



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E ÁGUAS NA BACIA DO RIO DO
CARMO E SUB-BACIA DO RIO GUALAXO DO NORTE, PÓS-ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, LESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO,
MG

Gustavo Simões de Araújo

MONOGRAFIA nº 281

Ouro Preto, Junho de 2018

**ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E ÁGUAS NA
BACIA DO RIO DO CARMO E SUB-BACIA DO RIO
GUALAXO DO NORTE, PÓS-ROMPIMENTO DA
BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, LESTE DO
QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Dr. Marco Antônio Fonseca

(Interino)

MONOGRAFIA

Nº 281

ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS E ÁGUAS NA BACIA DO RIO DO CARMO E SUB-BACIA DO RIO GUALAXO DO NORTE, PÓS-ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS DO FUNDÃO, LESTE DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MG

Gustavo Simões de Araújo

Orientador

Prof. Dr. Hermíno Arias Nalini Junior

Co-Orientadora

Prof.^a Dr.^a Mariangela Garcia Praça Leite

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2018/1.

OURO PRETO

2018

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Gustavo Simões de Araújo

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

A663a	<p>Araújo, Gustavo Simões de. Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo e na sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, pós-rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, leste do Quadrilátero Ferrífero, MG [manuscrito] / Gustavo Simões de Araújo - 2018.</p> <p>110 f.; il.: color.; grafs.; tabs.; mapas</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Junior. Coorientadora: Profa. Dra. Mariangela Garcia Praça Leite.</p> <p>Monografia (Graduação) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.</p> <p>1. Geoquímica. 2. Sedimentos (Geologia). 3. Barragem. I. Nalini Junior, Hermínio Arias. II. Leite, Mariangela Garcia Praça. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 550.4:624.136</p>
-------	---

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo e sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, pós-rompimento da barragem de rejeitos do Fundão, leste do Quadrilátero Ferrífero, MG

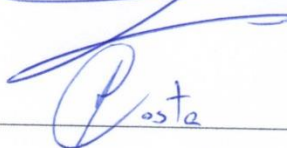
AUTOR: GUSTAVO SIMÕES DE ARÁUJO

ORIENTADOR: Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Junior

Aprovado em: 28 de Junho de 2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Junior  DEGEO/UFOP

Prof.^a Dr.^a Adivane Terezinha Costa  DEGEO/UFOP

MSc. Lucas Pereira Leão  DEGEO/UFOP

Ouro Preto, 28/06/2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, porque sem Ele guiando e protegendo meus passos, juntamente com Maria santíssima, nada disto seria possível.

Agradeço aos meus pais Edvaldo e Rosângela pelo amor, ajuda e motivação para a conclusão do curso sonhado tanto tempo por seu filho. Agradeço a meu irmão Bruno por todo o apoio durante o período de graduação. À família Araújo, todo amor e carinho.

Agradeço ao professor Dr. Hermínio Arias Nalini Junior, que aceitou me orientar no primeiro período de minha graduação, e me orientou pelos cinco anos, o que culminou neste trabalho. Obrigado pelos ensinamentos, orientações e amizade durante este período, principalmente no desenvolvimento deste projeto. Obrigado por acreditar em mim.

Agradeço à professora Dr^a Mariangela Garcia Praça Leite, pela co-orientação deste trabalho, pelas correções, sugestões e discussões sobre os resultados obtidos.

Agradeço ao MSc Lucas Pereira Leão, pelas sugestões e correções deste trabalho. Obrigado por sempre estar disposto a me atender e obrigado por sua amizade.

Agradeço ao LGqA nas pessoas da Adriana, Celso e Léo, pela oportunidade de se aprender o mundo da geoquímica de maneira prática, interativa e instrutiva, orientado por estes grandes profissionais.

Agradeço de forma especial a todos que, direta ou indiretamente influenciaram em minha formação pessoal e profissional. A todo o corpo docente do DEGEO que durante cinco longos e prazerosos anos me construíram geólogo de corpo e alma, especialmente Cláudio Lana, Leonardo, Tazava, Marco Antônio e Max. À Driele pelo constante e paciente amor e carinho. A todos os amigos de curso (principalmente os amigos do 13.2) e de Ouro Preto pela amizade.

Finalmente agradeço de forma mais enérgica ao Departamento de Geologia da Escola de Minas de Ouro Preto, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Fundação Gorceix, pelo curso superior em geociências de excelência ofertado com grande qualidade e de forma gratuita a pessoas como eu, que sonharam em um dia serem chamados de geólogo.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ix
SUMÁRIO	xi
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xxi
RESUMO	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 NATUREZA DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	4
1.5 MATERIAIS E MÉTODOS	4
1.5.1 Revisão bibliográfica	4
1.5.2 Base cartográfica	5
1.5.3 Trabalhos de Campo	5
1.5.4 Geoquímica de águas	7
1.5.5 Elementos no particulado em suspensão	9
1.5.6 Geoquímica de sedimentos ativos de corrente	10
1.6 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	12
1.6.1 Clima	12
1.6.2 Geomorfologia	13
1.6.3 Hidrografia	13
1.6.4 Vegetação	15
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	17
2.1 GEOLOGIA	17
2.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	19
2.2.1 Complexo Metamórfico Santa Bárbara	19
2.2.2 Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapitinga	20
2.2.3 Complexo Granulítico Acaiaca	20
2.2.4 Complexo Metamórfico Mantiqueira	20
2.2.5 Grupo Dom Silvério	21
2.2.6 Supergrupo Rio das Velhas	21
2.2.7 Supergrupo Minas	22
2.2.8 Grupo Itacolomi	23
2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL	24
3 EMBASAMENTO TEÓRICO	25

3.1	AMBIENTES FLUVIAIS	25
3.1.1	Erosão e intemperismo	25
3.1.2	Transporte.....	26
3.1.3	Deposição e Sedimentação	26
3.2	GEOQUÍMICA DE ÁGUAS FLUVIAIS	27
3.2.1	Contaminação.....	28
3.3	GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIAIS	30
3.3.1	Contaminação.....	30
3.4	ESTADO DA ARTE NOS RIOS DO CARMO E GUALAXO DO NORTE.....	32
4	HIDROQUÍMICA.....	39
4.1	INTRODUÇÃO.....	39
4.2	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	39
4.2.1	Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Condutividade Elétrica (CE).....	39
4.2.2	Potencial de Oxi-Redução (Eh) e Potencial Hidrogeniônico (pH).....	41
4.3	ÂNIONS	42
4.3.1	Bicarbonato (HCO_3^-)	42
4.3.2	Cloreto (Cl^-).....	43
4.3.3	Sulfato (SO_4^{2-})	44
4.4	CÁTIONS PRINCIPAIS	45
4.4.1	Cálcio (Ca^{2+}).....	45
4.4.2	Magnésio (Mg^{2+})	46
4.4.3	Sódio (Na^+).....	47
4.4.4	Potássio (K^+).....	48
4.5	FERRO, ALUMÍNIO E MANGANÊS	49
4.5.1	Ferro (Fe).....	49
4.5.2	Alumínio (Al).....	50
4.5.3	Manganês (Mn)	51
4.6	ELEMENTOS TRAÇO.....	52
4.6.1	Arsênio (As).....	52
4.6.2	Bário (Ba).....	53
4.6.3	Cobalto (Co).....	54
4.6.4	Cromo (Cr)	55
4.6.5	Cobre (Cu).....	56
4.6.6	Níquel (Ni)	57
4.6.7	Chumbo (Pb)	58
4.6.8	Vanádio (V).....	59

4.6.9 Zinco (Zn)	60
4.7 DISCUSSÕES FINAIS	61
5 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO	63
5.1 INTRODUÇÃO.....	63
5.2 ELEMENTOS MAIORES	65
5.2.1 Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e Sódio (Na)	65
5.2.2 Ferro (Fe)	66
5.2.3 Alumínio (Al).....	66
5.2.4 Manganês (Mn).....	68
5.3 ELEMENTOS TRAÇO.....	68
5.3.1 Arsênio (As).....	68
5.3.2 Bário (Ba).....	69
5.3.3 Cobalto (Co).....	70
5.3.4 Cromo (Cr).....	70
5.3.5 Cobre (Cu).....	70
5.3.6 Níquel (Ni)	71
5.3.7 Vanádio (V).....	71
5.3.8 Zinco (Zn)	71
5.4 DISCUSSÕES FINAIS	73
6 SEDIMENTOS DE CORRENTE.....	77
6.1 INTRODUÇÃO.....	77
6.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	77
6.3 ELEMENTOS MAIORES	79
6.3.1 Cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e sódio (Na)	79
6.3.2 Alumínio (Al).....	82
6.3.3 Ferro (Fe)	83
6.3.4 Manganês (Mn).....	84
6.4 ELEMENTOS TRAÇO.....	85
6.4.1 Arsênio (As).....	85
6.4.2 Bário (Ba).....	85
6.4.3 Cádmio (Cd).....	86
6.4.4 Cobalto (Co).....	87
6.4.5 Cromo (Cr).....	88
6.4.6 Cobre (Cu).....	89
6.4.7 Níquel (Ni)	90
6.4.8 Chumbo (Pb).....	91

6.4.9 Zinco (Zn)	92
6.5 ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR + Y).....	93
6.6 DISCUSSÕES FINAIS	97
7 CONCLUSÕES	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização e vias de acesso a área de estudo utilizando vias transitáveis.....	3
Figura 1.2 - Mapa com a localização dos sítios amostrais monitorados na calha principal dos rios estudados.....	6
Figura 1.3 - Fluxograma do procedimento de solubilização do particulado em suspensão por digestão total modificada com uso de béquer de teflon.....	9
Figura 1.4 - Fluxograma do procedimento de solubilização parcial de sedimentos ativos de corrente por água régia	11
Figura 1.5 - Fluxograma do procedimento de solubilização total de sedimentos ativos de corrente pelo método de Savillex®.....	12
Figura 1.6 - Mapa hipsométrico da área de estudo, evidenciando baixas cotas altimétricas na região.	13
Figura 1.7 - Mapa hidrográfico da bacia do rio Doce, com enfoque no divisão do alto rio Doce, com área de estudo em vermelho.....	14
Figura 2.1 - Mapa geológico da área de estudo, compilado do Mapa Geológico de Minas Gerais de 2014.....	17
Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero mostrando as ocorrências das unidades estratigráficas na região.....	18
Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, representando seus supergrupos, grupos e formações. Apresenta idades de algumas unidades.....	19
Figura 3.1 - Principais fontes e transporte de elementos traço em um sistema fluvial	28
Figura 3.2 - Metais e metalóides acima dos padrões brasileiros de sedimentos e água para uso agrícola e residencial e acima do limite classes I e II.	37
Figura 4.1 - Gráfico mostrando a variação das concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e dos valores de condutividade elétrica (CE) nas águas	40
Figura 4.2 - Gráfico mostrando a variação das concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e dos valores de condutividade elétrica (CE)	41
Figura 4.3 - Gráfico comparativo entre os valores de pH e de Eh encontrados nas amostras de água do período chuvoso e de seca.....	42
Figura 4.4 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alcalinidade nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	43

Figura 4.5 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cloreto nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	44
Figura 4.6 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sulfato nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	45
Figura 4.7 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cálcio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	46
Figura 4.8 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de magnésio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	47
Figura 4.9 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sódio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	48
Figura 4.10 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de potássio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	49
Figura 4.11 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de ferro nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	50
Figura 4.12 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alumínio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	51
Figura 4.13 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de manganês nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	52
Figura 4.14 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de arsênio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	53
Figura 4.15 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de bário nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	54
Figura 4.16 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobalto nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.	55
Figura 4.17 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cromo nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	56
Figura 4.18 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobre nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	57
Figura 4.19 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de níquel nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	58

Figura 4.20 - Gráfico com a variação sazonal das concentrações de chumbo nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	59
Figura 4.21 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de vanádio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	60
Figura 4.22 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de zinco nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	61
Figura 5.1 – Variação das concentrações de material particulado em suspensão nas águas, determinados no período chuvoso.	64
Figura 5.2 – Variação das concentrações de material particulado em suspensão nas águas, determinados no período de seca.....	64
Figura 5.3 – Variação das concentrações de cálcio, magnésio e sódio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	65
Figura 5.4 – Variação das concentrações de potássio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	66
Figura 5.5 – Variação das concentrações de ferro no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.	67
Figura 5.6 – Variação das concentrações de alumínio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	67
Figura 5.7 – Variação das concentrações de manganês no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	68
Figura 5.8 – Variação das concentrações de arsênio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.	69
Figura 5.9 – Variação das concentrações de bário no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.	70
Figura 5.10 – Variação das concentrações de cobalto no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	72
Figura 5.11 – Variação das concentrações de cromo, níquel e cobre no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	72
Figura 5.12 – Variação das concentrações de vanádio e zinco no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.....	73

Figura 5.13 – Imagem de satélite de 01/08/2016 (um mês antes da coleta) nas imediações do ponto P5.	74
Figura 5.14 – Imagem com as áreas recuperadas com solo de empréstimo atualmente, a montante do ponto P5.....	75
Figura 5.15 – Gráficos de difração de raios- X no MPS oriundo do ponto P1, destacando as mineralogias encontradas.....	76
Figura 6.1 – Gráficos demonstrativos das frações granulométrica do sedimento de corrente por ponto amostrado no período chuvoso.....	78
Figura 6.2 – Gráficos demonstrativos das frações granulométrica do sedimento de corrente por ponto amostrado no período de seca.....	78
Figura 6.3 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cálcio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	80
Figura 6.4 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de potássio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	80
Figura 6.5 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de magnésio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	81
Figura 6.6 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sódio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	81
Figura 6.7 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alumínio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	82
Figura 6.8 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de ferro nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	83
Figura 6.9 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de manganês nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	84
Figura 6.10 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de bário nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	86
Figura 6.11 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cádmio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	87
Figura 6.12 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobalto nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	88

Figura 6.13 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cromo nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	89
Figura 6.14 – Gráfico com a variação das concentrações de cobre nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios no período chuvoso.	90
Figura 6.15 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de níquel nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	91
Figura 6.16 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de chumbo nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	92
Figura 6.17 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de zinco nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.....	93
Figura 6.18 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y normalizado pelo PAAS, dos pontos estudados ao longo dos rios no período chuvoso.....	95
Figura 6.19 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y normalizado pelo PAAS, dos pontos estudados ao longo dos rios no período de seca.....	96
Figura 6.20 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y na razão P2/P1 evidenciando a maior carga de ETR provenientes do rio do Carmo.....	97
Figura 6.21 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y na razão P6/P1 evidenciando uma diminuição das concentrações.....	97
Figura 6.22 – Gráficos de correlação dos elementos maiores Ca, Mg, K e Na com o alumínio, apresentando tendências positivas através de regressão linear.....	99
Figura 6.23 – Gráfico de correlação entre Mn x Ba, mostrando uma forte tendência positiva entre os dois elementos, através de regressão linear.....	99
Figura 6.24 – Imagens mostrando a modificação do regime de velocidade (remanso para corredeiras) no trecho amostrado após o rompimento do Fundão	101
Figura 6.25 – A: Imagem no topo da margem retaludada do rio do Carmo em Barra Longa, mostrando a camada de <i>topsoils</i>	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 - Relação dos sítios amostrais monitorados durante o ano hidrológico na região do rio do Carmo.....	6
Tabela 1.2 - Tabela de fórmulas e tipo de espécie causadora da alcalinidade. Retirado de POP-LGqA 003/03.....	8
Tabela 1.3 - Tabela correlacionando as aberturas das peneiras utilizadas em ABNT/Mesh, o diâmetro das partículas em milímetros e a fração granulométrica.	10
Tabela 3.1 - Valores máximos dos metais e As em água de acordo com a sua classe em mg/L. A classe 4 não apresenta valores máximos para estes elementos..	30
Tabela 3.2 - <i>Guideline</i> de qualidade de sedimentos do <i>Ontario Ministry of the Environment and Energy</i> . - OMEE.	31
Tabela 3.3 - Níveis de classificação de metais pesados e As para material a ser dragado em água doce, por unidade de material seco.....	32
Tabela 3.4 - Tabela com concentrações de metais pesados em sedimentos de fundo do rio do Carmo analisados por Eleutério (1997).....	33
Tabela 3.5 - Tabela com teores máximos permitido pelo CONAMA nº 357 (CONAMA 2005) para as classes I e II de água doce.	34
Tabela 3.6 - Valores de <i>Background</i> sugeridos por Rodrigues (2012) para o rio Gualaxo do Norte... ..	34
Tabela 3.7 - Valores de <i>background</i> sugeridos por Costa (2007) para o rio do Carmo..	35
Tabela 3.8 - Valores de <i>background</i> sugeridos por Vicq 2005 para o Quadrilátero Ferrífero utilizando terceiro quartil... ..	37
Tabela 6.1 – Tabela com os valores das razões Eu/Eu* e Ce/Ce* do período chuvoso (C) e do período de seca (S).	94

Resumo

A bacia do Rio do Carmo e a sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte, nos últimos 3 séculos, receberam contaminação oriundo de atividades minerárias (garimpo de ouro) em seus leitos. A partir da década de 70, o minério de ferro começou a ser explotado em suas cabeceiras, levando a um aumento nas concentrações de elementos químicos vinculados às atividades minerárias nos rios. Trabalhos já foram realizados para se entender a geoquímica dos rios, e os efeitos antrópicos sobre eles, mas em Novembro de 2015, uma barragem de rejeitos de minério de ferro (Barragem do Fundão) rompeu-se, causando uma mudança brusca em toda a bacia do Rio Doce. Aproximadamente 43 milhões de metros cúbicos de rejeito foram despejados no rio Gualaxo do Norte e posteriormente no rio do Carmo. Para o melhor entendimento dos efeitos sobre a geoquímica do rio, foram coletadas amostras de água, material particulado em suspensão (MPS) e sedimentos de corrente, em período chuvoso e período de seca, após um ano do rompimento. A amostragem foi realizada em sete pontos ao longo do rio do Carmo e do rio Gualaxo do Norte, entre as cidades de Barra Longa e Rio Doce-MG. As amostras de sedimento foram fracionadas em diferentes granulometrias, solubilizadas por digestão parcial e analisadas em ICP-OES. As amostras também foram pulverizadas, solubilizadas por digestão total e seus elementos traço e majoritários foram determinados por ICP-MS e ICP-OES. Já as amostras de água tiveram seus parâmetros físico-químicos determinados por multiparâmetro *in situ* (pH, Eh, STD e T) e seus principais ânions em testes laboratoriais (HCO_3^- , SO_4^{2-} e Cl^-). Elementos traço e majoritários também foram determinados nas amostras de águas e MPS por ICP-MS e ICP-OES. Nas amostras de águas, os parâmetros físico-químicos encontrados não parecem estar alterados quando comparados a valores encontrados em trabalhos realizados anteriormente ao rompimento e aos valores do CONAMA 357/05. Os elementos Al, Fe, Cu e Zn foram os únicos que apresentaram valores acima do CONAMA 357/05 para um rio de classe III, no ponto P2, localizado no ribeirão do Carmo e sem influência da lama. A quantidade de MPS no trecho estudado variou de 1,6 a 81,8 mg/L no período de seca e de 72,2 a 1470,3 mg/L no período chuvoso. O MPS apresentou as maiores concentrações dos elementos estudados em comparação ao sedimento de corrente, principalmente no ponto P2 (ribeirão do Carmo). O Fe foi o elemento mais abundante no MPS, com média de 27% por todo o trecho atingido pela lama. As amostras de sedimento de corrente apresentam a maior parte de seu material na fração

silte/argila. A análise química revelou concentrações acima dos valores de *background* sugeridos para o elemento Fe (até 22 %), e valores altos para os elementos Al, K, Ca, Mg. Alguns elementos traço também mostraram-se acima dos valores de referência local, como o As, Ba nos pontos P2 e P3 e Mn em todos os pontos. Com a análise dos resultados, percebe-se uma diminuição dos elementos traço em água, e valores normais para sedimentos de corrente, exceto o Fe, Mn, As e Ba, refletindo a geologia da área e de suas cabeceiras. Desta forma, o presente estudo indica que o maior impacto sobre o rio parece ser a elevada carga de ferro, ainda presente no rio em forma de sedimentos de corrente e em suspensão.

Palavras chave: Geoquímica; Hidroquímica; Sedimentos de corrente; Barragem do Fundão; rio do Carmo; Gualaxo do Norte.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção centro-sul de Minas Gerais, possui área de aproximadamente 7.000km², é uma importante província mineral brasileira, com diversas jazidas minerais economicamente viáveis, como ouro, ferro, manganês, alumínio, topázio, dentre outros (Dorr II *et al.*, 1957; Dorr II, 1969).

O histórico de mineração nesta área remonta ao século XVIII com a exploração de minerações auríferas, fortemente praticadas até o século XIX em jazidas aluviais e de encostas. Calcula-se que nesse período a exploração de 16t de ouro anualmente (Lobato *et al.* 2001). Já no século XX, sobretudo a partir da década de 70, a demanda global por minério de ferro aumentou, iniciando-se uma nova fase minerária no QF. Com fortes investimentos, grandes lavras de minas a céu aberto foram abertas para se explorar o minério de ferro de alto teor enriquecido por processos intempéricos ao longo do tempo. Após a escassez deste tipo de minério mais rico, as lavras começaram a se expandir para minérios com teores menores, necessitando-se de tratamento em usinas de beneficiamento para sua comercialização. Tais processos de beneficiamento geram grandes quantidades de rejeitos que, como solução ambiental para a recuperação da água utilizada no processo, são estocados em barragens. Estas foram instaladas em regiões de cotas elevadas do QF, em razão da proximidade com as minas de ferro na Formação Cauê, aflorante comumente em cristas de serras.

Com a implantação das atividades minerárias (exploração e beneficiamento desde o séc. XVII), o problema ambiental (físico e químico) vinculado a sistemas hídricos superficiais passou a assumir grande importância, sobretudo vinculado à contaminações de Hg, As e Sb, no caso da exploração aurífera (Ribeiro 1998) e Fe, Mn e Al, no caso da mineração de minério de ferro (Costa 2001). Embora os elementos químicos estejam presentes naturalmente em solos e em sistemas aquáticos superficiais e sub-superficiais, é plausível se afirmar que o aumento em sua concentração pode ser ocasionado pelas atividades antrópicas, principalmente as de natureza extrativo-mineral (Guilherme *et al.* 2005). De acordo com Costa (2001), as associações minerais presentes nos depósitos explorados no QF, principalmente ouro e ferro, são ricas em elementos-traço que em geral apresentam um alto poder de dispersão, representando risco de contaminação para a água, sedimentos e, conseqüentemente, para a biota local.

Com o estudo geoquímico de sedimentos de terraços aluviais antigos oriundos exclusivamente de fontes geológicas pode-se estimar “valores de referência” naturais (*background*) que, de acordo com

Matschullat *et al.* (2000), seriam medidas relativas utilizadas para a distinção entre a concentração natural do elemento ou composto químico e a concentração oriunda das atividades antropogênicas. Dados de inúmeras pesquisas consideram o QF como um exemplo clássico de contaminação de recursos hídricos por elementos como As, Mn, Ba, Zn, Cu, Cd e Pb (Ribeiro 1998; Eleutério, 1997; Borba *et al* 2000; Cavalcanti 2003; Costa 2007; Vicq 2015) de origem antropogênicas. Diversos autores realizaram estudos na bacia do rio do Carmo e suas sub-bacias, definindo valores de *background* geoquímico e as concentrações no momento da pesquisa (Costa *et al.* 2006 e 2010; Varejão *et al.* 2009 e 2011; Rodrigues 2012; Vicq 2015). Os dados obtidos constataram que águas e sedimentos da bacia do rio do Carmo apresentam composições químicas resultantes do intemperismo de suas rochas e da contaminação por mineração aurífera antiga e atual (Costa *et al.* 2010).

Em novembro de 2015, essa barragem se rompeu, despejando 43 milhões de metros cúbicos de lama com altos teores de ferro no rio Gualaxo do Norte, parte da bacia do rio do Carmo (Samarco 2016). Considerado o maior acidente ambiental registrado em território brasileiro, quiçá do mundo, os impactos causados afetaram toda a extensão do rio Doce, atingindo inclusive a região costeira do oceano Atlântico, afetando, portanto, ecossistemas fluviais continentais e marinhos. Tornando-se o maior acidente ambiental da história do Brasil, sem precedentes históricos, atingindo toda a bacia hidrográfica do rio Doce e a região costeira do Estado do Espírito Santo.

Somente um monitoramento contínuo das condições físico-químicas de águas e sedimentos da calha principal afetada permitirá se estimar a magnitude dos impactos e se estimar o tempo e as metodologias necessários para que o sistema fluvial se recupere, ao menos parcialmente, permitindo o restabelecimento das condições ambientais mínimas para o reestabelecimento dos ecossistemas aquáticos e ribeirinhos. Assim, após o acidente, a bacia passou a ser um “laboratório” de grande importância para o estudo dos impactos ambientais vinculados às atividades de exploração de minério de ferro.

Neste contexto, este trabalho visou analisar dados geoquímicos de água e sedimentos de um segmento da bacia do alto rio Doce, compreendidos entre os municípios de Barra Longa e Rio Doce, MG, no intuito de entender as modificações geoquímicas ocorridas neste trecho por conta do rompimento de uma barragem de rejeitos minerários. O trabalho está vinculado a disciplina obrigatória de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto, requisito para a colação do grau de bacharelado.

1.2 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área estudada localiza-se entre os municípios de Barra Longa e Rio Doce, no trecho onde o rio Gualaxo do Norte desagua no rio do Carmo, e este recebe as águas do rio Piranga, formando o rio

Doce. A região situa-se no sudeste de Minas Gerais, na mesoregião denominada Zona da Mata mineira (Figura 1.1).

