

UTILIZAÇÃO DO MAPEAMENTO HIDROQUÍMICO PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DA BACIA DO RIO SÃO MIGUEL, MINAS GERAIS

Thiago Nogueira Lucon¹, Adivane Terezinha Costa², Bruna de Oliveira Meyer³,
Pedro Henrique Silva Assunção⁴, Leon Dias Oliveira⁵.

1 - Doutorando do departamento de engenharia geológica – UFOP. Ouro Preto, MG. thiago.n.lucon@gmail.com

2 - Profª Drª do departamento de engenharia geológica – UFOP. Ouro Preto, MG. adivanecosta@gmail.com

3 - Mestre do departamento de engenharia geológica – UFOP. Ouro Preto, MG. brunadeoliveira108@gmail.com

4 - Graduando do departamento de engenharia geológica – UFOP. Ouro Preto, MG. pedroassuncao94@hotmail.com

5 - Engenheiro geólogo – UFOP. Ouro Preto, MG. leon-dias@hotmail.com.

Recebido em 25 de novembro de 2017; aceito em 17 de junho de 2018

Resumo: A área em estudo contempla a bacia do rio São Miguel (≈520 km²), afluente do rio São Francisco, situada na província cárstica de Arcos-Pains e inserida na Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco (235.635 km²). Com o objetivo de avaliar preliminarmente a utilização do mapeamento hidroquímico para verificar espacialmente a qualidade das águas superficiais, foram realizadas análises hidroquímicas em 34 pontos da bacia em apreço durante uma estação seca e uma chuvosa. As análises incluíram a determinação de parâmetros físico-químicos (temperatura, pH, Eh, CE, STD, oxigênio dissolvido e turbidez), assim como a concentração de ânions (NO₃⁻, PO₄³⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ e Cl⁻), cátions maiores e elementos traço. Os dados foram tratados e comparados com os valores estabelecidos pela legislação Conama nº 357 (2005) para águas da classe 1 os quais balizaram os valores plotados nos mapas hidroquímicos, facilitando, desta maneira, a visualização dos locais que violaram o limite. Foram observados valores acima dos permitidos para as concentrações de nitrato, alumínio, ferro, cádmio, manganês e turbidez.

Palavras Chave: Carste, Alto São Francisco, Arcos-Pains

Abstract: USE OF HYDROCHEMICAL MAPPING FOR QUALITY EVALUATION OF SURFACE WATERS, SÃO MIGUEL RIVER BASIN, MINAS GERAIS. The study aimed to check the waters quality of the karst region of the São Miguel River (≈520 Km²), a tributary of the São Francisco river, located in the karst province of Arcos-Pains, and belonging to the Upper San Francisco Basin (235,635 Km²). In order to evaluate the quality of surface waters with the use of hydrochemical mapping, chemical analyzes were performed in 34 basin sites during the dry season and the rainy season. The analysis included the determination of physicochemical parameters (temperature, pH, Eh, CE, STD, dissolved oxygen and turbidity), as well as the concentration of anions (NO₃⁻, PO₄³⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ and Cl⁻), and major cations and trace elements. The data were treated and compared with the legal parameters which marked the ranges of isovalues plotted in the hydrochemical maps through the software Arcgis 10.1, facilitating in this way the visualization of the anomalies. Anomalies were observed in relation to the maximum values for turbidity and the concentrations of nitrate, aluminum, iron, cadmium and manganese.

Keywords: Karst, Upper São Francisco, Arcos-Pains

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento social e econômico mundial ocasiona um aumento na demanda por água. Isto exige um controle sistemático da qualidade das águas, a fim de garantir o bem-estar humano e o equilíbrio ecológico, como é preconizado pelas legislações vigentes no Brasil: Portaria do Ministério da Saúde (MS) nº 2.914 (2011), Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 357 (2005) e Deliberação Normativa Conjunta do Conselho Estadual de Políticas Ambientais e do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais (COPAM/CERH-MG) nº 1 (2008).

As características das águas repercutem o resultado das interações físico-químicas entre as fases sólidas, líquidas e gasosas com as quais mantiveram contato durante as diferentes etapas do ciclo hidrológico. Este processo é influenciado pelo potencial hidrogeniônico (pH) e de oxidação-redução (Eh), pela temperatura e pelo grau de saturação dos elementos no meio aquoso (Feitosa *et al.* 2008),

assim como pelo arcabouço topográfico, geológico e ambiental (Gonçalves *et al.* 2010).

A composição das águas pode ter influência geogênica, biogênica e antropogênica, derivada do contexto social e ambiental da região e do entorno da bacia hidrográfica. Dentre os mais graves problemas que afetam a quantidade e qualidade da água de rios, córregos e lagoas procedem do lançamento de forma inadequada de esgotos domésticos e industriais, da perda e destruição de bacias de captação, do desmatamento, da agricultura migratória sem controle e de práticas agrícolas deficientes (Moraes & Jordão, 2002).

De acordo com Hirata e Rebouças (1999), Nieto *et al.* (2005), Hirata e Fernandes (2006), Vrba (2006), Mestrinho (2008), Milek *et al.* (2014) e Villanueva *et al.* (2014), o diagnóstico químico das águas é uma importante ferramenta, pois busca a compreensão sobre a qualidade destas visando, por exemplo, a modelagem e avaliação de riscos de contaminação, medidas de proteção da qualidade das águas, dentre outros dispositivos de planejamento.

10.18285/geonomos.v26i1.1237

A contaminação das águas por elementos químicos oriundos das rochas e sedimentos têm recebido atenção especial dos serviços de saúde pública devido às evidências toxicológicas, expressas de forma aguda ou crônica, com potenciais danos à saúde humana. A água representa o principal meio de conexão entre a geoquímica das rochas, solos e a fisiologia humana (Cunha & Machado, 2004; Cortecci, 2006).

Diante disso, o mapeamento hidroquímico tem sido uma importante ferramenta para o conhecimento, quando bem elaborados e com uma base de dados consistente, mapas geoambientais proporcionam inúmeras informações, as quais permitem uma fácil interpretação, subsidiando o estabelecimento de políticas públicas para gestão ambiental, de forma a contemplar a utilização adequada de recursos naturais e garantir melhoria na qualidade de vida (De Vivo *et al.* 2003).

Neste contexto, o presente estudo apresenta as características químicas das águas superficiais da bacia do rio São Miguel em mapas hidroquímicos visando melhor conhecimento sobre a qualidade destas, de acordo com os padrões estabelecidos pelas legislações vigentes.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área em estudo localiza-se nos domínios dos municípios de Arcos, Pains, Iguatama, Córrego Fundo e Formiga, no centro oeste do estado de Minas Gerais, na bacia hidrográfica do rio São Miguel ($\approx 520 \text{ km}^2$), no extremo meridional da bacia do rio São

Francisco (Figura 1). Esta bacia compreende uma das cabeceiras do rio São Francisco, um dos mais importantes rios nacionais.

A região encerra a Província Cárstica de Arcos Pains, representada principalmente pelas rochas carbonáticas e pelíticas da Formação Sete Lagoas, pertencentes ao Grupo Bambuí (Figura 2), com exposições secundárias do embasamento granito-gnáissico.

O uso e ocupação do solo na região são representados, principalmente, pelo setor agrícola, pecuário, atividades minerárias relacionadas à extração de rochas carbonáticas e a urbanização. Haddad (2007) avalia que a combinação destas atividades contribui como fontes de poluição pontuais e difusas. Vale ressaltar que a região ainda carece de dispositivos de saneamento básico adequados, sendo os efluentes urbanos diretamente despejados nos corpos d'água do rio São Miguel.

