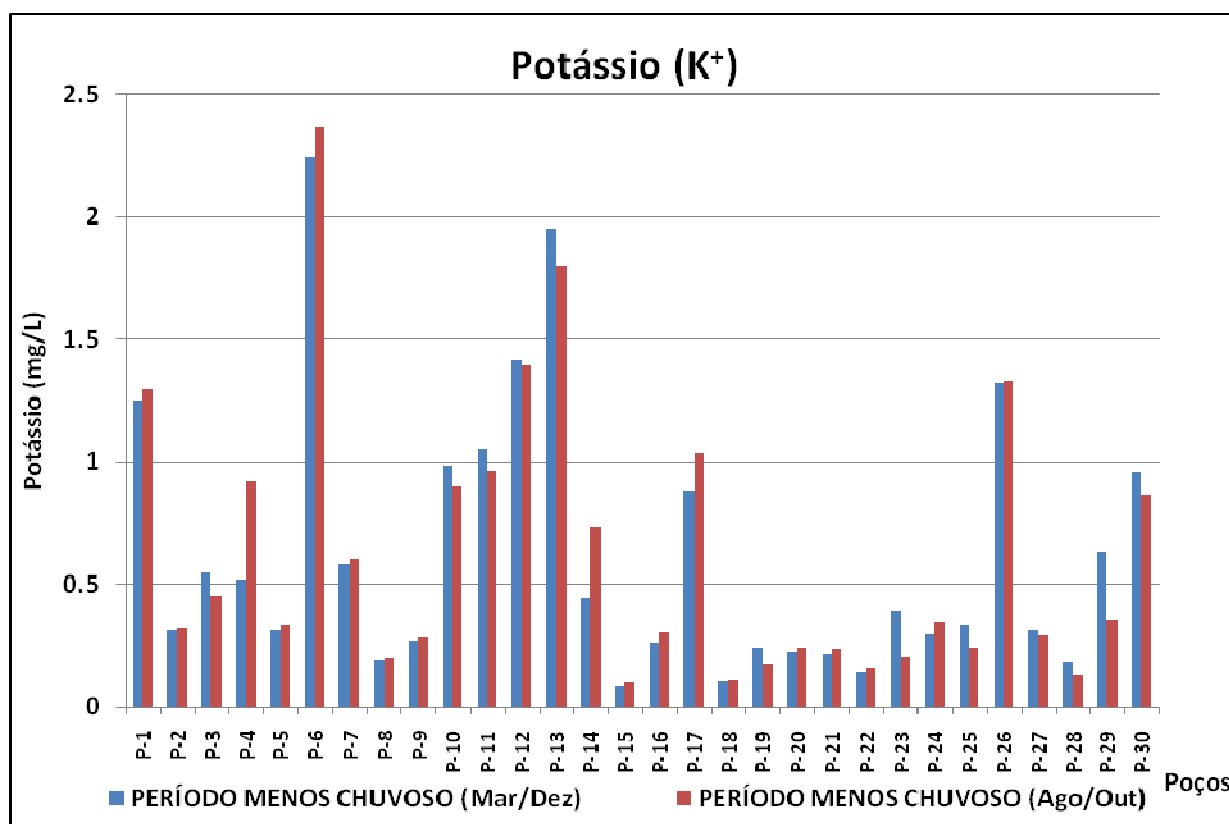
O teor de potássio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,1 mg/L (poços 15, 18 e 22) a 2,2 mg/L (poço 6), e uma média de 0,6 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de potássio variaram de 0,1 mg/L (poços 15, 18 e 28) a 2,4 mg/L (poço 12), com média de 0,6 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 19).

Observa-se que o poço 6 (SAEBE/PERIMETRAL SUL) apresenta o teor mais elevado de potássio, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Isto pode estar relacionado à presença de níveis/minerais argilosos na Formação Barreiras. Altas concentrações de potássio

podem causar distúrbios intestinais e náuseas, além de produzir um gosto “salobro” e desagradável às águas consumidas.

A legislação brasileira não estipula valores quanto ao teor de potássio pela Portaria nº 2.914/2011, geralmente as águas superficiais possuem teores de potássio entre 1 e 3 mg/L e, em águas subterrâneas, possuem valores inferiores a 10 mg/L, sendo mais freqüente entre 0,5 a 5 mg/L (PARRON, 2011). Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do limite aceitável para consumo humano.

Figura 19. Valores de Potássio nas águas subterrâneas analisadas.



8.2 PARÂMEROS RELATIVOS À SUBSTÂNCIAS INDESEJÁVEIS OU TÓXICAS

8.2.1. Ferro Total

O ferro é um elemento bastante comum nas águas subterrâneas, sua origem pode estar ligada à lixiviação dos solos, contaminantes industriais e ao contato da água com tubulações metálicas. Segundo Parron (2011), as fontes de ferro são minerais escuros (máficos) portadores de Fe:

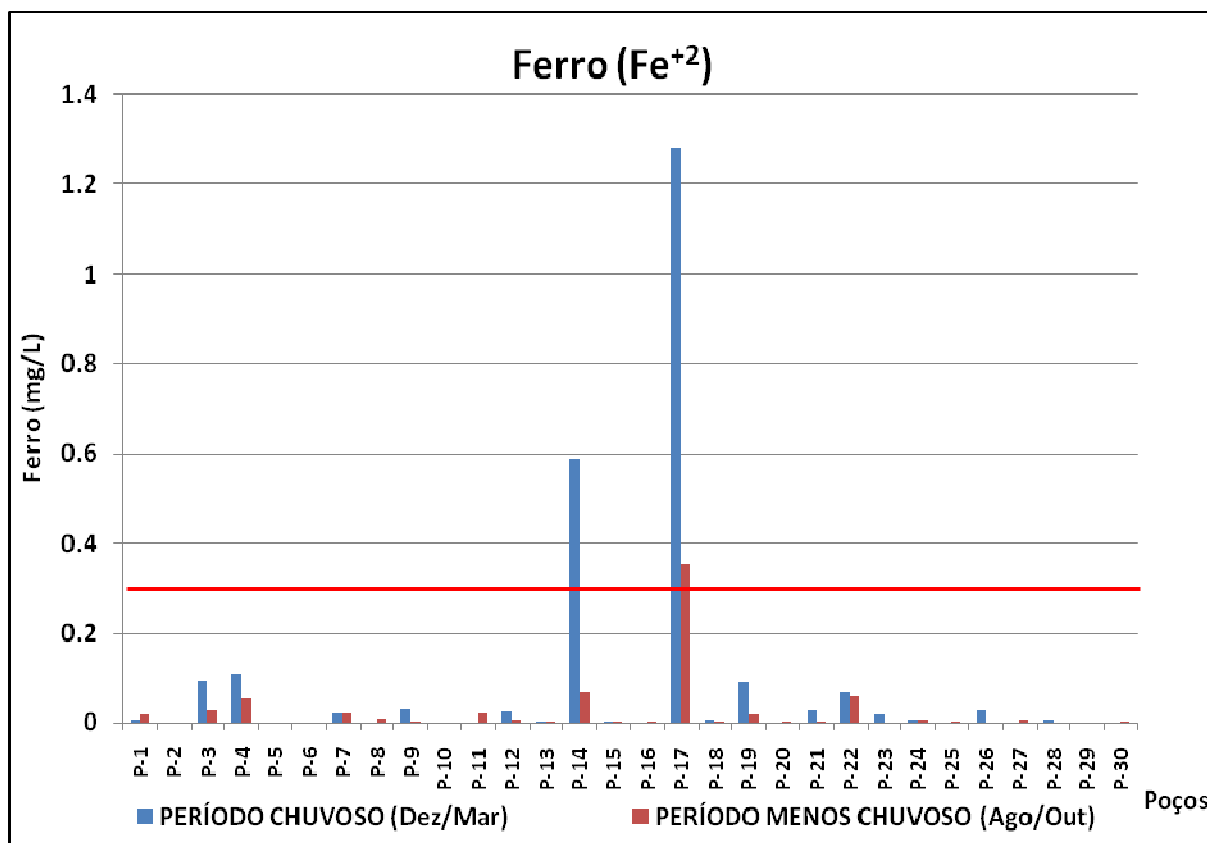
magnetita, biotita, pirita, piroxênios e anfibólios. No estado ferroso (Fe^{+2}) forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes o Fe^{+2} passa a Fe^{+3} dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel e se precipita, tingindo fortemente a água.

O valor de ferro das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (em quase 50% dos poços) a 1,3 mg/L (poço 17), e uma média de 0,2 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de ferro variaram de 0,00 mg/L (em mais de 50% dos poços) a 0,4 mg/L (poço 17), com média de 0,1 mg/L. Enquanto o período chuvoso apresentou valores maiores de ferro, o período menos chuvoso teve valores menores (Figura 20).

Observa-se que o poço 17 (CONDOMÍNIO BELO JARDIM) apresenta o teor mais elevado de ferro, tanto no período chuvoso (em mais de 300% acima do valor estabelecido pela Portaria N° 2.914/2011) quanto no período menos chuvoso. Já o poço 14 (SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL) apresenta valores acima do permitido para o consumo humano, durante o período chuvoso. Estas concentrações elevadas de ferro podem estar relacionadas ao alto teor de ferro encontrado na Formação e sistema aquífero Barreiras, apresentando concentrações de ferro que chegam a 12 mg/L, com águas de coloração típica do ferro, gerando a designação de “capa rosa”. O alto teor de ferro nas águas subterrâneas pode ser um fator preocupante, uma vez que este causa danos à saúde humana e confere à água sabor amargo e coloração amarela a turva. Além disso, causa manchas em instalações sanitárias e roupas, destrói tubulações (infiltrações nos filtros dos poços e obstruções nas canalizações) e restringe essa água para uso industrial.

De acordo com a Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o ferro é de até 0,3 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Dois poços (poços 14 e 17) apresentam valores acima do permitido pela legislação.

Figura 20. Concentrações de Ferro nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.2. Manganês

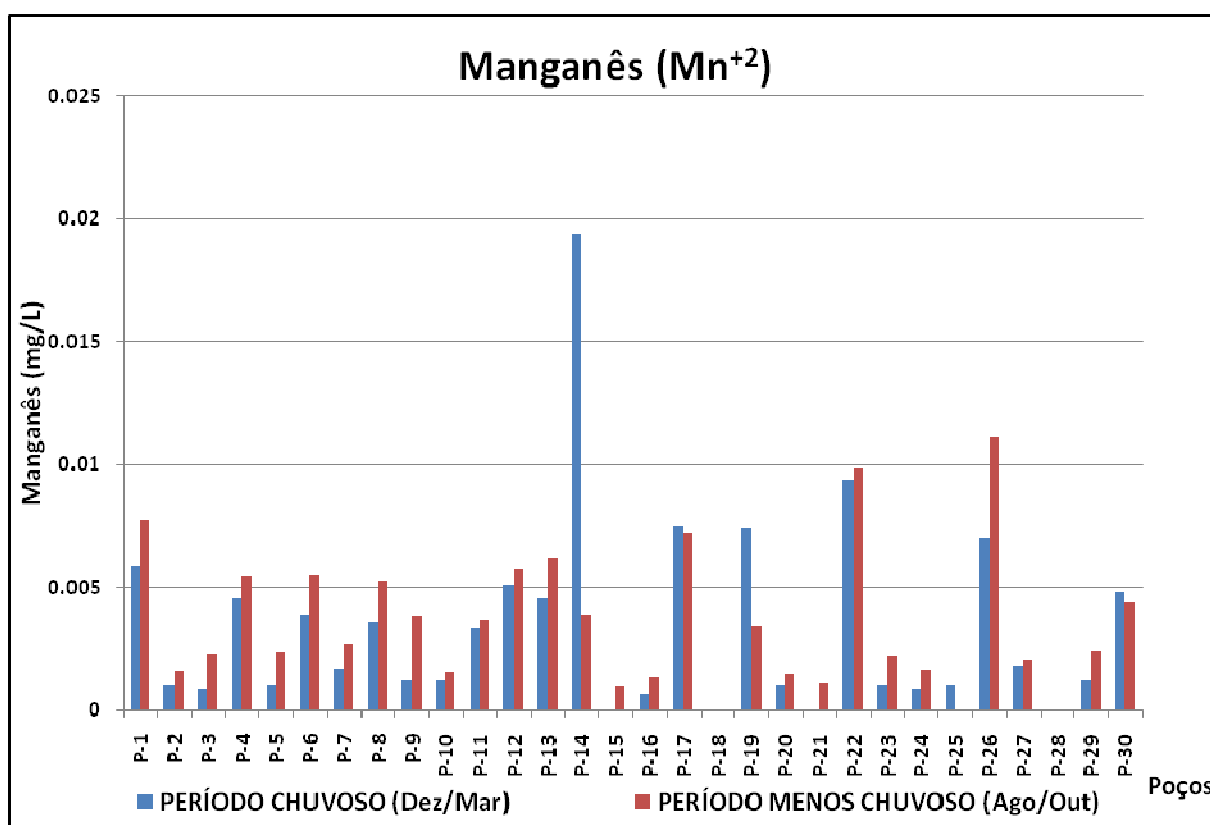
O manganês assemelha-se, quimicamente, ao ferro em termos de ocorrência nas águas subterrâneas. É menos abundante que o ferro nas rochas e, conseqüentemente, sua presença nas águas naturais é menos comum e a sua concentração, em geral, é muito menor que a do ferro. Ocorre quase sempre como óxido de manganês bivalente, que se oxida na presença do ar, dando origem a precipitados negros. Segundo Parron (2011), para controle ou remoção de manganês e ferro são utilizados processos de aeração, sedimentação e filtração conjugados ao uso de oxidantes.

O valor de manganês das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,001 mg/L (em quase 50% dos poços) a 0,019 mg/L (poço 14), e uma média de 0,004 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de manganês variaram de 0,001 mg/L (poços 15, 16, 20 e 21) a 0,011 mg/L (poço 26), com média de 0,004 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de manganês (Figura 21).

Assim como o ferro, o alto teor de manganês nas águas subterrâneas pode ser um fator prejudicial à saúde humana e confere à água sabor desagradável, além de causar manchas em instalações sanitárias e roupas, e corrosão de tubulações.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o manganês é de até 0,1 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 21. Concentrações de Manganês nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.3. Alumínio

O alumínio é o elemento metálico mais abundante da crosta terrestre, ocorrendo naturalmente no solo, na água e no ar, sendo redistribuído ou movido, através de atividades naturais ou humanas. Não é encontrado como substância elementar, mas sim em suas formas combinadas como óxidos e silicatos. Além disso, é um dos elementos presentes nas chuvas ácidas, que contaminam os rios, lagos, peixes, aves e seres humanos. As concentrações de alumínio variam bastante nas águas subterrâneas, dependendo diretamente de fatores geológicos e físico-químicos. Já nas águas superficiais, as concentrações podem ser influenciadas diretamente por atividades

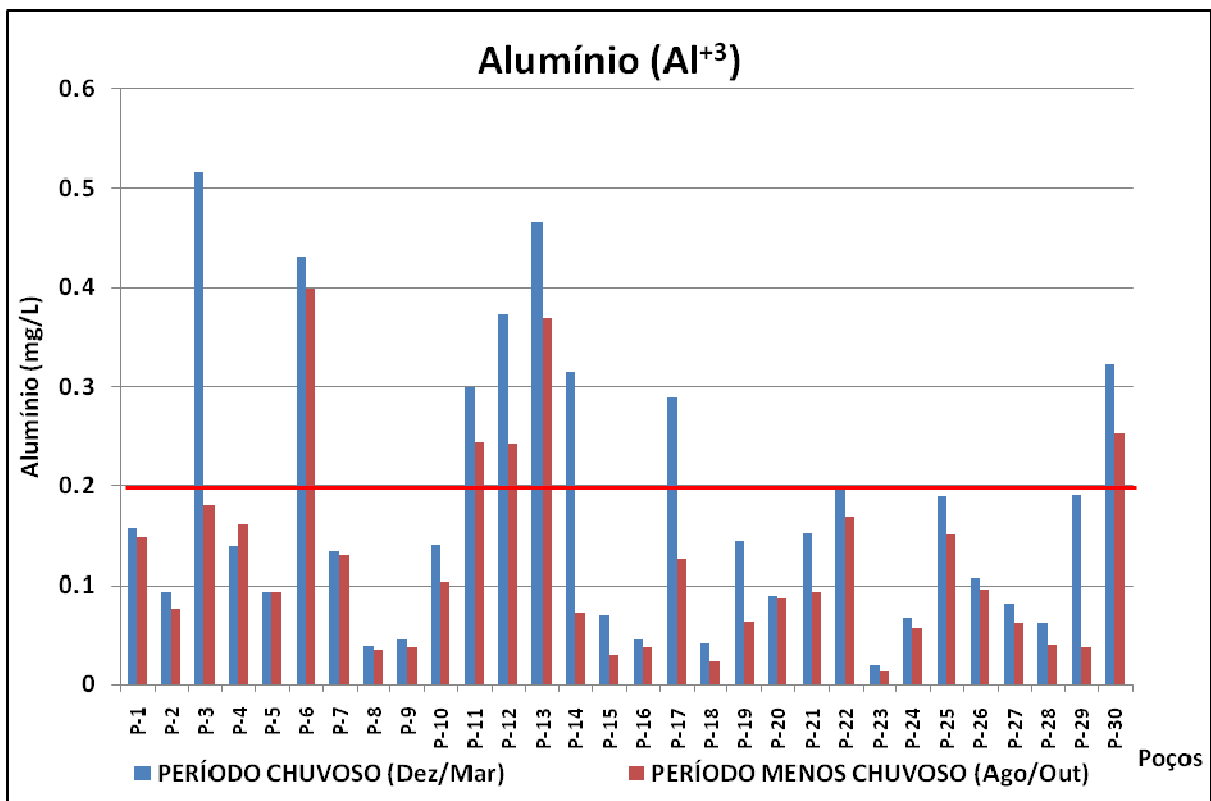
humanas através de descargas industriais e atividades ligadas à agricultura, com a presença de complexos de alumínio formados por matéria orgânica (PARRON, 2011).