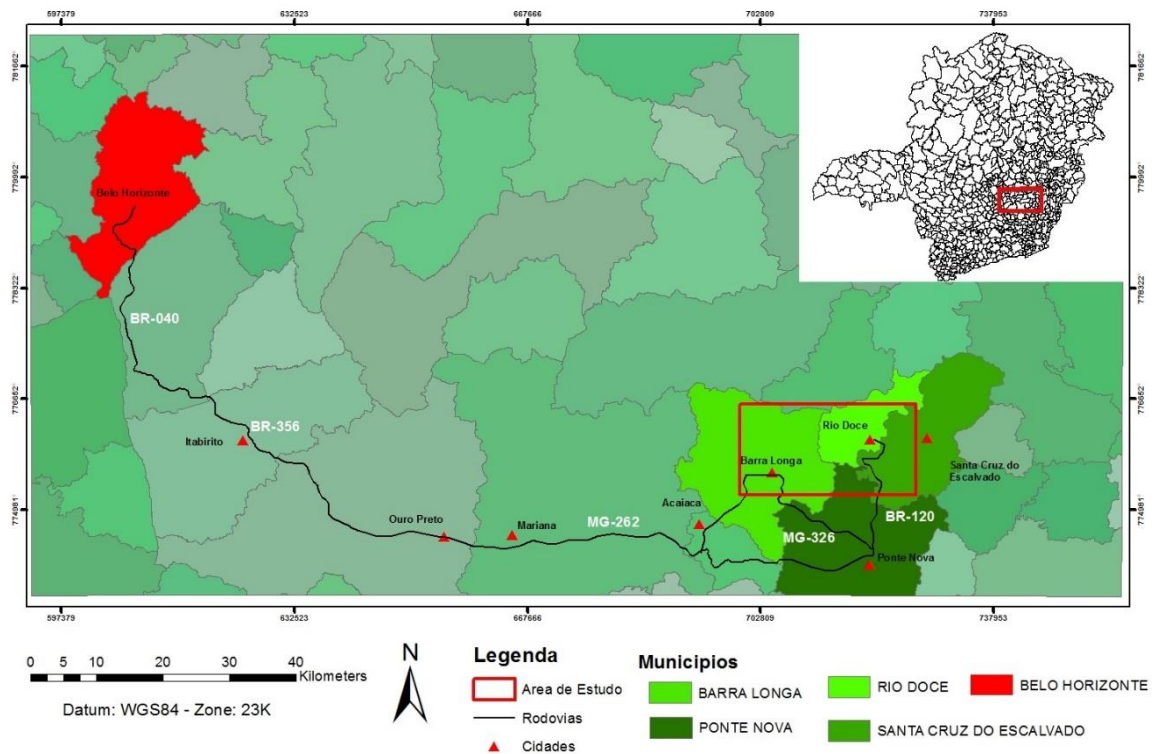


Figura 1.1 - Mapa de localização e vias de acesso à área de estudo utilizando vias transitáveis.

As áreas visitadas são acessadas por rodovias pavimentadas e estradas de terra que seguem o curso principal do rio. Partindo-se da capital mineira, Belo Horizonte, em direção à Barra Longa (começo do trecho monitorado), pega-se a BR-040 a sul da capital, sentido sul. A 29km do centro de Belo Horizonte, entra-se na BR-356 (Rodovia dos Inconfidentes) a sudeste, seguindo 86km até o município de Mariana. Em Mariana, segue-se pela MG-262 por 33km, sentido leste até o trevo de Acaiaca. No trevo, pega-se a estrada pavimentada sentido norte, em direção à Acaiaca. Após este município, continuar na rodovia pavimentada por 15km sentido NE até o município de Barra Longa. Para acessar os demais sítios amostrais, trafega-se em estrada de terra (em condições precárias) paralela ao rio do Carmo na direção ENE até atingir a cidade de Rio Doce e posteriormente a Usina Hidrelétrica Risoleta Neves.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo principal contribuir para a compreensão do impacto geoquímico do despejo de rejeitos da mineração de ferro promovido pelo rompimento da barragem de Fundão sobre sedimentos e águas dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce.

De modo específico se espera-se:

- Entender a abundância e distribuição de elementos químicos maiores e traço nos rios afetados pelos efluentes oriundos da barragem, no período de um ano hidrológico;
- Fazer um estudo comparativo das concentrações de elementos e parâmetros físico-químicos anteriores e posteriores ao rompimento da barragem do Fundão através de amostras de água e de sedimento de corrente.

1.4 NATUREZA DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

As bacias do rio Gualaxo do Norte e do rio do Carmo já foram alvos de estudos geoquímicos para se compreender as influências geogênicas e antropogênicas em suas águas e sedimentos (Costa 2001 e 2007; Rodrigues 2012), no entanto, as condições geoquímica dos principais cursos d'água dessas bacias foram fortemente afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, ocorrido em novembro de 2015, tornando-se o maior acidente ambiental da história do Brasil, sem precedentes históricos, atingindo toda a bacia hidrográfica do rio Doce e a região costeira do Estado do Espírito Santo.

Após o acidente, o local passou a ser um “laboratório” de grande importância para o estudo dos impactos ambientais vinculados às atividades de exploração de minério de ferro. Ou seja, o monitoramento contínuo das condições físico-químicas de águas e sedimentos da calha principal afetada se faz necessário para se estimar a magnitude dos impactos e se estimar o tempo necessário para que o sistema fluvial se recupere, ao menos parcialmente, permitindo o restabelecimento das condições ambientais mínimas para o restabelecimento de ecossistemas aquáticos e da população ribeirinha. Assim sendo, o presente trabalho visa estudar a geoquímica das bacias, após o rompimento da barragem, tentando entender quais os principais parâmetros físico-químicos afetados, a distribuição dos elementos químicos em águas e sedimentos de corrente e observar as modificações ocorridas nas concentrações destes após o rompimento.

1.5 MATERIAIS E MÉTODOS

1.5.1 Revisão bibliográfica

Para a realização deste trabalho, foi realizada uma vasta revisão bibliográfica, sobre os métodos a serem empregados na execução das solubilizações e das análises a serem feitas, com o objetivo utilizar técnicas similares as que foram utilizadas em outros trabalhos na mesma região. Foram lidos e catalogado trabalhos que analisaram a geoquímica dos dois rios estudados e de áreas similares do Quadrilátero Ferrífero, com os valores de concentração e *background* de metais pesados e traço

anteriores ao do rompimento da barragem, sendo de vital importância para efeitos comparativos sobre a área.

1.5.2 Base cartográfica

Para a execução dos trabalhos de campo e para melhor entendimento hidrológico e geológico da área, realizou-se uma busca a base cartográfica disponível sobre a região utilizando sistemas de SIG (Sistemas de Informações Cartográficas) para criar os mapas temáticos. Utilizou-se para isto:

- Base cartográfica disponibilizado pelo site do IBGE;
- Imagem SRTM para extração de drenagens disponibilizado pelo site da EMBRAPA (Projeto Brasil em relevo);
- Cartas geológicas na escala 1:100.00 da Folha Mariana (1993) e Folha Ponte Nova (1991); Serviço Geológico do Brasil;
- Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais na escala de 1:1.000.000, atualizado de Dezembro de 2014. CODEMIG/CPRM;
- *Software* de para elaborações de mapas: ArcGis® 10.3;
- *Software* para capturas de imagens de sensoriamento remoto: Google Earth Pro.

1.5.3 Trabalhos de Campo

Foram utilizados para as análises deste trabalho, água natural e sedimento ativo de corrente das bacias estudadas, coletadas em sete pontos ao longo da drenagem principal, do município de Barra Longa ao Município de Rio Doce, no Sudeste de Minas Gerais (Figura 1.2). Os pontos de coleta foram escolhidos visando o acesso facilitado aos rios e retirando a interferência antrópica direta (fontes de esgoto) e a influência de tributários. A baixa quantidade de pontos do projeto se deve ao difícil acesso as áreas de coleta e a dificuldade de se acessar a calha principal do rio (rio encaixado na maior parte do trecho amostrado entre os pontos P3 e P5).

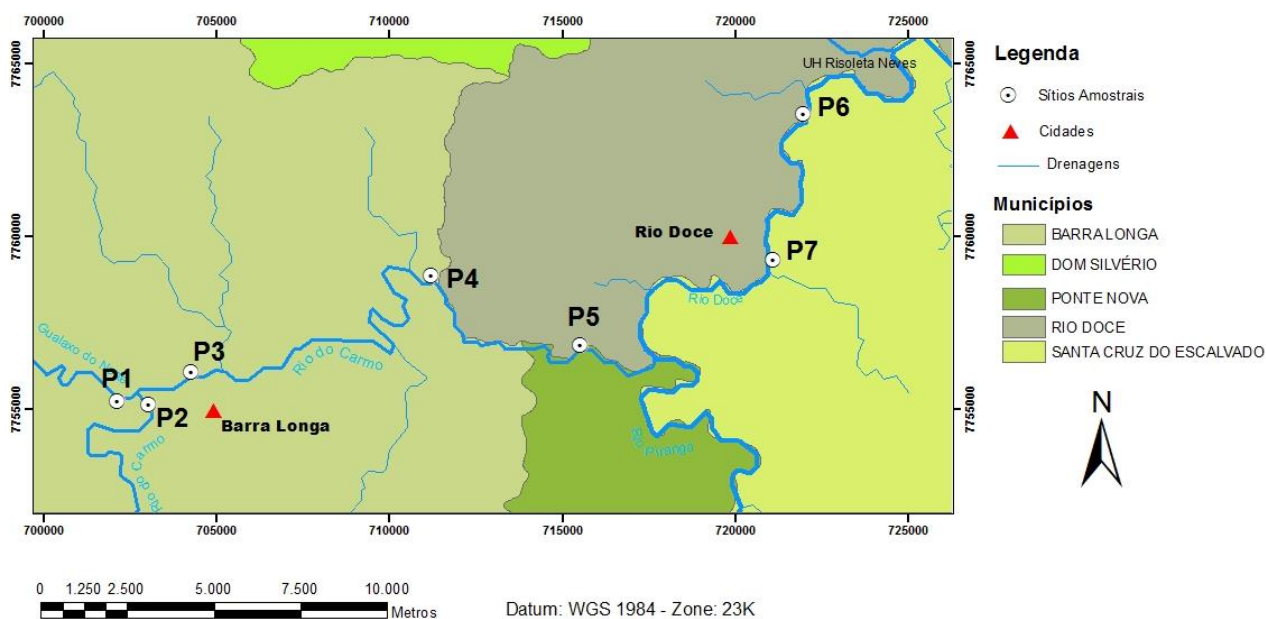


Figura 1.2 - Mapa com a localização dos sítios amostrais monitorados na calha principal dos rios estudados.

O primeiro ponto foi feito no rio Gualaxo do Norte anteriormente ao seu encontro com o rio do Carmo, e o segundo ponto, antes do rio do Carmo receber as águas do Gualaxo do Norte, para se ter uma ideia da contribuição de cada vertente no trecho analisado no trabalho. O restante dos pontos se localizou no rio do Carmo até a Usina Hidrelétrica de Risoleta Neves, onde já é denominado como rio Doce (Tabela 1.1). As coletas foram realizadas em período chuvoso, no dia 09/12/2016 e em período de seca, no dia 09/06/2017, fechando um ano hidrológico da região estudada. As amostras foram preparadas, solubilizadas e analisadas no Laboratório de Geoquímica (LGqA) do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Tabela 1.1 - Relação dos sítios amostrais monitorados durante o ano hidrológico na região do rio do Carmo.

Sítios Amostrais	Toponímia	Coordenadas UTM (WGS84)	
P1	Rio Gualaxo do Norte, próximo à Barra Longa, MG.	23K	0702131/7755227
P2	Rio do Carmo, próximo à Barra Longa, MG.	23K	0703059/7755136
P3	Av. Beira Rio, Centro de Barra Longa, MG.	23K	0704267/7756081
P4	Fazenda do Bueno, após Barra Longa, MG.	23K	0711217/7758868
P5	Fazenda Porto Alegre, antes de Rio Doce, MG.	23K	0715517/7756863
P6	Represa da UHE Risoleta Neves, Rio Doce, MG.	23K	0721203/7763142
P7	Rodovia de acesso a Rio Doce, MG, antes do viaduto.	23K	0720963/7759148

1.5.4 Geoquímica de águas

1.5.4.1 Elementos traço e cátions maiores

As amostras de água foram coletadas de dois modos diferentes, uma para análises por aparelhos analíticos e outra para análises físico-químicas em bancada e retirada das amostras de particulado. Com a ajuda de uma seringa descartável de 20 mL e um filtro de membrana 0,45 µm, foram coletados 40 mL de água natural, posteriormente acidificada com três gotas de HNO₃ ultrapuro concentrado (98%), para se manter os elementos dissolvidos em solução por um prazo de seis meses. Utilizando uma garrafa plástica virgem de um litro, foi amostrado um litro de água natural sem filtração previa, lacrada com o mínimo de ar possível, para preservação dos parâmetros a serem analisados em laboratório.

Os elementos dissolvidos na água foram quantificados através de análises realizadas por espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado, modelo 7700 series ICP-MS da Agilente Technologies, e por espectrômetro de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado, modelo 700 series ICP-OES da Agilente Technologies.

1.5.4.2 Parâmetros físico-químicos e ânions maiores

Os parâmetros físico-químicos foram analisados em duas etapas diferentes. Na primeira etapa, se utilizou o multiparâmetro ULTRAMATER II 6 Psi, Serial #6201163 para leituras *in situ* dos parâmetros pH, Eh (mV), condutividade elétrica (µS/cm), sólidos totais dissolvidos (ppm) e temperatura (°C), realizadas em cada ponto de amostragem. A análise de ânions foi desenvolvida em laboratório por teste de bancada, para determinação de alcalinidade, cloreto, sulfato e particulado, descritos a seguir.

- Alcalinidade:

Para a determinação da alcalinidade foi utilizado o método titulométrico, que consiste em titular 100 mL da amostra com H₂SO₄ 0,01 mol/L utilizando os indicadores fenolftaleína e metilorange separadamente. De acordo com a quantidade titulada para os dois indicadores, determina-se a alcalinidade utilizando a fórmula abaixo, e qual espécie está causando esta alcalinidade pela Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Tabela de fórmulas e tipo de espécie causadora da alcalinidade. Retirado de POP-LGqA 003/03.

Relações de Volume	Tipo de Alcalinidade	Cálculo	Unidade
$V_{ff} = V_t (V_{mo} = 0)$	OH^-	$C_{OH^-} = C_{H_2SO_4} V_{ff} 340$	mg/L
$V_{ff} > V_{mo}$	OH^- e CO_3^{2-}	$C_{OH^-} = C_{H_2SO_4} (V_{ff} - V_{mo}) 340$ $C_{CO_3^{2-}} = C_{H_2SO_4} V_{mo} 1200$	mg/L
$V_{ff} = V_{mo}$	CO_3^{2-}	$C_{CO_3^{2-}} = C_{H_2SO_4} (V_{ff} + V_{mo}) 600$	mg/L
$V_{ff} < V_{mo}$	HCO_3^- e CO_3^{2-}	$C_{CO_3^{2-}} = C_{H_2SO_4} V_{ff} 1200$ $C_{HCO_3^-} = C_{H_2SO_4} (V_{mo} - V_{ff}) 1220$	mg/L
$V_{ff} = 0 (V_t = V_{mo})$	HCO_3^- e CO_2	$C_{HCO_3^-} = C_{H_2SO_4} V_{mo} 1220$	mg/L
$V_t = V_{ff} + V_{mo}$	$CaCO_3$	$C_{CaCO_3} = C_{H_2SO_4} (V_{ff} + V_{mo}) 1000$	mg/L

- Cloreto (Cl^-)

Para a determinação de cloretos, foi utilizado o método titulométrico, onde se titulou 100 mL da amostra previamente filtrada com $AgNO_3$ (0,0141 mol/L aproximadamente) na presença do indicador cromato de potássio até a mudança de coloração da amostra. Com a quantidade de $AgNO_3$ utilizado, se determina a concentração de cloreto utilizando a equação (1).

$$C_{Cl^-} = \frac{C_{AgNO_3} \times V_{AgNO_3} \times 35,5 \text{ g/mol}}{100 \text{ mL}} \quad \text{Equação (1)}$$

- Sulfato (SO_4^{2-})

Para a determinação de sulfato nas amostras, foi utilizado o método turbidimétrico, onde se utilizou 100 mL da amostra previamente filtrada. Foi adicionado a amostra 20 mL de Solução Tampão para Sulfato e uma ponta de espátula de Cloreto de Bário, sendo agitado por dois minutos em uma mesa agitadora. As amostras foram lidas em duplicata no tubidímetro Policontrol AP2000 previamente calibrado, tendo-se seus valores de turbidez em NTU. Para se calcular a concentração de sulfato, foi feita uma curva de calibração Concentração x Turbidez, com soluções de concentração conhecidas e turbidez obtida pelo mesmo método das amostras a serem analisadas. Com a função gerada a partir da regressão linear da curva, foram calculadas as concentrações finais das amostras.

- Particulado em suspensão (MPS)

As amostras sem filtração previa em campo foram submetidas a filtração a vácuo em laboratório por filtro de 0,45 μm . Foram anotados os valores filtrados, obtidos por provetas, e da massa retida nos filtros. O cálculo da massa realizado pesando-se as membranas secas 48 horas em estufa a 100°C após a filtragem, descontando-se a média dos pesos das membranas sem o particulado. Para o cálculo do particulado se utilizou a equação (2) para obter a concentração em mg/L.

$$\text{Particulado em suspensão} = \frac{\text{Massa retida (g)}}{\text{Volume Filtrado (L)}} \times 1000 \quad \text{Equação (2)}$$

1.5.5 Elementos no particulado em suspensão

O material retido nos filtros da filtragem a vácuo das amostras de água do período chuvoso em laboratório, após secas e pesadas para determinação do particulado em suspensão, foram submetidas ao ataque ácido por digestão total modificada juntamente com o papel de filtro, feita em béquer de teflon, segundo o fluxograma apresentado abaixo (Figura 1.3). As amostras solubilizadas foram analisadas em ICP-OES, no mesmo laboratório. As solubilizações foram acompanhadas de duplicatas, um branco (com papel de filtro) e o padrão GBW07406 para validar as amostras. A Amostra P1.1, obtida do rio Gualaxo do Norte, obteve material suficiente para a solubilização e para a análise no difratômetro EMPYREAN, da PANALYTICAL, realizado no Laboratório de Difratometria de raios-X do Departamento de Geologia-UFOP, para sua caracterização mineralógica. As amostras relativas ao período de seca, não obtiveram massa de MPS suficientes para a solubilização e respectiva análise dos mesmos.

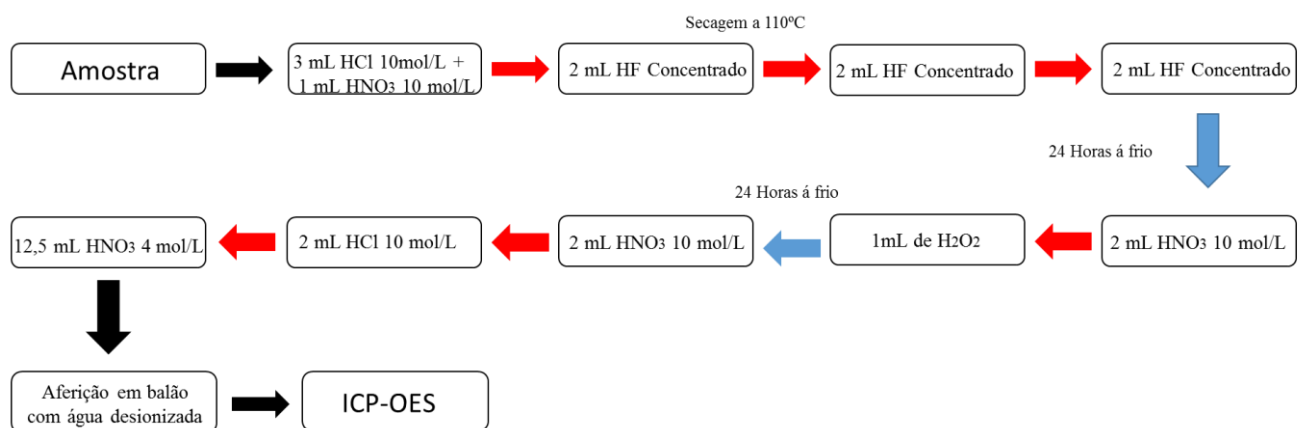


Figura 1.3- Fluxograma do procedimento de solubilização do particulado em suspensão por digestão total modificada com uso de béquer de teflon.

1.5.6 Geoquímica de sedimentos ativos de corrente

As amostras de sedimentos de corrente, após secas em estufa em torno de 50 °C, foram homogeneizadas e quarteadas, retirando se uma fração amostral de aproximadamente um quilograma. Esta fração foi submetida a análise granulométrica, para se definir as quantidades de cada espécime granulométrico na amostra. Para isso se usou peneira vibratória da série Tyler, com as aberturas específicas para diferenciar areia muito grossa, grossa, média, fina, muito fina e silte/argila (Tabela 1.3).

Tabela 1.3 - Tabela correlacionando as aberturas das peneiras utilizadas em ABNT/Mesh, o diâmetro das partículas em milímetros e a fração granulométrica retida nas mesmas.

Granulometria (Wentworth 1922)	Aberturas	
	Ø (mm)	ABNT/Mesh
Areia muito grossa	1,000	18
Areia grossa	0,500	35
Areia média	0,250	60
Areia fina	0,125	120
Areia muito fina	0,063	230
Silte/Argila	Fundo	Fundo

Após a separação granulométrica, as amostras correspondentes a cada fração, foram submetidas a digestão parcial por água régia, segundo o fluxograma abaixo (Figura 1.4) e analisadas em ICP-OES. Estas digestões foram acompanhadas por duplicatas, brancos e os padrões LKSD-2 e Lake Sediment nº 701.

Foram solubilizadas também amostras das frações totais de cada ponto coletado. Após a homogeneização e quarteamento das amostras, foi retirado uma alíquota de 100 gramas que foram submetidas posteriormente a pulverização por pulverizador de bolas PM100CM da Retsch, para melhor solubilização das mesmas. Foi utilizado o método de solubilização total por Savillex® modificado para minério de ferro (Sampaio 2012a) devido as altas concentrações de ferro das amostras (Figura 1.5).

Estas amostras foram analisadas em ICP-OES e ICP-MS. As solubilizações foram acompanhadas de duplicatas, um branco e o padrão GBW07406 para validar as amostras.

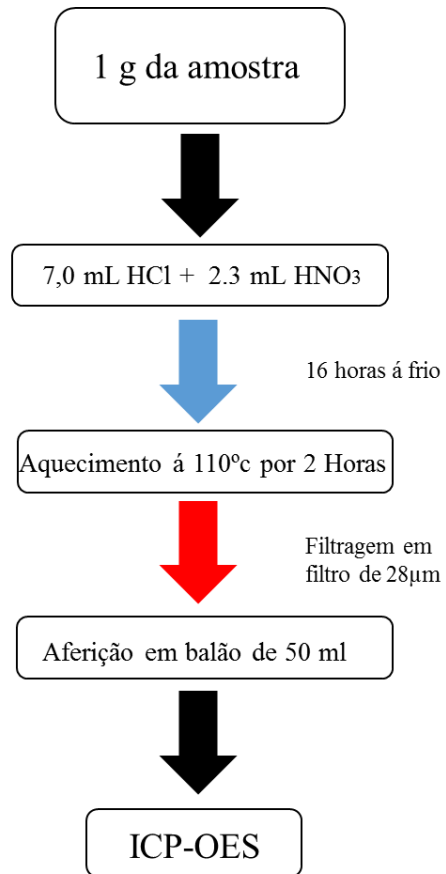


Figura 1.4 - Fluxograma do procedimento de solubilização parcial de sedimentos ativos de corrente por água régia

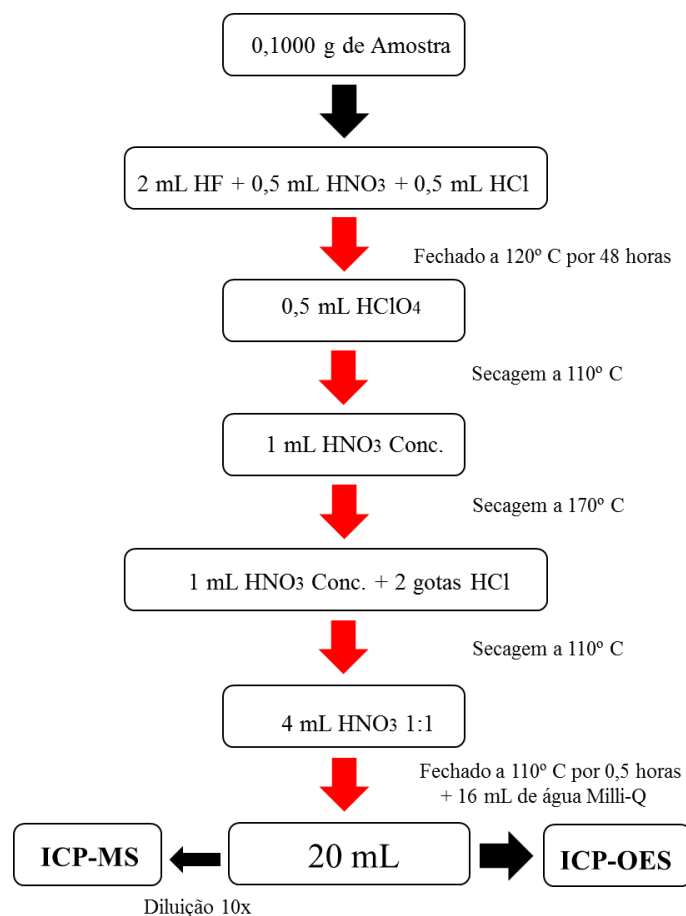


Figura 1.5 - Fluxograma do procedimento de solubilização total de sedimentos ativos de corrente pelo método de Savillex® modificado (Sampaio 2012).

