

Qualidade da Água Subterrânea do Aquífero Furnas na Região de Rondonópolis/MT

Groundwater Quality of the Furnas Aquifer in the Rondonópolis/MT Region

Aparecida de Magalhães¹  & Renato Blat Migliorini² 

¹Secretaria Estadual de Educação – Seduc, Cuiabá, MT, Brasil

²Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Geociências, Cuiabá, MT, Brasil

E-mails: aparecidamagalhaes53@gmail.com; renamigliorini@gmail.com

Resumo

Visto que a qualidade das águas subterrâneas é tão importante quanto a quantidade, este trabalho teve por objetivo realizar um estudo hidroquímico do Aquífero Furnas na região sudeste do Estado de Mato Grosso, considerando a classificação e caracterização química. Foram coletadas e analisadas amostras da água subterrânea de vinte dois poços tubulares profundos. Verificou-se a adequação para o consumo humano, agricultura e as interações rocha-água. Foi observado que o Aquífero Furnas é do tipo confinado, ocorrem os fenômenos de termalismo e artesianismo, predominam águas mesotermais e termais, embora em alguns locais as águas sejam hipertermais. Possuem baixas concentrações de sais dissolvidos, sendo de boa qualidade para o consumo humano, agricultura e pecuária. O bicarbonato foi o principal ânion e o magnésio, o principal cátion. O tipo químico dominante permitiu classificar as amostras em águas bicarbonatada cárcea ou magnesiana, existindo a ocorrência de três poços com águas do tipo bicarbonatada sódica. O principal tipo de água observada na região foi a bicarbonatada magnesiana.

Palavras-chave: Hidroquímica; Análise hidrotermal; Sudeste do Mato Grosso

Abstract

Since quality is as important as quantity, this work general objective had conducting a hydrochemical study of chemical classification and characterization of Furnas Aquifer groundwater in Mato Grosso southeast region. The groundwater samples from twenty- two deep tubular wells were collected and analyzed, and water suitability for human consumption, agriculture and rock-water interactions was verified. It was observed that Furnas aquifer is confined, occurring artesianism and thermalism phenomena, mesothermal and thermal water predominate, although there is hyperthermal water in part of it. Have low concentration of dissolved salt in the aquifer, being the aquifer of good quality for agriculture and livestock. The most common anion found was bicarbonate, cation and magnesium. The dominant chemical type allowed to classify water samples in calcium or magnesian bicarbonate water, and there were three wells with bicarbonate sodium water. The main type of water observed in the region was magnesium bicarbonate water. In Furnas aquifer, groundwater can be classified as mesothermal, thermal and hyperthermal and groundwater chemical characterization can be calcium, magnesian sodium bicarbonate water.

Keywords: Hydrochemistry; Hydrothermal analysis; Southeast of Mato Grosso



1 Introdução

Os recursos hídricos são essenciais para a vida no planeta e sobrevivência dos seus habitantes. Por esse motivo, sua qualidade deve ser uma preocupação constante, pois a crescente demanda proveniente do desenvolvimento populacional e das atividades econômicas diminui a qualidade deste recurso comprometendo seus múltiplos usos.

Os aquíferos são formação geológicas que funcionam como reservatório de água subterrânea e são recarregados pelas chuvas que se infiltram no subsolo. São rochas com características porosas e permeáveis capazes de armazenar e transmitir água. A qualidade da água subterrânea é tão importante quanto a quantidade. Suas características físicas, químicas, biológicas e radiológicas determinam os tipos de usos desse precioso recurso natural. Os conjuntos de todos os elementos que compõe a água subterrânea permitem estabelecer limites segundo os padrões de qualidade estudados, classificando-a de acordo com seus usos preponderantes, como o consumo humano, dessedentação animal, irrigação, indústria, piscicultura, aquicultura, recreação, entre outros.

Segundo Salles et al. (2019) na maioria dos países, a água subterrânea é utilizada para abastecimento doméstico de pequenas cidades, principalmente em regiões rurais, que é o caso das cidades da região de Rondonópolis (MT). Nestes locais, a de teorização da qualidade da água pode acarretar em consequências negativas para a atividade civil, agrícola, pecuária e industrial. Dessa forma, a compreensão da qualidade física e química é fundamental para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo geral realizar um estudo da qualidade das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na região sudeste de Mato Grosso, visando identificar e qualificar seus constituintes iônicos, procurando estabelecer uma relação com as rochas da região. Para este fim, teve como objetivos específicos, estudar a interação física e química entre as águas subterrâneas e as rochas da Formação Furnas, estudar essas águas através dos íons dominantes e verificar se as concentrações estão de acordo com os padrões de potabilidades da legislação vigente.

2 Material e Métodos

2.1 Geologia e Hidrogeologia

A área de estudo está localizada na região sul do Estado de Mato Grosso, entre os paralelos 16° 25'S e 16° 30'S e os meridianos 54° 40' 20"W e 54° 34' 50"W.

Neste trabalho foram analisadas águas subterrâneas dos municípios de Rondonópolis, Juscimeira, Poxoréu, Pedra Preta, São José do Povo e Guiratinga (Figura 1). Localizada a sudeste do estado de Mato Grosso, limitado a nordeste pela Depressão do Araguaia; a norte, noroeste e oeste pelas depressões do Cinturão Orogênico Paraguai-Araguaia. Geologicamente está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, mais especificamente na Província do Paraná. Compreende toda a região sul e sudeste do estado de Mato Grosso, abrangendo o vale do Araguaia e a região de Rondonópolis, ocupando uma área de aproximadamente 104.648 km². Contém três importantes aquíferos no estado de Mato Grosso: Aquífero Furnas, Aquífero Aquidauana e Aquífero Bauru.

A Formação Furnas, principal aquífero da região, é a unidade basal da Bacia do Paraná na área de estudo, é constituída principalmente por sedimentos essencialmente arenosos, esbranquiçados, avermelhados, constituídas por arenitos grosseiros, médios e finos, níveis de arenitos e lentes conglomeráticas, feldspáticos, argilosos, micáceos, ortoquartzíticos com seixos esparsos de quartzo leitoso; matriz arenosa grossa, feldspática e argilosa, com intercalações para o topo da sequência de siltitos e argilitos vermelhos e micáceos (Barros et al. 1982).

A Formação Furnas possui uma considerável extensão, iniciando-se a oeste da cidade de Chapada dos Guimarães indo até a divisa dos estados de Mato Grosso do Sul e Goiás, com espessura média de 337 metros. É um dos principais aquíferos do Estado de Mato Grosso, possui excelentes condições de armazenamento e circulação das águas subterrâneas. Predominam condições de aquífero do tipo confinado, porém, na porção sul do estado de Mato Grosso, entre os municípios de Itiquira e Rondonópolis, onde ocorrem suas áreas de afloramento, e consequentemente, recarga direta, caracteriza-se com o aquífero do tipo livre (Migliorini et al. 2006).