As características intrínsecas ao ambiente cárstico, desenvolvido nas rochas carbonáticas que caracterizam o tipo de aquífero local, conferem aos reservatórios subterrâneos maior vulnerabilidade à contaminação, visto a hidrodinâmica dessas águas e a percolação direta da zona vadosa para a freática, dificultando a depuração dessas águas no meio subterrâneo (Villanueva *et al.* 2014; Haddad, 2007). Assim, a identificação de contaminantes no meio superficial pode ter repercussões diretas na qualidade das águas subterrâneas, cuja real dinâmica ainda é pouco compreendida.

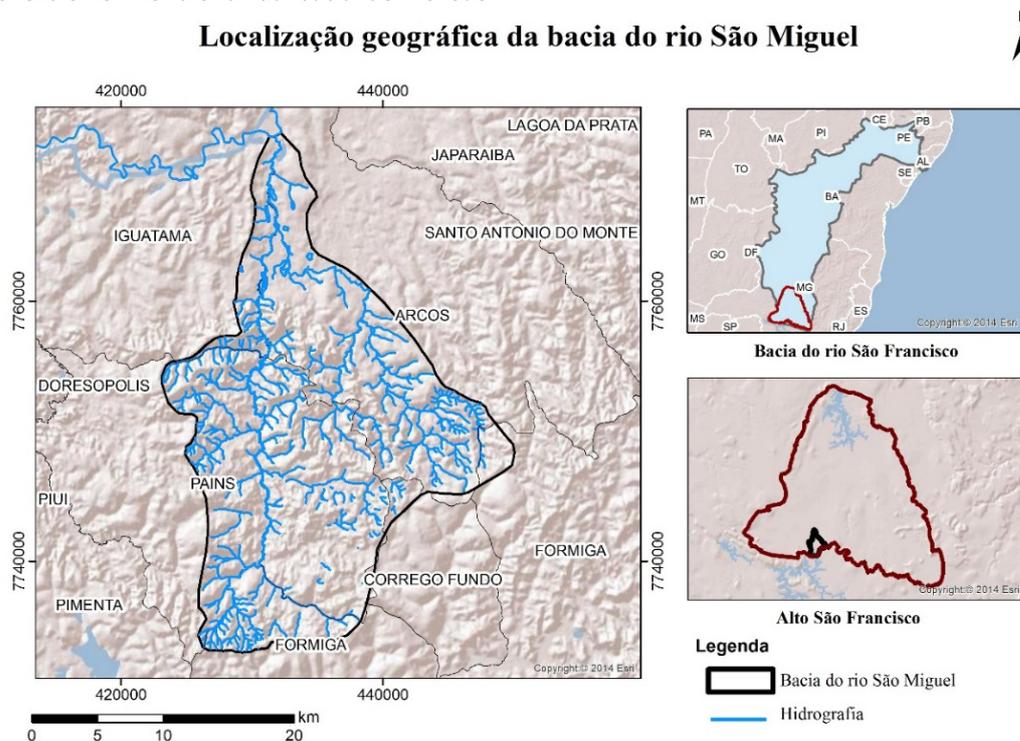


Figura 1. Localização geográfica da bacia do rio São Miguel em relação a bacia do rio São Francisco.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a qualidade das águas da bacia do rio São Miguel, realizou-se um monitoramento sazonal, com a análise de parâmetros físico-químicos das águas em duas campanhas, uma no período seco e outra no chuvoso. Foram coletadas 34 amostras por estação (seca - agosto e setembro de 2015 e chuvosa - novembro e dezembro de 2015) ao longo da bacia, totalizando 68 amostras (Figura 2).

Os parâmetros físico-químicos de qualidade das águas foram analisados *in situ*, com o uso dos seguintes equipamentos: Multiparâmetro (UltrameterTM6p), Oxímetro (Digimed DM 4P), Colorímetro (DR 890 HACH) e Turbidímetro (Policontrol). A partir destes equipamentos foram obtidas as propriedades de: condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), resistividade, temperatura, pH, Eh, oxigênio dissolvido (OD), turbidez e a concentração de nitratos, sulfatos, fosfatos e cloretos.

Para as análises da alcalinidade, amostras de água foram coletadas em garrafas de polietileno de 1L, acondicionadas em isopor, e ao final do dia, já no alojamento foi determinada a concentração de HCO₃⁻ através do método titulométrico (Greenberg *et al.* 1995). Para análise dos elementos maiores e traços, as amostras de água foram coletadas em recipientes de polietileno e filtradas com membrana HA em éster de celulose de 0,45µm, e conservadas com ácido

nítrico 65% ultra puro para posterior análises dos elementos via Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES Agilent 725) e Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS Agilent 7700x), na determinação das concentrações totais de Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sn, Sr, Ti, V e Zn.

Neste trabalho, para cada amostra coletada foi calculado o erro de balanço iônico segundo Logan (1965) que estabelece limites de aceitabilidade em função da somatória dos cátions (Tabela 1), e também segundo Custodio & Llamas (2001) que estabelece limites de aceitabilidade em função da condutividade (Tabela 2).

Tabela 1. Erro admissível no balanço iônico, segundo Logan (1965).

Σ cátions (mEq/L)	1	2	6	10	30
Erro admissível (%)	10	6	4	3	2

Tabela 2. Erro admissível no balanço iônico, segundo Custodio & Llamas (2001).

Condutividade (µS/cm)	50	200	500	2000	>2000
Erro admissível (%)	30	10	8	4	4

Para auxiliar as análises da qualidade das águas, principalmente para interpretação gráfica e estatística dos dados hidroquímicos, foram utilizados os softwares MINITAB V.15. e QualiGraf V.1.17, este último desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

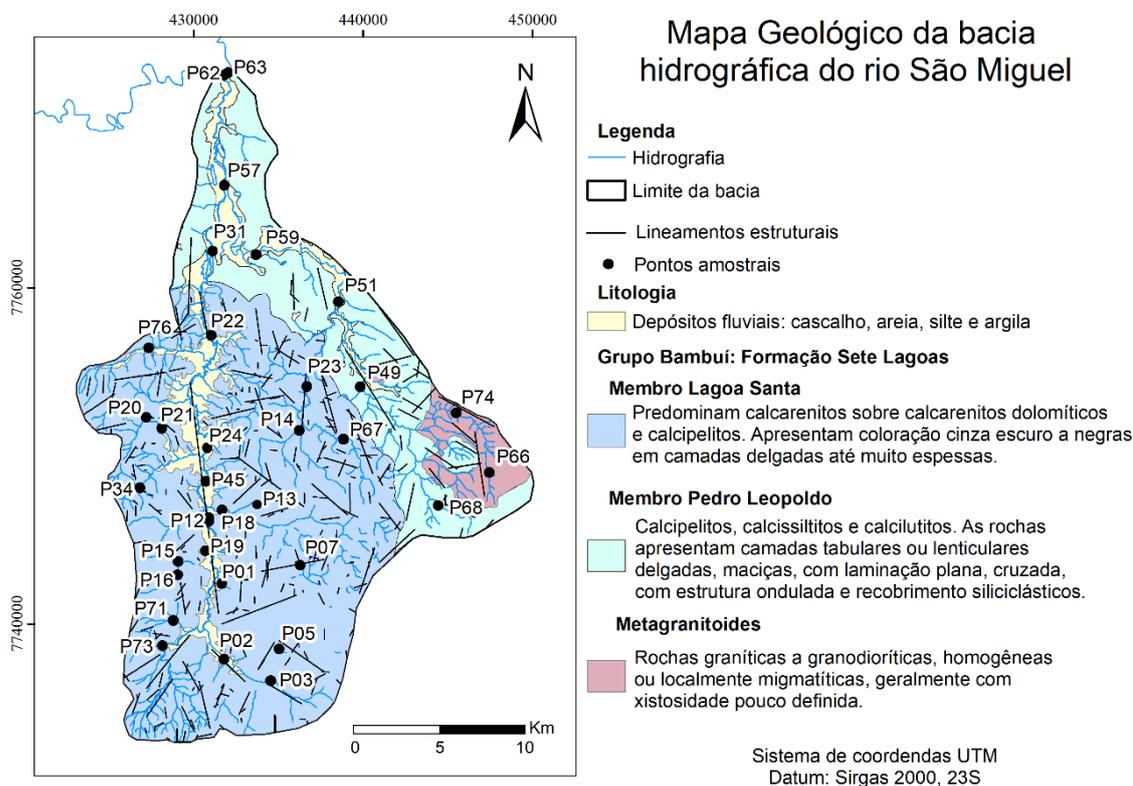


Figura 2. Mapa geológico da bacia hidrográfica do rio São Miguel, com a distribuição dos pontos de amostragem.