1.6 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Geograficamente, a área de estudo deste trabalho está localizada na Zona da Mata de Minas Gerais, mais precisamente na microrregião de Ponte Nova. Segundo o IBGE, a Zona da Mata engloba 142 municípios com uma população de 2 175 254 habitantes. A economia da região é baseada em setores de serviço, indústria e agropecuária, sendo a pecuária leiteira a predominante na região do estudo.

1.6.1 Clima

O clima das partes de maior altitude da região estuda é caracterizado, segundo a classificação climática de Köppen como tipo Cwa (Clima úmido de verões quentes) com temperatura média variando de 21,8 a 9,5 ° C e pluviosidade variando de 1.100 a 1.400 mm ao ano. Já nas partes mais baixas da bacia, a temperatura média varia 24,7 a 21,4 com pluviosidade concentrando nos períodos de Outubro a Março, sendo classificado como tipo Aw (semi-úmido) (Brandaleise 1991). Já segundo o IBGE (2006a) a área é classificada como clima subquente- úmido.

1.6.2 Geomorfologia

Na área estudada, o rio do Carmo corre sobre rochas do embasamento cristalino, pertencentes aos complexos metamórficos do leste mineiro. Estas litologias meta-graníticas sofrem profundamente com o intemperismo, sendo seus minerais transformados rapidamente em argilominerais, formando espessas camadas de manto intempérico. Sobre esta perspectiva, segundo Costa (2007) a geomorfologia se apresenta de formas de cristas e colinas com vales encaixados e/ou fundos chatos, caracterizando a unidade geomorfológica denominada de Planaltos Dessecados do centro-sul e leste de Minas Gerais. As cotas são baixas, com uma média de 400 metros na calha da drenagem principal em relação ao nível do mar (figura 1.6).

Segundo Brandaleise (1991), as feições morfológicas denotam uma forte influência das variáveis geológicas (litologias, foliação e falhamentos) e as oscilações climáticas mesozóicas e cenozóicas, elaborando superfícies cíclicas de erosão.

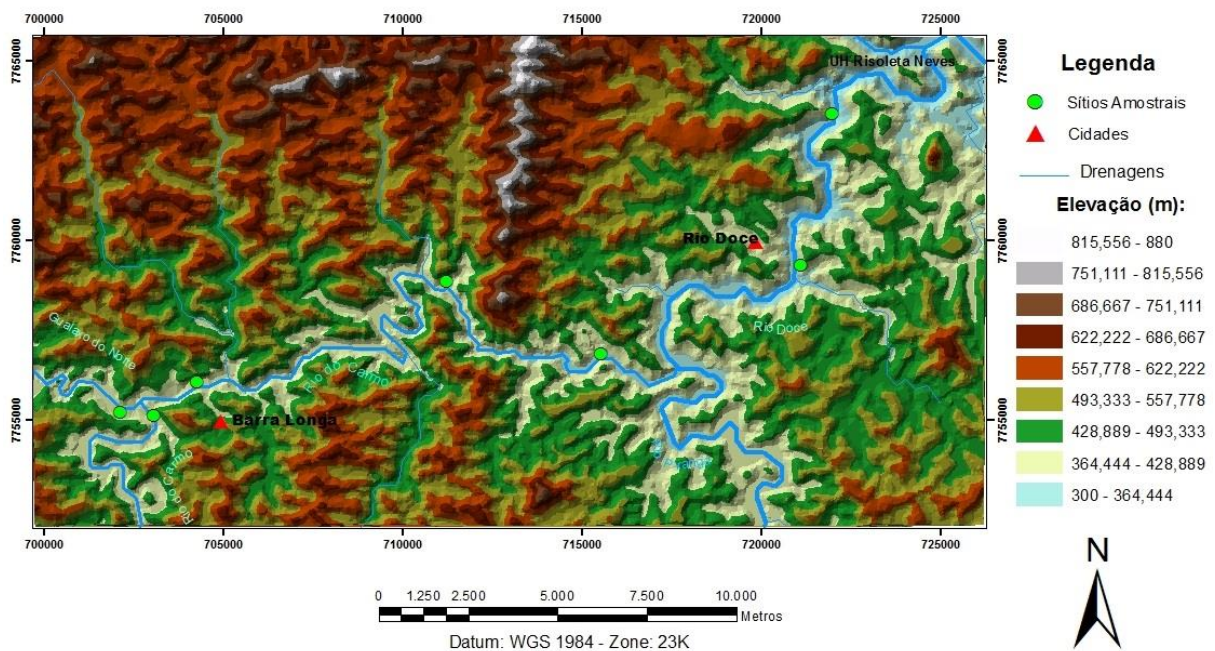


Figura 1.6 - Mapa hipsométrico da área de estudo, evidenciando baixas cotas altimétricas na região.

1.6.3 Hidrografia

A região estuda compreende em termos hidrológicos a bacia do alto rio Doce. A bacia do rio Doce é uma das grades bacias hidrográficas de Minas Gerais, que drena a porção leste do estado,

atingindo a porção norte do estado do Espírito Santo e desaguando no oceano Atlântico na altura do município de Linhares, ES (Figura 1.7).

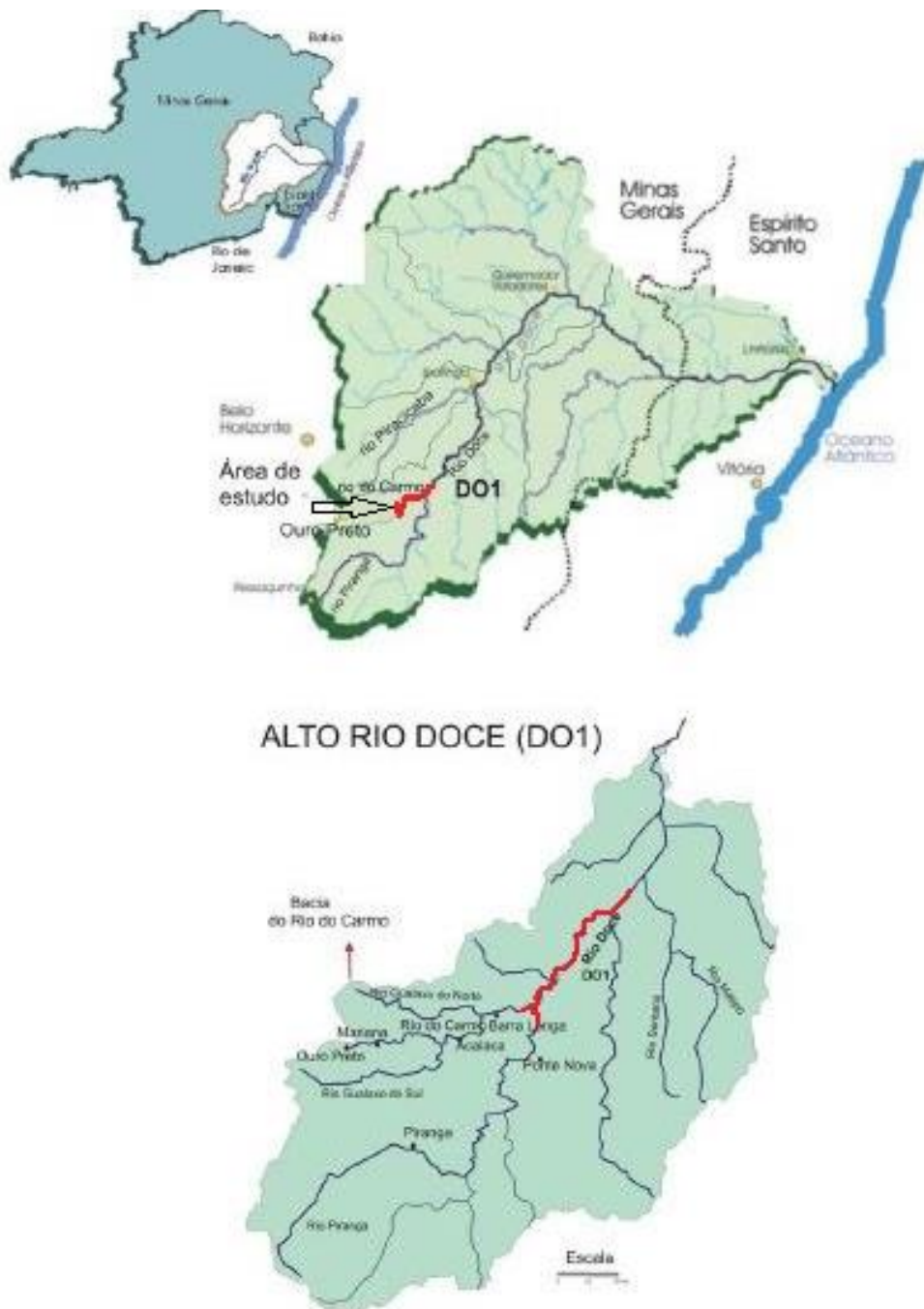


Figura 1.7 - Mapa hidrográfico da bacia do rio Doce, com enfoque no divisão do alto rio Doce, com área de estudo em vermelho. Modificado de Costa (2007).

A bacia do alto rio Doce é composta principalmente pelas bacias do rio Piranga e do rio do Carmo, alvo deste estudo. O rio do Carmo tem suas cabeceiras localizadas na porção sul do Quadrilátero Ferrífero, a SW da cidade de Ouro Preto, sendo os córregos Tripuí e Funil os principais formadores do ribeirão do Carmo. O ribeirão recebe o título de rio a partir do município de Barra Longa, onde recebe as águas das sub-bacias do rio Gualaxo do Norte e Gualaxo do Sul. O rio Gualaxo do Norte, também alvo deste estudo, tem suas cabeceiras localizadas na região SE do QF, na divisa dos municípios de Ouro Preto e Mariana. É formado pelos córregos Manso, Água Suja e Santarém, sendo o Santarém a primeira drenagem atingida pelo rompimento da barragem do Fundão.

A partir de Barra Longa, o rio do Carmo corre em sentido preferencial ENE até se encontrar com o rio Piranga, na altura do município de Rio Doce, onde recebe a denominação de rio Doce até sua foz no oceano Atlântico.

1.6.4 Vegetação

A vegetação da área é classificada como Floresta Atlântica, mas poucos vestígios dela são encontrados ao longo da bacia do rio Doce (Costa 2007). A maior parte da área é desmatada, sendo o domínio de campos desnudos com vegetação própria para pastagem, devido à forte cultura agropecuária da região. Os poucos vestígios de vegetação se encontram em vales apertados, próximo a cursos de água e ao rio principal ou topo de morros, sendo a mata de médio porte. Segundo o IBGE (2006b) a região é classificada como Floresta Estacional Semidecidual, mas totalmente modificada pela ação antrópica.

Araújo, G. S. 2018, Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo....

2.1 GEOLOGIA

A área estudada pertence a parte baixa da bacia do rio do Carmo, localizada entre os municípios de Barra Longa, onde o ribeirão do Carmo recebe as águas do rio Gualaxo do Norte e Gualaxo do Sul, tornando-se rio do Carmo (Costa 2007), e a cidade de Rio Doce, onde o rio Piranga desagua do Carmo, formando o rio Doce. O substrato geológico da área monitorada (Figura 2.1) é formada em sua grande parte pelo Complexo Mantiqueira. Em sua porção central aflora o Grupo Dom Silvério e nas proximidades de Barra Longa o Granito Barra Longa (Granito tipo A intraplaca), pertencentes a província Mantiqueira (Almeida 1977). Regionalmente, a geoquímica fluvial da área é afetada pela geologia de toda a bacia do rio do Carmo e rio Gualaxo do Norte, sendo esta localizada na porção extremo sul/sudeste do Quadrilátero Ferrífero, como mostra o mapa em anexo de Costa *et al.* (2010) (Anexo 1).

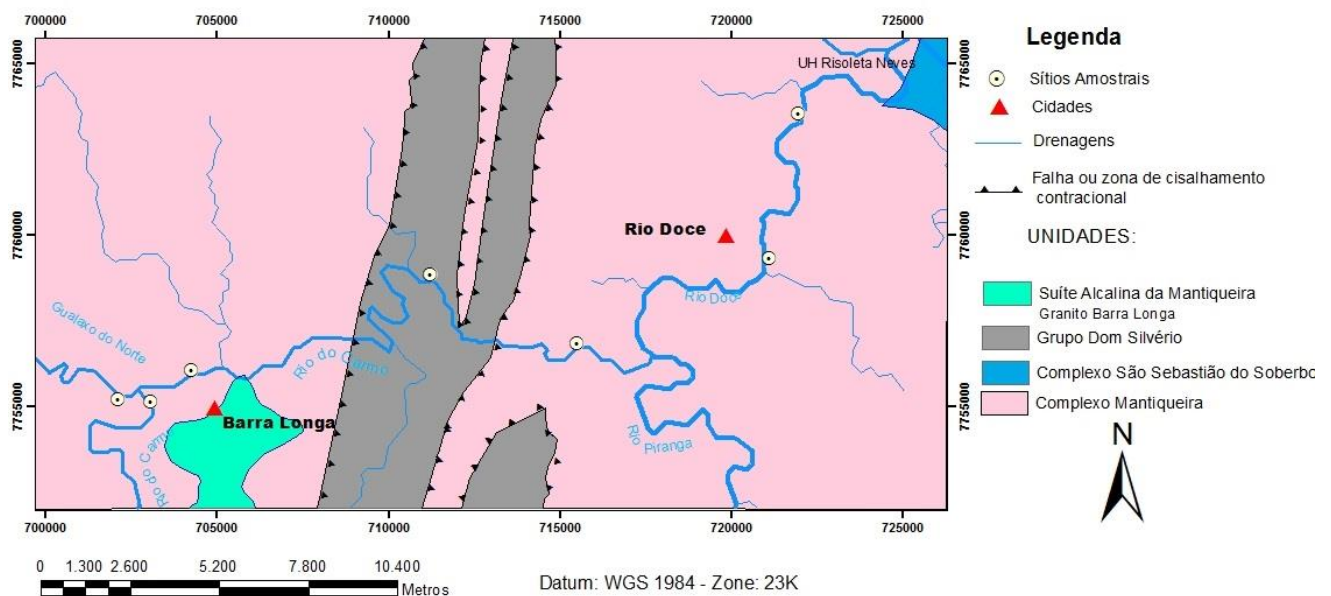


Figura 2.1- Mapa geológico da área de estudo, compilado do Mapa Geológico de Minas Gerais de 2014. Modificado de CPRM & CODEMIG 2014).

O Quadrilátero Ferrífero (Figura 2.3), localizado na província geotectônica São Francisco, é um local de geologia única. Por conta de suas mineralizações, principalmente de ouro e ferro, é reconhecido mundialmente e se tornou alvo de estudos pioneiros na área de geociências no Brasil. Pioneiros como Eschwege, Gorceix e Derby foram os responsáveis por estes estudos desde a metade do século XIX.

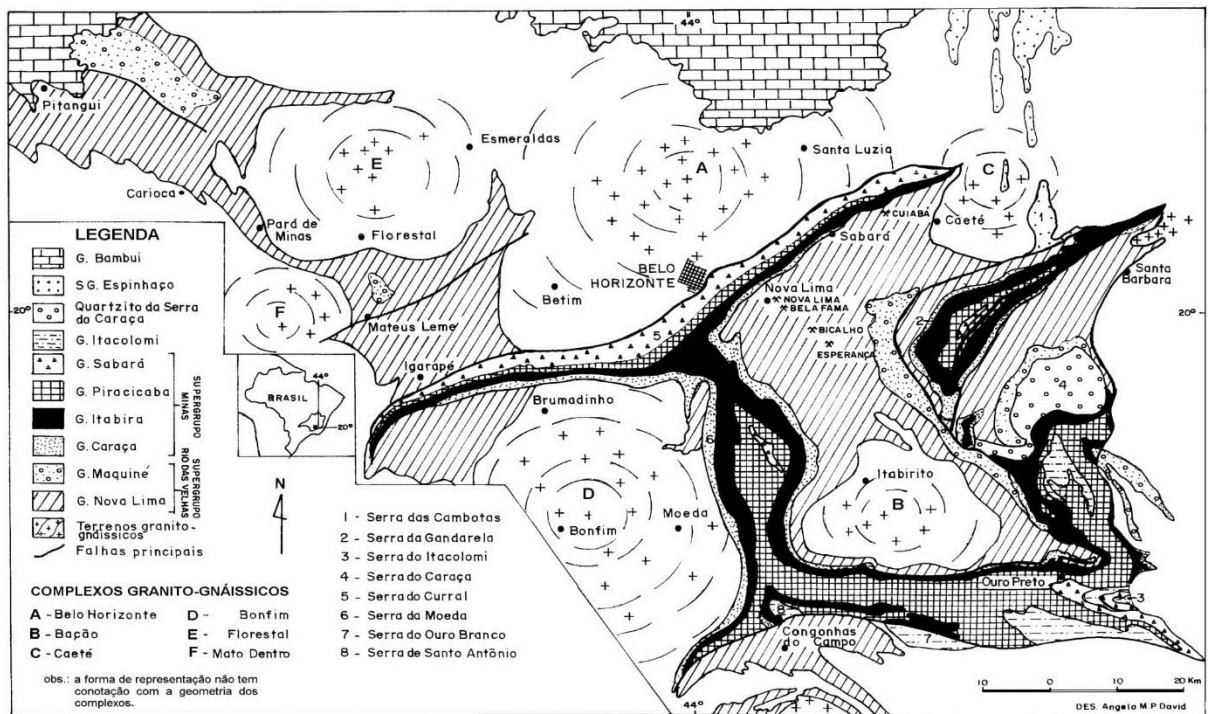


Figura 2.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero mostrando as ocorrências das unidades estratigráficas na região. (Retirado de Ranger et al. 1995).

Dorr II *et al.* (1957) realizou um trabalho de mapeamento geológico do QF, descrevendo sua estratigrafia e concedendo modelos de evolução na área. O autor classificou a área em quatro grandes unidades compostas pelos complexos metamórficos (embasamento), Supergrupo Rio das Velhas, Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi, sendo ao longo do tempo, modificado por estudos mais detalhados (Ladeira 1980; Renger *et al.* 1995; Alkmim & Marshak 1998). A coluna estratigráfica de Dopico *et al.* 2017 é a mais recente (Figura 2.4), baseada nas colunas de Dorr (1969), Alkmim & Marshak (1998) e Alkmim & Martins-Neto (2012), onde demonstra o embasamento cristalino Arqueano, o Supergrupo Rio das Velhas, o Supergrupo Minas, as Intrusivas pós Minas e Grupo Itacolomi, com as idades obtidas por diversos autores.

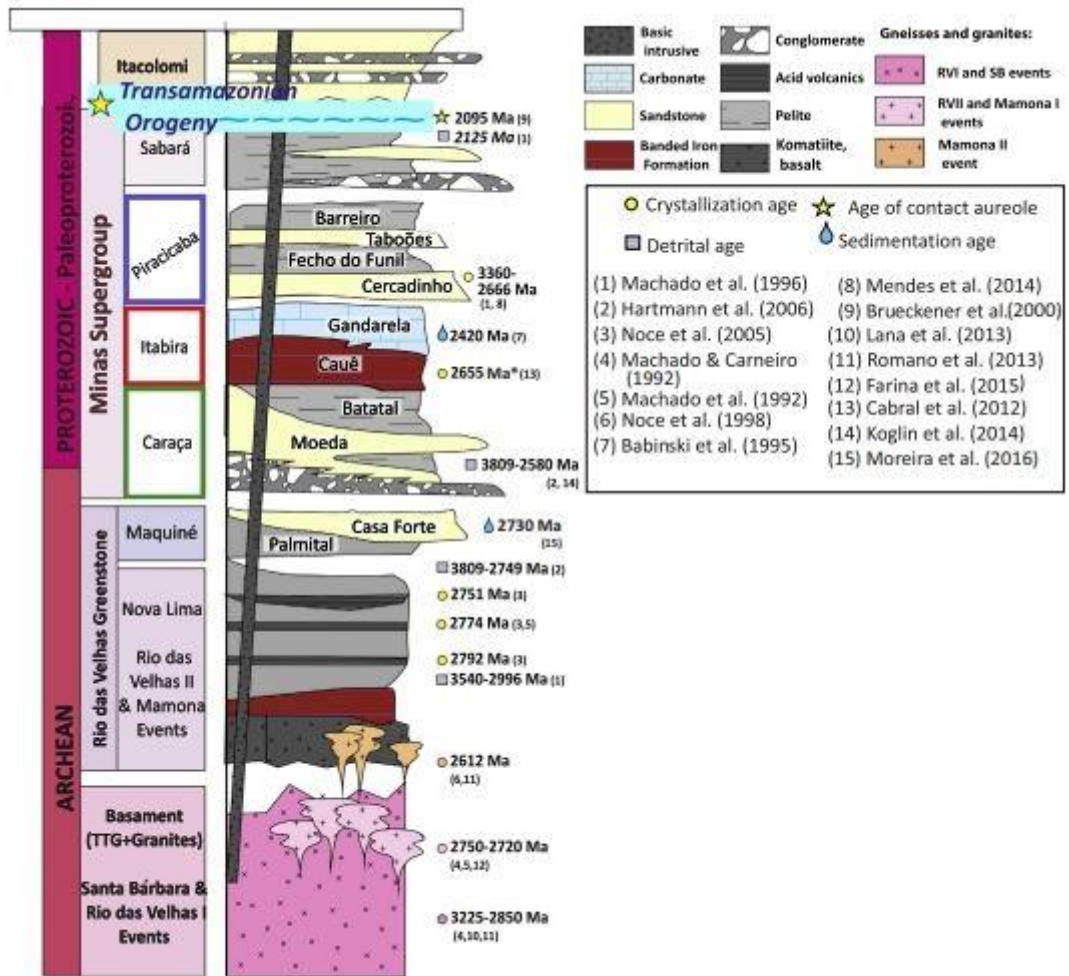


Figura 2.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero, representando seus supergrupos, grupos e formações. Apresenta idades de algumas unidades. Retirado de Dopico *et al.* (2017).

2.2 UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

2.2.1 Complexo Metamórfico Santa Bárbara

O Complexo Santa Barbára, aflora na maior parte da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012). O complexo, segundo Baltazar & Raposos (1993) é composto por três litotipos, um gnaiss tonalítico trondhjémítico claro e frequentemente bandado, uma rocha de composição granítica, frequentemente foliada (que as vezes intrude os gnaisses) e uma terceira rocha de composição granítica mais clara, posteriores na área em relação as outras rochas. A idade de cristalização deste complexo é dita como 3212 ± 8 Ma a 3210 ± 9 Ma (Lana *et al.* 2013).

2.2.2 Complexo Metamórfico Santo Antônio do Pirapitinga

O complexo metamórfico Santo Antônio do Pirapitinga aflora nas porções mais a sul da Bacia do rio do Carmo. Segundo Baltazar & Raposos (1993), o complexo pode ser definido como um conjunto de rochas geradas em fases distintas, sendo algumas, podendo se relacionar os Supergrupo Rio das Velhas (Quebra Ossos).

É composta basicamente por rochas básicas e ultra-básicas metamorfizadas e metassomatizadas, e gnaisses tonalíticos a graníticos. Apresentam idades de $2867 \pm 128\text{Ma}$ a $2726 \pm 101\text{Ma}$, retirada de um afloramento de gnaiss próximo a Mariana (Teixeira 1982 *in* Baltazar & Raposos 1993).

2.2.3 Complexo Granulítico Acaiaca

O Complexo Acaiaca (Jordt-Evangelista 1984) é um complexo metamórfico de rochas granulíticas aflorantes na região do município de Acaiaca. Segundo Medeiros Júnior & Jordt-Evangelista (2010), o complexo possui 36 Km de comprimento na direção Norte-Sul e até 6 Km de largura em sua porção mais central. É composta por granulitos félsicos (biotita granulitos e charnockitos), granulitos máficos (piroxênio \pm hornblenda granulitos), granulitos ultramáficos (olivina-piroxênio granofels) e granulitos aluminosos (granada-sillimanita \pm cordierita granulitos e granada-ordierita-cianita granulitos). Sua idade de deposição estaria em torno de $2165 \pm 10\text{ Ma}$ (Medeiros Júnior 2016).

2.2.4 Complexo Metamórfico Mantiqueira

O complexo Mantiqueira (Brandalise 1991) se apresenta na maior parte da área estuda. É composta predominantemente por um biotita-anfibólio ortognaisse bandado de composição tonalítica a granítica. Apresenta lentes, *boudins* e camadas concordante de anfibolitos (Noce *et al.* 2007a). A idades apresentadas para este complexo é de 2041 Ma seguido por estágios colisionais e pós-colisionais de 2050 Ma (Noce *et al.* 2007b).

2.2.4.1 Granito Barra Longa

Na região de Barra Longa, aflora um corpo granítico denominado Granito Barra Longa. O granito apresenta granulação grossa, e é predominantemente quartzo-feldspática, com foliação milonítica bem desenvolvida ou excipiente (Baltazar & Raposos 1993).

2.2.5 Grupo Dom Silvério

O Grupo Dom Silvério aflora na região central da área estudada. Foi definido por Lima *et al.* (1974 *in* Brandalise 1991). Brandalise (1991) coloca o grupo Dom Silvério dividido em três unidades da base para o topo:

- Unidade 1: biotita-anfibolitos, granada-biotita-muscovita xisto, tremolitos e rochas calciossilicáticas;
- Unidade 2: Moscovita-biotita-xistos com ou sem granadas, cianita, grafita, sillimanita, muscovita-quartzitos, muscovita-quartzo xisto, magnetita-quartzitos, rochas calciossilicáticas, gonditos, mármore, biotita-anfibolitos, formação ferrífera e biotita-gnaisses laminados;
- Unidade 3: Muscovita quartzitos, muscovita—quartzo xistos.

Segundo Jordth-Evangelista (1992) o Grupo Dom Silvério é uma sequência metassedimentar composta por mica-xistos na porção sul e quartzitos na porção norte (subordinadamente mica-xistos, mármore, gonditos e rochas calciossilicáticas). Possui 160Km de extensão e 4km de largura em média. Seu enquadramento estratigráfico segundo Jordth-Evangelista (1992) é problemático, concluindo que o grupo pode pertencer aos terrenos granitos-greenstones arqueanos.