A região é reconhecida por apresentar os fenômenos de termalismo e artesianismo, que contribui para a economia local na questão turística e industrial (Cutrim & Rebouças 2006; Migliorini et al. 2006; Silva & Migliorini 2014). As águas quentes são utilizadas na prática de lazer e recreação, nas atividades industriais como depenagem de aves, no preparo de alimentos, limpeza de utensílios e equipamentos e em hotéis, motéis e hospitais para a lavagem de roupas e itens de cama, mesa e banho. Essas atividades poderão, com o passar do tempo, serem inviabilizadas, como já acontece em alguns casos, devido à perda e/ou a diminuição do artesianismo, principalmente em função do desperdício, tendo em vista que em alguns locais existem poços tubulares profundos que joram 24 horas por dia, causando um contínuo rebaixamento potenciométrico do aquífero. O

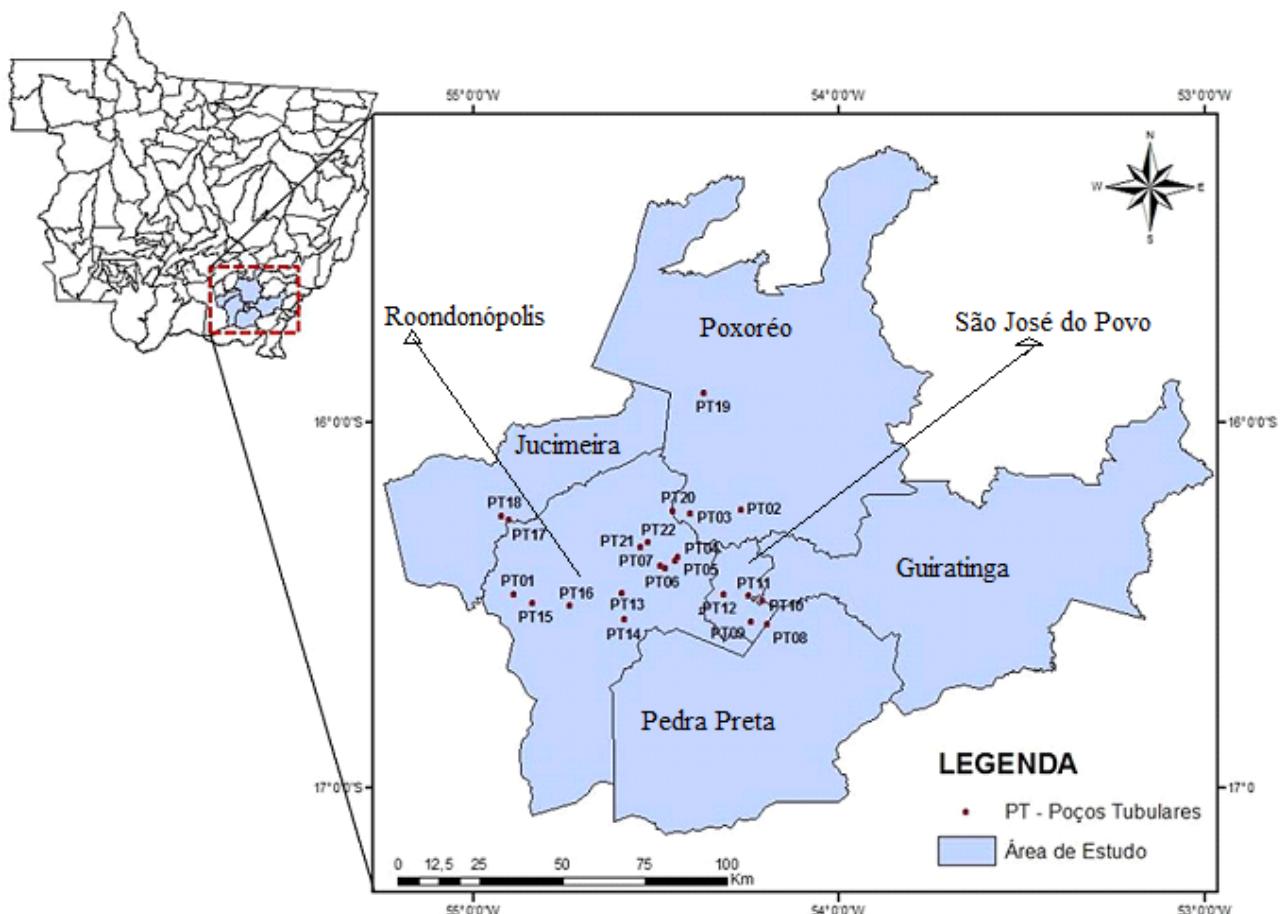


Figura 1 Área de estudo com a localização dos poços tubulares profundos

fenômeno de termalismo nas águas subterrâneas estudadas é função do grau geotérmico, visto que na região não ocorrem radioatividade, vulcanismo e gêiser, que poderiam provocar a elevação da temperatura.

2.2 Metodologia de Coleta e Análise

Os procedimentos de coleta foram baseados no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos (Agencia Nacional de Águas, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo 2011) e para a metodologia de análise o Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater (Associação Americana de Saúde Pública 2012). Foram amostrados 22 poços, sendo 11 no município de Rondonópolis, 3 em Poxoréu, 2 em Pedra Preta, 3 em São José do Povo, 1 no município de Guiratinga e 2 poços no município de Juscimeira.

Para a coleta dos cátions utilizou-se frascos descartáveis de polietileno com capacidade para um litro, que foram lavados com detergente neutro e deixados em repouso em solução de ácido nítrico a 10%, posteriormente enxaguados com água destilada. Para as análises de elementos traços (metais pesados), as amostras foram acidificadas com ácido nítrico (HNO_3) PA até o $\text{pH} < 2$, e refrigeradas a 4 °C.

Todas as amostras foram coletadas na boca do poço. Antes da coleta, os poços ficavam jorrando por alguns minutos para evitar água estagnada nas tubulações e não representativas do aquífero. As amostras foram acondicionadas em caixas de isopor refrigerada e encaminhadas ao laboratório para análises. Tendo em vista que a temperatura, o pH bem como a condutividade elétrica e alcalinidade podem sofrer alterações com o decorrer do tempo, esses parâmetros foram medidos *in situ*, no momento de coleta das amostras.

Foram realizados ensaios para determinação dos níveis dos metais pesados Fe, Mn, Cu, Cr, Pb e Cd. Amostras em branco foram preparadas para corrigir a presença de possíveis interferências existentes nos reagentes utilizados. Foram analisadas por espectrofotometria de absorção atômica pelo equipamento modelo *SPECTRA AA 220* do fabricante Varian.

As amostras coletadas para ensaios de íons dissolvidos (ânions e cátions majoritários) foram filtradas com membrana filtrante de 0,22 µm, e guardadas sob refrigeração logo que chegaram ao laboratório. Foram realizadas as análises para os íons F⁻, Cl⁻, Br⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻, Li⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Na⁺ e Mg²⁺ pela técnica de cromatografia de troca iônica na Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Estado de Mato Grosso. Utilizou-se cromatógrafo iônico modelo *Dionex ICS1000*.

Para verificar a consistência das análises foi calculado o balanço iônico utilizando o software *AQUACHEM 4.0*, desenvolvido pela *Waterloo Hydrogeologic Company*. No mesmo programa foram realizados o cálculo de dureza das amostras e o tipo de água em relação aos íons dominantes. Também foi utilizado o programa Qualigraf da Funceme (MOBUS 2003), para elaborar o diagrama de Piper e o gráfico de salinidade. O diagrama de Piper é utilizado para classificar os diferentes grupos de água quanto aos íons maiores. O parâmetro STD (sólidos totais dissolvidos) foi calculado pela equação STD = 0,65 x CE, segundo Matthess (1982), onde CE é a condutividade elétrica da água medida no campo. Com o auxílio do *Excel* foram gerados as planilhas e os gráficos. Para análise da aptidão da água para ingestão humana foi utilizada a Portaria de Consolidação Nº 5 de 28/08/2017 (Tabela 1). Também foram avaliados a qualidade da água para fins de irrigação. O risco de salinidade para a irrigação foi representado pelo Diagrama de USSL, que serve para classificar a possibilidade de perigo da água para a agricultura.

A Tabela 1 apresenta os valores máximos permisíveis para o consumo humano (VMP) da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28/09/2017. Os parâmetros pH, Condutividade Elétrica, Alcalinidade, Potássio, Cálcio, Magnésio, Bicarbonato e Fosfato não foram encontrados nas legislações vigentes.