Adaptado de Martins, 2013.

A partir dos resultados obtidos com as análises químicas, os valores das concentrações dos elementos analisados foram inseridos no software ArcGis® 10.1, para posterior confecção de mapas hidroquímicos, destacando aquelas que violaram os limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357 (2005) para as águas da classe 1.

A classe 1 trata das águas que podem ser destinadas: ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do cálculo do balanço iônico realizado, verificou-se que a maioria das amostras coletadas tanto do período seco quanto chuvoso apresentaram erro inferior aos estabelecidos por Logan (1965) e Custodio & Llamas (2001) (Figuras 3). Em uma boa

análise, o erro do balanço iônico não pode exceder 10% para que a análise possa ser considerada analiticamente correta (Feitosa *et al.* 2008). Para águas pouco mineralizadas, onde é difícil quantificar íons com baixas concentrações, são admissíveis erros na ordem de 30% (Custodio & Llamas, 2001).

Altos valores de erro podem ser devidos a: erro analítico ou de cálculo; presença de íons não considerados no cálculo; águas pouco mineralizadas, ou mesmo, resultados não usuais (Hounslow 1995, Feitosa *et al.* 2008).

De acordo com as análises químicas realizadas, as águas superficiais da bacia do rio São Miguel podem ser classificadas como bicarbonatadas cálcicas, repercutindo a composição essencialmente carbonática do arcabouço geológico (Figura 4), ainda é possível observar a influência da sazonalidade na amostragem, onde as maiores concentrações, principalmente para os elementos Ca^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- são relatadas durante o período chuvoso, estando diretamente relacionada com o processo de dissolução das rochas carbonáticas, processo de carstificação da bacia (Goldscheider & Drew 2007).

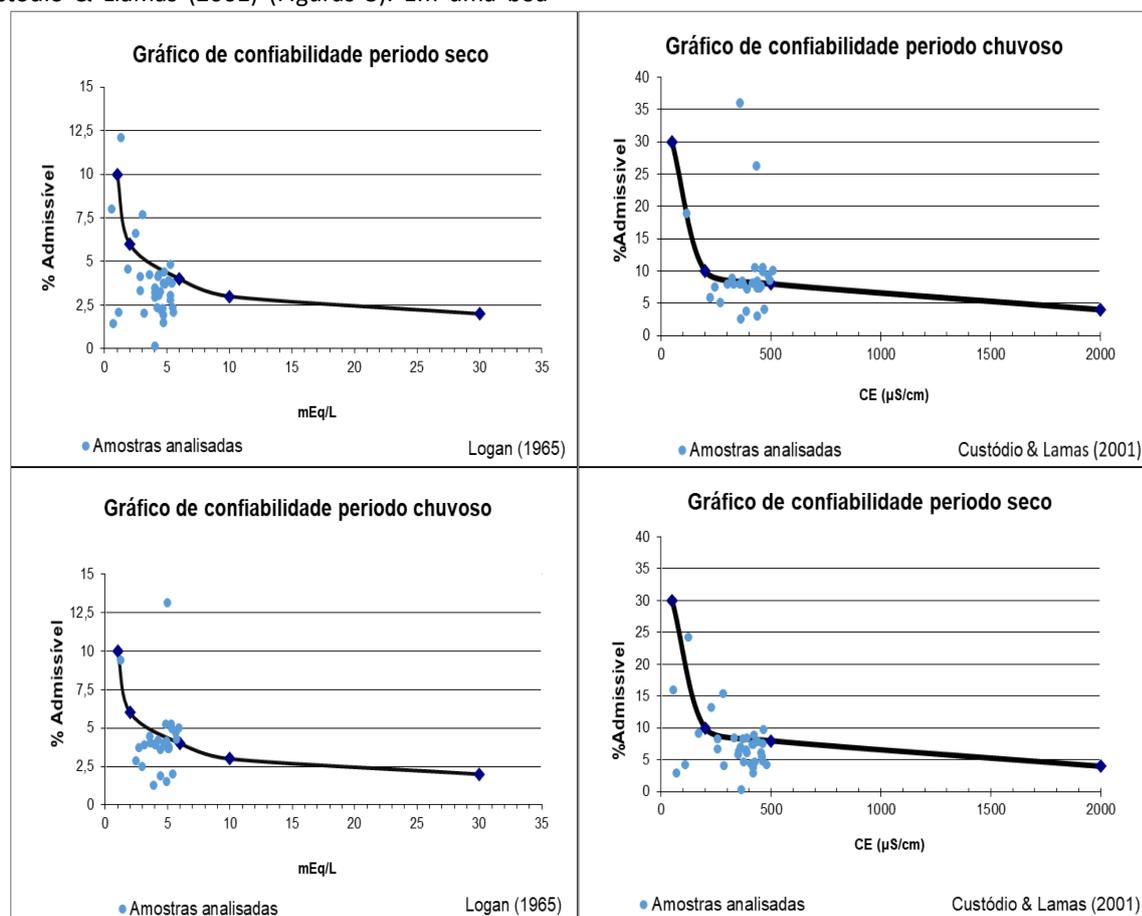


Figura 3. Representação gráfica de confiabilidade das amostras do período seco e chuvoso de acordo com Logan (1965) e Custodio & Llamas (2001).

Análise da concentração de turbidez nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

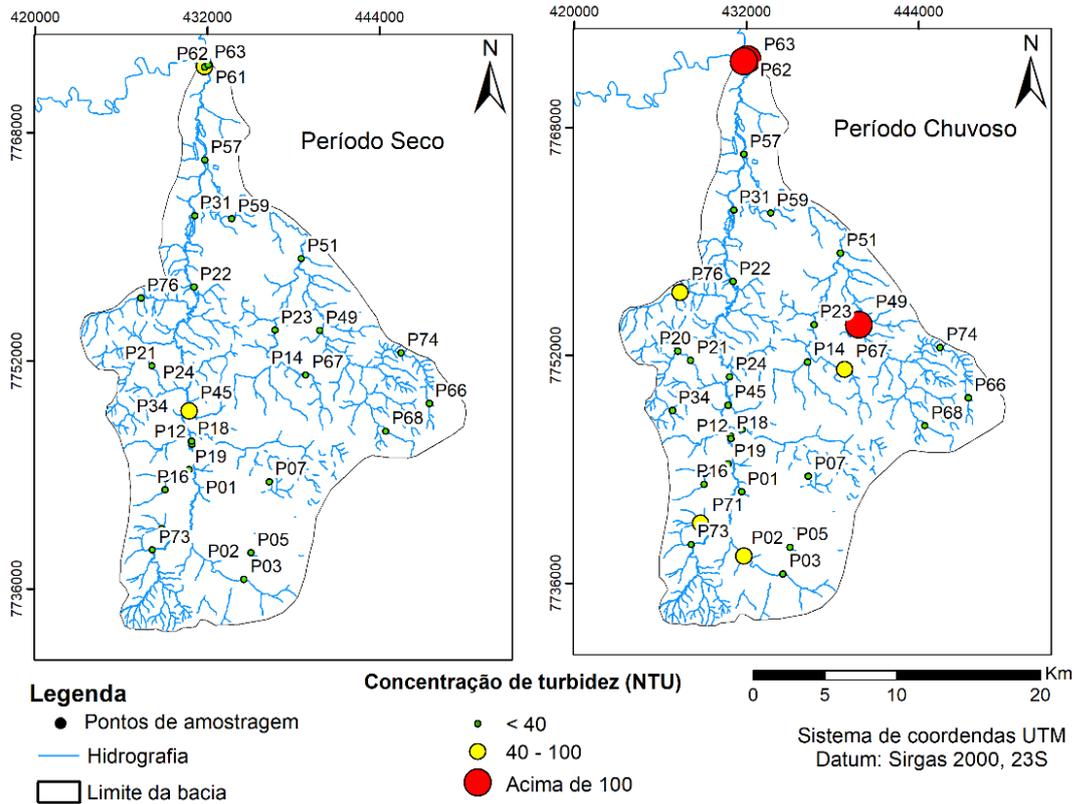


Figura 6. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite de turbidez de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