2.2.6 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo Rio das Velhas foi definido por Dorr *et al.* (1957) logo após o registro de uma grande discordância desta para o Supergrupo Minas. O supergrupo é formado por rochas metavulcano-sedimentares, com magmas típicos de fundo oceânico. Possui metamorfismo de fácies xisto-verde a anfibolito, caracterizando um *greenstone-belt* de idade arqueana juntamente com rochas plutônicas de 2,6 a 2,7 Ga (Alkmin & Marshak 1998). O vulcanismo félsico no supergrupo foi datado em 2776 Ma (Endo & Machado 2002). Os primeiros autores dividiram o Supergrupo Rio das Velhas em Grupo Nova Lima e Grupo Maquiné.

2.2.6.1 Grupo Nova Lima

Definido por Dorr II *et al.* (1957) o grupo, mais antigo da estratigrafia do QF, é constituído de rochas metassedimentares máficas, xistos grafitosos e carbonosos, formação ferrífera, metagrauvacas, metatufitos máficos, quartzitos impuros e metaconglomerados.

Ladeira (1980) propôs a subdivisão do grupo Nova Lima em três unidades, da base para o topo:

- Unidade inferior metavulcanica: Rochas de origem vulcânica metamorfizadas, incluindo o Quebra Ossos, posteriormente colocada como grupo na base do Supergrupo Rio das Velhas, constituídos de rochas ultramáficas do tipo komatiito peridotíticos (Baltazar & Raposos 1993);
- Unidade Media metassedimentar Química;
- Unidade Superior Clástica;

Baltazar & Raposos (1993): Subdivide o grupo em duas subunidades, uma subunidade peridotítica Quebra Osso, e uma subunidade vulcano-sedimentar.

2.2.6.2 Grupo Maquiné

O Grupo Maquiné, segundo, Baltazar & Raposos (1993) é subdividido em duas formações:

- Formação Palmital: Formação inferior constituída de filitos quartzosos, quartzitos homogêneos e lentes conglomeráticas.
- Formação Casa Forte: Formação Superior constituídas de lentes de conglomerados e quartzitos.

2.2.7 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas foi descrito por Dorr II (1969) com o nome de “Sequência Minas”, subdividindo-se em três unidades: Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. Posteriormente seria adicionado ao Supergrupo o Grupo Sabará. O Supergrupo Minas é um enorme pacote metassedimentar em discordância com o Supergrupo Rio das Velhas.

2.2.7.1 Grupo Caraça

O grupo Caraça é composto de rochas metasedimentares de composição clástica variada. O grupo foi subdividido em duas formações distintas de características marcantes. A unidade inferior foi definida Formação Moeda (Wallace 1958) composta de quartzitos grosso, conglomerados e quartzitos finos friáveis. A unidade superior foi definida com Formação Batatal (Maxwell & Simmons 1958), e é composta por filitos de coloração fortemente cinza.

2.2.7.2 Grupo Itabira

O Grupo Itabira caracteriza-se por rochas metassedimentares químicas, sobrepostas ao grupo Caraça (Dorr II *et al.* 1957). Foi subdividida em duas formações, de acordo com o tipo de rocha química.

A unidade inferior foi definida por Formação Cauê, e é composta predominantemente por formações ferríferas bandadas metamorfizadas, litotipo nomeado de Itabirito (Eschwege 1833). A unidade superior foi denominada Formação Gandarela, com o dolomito como litotipo característico.

A Formação Cauê teve grande importância econômica no último século, sendo explorado de suas rochas o minério de ferro. Por conta de suas características fácies de reconhecer e ser uma camada continua em toda região, foi utilizada por Dorr II *et al.* (1957) como camada guia no levantamento estratigráfico e estrutural do QF. Esta formação possui idade mínima de 2.65 Ga (Cabral *et al.* 2012) obtida por zircões presentes em uma lente vulcânica em meio aos itabiritos.

2.2.7.3 Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba foi definido por Dorr II *et al.* (1957) elevando a Formação Piracicaba (Hander & Chamberlin) a categoria de grupo. Foi inicialmente subdividido Formação Cercadinho, Fecho do Funil, Tabões, Barreiro e Sabará (elevada à categoria de grupo anos depois). Sua composição é praticamente clástica, composta de conglomerados, quartzitos ferruginosos, quartzitos, filitos hematíticos e filito grafitoso, podendo ter lentes de material dolomitos e formação ferríferas (Baltazar & Raposos 1993).

2.2.7.4 Grupo Sabará

Segundo Baltazar & Raposos (1993), a definição da unidade Sabará sempre foi conturbada, assim como seu posicionamento estratigráfico. Barbosa (1966 *in* Dorr II 1969) já havia sugerido a definição de grupo a antiga Formação Sabará, sendo aceita após Ranger *et al.* (1995) o elevar a categoria de grupo. O Grupo Sabará se definiu como uma sequência metavulcano-sedimentar composta de rochas predominantemente pelíticas e grauvacas. Ocorrem também conglomerados, quartzitos, filito grafitoso, tufito e vulcânicas máficas e ácidas (Ranger *et al.* 1995). A idade máxima de deposição para o Grupo Sabará é de 2131 ± 5 Ma (Machado *et al.* 1996). Segundo Dorr II *et al.* (1957) o Grupo Sabará possui de 3000 a 3500m de espessura. Isto o deixa como a maior espessura do Supergrupo Minas (Ranger *et al.* 1995).

2.2.8 Grupo Itacolomi

Unidade estratigráfica superior do QF, o Grupo Itacolomi é formado por rochas quartzíticas e quartizíticas sericiticas, com lentes de filitos e conglomerados, cortado localmente por diques diabáticos (Dorr II 1969).

2.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL

O Quadrilátero Ferrífero, como é um terreno polideformado, sempre esteve como alvo de estudos para se compreender a estruturação e possível origem dos metassedimentos ali presentes. Dorr II (1969) interpretou o arcabouço do QF como envolvido em três eventos deformacionais: Um primeiro evento, que afetaria apenas o Supergrupo Rio das Velhas (o que explicaria a discordância angular do mesmo com o Supergrupo Minas), um segundo evento que afetaria toda a estratigrafia anterior a deposição do Grupo Itacolomi, e um terceiro evento, que afetaria toda a estratigrafia do QF, formando as grandes estruturas dobradas vistas atualmente.

Alkimin & Marshak (1998), com o auxílio de outras ferramentas, interpretou a deformação do QF em quatro eventos deformacionais: um evento transamazônico (responsável por estruturas com vergência para NW, e os sinclinal Gandarela e Ouro Fino), um evento de idade Uruaçuana (compressão N-S), um evento Brasileiro (vergente para W, formando estruturas com eixos N-S) e um evento de caráter extensional, após o evento Brasileiro.

Endo (1997) explica a estruturação do QF em três ciclos deformacionais: o ciclo Jequié (e idade 2,78 Ga a 2,56 Ga) constituído de três eventos transpressionais N-S, o ciclo Transamazônico constituído de dois eventos compressivos S-SW e para NW respectivamente, e por último o ciclo Brasileiro com vergência para W.

CAPÍTULO 3

EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1 AMBIENTES FLUVIAIS

As regiões continentais com abundância de água doce, ou seja, que possuem alguma precipitação regular durante um ciclo anual, geram os rios, através do escoamento das águas por linhas de vales, fraturamentos e outras feições canalizadoras, caracterizando um ambiente fluvial. Os rios, em uma definição mais teórica, são cursos naturais de água doce, com canais definidos e fluxo permanente ou sazonal para um oceano, lago ou outro rio (Teixeira *et al.* 2003). Os rios se ligam a outros maiores formando uma bacia hidrográfica, que nada mais é, que uma rede de drenagens onde todos os rios convergem a um mesmo curso, formando um canal principal de maior volume e fluxo. Estas bacias podem apresentar tamanhos variados, caracterizadas em micro, meso e macro bacias, de acordo com a relação das redes de drenagens com a região estudada. São delimitadas por acidentes topográficos, e irregularidade no relevo, que afeta o sentido de escoamento da água superficial. Um delimitador de bacias é denominado divisor de águas (Teixeira *et al.* 2003). Nos rios há três processos principais ocorrendo, erosão, transporte e sedimentação, controlados por fatores externos como intemperismo, clima, perda de energia por declividade, nível de base entre outros.

3.1.1 Erosão e intemperismo

A erosão ocorre durante todos os estágios do rio, mas nas regiões de cabeceiras, há uma maior predominância deste processo, aliado a maior energia potencial do meio (Cunha 1996), facilitado pelo intemperismo físico e químico das rochas presentes no meio. Segundo Magalhães (2001), erosão é um processo mecânico que age em superfície e profundidade, em certos tipos de solo e sob determinadas condições físicas, naturalmente relevantes. Analisando em termos de sistema fluvial, a erosão é um fenômeno contínuo e espontâneo que ocorre devido à ação das correntes dos rios, a qual provoca escavações no leito e da margem do rio, carregando os materiais geológicos que compõem o leito do canal. A erosão de leito é causada basicamente pela ação da corrente, enquanto a erosão de margem é proporcionada pela ação da corrente, pela ação das ondas que esta corrente provoca e ainda pelo encharcamento do terreno marginal, causando o seu desgaste e posterior desabamento (Makkaveyev 1986 *in* Vicq 2015). A erosão de um canal ocorre de forma diferente, segundo sua morfologia, gerando sedimentos com propriedades físicas e químicas peculiares a cada padrão (Makkaveyev 1986). O

intemperismo, agente facilitador da erosão, segundo Vicq (2015) pode ser descrito em dois estágios, o intemperismo físico, que causa a desagregação das rochas em frações menores tendo como consequências a redução da granulometria dos minerais, o contínuo aumento da superfície específica e a formação de solo. Posteriormente têm-se o intemperismo químico, o qual implica em transformações químicas dos minerais que compõem a rocha. O principal agente do intemperismo químico é a água, e isso tem um peso relevante quando se compara o intemperismo em países de clima temperado e tropical. Em países de clima tropical, a oferta de água pluvial e fluvial é alta, em consequências do clima quente e húmido, o que acelera o processos intempéricos (predominantemente os processos químicos), criando espessas camadas de solos, principalmente em terrenos ácidos.

3.1.2 Transporte

Em sistemas fluviais, o transporte de material erodido nos rios se dá de cinco principais formas: por arrasto, saltação, rolamento, suspensão e solução. Os processos de arrasto, saltação e rolamento ocorrem em contato com o leito do canal, e transporta sedimentos na escala de silte/areia muito fina a seixos e matacões, dependendo da energia do sistema. O transporte por suspensão ocorre com materiais finos (argila/silte) e ultrafinos, comumente denominado particulado em suspensão. Já os íons provenientes do intemperismo químico são transportados por solução no rio (Miall 1992). O que define o mecanismo de transporte do sedimento é a variação do tamanho da partícula, do peso e formato, da forma de escoamento (laminar, turbulento corrente ou turbulento encachoeirado, o qual é definido pelo número de Froude), dos obstáculos no leito, e de diversos outros fatores inter-relacionados, tais como: declividade do leito, forma do canal, temperatura da água (Stevens & Yang 1989 *in* Vicq 2015). Os materiais em suspensão correspondem pelas maiores porcentagens de material transportado em um rio (Ward & Timble 1995), principalmente em períodos chuvosos, afetando visualmente a turbidez das águas.

3.1.3 Deposição e Sedimentação

Assim que um rio perde energia, devido a sua morfologia ou por chegar a uma área relativamente baixa ao nível de base local ou regional, os sedimentos transportados pelas águas se depositam, formando planícies, deltas, terraços e barras. Estes depósitos fluviais, trazem consigo uma assinatura geoquímica peculiar ao ambiente do rio e a contribuição geogênica de cada área. Contribuições antropogênicas também interferem na geoquímica destes depósitos, incluindo metais de alta toxicidade, transportados em suspensão durante períodos de cheia e depositados nos períodos mais seco (Costa 2007). O estudo destes ambientes de deposição, aliados a estratigrafia recente destes sedimentos, nos

leva a história de contaminação de metais pesados e a valores confiáveis de *background* geoquímico (Rodrigues 2012).

3.2 GEOQUÍMICA DE ÁGUAS FLUVIAIS

A água é um bem necessário a todo ser vivo da Terra, sendo, que os animais e plantas terrestres, em boa parte, dependem das águas fluviais para sua sobrevivência. A avaliação desta por meios de pesquisas são necessárias para se compreender o estado destas águas no ambiente, se permanecem de modo natural ou possui algum nível de contaminação antropogênica.

A geoquímica de águas se faz necessária para compreender os níveis de cada elemento na água, e se obter uma concentração tolerável para cada elemento, sendo acima deste nível, considerado contaminação. Para trabalhos de hidroquímica e hidrofísica se utilizam parâmetros como pH, Eh, Condutividade, Resistividade, sólidos totais dissolvidos, íons (alcalinidade, sulfato, cloreto), metais e elementos traço.

Segundo Santos (2017) as principais fontes naturais de material dissolvidos nos rios são providas do intemperismo químico e físico das rochas, além de mecanismos de desorção das plantas, fontes vulcânicas e geotermiais. De fontes antropogênicas se tem os esgotos domésticos e industriais, resíduos de mineração e da indústria agropecuária (Figura 3.1). Santos (2017) coloca os óxidos, carbonatos e sulfetos superficiais, matéria orgânica e argilominerais superficiais como os principais sólidos capazes de interagir com as substâncias dissolvidas. Afirma também que os processos de sorção e complexação são importantes para condicionar a quantidade de elementos traço disponíveis no sistema fluvial.

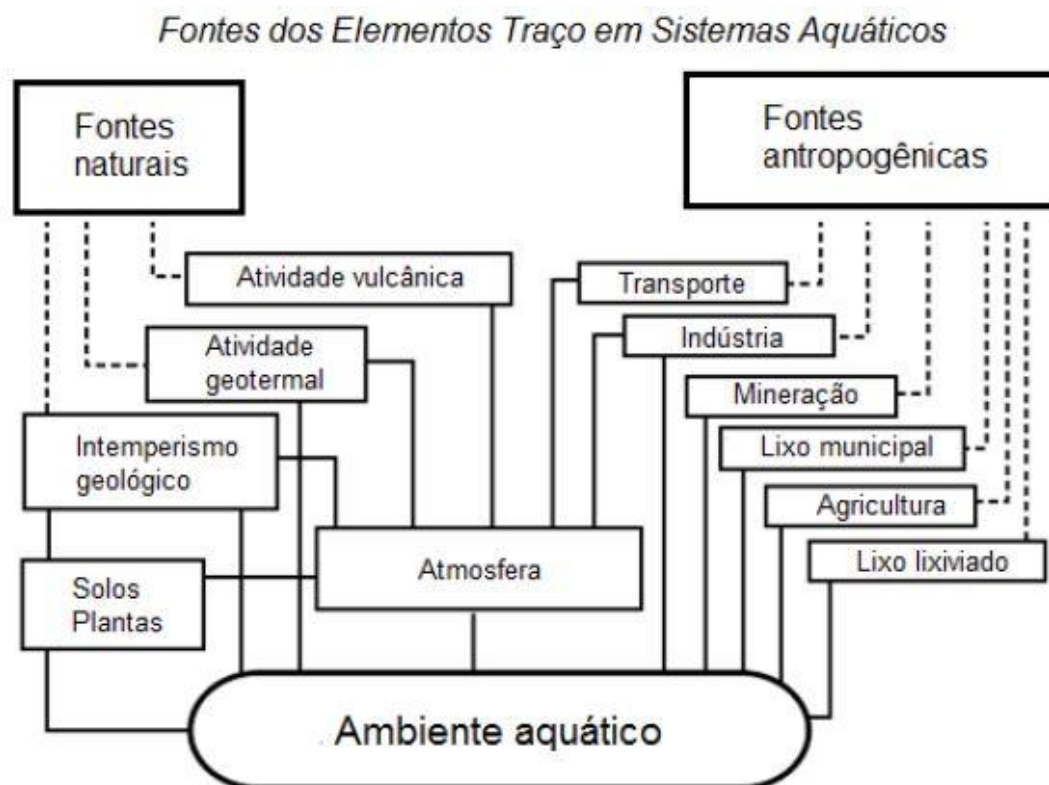


Figura 3.1 - Principais fontes e transporte de elementos traço em um sistema fluvial. Modificado de Gaillardet et al. (2004) in Santos (2017).

3.2.1 Contaminação

A avaliação do estado de contaminação da água se torna necessária a partir do momento em que sua utilização humana é necessária (irrigação, abastecimento e outros). Os graus de contaminação em que estão as águas de uma determinada fonte (águas subterrâneas, superficiais, meteóricas) é regida por leis rígidas para que a mesma não contamine o ecossistema ou até mesmo não seja utilizada em ações antrópicas. Visando o consumo humano, a Organização Mundial de Saúde (OMS) publica desde 1958, o periódico *International standards for drinking-water*, posteriormente substituído pelo *Guidelines for drinking-water quality*, estando em sua quarta edição (WHO 2011).

Em 1974, a *Ontário Ministry of the Environment and Energy* (OMEE 1974) publicou valores máximos de concentração para águas, separando para três usos distintos, para a agricultura, para a proteção da vida aquática e para o uso em indústrias. Nos Estados Unidos a *United States Environmental Protection Agency* também possuem valores limites de contaminação para águas desde 1983 (USEPA 1994), publicando em 1985 a *Guidelines for Deriving Numerical National Water Quality Criteria for the Protection Of Aquatic Organisms and Their Uses* (USEPA 1985), introduzindo a metodologia de se obter o SMAV (*Species Mean Acute Value* –Valores agudos médios das espécies).

No Brasil a legislação que para o uso de águas vem desde o Brasil colônia. Em 1934 é decretado o Código das Águas, importante passo em termos de legislação ambiental no país. Em 1997 surge a Política Nacional de Recursos Hídricos, criando assim a Agência Nacional de Águas (julho de 2000). Em termos de contaminação de águas, parâmetros foram propostos na resolução CONAMA nº 86 de 1986 (CONAMA 1986) sendo substituído em 2005 por uma resolução mais nova e completa, a resolução nº 357 (2005). A resolução CONAMA 357/05 classifica as águas doces em quatro classes de acordo com sua utilização e uma classe especial com nível de contaminação muito baixo. Cada classe possui valores máximos dos padrões para as atividades relacionadas a ela (Tabela 3.1). As classes são definidas como (CONAMA 2005):

- Classe Especial: águas destinadas ao abastecimento doméstico sem prévia ou com simples desinfecção; a preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1: águas destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento simplificado; a proteção das comunidades aquáticas; a recreação de contato primário (natação, esqui aquático e mergulho); a irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de películas; a criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécie destinadas à alimentação humana.
- Classe 2: águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; a proteção das comunidades aquáticas; a recreação de contato primário (esqui aquático, natação e mergulho); a irrigação de hortaliças e plantas frutíferas; a criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécie destinadas a alimentação humana.
- Classe 3: águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional; a irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; a dessedentação de animais.
- Classe 4: águas destinadas a navegação; a harmonia paisagística; aos usos menos exigentes.

Tabela 3.1- Valores máximos dos metais e As em água de acordo com a sua classe em mg/L. A classe 4 não apresenta valores máximos para estes elementos. Modificado de CONAMA (2005).

(mg/L)	Al	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn
Classe 1	0,1	0,01	0,7	0,001	0,05	0,009	0,3	0,0002	0,1	0,01	0,18
Classe 2	0,1	0,01	0,7	0,001	0,05	0,009	0,3	0,0002	0,1	0,01	0,18
Classe 3	0,2	0,0	1,0	0,0	0,1	0,0	5,0	0,0	0,5	0,0	5,0

3.3 GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIAIS

A análise geoquímica de sedimentos fluviais é uma ferramenta importante para a compreensão da dispersão de elementos químicos em uma bacia. Os sedimentos, gerados a partir da erosão de rochas e minerais, são canalizados pelas drenagens ativas, e apresentam uma assinatura geoquímica, que varia por fatores como a geologia diferenciada, uso do solos, contaminações antrópicas, vegetação local entre outros (Tarvaine & Kallio 2002).

Os sedimentos tem uma grande disposição a acumular elementos traço (Silva *et al.* 2003), sendo de grande importância para mapeamentos geoquímicos, onde os elementos geogênicos representam assinaturas da geologia local (Baltazar & Raposos 1993). Estudos ambientais também são feitos com base em dados geoquímicos, uma vez que atividades antrópicas podem influenciar nas assinaturas geoquímicas dos sedimentos (Salomons & Forstner 1980).

Os sedimentos são considerados os melhores retentores de materiais orgânicos e inorgânicos em um sistema fluvial. Para Förstner *et al.* (1995), até 99% das substâncias químicas em um ambiente fluvial está ligada aos sedimentos de fundo, sendo o restante solubilizado nas águas. Trabalhos com Eleutério (1997) e Costa (2001 e 2007), mostram que a carga de metais é muito mais elevada em sedimentos do que solubilizada nas águas nas bacias estudadas neste trabalho.

3.3.1 Contaminação

O estudo ambiental de contaminação antrópica através da geoquímica de sedimentos vem através do entendimento de que os sedimentos acumulam a maior parte das substâncias químicas e dos metais contaminantes do sistema hídrico (Gerrits & Edelenbos 2004). Os estudos de contaminação em sedimentos começaram, segundo Leão (2014) em 1973 pela *Federal Water Quality Administration e adotado pela United States Environmental Protection Agency* (U.S.E.P.A), com o intuito de regulamentar o destino de materiais oriundos de dragagem. Em 1993, a *Ontário Ministry of the Environment and Energy* (OMEE 1993) desenvolveu o conceito de VGQS (Valores Guia para a Qualidade de Sedimentos), instituindo níveis de contaminação e estabelecendo valores de TEL (*Threshold Effect Concentration Level* - Nível limite de efeito) e de PEL (*Probable Effect Level* - Nível provável de efeito), sendo estes valores obtidos por técnicas analíticas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - *Guideline* de qualidade de sedimentos do *Ontario Ministry of the Environment and Energy*. - OMEE para metais (concentração total em $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso seco). Retirado de Leão (2014).

Elementos	Nível de efeito: Baixo ($\mu\text{g/g}$)	Nível de efeito: Severo ($\mu\text{g/g}$)
Arsênio (As)	5,9	33
Cádmio (Cd)	0,6	10
Cobalto (Co)	-	50
Cromo (Cr)	37,3	80
Cobre (Cu)	35,7	70
Níquel (Ni)	18	30
Zinco (Zn)	123	120

No Brasil, o processo de regulamentação para níveis de contaminação em sedimentos começaram no estado de São Paulo, onde a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) realizou estudos de contaminação em sedimentos utilizando como base, valores internacionais para contaminação (CETESB 1998). Em 2004, o CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) publicou a resolução CONAMA 344/2004 (CONAMA 2004) com valores de referência de sedimentos para materiais dragados baseados em valores canadenses e norte-americanos (Tabela 3.3). Estes foram subdivididos em dois níveis, de acordo com seus efeitos à biota:

- Nível 1: limiar abaixo do qual prevê-se baixa probabilidade de efeitos adversos à biota.
- Nível 2: limiar acima do qual prevê-se um provável efeito adverso à biota.

Estes valores regulamentados pela legislação brasileira, como foi embasados em valores estrangeiros, não refletem o quadro natural de concentração destes elementos nos rios brasileiros. Esta resolução foi revogada pela resolução CONAMA nº 454/2012 (CONAMA 2012), mais manteve os valores expressos anteriormente. Nos rios estudados, os valores geogênicos e de *background* se encontram acima dos valores legislados (Costa 2007; Rodrigues 2012), sendo uma evidência que, é necessário um estudo local para a caracterização destes valores em uma bacia a ser estudada. Segundo Hursthouse (2001) estas diferenças podem indicar uma falsa contaminação ou podem superestimar valores de contaminação em uma área.

Tabela 3.3 - Níveis de classificação de metais pesados e As para material a ser dragado em água doce, por unidade de material seco. Modificado de CONAMA (2004).

(mg/kg)	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Ni	Zn
Nível 1	5,9	0,6	35	35,7	37,3	0,17	18	123
Nível 2	17	3,5	91,3	197	90	0,486	35,9	315

3.4 ESTADO DA ARTE NOS RIOS DO CARMO E GUALAXO DO NORTE

A bacia do Rio do Carmo e do Rio Gualaxo do norte, ambas localizadas no Alto rio Doce, apresentam diversos estudos geoquímicos de água e sedimentos, a fim de compreender suas complexidades químicas e a contribuição antropogênica ao longo do tempo, oriundas principalmente das atividades extrativas minerárias em seus leitos (garimpos e minas). O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) realizou, no mapeamento das folhas de Ponte Nova (Brandaleise 1991) e Mariana (Baltazar & Raposos 1993), análises de sedimentos de corrente, determinando estatisticamente valores de *background* para as unidades aflorantes da geologia local. Na área de geoquímica ambiental, trabalhos foram realizados por diversos autores, sendo de destaque para esta monografia, os apresentados a seguir. Os trabalhos tiveram como principal enfoque a contaminação das drenagens por metais pesados, como As e Hg, sendo estes os mais estudados no trecho conhecido como ribeirão do Carmo e afluentes do rio Gualaxo do Norte.