3 Resultados e Discussão

Foram amostrados 22 poços tubulares profundos, todos do tipo artesiano, sendo 13 jorrantes e 09 não jorrantes. As profundidades variam de 114 m a 516 m, com média de 341 m. As medidas de vazão variaram de 3,3 m³ h⁻¹ a 40 m³ h⁻¹. Os resultados das análises dos metais

Tabela 1 Valores Máximos Permissíveis (VMP) para o consumo humano da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28/09/2017

Parâmetro	VMP (em mg.L ⁻¹)
Manganês	0,1
Cobre	2
Cromo	0,05
Chumbo	0,01
Cadmio	0,05
Sólidos Totais Dissolvidos	1000
Dureza Total	500
Sódio	200
Ferro Total	0,3
Sulfato	250
Cloreto	250
Nitrito	10
Nitrito	1
Amônia	1,5
Fluoreto	1,5

Manganês, Cobre, Cromo, Chumbo e Cadmio, como o produto nitrogenado amônia, deram abaixo do limite de quantificação do método utilizado em todas as amostras, por este motivo não serão discutidos.

3.1 Caracterização Termal

O termalismo favorece e viabiliza potencial turístico promissor para o desenvolvimento de práticas de lazer e recreação em balneários, pousadas e hotéis. A água aquecida reduz os custos com energia elétrica para o aquecimento da água. Por conta disso, pode ser utilizada para outras atividades, como fonte alternativa de energia para lavagem de carcaça de animais, secagem de grãos, depenagem e evisceração de aves, dentre outras atividades que se beneficiam da elevada temperatura hídrica. Na caracterização termal foi utilizada a convenção proposta por Custódio & Llamas (1983), que classifica as águas subterrâneas de acordo com a variação de temperatura (Tabela 2).

As medidas de temperatura variaram de 27,8º C a 47º C. Essas variações indicaram que 40,9% das amostras são mesotermais, 40,9% termais e 18,8% são hipertermais. Nenhuma foi classificada como hipotermal. A figura 2 mostra que os maiores valores de temperatura estão concentrados na porção nordeste, centro e sudoeste da região. Os maiores valores de temperatura provavelmente estão relacionados ao grau geotérmico e a feições estruturais.

Tabela 2 Classificação da temperatura das águas subterrâneas do Aquífero Furnas

Nº do Poço	Temperatura (°C)	Classificação
4	27,8	Mesotermal
6	34	Mesotermal
7	30	Mesotermal
13	28	Mesotermal
14	28	Mesotermal
16	27,5	Mesotermal
17	31,5	Mesotermal
18	30	Mesotermal
22	34,5	Mesotermal
2	43	Termal
5	38	Termal
8	45	Termal
9	40	Termal
10	41	Termal
11	38	Termal
12	38	Termal
15	42	Termal
19	40	Termal
1	46	Hipertermal
3	46	Hipertermal
20	47	Hipertermal
21	47	Hipertermal

Na porção sul do mapa ocorre temperaturas inferiores a 35°C. De uma maneira geral, observa-se que os poços mais profundos estão com valores de temperatura maiores. As águas mais quentes estavam localizadas nos municípios de Rondonópolis e Poxoréo.

3.2 Análise Hidroquímica

No momento da coleta formam determinados os parâmetros da Tabela 3 e no laboratório foram analisados os das Tabelas 4 e 5. A interpretação dos dados expostos a seguir foi feita a partir do estudo destas tabelas.

O pH, a temperatura da água e o grau de saturação de cada elemento químico, determina o processo de dissolução dos íons nas águas subterrâneas. Seis poços apresentaram águas com características neutras, enquanto três poços apresentaram características levemente alcalina (Tabela 3). A maioria das amostras apresentaram valores de pH com características levemente ácidas,

indicando, de forma geral, que as águas do aquífero Furnas são levemente ácidas com tendências a neutras, que é considerado normal nas águas subterrâneas em locais que não há evidências de cimento carbonático na composição mineralógica.

Os íons carbonato e bicarbonato são responsáveis pela alcalinidade das águas subterrâneas. Ocorrem de forma natural através da dissolução do CO₂. Comparando os valores de pH das amostras estudadas com os valores de alcalinidade, foi possível observar que todas estavam na faixa de 4,8 < pH < 7,8 mostrando que prevalece o equilíbrio químico entre o ácido carbônico e o íon bicarbonato. Nessa faixa de pH não há a formação do ânion carbonato, pois não foi detectado a presença do ânion carbonato, conforme comprovado nas análises. As rochas da Formação Furnas são ricas em quartzo e feldspato e não há evidências de rochas calcárias e cimento carbonático, que poderiam contribuir para a alcalinidade dessas águas.