Análise da concentração de nitrato nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

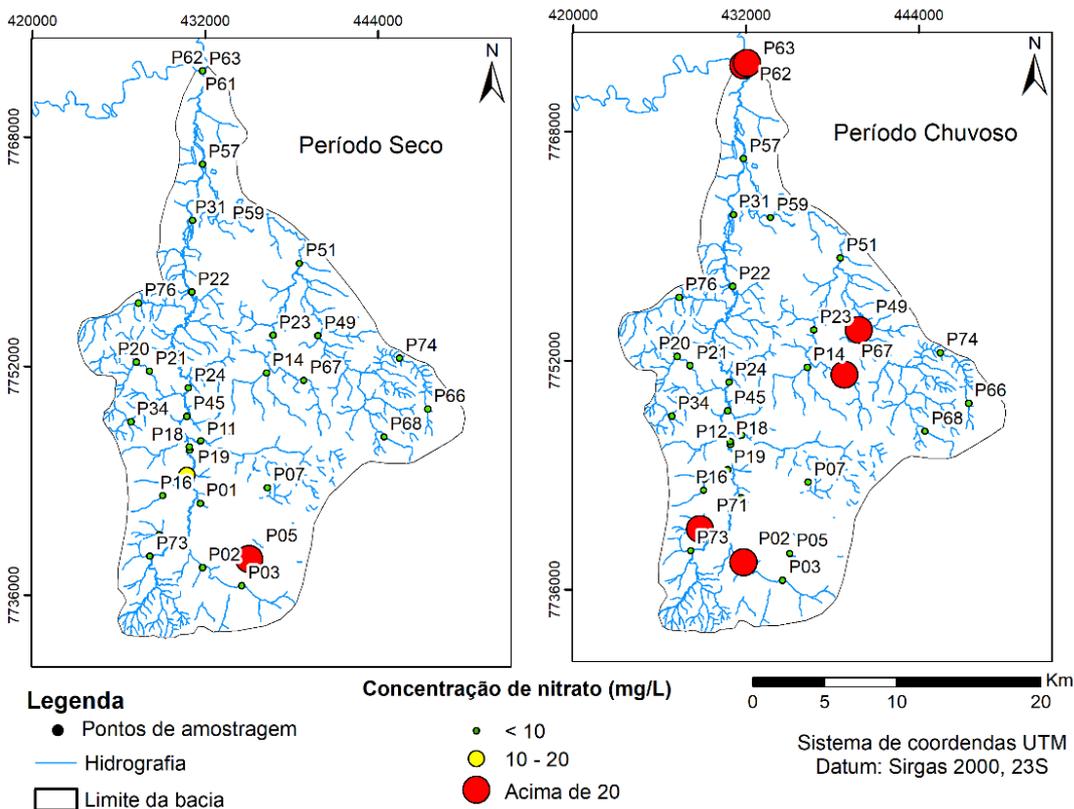


Figura 7. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite para a concentração de nitrato de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

Os teores de cloreto das amostras da bacia do rio São Miguel variaram de <LD (limite de detecção) a 0,29 mg/L no período seco e 0,09 a 2,20 mg/L durante o período chuvoso. Estas concentrações de cloreto se encontram abaixo do valor máximo permitido (250 mg/L) de acordo com o proposto pela resolução CONAMA n° 357 (2005) para a classe 1. De acordo com Villanueva *et al.* (2014), valores de cloreto acima de 250 mg/L podem estar associadas à deficiência na circulação hídrica associada à recarga ou a focos esparsos de contaminação.

As maiores concentrações de sulfato foram de 4,0 mg/L no período seco e 80,0 mg/L no chuvoso. As elevadas concentrações deste elemento, principalmente no período chuvoso, sugerem uma influência geogênica, Meyer *et al.* (no prelo) identificaram para a região em estudo a ocorrência carbonatos contendo pirita e galena, que poderiam ser os responsáveis pela liberação do enxofre.

Estes valores encontram-se abaixo de 250 mg/L, valor máximo estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357 (2005) para a classe 1. Concentrações elevadas

de sulfato podem desencadear distúrbios gastrointestinais, além de ocasionar a corrosão e acidificação dos solos (Silva *et al.* 2011).

Os teores de fosfato apresentaram variação de 0,04 a 0,9 mg/L no período seco, e 0,06 a 1,12 mg/L durante o período chuvoso. Vale salientar que não existe um valor limite perante a legislação que trata da qualidade dos recursos hídricos. Altas concentrações de fosfato podem indicar afluxo de fertilizantes, descargas de esgoto doméstico ou a presença de efluentes industriais.

Em relação aos elementos traço, o Alumínio (Al), o Cádmiio (Cd), o Ferro (Fe) e o Manganês (Mn), apresentaram concentrações acima dos valores permitidos pela Resolução CONAMA n° 357 (2005) para a classe 1 (Tabela 3).

O Al variou entre <0,010 e 0,342 mg/L durante o período seco e de <0,010 e 0,446 mg/L no período chuvoso. Vale destacar que de acordo com a legislação, o limite para este elemento nas águas de classe I é de 0,1 mg/L (CONAMA n° 357, 2005) (Figura 8).

Tabela 3. Concentração dos elementos: turbidez, nitrato, Al, Fe, Mn e Cd.