Buscher (1991), estudou o córrego Água-suja (Tributário do Gualaxo do Norte), ribeirão do Carmo e córrego Tripuí. Seu enfoque foi em sedimentos de fundo e principalmente a análise das concentrações de Hg, um dos principais contaminantes provenientes dos garimpos de ouro. As concentrações encontradas de Hg no rio do Carmo chegam a 1,73 mg/kg. A média para o elemento Fe teve média de 25,1% (Buscher 1992). Outro autor que estudou concentrações de Hg no ribeirão do Carmo e Gualaxo do Norte foi Zeferino *et. al.* (1998), encontrando concentrações semelhantes a Buscher (1991), e afirmando a relação deste com minerais oxo-hidróxidos de ferro. Eleutério (1997), estudou sedimentos de fundo do ribeirão do Carmo e drenagens oriundas da borda sudeste do Parque Estadual do Itacolomi. Suas análises visavam determinar as concentrações dos metais Hg, As, Pb, Cd, Zn, Ni, Cr, Co, Cu (metais pesados) e Li, investigando seus graus de contaminação (Tabela 3.4). Deu-se enfoque ao elemento Hg, no qual afirmou ser o rio do Carmo fortemente poluído por este. Segundo o autor, nas áreas mais impactadas, as concentrações chegavam a 40 vezes o limite máximo permissível para sedimentos (1,3 Kg de Hg disponibilizados por ano no rio). Outros metais considerados pesados e danosos foram associados a mineralizações de ouro, ou seja, provenientes de fontes geogênicas, mais disponibilizados por processos de mineração. Oliveira (1998), estudou metais em sedimentos de fundo e águas das drenagens do Parque Estadual do Itacolomi, afluentes do rio do Carmo. Seus resultados apresentaram baixa contaminação em metais pesados, com exceção do Cd. Pimentel (2001) estudou a

qualidade das águas para abastecimento oriundo da serra de Ouro Preto, e analisou amostras de rochas, mostrando a disponibilidade alta de As de origem geogênica para as águas do ribeirão do Carmo. A Agência Nacional de Águas (ANA), desde 1993 monitora a qualidade das águas nas bacias do alto rio Doce, sendo que as bacias estudadas, sempre estiveram acima dos limites para o CONAMA 20/86, ficando entre as classes 3 e 4 segundo a resolução (Costa 2007).

Tabela 3.4 - Tabela com concentrações de metais pesados em sedimentos de fundo do rio do Carmo analisados por Eleutério (1997). Modificado de Eleutério (1997).

Metais (ppm)	As	Hg	Pb	Zn	Cr	Cd	Co	Cu	Ni	Li
Verão	620,0	1,8	274,0	107,0	103,0	10,51	106,5	91,0	150,0	2,35
Inverno	1268,6	2,35	932,0	152,0	162,0	22,27	180,2	162,0	242,0	30,6

Costa (2001), desenvolveu um completo estudo de geoquímica ambiental no rio Gualaxo do Norte, realizando análises de água e sedimentos na drenagem principal do rio e dos tributários de suas cabeceiras, incluindo as barragens de Germano, Natividade, Timbopeba e Santarém. O trabalho visava elucidar o comportamento físico-químico das águas e sedimentos frente as interferências antrópicas relacionada a mineração e garimpo na área. Os elementos Fe, Mn e Al, apresentaram valores de *background* acima da legislação brasileira, tendo o Fe e Mn origens geogênicas ligadas a sua mobilização pelo garimpo. O elementos tóxicos As, Mn, Sb, Ba e Hg estavam também acima dos valores de *background* local e dos valores da legislação brasileira, sendo atribuídos a contaminação antrópica. Estes elementos estão associado ao Ca e Mg, e são disponibilizados pela remobilização provocada pelo garimpo. Os parâmetros físico-químicos das águas foram considerados bons para a irrigação, menos nos locais com proximidade da barragens de rejeito. O rio foi classificado como de águas sódico-bicarbonatadas, sendo contribuições de HCO_3^- , SO_4^{2-} e Na^+ oriundas dos processos de beneficiamento do minério de ferro.

Mais tarde, no rio Gualaxo do Norte, Rhodes (2010) estudou sedimentos de corrente, analisando diversos elementos, mas visando principalmente as concentrações de Hg e As, com o objetivo do entendimento destes na contaminação antrópica causado por garimpos. Chegou à conclusão que mesmo com a diminuição da atividade garimpeira na região, as concentrações de As e Hg eram elevadas nos sedimentos. Rhodes (2010) também estudou as águas, analisando metais e metaloides dissolvidos e alguns parâmetros físico-químicos. Este estudo mostrou que as concentrações das maiorias dos metais e metaloides dissolvidos nas águas do rio estão dentro dos parâmetros estabelecidos pelo CONAMA 357/05 para rios de classe I e II (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Tabela com teores máximos permitido pelo CONAMA nº 357 (CONAMA 2005) para as classes I e II de água doce, comparados com valores de máximo e mínimo encontrados no rio Gualaxo do Norte e afluentes. Retirado de Rhodes (2010).

Parâmetros	CONAMA (µg/L)	Valores encontrados em Agosto/08		Valores encontrados em Abril/09	
		Mínimo(µg/L)	Máximo(µg/L)	Mínimo(µg/L)	Máximo(µg/L)
Al	100	12,77	104,9	<7,3	98,9
As	10	ND	ND	<64,3	<64,3
Ba	700	10,45	45,38	13,2	30,5
Co	50	<14,2	<14,2	<15,2	<15,2
Cr	50	<7,71	<7,71	<9,6	<9,6
Cu	9	<4,79	<4,79	<4,9	<4,9
Fe	300	52,8	251,8	119	1053
Hg	0,2	<0,16	2,63	<0,16	<0,16
Mn	100	<7,48	135,8	6,1	182
V	100	<9,41	<9,41	<5,1	<5,1
Zn	180	<4,25	7,28	<4,9	191

No mesmo rio, Rodrigues (2012) realizou uma caracterização geoquímica e propôs valores de *background* geoquímico locais para os elementos Fe, As, Pb, Mn, Ba, Zn e Ni (Tabela 3.6). A análise de sedimentos de corrente revelou, juntamente com os valores de *background*, que os elementos analisados, apesar de se apresentarem em concentrações anômalas, seriam provavelmente de fontes geogênicas, com exceção do Fe, que apresentou valores acima do *background* na maior parte dos pontos amostrados, indicando uma forte contaminação causada pelas minerações a montante. O trabalho também gerou mapas geoquímicos, que evidenciaram contribuições antropogênicas dos elementos Ba, Fe e Mn, e que os garimpos provavelmente não estariam mais disponibilizando para o ambiente os metais As e Pb.

Tabela 3.6 - Valores de *Background* sugeridos por Rodrigues (2012) para o rio Gualaxo do Norte.

Elementos	Fe (%)	As (ppm)	Pb (ppm)	Mn(ppm)	Ba (ppm)	Zn (ppm)	Ni (ppm)
Valor de Background	8,2	64,2	43,8	1636	141,4	65,3	39

No rio do Carmo, Varejão *et al.* (2009 e 2011) analisou os metais As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, tendo enfoque, principalmente no elemento As, chegando a concentrações de 68,3 mg l⁻¹ muito acima dos valores da legislação brasileira. Costa (2007) estudou as planícies de inundação e perfis de terraços aluvionais do rio do Carmo, a fim de entender a influência da exploração aurífera histórica (mineração e garimpo) no registro estratigráfico e geoquímico dos mesmos. Também propôs valores de

background locais (Tabela 3.7) e caracterizou áreas de risco de contaminação. Encontrou concentrações de As, Cu, Zn, Cd anômalas para a área, oriundas de fontes primárias sulfetadas na serra de Ouro Preto, com disponibilidade acelerada pela atividade minerária ou garimpos.

Tabela 3.7 - Valores de *background* sugeridos por Costa (2007) para o rio do Carmo. Modificado de Costa (2007).

Composição geoquímica parcial	Método Comparativo- Estatística n=120 B. Ribeirão do Carmo	
	1º Valor	2º Valor
As (mg/kg)	35,3	810,0
Cu (mg/kg)	135,1	-
Zn (mg/kg)	124,0	-
Cd (mg/kg)	14,06	-
Ni (mg/kg)	53,10	-
Cr (mg/kg)	111,0	-
Ba (mg/kg)	18,5	-
Fe ₂ O ₃ (%)	9,88	-
Al ₂ O ₃ (%)	3,84	-
Mn (mg/kg)	189,8	5800

Em novembro de 2015, o rompimento da barragem do Fundão, que armazenava rejeitos oriundos do beneficiamento do minério de ferro, afetou drasticamente o rio Gualaxo do Norte e conseqüentemente o rio do Carmo após Barra Longa até alcançar o rio Doce. Após este desastre, trabalhos de diversas áreas do conhecimento, tem sido feitos para se compreender as dimensões dos estragos ambientais relacionados ao despejo instantâneo dos rejeitos no meio fluvial. No rio Gualaxo do Norte, foram desenvolvidos dois trabalhos de conclusão de curso no Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto sobre o estado da geoquímica do rio após o acidente.

Ramos (2017) analisou os parâmetros físico-químicos das águas do rio Gualaxo do Norte (Ph, Eh, Cloreto, Alcalinidade, CE, TDS) e os elementos maiores, metais pesados e traço (Fe, Mn, Cr, Ni, Cu, As, Ba entre outros). O autor chegou à conclusão que, comparado a dados de outros autores, alguns elementos obtiveram um ligeiro aumento. Os valores de Mn e As estão acima das concentrações previstas na legislação brasileira, e afirma que as maiores concentrações de As são oriundas do rio do Carmo. O elemento Fe se manteve constante e dentro das concentrações vistas por lei. Os parâmetros físico-químicos obtiveram alteração apenas nos valores de condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos, sendo os outros, estáveis para o rio. Canatto (2017) analisou os elementos Fe, Mn, Al, Ca, Na, K, Mg, As, Ba, Cr, Ni, V, Pb, Cu e Zn em amostras de sedimento de corrente ao longo do rio Gualaxo do Norte. Os resultados foram que apenas o elemento Fe (concentrações acima de 22%) estaria

acima do seu valor de *background* proposto para o rio por outros autores anteriores ao desastre (Rodrigues 2012). O restante dos elementos obteve um relativa baixa nas concentrações em comparação com estudos anteriores. Realizou também ensaios granulométricos, que evidenciaram um aumento da porcentagem de material na fração silte/argila (aproximadamente 50 % da massa total), não registrados anteriormente ao rompimento.

Fernandes (2017), fez um estudo completo sobre a qualidade das águas dos rios Gualaxo do Sul, Gualaxo do Norte e do Carmo, conseguindo dados amostrais por toda a bacia do alto rio Doce antes e após o rompimento da barragem do Fundão. Analisou-se metais, metaloides e a qualidade das águas nos três rios. As concentrações dos metais e metaloides nos sedimentos, segundo a autora diminuiu, provavelmente por uma diluição ocasionado pelo fluxo de lama (Figura 3.2), mas esta mobilização provocou uma re-solubilização de metais que se encontravam imobilizados nos leitos dos rios em suas águas.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em conjunto com a Agência Nacional de Águas (ANA), monitorou toda a bacia do rio Doce em 2010 e em meados de novembro de 2015. A comissão especial de monitoramento do rio Doce, analisou água e sedimentos por todas as drenagens atingidas pela lama, em especial nos municípios Barra Longa e Rio Doce, no trecho alvo deste trabalho. Estes trabalhos está publicado no relatório especial de monitoramento do rio Doce (CPRM & ANA 2015). No rio Doce, a CPRM já havia desenvolvido um relatório sobre a bacia no ano de 1993 (CPRM 1993).

O Quadrilátero Ferrífero, principal fonte dos sedimentos e águas do rio do Carmo e rio Gualaxo do Norte possui valores de *background* regional feitas por Vicq (2015), mostrados na tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Valores de *background* sugeridos por Vicq 2015 para o Quadrilátero Ferrífero utilizando terceiro quartil. Modificado de Vicq 2015.

Elemento	Valor de Referência 3º Quartil
Al (%)	3,4
Fe (%)	19,6
Ca (%)	0,13
Mg (%)	0,11
K (%)	0,06
Ti (%)	0,07
As (mg/kg)	6,1
Cd (mg/kg)	0,9
Co (mg/kg)	18,5
Cr (mg/kg)	128
Cu (mg/kg)	33
Mn (mg/kg)	1770
Ni (mg/kg)	43
Pb (mg/kg)	32
Zn (mg/kg)	60

Metais e metaloides acima dos padrões brasileiros em:	Rio Gualaxo do Norte e afluentes		Rio Gualaxo do Sul e afluentes		Alto Rio do Carmo e afluentes		Baixo Rio do Carmo, Alto Rio Doce e afluentes	
	ARB	DRB	ARB	DRB	ARB	DRB	ARB	DRB
Sedimentos	As, Cr, Fe, Hg, Mn, Ni e S	As	-	-	As, Ba, Cd, Co, Cr, Hg, Ni e Pb	As	As, Cr e Sb	-
Água	Al, Cd, Fe, Hg, Mn, P, Pb, S e Zn	Al, As, Cd, Fe, Hg, Mn, P, S, Sb, Se e Zn	As, Fe, Mn, P e S	Fe, P e S	Al, As, Cd, Fe, Hg, Mn, P, S e Zn	Al, As, Cr, Fe, Mn, P, Pb, S e Zn	Al, As, Fe, Hg, Mn, P, S, Sb e Zn	As, Cd, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Se e Sb

Figura 3.2 - Metais e metaloides acima dos padrões brasileiros de sedimentos e água para uso agrícola e residencial e acima do limite classes I e II e para cultivo de organismos aquáticos antes (ARB) e depois do rompimento da barragem de Fundão (DRB) nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul, do Carmo, alto rio Doce e afluentes. Retirado de Fernandes (2017).

Araújo, G. S. 2018, Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo....

CAPÍTULO 4

HIDROQUÍMICA

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tratará dos parâmetros de qualidade de água e das concentrações de elementos maiores, menores e traço determinados no trecho monitorado da bacia do Alto rio Doce em um ano hidrológico. Busca-se o entendimento da distribuição destes elementos ao longo da calha principal dos rios estudados e suas possíveis origens.

Ao final deste capítulo, se discutirá a relação das concentrações e dos parâmetros determinados após o rompimento da barragem do Fundão, utilizando-se de trabalhos anteriores e de valores máximos determinados pelo CONAMA 357/05 (CONAMA 2005) para rios de classe III, no qual os rios Gualaxo do Norte e rio do Carmo foram classificados (Costa 2001). Esta comparação servirá de controle para se entender o impacto hidroquímico gerado pelos rejeitos minerários do Fundão e as outras possíveis causas de contaminação nos rios.

Foram determinados os parâmetros de pH (potencial hidrogeniônico), Eh (potencial de oxidação-redução), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Condutividade Elétrica (CE) e Temperatura (variou conforme estação do ano e horário da coleta, sendo em média 24° C no inverno e 28° C no verão). Também foram determinados concentrações dos ânions principais (bicarbonato, cloreto e sulfato), cátions principais (cálcio, magnésio, potássio e sódio), os metais ferro, alumínio e manganês e os elementos traço As, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V e Zn (Apêndices 1 a 4). As concentrações de Cd e Li ficaram abaixo do limite de quantificação na maioria dos pontos.

Não foi possível medir a turbidez das águas nos sítios amostrais colhidos devido a erros de leitura do turbidímetro, determinando valores baixos de NTU para amostras de nítida turbidez elevada. Este erro pode estar condicionado a altas concentrações de metal (principalmente Fe) no particulado em suspensão, atrapalhando a análise da amostra pelo aparelho.

4.2 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

4.2.1 Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e Condutividade Elétrica (CE)

Os parâmetros de STD e CE foram determinados em todos os sítios amostrais, sendo os sólidos totais dissolvidos constituídos de carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, fosfatos, nitratos de cálcio e magnésio, além de outras substâncias (Costa 2001) e a condutividade elétrica, resposta da concentração destas substâncias no rio. As concentrações máximas de STD nos rios, segundo o CONAMA (2005) é de 500 mg/L para todas as classes.

Os resultados obtidos no período chuvoso (Figura 4.1) e no período de seca (Figura 4.2), apresentaram um padrão esperado, onde a curva de STD acompanha a de CE ao longo de suas variações nos rios. No período chuvoso, as concentrações de STD se apresentaram maiores no rio do Doce, atingindo um máximo de 52,2 mg/L (provável contribuição do rio Piranga) e tendo uma grande diminuição devido ao barramento da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves. No rio Gualaxo do Norte, este valor chegou a 33,38 mg/L, abaixo dos valores obtidos no rio do Carmo. A condutividade variou de 51,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Gualaxo do Norte a até 81,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no Doce.

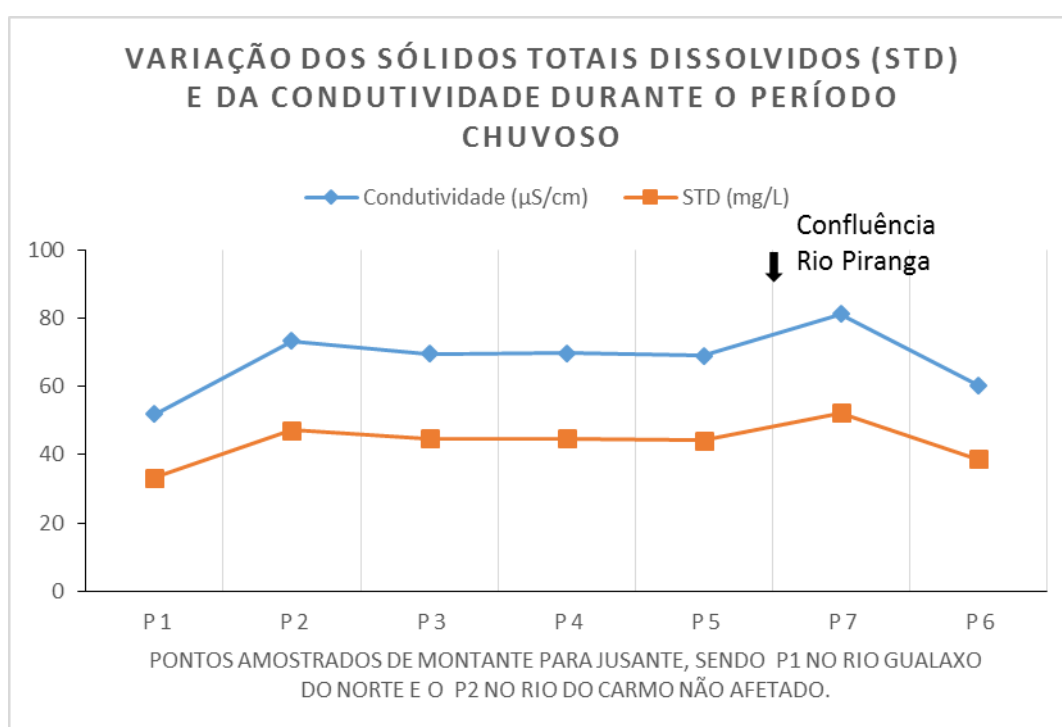


Figura 4.1 - Gráfico mostrando a variação das concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e dos valores de condutividade elétrica (CE) nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo do rio no período chuvoso.

No período de seca, os valores de STD e de Condutividade foram maiores que no período chuvoso por conta da diluição, sendo que os valores mais baixos foram encontrados no rio Gualaxo do Norte, onde o STD foi de 48,26 mg/L e a CE de 74,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4.2). Os valores mais elevados foram encontrados no rio do Carmo, diminuindo continuamente até a UHE de Risoleta Neves. Houve diminuição nos resultados do ponto coletado após a confluência com o rio Piranga. Os valores de STD variaram de 45,0 a 59,3 mg/L e CE de 69,9 a 92,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

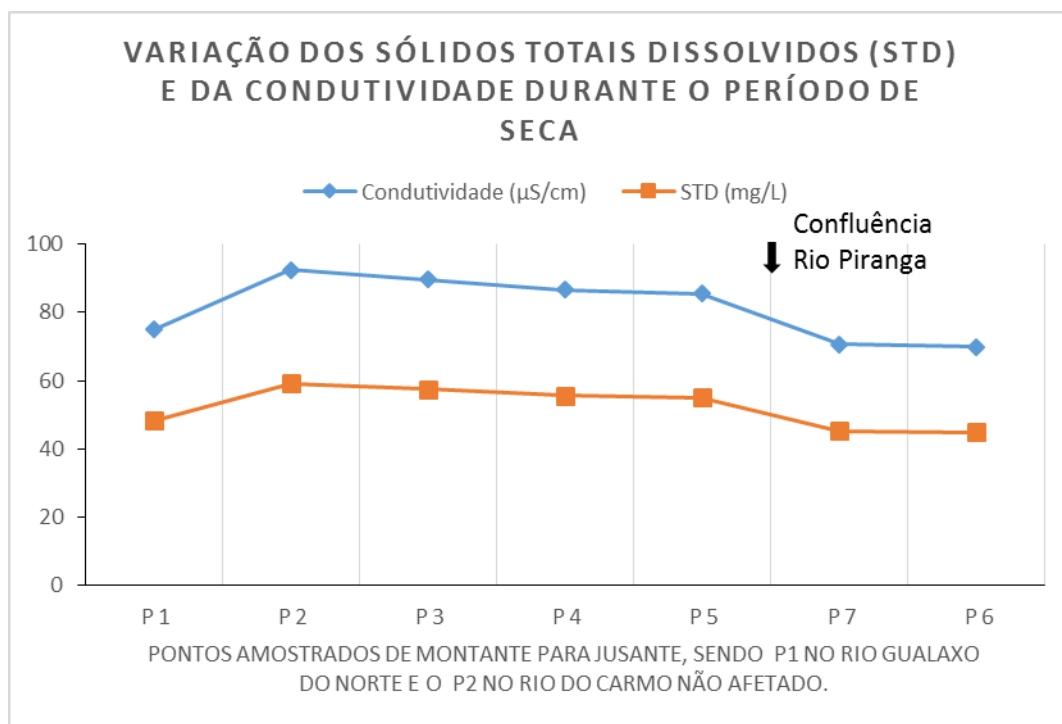


Figura 4.2 - Gráfico mostrando a variação das concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) e dos valores de condutividade elétrica (CE) nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo do rio no período de seca.

4.2.2 Potencial de Oxi-Redução (Eh) e Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico (pH) se caracteriza pela disponibilidade de H^+ no sistema, sendo estes, fatores diretos da quantidade de gás carbônico dissolvido na água e sua alcalinidade (Santos 1997). Já o Potencial de Oxi-Redução (Eh) se caracteriza segundo a habilidade do sistema de fornecer ou tomar elétrons (Santos 1997).

Já é sabido da química que a correlação entre as medidas de pH e Eh mostram a condição de estado reduzido ou oxidado que definem um sistema físico-químico, tendo-se uma previsão dos estados iônicos em que se podem encontrar substâncias dissolvidas.

O pH no trecho monitorado apresentou variações de 6,8 a 7,27 no período chuvoso e de 7,06 a 7,55 no período de seca, ficando dentro dos padrões de pH estabelecidos para todas as classes de água pelo CONAMA (2005) que varia de 6,0 a 9,0. Já os valores de Eh, variou de 0,234 a 0,267 volts em ambos os períodos, determinando um ambiente mais oxidante, independente da época do ano.

Segundo o gráfico da relação de pH x Eh, as amostras de água se caracterizaram, segundo o gráfico da figura 4.3 como estabelecida em um meio transicional entre águas superficiais e águas subterrâneas.

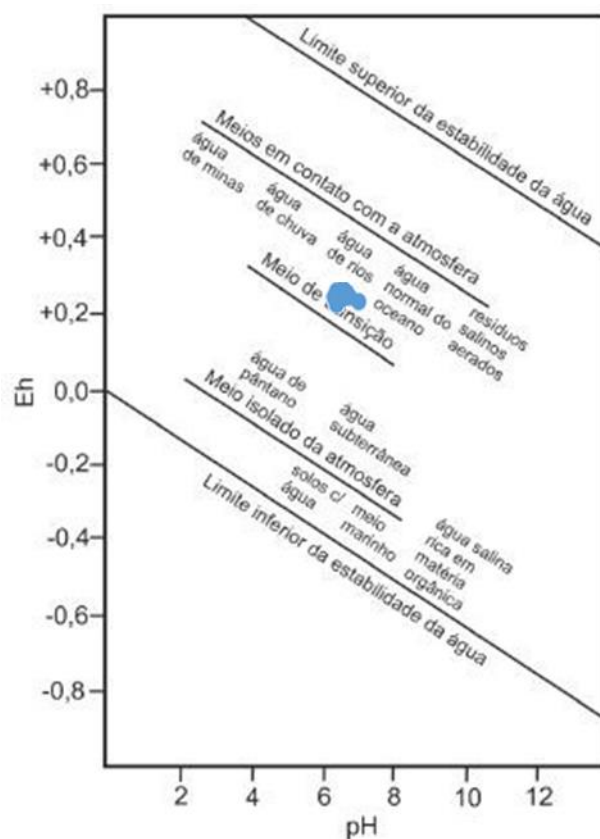


Figura 4.3 - Gráfico comparativo entre os valores de pH e de Eh encontrados nas amostras de água do período chuvoso e de seca utilizando sobreposto ao gráfico de posição aproximada de alguns meios naturais caracterizados pela relação de pH x Eh (Garrels & Christ 1965 in Sikszay 1993).

4.3 4.3 ÂNIONS

4.3.1 Bicarbonato (HCO_3^-)

As concentrações de alcalinidade determinadas nos trechos estudados, foram caracterizados como provocados por ânions de HCO_3^- , juntamente com CO_2 dissolvido. Foram analisados as concentrações de bicarbonato nos períodos de seca e chuvoso, sendo as maiores concentrações determinadas no período de seca (Figura 4.4). Nos dois períodos, as concentrações de alcalinidade foram maiores no rio Gualaxo do Norte, atingindo 41,6 mg/L de bicarbonato, podendo ser relacionado aos carbonatos da Fm. Gandarela. Há uma diluição desta concentração com a entrada das águas do rio do Carmo, ficando em média 30,0 mg/L no período da seca e 24,0 mg/L no período chuvoso.