O valor de alumínio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,02 mg/L (poço 23) a 0,515 mg/L (poço 3), e uma média de 0,177 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de alumínio variaram de 0,013 mg/L (poço 23) a 0,399 mg/L (poço 6), com média de 0,125 mg/L. De uma forma geral, o período chuvoso apresentou valores maiores de concentrações de alumínio se comparado ao período menos chuvoso (Figura 22).

Observa-se que oito poços apresentam teores elevados de alumínio, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. São eles, em ordem crescente por teor de alumínio: CONDOMÍNIO BELO JARDIM 1, SAEBE/SANTA ROSA, SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL, BENEVIDES INDÚSTRIA DE PISCINAS, SAEBE/RUA ALACIDE NUNES, SAEBE/PERIMETRAL SUL, SAEBE/MÉDICE II e SAEBE/PRAÇA JARDIM DE PARIS. Já o poço 14 (SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL). Estas concentrações elevadas de alumínio podem estar relacionadas a fatores geológicos, físico-químicos e a atividades antrópicas. O alto teor de alumínio nas águas subterrâneas é bastante preocupante, uma vez que há considerável evidência deste ser um elemento neurotóxico, sendo a osteomalacia uma doença característica em humanos expostos a elevadas quantidades de alumínio. Além disto, estudos recentes associam o acúmulo de alumínio no homem ao aumento de casos de demência senil do tipo Alzheimer (Cleto, 2008). Outros problemas relacionados ao consumo em excesso do alumínio são: alterações das propriedades organolépticas da água (sabor desagradável e coloração turva), problemas renais e distúrbios orgânicos, além de incrustações em tubulações e obstruções nas canalizações.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o alumínio é de até 0,2 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Oito poços (poços 3, 6, 11, 12, 13, 14, 17 e 30) apresentam valores acima do permitido pela legislação.

Figura 22. Valores de Alumínio nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.4. Bário

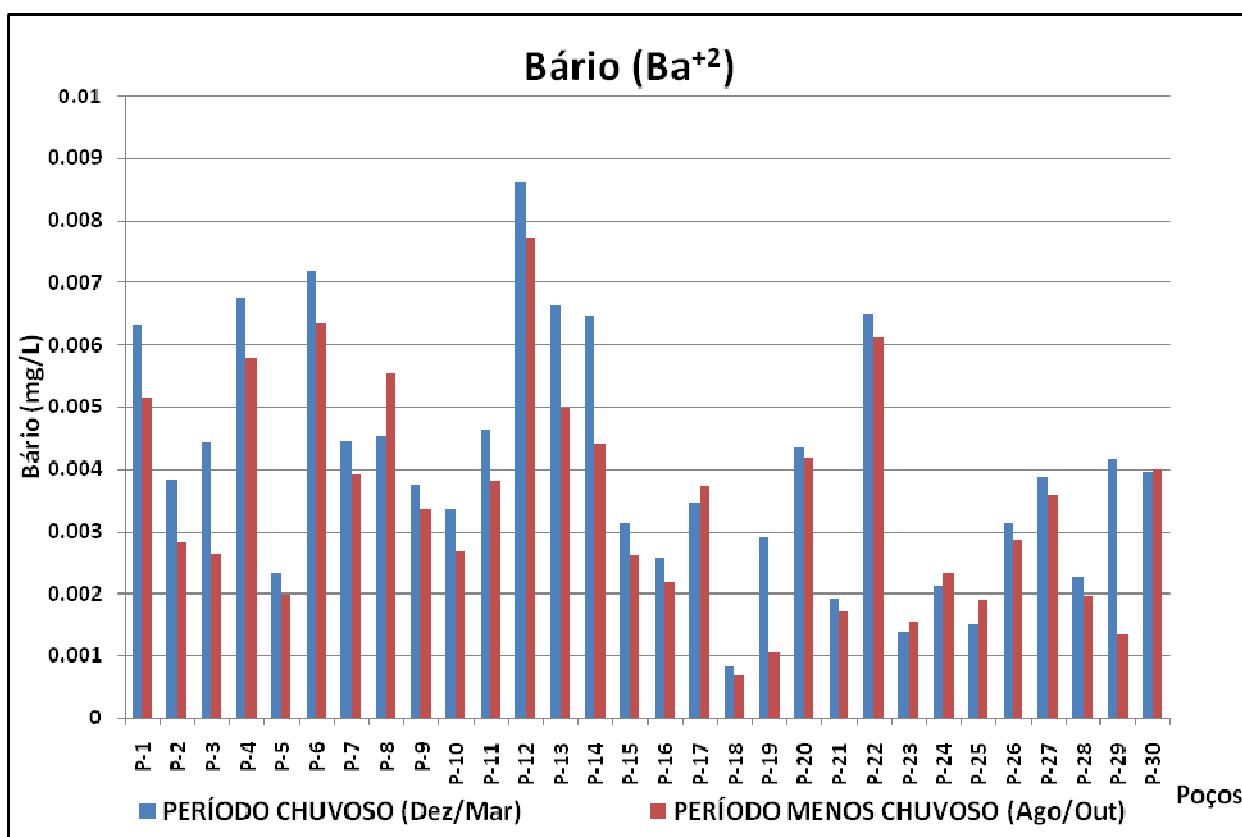
O bário ocorre em pequenas concentrações nas águas naturais e essencialmente sob a forma de barita (BaSO_4), podendo ser liberado para as águas subterrâneas através da solubilização deste mineral. As principais fontes naturais são o intemperismo e erosão de depósitos naturais, normalmente através de veios e feldspatos ricos em bário. Entre as atividades humanas que introduzem bário no meio ambiente, podemos citar a perfuração de poços, onde é empregado em lamas de perfuração; produção de pigmentos, fogos de artifício, vidros e defensivos agrícolas. Nas águas naturais o bário apresenta, em geral, concentrações de 0,01 mg/L, devido à reduzida solubilidade de seus sais. Os sais de bário mais solúveis são os cloretos, nitratos e, particularmente, os carbonatos.

O valor de bário das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00082 mg/L (poço 18) a 0,00862 mg/L (poço 12), e uma média de 0,004 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de bário variaram de 0,00069 mg/L (poço 18) a 0,00772 mg/L (poço 12), com média de 0,003 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 23).

Observa-se que o poço 12 (SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) apresenta o teor mais elevado de bário, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Enquanto isto, o poço 18 (CRECHE JARDIM DAS JURUTIS) apresenta o menor teor de bário, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Altas concentrações de bário em águas utilizadas para consumo humano podem provocar sérios problemas toxicológicos devido à sua característica de persistência no ambiente e ser acumulativo dentro da cadeia trófica, além de causar efeitos nocivos ao sistema cardiovascular e nervoso, através da constrição de vasos sanguíneos e elevação da pressão arterial. Além disto, pode causar náuseas, vômitos, diarreias, gastroenterites, perda de reflexos e paralisia muscular.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o bário é de até 0,7 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 23. Valores de Bário nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.5. Chumbo

O chumbo, juntamente com o mercúrio e o cádmio, faz parte do grupo dos metais pesados aos quais são associados os maiores riscos para a saúde pública. O chumbo está presente em diversos minerais, dentre os quais se destaca a galena (PbS). Geralmente, o chumbo encontra-se associado a outros metais nos sulfetos, tais como o zinco (blenda) e o ferro (pirita), além de outras impurezas, como o cobre e a prata. Segundo Santos (2011), as principais atividades humanas que introduzem chumbo no meio ambiente são: a utilização de encanamentos e soldas, plásticos, tintas, pigmentos e metalurgia. As concentrações de chumbo variam bastante nas águas subterrâneas, dependendo diretamente de fatores geológicos, físico-químicos e antrópicos (atividades industriais).

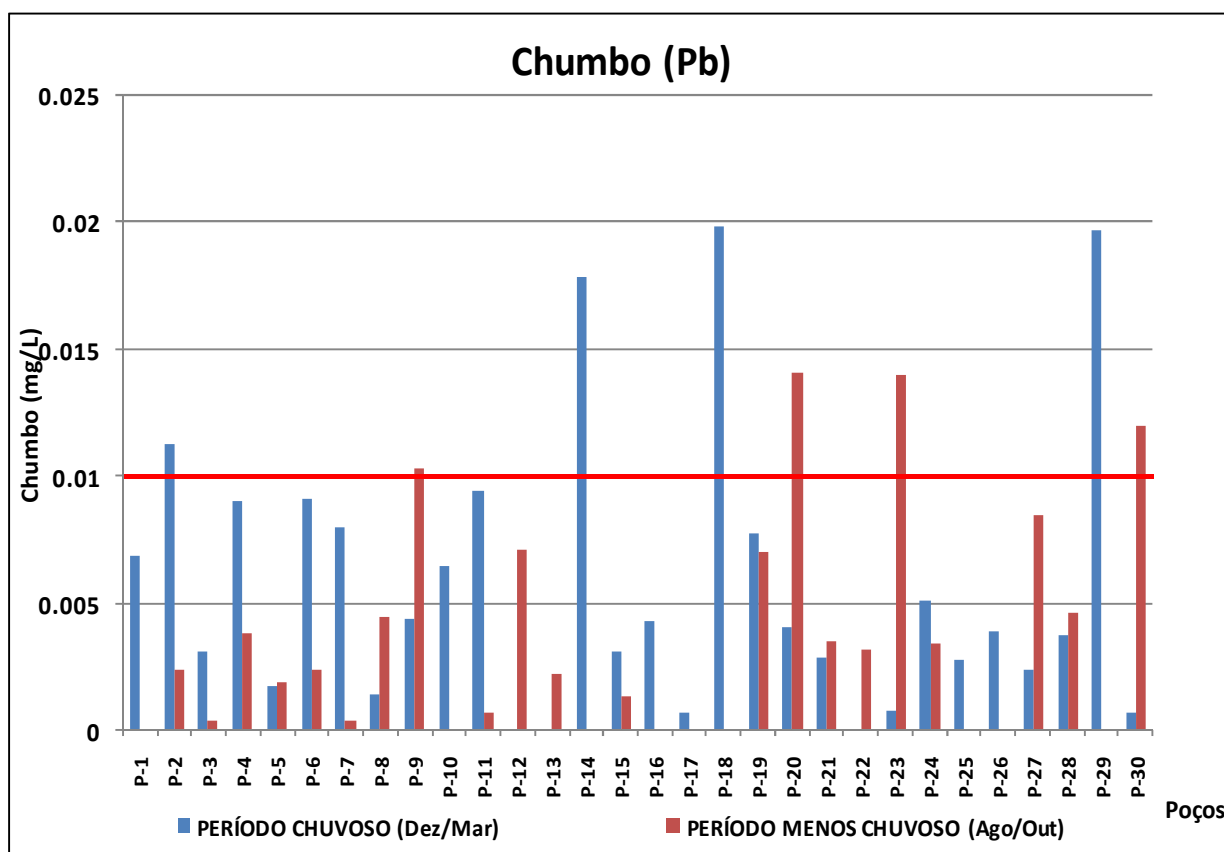
O valor de chumbo das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (poços 12 e 13) a 0,01991 mg/L (poço 18), e uma média de 0,16 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os teores de chumbo variaram de 0,00 mg/L (poços 1, 10, 14, 16, 17, 18, 25, 26 e 29) a 0,01412 mg/L (poço 14), com média de 0,009 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de chumbo (Figura 24).

Observa-se que oito poços apresentam teores elevados de chumbo, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. São eles, em ordem crescente por teor de chumbo: SAEBE/ESCOLA ALICE FANJAS, SAEBE/MAGUARY, BENEVIDES INDÚSTRIA DE PISCINAS, CLUB BARCELONA, RESTAURANTE O JAPONÊS, SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL, FAZENDA Y WATANABE e CRECHE JARDIM DAS JURUTIS. Estas concentrações elevadas de chumbo podem estar relacionadas a fatores geológicos, físico-químicos e/ou a atividades antrópicas. A presença de chumbo na água, provavelmente, está associada à presença de sulfetos metálicos de galena (PbS) disseminados na Formação Barreiras, além de esfalerita (ZnS) e covelita (CuS). Por outro lado, a presença de atividades industriais e/ou comerciais pode gerar contaminação do aquífero através de despejo de resíduos sólidos e solúveis tóxicos, conhecido como “lixo industrial”. O alto teor de chumbo nas águas subterrâneas é bastante preocupante, uma vez que este é um elemento tóxico cumulativo e sua intoxicação para o organismo humano traduz-se por alterações clínicas, doenças neurodegenerativas, neoplasia e saturnismo, causando atraso intelectual ou outras alterações neurológicas. Os principais efeitos da intoxicação por chumbo são: tontura, irritabilidade, dor de cabeça, perda de memória. A intoxicação aguda caracteriza-se pela sede intensa, sabor metálico na boca, inflamação gastrointestinal, vômitos e diarreias. O chumbo é um dos contaminantes ambientais mais comuns, tóxico para os homens e

animais, e que não possui nenhuma função fisiológica conhecida no organismo, podendo entrar no organismo pela respiração ou a através do consumo de água ou alimentos.

De acordo com a Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o chumbo é de até 0,01 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Oito poços (poços 2, 9, 14, 18, 20, 23, 29 e 30) apresentam valores acima do permitido pela legislação.

Figura 24. Concentrações de Chumbo nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.6. Cobre

O cobre ocorre em águas naturais em pequenas concentrações e essencialmente sob a forma de calcopirita (CuFeS_2), calcosita (Cu_2S), covelita (CuS) e a malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), podendo ser liberado para as águas subterrâneas através da solubilização destes minerais. Segundo Santos (2011), a solubilidade do cobre é diretamente influenciada pelo pH da água, sendo que a respectiva acidez vai determinar uma maior ou menor solubilização/precipitação deste metal. Em águas alcalinas a mobilidade do cobre é muito reduzida, uma vez que sua concentração é muito baixa,

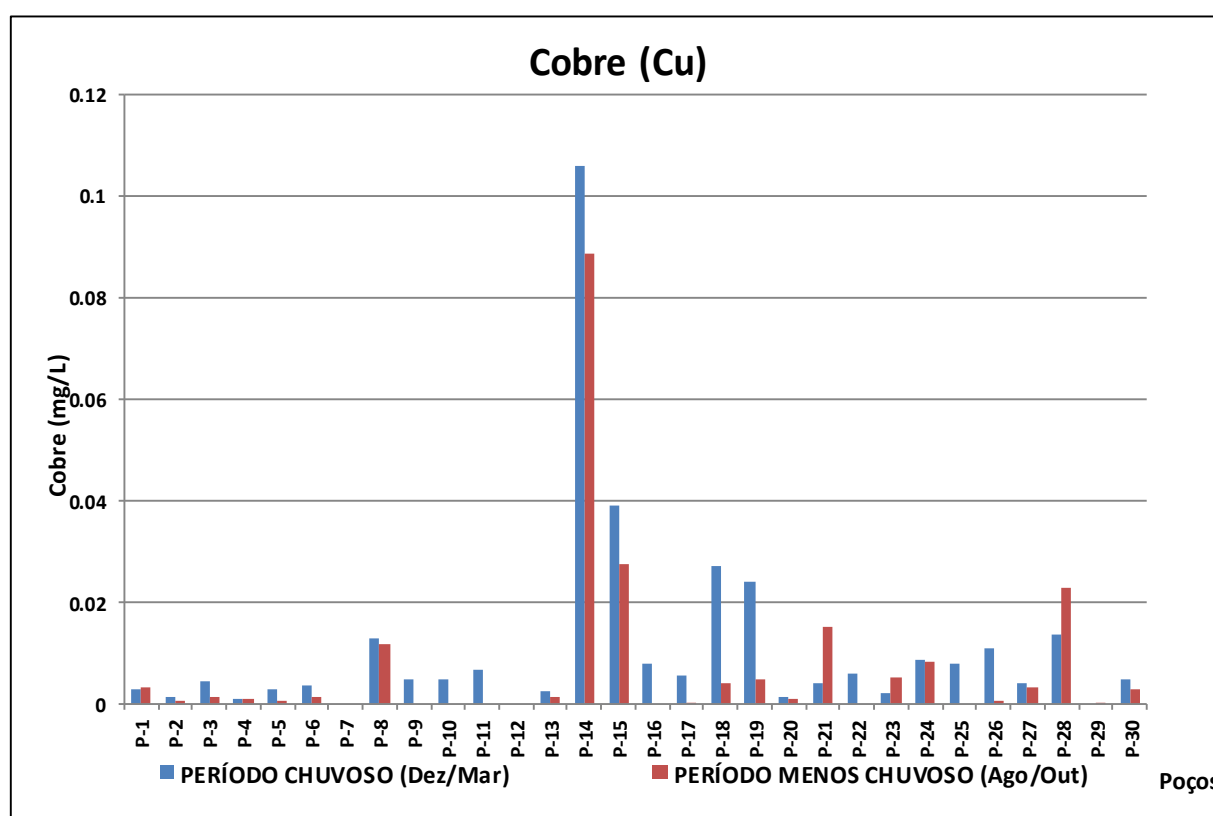
como acontece nas águas subterrâneas estudadas, as quais possuem valores médios de pH de 6,5. Nas águas subterrâneas o cobre apresenta, em geral, concentrações de 1 mg/L.