Amostra	Turbidez (NTU)		Nitrato (mg/L)		Al (mg/L)		Fe (mg/L)		Mn (mg/L)		Cd (µg/L)	
	Seca	Chuva	Seca	Chuva	Seca	Chuva	Seca	Chuva	Seca	Chuva	Seca	Chuva
P01	1,920	26,200	4,100	5,200	0,013	<0,010	<0,007	<0,007	0,004	0,010	0,071	0,146
P02	3,210	48,400*	4,800	30,000*	0,018	<0,010	0,018	<0,007	0,016	0,034	0,025	2,326*
P03	9,500	16,300	4,200	5,200	0,016	<0,010	<0,007	<0,007	0,005	0,008	0,012	1,086*
P05	11,200	7,030	23,500*	6,200	0,342*	<0,010	0,325*	<0,007	0,186*	0,041	0,010	1,220*
P07	7,130	25,300	1,300	2,100	0,023	<0,010	<0,007	<0,007	0,005	0,037	0,005	1,136*
P11	2,400	4,480	3,900	6,400	0,013	<0,010	<0,007	<0,007	0,002	<0,002	0,006	0,118
P12	4,700	10,400	1,800	4,200	0,027	<0,010	0,017	0,018	0,009	0,009	0,009	0,064
P13	2,340	5,920	3,900	4,400	0,020	<0,010	0,012	0,011	<0,002	0,010	0,186	0,696
P14	3,930	10,800	3,300	1,900	0,018	<0,010	0,008	0,015	0,126*	0,409*	0,100	0,046
P15	11,600	36,900	4,600	2,700	0,022	<0,010	<0,007	0,047	0,092	0,138*	0,074	<0,004
P16	8,500	3,960	3,200	5,300	0,017	<0,010	<0,007	<0,007	<0,002	<0,002	0,133	0,027
P18	4,340	16,500	1,300	0,700	0,016	<0,010	0,016	0,029	0,008	0,019	0,153	<0,004
P19	9,960	32,200	11,900*	4,750	0,018	<0,010	<0,007	<0,007	0,007	0,008	0,035	0,016
P20	11,100	18,100	4,800	3,100	0,023	<0,010	0,087	0,334*	0,055	0,055	0,036	2,658*
P21	4,740	9,240	7,900	1,000	0,019	<0,010	0,009	0,031	0,068	0,039	0,038	1,100*
P22	8,900	40,000	4,800	2,700	0,018	<0,010	0,017	0,012	0,008	0,015	0,019	<0,004
P23	4,630	26,700	4,100	2,900	0,017	<0,010	0,013	0,015	0,014	0,021	0,020	0,545
P24	3,620	14,500	3,800	7,300	0,021	<0,010	0,019	0,024	0,027	0,027	0,053	0,043
P31	7,050	5,390	4,800	2,900	0,049	<0,010	0,010	<0,007	0,061	0,036	0,235	0,339
P34	3,620	6,340	5,300	6,300	0,025	<0,010	<0,007	<0,007	<0,002	<0,002	0,372	<0,004
P45	46,500*	25,500	3,300	7,800	<0,010	<0,010	<0,007	0,030	0,019	0,025	<0,004	0,023
P49	40,000	430,00*	0,500	30,000*	0,021	0,446*	0,158	0,319*	0,179*	0,082	0,070	1,669*
P51	35,000	40,000	2,300	0,700	0,022	<0,010	0,089	0,059	0,036	0,054	0,065	0,180
P57	17,200	40,000	2,600	2,200	0,034	0,013	0,034	0,015	0,021	0,023	0,045	0,397
P59	34,600	40,000	0,100	1,200	0,028	<0,010	0,092	0,030	0,019	0,017	0,035	0,615
P62	40,000	131,000*	1,700	30,000*	0,029	0,083	0,028	0,081	0,020	0,003	0,062	2,784*
P63	40,000	154,000*	0,000	30,000*	0,045	0,098	0,118	0,139	0,008	0,003	0,056	2,584*
P66	36,000	23,200	7,800	2,900	0,044	<0,010	0,346*	0,308*	0,048	0,040	0,125	0,177
P67	4,800	42,000*	1,500	30,000*	0,028	0,014	0,019	0,040	0,012	0,026	0,100	0,437
P68	40,000	30,200	0,300	3,000	0,021	<0,010	0,801*	0,705*	0,161*	0,120*	0,091	0,025
P71	40,000	48,100*	1,000	30,000*	0,028	<0,010	0,077	0,056	0,047	0,104*	0,196	0,489
P73	29,600	33,300	0,800	0,600	0,019	<0,010	0,140	0,048	0,141*	0,159*	0,244	0,947
P74	27,500	25,200	6,500	3,200	0,024	<0,010	0,370*	0,462*	0,060	0,070	0,210	1,395*
P76	13,100	51,500*	1,300	0,200	0,021	0,094	0,033	0,332*	0,073	0,117*	0,249	0,734

*Valores em negrito correspondem às concentrações acima do nível permitido pela Resolução CONAMA n° 357 (2005) para a classe 1.

Análise da concentração de alumínio nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

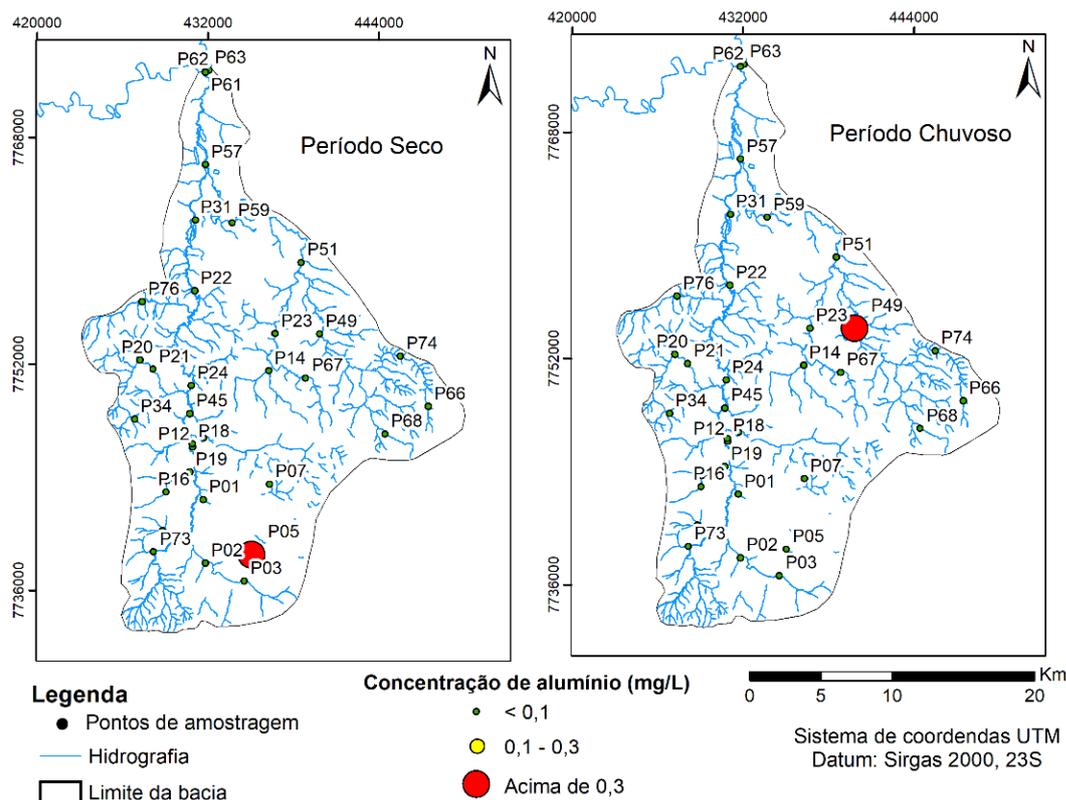


Figura 8. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite para a concentração de alumínio de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

Os elevados valores observados podem repercutir ambientes oxidantes com pH elevados, visto que, fora estas condições, o Al é bastante insolúvel. Alternativamente, a mobilização do Al no solo pode ocorrer em consequência de chuvas ácidas (Baird & Cann, 2008), ou ainda da dosagem em excesso de sulfato de alumínio em estações de tratamento de água.

As elevadas concentrações de Al em P05 (0,342 mg/L) durante o período seco e em P49 (0,446 mg/L) durante o período chuvoso, representam processos erosivos originados pela pressão antrópica, oriundas de atividades minerárias em P49 e pecuárias em P05.

A ingestão em excesso de Al é apontada pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 1998) e por Pogue e Lukiw (2016), Bondy (2016) e Wang *et al.* (2016) como responsável por danos neurológicos, talvez também associados à incidência de Alzheimer, ainda que a comprovação desta premissa não seja definitiva. Ambientalmente, o Al pode ocasionar a diminuição na população de peixes e plantas no meio aquático, além de interferir na assimilação de nutrientes por plantas quando concentrados no solo (Baird & Cann, 2008).

Com relação ao Fe, sua concentração variou de <0,007 a 0,801 mg/L durante o período seco e de <0,007 a 0,705 mg/L durante o período chuvoso (Figura 9). Tanto no período seco quanto chuvoso, os pontos P66, P68 e P74 apresentaram valores acima do limite proposto pela resolução CONAMA nº 357

(2005), o qual é estabelecido em 0,3 mg/L para a classe I.