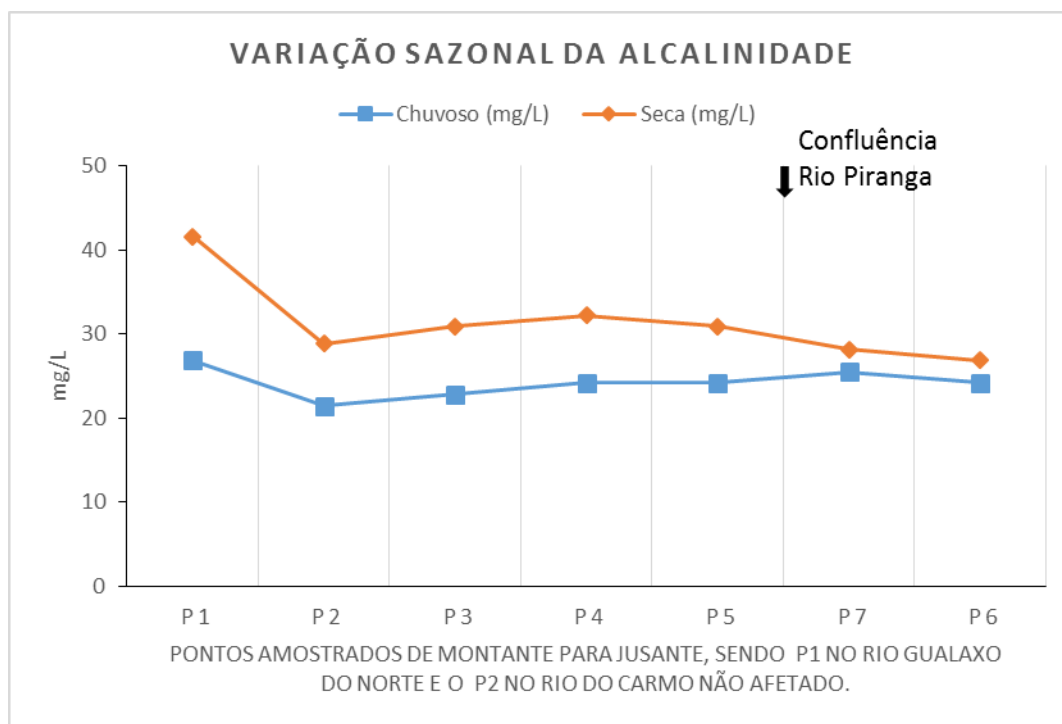


Figura 4.4 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alcalinidade nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.3.2 Cloreto (Cl⁻)

O cloreto é um dos mais comuns ânions em águas fluviais, sendo sua concentração máxima estabelecida em 250 mg/L para águas de classe III (CONAMA 2005). A distribuição das concentrações de Cl⁻ nos rios é caótica em relação aos períodos hidrológicos (Figura 4.5). No período chuvoso, as maiores concentrações foram determinadas nos primeiros pontos analisados, com pico de 6,09 mg/L dentro do município de Barra Longa, diminuindo a jusante do ponto. Este pico pode estar relacionado a esgoto doméstico lançado *in natura* no trecho.

No período de seca, os valores nos pontos iniciais foram baixos, sendo o rio Gualaxo do Norte o trecho de menor concentração. Os níveis de cloreto alcançaram concentração máxima no barramento da UHE Risoleta Neves, chegando a 6,60 mg/L neste período.

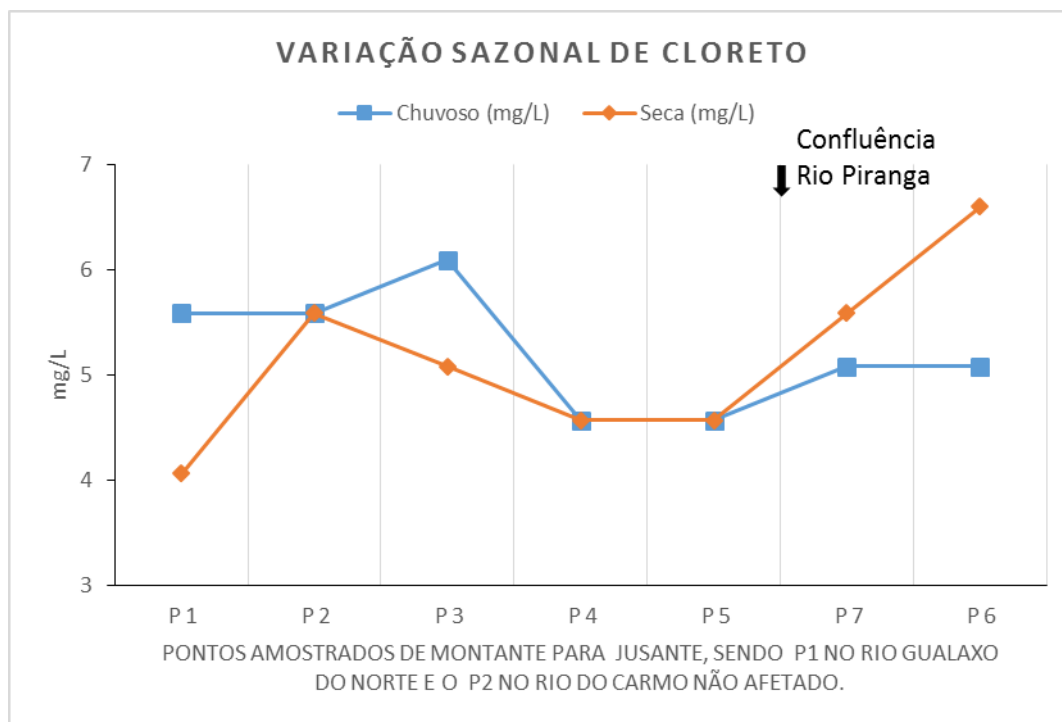


Figura 4.5 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cloreto nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.3.3 Sulfato (SO_4^{2-})

O ânion sulfato está diretamente relacionado a lixiviação de compostos sulfetados presente em rochas, que são facilmente solubilizados e disponibilizados para o sistema (Santos 1997). Também podem estar relacionados a processos industriais variados, sendo que seu limite máximo para águas de classe III é de 250 mg/L (CONAMA 2005).

Nos trechos analisados, a presença de sulfato ficou abaixo dos limites de quantificação no rio Gualaxo do Norte e no rio Doce, após a entrada do rio Piranga em ambos os períodos (Figura 4.6). O rio do Carmo foi o único que apresentou valores quantificáveis de sulfato, sendo as maiores concentrações determinadas no ponto P2, no rio do Carmo anterior a entrada do Gualaxo do Norte (11,8 e 17,8 mg/L). Esta alta pode estar relacionado diretamente as mineralizações auríferas a montante, que possuem paragênese de minerais sulfetados (Nalini Jr. 1993). As concentrações foram maiores no período de seca, sempre com valores diminuindo de montante para jusante no rio.

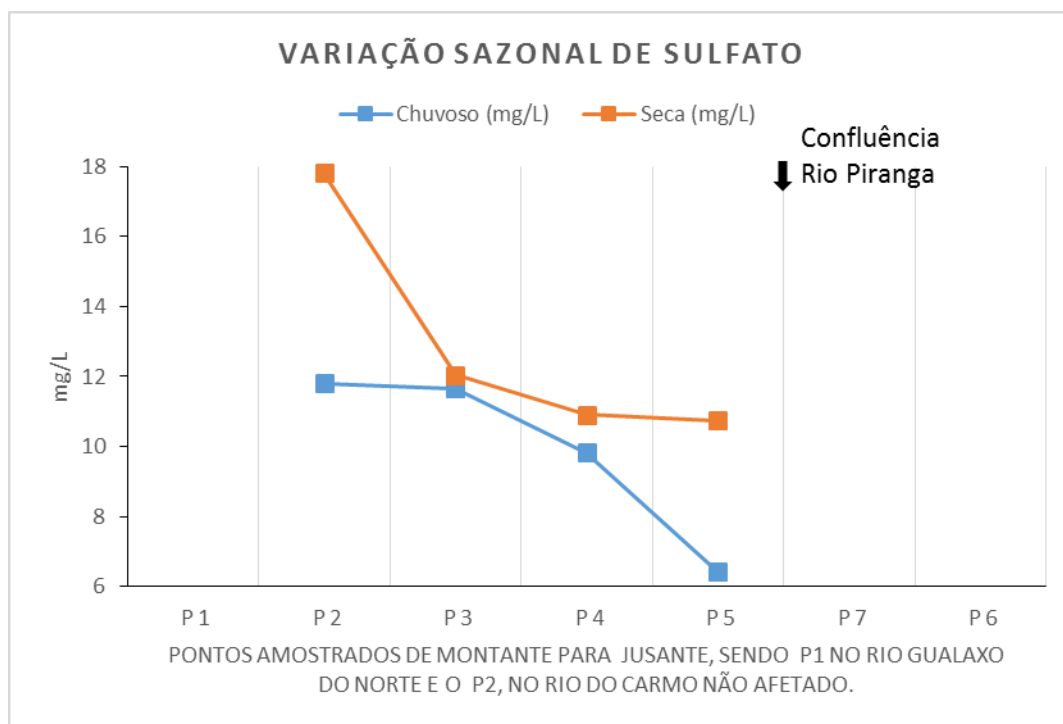


Figura 4.6 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sulfato nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.4 CÁTIOS PRINCIPAIS

4.4.1 Cálcio (Ca^{2+})

Segundo Santos (1997), o cálcio é o elemento que apresenta as maiores concentrações em águas em nível mundial, devido a sua fácil solubilidade (moderada a elevada). Dissolvido em água, é o principal responsável pela dureza, apresentando-se comumente em forma de bicarbonato (Santos 1997).

No trecho avaliado, no período chuvoso, não houve uma mudança significativa nas concentrações de cálcio no rio (Figura 4.7), tendo em média 3,7 mg/L de cálcio dissolvido. Já no período de seca, houve um aumento da concentração no rio Gualaxo do Norte, chegando a 5,34 mg/L (acompanhando o aumento da alcalinidade), variando na mesma faixa do período chuvoso nos pontos restantes.

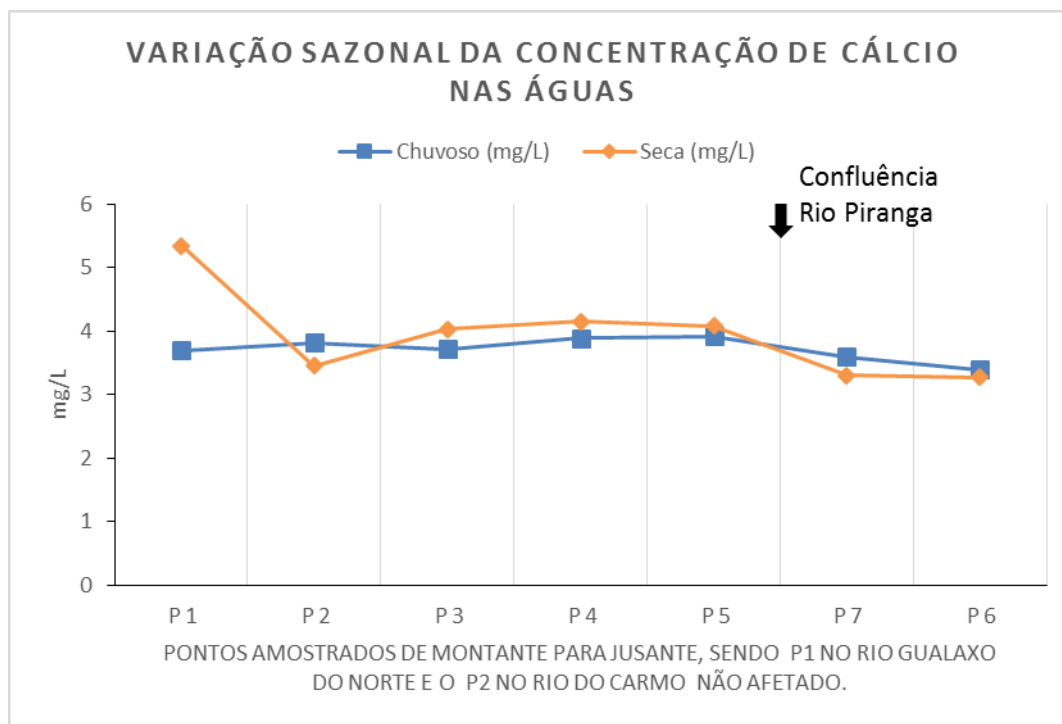


Figura 4.7 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cálcio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.4.2 Magnésio (Mg^{2+})

O magnésio, segundo Santos (1997), possui uma facilidade maior de se dissolver do que o cálcio, também sendo responsável pela dureza das águas e ocorrendo principalmente em forma de carbonatos.

A variação das concentrações de magnésio nos rios (Figura 4.8) obteve grande semelhança com as variações encontradas para o cálcio, mas em concentrações menores. No período chuvoso, as concentrações se mantiveram constantes ao longo do trecho, tendo concentração média de 1,3 mg/L. Já no período de seca, as concentrações foram um pouco maiores que no período chuvoso (média de 1,69 mg/L), exceto o rio Gualaxo do Norte, que teve um pico de 2,4 mg/L, também relacionado a alta da alcalinidade neste ponto.

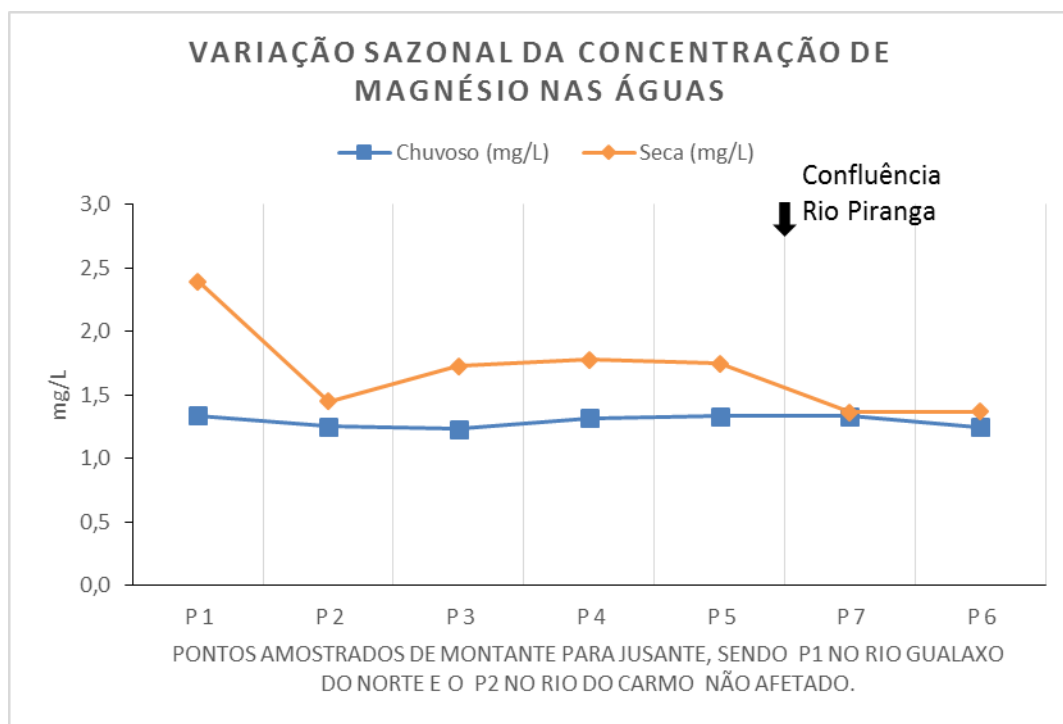


Figura 4.8 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de magnésio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.4.3 Sódio (Na^+)

O sódio é um elemento que está presente em todos os tipos de águas devido a sua solubilidade elevada e difícil precipitação de seus compostos químicos (Santos 1997). Segundo Santos (1997), as concentrações de sódio em águas naturais doces é de 1 a 150 mg/L.

No trecho analisado, a variação das concentrações de sódio nos pontos foram, de certo modo, uniformes entre os períodos, sendo maior as concentrações no período de seca (Figura 4.9). Fica claro no gráfico que a maior carga de sódio vem do rio do Carmo, onde atingiu picos de 7,76 mg/L no período chuvoso e 10,35 mg/L no de seca, diminuindo gradativamente até o barramento da UHE Risoleta Neves. As menores concentrações foram obtidas no rio Gualaxo do Norte, sendo 3,3 mg/L no período chuvoso e 4,37 no de seca.

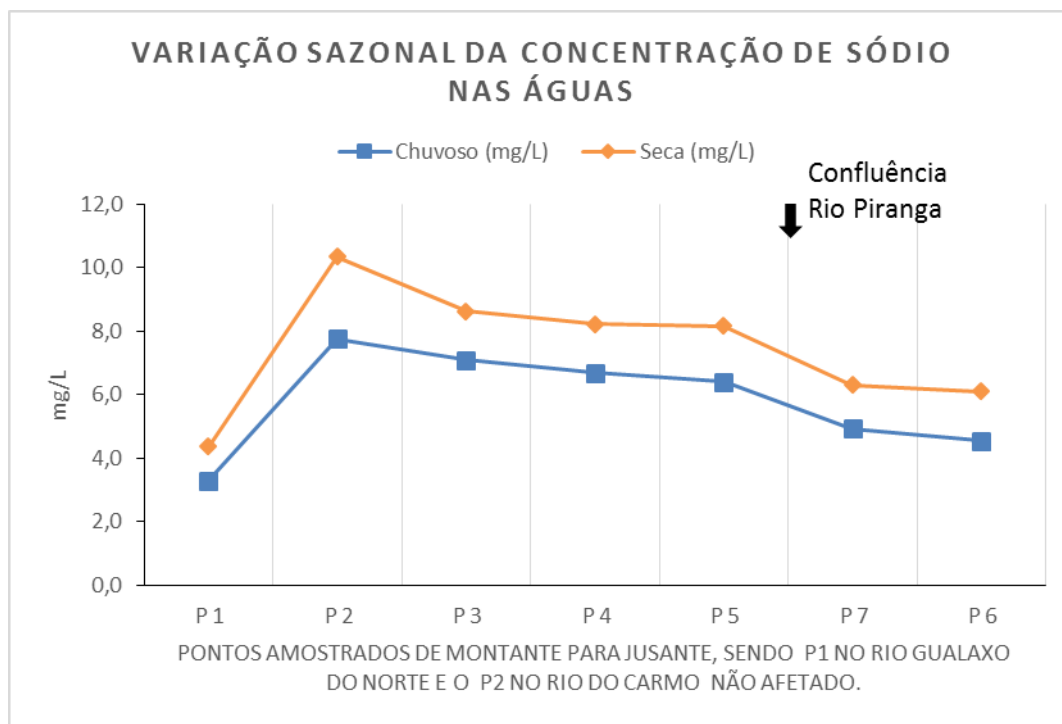


Figura 4.9 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sódio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.4.4 Potássio (K^+)

As concentrações de potássio, ao contrário do que ocorreu com os outros cátions descritos acima, obteve valores maiores no período chuvoso em todos os pontos analisados (Figura 4.10). As concentrações permaneceram constantes por todo o segmento estudado com média de 1,0 mg/L no período da seca e 1,3 mg/L no período chuvoso. Os pontos amostrados após a junção do rio do Carmo com o rio Piranga obtiveram concentrações maiores, atingindo 2,14 mg/L no período chuvoso e 1,70 mg/L no período de seca.

Este aumento pode estar relacionado com as águas do rio Piranga, que corta grandes extensões de rochas meta-ígneas, portadoras de feldspatos potássicos, micas e leucitas, principais fontes mineralógicas de potássio nestas rochas (Santos 1997). Santos (1997) também afirma que o potássio tem baixa solubilização, por conta de sua intensa participação em processos de troca iônica.

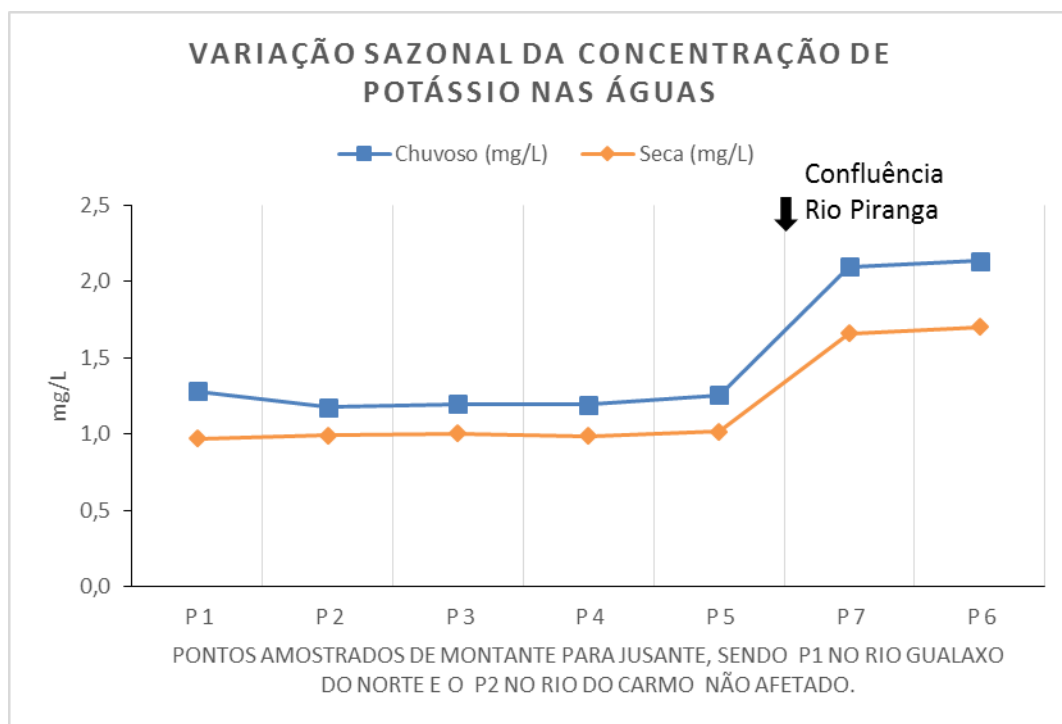


Figura 4.10 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de potássio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.5 FERRO, ALUMÍNIO E MANGANÊS

4.5.1 Ferro (Fe)

O ferro é um elemento presente em quase todas as águas, ocorrendo sobre diversas formas químicas, podendo ou não estar associado ao manganês (Santos 1997). Segundo o CONAMA (2005), um rio de classe I deve conter no máximo 0,3 mg/L de Ferro Total e 0,5 mg/L para um rio de classe III.

No trecho analisado, as concentrações de ferro no rio Gualaxo do Norte foram as mais baixas (média de 0,08 mg/L). Nos demais trechos as concentrações variaram de 0,14 a 0,90 mg/L no período chuvoso, e 0,06 a 0,28 mg/L no período de seca (Figura 4.11).

O valor mais alto para o ferro está associado ao rio do Carmo, antes do encontro com o rio Gualaxo do Norte, e é o único que ultrapassa os valores estabelecidos pelo CONAMA (2005) para um rio de classe III. O aumento nas concentrações de Fe dissolvido nas águas no ponto P7 pode estar relacionado a contribuição das águas do rio Piranga, pelo seu aumento após a confluência com o rio do Carmo.

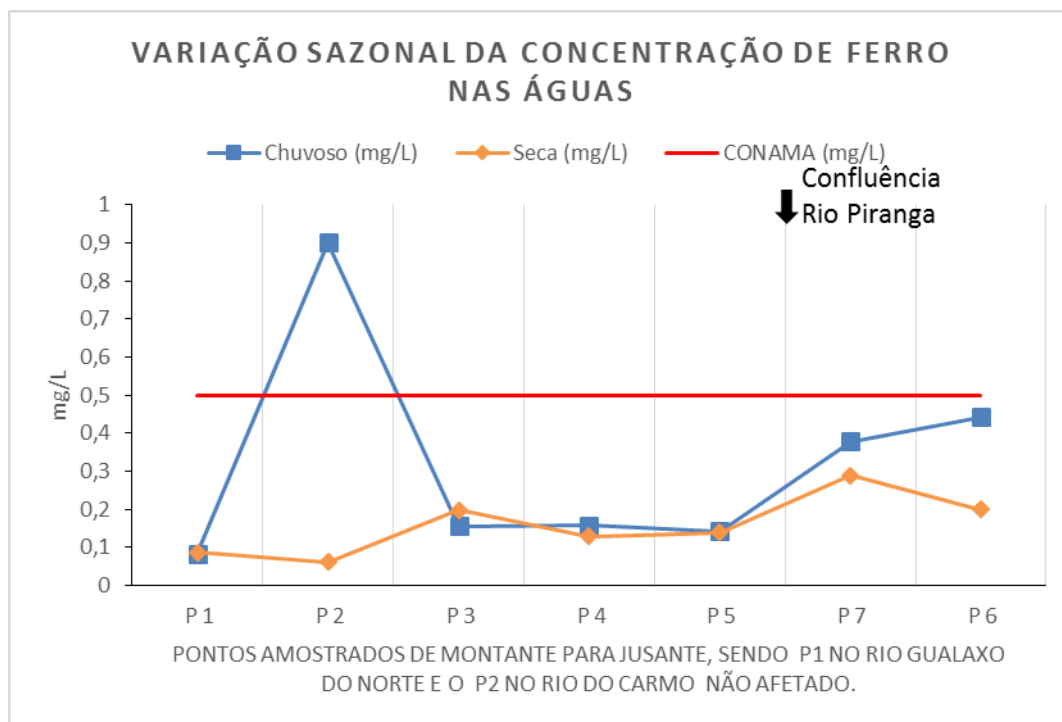


Figura 4.11 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de ferro nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.5.2 Alumínio (Al)

As concentrações máximas para o elemento alumínio dissolvido em águas de um rio de classe I é de 0,1 mg/L e de um rio classe III é de 0,2 mg/L (CONAMA 2005). As concentrações de alumínio no trecho monitorado variou entre 0,022 a 0,07 mg /L entre os períodos de seca e chuvoso (Figura 4.12)

O ponto localizado no rio do Carmo, anteriormente ao trecho afetado pelo rompimento da barragem do Fundão, obteve no período chuvoso, uma concentração anômala de 0,31 mg/L, que ultrapassou o limite máximo previstos por lei (CONAMA 2005). Em contrapartida, no período de seca, foi o que apresentou menores concentrações, ficando com 0,022 mg/L. Isto pode estar relacionado ao carreamento do alumínio das rochas pela ação das chuvas no rio do Carmo.