O teor de cobre das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (poços 7, 12 e 29) a 0,106 mg/L (poço 14), e uma média de 0,012 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de cobre variaram de 0,00 mg/L (em quase metade dos poços amostrados) a 0,089 mg/L (poço 14), com média de 0,009 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 25).

Observa-se que o poço 14 (SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL) apresenta o teor mais elevado de cobre, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso, valor este bem abaixo do limite estabelecido pela Portaria nº 2.914/2011 (2,0 mg/L). Apesar do cobre ser considerado um elemento essencial para todos os seres vivos, altas concentrações deste em águas utilizadas para consumo humano pode gerar sabor metálico à água, além de formação de precipitados de hidróxido de cobre e manchas em tubulações e instalações hidráulicas.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o cobre é de até 2 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 25. Concentrações de Cobre nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.7. Cobalto

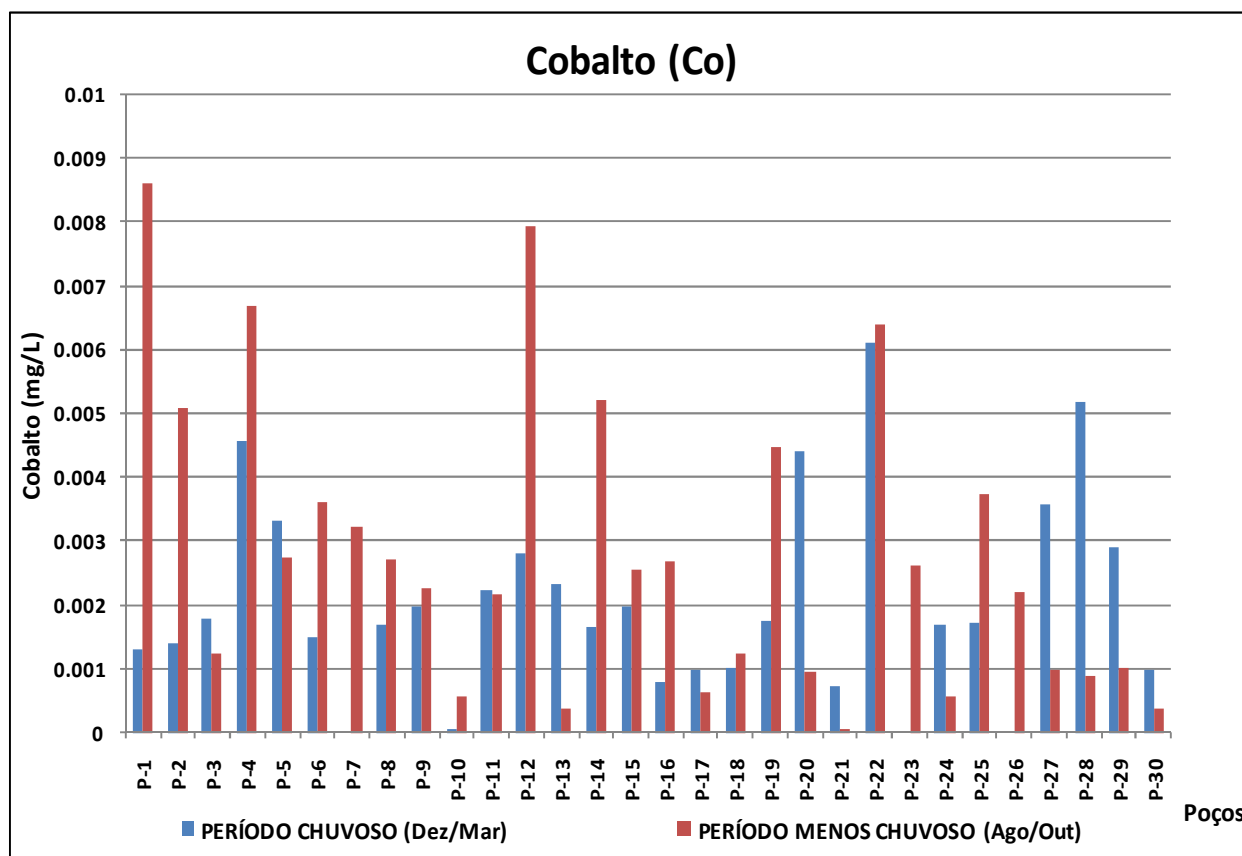
O cobalto é um elemento de transição que, geoquimicamente, se assemelha ao ferro, substituindo-o em vários minerais. Ocorre em águas naturais em pequenas concentrações e possui forte ligação geoquímica com o manganês, com o qual apresenta correlação positiva de concentrações, tanto em solo como em água. A precipitação e a adsorção do cobalto em óxidos de manganês são os fenômenos mais importantes que controlam o cobalto em águas naturais. O cobalto pode ocorrer em águas subterrâneas através de processos naturais como anomalias geoquímicas no aquífero ou por atividades antrópicas.

O teor de cobalto das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,00 mg/L (poços 7, 23 e 26) a 0,00612 mg/L (poço 22), e uma média de 0,002 mg/L. No período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de cobalto variaram de 0,00006 mg/L (poço 21) a 0,00863 mg/L (poço 1), com média de 0,003 mg/L. Tanto o período menos chuvoso quanto o período chuvoso apresentam valores médios semelhantes de magnésio (Figura 26).

O cobalto é considerado um elemento essencial para a função normal de todas as células do corpo humano particularmente das células da medula óssea, sistemas nervoso e gastrointestinal, além de favorecer o desenvolvimento dos glóbulos vermelhos no sangue. Porém, altas concentrações deste elemento em águas utilizadas para consumo humano, pode causar disfunção da glândula tireóide, dermatites, problemas cardíacos e papeira.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o cobalto é de até 0,2 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 26. Gráfico dos valores de Cobalto nas águas subterrâneas analisadas.



8.2.8. Cromo

O cromo ocorre em pequenas concentrações nas águas naturais e encontra-se amplamente distribuído no ambiente. Segundo Santos (2011), o cromo possui dois estados de oxidação no ambiente natural: hexavalente e trivalente. O Cr (III) é pouco móvel nas águas subterrâneas e apresenta baixa toxicidade para o ser humano se ingerido por via oral, pois é um nutriente essencial, enquanto que o Cr (VI) é altamente móvel e possui elevada toxicidade por ser cancerígeno. Geralmente, a presença de cromo em águas subterrâneas está associada à contaminação de origem antrópica, ligada a atividades como indústrias de metal e de tratamento de madeira, curtumes, mineração e processos de beneficiamento do metal, indústrias de manufaturas de pigmentos, de filmes fotográficos e de inibidores de corrosão. Porém, o cromo pode ser gerado através de processos naturais, estando associado aos minerais da rocha matriz do aquífero.

Embora o cromo não seja considerado um elemento tóxico ao organismo humano, se consumido em excesso pode causar problemas adversos pelo fato do cromo hexavalente ser altamente cancerígeno.

Todos os teores de cromo das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,00037 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o cromo é de até 0,05 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

8.2.9. Cádmio

O cádmio ocorre em pequenas concentrações nas águas naturais e encontra-se em concentração muito variável tanto na forma dissolvida como em particulados. O potencial redox tem pouco efeito na especiação. A sorção em sólidos em suspensão tais como argila é o processo dominante. Outros processos como a fotólise e a volatilização tem pouco importância. As principais atividades humanas que introduzem cádmio no meio ambiente são: combustíveis fósseis, pigmentos, baterias, soldas, equipamentos eletrônicos, lubrificantes, acessórios fotográficos, defensivos químicos, corrosão de tubos galvanizados e refinarias de minérios. Nas águas naturais o cádmio apresenta, em geral, concentrações inferiores a 0,001 mg/L.

Devido ao cádmio ser um metal de elevado potencial tóxico e ser acumulativo dentro da cadeia trófica, seu consumo em excesso pode provocar disfunção renal, hipertensão, arterosclerose, inibição no crescimento, doenças crônicas em idosos e câncer.

Todos os teores de cádmio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,0003 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração

diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o cádmio é de até 0,005 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

8.2.10. Níquel

O níquel ocorre em pequenas concentrações em águas naturais e está geralmente associado aos sulfetos de ferro (ou cobre), depósitos aluviais de silicatos e óxidos/hidróxidos. Os principais processos antrópicos responsáveis pela concentração de níquel em águas subterrâneas são a queima de combustíveis fósseis, processos de mineração e fundição do metal.

Altas concentrações de níquel no organismo humano podem gerar efeitos adversos, pelo fato de ser um potencial elemento cancerígeno, principalmente no desenvolvimento de câncer respiratório.

Mais de 50% das amostras contendo os teores de níquel das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,00015 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental. A média registrada durante o período chuvoso (dezembro e março) foi de 0,007 mg/L. Já a média obtida durante o período menos chuvoso (agosto e outubro) foi de 0,005 mg/L.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o níquel é de até 0,07 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

8.2.11. Zinco

O zinco é um elemento que se caracteriza pela sua mobilidade, sendo encontrado amplamente disperso no ambiente, podendo dissolver-se na água. Sua mobilidade é mais elevada em condições ácidas e oxidantes, sendo muito baixa em meios redutores e alcalinos. Os principais processos naturais que geram o aparecimento deste elemento na água são a lixiviação de terrenos e rochas a corrosão de canalizações de ferro galvanizado. Com relação ao seu aparecimento através de processos antrópicos, podemos citar a contaminação por efluentes industriais.

Embora o zinco não seja considerado um elemento tóxico ao organismo humano, se consumido em excesso pode causar problemas digestivos além de causar sabor desagradável à água e formação de depósitos em tubulações/canalizações.

Mais de 50% das amostras contendo os teores de zinco das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,00023 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental. A média registrada durante o período chuvoso (dezembro e março) foi de 0,035 mg/L. Já a média obtida durante o período menos chuvoso (agosto e outubro) foi de 0,025 mg/L.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o zinco é de até 5 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

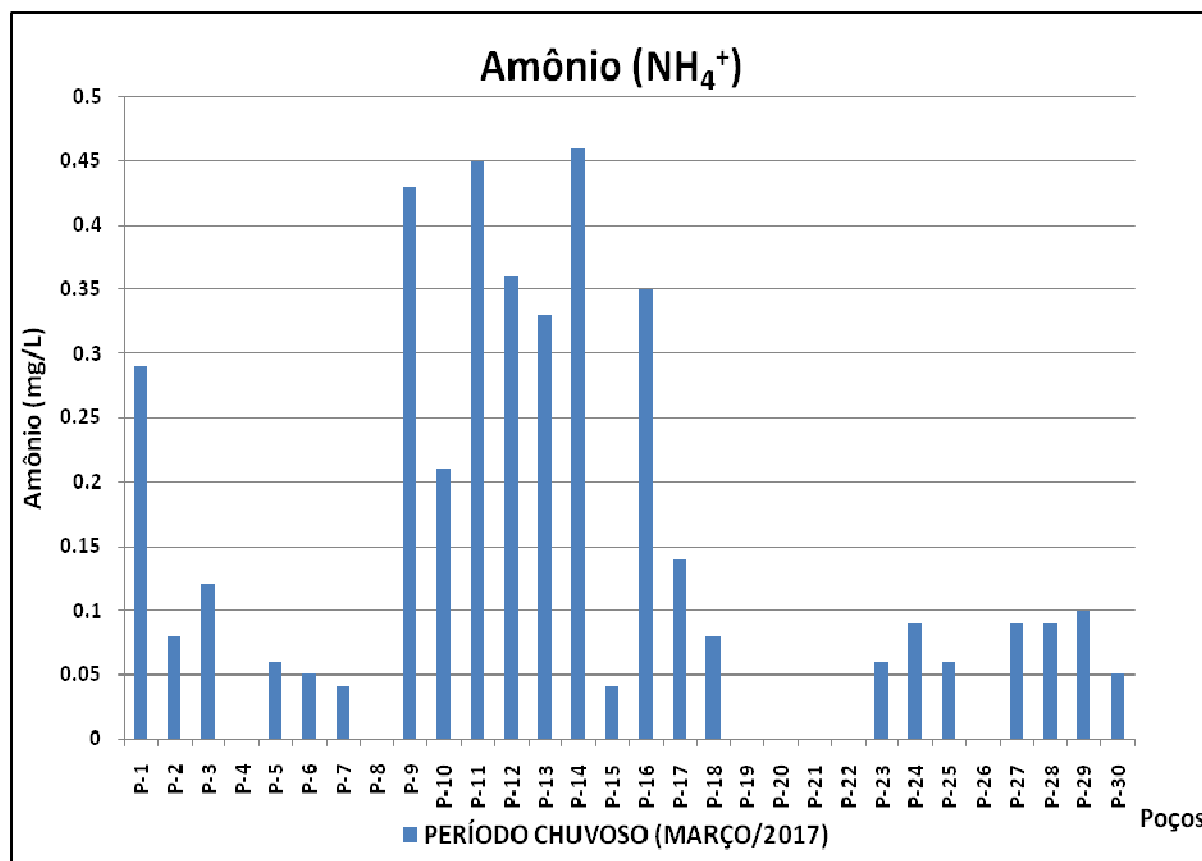
8.2.12. Amônio (N-NH₄⁺)

Com base em Parron (2011), o íon amônio (NH₄⁺), também conhecido como amônia ionizada, devido à sua carga elétrica, é um cátion formado pela protonação da amônia (NH₃) e ocorre em baixos teores em águas naturais, devido ao processo de degradação biológica da matéria orgânica. O processo pelo qual o nitrogênio molecular (N₂) é convertido em amônio é denominado fixação de nitrogênio. Concentrações mais altas podem ser encontradas em esgotos e efluentes

industriais. Altas concentrações de amônio em águas superficiais podem ser indicação de contaminação por esgoto bruto, efluentes industriais e presença de fertilizantes. Em águas muito alcalinas e com a presença de compostos amoniacais também ocorre a formação de altos níveis de NH_4^+ .

Mais de 50% das amostras contendo os teores de amônio das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e todas as amostras do período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,03 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental. A amostragem realizada em março/2017 (Figura 27), mostra valor mínimo de teor de amônio de 0,00 mg/L e valor máximo de 0,46 mg/L (poço 14, SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL), a média registrada neste período foi de 0,175 mg/L. O aumento nos valores de amônio em águas subterrâneas durante o período chuvoso pode estar relacionado à elevação do lençol freático, tornando-o mais próximo de fossas, que são fontes geradoras de amônio (ARAÚJO, 2011).

Apesar da Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, não estabelecer valores para o limite de potabilidade para o amônio nas águas destinadas ao consumo humano, valores superiores a 0,06 mg/L (CUSTÓDIO E LLAMAS, 1976) podem indicar a ocorrência de oxidação para nitrato (N-NO_3^-), resultando no processo de nitrificação. A maioria dos poços amostrados possui valor elevado de amônio, o que pode indicar uma contaminação destas águas, pois a elevação no teor deste elemento sinaliza a interferência de fatores como fossas, esgotos domésticos, lixo, rejeitos de origem industrial ou fertilizantes agrícolas. Portanto, somente 50% dos poços amostrados apresentam águas dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

Figura 27. Teores de amônio (NH_4^+) das águas subterrâneas rasas analisadas (março/2017).

8.2.13. Nitrito (N-NO_2^-)

Segundo Parron (2011), o nitrito é um estado de oxidação intermediário de nitrogênio, e ocorre tanto pela oxidação do amônio, como pela redução do nitrato. Ambos os processos (oxidação e redução) ocorrem em estações de tratamento de esgoto, em sistemas de distribuição de água e em águas naturais. Em águas subterrâneas, o nitrito pode ser encontrado em concentrações de até 0,1 mg/L.

Segundo Crespim (2017), o nitrito é um parâmetro simples, porém muito relevante quanto à verificação da qualidade de águas destinadas ao consumo, pois a detecção de sua presença, aponta contaminações recentes, com procedência de material orgânico animal ou vegetal. Além disto, pode ser identificado como consequência de decomposição biológica por ação de microrganismos, ou até mesmo, oriundo de ativos inibidores de corrosão em instalações de indústrias.

Quase todas as amostras contendo os teores de nitrito das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março) e período menos chuvoso (agosto e outubro), apresentaram valores

inferiores ao LD (Limite de Detecção) que é de 0,02 mg/L, não sendo possível apresentar os resultados através de gráficos. O LD do método para determinado composto/substância é definido como a menor concentração diferente de zero que pode ser reportada com 99% de confiança, e seu estudo envolve todas as etapas do método analítico, desde a preparação das amostras, até a análise instrumental. Os resultados disponíveis apresentam variação de 0,024 mg/L a 0,16 mg/L na amostragem realizada em agosto/2017. Devido ao comportamento instável do nitrito, a detecção de baixos índices deste composto nas águas subterrâneas rasas já era previsto.

De acordo com a Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o nitrito é de até 1 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Portanto, todas as águas analisadas estão dentro do padrão/limite aceitável para consumo.

8.2.14. Nitrato (N-NO₃⁻)

O nitrato é um parâmetro muito importante, pois é um grande indicador de contaminação e poluição das águas subterrâneas por atividade antrópica. Quando encontrado em águas minerais é associado ao risco de duas doenças graves como a metahemoglobinemia, conhecida como síndrome do bebê azul e o câncer gástrico. Esse elemento é considerado prejudicial à saúde, porém é um importante agente na agricultura.

O nitrato em águas subterrâneas origina-se principalmente de quatro fontes: aplicação de fertilizantes com nitrogênio, bem como inorgânicos e de esterco animal, em plantações; cultivo do solo; esgoto humano depositado em sistemas sépticos e deposição atmosférica (BAIRD; CANN, 2011).