De maneira geral, as maiores concentrações de Fe, tanto no período chuvoso quanto no seco, os maiores e recorrentes valores foram documentados principalmente na parte leste da bacia, onde afloram corpos graníticos do embasamento. Além disso, a presença do Fe pode ser ocasionada pela presença de minerais como a siderita, pirita e limonita. Ocorrências de carbonatos e sulfetos de Fe de forma disseminada, principalmente junto aos níveis terrígenos intercalados nos carbonatos na base da Formação Sete Lagoas, são reportados por Kuchenbecker *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2011), configurando possivelmente uma influência geogênica para as anomalias. Entretanto, concentrações anômalas nas águas superficiais podem indicar também uma intensificação da contaminação por efluentes industriais ou efluentes de minerações. O excesso de Fe no organismo pode aumentar a incidência de problemas cardíacos, hepáticos e de diabetes, além de potencialmente contribuir com o aumento de moléculas cancerígenas (Feitosa *et al.* 2008).

As concentrações de Mn oscilaram entre <0,002 a 0,186 mg/L durante o período seco e <0,002 a 0,409 mg/L durante o período chuvoso. Nos pontos P05, P14, P15, P49, P68, P71, P73 e P76 os valores excedem o limite proposto pela resolução CONAMA nº 357 (2005), o qual é estabelecido em 0,1 mg/L para a classe I (Figura 10).

Análise da concentração de ferro nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

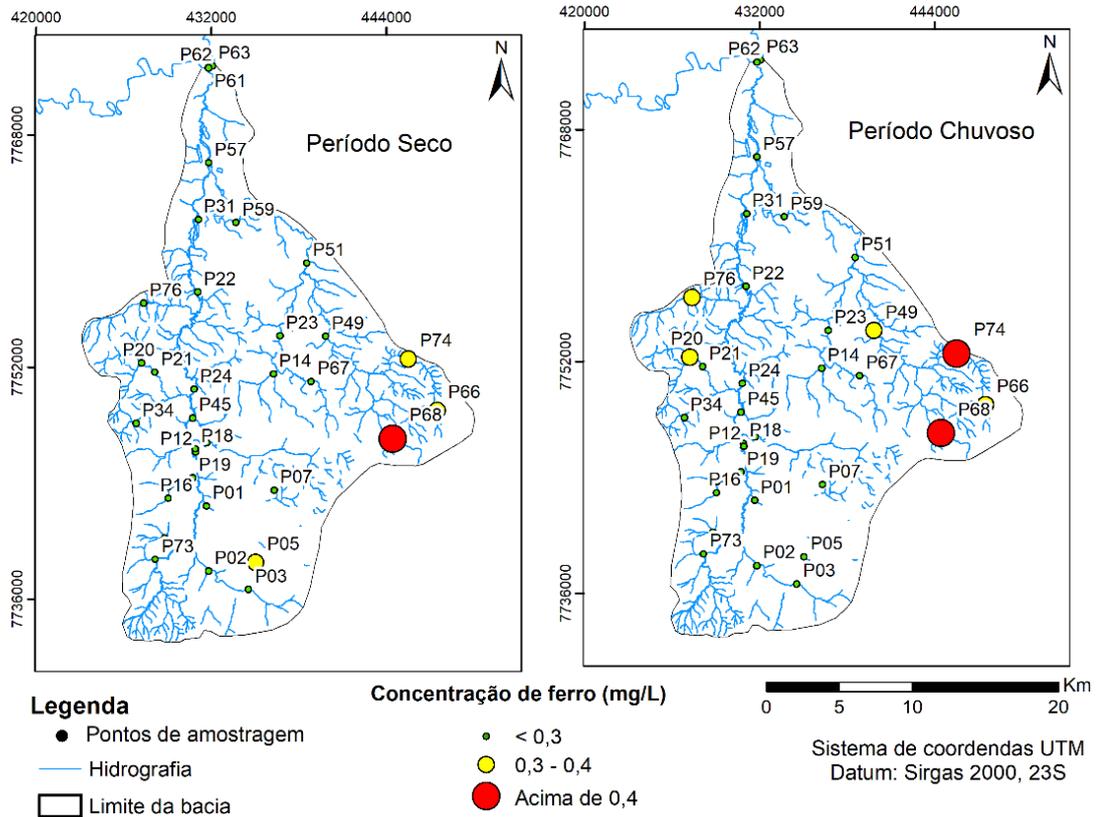


Figura 9. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite para a concentração de ferro de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

Análise da concentração de manganês nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

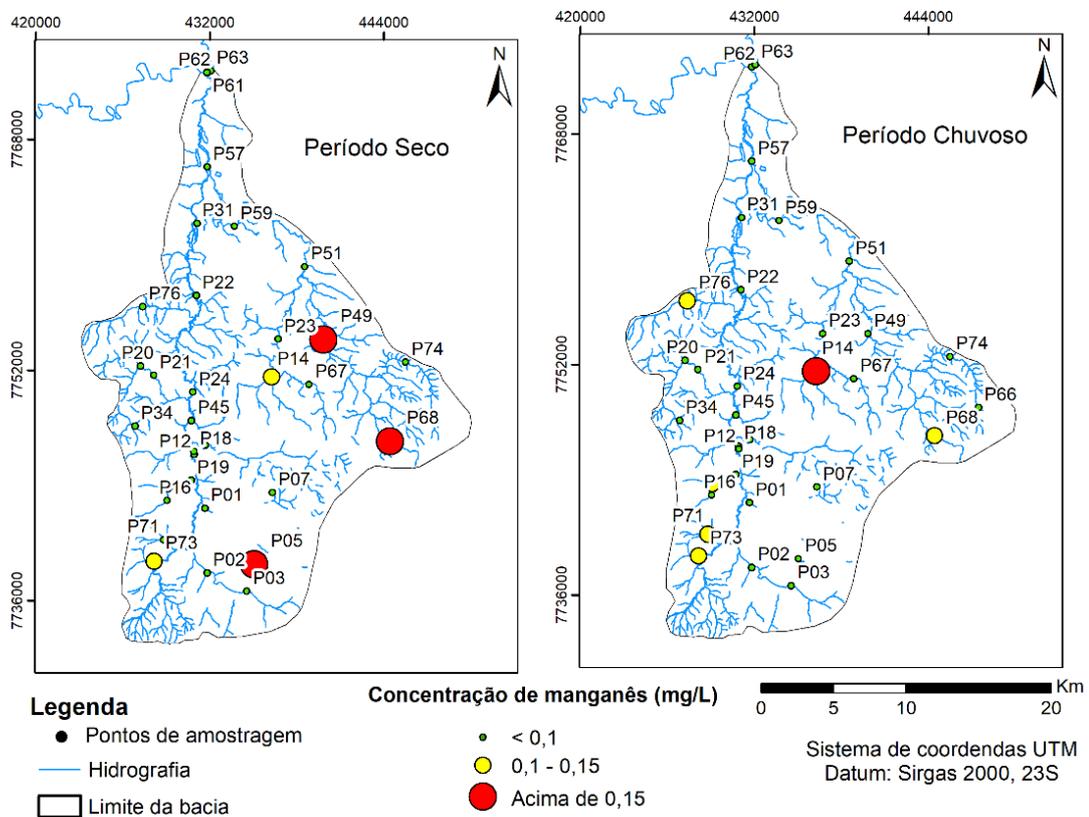


Figura 10. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite para a concentração de manganês de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

Ainda que o Mn seja um elemento essencial à fisiologia animal, seu excesso pode possuir efeitos tóxicos, ocasionando apatia, irritabilidade, dores de cabeça, insônia e fraqueza (Nascimento *et al.* 2006), além de distúrbios neurotóxicológicos associados a intoxicação crônica por Mn (Azevedo, 2010; Bagga & Patel, 2012; O'neal *et al.* 2014).