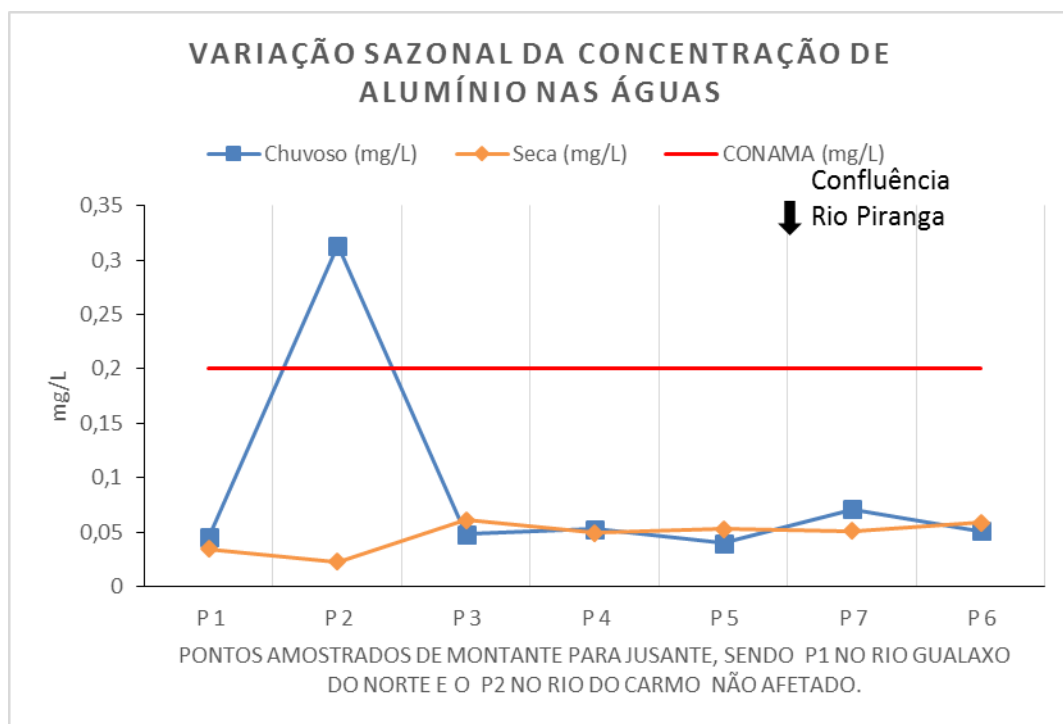


Figura 4.12 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alumínio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.5.3 Manganês (Mn)

O manganês possui concentração menor que a do ferro nas águas superficiais, apesar de suas semelhanças químicas (Santos 1997). Para o CONAMA (2005), as concentrações máximas de manganês nas águas devem ser de 0,1 mg/L para rios de classe I e de 0,5 mg/L para rios de classe III.

No período de seca, as concentrações de manganês variaram de 0,006 a 0,045 mg/L (Figura 4.13), sendo as maiores concentrações determinadas no ponto dentro de Barra Longa e no barramento da UHE Risoleta Neves. Já no período chuvoso, as concentrações foram parecidas com o período de seca (0,016 a 0,038 mg/L), com exceção das águas do rio do Carmo não afetado pela lama, que apresentou um pico de 0,29 mg/L.

Em todos os casos, as concentrações ficaram abaixo do máximo permitido por lei para o elemento manganês em um rio de classe I e III, com exceção do P2 no período chuvoso.

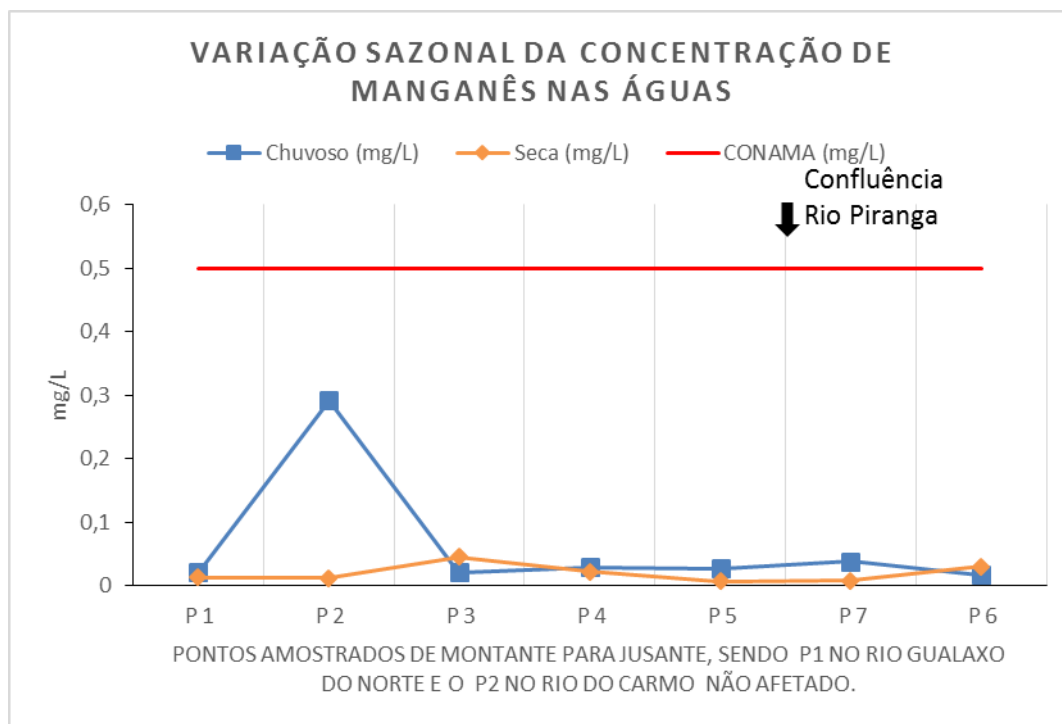


Figura 4.13 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de manganês nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6 ELEMENTOS TRAÇO

4.6.1 Arsênio (As)

As concentrações de arsênio no trecho estudado variou de 0,22 a 5,70 $\mu\text{g/L}$ no período chuvoso e de 0,21 a 3,81 $\mu\text{g/L}$ no período de seca (Figura 4.14). A análise do gráfico deixa claro que a bacia do alto rio do Carmo é a responsável pelas altas concentrações de arsênio encontrada ao longo do rio. As concentrações encontradas no rio Gualaxo do Norte são as menores. Esta alta concentração de As já foi encontrada por outros autores na bacia do rio do Carmo, sendo esta de origem geogênica relacionada a geologia das serras de Ouro Preto e Mariana (Pimentel 2001).

Para o CONAMA (2005), as concentrações máximas permitidas de arsênio nas águas de um rio de classe I é de 10 $\mu\text{g/L}$ e 33 $\mu\text{g/L}$ para um rio de classe III. Em todos os pontos amostrados, nenhum obteve concentrações acima do limite máximo estabelecido pela lei.

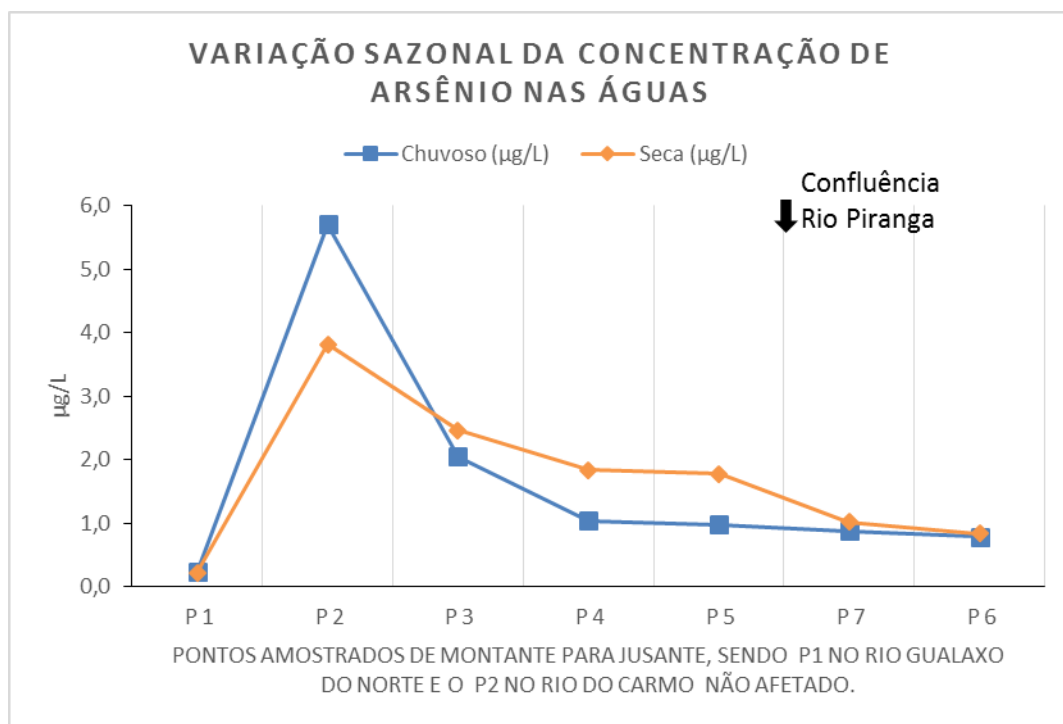


Figura 4.14 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de arsênio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.2 Bário (Ba)

No trecho analisado (Figura 4.15), as concentrações de bário no período chuvoso variou muito pouco, ficando entre 16,53 a 23,27 µg/L, sendo a menor concentração determinada em Barra Longa. Já no período de seca, a concentração de bário aumentou no rio Gualaxo do Norte e diminuiu no rio do Carmo. As concentrações variaram de 10,35 a 28,79 µg/L.

As concentrações de bário total nas águas, segundo o CONAMA (2005), não deve exceder 700 µg/L para rios de classe I e 1000 µg/L para rios de classe III. Sendo assim, em nenhum dos trechos, as concentrações ultrapassaram os limites determinados por lei.

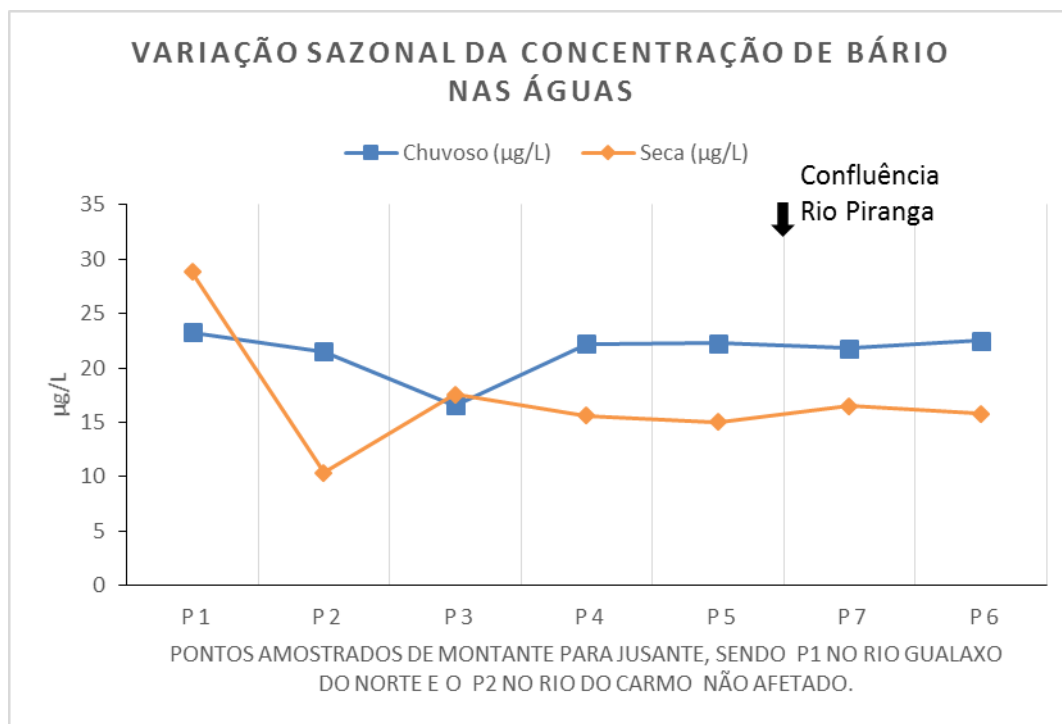


Figura 4.15 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de bário nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.3 Cobalto (Co)

O cobalto apresenta mobilidade baixa onde o pH se aproxima da neutralidade, ficando praticamente imóvel em ambientes redutores (Santos 2017). Os limites máximos estabelecidos pelo CONAMA (2005) é de 50 µg/L para rios de classe I e de 200 µg/L para rios de classe III.

No período chuvoso, as concentrações de cobalto ficaram entre 0,083 e 0,12 µg/L, com exceção do ponto P2, no rio do Carmo não afetado pela lama, que registrou um pico de 0,93 µg/L (Figura 4.16). Já no período de seca, as concentrações ficaram em uma faixa de 0,05 a 0,19 µg/L com picos nas cidades de Barra Longa e Rio Doce. Nenhum dos trechos ficaram acima do limite estabelecido por lei.

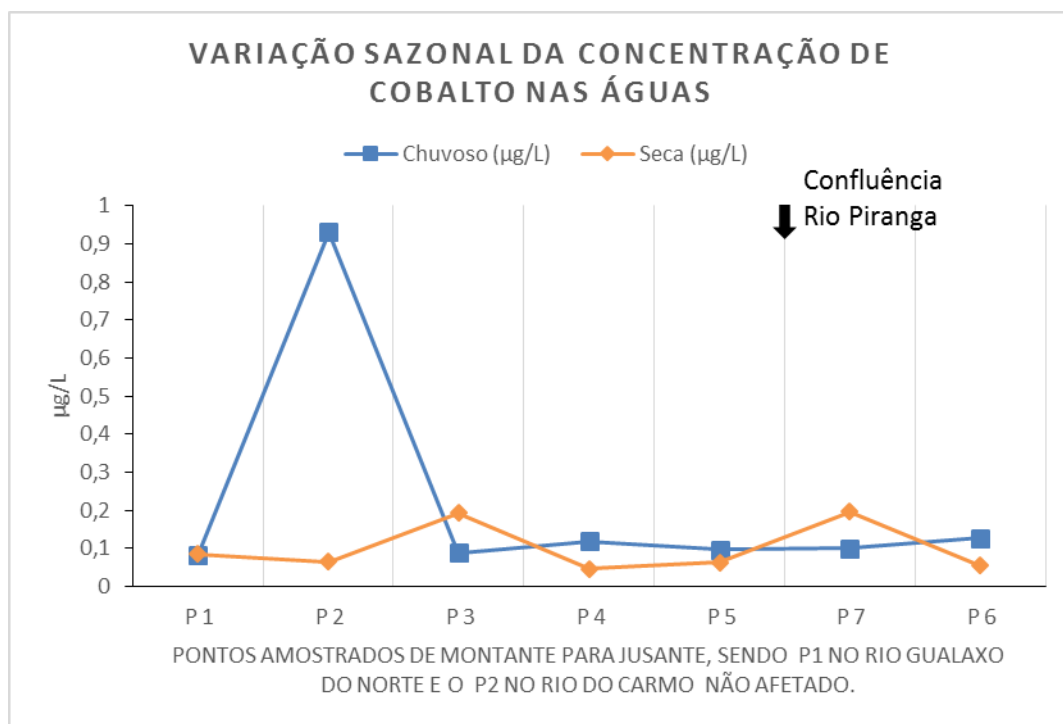


Figura 4.16 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobalto nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.4 Cromo (Cr)

As concentrações de Cromo no período chuvoso variou de 0,08 a 0,22 $\mu\text{g/L}$, com exceção do rio do Carmo não afetado pela lama, que registrou um pico de 0,72 $\mu\text{g/L}$ (Figura 4.17). Houve um pequeno aumento nas concentrações depois da entrada do rio Piranga. Já no período da seca, as concentrações variaram de 0,14 a 0,27 $\mu\text{g/L}$, com picos nas cidades de Barra Longa e Rio Doce.

As concentrações máximas permitidas por lei para o elemento cromo é de 50 $\mu\text{g/L}$ para todas as classes de rio (CONAMA 2005) sendo que, em nenhum dos pontos, as concentrações ultrapassaram este valor.

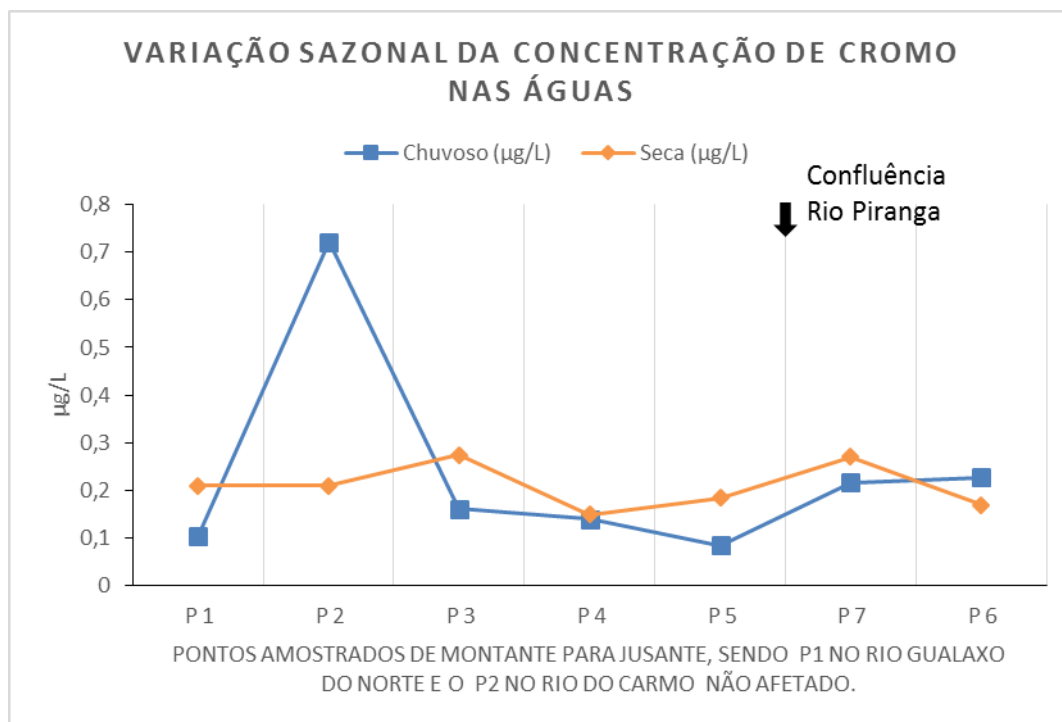


Figura 4.17 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cromo nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.5 Cobre (Cu)

O cobre, segundo Santos (1997), possui baixa solubilidade em águas. Por lei, as concentrações máximas de cobre dissolvidos nas águas de um rio de classe I deve ser de 9,00 µg/L e de 13,00 µg/L para um rio de classe III.

No período chuvoso, as concentrações de cobre variaram de <5,37 a 7,57, sendo registrado valores acima do limite de quantificação, apenas os pontos P1 e P2 (Figura 4.18). Já no período de seca, as concentrações ficaram entre 0,73 e 4,94 µg/L, exceto o rio do Carmo não afetado pela lama, que apresentou um pico anômalo de 41,14 µg/L. Todos os pontos ficaram dentro das concentrações máximas exigidas por lei para um rio de classe III, exceto o ponto P2, que ficou muito acima do exigido.

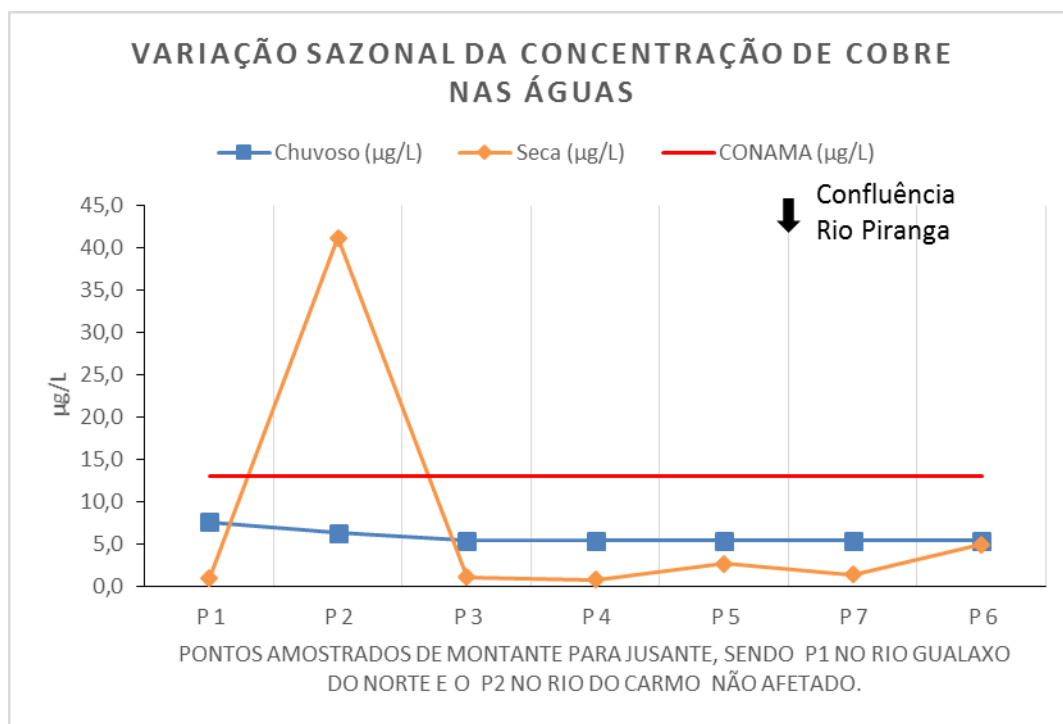


Figura 4.18 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobre nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.6 Níquel (Ni)

Segundo Santos (2007) em condições oxidantes com pH entre 5,0 a 8,0, o níquel apresenta baixa mobilidade. A concentração máxima de níquel total nas águas para todas as classes de rio é de 25,00 µg/L (CONAMA 2005).

No período chuvoso, as concentrações de níquel ficaram entre 0,35 e 1,23 µg/L, sendo P2 o ponto de concentração mais elevada (Figura 4.19). Já no período de seca, as concentrações variaram de 0,31 a 0,93 µg/L, exceto o rio do Carmo não afetado pela lama, que registrou um pico anômalo de 44,9 µg/L. Todos os pontos ficaram abaixo da concentração máxima prevista por lei, com exceção do ponto P2, que registrou quase o dobro da concentração permitida.

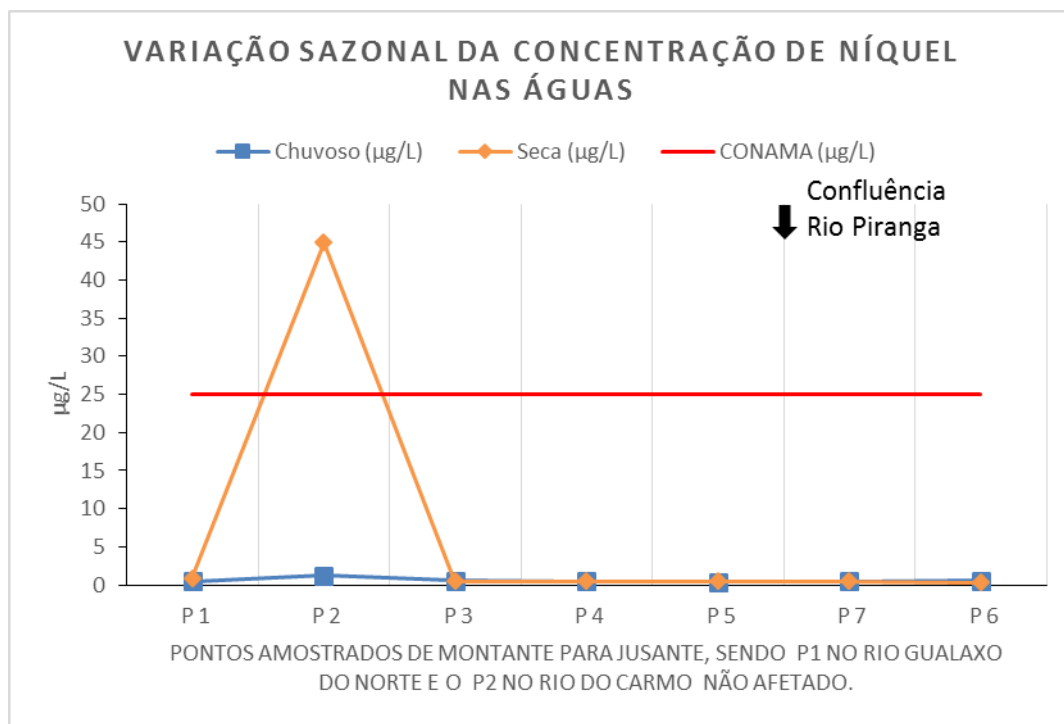


Figura 4.19 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de níquel nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.7 Chumbo (Pb)

As concentrações de chumbo no período chuvoso atingiu o pico de 2,86 µg/L no rio Gualaxo do Norte e foi diminuindo ao longo do trecho analisado até atingir 0,13 µg/L. Houve um leve aumento da concentração no barramento da UHE Risoleta Neves (Figura 4.20). No período de seca, as concentrações variaram de 0,04 a 1,44 µg/L, sendo o maior valor registrado no barramento da UHE Risoleta Neves.