A decomposição aeróbia finalmente leva à conversão de nitrogênio em nitrito e depois em nitrato. Nitrogênio com alto teor de nitrato e com baixo teor de amônia sugere que a poluição aconteceu há mais tempo (VESILIND; MORGAN, 2013). A maior parte do nitrogênio é absorvida pelas plantas na forma inorgânica, como amônio e, principalmente, nitrato. O excesso de nitrogênio acrescentado às culturas agrícolas via fertilização também pode ser fonte de contaminação de água superficial e subterrânea, resultado da perda de nitrato por lixiviação em solos.

Os materiais mais comuns encontrados em águas residuais domiciliares, que podem causar danos para os cursos de águas naturais ou criar problemas para a saúde humana são: materiais orgânicos, medidos pela DBO; nitrogênio (N); fósforo (P); sólidos suspensos (SS) e organismos patogênicos, estimados por coliformes. As águas residuais são descarregadas de domicílios, estabelecimentos comerciais e indústrias por meio de esgotos sanitários.

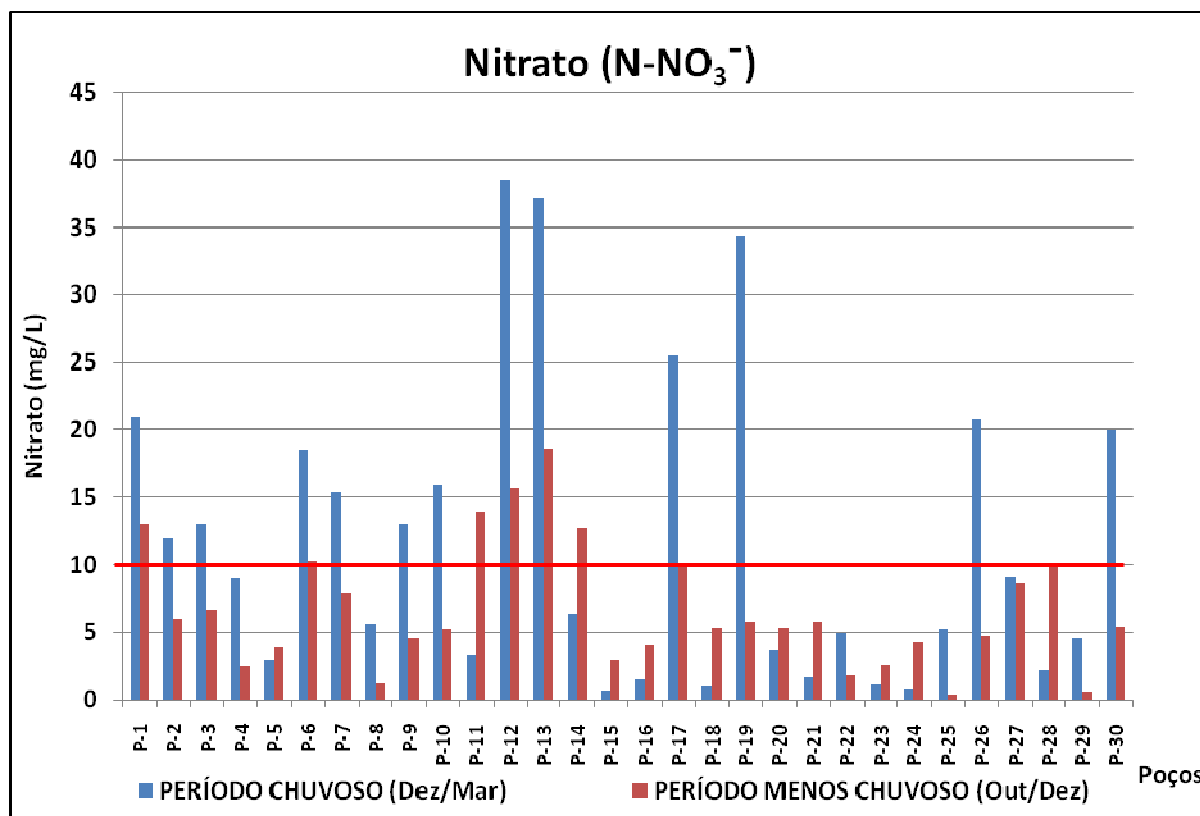
O teor de nitrato das águas coletadas durante o período chuvoso (dezembro e março), apresentou variação de 0,7 mg/L (poço 15) a 38,5 mg/L (poço 12), e uma média de 11,623 mg/L. O poço 12 (SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) apresentou resultado quatro vezes maior do que o limite estabelecido pela Portaria N° 2.914/2011, que é de 10 mg/L. No período chuvoso ocorre a elevação do lençol freático, propiciando a proximidade de sistemas de saneamento *in situ*, contribuindo para o aumento dos índices de nitrato (Araújo, 2011). Já no período menos chuvoso (agosto e outubro), os valores de nitrato variaram de 0,4 mg/L (poço 25) a 18,6 mg/L (poço 13), com média de 6,657 mg/L. De uma forma geral, o período chuvoso apresentou valores maiores de concentrações de nitrato se comparado ao período menos chuvoso (Figura 28).

Observa-se que 15 poços apresentam teores elevados de nitrato, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. São eles, em ordem crescente por teor de nitrato: SAEBE/MAGUARY, SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL, SAEBE/PÇ. JARDIM DE PARIS, SAEBE/ESCOLA ALICE FANJAS, SAEBE/SANTA ROSA, SAEBE/MADRE TEREZA, SAEBE/BEGOLÂNDIA, SAEBE/PERIMETRAL SUL, BENEVIDES INDÚSTRIA DE PISCINAS, ISO AMAZON FÁBRICA DE ISOPOR, SAEBE/SEDE, CONDOMÍNIO BELO JARDIM 1, COM. NOSSA SENHORA DO CARMO, SAEBE/MÉDICE II e SAEBE/RUA ALACIDE NUNES. Estas concentrações elevadas de nitrato provavelmente estão relacionadas a atividades antrópicas originadas pela ausência de saneamento básico local e caracterizada pela descarga de esgoto doméstico e utilização de fossas negras, próximas a maioria dos poços.

Os dois poços que apresentam maiores índices de concentração de nitrato (SAEBE/MÉDICE II e SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) apresentam correlação positiva, acompanhando o aumento da condutividade elétrica e dos íons: Na^+ e Cl^- . Esta relação deixa explícita a influência de fossas nas águas desses poços, pois a utilização de fossas negras como sistemas de saneamento *in situ*, viabilizam a percolação de efluentes no solo a partir de sua lixiviação provocada pela água da chuva, facilitando a infiltração destes efluentes.

De acordo com a Portaria n° 2.914/2011 do Ministério da Saúde, o limite de potabilidade para o nitrato é de até 10 mg/L, para as águas destinadas ao consumo humano. Geralmente, ocorre em pequenas quantidades em águas superficiais, mas pode atingir concentrações elevadas em algumas águas subterrâneas (até 5 mg/L). Metade dos poços amostrados (15 poços) apresentam em suas águas elevado índice de nitrato, acima do padrão/limite aceitável para consumo humano.

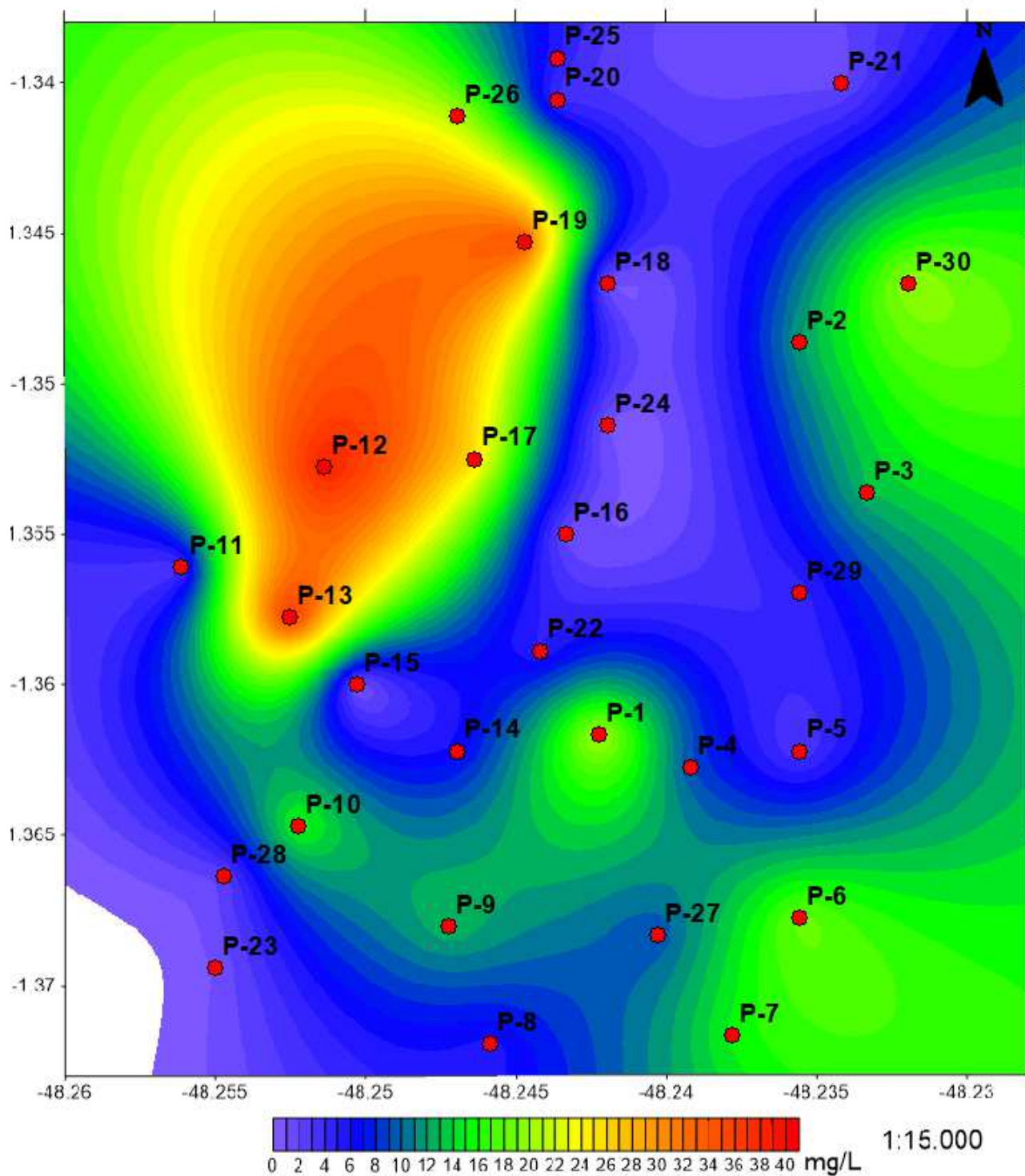
Figura 28. Variação sazonal de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas.



De uma forma geral, o nitrato (N-NO_3^-) apresentou-se bem distribuído na área de estudo em todos os períodos amostrais. Porém, durante o período chuvoso (dezembro e março/2017) há uma elevação nos índices de nitrato, onde os maiores índices de nitrato estão localizados na porção noroeste da área de estudo (Figura 29). Durante o período menos chuvoso, o nitrato (N-NO_3^-) exibiu valores mais elevados na porção centro oeste da área de estudo (Figura 30). Em ambos os períodos (chuvoso e menos chuvoso) destacam-se as concentrações expressivas de nitrato nos poços 12 e 13 (SAEBE/MÉDICE II e SAEBE/RUA ALACIDE NUNES).

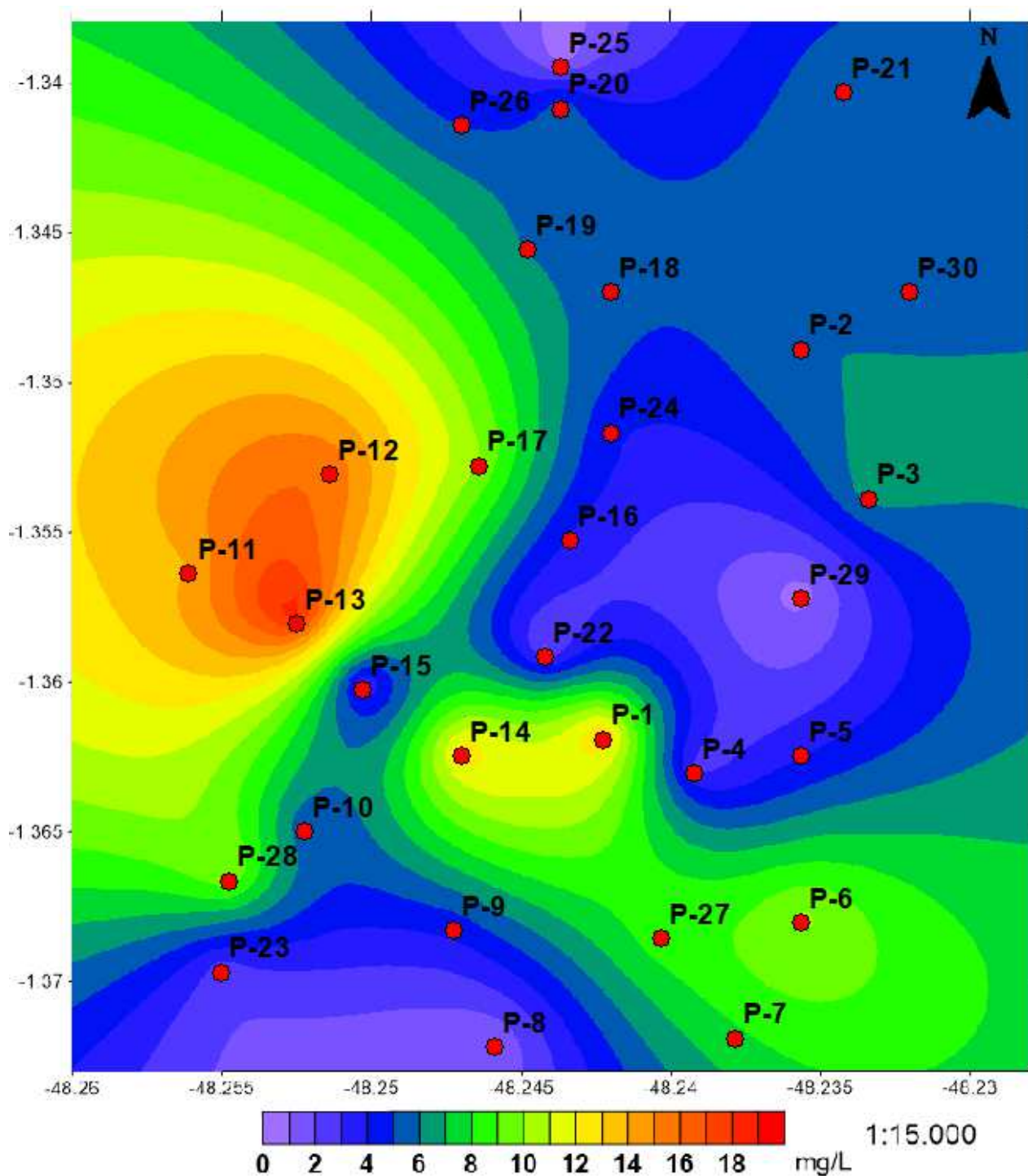
Vale ressaltar também, que em poços mais rasos, como o poço 19 (COMUNIDADE NOSSA SENHORA DO CARMO) com 18 metros de profundidade, os elevados índices de nitrato podem estar relacionados à construção inadequada e posicionamento incorreto dos filtros, além da proximidade de fossas, o que facilita a contaminação destas águas.

Figura 29. Distribuição de valores de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas na área de estudo no período chuvoso (março/2017).



Fonte: Surfer 10.0.

Figura 30. Distribuição de valores de nitrato (N-NO_3^-) das águas subterrâneas rasas analisadas na área de estudo no período menos chuvoso (agosto/2017).



Fonte: Surfer 10.0.