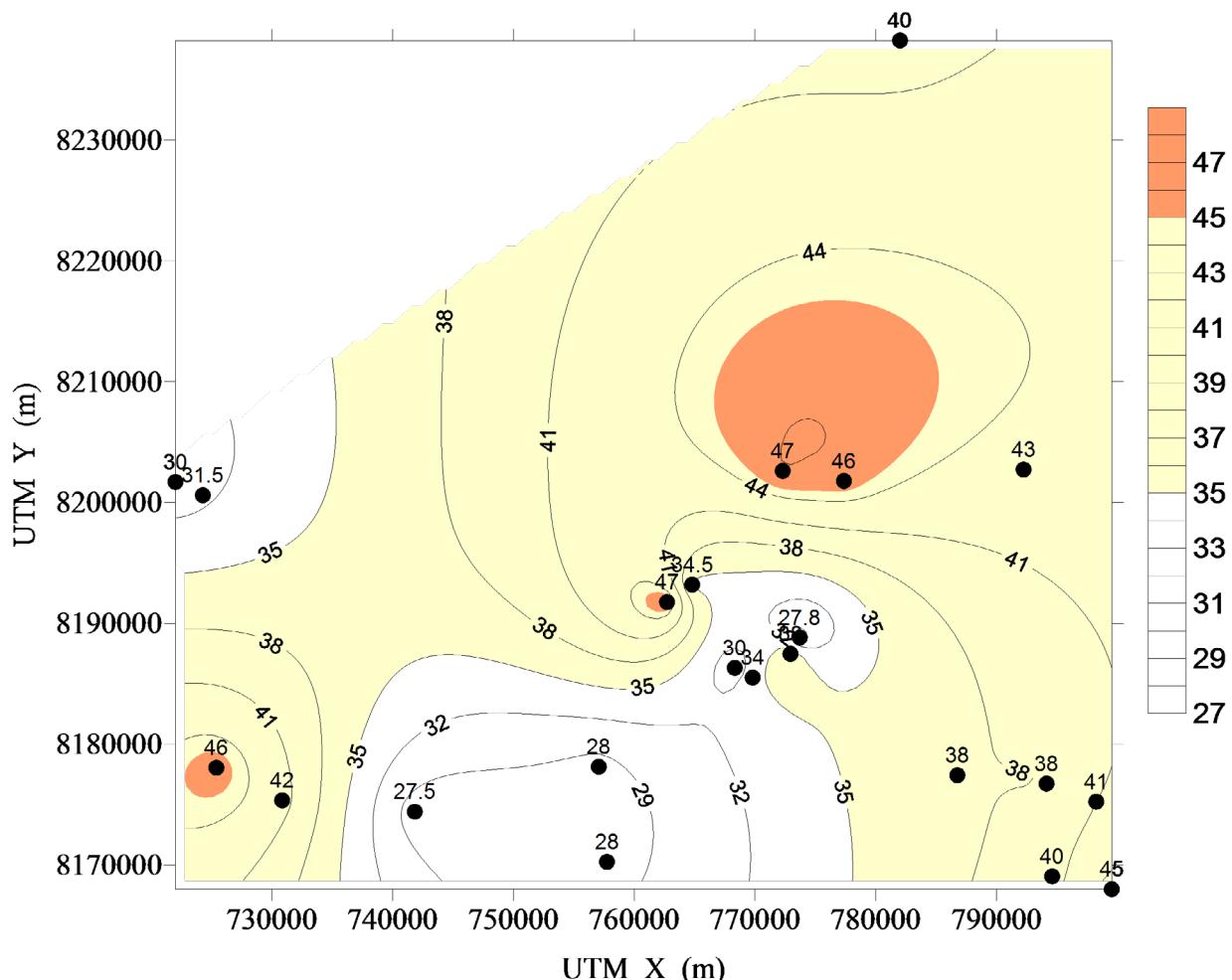


Figura 2 Mapa de isolinhas das temperaturas equidistantes de 3 °C

Os sólidos totais dissolvidos (STD) podem indicar uma relação com a composição mineralógica do aquífero, como também com a função do tempo de residência da água subterrânea. As concentrações encontradas foram baixas (Tabela 5), os poços que apresentaram maiores níveis de STD provavelmente se deve ao maior tempo de residências dessas águas. Todas as amostras apresentaram valores seguramente abaixo do estabelecido pela Portaria de consolidação nº 5 de 28/09/2017.

Os valores de condutividade elétrica foram baixos. Os poços de P7, P8, P9, P10 e P12 apresentaram os maiores valores, indicando que nesses poços há maior concentração de íons dissolvidos na água (Tabela 3). As mesmas características de baixa condutividade elétrica também foram encontradas por Silva & Migliorini (2014) nas águas do Aquífero Furnas na região de Jaciara. A Formação Furnas

é constituída por rochas quartzo-feldspáticas, que contêm minerais de pouca solubilidade em água, portanto fornecem pequenas quantidades de elementos para o meio aquífero. Esses fatores favorecem para que as águas apresentem baixa condutividade elétrica.

Verificou-se baixos valores de dureza (Tabela 5). As amostras apresentaram valores bem abaixo do estabelecido pela Portaria da Consolidação nº 5 de 28/09/2017. Todas foram classificadas como águas pouco duras. O valor baixo da dureza provavelmente está relacionado com composição mineral das rochas que compõe o Aquífero Furnas na região, pois são ricas em minerais de quartzos e feldspato, sem evidências de cimento carbonático, as concentrações encontradas estão relacionadas ao tempo de residência das mesmas, que como consequência, aumenta a quantidade de íons dissolvidos como cálcio e/ou magnésio.

Tabela 3 Parâmetros físico-químicos medidos *in loco*

AMOSTRAS	pH	Cond. Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temp. Água (°C)	Temp. Ar (°C)	Alcalinidade ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
P1	6,3	51,8	46	30	29,5
P2	6,37	81	43	30	40
P3	6,6	85,7	46	34	36,9
P4	6,25	87,5	27,8	30	31,6
P5	6,26	97,4	38	32	34,4
P6	5,66	101,9	34	32	36,1
P7	7,45	236	30	31	70
P8	7,8	280	45	33	134
P9	7,7	276	40	34	125
P10	7,5	164,4	41	34	100
P11	7,3	78,6	38	38	82
P12	7,08	129,5	38	30	65
P13	5,57	24,4	28	28	10,2
P14	5,51	11,04	28	29	2,1
P15	6,32	100,5	42	26	31,1
P16	4,84	7,57	27,5	32	25,4
P17	6,73	143,5	31,5	33	22,9
P18	6,64	55,8	30	32	32
P19	6,75	105,7	40	32	34,4
P20	7,49	59,2	47	42	39,3
P21	7,1	81,5	47	41	29,5
P22	7,23	78,6	34,5	39	40

Um dos maiores problemas associados aos íons de cálcio na água está na elevação da dureza e incrustações em tubulações (Hem 1985). Observa-se que apesar das amostras apresentarem pH levemente ácido, todas possuem baixa concentração do íon cálcio (Tabela 4). Esse fato é justificado pela composição mineralógica da Formação Furnas que é rica em quartzo e feldspato sem evidências de rochas carbonáticas. As baixas concentrações do íon cálcio que foram encontrados podem ter sido contribuição da dissolução de feldspato plagioclásio da Formação Furnas ou contribuição do Grupo Cuiabá, que, segundo Silva & Migliorini (2014) está estratigraficamente abaixo do Aquífero Furnas e possui mármore calcítico/dolomítico, marga e calcário em sua composição.

O íon magnésio também possui propriedades semelhantes às do cálcio, porém é mais solúvel e difícil

de precipitar. Isso ocorre porque os minerais fornecedores de magnésio são mais estáveis diante do intemperismo químico do que os minerais fornecedores de cálcio. De modo geral, nas águas subterrânea analisadas da região, o magnésio mostrou concentração relativamente baixa, sendo considerado não prejudicial para o consumo humano.

Da mesma maneira que o íon cálcio, observou-se que todas as amostras possuem baixa concentração do íon magnésio (Tabela 4). Esse fato é justificado pela composição mineralógica da Formação Furnas que é rica em quartzo e feldspato, sem evidências de cimento carbonático ou rochas carbonatadas. As concentrações do íon magnésio também podem ter sido da contribuição do Grupo Cuiabá, que possui mármore calcítico/dolomítico, marga e calcário em sua composição e se encontra estratigraficamente abaixo da Formação Furnas (Silva & Migliorini 2014).

Tabela 4 Concentração dos íons maiores (em mg.L⁻¹)

Poço	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃ ⁻¹
P1	3,9	3,08	2,62	2,74	0,12	0,77	36
P2	4,4	8,47	3,69	3,18	0,13	1,13	48,8
P3	4,29	6,17	3,65	2,89	0,15	1,67	45
P4	4,00	7,48	3,68	3,06	0,13	1,10	38,5
P5	5,02	8,15	3,99	3,12	0,30	2,12	42
P6	4,25	9,19	4,78	3,57	0,93	1,63	44
P7	29,30	8,59	5,89	2,38	0,11	15,03	85,4
P8	43,39	16,17	16,68	5,20	0,72	17,77	164,7
P9	37,57	15,07	16,84	5,14	0,52	13,75	152,5
P10	12,95	11,31	10,56	5,00	0,20	3,49	122
P11	11,88	10,22	9,306	4,94	0,23	4,01	100
P12	8,20	7,72	6,07	4,40	0,27	1,90	79,3
P13	0,34	1,84	1,15	0,94	0	0,73	12,5
P14	0,09	0,31	0,53	0,17	0,026	0,20	2,54
P15	2,47	4,27	3,96	3,20	0,20	1,68	38
P16	0,06	0,15	0,12	0,013	0	0	31
P17	3,29	3,47	2,70	2,54	0	1,08	28
P18	2,52	3,46	2,82	2,59	0,14	1,35	39
P19	1,77	2,76	1,47	2,08	0	0,54	42
P20	3,16	5,71	3,11	2,90	0,12	1,57	48
P21	3,30	5,21	3,63	2,91	0	2,14	36
P22	4,80	5,78	3,49	2,73	0,07	2,12	48,8

Os poços P7, P8 e P9 (Tabela 4) apresentaram concentrações mais elevadas de sódio em relação aos demais, dessa forma, essas águas devem ser usadas com restrições para a irrigação. Porém, todas as amostras analisadas estão dentro dos padrões de potabilidades da Portaria de Consolidação Nº 5 de 28/09/2017. As concentrações do íon sódio encontradas podem ser originadas principalmente da dissolução de feldspatos, tendo em vista que as rochas que compõem a Formação Furnas são constituídas principalmente por arenitos quartzosos, em menor concentração feldspato alcalino e pouco feldspato plagioclásio.