O Cd apresentou valores entre $<0,004$ a $0,37 \mu\text{g/L}$ durante o período seco e $<0,004$ a $2,78 \mu\text{g/L}$ no período chuvoso (Figura 11), atingindo valores superiores ao estabelecido pela resolução CONAMA nº 357 (2005) para classe 1, de $1 \mu\text{g/L}$. Os valores acima do estabelecido por lei ocorrem somente no período chuvoso em: P02, P03, P05, P07, P20, P21, P49, P62, P63 e P74.

As principais fontes de contaminantes por Cd são associadas a poluição atmosférica, à incineração de compostos que o contêm, fertilizantes, por efluentes industriais e pela disposição de resíduos (Baird & Cann, 2008). Este elemento é cancerígeno para seres humanos, além de potencialmente desencadear problemas como a osteoporose, hipertensão, doenças cardíacas, enfisema, catarata, atrofia muscular e alterações psicomotoras (Hallenbeck, 1984; IARC, 1993; Ramakrishnan *et al.* 1995; Cary *et al.* 1997).

5. CONCLUSÃO

Os parâmetros que apresentam valores acima dos limites máximos permitidos de acordo com a resolução CONAMA nº 357 (2005) para classe 1, foram listados considerando-se a sua ocorrência em relação ao percentual de amostras analisadas para classe I: Turbidez (11,76%), Nitrato (11,76%), Alumínio (2,94%), Ferro (14,70%), Manganês (16,17%) e Cádmiio (14,70%).

A contribuição geogênica carbonática é reconhecida no caráter neutro a alcalino (pH) das águas em condições oxidantes (Eh) e nos altos valores para STD e CE, com variações locais associadas a exposição do embasamento granítico, onde também é possível averiguar uma maior contribuição por Fe, Al e turbidez nas águas.

O mapeamento hidroquímico se mostrou como uma importante ferramenta para o conhecimento da região, proporcionando informações facilmente interpretáveis, podendo contribuir para a gestão ambiental da bacia, preservando os recursos naturais e garantindo melhoria na qualidade de vida para população local.

Análise da concentração de cádmio nas águas superficiais da bacia do rio São Miguel

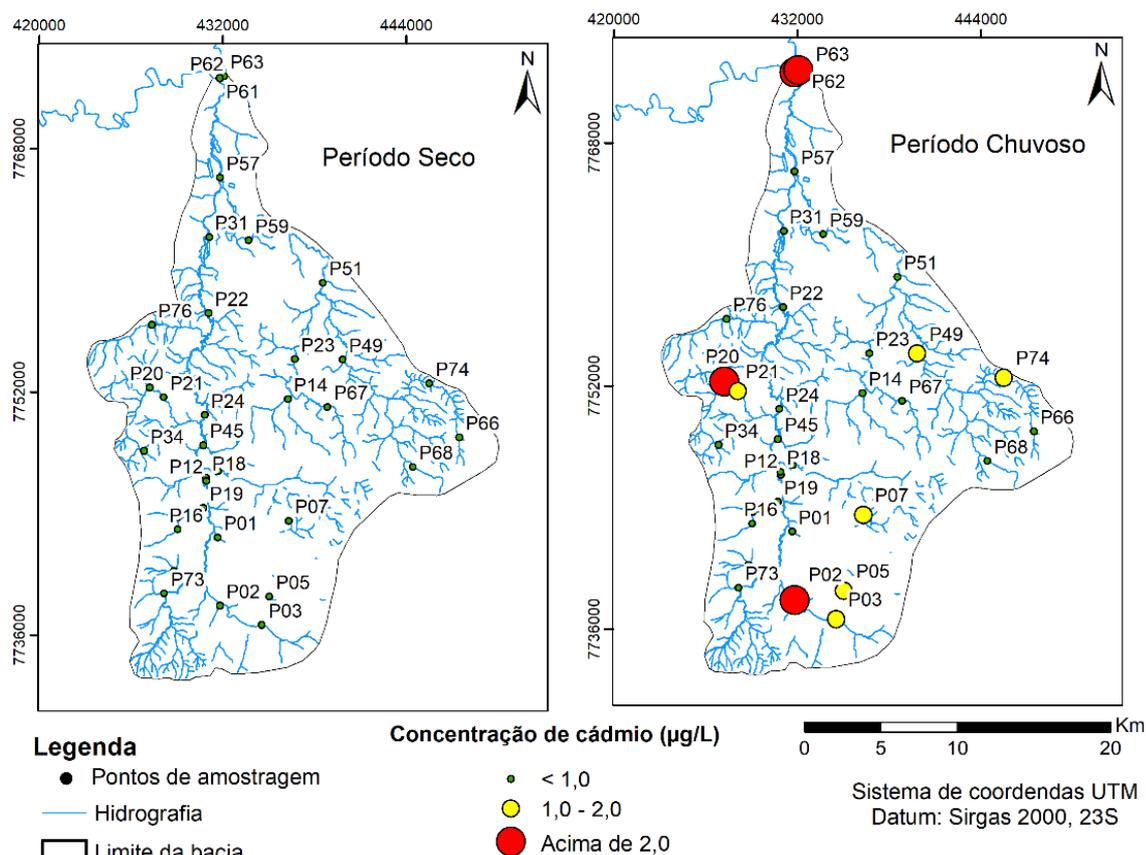


Figura 11. Mapa com indicação dos pontos que violaram o limite para a concentração de cádmio de acordo com o estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357 (2005) para a classe 1.

As concentrações acima do limite legalmente estabelecido para o Al, Fe e Mn representam fontes difusas as quais podem estar relacionadas tanto com a geologia da região como também associada a impactos antrópicos relacionados a atividades agrícolas e minerárias, onde a dispersão destes elementos pode estar vinculada aos particulados oriundos do uso de corretivos agrícolas e dos processos de extração mineral. Ainda com relação aos elevados valores de Al, estes, podem também refletir uma dosagem mal administrada em centros de tratamento de água.

Para elemento Cd, foram observadas fontes pontuais de contaminação associadas ao período chuvoso, diretamente ligadas a poluição atmosférica, o qual pode estar sendo intensificada com a indústria da mineração de calcário e suas inúmeras calcinações instaladas na região. Durante o período chuvoso, o Cd interage com as águas meteóricas, precipita e contamina as águas superficiais da bacia.

Os elementos que apresentaram valores acima do limite legalmente estabelecido são preocupantes, ainda mais se tratando de uma região cárstica, onde hidrodinâmica e a percolação direta da zona vadosa para a freática dificultam a depuração natural dessas águas no meio subterrâneo, repassando rapidamente os contaminantes até as subterrâneas. Além disso, a precária compreensão dos mecanismos hidráulicos subterrâneos dificulta a remediação de contaminações neste meio.

Em geral, as águas superficiais da bacia do rio São Miguel não são indicadas para consumo humano direto visto que alguns elementos (nitrito, alumínio, ferro, cádmio, manganês e turbidez) violaram os limites legalmente estabelecidos. Logo para o consumo, as mesmas devem passar por tratamento prévio simplificado, com a clarificação por meio de filtração e desinfecção.

6. AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais do Departamento de Geologia da UFOP pelo apoio na realização deste trabalho. Ao laboratório LGqA-DEGEO e todo seu corpo técnico, pelas análises dos dados. Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ) pelo apoio e financiamento técnico científico e, por fim, a Sociedade Excursionista Espeleológica (SEE) por todo apoio e ajuda na realização dos trabalhos de campo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo M.F.A. 2010. Abordagem inicial no atendimento ambulatorial em distúrbios neurotoxicológicos. Parte I: Metais. *Revista Brasileira de Neurologia*, v. 46, n. 3, p. 17 – 31, jul./ago./set.

Bagga P. & Patel A.B. 2012. Regional cerebral metabolismo in mouse under chronic manganese exposure: implications for

Manganism. *Neurochemistry International*, v. 60, n. 2, p. 177 – 185, jan.

Baird C., Cann M. 2008. *Environmental Chemistry*. Nova Iorque. W.H. Freeman & Company, 4ª Ed., 847 p.