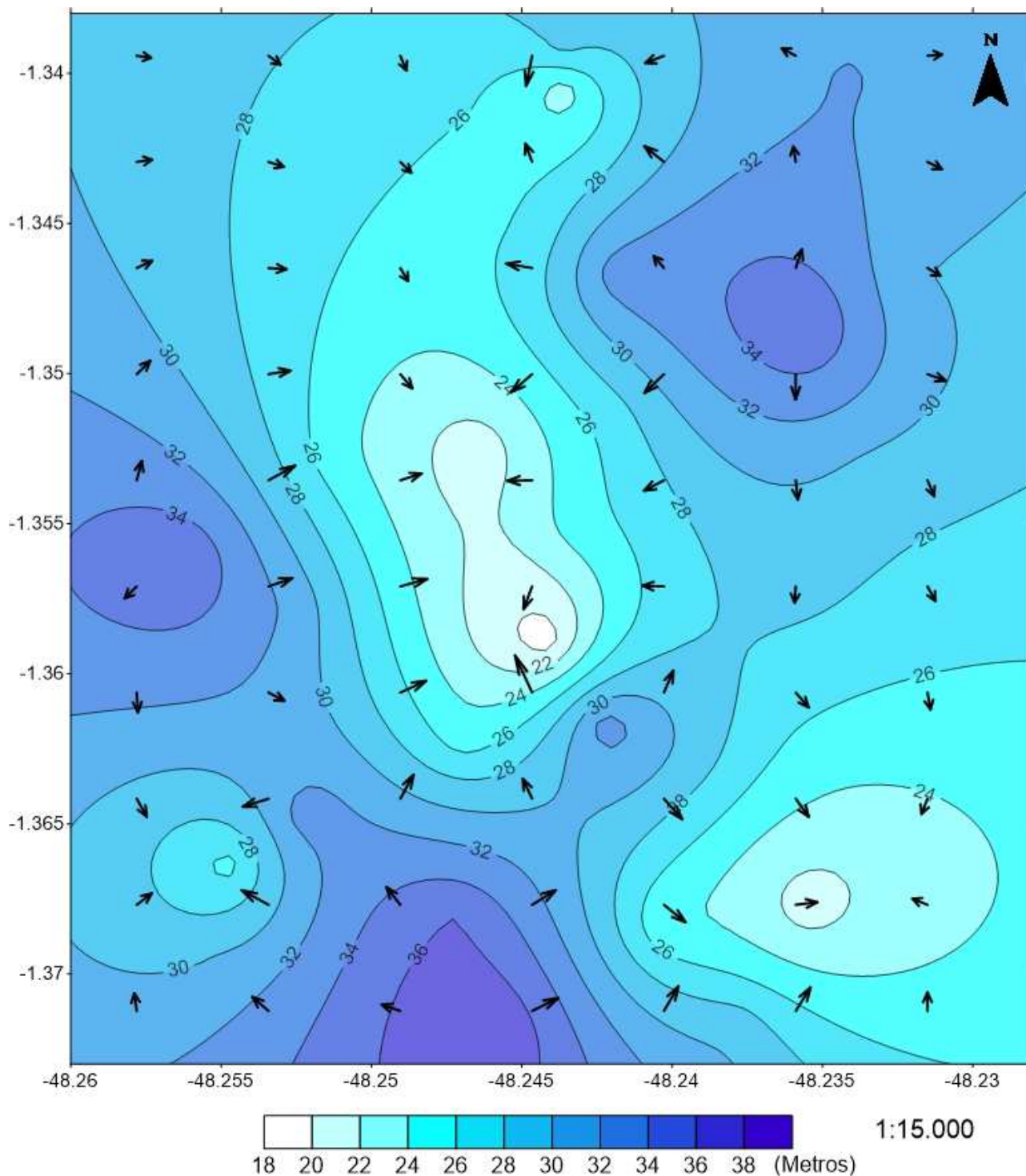
9. SENTIDO DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Segundo Ferrari (2010), a importância do estudo do fluxo de água subterrânea e do transporte de poluente em aquíferos livres e rasos se evidencia quando se analisam tais aquíferos quanto a duas importantes características: vulnerabilidade a poluentes e localização geográfica. A reduzida espessura da zona não saturada dos aquíferos livres e rasos facilita o transporte de poluentes que possam vir a atingir a zona saturada (FOSTER E HIRATA, 1988). A associação destes dois fatores é especialmente importante em países como o Brasil, onde aproximadamente 40% da população utilizam fossas rudimentares ou não possuem qualquer sistema de saneamento (FERRARI, 2006).

Para analisar e interpretar o sentido preferencial de fluxo hídrico da área de estudo foram elaborados mapas potenciométricos do período chuvoso (Figura 31) e do período menos chuvoso (Figura 32). Estes mapas foram construídos através de linhas isopotenciométricas, obtidas pela resultante da diferença entre a cota dos poços e a profundidade do nível estático. Com o objetivo de aprimorar os resultados, foi executado o cadastramento de novos poços, para melhor distribuição espacial dos poços/amostras, além da realização de novas medidas de cotas topográficas com GPS geodésico e nivelamento ortométrico. A elaboração do mapa foi realizada em SIG através dos softwares *ArcGis* 10.3 e *Surfer* 10.0.

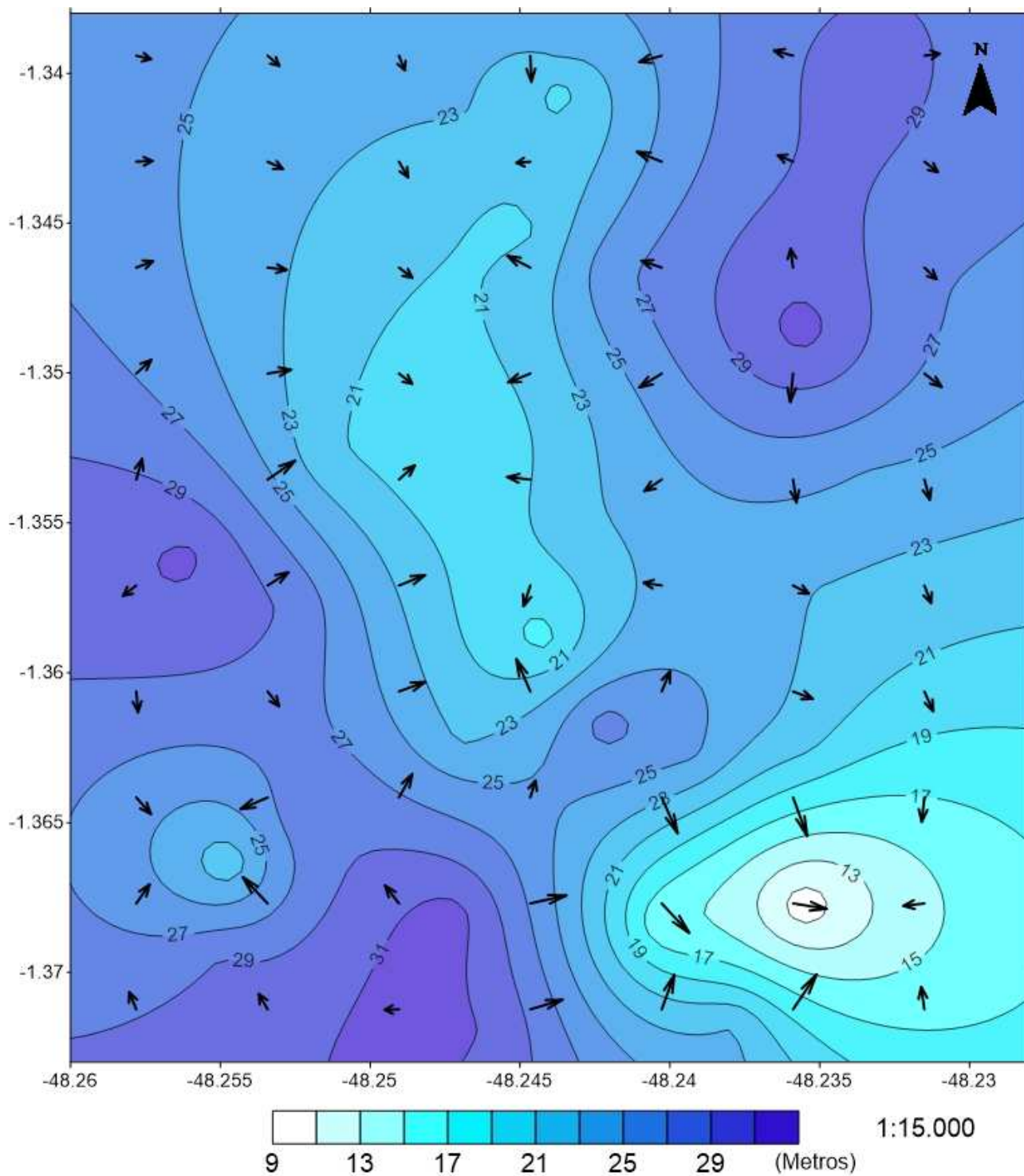
Por meio da análise dos mapas potenciométricos da área de estudo (Figuras 31 e 32), os resultados obtidos mostram que: as zonas de recarga são representadas por setas divergentes e as áreas de descarga correspondem às setas convergentes; o tipo de recarga do aquífero livre Barreiras, se processa de forma direta nas porções oeste, sul e nordeste da área de pesquisa. Os menores valores de nível da água foram encontrados nos poços situados em cotas topográficas mais baixas. O sentido de fluxo destas é concordante com a morfologia da superfície topográfica do terreno. No restante da área, as descargas das águas subterrâneas rasas ocorrem nas áreas leste, noroeste e sudoeste da área de estudo e desempenham um importante papel na qualidade das águas superficiais, utilizadas no abastecimento público e na manutenção dos principais rios da região, como o rio Benfica; na zona de recarga das porções noroestes e sudoeste, o sentido de fluxo está, predominantemente, direcionado para E-W, enquanto que na zona de recarga da região leste o fluxo tende para N-S. A profundidade média da superfície potenciométrica durante o período chuvoso foi de 29 metros, enquanto que no período menos chuvoso foi de 20 metros.

Figura 31. Mapa de sentido preferencial de fluxo das águas subterrâneas rasas no período chuvoso (março/2017).



Fonte: Surfer 10.0.

Figura 32. Mapa de sentido preferencial de fluxo das águas subterrâneas rasas no período menos chuvoso (agosto/2017).



Fonte: Surfer 10.0.

10. VULNERABILIDADE DO AQUÍFERO LIVRE BARREIRAS

A vulnerabilidade à poluição dos aquíferos pode ser definida como a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero (PARALTA, 2003). De acordo com Foster e Hirata (1988), A vulnerabilidade de um aquífero pode ser entendida com base em duas funções: a primeira se refere a “acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes (advecção de contaminantes)”; a segunda função é definida pela “capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação)”.

A metodologia utilizada para classificar a vulnerabilidade do aquífero livre Barreiras na área de estudo foi a GOD que foi desenvolvida por Foster & Hirata (1988) para a Organização Mundial de Saúde, para atender as necessidades de países em desenvolvimento por não necessitar de grandes quantidades de informações em relação ao método DRASTIC. De acordo com Foster (2006), o método GOD considera dois fatores básicos: as barreiras hidráulicas ou nível de inacessibilidade à zona saturada do aquífero e a capacidade de atenuação da litologia da zona vadosa e camadas confinantes do aquífero (Quadro 9).

Quadro 9. Fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero a contaminação.

Componentes de Vulnerabilidade	Dados Hidrogeológicos	
	Idealmente necessários	Disponíveis
Inacessibilidade Hidráulica	Grau de confinamento do aquífero.	Tipo de confinamento da água subterrânea.
	Profundidade até o lençol freático ou a posição da água subterrânea.	Profundidade até o lençol freático.
	Condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante.	
Capacidade de atenuação	Distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante.	Grau de consolidação / fissuração desses estratos.
	Mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante.	Características litológicas.

Fonte: Foster (2006).

O método GOD corresponde aos seguintes indicadores: Parâmetro G (*Groundwater occurrence*) que é a ocorrência de água subterrânea, onde os valores são obtidos dentro de um intervalo de 0 a 1; Parâmetro O (*Overall aquifer class*) que é a classificação dos estratos acima da zona saturada do aquífero em termos do grau de consolidação e caráter litológico, esta propriedade é o segundo ponto na escala de 0,3 a 1; Parâmetro D (*Depth to groundwater table*), que é a profundidade do topo do aquífero, definindo o terceiro ponto em uma escala de 0,4 a 0,9. O índice da escala GOD varia entre 0 e 1 sendo o mínimo qualificado como vulnerabilidade insignificante e o máximo como extrema.

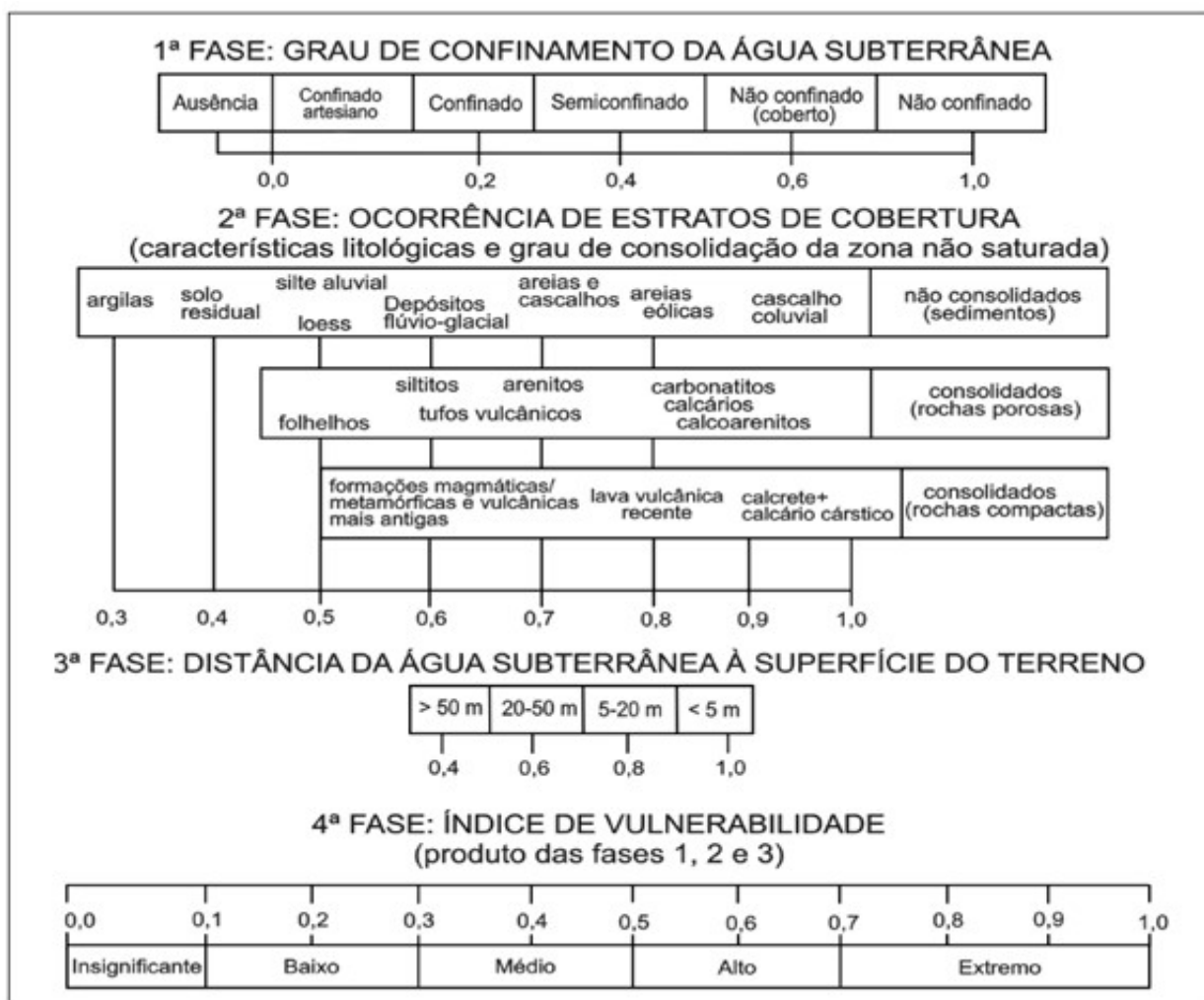
Quadro 10. Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.

Definição das Classes de Vulnerabilidade	
Classe de Vulnerabilidade	Definição Correspondente
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.
Moderada	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.
Baixa	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando continua e amplamente lançados ou lixiviados.
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: Foster (2006).

Com a elaboração de mapas de vulnerabilidade do aquífero é possível caracterizar uma determinada área de acordo com a sua suscetibilidade à contaminação, uma importante ferramenta no planejamento do uso do solo, na identificação de locais adequados para a deposição de resíduos sólidos e outras atividades de impacto ambiental, bem como, na seleção de locais para instalação de redes de monitoramento e avaliação da contaminação das águas subterrâneas.

Figura 33. Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



Fonte: Foster (2006).

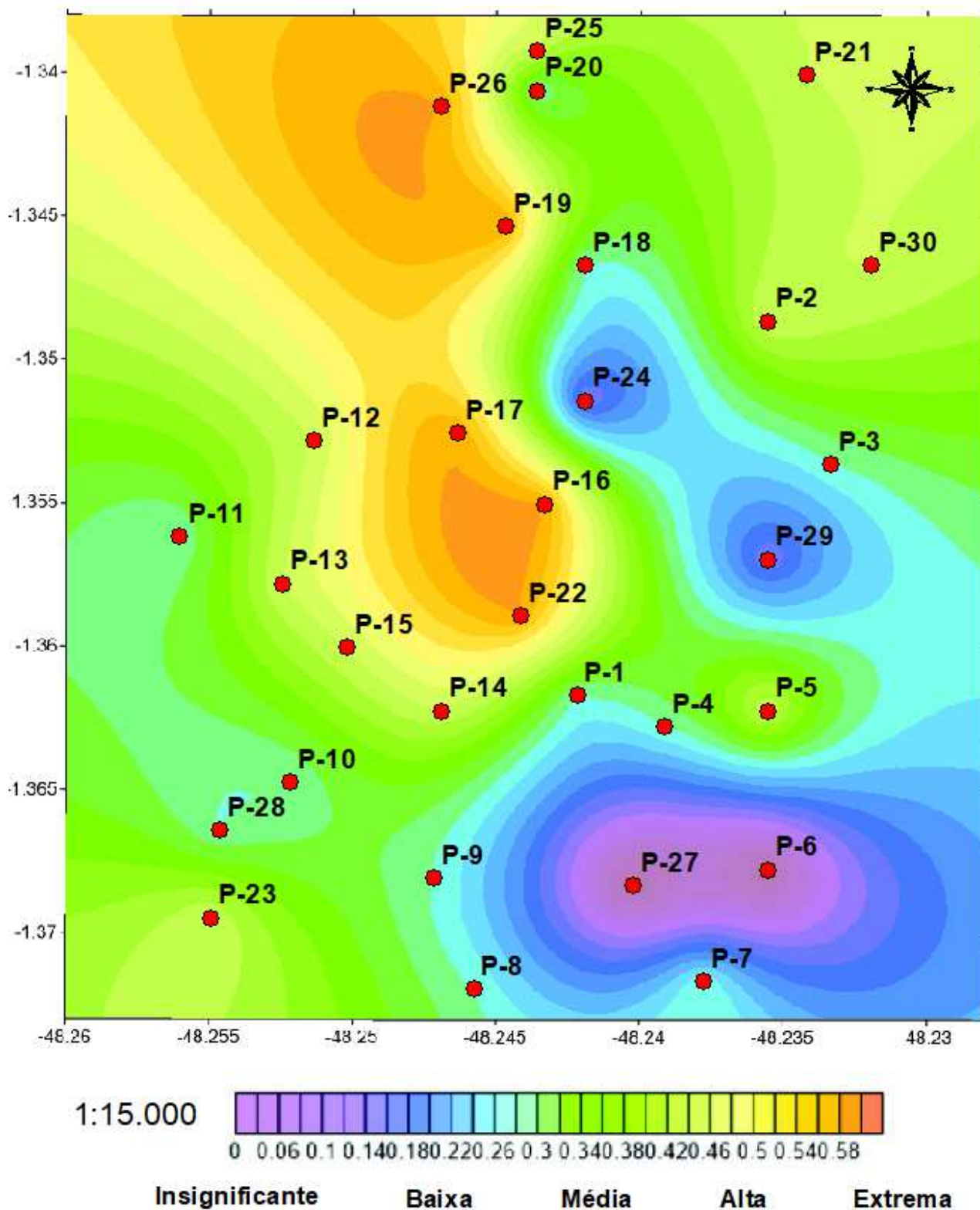
Para avaliar a vulnerabilidade à poluição do aquífero livre Barreiras (Figura 34) foi construído o mapa através do método GOD (baseado na interpolação dos dados de litologia, profundidade até o lençol freático e grau de confinamento da água subterrânea), com suporte de SIG, correlacionando os resultados obtidos com as análises químicas realizadas nas águas subterrâneas freáticas. Este produto foi gerado através da integração de poços já existentes no SIAGAS/CPRM e utilização de dados de novos poços cadastrados, para melhor distribuição espacial e interpolação dos resultados obtidos. A elaboração do mapa foi realizada em SIG através dos softwares *ArcGis* 10.3 e *Surfer* 10.0.