O íon potássio ocorre em pequenas quantidades ou está ausente nas águas subterrâneas, devido a sua participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvida pelos minerais de argila. O potássio é um elemento abundante na crosta terrestre, porém ocorre em pequena quantidade nas águas subterrâneas. Normalmente as concentrações não são consideradas tóxica, sendo um elemento vital para as plantas (Hem 1985).

Pode-se observar que a maioria das amostras apresentaram concentrações do íon potássio inferior a 10 mg.L⁻¹, porém os poços P8, P9, P10 e P11 mostraram concentrações mais elevadas em relação aos demais (Tabela 4). Os valores encontrados provavelmente estão associados ao intemperismo das rochas com dissolução do arenito através decomposição dos feldspatos alcalinos da Formação Furnas.

Neste trabalho a concentração média encontrado de ferro ($\text{Fe}^{+2}/\text{Fe}^{+3}$) foi de 0,4 mg.L⁻¹, o mínimo de 0,02 mg.L⁻¹ e o máximo foi de 1,8 mg.L⁻¹ (Tabela 5). A Portaria de Consolidação nº 5 de 28/09/2017, delimita o valor máximo permitível para o ferro de até 0,3 mg.L⁻¹ para fins de ingestão humana. A água de um poço pode ter concentrações consideráveis de ferro pelo contato com partes metálicas de revestimentos do próprio poço, partes da bomba ou do encanamento. Também pode estar presente em teores de até 0,3 mg.L⁻¹ nas águas subterrâneas (Santos 2008).

As concentrações mais elevadas do íon ferro foram encontradas nas amostras P1, P3, P6, P7, P9, P10, P11, P13

Tabela 5 Concentração de nitrato, nitrito fosfato, fluoreto, ferro, sólidos totais dissolvidos e dureza (em mg.L⁻¹)

Poço	NO ₃ ⁻¹	NO ₂ ⁻¹	PO ₄ ⁻³	Fl ⁻¹	Dureza	STD	Fe
P1	0,12	0,20	0	0	17,8	33,67	1,89
P2	0	0,21	0	0	22,3	52,65	0,22
P3	0,04	0,22	0	0	21	55,70	0,77
P4	0,14	0,21	0	0	21,8	56,87	0,21
P5	0,52	0,18	0	0	22,8	63,31	0,15
P6	1,85	0,11	0	0	26,6	66,23	0,77
P7	0,20	0,35	0	0	24,5	153,4	0,54
P8	0,34	0	0	0	63,1	182,0	0,27
P9	0,31	0	0	0	63,2	179,4	0,39
P10	0,15	0,20	0	0	47	106,8	0,74
P11	0,14	0,20	0	0	43,6	51,09	0,82
P12	0,17	0,18	0	0	33,3	84,17	0,25
P13	0	0,37	0	0	6,8	15,86	0,44
P14	0	0,06	0	0	2	7,17	0,27
P15	0	0	0,80	0,22	23,1	65,32	0,08
P16	0,11	0	0,03	0,14	17,7	4,92	0,02
P17	0	0	0	0	12,3	93,27	0,087
P18	0	0	0	0,20	19,7	36,27	0,18
P19	0	0	0,41	0,15	21	68,70	0,22
P20	0	0	2,92	0,12	20	38,48	0,09
P21	0,12	0,20	0	0	17,8	52,97	1,89
P22	0,	0,21	0	0	22,3	51,09	0,22

e P21. Estes nove poços ultrapassaram o valor máximo estabelecido pela legislação vigente em relação a ingestão humana (Tabela 5). Provavelmente a ocorrência de íons férricos pode ter surgido da contribuição por dissolução das rochas do Grupo Cuiabá, que estratigráficamente está abaixo da Formação Furnas, tendo em vista que neste grupo há a ocorrência de piritas disseminadas nos filitos e metadiamectitos (Silva & Migliorini 2014).

Em águas subterrâneas os íons de ferro ocorrem sob a forma do íon ferroso (Fe^{+2}) e férrico (Fe^{+3}). O íon ferroso (Fe^{+2}) é instável e se oxida a férrico (Fe^{+3}) que é insolúvel em águas alcalinas. O íon ferroso é instável na presença de oxigênio contido na água. Dessa forma, se no momento da amostragem tiver presença do íon ferroso, quando a amostra entrar em contato com o ar atmosférico, este se converterá em íon férrico. Por este motivo as concentrações são expressas em ferro total.

As amostras apresentaram concentrações de sulfato abaixo do limite estabelecido legislação vigente, portanto os teores eram baixos. Os mais elevados foram encontrados nas amostras P7, P8 e P9 (Tabela 4). Na composição química das rochas da Formação Furnas não há evidências de

minerais contendo enxofre. A explicação mais provável para a presença de sulfatos nessas amostras seria da dissolução das piritas, que ocorrem disseminadas nos filitos e metadiamectitos do Grupo Cuiabá. Outra possível fonte de sulfato nessas águas, poderia ser da contaminação antrópica através do uso de fertilizantes e agrotóxicos nas áreas de recarga, visto que na área estudada o aquífero é confinado.

Com relação ao ânion cloreto, os valores encontrados foram baixos, sendo que não foi detectado a presença em cinco poços (Tabela 4). Os arenitos da Formação Furnas são constituídos principalmente por minerais de quartzo e possui em menor concentração feldspato alcalino e plagioclásio. Há pouca probabilidade de haver contribuição de cloretos desses minerais, porém as concentrações encontradas podem ter surgidos através da lixiviação das áreas de recargas do aquífero.

Águas subterrânea com concentração abaixo de 5 mg.L⁻¹ de nitrato não causam problemas graves à saúde humana, todavia teores superiores representam um indicativo de possíveis contaminações por fertilizantes ou dejetos animais. Em geral, nitrito e amônia não são constatados nas análises químicas porque são rapidamente

convertidos em nitrato por bactérias presentes na água. Contudo, se constatadas, indicam poluição orgânica recente. Em águas subterrâneas é improvável haver relação com as formações geológicas (Hem 1985).

As fontes de contaminação dos aquíferos por nitrato podem ocorrer através do esgoto lançado em fossas sépticas e valas negras, como também pelas fazendas de criação de animais, que produzem quantidades consideráveis de rejeitos orgânicos nitrogenados e propiciam a contaminação do aquífero por infiltração e lixiviação.

Os produtos nitrogenados apresentaram baixos valores. O nitrato apresentou concentração abaixo do detectável pelo método empregado em oito amostras (Tabela 5) e todos os teores detectados estavam de acordo com o VMP da Portaria de consolidação no 5 de 28/09/2017. A concentração média de nitrito encontrada foi de 0,18 mg.L⁻¹. O valor máximo de 0,37 mg.L⁻¹ e mínimo de 0,06 mg.L⁻¹. Oito poços apresentaram a concentração de nitrito abaixo do limite de detecção do método empregado (Tabela 5). Todas as amostras ficaram abaixo do valor máximo permitido pela Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde. Em nenhuma das amostras analisadas foi encontrada concentração acima do limite de quantificação do cátion amônia, fato esse já esperado, tendo em vista que não é comum a presença desse íon em formações rochosas.

A presença do íon fluoreto foi detectada somente em cinco poços, devido aos baixos teores encontrados. A concentração média foi de 0,14 mg.L⁻¹, a máxima foi de 0,22 mg.L⁻¹ e a mínima de 0,12 mg.L⁻¹ (Tabela 5). Todos estão abaixo do VMP da legislação vigente.