Bondy S.C. 2016. Low levels of aluminum can lead to behavioral and morphological changes associated with Alzheimer's disease and age-related neurodegeneration. *Neurotoxicology*, 52, p. 222 – 229.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria MS nº2.914 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. *Legislação de Saúde*.

Cary R., Clarke S., Delic J. 1997. Effects of combined exposure to noise and toxic substances – Critical review of the literature. *Annals of Occupational Hygiene*, v. 41, p. 455-465.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acessado em: 28 fev. 2017.

COPAM/CERH-MG – Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=815>. Acesso em: 8 fev. 2017.

Cortecchi G. 2006. *Geologia e Saúde*. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geosaude.pdf>. Acessado em: 16 abr. 2017.

Cunha F. G. & Machado G. J. 2004. Estudos de geoquímica ambiental e o impacto na saúde pública no município de São Gonçalo do Piauí. CPRM, PI: Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia médica – PGAGEM, p. 1-36.

Custodio E. & Llamas M.R. (2001) *Hidrologia subterrânea*. Tomo I e II, Ediciones Omega, S.A, Barcelona. 2350p.

De Vivo B., Lima A., Boni M., Albanese S., Cicchella D., Iachetta A., Malanga F., Somma R., Tarzia M., Frizzo P., Raccagni L., Sabatini G., Baroni F., Di Lella L.A., Protano G., Riccobono F. 2003. Foreign geochemical baseline mapping programme: Italian territory. In: 4 Th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, 2003, Bologna. *Proceedings*, v. II, p. 639– 640.

Feitosa F.A., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demetério J.G.A. 2008. *Hidrologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM; LABHID, 2008. 812 p.

Goldsheider N, Drew D. 2007. *Methods in karst hydrology*. Taylor & Francis Group, London, U.K. 264 p.

Gonçalves J.A.C., Lena J.C., Nalini Jr. H. A., Paiva J.F., Pereira J.C. 2010. Hidrogeoquímica do Arsênio e outros constituintes inorgânicos presentes nas águas subterrâneas da cidade de Ouro Preto – MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 4, p. 89 – 104, out./dez.

Greenberg A.E., Clesceri L.S., Eaton A.D. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. In: Ed. American Public Health Association, 18, Washington, D.C.

Haddad E.A. 2007. Influência antrópica na qualidade da água da bacia hidrográfica do Rio São Miguel, Carste do Alto São Francisco, Minas Gerais. 2007. 156 p. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental) – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

Hallenbeck W. H. 1984. Human health effects of exposure to cadmium. *Experientia*, v. 40, n. 2, p. 136-142.

- Hirata R. C.A. & Fernandes A. 2006. Monitoramento das águas subterrâneas: um grande desafio para países emergentes. In: Simpósio latino-americano de monitoramento das águas subterrâneas, I, 2016, Belo Horizonte, MG.
- Hirata R.C.A. & Rebouças A. 1999. La protección de los recursos hídricos subterráneos: una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. *Boletín Geológico y Minero*, v. 110, n. 4, p. 423-436.
- Hounslow A.W. 1995. Water Quality Interpretation. In: *Water Quality Data – Analysis and Interpretation*. Lewii, pp.: 71-128.
- IARC - International Agency for Research on Cancer. 1993. Beryllium, cadmium, mercury and exposures in the glass manufacturing industry. In: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer (WHO – IARC). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans*, v. 58, 444 p.
- Kuchenbecker M., Lopes-Silva L., Pimenta F., Pedrosa-Soares A.C., Babinski M. 2011. Estratigrafia da porção basal do Grupo Bambuí na região de Arcos (MG): uma contribuição a partir de testemunhos de sondagem. *Revista do Instituto de Geociências – USP*, v. 11, n. 2, p. 45 – 54.
- Logan J. 1965. Interpretação de análises químicas da água. U. S. Agency for International Development. Tradução de Araknéa Martins de Lemos. Recife.
- Martins T. I. S. 2013. Mapeamento geomorfológico da Folha Piumhi, Minas Gerais. 2013. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais.
- Mestrinho S.S.P. 2008. Monitoramento em água subterrânea. In: Feitosa F.A.C., Manoel Filho J., Feitosa E.C., Demétrio J.G.A. (Org.) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Rio de Janeiro. CPRM: LABHID, 3ª Ed., p. 673-685.
- Milek C. B., Kishi R.T., Gomes J. 2014. Avaliação do risco de contaminação da água subterrânea do aquífero cárstico no município de Almirante Tamandaré/PR com o uso de mapa de índices de risco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.19, n.2, p. 89 – 100, abr./jun.
- Moraes D. S. L. & Jordão Q. J. 2002. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. *Revista Saúde Pública*, São Paulo, v.36, n.3, jun.
- Nascimento S.C., Hypolito R., Ribeiro A.A. 2006. Disponibilidade de metais pesados em aterro de indústria siderúrgica. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v.2, n.3, p. 196-202.
- Nieto P., Custodio E., Manzano M. 2005. Baseline groundwater quality: a European approach. *Environmental Science & Policy*, v.8, p. 399 – 409.
- O’neal S.L., Lee J.W., Zheng W., Cannon J.R. 2014. Subacute manganese exposure in rats is a neurochemical model of early manganese toxicity. *Neurotoxicology*, v.44, p.303 – 313.
- Pogue A.L., Lukiw W.J. 2016. Aluminum, the genetic apparatus of the human CNS and Alzheimer’s disease (AD). *Morphologie*, 100, p. 56 – 64.
- Ramakrishnan S., Sulochana K.N., Selvaraj T., Rahim A.A., Lakshmi M., Arunagiri K. 1995. Smoking of beedies and cataract: cadmium and vitamin C in the lens and blood. *British Journal of Ophthalmology*, v. 79, p. 202-206.
- A., Paciullo F.V.P., Senra A.S., Valeriano C.M., Trouw A.J. 2007. Geologia da Folha de Piumhi, SF-23-V-B-II. In: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Programa Geologia do Brasil Minas Gerais: UFRJ/CPRM, 50 p.
- Santos T.C., Reis-Neto J.M., Xavier F.C.B. 2011. Químioestratigrafia das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas: Grupo Bambuí – Arcos – MG. In: Congresso brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em petróleo e gás, VI, 2011, Florianópolis, SC.
- Sardinha D.D.S., Conceição F.T., Souza A.D.G., Silveira A., Julio M.D., Gonçalves J.C.S.I. 2008. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP). *Revista Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 329-338, jul./set.
- Silva R.D.R., Rubio J., Bauer M.A. 2011. O problema da remoção de íons de sulfato no reuso de águas tratadas de DAM’s no Brasil. *Holos*, v. 5, p. 10-19.
- Villanueva T.C.B., Leal L.R.B., Zucchi M.R., Azevedo A.E.G., Villanueva P.R. 2014. Caracterização hidroquímica e hidrogeológica do aquífero cárstico salitre na região de Irecê, Bahia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.19, nº.4, p. 83-96, out./dez.
- Vrba J. 2006. The role of groundwater monitoring in the management of groundwater resources. In: Simpósio latino americano de monitoramento de águas subterrâneas, I, Belo Horizonte, MG.
- Wang Z., Wei X., Yang J., Suo J., Chen J., Liu X., Zhao X. 2016. Chronic exposure to aluminum and risk of Alzheimer’s disease: a meta-analysis. *Neuroscience Letters*, 610, p.
- World Health Organization – WHO. 1998. Aluminium in drinking-water. In: WHO - World Health Organization. *Guidelines for drinking-water quality*. Geneva, 2ª Ed., 14 p.
- Zublena JP, Cook MG, St Clair MB. 2001. Pollutants in groundwater: health effects. http://ces.soil.ncsu.edu/soilscience/publications/soil_facts. Accessed 10 out 2017