A análise do mapa de vulnerabilidade da área de estudo, mostra vulnerabilidade GOD média (1,0%), média a alta (35,0%), alta (40,0%) e alta a extrema (24,0%). Observa-se que toda a porção norte do mapa apresenta vulnerabilidade de alta a extrema e a porção sudoeste apresenta

vulnerabilidade média a alta, totalizando cerca de 75,0% de toda a área. Os pontos de observação estão localizados em uma área que vai de média a extrema vulnerabilidade e sofrem influência de áreas de recarga do aquífero, localizados na direção de fluxo das áreas de descarga.

Segundo Araújo (2016), a vulnerabilidade alta a extrema (24,0%) sinaliza áreas onde as águas subterrâneas rasas podem ser afetadas por contaminantes degradáveis como bactérias e vírus, enquanto que, aquelas classificadas como de vulnerabilidade alta (40,0%) são susceptíveis de serem contaminadas por diversos contaminantes, com exceção daqueles facilmente absorvidos e/ou transformáveis. Áreas com vulnerabilidade média a alta, são susceptíveis a contaminantes como hidrocarbonetos halogenados ou não, e alguns metais pesados. A presença de metais pesados nas águas subterrâneas apresenta especial interesse, sobretudo para níquel, chumbo, cromo, cobre e zinco. Sais solúveis são incluídos neste grupo. Vulnerabilidade baixa indica que o aquífero é vulnerável a compostos móveis e persistentes como sais, nitratos e alguns solventes organo-sintéticos. Muitos destes produtos foram proibidos em diversos países em virtude de seu efeito altamente cancerígeno (ARAÚJO, 2011). Esses compostos se espalham no meio fluido através do fenômeno conhecido como dispersão hidrodinâmica. Vulnerabilidade insignificante indica que pode não existir aquífero, quer pela ausência de água em quantidades aproveitáveis, quer pela baixa qualidade (ARAÚJO, 2016). Considerando-se que a presença de áreas com vulnerabilidade alta e extrema possui correlação positiva com as áreas que apresentam maiores índices de nitrato, provavelmente, os poços localizados nessas áreas estão mais vulneráveis à contaminação e sofrendo de forma mais intensa com a influência de fossas. Segundo Araújo (2011), esta aferição é realizada por comparação entre o mapa de vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas rasas (Figura 34) e o mapa de isotores de nitrato (Figuras 29 e 30).

Figura 34. Mapa de vulnerabilidade à poluição (método GOD) da área de estudo.



Fonte: Surfer 10.0

11. ANÁLISE ESTATÍSTICA E CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas de Benevides resultou da coleta e análise em 30 poços tubulares distribuídos sobre a superfície territorial da sede municipal. O estudo de análises químicas pode ser facilitado através da utilização de gráficos e diagramas, principalmente quando se deseja fazer comparações entre várias amostras de água, de um mesmo ponto ou de diferentes pontos. Estas representações gráficas podem evidenciar possíveis relações entre íons de uma mesma amostra, ou ressaltar variações temporais ou espaciais existentes.

Para a classificação hidroquímica das águas subterrâneas da área de estudo foram utilizados os valores dos cátions (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ e K^+) e dos ânions (CO_3 , HCO_3 , Cl^- e SO_4^{-2}), dispostos no diagrama triangular de Piper (1944). O diagrama de Piper é frequentemente utilizado para classificação e comparação de distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes. Para este trabalho, os diagramas foram gerados no software QUALIGRAF 1.1.

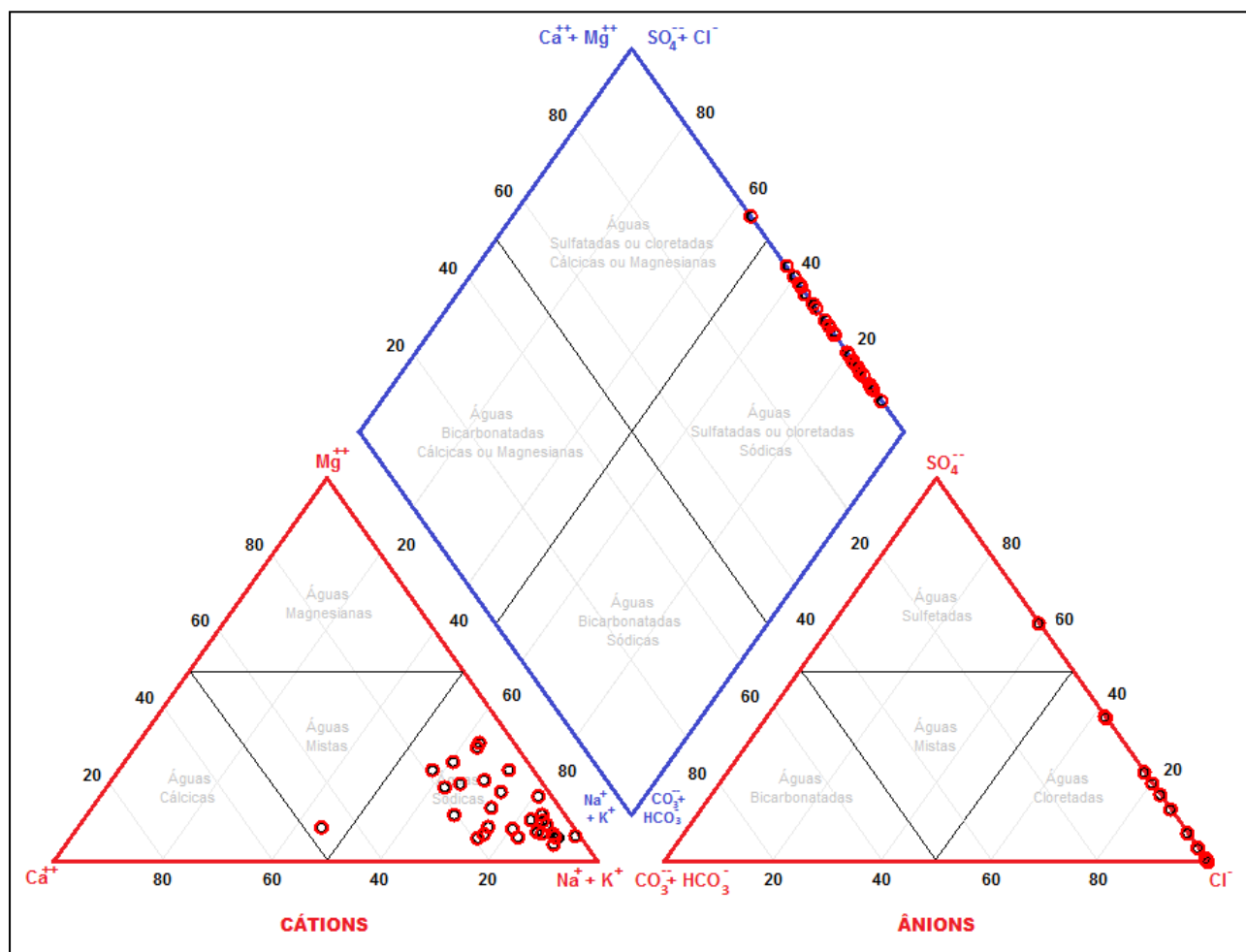
As águas da primeira coleta (março/2017) foram classificadas como cloretadas sódicas, tendo Na^+ e Cl^- como elementos predominantes. Em outros pontos pode-se observar a existência de águas sódicas sulfatadas e cloretadas mistas. Os resultados apresentaram a relação entre cátions e ânions da seguinte forma: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$ e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3$ (Figura 35).

Nos resultados da segunda coleta (agosto/2017), a característica de águas cloretadas sódicas (Na^+ e Cl^-) continua predominante, e em alguns pontos foram classificadas como sódicas sulfatadas. A tendência entre cátions e ânions apresentou-se como $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$ e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3$ (Figura 36).

A característica de águas cloretadas sódicas (Na^+ e Cl^-) foi a que predominou na terceira coleta (outubro/2017), sendo em alguns pontos classificadas como sódicas sulfatadas. A relação de cátions e ânions observada foi de $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$ e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3$ (Figura 37).

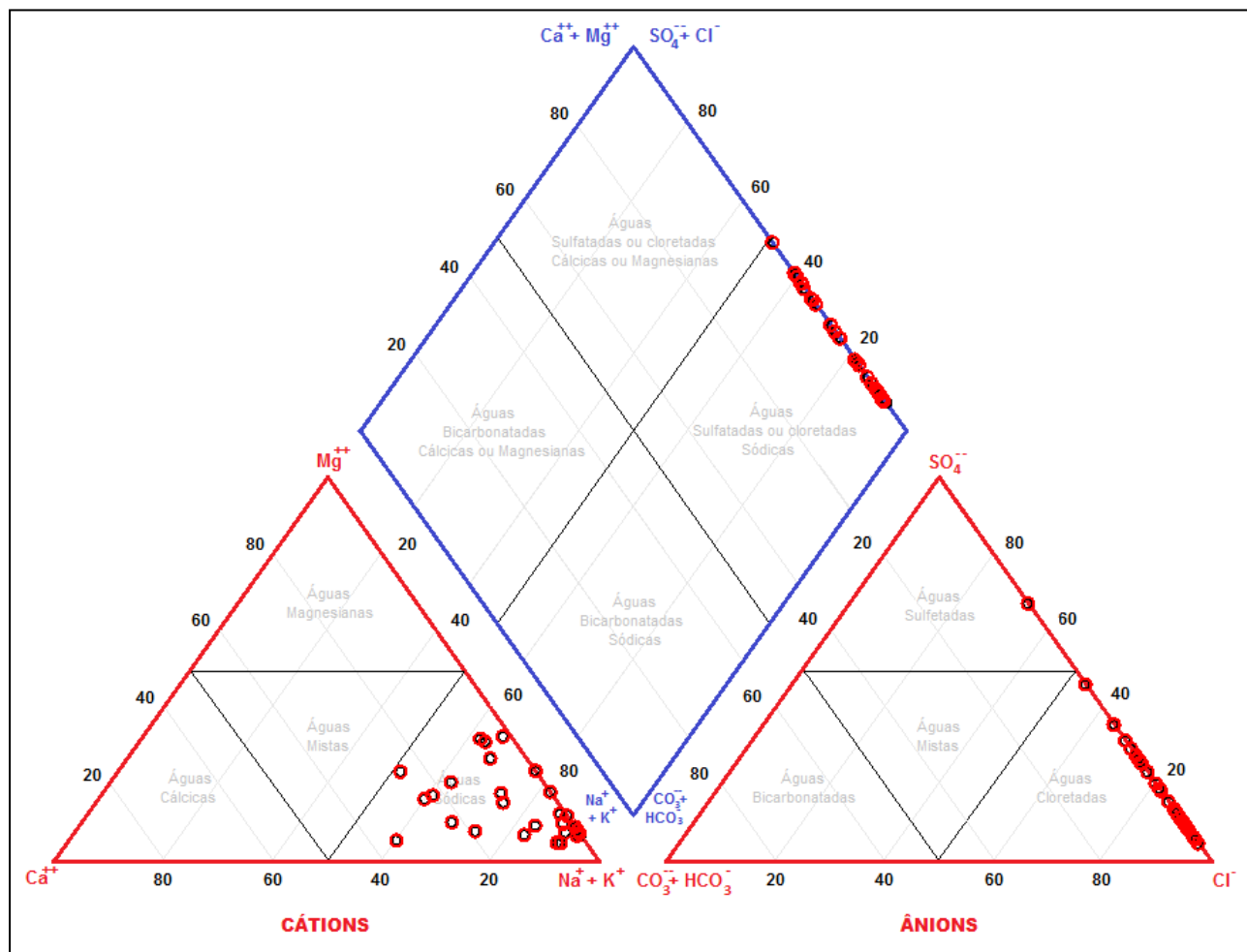
Já na quarta coleta (dezembro/2017) a predominância foi também de águas cloretadas sódicas (Na^+ e Cl^-), tendo também como característica, águas sódicas e sulfatadas em alguns pontos. Sendo a tendência de cátions e ânions: $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{+2} > \text{Mg}^{+2}$ e $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{-2} > \text{HCO}_3$ (Figura 38).

Figura 35 – Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de março/2017 (período chuvoso).



Segundo Matta (2002), como o cloro não é muito abundante nas rochas que compõe a geologia da região metropolitana de Belém, cuja área de estudo está inserida, sua ocorrência nas águas subterrâneas deve estar associada às águas pluviais associadas à influência do mar através da proximidade das águas salobras da Baía do Marajó, localizada a oeste da área de interesse.

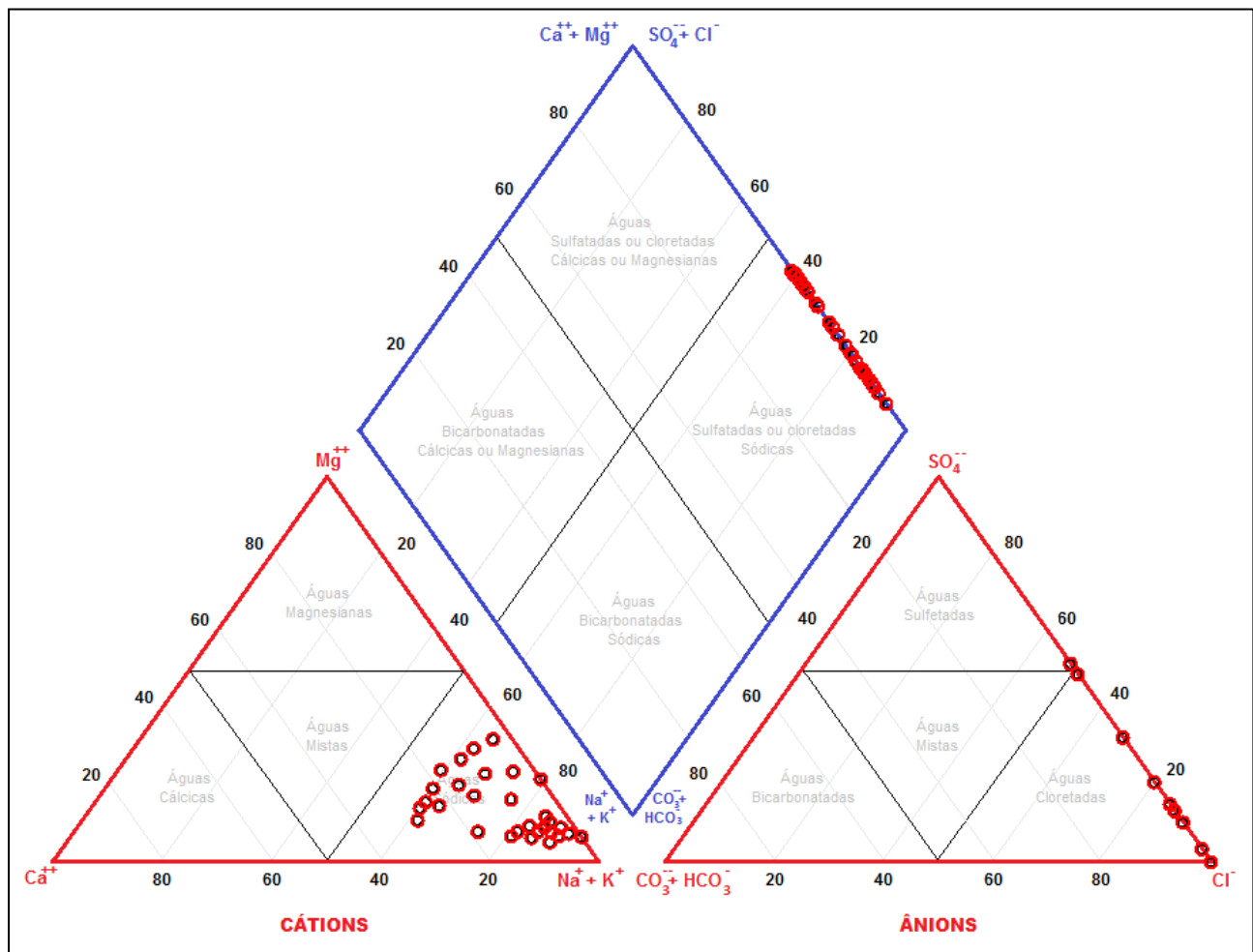
Figura 36 – Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de agosto/2017 (período menos chuvoso).