Segundo Santos (2008), a concentração de fosfato em águas subterrâneas pode variar entre 0,01 mg.L⁻¹ a 1,0 mg.L⁻¹, podendo chegar a 10 mg.L⁻¹. Foram detectadas a presença do íon fosfato somente em cinco amostras (Tabela 5). O teor médio do íon fosfato foi 0,58 mg.L⁻¹, o máximo de 2,92 mg.L⁻¹ e mínimo de 0,03 mg.L⁻¹. A Portaria de Consolidação N° 5 de 28/09/2017 não limita valores para este ânion. Os valores encontrados provavelmente estão relacionados ao ciclo natural do fósforo pela ação de micro-organismos, tendo em vista que o aquífero é confinado e não há indícios de fosfato nas rochas do Aquífero Furnas. Outra hipótese seria a contaminação advinda dos detergentes, efluentes domésticos, inseticidas e pesticidas nas áreas de recarga do aquífero.

3.3 Classificação de Piper

O diagrama de Piper é utilizado para classificar os diferentes grupos de água quanto aos íons maiores, isto é, aos íons predominantes nas águas subterrâneas. A água é

denominada de acordo com os cátions e ânions que existem em maior quantidade (Figura 3). Para isto, as concentrações dos diferentes cátions e anions, computados separadamente, são expressos em miliequivalentes por litro e transformados em porcentagem do total de cátions e do total de anions.

Observa-se na Figura 3, que a classificação do diagrama de Piper possui dois grupos distintos, 85% das amostras foram classificadas como sendo águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas, totalizando 17 amostras. E 15% foram classificadas em águas bicarbonatadas sódicas.

3.4 Classificação da Qualidade da Água para Irrigação

Na determinação da qualidade da água subterrânea para fins de irrigação foi utilizado o diagrama da *United States Salinity Laboratory – USSL* (Santos 2008). Esse diagrama classifica as águas quanto ao uso na agricultura considerando a condutividade elétrica como indicador do perigo de salinização do solo e a razão de adsorção de sódio (RAS) como indicador do perigo de alcalinização ou solidificação do solo, que faz a relação entre os íons sódio, cálcio e magnésio. Quanto maior o RAS menos adequado será a água para irrigação. A Figura 4 apresenta o diagrama de USSL, pode-se observar que somente dois poços (P8 e P9) apresentaram risco de salinidade média, as outras foram baixo ou nulo.

Segundo o diagrama da USSL, observa-se que doze poços apresentaram águas classificadas em C0-S1 (Figura 4), indicando águas com teor de salinidade nulo e baixo teor de sódio. De acordo com essa classificação, estas águas podem ser usadas sem restrições para fins de irrigação.

Seis poços apresentaram águas classificadas em C1-S1 (Figura 4), consideradas de baixa salinidade de sódio, podendo ser usadas para a irrigação de quase todas as culturas, salvo se a permeabilidade do solo for muito baixa. Os poços P8 e P9 apresentaram classificação C2-S1 (Figura 4), sendo consideradas águas de salinidade média e teor de sódio médio. Essas águas podem ser utilizadas para a irrigação de plantas com tolerância moderada para sais e em solos arenosos e/ou solos orgânicos de boa permeabilidade, tendo em vista que a irrigação com águas ricas em sais afeta a dinâmica de flocação e dispersão do solo, e pode modificar os aspectos físicos e químicos, além de influenciar na germinação de plantas. A maior salinidade desses poços provavelmente se deve ao maior tempo de residência destas águas, que, como consequência, aumenta a quantidade de íons solubilizados nas mesmas.

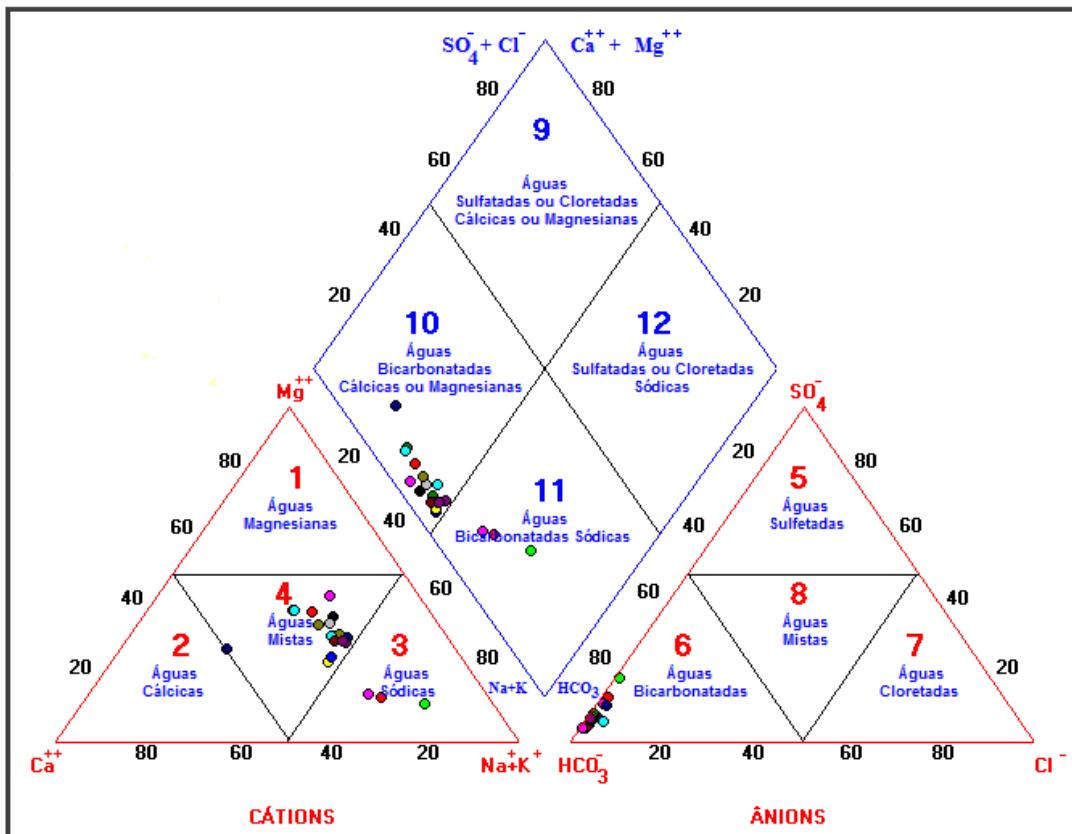


Figura 3 Diagrama de Piper com a classificação dos íons maiores

3.5 Razões Iônicas

As razões iônicas são as relações entre os íons dissolvidos na água e indicam uma relação entre o tipo da litologia do qual a água se origina. Segundo Santos (2008), estas relações podem indicar um certo relacionamento com o meio físico no qual água se origina, sugerir ações de fenômenos modificadores ou apontar uma característica da água considerada. No presente trabalho foram calculadas as razões iônicas $r\text{K}^{+}/r\text{Na}^{+}$, $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ e $r\text{Na}^{+}/r\text{Ca}^{2+}$ (Tabela 6).

A razão $r\text{K}^{+}/r\text{Na}^{+}$, apresentou valor médio de 0,92, mínimo de 0,17 e máximo de 3,12 (Tabela 6). Através do valor médio, observa-se que na maioria das amostras as concentrações dos íons sódio e potássio estão bem próximas. Porém, no poço P13 essa relação é maior, indicando que ocorre a predominância do íon potássio em detrimento ao íon sódio. Essa razão também pode indicar um processo de troca catiônica natural da água em questão. As razões $r\text{K}^{+}/r\text{Na}^{+}$ são frequentemente encontradas na faixa de 0,04 e 0,3 em águas doces (Hem 1985).

Os valores da razão $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ variaram entre 0,51 e 2,36 com média de 1,22 (Tabela 6). A maioria das amostras

(14 poços) apresentaram valores maiores que 1,0, indicando que nesses pontos as águas analisadas possuem maiores concentrações do íon magnésio. Quando os valores são menores que 1,0 podem indicar a presença de rochas dolomíticas e se forem superiores a 1,0 tem-se a associação com compostos de silicatos magnesianos. A diminuição da razão ocorre quando há a dissolução da calcita e o aumento quando há a precipitação do carbonato de cálcio (Custodio & Lhamas 1983). De fato, foram encontrados somente seis poços com razão menor que 1 e quatorze poços com razão maiores que 1, isso pode ser um indicativo de que a contribuição desses íons provém de rochas silicatadas magnesianas. Esta razão é importante para indicar influência de águas confinadas por rochas cálcicas ou dolomíticas, ou uma possível contaminação do aquífero por água do mar (Hem 1985). Os valores baixos encontrados confirmam a hipótese de ausência de rochas calcárias ou dolomíticas nas águas do Aquífero Furnas.

Para a razão $r\text{Na}^{+}/r\text{Ca}^{2+}$, os valores variaram de 0,16 a 4,32 com média de 1,18 (Tabela 6). A maioria dos valores encontram-se perto de 1, indicando que há um equilíbrio nas concentrações desses dois íons. As razões entre sódio e

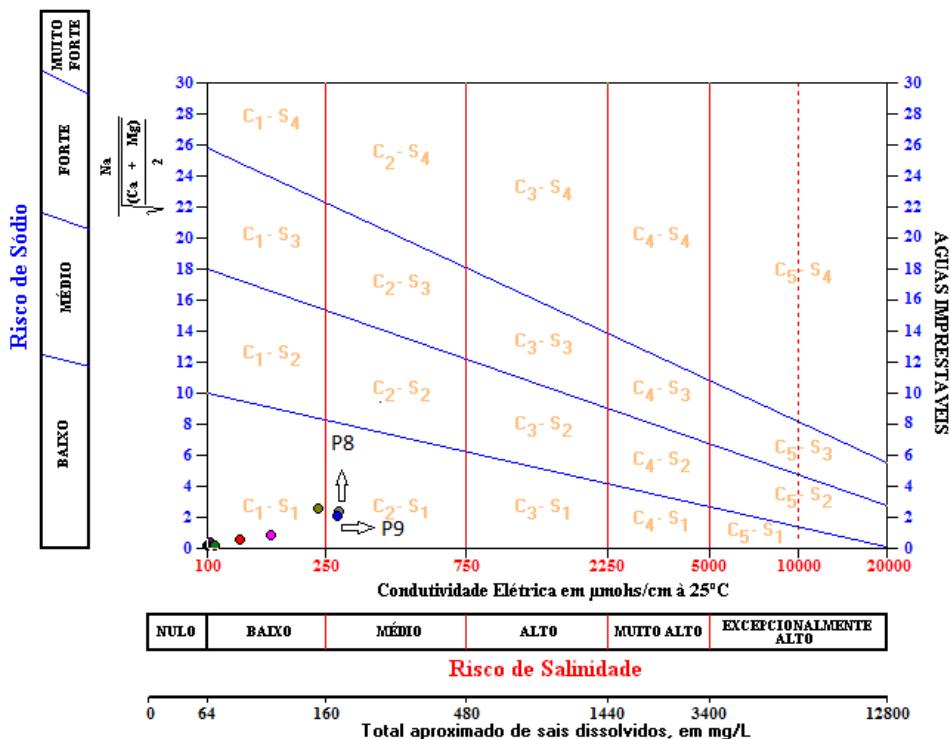


Figura 4 Diagrama de USSL com a classificação da qualidade da água para irrigação

cálcio podem indicar uma variação nos processos de troca de base na água. A maior parte das amostras apresentaram essa razão em torno de 1, indicando o equilíbrio químico dos íons sódio e cálcio.

3.6 Correlação de Pearson

As correlações permitem estudar o comportamento conjunto de variáveis distintas e indicar um grau de relacionamento entre elas. O coeficiente de correlação linear de Pearson é usado para medir as correlações entre duas variáveis distintas. Tem um intervalo de valores de -1 a $+1$, o valor de zero indica que não há associação entre as duas variáveis, quando o valor for maior que zero indica uma associação positiva e um valor menor que zero indica associação negativa (Brito *et al.* 2003).

Diversos autores buscam classificar os diferentes intervalos de coeficiente de correlação, neste trabalho, quando a correlação for maior que $0,9$ é muito forte, se estiver entre $0,7$ e $0,9$ é forte, se estiver entre $0,5$ e $0,7$ é moderada, se entiver entre $0,3$ e $0,5$ é fraca e se estiver entre 0 e $0,3$ é desprezível, porque indica pouca ou quase nenhuma correlação entre os íons (Bussab & Morettin 2010). A Tabela 7 mostra que vários parâmetros deram correlação entre os íons forte a muito forte (em negrito).

Houve correlação forte entre o pH e a alcalinidade ($\rho = 0,77$). Essa correlação é uma indicação de que o íon bicarbonato influencia de forma direta com o pH dessas águas, além da dureza que teve uma correlação forte com o pH ($\rho = 0,71$). Os íons cálcio, magnésio, potássio, sulfato e sódio apresentaram correlação moderada. A alcalinidade dessas águas é decorrente da presença de íons bicarbonato, que controlam o pH e contribuem para a formação de compostos solúveis como bicarbonato de sódio, bicarbonatos de cálcio, bicarbonatos de magnésio e bicarbonato de potássio. Estes são sais que estão solubilizados na água que provavelmente são de origem natural da Formação Furnas e também do Grupo Cuiabá que se encontra subjacente.

Pode se observar na Tabela 7 uma correlação muito forte a forte entre a condutividade elétrica e os íons sódio ($\rho = 0,94$), potássio ($\rho = 0,84$), cálcio ($\rho = 0,86$), bicarbonato ($\rho = 0,88$), sulfato ($\rho = 0,92$) e alcalinidade ($\rho = 0,88$). A condutividade elétrica na água é determinada pela presença de sais dissolvidos e ionizados, que neste caso é favorecida pela presença desses íons na solução, com ênfase para os íons sódio e sulfato, demonstrando também que estes íons tiveram forte e muito forte correlação, indicando que os íons responsáveis pela condutividade elétrica dessas águas estão relacionados com a concentração dos mesmos.

Tabela 6 Razões iônicas dos cátions (em miliequivalentes por litro)

Poços	rK ⁺ / rNa ⁺	rMg ²⁺ / rCa ²⁺	rNa ⁺ / rCa ²⁺
P1	0,46	1,74	1,30
P2	1,11	1,43	1,05
P3	0,84	1,32	1,023
P4	1,10	1,38	0,94
P5	0,95	1,30	1,093
P6	1,2743	1,24	0,77
P7	0,17	0,67	4,32
P8	0,21	0,52	2,26
P9	0,23	0,50	1,9
P10	0,51	0,79	1,06
P11	0,50	0,88	1,11
P12	0,55	1,20	1,17
P13	3,12	1,35	0,26
P14	1,88	0,54	0,15
P15	1,02	1,34	0,54
P16	0,80	1,53	0,77
P17	0,91	2,36	1,04
P18	1,06	1,55	0,88
P19	0,93	1,33	0,78
P20	0,70	1,30	1,19
P21	0,46	1,74	1,30
P22	1,11	1,43	1,057