Observa-se uma forte e positiva correlação da condutividade elétrica (CE) com os parâmetros que aumentam a carga iônica K^+ , Na^+ , Ca^{2+} e Cl^- . Estas correlações são perfeitamente previstas, já que a condutividade elétrica é um parâmetro que está diretamente relacionado com a presença de íons dissolvidos na água. Baseado nos valores destas correlações é possível dizer que as amostras das águas subterrâneas analisadas apresentam concentração de sais de cloreto maior que de sais de carbonatos. O poço 12 (SAEBE/MADRE TEREZA) apresenta os valores máximos de condutividade elétrica em ambos os períodos (chuvoso e menos chuvoso), destacando-se dos demais poços analisados. Segundo Cabral (2006), o aumento da condutividade elétrica associado a elevadas quantidades de sódio e cloreto podem estar relacionados ao processo de contaminação por efluentes domésticos, principalmente pelo fato destes íons estarem intimamente associados a presença de elevados índices de nitratos e à interferência de fossas. Por se tratar de um poço relativamente raso (36 metros) e construído sem os critérios construtivos apropriados, essas

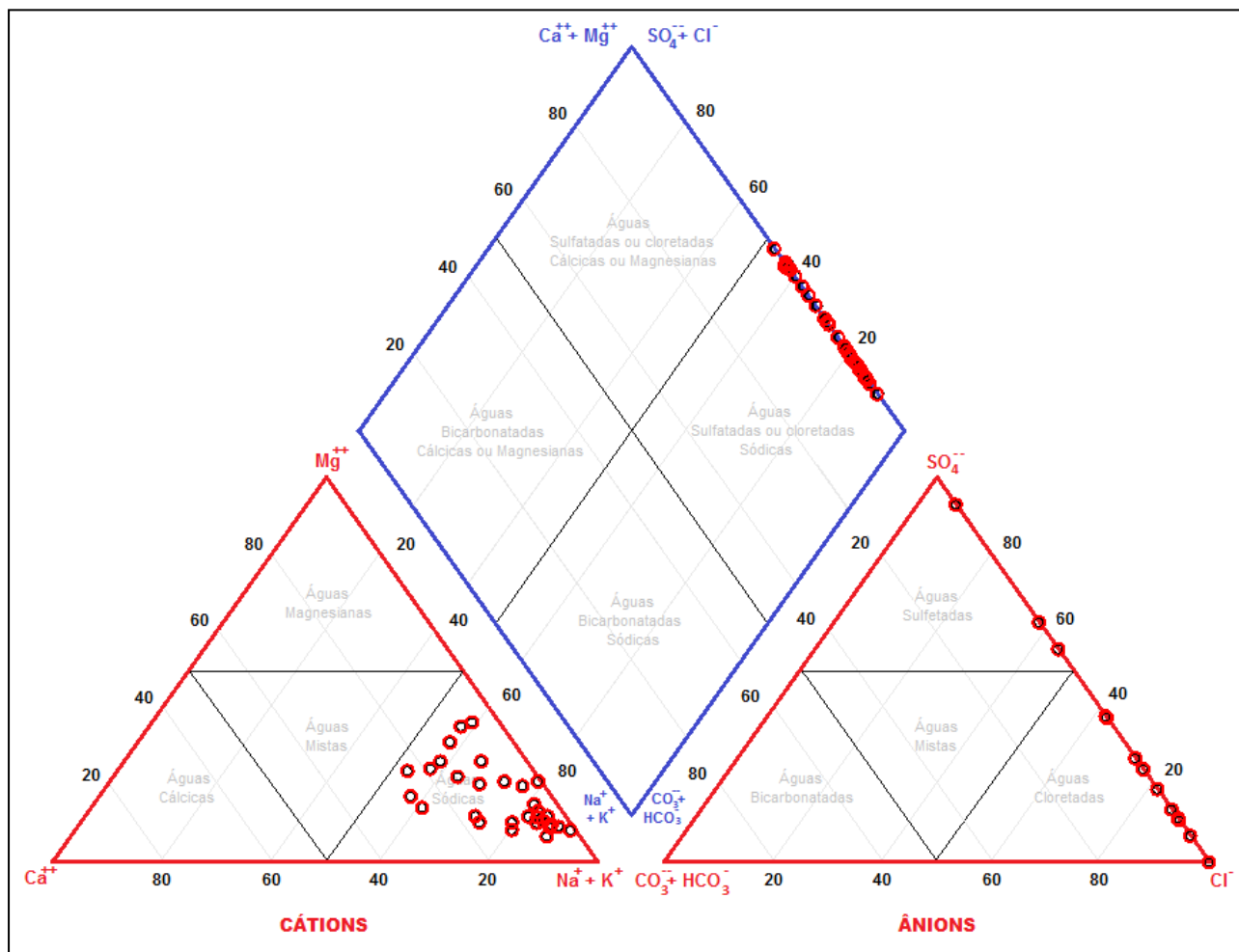
características tornam-no mais propício a contaminação antrópica, principalmente pela ocorrência de fossas negras identificadas na região.

Figura 37 – Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de outubro/2017 (período menos chuvoso).



Através dos resultados obtidos, percebe-se também uma correlação positiva entre os índices de amônio e pH das águas analisadas. A presença de amônio tem influência direta na variação de pH, principalmente durante o período chuvoso quando ocorre a elevação do nível freático, tornando-o mais próximo de fossas que são fontes importantes na formação do amônio, interferindo assim nos valores de pH.

Figura 38 – Diagrama de Piper com a caracterização hidroquímica das águas subterrâneas no mês de dezembro/2017 (período chuvoso).



Com o objetivo de analisar e descrever os dados obtidos de uma forma geral, foram construídas duas tabelas (Quadros 11 e 12) para o período chuvoso e menos chuvoso, respectivamente. Foi realizada a estatística descritiva comparando os valores mínimo, médio e máximo de cada parâmetro analisado aos valores máximos permitidos pela Portaria 2.914/11 do Ministério da Saúde. Para este trabalho, os aspectos bacteriológicos não foram pesquisados.

Através dos dados presentes nos Quadros 11 e 12, observa-se que dos 24 parâmetros físico-químicos analisados, 5 parâmetros apresentaram valores acima dos valores máximos permitidos pela Portaria 2.914/11, em todos os períodos amostrais (período chuvoso e menos chuvoso). Os parâmetros são os seguintes: nitratos (62% dos pontos amostrados), turbidez (7% dos pontos amostrados), ferro total (12% dos pontos amostrados), alumínio (35% dos pontos amostrados) e chumbo (15% dos pontos amostrados). Com destaque para o nitrato e ferro total, que apresentaram

valores até 5 vezes acima do recomendado pela Portaria. Vale ressaltar que o pH apresentou valores abaixo dos valores mínimos permitidos pela Portaria nº 2.914/11. Segundo Almeida (2004) apesar de todos os valores de pH se encontrarem abaixo do recomendado legalmente pela Portaria, não chega a ser uma restrição, já que esses valores refletem apenas a acidez regional característica das águas amazônicas. Todas as outras variáveis analisadas na água subterrânea apresentam valores normais de potabilidade segundo os padrões de qualidade utilizados, não contribuindo para a contaminação da água.

Quadro 11. Padrão de potabilidade de água para consumo humano no período chuvoso, conforme a Portaria nº 2.914/2011.

Parâmetro	Valores máximos na área de estudo	VMP pela Portaria 2.914/2011	Unidade
pH	5,84	6 a 9,5	
STD	267,7	1000	mg/L
CE	195,8	*	µS/cm
Turbidez	5,5	5	UT
Cloreto	21,8	250	mg/L
Sulfato	19	250	mg/L
Fosfato	3,215	*	mg/L
Cálcio	2,9	*	mg/L
Magnésio	1,2	*	mg/L
Sódio	18,9	*	mg/L
Potássio	2,2	*	mg/L
Ferro Total	1,3	0,3	mg/L
Manganês	0,019	0,1	mg/L
Alumínio	0,515	0,2	mg/L
Bário	0,00862	0,7	mg/L
Chumbo	0,01991	0,01	mg/L
Cobre	0,106	2	mg/L
Cobalto	0,00612	0,2	mg/L
Cromo	0,00037	0,05	mg/L
Níquel	0,005	0,07	mg/L
Zinco	0,266	5	mg/L
Amônio	0,46	*	mg/L
Nitrito	0,07	1	mg/L
Nitrato	38,5	10	mg/L

* Valores sem referência

Quadro 12. Padrão de potabilidade de água para consumo humano no período menos chuvoso, conforme a Portaria nº 2.914/2011.

Parâmetro	Valores máximos na área de estudo	VMP pela Portaria 2.914/2011	Unidade
pH	5,96	6 a 9,5	
STD	249,6	1000	mg/L
CE	184,1	*	µS/cm
Turbidez	4	5	UT
Cloreto	21,4	250	mg/L
Sulfato	6,9	250	mg/L
Fosfato	0,555	250	mg/L
Cálcio	2,7	*	mg/L
Magnésio	1	*	mg/L
Sódio	17,7	*	mg/L
Potássio	2,4	*	mg/L
Ferro Total	0,4	0,3	mg/L
Manganês	0,011	0,1	mg/L
Alumínio	0,399	0,2	mg/L
Bário	0,00772	0,7	mg/L
Chumbo	0,01412	0,01	mg/L
Cobre	0,089	2	mg/L
Cobalto	0,00863	0,2	mg/L
Cromo	0,00037	0,05	mg/L
Níquel	0,011	0,07	mg/L
Zinco	0,057	5	mg/L
Amônio	0,03	*	mg/L
Nitrito	0,16	1	mg/L
Nitrato	18,6	10	mg/L

* Valores sem referência

Para buscar o melhor entendimento e compreender os prováveis processos envolvidos na área de estudo, foi executado o cadastramento e observação de possíveis pontos de contaminação na sede municipal de Benevides, resultando o total de 9 pontos visitados e descritos (ANEXO I). Em cada um dos pontos visitados foi feita a descrição do ponto com abordagem quantitativa e qualitativa. No primeiro momento foi realizada uma análise dos pontos de contaminação, descrevendo o endereço, coordenadas, nome do empreendimento, proprietário e os possíveis contaminantes. Em um segundo momento, houve a necessidade da utilização de pesquisa bibliográfica, fotos, visita, entrevista, percepção visual, cadastro de pontos georreferenciados dos locais visitados, na busca e alocação de conhecimento sobre vulnerabilidade de aquíferos e sua correlação com a contaminação das águas subterrâneas.

12. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Os poços amostrados na área de estudo são do tipo tubular possuindo profundidade de 18 a 60 metros, captando as águas do aquífero livre Barreiras, com variação de nível estático de 0,8 a 20,4 metros no período chuvoso e 1,7 a 25,34 no período menos chuvoso.
- O pH das águas subterrâneas rasas exibiu valores baixos, com variação de 4,33 a 5,84 durante o período chuvoso e 4,48 a 5,96 no período menos chuvoso. Estes valores refletem o pH ácido típico das águas amazônicas. Outro fator a ser considerado, é de que próximo a estes poços há indícios de atividades antrópicas com potencial significativo para acidificar a água.
- Os valores de amônio foram mais expressivos durante o período chuvoso, com valor médio de 0,175 mg/L. Este resultado está relacionado ao fato de ocorrer a elevação do nível freático no período chuvoso, ficando assim mais próximo a fossas que são fontes importantes na formação de amônio, que por sua vez, interfere nos valores de pH.
- Em todos os períodos amostrados (chuvoso e não chuvoso), o poço P-12 (SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) apresenta correlação positiva de índices de nitrato, cloreto, sódio e condutividade elétrica. As observações de campo e uma análise da correlação estatística destes parâmetros permitem concluir que ambos os elementos estão relacionados com o processo de contaminação antrópica, particularmente por esgotos e efluentes domésticos, lançados em fossas sem qualquer tratamento prévio. Por se tratar de um poço relativamente raso (36 metros) e construído sem os critérios construtivos apropriados, essas características tornam-no mais propício a contaminação antrópica, principalmente pela ocorrência de fossas negras identificadas na região.
- As águas da primeira coleta (março/2017) apresentaram os poços P-14 (SAEBE/BOSQUE MUNICIPAL) e P-17 (CONDOMÍNIO BELO JARDIM 1) com os maiores índices de ferro total na área de estudo, chegando a possuir concentrações de até 10 vezes mais do que o estipulado pela Portaria 2.914/11. Estas concentrações elevadas de ferro estão relacionadas ao alto teor de ferro encontrado na Formação e sistema aquífero Barreiras, apresentando concentrações de ferro que chegam a 12 mg/L, quase sempre exigindo a instalação de estações de tratamento.
- Metade dos poços amostrados (15 poços) apresentaram em suas águas elevados índices de nitrato, acima do permitido pela Portaria 2.914/11. Com destaque para os dois poços que

apresentam maiores índices de concentração de nitrato (SAEBE/MÉDICE II e SAEBE/RUA ALACIDE NUNES) com concentrações de até 38,5 mg/L (4 vezes a mais que o limite estipulado). As áreas mais afetadas pelos altos índices de nitrato são as porções noroeste e centro oeste, além dos poços mais rasos como o P-19 (COMUNIDADE NOSSA SENHORA DO CARMO). Estas concentrações elevadas de nitrato estão relacionadas a atividades antrópicas originadas pela ausência de saneamento básico local e caracterizada pela descarga de esgoto doméstico e utilização de fossas negras, próximas a maioria dos poços.

- O alumínio e o chumbo aparecem acima do valor permitido pela Portaria 2.914/2011, tanto no período chuvoso quanto no período menos chuvoso. Isto ocorre devido a anomalias geoquímicas que podem ser originadas por fatores geológicos e físico-químicos. No caso do chumbo pode estar relacionado à existência de sulfetos metálicos disseminados na Formação Barreiras, além de esfalerita (ZnS) e covelita (CuS). Por outro lado, não se pode descartar a possibilidade de atividades antrópicas e presença de atividades industriais e/ou comerciais que podem estar gerando a contaminação do aquífero através de despejo de resíduos sólidos e solúveis tóxicos, conhecido como “lixo industrial”. Para investigar esta hipótese, necessita-se de estudos mais detalhados relacionados ao controle da qualidade das águas nestes poços.
- Com relação aos aspectos hidrogeológicos, observa-se que o tipo de recarga do aquífero livre Barreiras, se processa de forma direta nas porções oeste, sul e nordeste da área de pesquisa, estando os altos potenciométricos localizados nestas porções. A partir desses altos, as drenagens superficiais e subterrâneas fluem para o restante da área, onde as descargas das águas subterrâneas rasas ocorrem nas áreas leste, noroeste e sudoeste da área de estudo e desempenham um importante papel na qualidade das águas superficiais, utilizadas no abastecimento público e na manutenção dos principais rios da região, como o rio Benfica. O sentido de fluxo destas é concordante com a morfologia da superfície topográfica do terreno.
- De acordo com o mapa de vulnerabilidade, pode se concluir que as regiões sul e centro leste da sede municipal de Benevides são as áreas menos propícias a contaminação antrópica devido as suas características hidrogeológicas, analisadas através do método *GOD*. Recomenda-se para trabalhos futuros, a implantação e adensamento da rede de poços de monitoramento, realização de análises químicas bimestrais para aferição entre os índices *GOD* e utilização de outros métodos de classificação de vulnerabilidade que levem em consideração mais parâmetros, como, por exemplo, o *DRASTIC*.

- A caracterização hidroquímica das águas de Benevides evidencia um caráter de natureza, predominantemente, cloretadas sódicas, independente do período da amostragem (chuvoso e menos chuvoso). Localmente, podem ocorrer águas sódicas sulfatadas e cloretadas mistas. As águas analisadas apresentam baixa mineralização devido à influência das precipitações pluviométricas na área de estudo.

De uma forma geral, as águas captadas na área de estudo possuem boa característica hidroquímica para a maioria dos parâmetros amostrados, com algumas ressalvas específicas, no que diz respeito à sua qualidade para abastecimento doméstico. Portanto, recomenda-se o acompanhamento e controle da qualidade destas águas através da realização de análise química periódica, manutenção constante nos poços já existentes e melhoria nas condições das formas de captação e distribuição de água para a população. A instalação de uma rede de tratamento de esgoto seria de grande valia. Além disto, sugere-se a perfuração e construção de poços mais profundos a fim de captar águas da Formação Pirabas, visto que este possui água com melhor qualidade e tende a ser menos vulnerável à contaminação. Outro fator a ser considerado, é que a construção de futuros poços deve ser feita com planejamento para minimizar a influência de contaminantes e os impactos ambientais gerados ao aquífero, recomendando-se também definir perímetro de proteção de poços. A construção de poços de captação fora dos padrões técnicos também contribui para a contaminação das águas produzidas.