Tabela 7 Matriz de correlação de Pearson entre os íons estudados

	pH	C.E.	Durez	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Alc	NO ₃ ⁻
pH	1,0											
C.E.	0,69	1,0										
Durez	0,71	0,83	1,0									
HCO ₃	0,77	0,88	0,97	1,0								
Ca	0,69	0,86	0,98	0,98	1,0							
Mg	0,68	0,66	0,92	0,85	0,84	1,0						
K	0,64	0,84	0,94	0,93	0,92	0,88	1,0					
Na	0,67	0,94	0,83	0,90	0,90	0,60	0,82	1,0				
Cl	0,11	0,53	0,63	0,54	0,62	0,59	0,69	0,52	1,0			
SO ₄	0,64	0,92	0,73	0,82	0,81	0,48	0,74	0,98	0,46	1,0		
Alc	0,77	0,88	0,97	1,0	0,98	0,86	0,93	0,90	0,54	0,82	1,0	
NO ₃	-0,24	0,18	0,20	0,12	0,17	0,24	0,34	0,11	0,83	0,10	0,12	1,0

A dureza apresentou correlação muito forte com os íons cálcio ($\rho = 0,98$), magnésio ($\rho = 0,92$), potássio ($\rho = 0,94$) e alcalinidade ($\rho = 0,97$) demonstrando que a concentração dos íons cálcio e magnésio estão diretamente relacionados com a dureza total, indicando que a dureza sofre influência desses íons. Observa-se também que o íon cálcio apresentou maior correlação que o magnésio. Certamente a dureza dessas águas são provenientes de compostos solúveis de bicarbonatos de cálcio e/ou magnésio, sulfatos de cálcio e/ou magnésio em solução. Também ocorre correlação forte com os íons sódio ($\rho = 0,83$) e moderada com cloreto ($\rho=0,63$) demonstrando que a dureza também é influenciada pelos sais de sódio e cloreto (Tabela 7).

A correlação entre o pH e o nitrato deu negativa, indicando que quando uma variável aumenta a outra diminui, resultando em uma correlação inversa entre as duas variáveis.

O íon cloreto apresentou correlação moderada com a dureza ($\rho = 0,63$), o cálcio ($\rho = 0,62$) e o potássio ($\rho = 0,69$). Esse fato indica que também há na composição química da água, sais solubilizados de cloreto de cálcio e cloreto de potássio, que também influenciam na dureza (Tabela 7). A correlação forte com o ânion nitrato ($\rho = 0,83$) pode ser explicado pela existência de troca aniônica entre as espécies.

Vários íons demonstraram correlação forte e muito forte entre si (Tabela 7). Podendo ser um indicativo de que após a diluição das rochas, estas espécies químicas estejam em equilíbrio formando compostos solúveis nas águas subterrâneas.

4 Conclusão

Este trabalho permitiu observar a ocorrência de fenômenos de artesianismo e termalismo. As temperaturas medidas mostraram que predomina na região águas mesotermais e termais, embora em alguns locais as águas são hipertermais. O aquífero é explorado por poços profundos artesianos jorrantes e não jorrantes.

Os parâmetros iônicos estudados permitiram concluir que as águas subterrâneas apresentam baixa concentração de sais dissolvidos, fato que provavelmente está relacionado com a ocorrência de minerais pouco solúveis da formação rochosa (quartzo e feldspato), além do alto índice pluviométrico da região e a baixa lixiviação das rochas.

Alguns poços apresentaram concentração excessiva de ferro. Com exceção deste íon, todos os parâmetros estudados estavam abaixo dos valores máximos permissíveis para o consumo humano da Portaria de Consolidação nº 5 de 28/09/2017.

Os tipos químicos dominantes permitiram classificar as amostras de água da região em águas bicarbonatada cárnicas ou magnesianas, havendo três poços com águas do tipo bicarbonatada sódica. O principal tipo de água encontrada foi bicarbonatada magnesiana, o que mostra o controle litoquímico exercido pelas rochas da Formação Furnas.

Para se conhecer melhor a hidrogeologia da região, recomenda-se continuar estudando o Aquífero Furnas mais para leste, na direção do município de Ato Araguaia. Também seria interessante compreender o tempo de residências destas águas a partir de métodos isotópicos.

5 Referências

- Agencia Nacional de Águas Brasil 2011, *Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos*, Companhia Estadual do Estado de São Paulo, Brasília.
- American Public Health Association 2012, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22th edn, Water Environment Federation, Washington.
- Barros, L.C., Cardoso, O.R.F.A., Freire, F.A., Souza Júnior, J J, Rivetti, M., Luz, D.S., Palmeira, R. C.B.& Tassinari, C.C. G. 1982, *Geologia da Folha SE-1, Corumbá, Projeto RADAMBRASIL*, vol. 27. Rio de Janeiro.
- Brito, N.M., Junior, O.P.A., Polese, L. & Ribeiro, M.L. 2003, ‘Validação de Métodos Analíticos: Estratégias e Discussão’, *Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, Curitiba, vol. 13, pp. 129-46.
- Bussab, W.O.& Morettin, P.A. 2010, *Estatística Básica*, 6 ed, Saraiva, São Paulo.
- Custódio, E. & Llamas, M.R. 2001, *Hidrologia Subterrânea*, 2 ed, Omega S.A., Barcelona.
- Cutrim A.O. & Rebouças, A.C. 2006, ‘O Aquífero Furnas no Estado de Mato Gross’, in C.J. Fernandes & R.R. Fernandes (coords), *Coletânea Geológica de Mato Grosso*, edUFMT, Cuiabá, pp. 51-62.
- Hem, J.D. 1985, *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*, 3th edn, Geological Survey Water- Suply Paper, Riverside, California.
- Matthess G. 1982, *The properties of groundwater*, 1th edn, John Wiley & Sons, New York.
- Migliorini, R.B., Barros, M.S., Apoitia, L.F.M. & Silva, J.F. 2006, ‘Diagnóstico Preliminar das Principais Províncias Hidrogeológicas do Estado de Mato Grosso: Uma Proposta Hidrogeológica de Reconhecimento’, in C.J. Fernandes & R.R. Fernandes (coords), *Coletânea Geológica de Mato Grosso*, edUFMT, Cuiabá, pp 37-49.
- MOBUS, G. 2003, *Qualigraf: software para interpretação de análise físico-químicas*, versão Beta. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, FUNCEME, Fortaleza, Ceará, visto em 27 abril 2021, <<http://www.funceme.br>>.
- Salles, L.Q., Leal, L.R.B., Pereira, R.G.F.A., Sanilaureano, F.V., Nascimento, S.A.M., Zucchi, M.R. & Barbosa, N.S. 2019, ‘Ferramentas Hidrogeoquímicas e Isotópicas ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$) Aplicado no Entendimento dos Processos de Salinização da

Água Subterrânea em Aquíferos Carbonáticos Proterozóicos:
Evidencia do Semiárido do Nordeste Brasileiro', *Anuário do
Instituto de Geociências*, vol. 42, n 2, pp. 117-25.
Santos, A.C. 2008, 'Noções de Hidroquímica', in F.A.C. Feitosa,
J.M. Filho, E.C. Feitosa & J.G.A. Demetrio (coords),

Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações, 3 ed, CPRM
LABHID, Rio de Janeiro, pp 325-57.
Silva, J.J.F. & Migliorini, R.B. 2014, 'Caracterização das Águas
Subterrâneas do Aquífero Furnas na Região Sul do Estado de
Mato Grosso', *Revista Geociências*, vol. 33, n. 2, p.261-77.

Recebido em: 23/11/2020

Aprovado em: 24/05/2021

Como citar

Magalhães, A. & Migliorini, R.B. 2021, 'Qualidade da Água Subterrânea do Aquífero Furnas na Região de Rondonópolis/MT', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 39602. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39602