O presente estudo possibilitou além da elaboração de um diagnóstico acerca da qualidade das águas subterrâneas da sede municipal de Benevides, a realização de um mapeamento das condições hidrogeoquímicas locais do aquífero livre Barreiras. Com isto, pretende-se disponibilizar informações como ferramenta de proteção e gestão das águas subterrâneas rasas, através da escolha de áreas adequadas (com menor influência de ação antrópica/contaminação das águas subterrâneas) à locação de poços para perfuração, associadas ao aquífero livre Barreiras. Neste sentido, pretende-se que os resultados do conhecimento sobre as águas subterrâneas, sejam susceptíveis de construir-se em instrumento inicial para o gerenciamento sustentável das águas subterrâneas, planejamento estratégico e gestão hídrica e ambiental na sede municipal de Benevides – PA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHEIROS, M.M., LIMA FILHO, M.F., MONTEIRO, F.A.J., OLIVEIRA FILHO, J.S., 1988. Sistemas deposicionais da Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém., 1988. Anais. Belém, SBG, 1988. v. 2 p. 753 - 760.
- ALMEIDA, F.M., MATTA, M.A.S, DIAS, E.R.F, SILVA, D.P.B, FIGUEIREDO, A.B, 2004. Qualidade das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero Barreiras na Bacia Hidrográfica do Tucunduba - Belém/PA. Anais do XIII congresso brasileiro de águas subterrâneas, p. 1 - 20, São Paulo.
- ARAÚJO, Paulo Pontes, 2011. Avaliação dos compostos nitrogenados no aquífero livre em agroecossistemas de citros no alto do rio Capitão Pocinho, Amazônia oriental. Tese de Doutorado em Ciências Agrárias/Agroecossistemas da Amazônia – Universidade Federal Rural da Amazônia e Embrapa Amazônia Oriental, Belém.
- ARAÚJO, Paulo Pontes, 1998. Aspectos Gerais da Hidrogeologia das Regiões Costeiras cidade de Salinópolis. Monografia - Especialização em Geociências aplicadas ao meio ambiente - UFPA/CG, Belém.
- ARAÚJO, Paulo Pontes; FREDDO, V. J. F.; FERREIRA, H. S & ABREU, F. A. M., 2016. Cartografia de Bacias Hidrogeológicas usando os Métodos Potenciométrico e Gravimétrico – Nordeste do Estado do Pará, XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Anais, Campinas.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS). Águas subterrâneas: o que são? 2017. Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em: 02 de jan de 2018.
- BOUCHARD, D. C.; WILLIAMS, M. K.; SURAMPALLI, R. Y.; Nitrate Contamination of Groundwater: Sources and Potential Health Effects. American Water Works Association, 1992.
- BOVOLATO, L. E. Saneamento básico e saúde. Escritas: Revista do Curso de História de Araguaína, [S.l.], v. 2, abr. 2015. ISSN 2238-7188. Disponível em: <<https://sistemas2.uft.edu.br:8004/index.php/escritas/article/view/1145>>. Acesso em: 30 dez. 2017.
- BRASIL. Portaria Ministério da Saúde. Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os Procedimentos de Controle e de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Disponível em:

<http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 10 de nov. 2017.

- BRASIL. Resolução CONAMA nº 335 de 3 de abril de 2003. Dispõe sobre o licenciamento de cemitérios. Brasília.

- CABRAL, N.M.T. Comportamento hidrogeoquímico das águas do aquífero Barreiras nos bairros centrais de Belém, Pará. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciências Naturais, Belém, v. 1, n. 1, p. 149-166, jan-abr. 2006.

- CARNEIRO, Victor Santos, 2009. Impactos causados por Necrochorume de cemitérios: Meio Ambiente e Saúde Pública, I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, Anais, São Paulo.

- CASARINI, D. C. P., 2004. Gestão da qualidade e risco de contaminação do recurso hídrico subterrâneo. Anais do XIII congresso brasileiro de águas subterrâneas, p. 1 - 20, São Paulo.

- CLETO, C. I. T. P., 2008. O alumínio na água de consumo humano. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Química Industrial, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

- Crespim, R. C. S, 2017. Qualidade das Águas Subterrâneas Rasas: Estudo de caso no Distrito de Icoaraci – PA. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA.

- FEITOSA, A. C.; FILHO, J. M.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. (2008). Hidrogeologia, conceitos e aplicações. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 3ª Ed.

- FERRARI, L.C., 2006. Modelagem Tridimensional de Fluxo de Águas Subterrâneas em um Aquífero Livre e Raso: Aplicação no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo. Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, 2006, São Paulo.

- FERREIRA, C.S. Notas estratigráficas sobre o Cenozóico marinho do Estado do Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 1., Belém. Anais. Belém: SBG, 1982. p. 84-88.

- FETTER, C.W. Contaminant hydrogeology. New York: McMillan, 1993.

- FOSTER, S. & HIRATA, R., 1988. Groundwater pollution risk evaluation: a survey manual using available data. Lima, CEPIS-PAHO/WHO. 89p.

- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: Servemar, 2006.
- FREDDO, V. J. F.; ARAÚJO, P. P., 2016. Potenciometria e Sentido de Fluxo das Águas Subterrâneas do Aquífero Barreiras na Região Nordeste do Estado do Pará. Anais do 48º Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre.
- FREITAS, H. B.; SILVA, C. T. S. da, SILVA, F. J. F. da, SILVA, K. de F. N. L.; FERREIRA, L. C. C.; NOGUEIRA, J. L. S.; SANTOS, F. S. S. dos. Avaliação do Monitoramento das Águas Subterrâneas Usadas para Abastecimento Humano na Comunidade de Morrinhos, Aracati–Ceará. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/e2aa5f493922955ee6ea4fc58173ac29_54771066426a956842d2f844745ecc2f.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ, 2008.
- GLEICK, P. H. The world's water. 2000-2001. Report on Freshwater Resources. Island Press, 2000. 315p.
- GÓES, A.M.; TRUNCKENBRODT, W., 1980. Caracterização faciológica e Interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região Bragantina, Nordeste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriú. Anais. Belém, SBG, v. 2 p. 766-771.
- GOMES, J. N., 2011. Condições ambientais e análise social dos moradores do entorno do lixão do município de Benevides, estado do Pará. Caminhos de Geografia. Uberlândia, v. 12, n. 37. mar/2011 p. 305 - 309.
- IBGE, 2014.
- MATTA, M.A.S. 2002, Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 292p. (Tese de Doutorado).
- MORAES, D. S. L.; JORDÃO, B. Q.; Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. Revista Saúde Pública 2002; 36(3):370-4.

- PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P.; SARMENTO, P. A. Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição agrícola do aquífero mio-pliocénico da região de Canhestros (Alentejo). In: Congresso da Água. 6., 2003, Lisboa. Anais. Lisboa, 2003.
- PARRON, M.P., MUNIZ, D.H.F., PEREIRA, C.M., 2011. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Florestas. ISSN 1980-3958, Documentos 232, Colombo – PR.
- ROGERS, P. P. Water governance, water security and water sustainability. In: ROGERS, P. P. et al. (Ed.) Water crisis: myth or reality? London: Fundación Marcelino Botín, Taylor & Francis, 2006. p.3-36.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; GÓES, A. M., 1989. Estudo Paleoambiental e estratigráfico dos Sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na Região Bragantina, nordeste do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, v.1, n.1, 1989 74p.
- SANTOS, R. A., 2011. Hidrogeoquímica das Águas Subterrâneas do Município de Iraquara, Bahia. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- SOFTWARE SURFER versão 10.0.
- SOFTWARE ARCGIS versão 10.3.
- SOMLYODY, L; VARIS, O. Freshwater under pressure. International Review for Environmental Strategies, v.6, n.2, p.181-204, 2006.
- SOUZA, L. C., 2010. A Efetividade da Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil. Anais do 8º Congresso Brasileiro do Magistério Superior da Associação dos Professores de Direito Ambiental do Brasil – APRODAB.
- TANCREDI, A. C. F. N. S., 1996. Recursos Hídricos Subterrâneos de Santarém: Fundamentos para Uso e Proteção. 153f. Tese de Doutorado - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. Estudos Avançados, v.22, n.63, p.1-16, 2008.
- TUNDISI, J. G. et al. Conservação e uso sustentável de recursos hídricos. In: BARBOSA, F. A. (Org.) Ângulos da água: desafios da integração. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008. p.157-83.

ANEXOS

ANEXO I - CADASTRAMENTO DE PROVÁVEIS FONTES DE CONTAMINAÇÃO

SECRETARIA DE OBRAS DE BENEVIDES – PA (SAAE)

Ponto 1 => Ponto de controle para georreferenciamento (coordenadas: 1° 21' 45" S e 48° 14' 34" W). Encontro com o Secretário de Obras, Sr. Pedro Paulo, para reconhecimento e visita às possíveis fontes de contaminação.

EMPRESA MISTER AÇAÍ

Ponto 2 => Empresa produtora de açaí localizada na Travessa São João, Bairro das Flores (coordenadas: 1° 22' 29" S e 48° 14' 17" W). Segundo a gestora da empresa, Sra. Raquel Batista, nenhum produto químico é utilizado no processo de confecção do açaí, somente é utilizado cloro para a lavagem. A empresa possui três anos de funcionamento com produção equivalente a 3.500 kg/dia e existe um sumidouro/vala com utilização de carvão ativado para o descarte de resíduos. A compra do açaí é feita através das comunidades ribeirinhas próximas a empresa.

EMPRESA COURO CARAJÁS

Ponto 3 => Empresa de produtos agropecuários para processamento de couro cru (curtume) localizada na Estrada do Taiassui (coordenadas: 1° 23' 6" S e 48° 14' 56" W). Observa-se na área externa próxima ao galpão, dois tanques de concreto para descarte do rejeito industrial. Segundo o vigia da empresa, Sr. Neto, há presença de nascente próxima aos tanques de concreto, o que pode ser um possível fator de contaminação da formação pós Barreiras observada na região. A empresa está em funcionamento desde Maio de 2016, e há presença de poço tubular com 30 metros de profundidade, fator preocupante em relação à contaminação dos aquíferos da região.

LIXÃO LOCALIZADO NA ESTRADA DO TAIASSUI

Ponto 4 => Este local é uma provável fonte de contaminação, contudo não existem dados disponíveis para a elaboração de um plano de sustentabilidade sobre a questão dos resíduos sólidos (lixão) dentro do município de Benevides, havendo necessidade de um levantamento sistemático do volume presente. O lixão possui área de, aproximadamente, 39 km², sendo uma potencial área de

contaminação dos aquíferos da área de estudo. O impacto ambiental e a saúde pública merecem uma atenção relevante das autoridades, sendo possível identificar que há uma tendência de aumento de resíduos sólidos em comparação ao crescimento da população no município de Benevides (coordenadas: 1° 22' 44" S e 48° 14' 43" W).

NASCENTE PRÓXIMA AO LIXÃO

Ponto 5 => Área para recuperação do rejeito lançado pela empresa Couro Carajás (ponto 3). Presença de lagoa/riacho com o objetivo de reduzir os impactos ambientais gerados pela fabricação de curtume (coordenadas: 1° 22' 59" S e 48° 14' 49" W).

POSTO DE GASOLINA

Ponto 6 => Posto de gasolina localizado na rua Joaquim Pereira de Queiroz na rota turística Belém – Bragança (coordenadas: 1° 21' 26" S e 48° 14' 11" W). Neste local existe a possibilidade de fonte de contaminação, pois há necessidade de um eficiente plano de trabalho para construção, fabricação e montagem dos equipamentos e sistemas de armazenamento de combustíveis. Além disso, faz se necessário também a implantação de um sistema de monitoramento (com sensor instalado no espaço intersticial em tanques de armazenamento e/ou no interior de câmaras de contenção) e detecção de vazamento de efluentes tóxicos e nocivos, a fim de evitar a contaminação das águas subterrâneas.

CEMITÉRIO MUNICIPAL SÃO FRANCISCO

Ponto 7 => Localizado na rua Laurentina Ramos (coordenadas: 1° 21' 29" S e 48° 14' 54" W). Neste local existe a possibilidade de contaminação devido à presença de metais pesados utilizados em caixões, além do chorume gerado da decomposição de restos humanos. Segundo a CONAMA n°420/2009 (Brasil, 2009) para os metais analisados, utilizados em caixões, estão presentes na tabela a seguir:

BÁRIO	150
COBRE	60
CROMO	75
ZINCO	300

Fonte: Adaptado de CONAMA n° 420/2009

Mas não são apenas os metais que são geradores dos contaminantes no cemitério, uma vez que temos o caso do necrochorume gerado através da decomposição de restos humanos. A exposição dos lençóis freáticos ao necrochorume é uma fonte de contaminação, pois o processo de autodepuração dentro do sistema hídrico pode ocorrer de forma ineficiente fazendo com que o ambiente permaneça poluído e conseqüentemente aumente gradativamente os teores de poluição orgânica gerado pelo necrochorume.

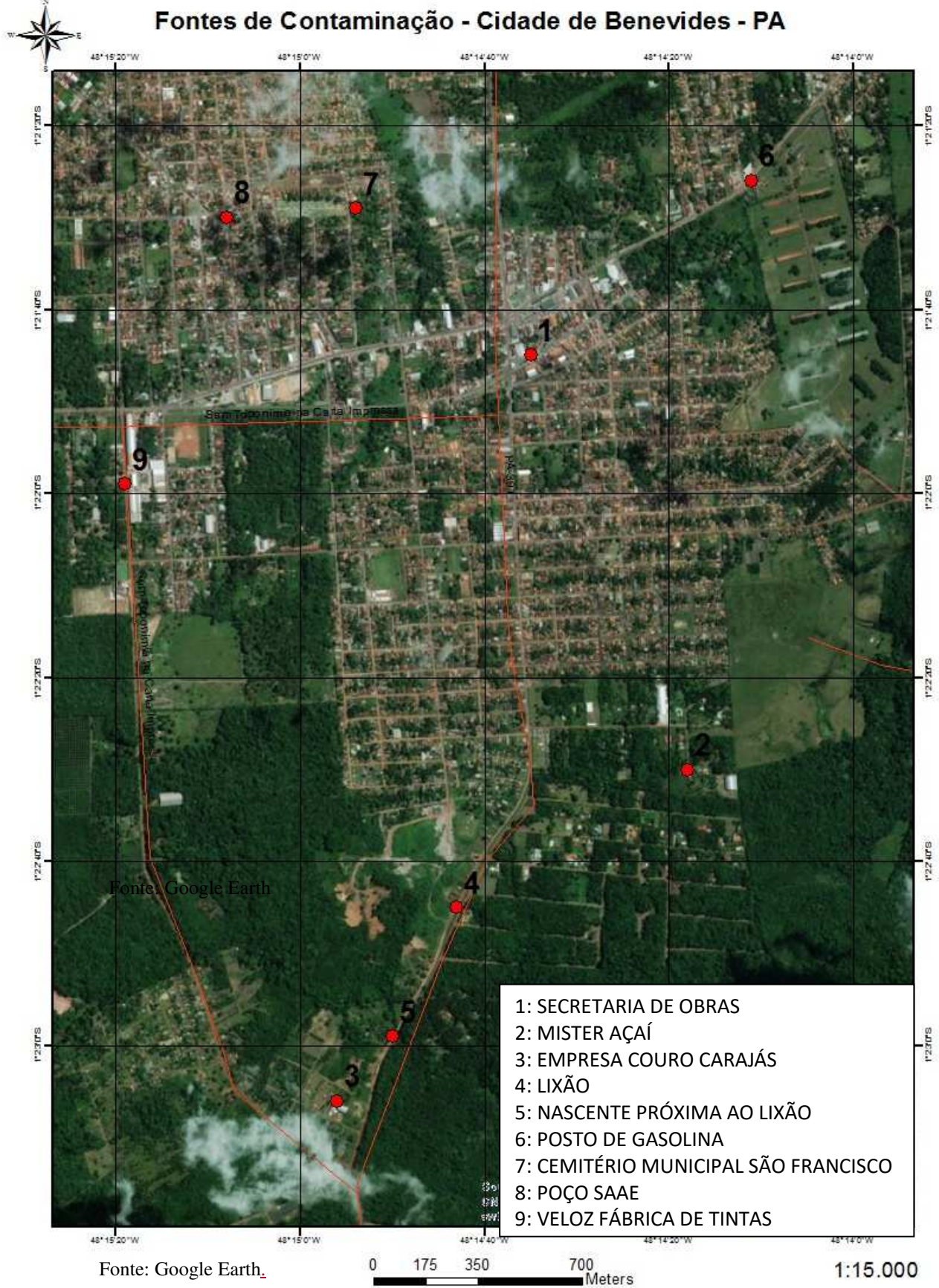
POÇO DE PROPRIEDADE DA PREFEITURA (SAAE)

Ponto 8 => Localizado entre as ruas Costa e Silva e Santa Rosa, Bairro Independente (coordenadas: 1° 21' 30" S e 48° 15' 8" W). Poço já cadastrado no banco de dados SIAGAS/CPRM (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), número 150001751. Não possui análise química de água, o que seria importante para verificar se ocorre ou não valores anômalos que indiquem algum tipo de contaminação do aquífero.

POÇO DE PROPRIEDADE DA EMPRESA VELOZ QUÍMICA FÁBRICA DE TINTAS

Ponto 9 => Localizado na rua Presidente Vargas (coordenadas: 1° 21' 58" S e 48° 15' 18" W). Poço já cadastrado no banco de dados SIAGAS/CPRM (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), número 150005965. Não possui análise química de água, o que seria importante para verificar se ocorre ou não valores anômalos que indiquem algum tipo de contaminação do aquífero.

Figura. Localização das possíveis fontes de contaminação.



ANEXO 2 – FORMULÁRIO UTILIZADO PARA CADASTRO DE POÇOS

Profundidade	
Boca	
Altura da Boca	
Coordenadas/Altitude	
Revestimento/Filtro/Tubo Geomecânico	
Data de Construção	
Caixa d'água (Material, Volume, Tempo)	
Bomba (Tipo, Potência, Marca)	
Situação do Poço	
Proprietário	
Localidade	
Município	
Fonte de Informação	
Perfurador	
Material do Espaço Anular	
Dados de Vazão (NE, ND, Vazão)	
Perfil Litológico	