As concentrações máximas de chumbo total em águas, exigidas pelo CONAMA (2005), são de 10 µg/L para rios de classe I e de 33 µg/L para rios de classe III. Em nenhum dos trechos foram observados concentrações acima dos limites exigidos pela lei.

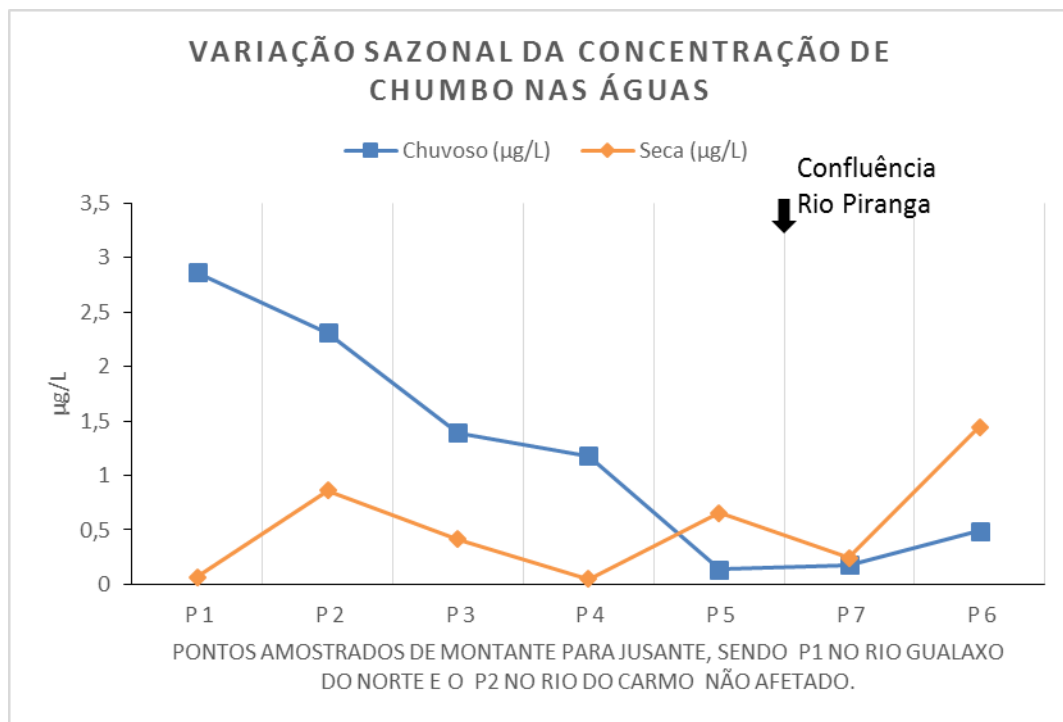


Figura 4.20 - Gráfico com a variação sazonal das concentrações de chumbo nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.8 Vanádio (V)

As concentrações de Vanádio no período chuvoso variaram de 0,20 a 1,07 µg/L (Figura 4.21). As maiores concentrações foram determinadas no ponto P2, no rio do Carmo não afetado pela lama e no ponto P6, no barramento da UHE Risoleta Neves. Já no período de seca, as concentrações variaram de 0,15 a 0,59 µg/L, sendo as maiores concentrações, determinadas na cidade de Rio Doce e no barramento da UHE Risoleta Neves.

A concentração máxima estabelecida pelo CONAMA (2005) para o elemento vanádio em todas as classes de rio é de 100 µg/L. Sendo assim, em nenhum ponto o valor máximo permitido por lei foi ultrapassado.

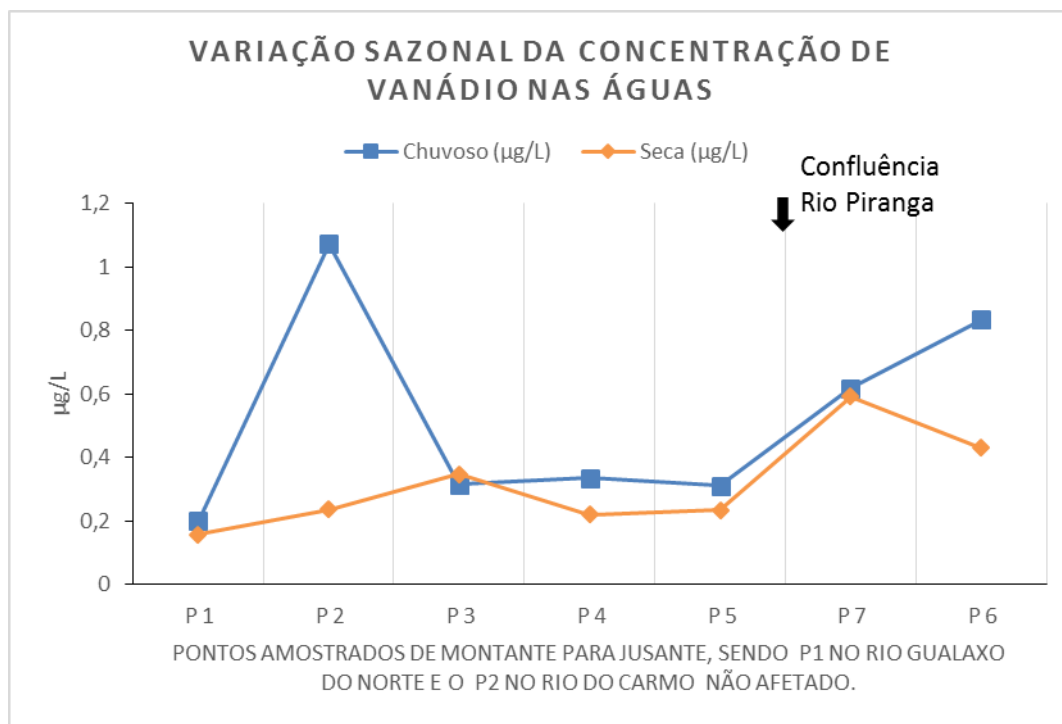


Figura 4.21 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de vanádio nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.6.9 Zinco (Zn)

O zinco, segundo Santos (1997), é entre os metais pesados, o mais solúvel. Segundo o CONAMA (2005) as concentrações máximas de zinco nas águas de um rio de classe I é de 180 µg/L e de 5000 µg/L para um rio de classe III.

No período chuvoso, as concentrações foram relativamente baixas, variando de 0,98 a 4,13 µg/L (Figura 4.22). Já no período de seca, as concentrações foram maiores, atingindo picos de 42,07 no rio Gualaxo do Norte e de 29,31 no rio do Carmo em Barra Longa. Não houve trechos em que as concentrações ultrapassaram o limite máximo permitido por lei.

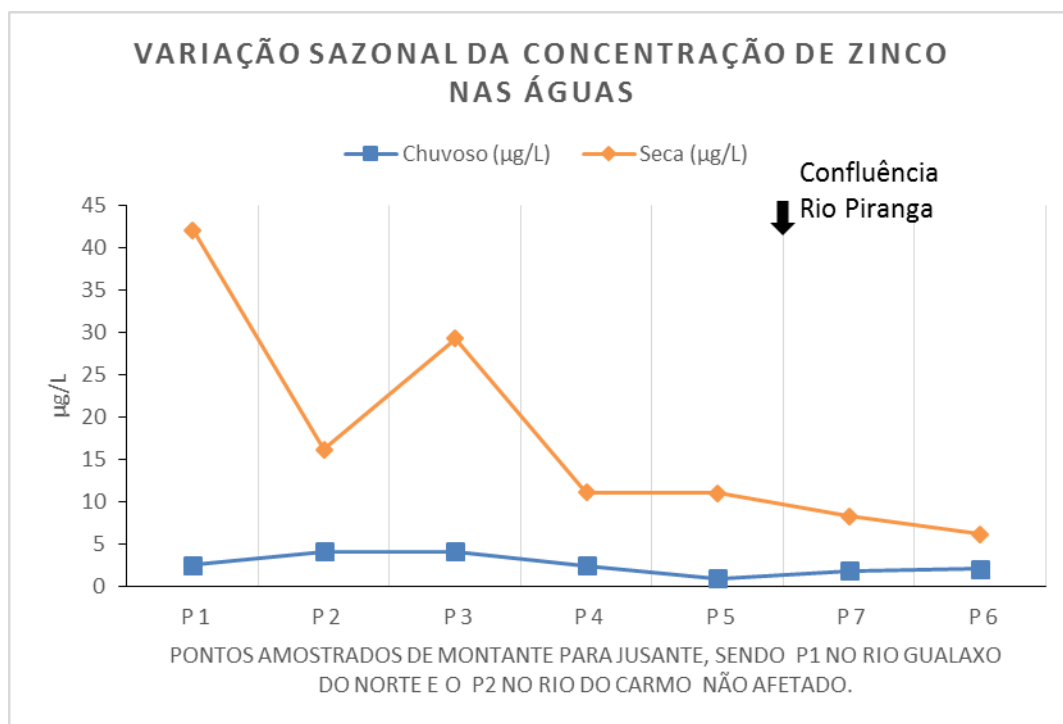


Figura 4.22 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de zinco nas águas, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

4.7 DISCUSSÕES FINAIS

Os valores dos parâmetros físico-químicos analisados, mostram que não há uma grande variação destes no trecho estudado. Todos os parâmetros se encontraram dentro das normas do CONAMA 357 (2005), mostrando que não há grande influência da barragem do Fundão sobre estes nos rios. Em relação aos ânions principais, é visto uma maior concentração de bicarbonato no rio Gualaxo do Norte, podendo ser causado por rochas carbonáticas, visto que as concentrações de Ca e Mg acompanham esta alta. Algumas variações no sulfato e no cloreto podem estar relacionadas ao despejo de esgoto doméstico nos rios.

As concentrações dos elementos nos rios seguiram um certo padrão visivelmente representado nos gráficos deste capítulo, com algumas exceções. Para a maioria dos elementos, as concentrações se mantiveram baixas, sendo alta apenas no ponto P2, onde as águas são oriundas das cabeceiras do rio do Carmo. O rio Gualaxo do Norte apresentou concentrações maiores que o rio do Carmo (Ponto P2) apenas para os elementos Pb no período chuvoso, Ca e Zn no período de seca e Mg e Ba em ambos os períodos. Costa (2001) indicou valores anômalos de Pb no resíduo industrial de Timbopeba e Zn no rio Gualaxo do Norte, o que poderia ser uma possível causa das anomalias encontradas. Já Rodrigues (2012) chegou a um valor de referência para o Ba maior no rio Gualaxo do Norte do que no rio do Carmo.

Os elementos Fe e Al no período chuvoso e Cu e Ni no período de seca, foram os únicos a ultrapassarem os valores estabelecidos pelo CONAMA (2005) para um rio de classe III, mas somente no ponto P2. Isto nos mostra que em termos de qualidade de águas, o rompimento da barragem do Fundão em nada afetou a bacia do alto rio Doce. Há de se notar que o trecho não afetado pelos rejeitos (ribeirão do Carmo) é o que contribui com as maiores concentrações de elementos tóxicos nas águas, e possui maior concentração de Fe dissolvido.

...

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tratará da geoquímica do material particulado em suspensão (MPS) coletado no trecho monitorado da bacia do alto rio Doce, visando entender a distribuição dos elementos ao longo dos rios em forma particulada, suspensos nas águas. Ao final deste capítulo será discutido os resultados encontrados e suas relações com o rompimento da barragem do Fundão. Também será feita uma análise comparativa das concentrações encontrados com as concentrações máximas permitida pelo CONAMA 344/2004 (CONAMA 2004) para sedimentos, considerando o MPS como um sedimento fino, transportado por suspensão.

O MPS foi calculado através da filtração das águas coletadas em filtros de 0,45µm, onde foi pesado e analisado, quando houve massa mínima para a solubilização. No período chuvoso, a quantidade de MPS foi alta, variando de 72,2 mg/L no rio do Carmo não afetado pela lama a 1470,3 mg/L no rio Gualaxo do Norte (Figura 5.1). Já no período da seca a quantidade de MPS nos rios diminuiu, variando de 1,6 mg/L no rio do Carmo não afetado pela lama a 81,8 mg/L no ponto P5, localizado no rio do Carmo antes da cidade de Rio Doce (Figura 5.2).

Devido à baixa quantidade de MPS coletado nos rios durante o período da seca, a análise geoquímica foi realizada apenas nas amostras de MPS do período chuvoso. Foram determinadas as concentrações dos elementos maiores Ca, K, Mg e Na, dos metais Fe, Al e Mn e dos elementos traço As, Ba, Co, Cu, Cr, Ni, V e Zn (Apêndice 5). Os elementos Cd e Pb apresentaram-se abaixo dos limites de quantificação na maioria dos pontos amostrados, portanto não serão discutidos neste trabalho.

O particulado em suspensão, segundo Costa (2007), apresenta grandes quantidades de argilo-minerais, que devido à sua alta capacidade de troca catiônica, são importantes capturadores e mobilizadores de metais pesados como As, Cd, Pb, Cr e outros. Ainda segundo Costa (2007), o MPS formam grandes depósitos de sedimentos finos, depositados nas planícies de inundação ao longo do rio do Carmo, concentrando os elementos tóxicos por eles transportados. Este material fino, após depositado em ambientes antrópicos (como ruas, praças) durante uma onda de cheia, podem secar e entrar em suspensão na atmosfera local. O material particulado (MP) rico em metais tóxicos, no ar de centros urbanos, podem ser facilmente inalados pela população, causando vários tipos de doenças (Colombini 2008, Sampaio 2012b). Esta situação foi observada em Barra Longa.

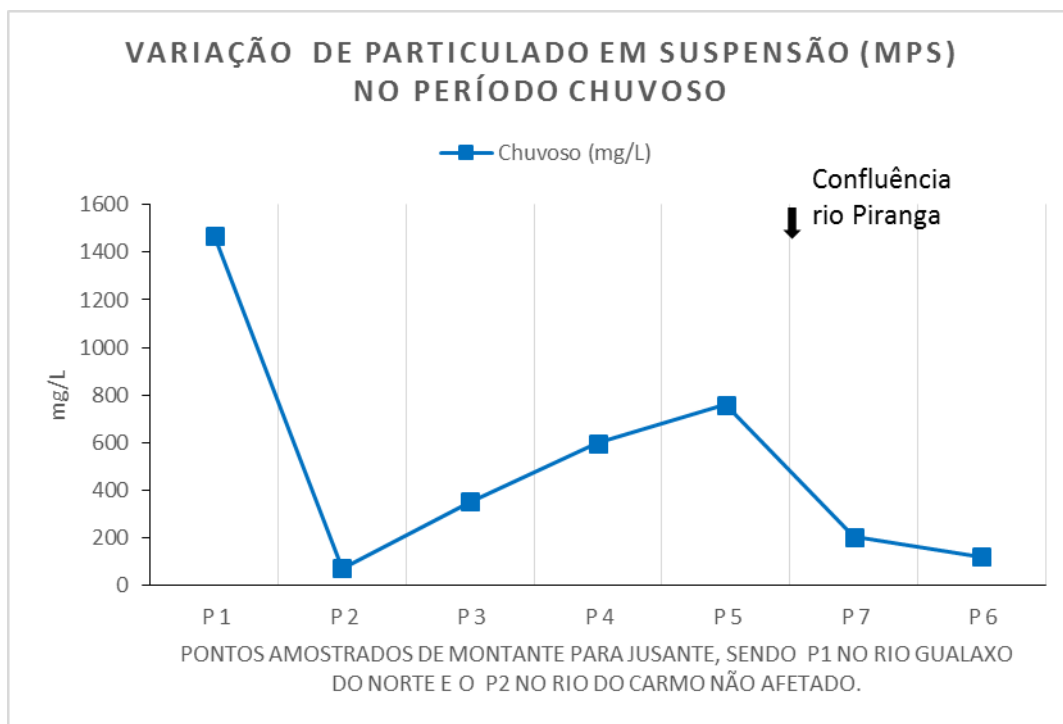


Figura 5.1 – Variação das concentrações de material particulado em suspensão nas águas, determinados no período chuvoso.

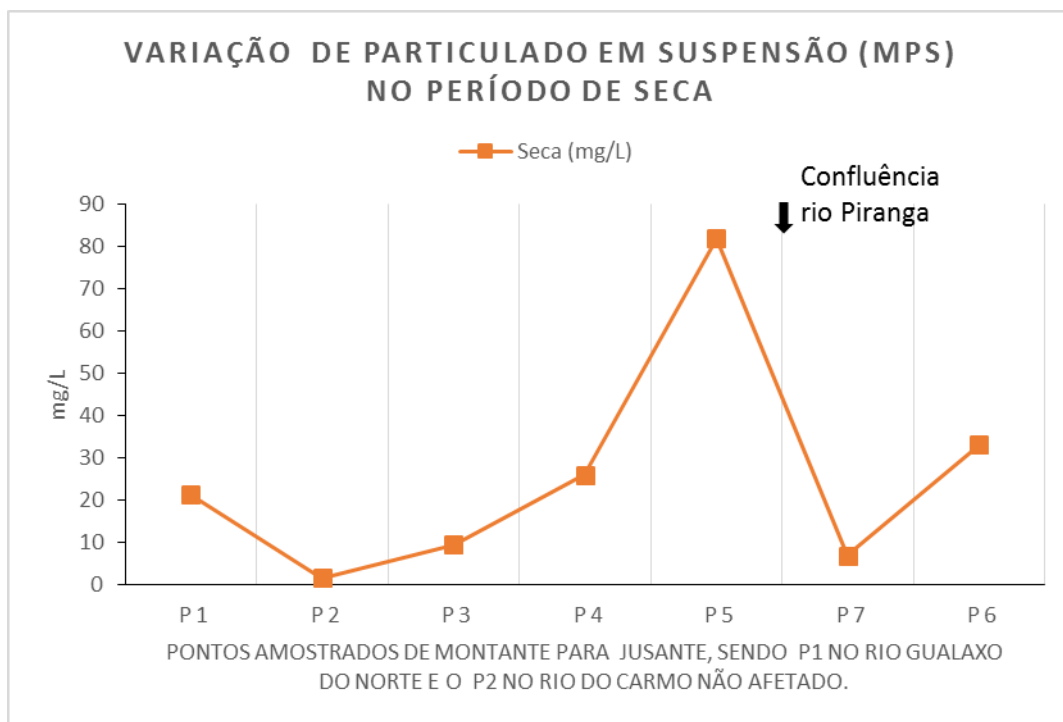


Figura 5.2 – Variação das concentrações de material particulado em suspensão nas águas, determinados no período de seca

5.2 ELEMENTOS MAIORES

5.2.1 Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg) e Sódio (Na)

As concentrações de cálcio no trecho estudado variaram de 649,77 a 3747,25 mg/kg (Figura 5.3), com picos no rio do Carmo não afetado pela lama e no rio Doce, na cidade de Rio Doce.

As concentrações de potássio foram as maiores dos quatro elementos discutidos neste tópico, variando 4608,49 mg/kg (rio Gualaxo do Norte) a 13458,53 mg/kg (13,4 %) no rio do Carmo não afetado pela lama (Figura 5.4).

As concentrações de magnésio, como esperado, acompanharam a variação do cálcio, com exceção do ponto P6, localizado no barramento da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves. O magnésio variou de 1123,26 a 3765,42 mg/kg, com picos no rio do Carmo não afetado e no P6 (Figura 5.3).

As concentrações de sódio foram as menores em relação aos quatro outros elementos, variando de 345,94 a 2049,73 mg/kg, com pico no rio do Carmo não afetado pela lama (Figura 5.3).

A análise destes quatro elementos ressalta a alta quantidade de argilo-minerais presentes no MPS, sendo estes, resultantes do intemperismo das rochas meta-graníticas, formadoras do embasamento da região (Costa 2007). A um aumento após a entrada do rio Piranga, mostrando também alta carga de argilo-minerais provenientes deste rio.

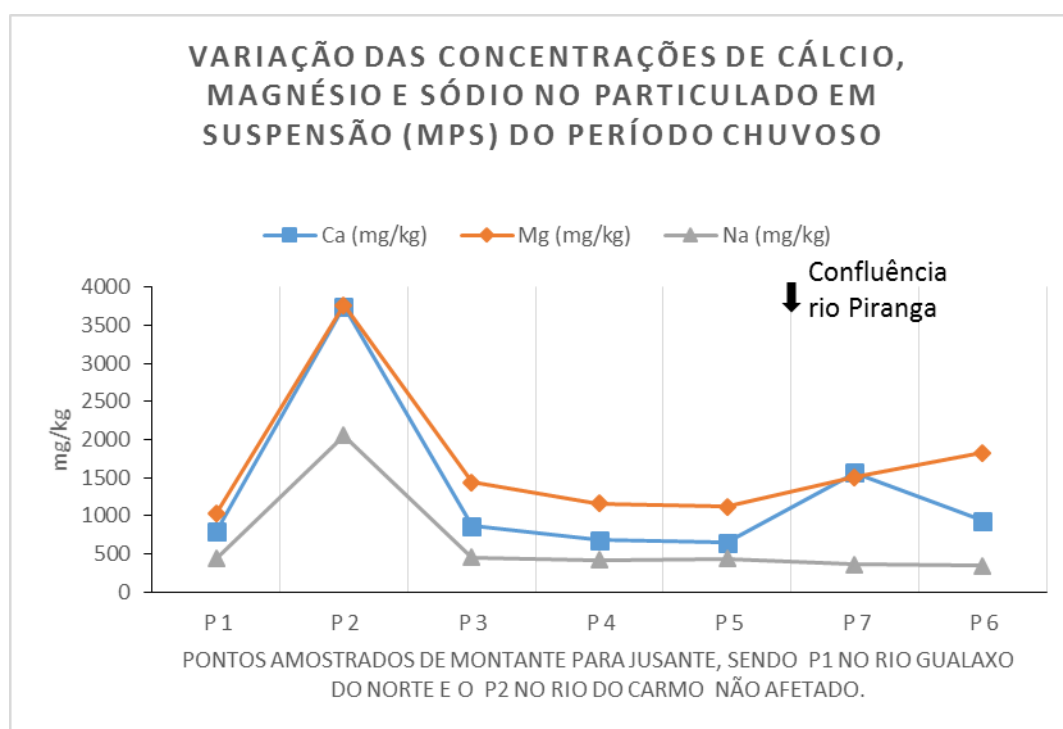


Figura 5.3 – Variação das concentrações de cálcio, magnésio e sódio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

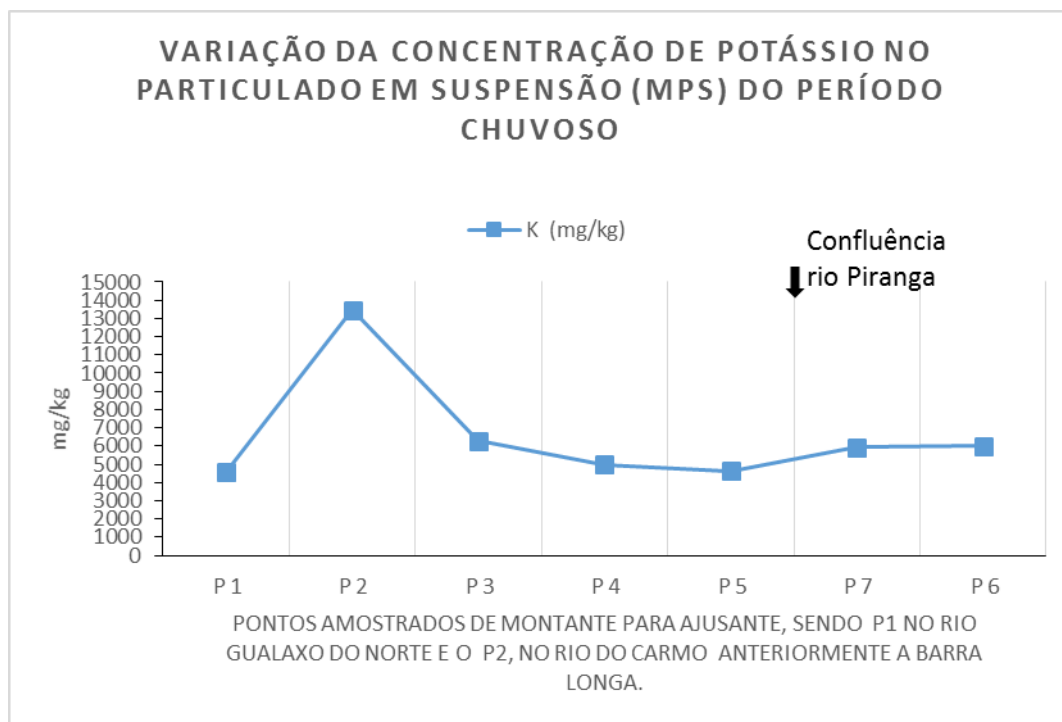


Figura 5.4 – Variação das concentrações de potássio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

5.2.2 Ferro (Fe)

As concentrações de ferro no trecho analisado, apresentaram porcentagens altas em relação aos outros elementos analisados. As concentrações variaram de 14,57 a 28,09 %, sendo as maiores concentrações determinadas no trecho afetado pelo rompimento do Fundão, principalmente no rio Gualaxo do Norte e no barramento da UHE Risoleta Neves, onde boa parte do rejeito se acumulou (Figura 5.5). O rio do Carmo não afetado pela lama apresentou a menor concentração, mas ainda com 14,57% de Fe, o que pode ser explicado pela geologia de sua cabeceira. A um pico negativo no ponto P5, que pode estar relacionado a entrada de algum tributário nas proximidades ou outras fontes de MPS.

5.2.3 Alumínio (Al)

As concentrações de alumínio variaram de 2,4 a 7,8 %. No rio Gualaxo do Norte, a concentração foi de 3,18 %, abaixo dos pontos a jusante (Figura 5.6). No rio do Carmo não afetado pela lama, foi onde se obteve a maior concentração de alumínio, sendo quase o dobro dos outros pontos. Há um aumento das concentrações a partir do ponto P7, após a entrada do rio Piranga e no barramento da UHE Risoleta Neves.

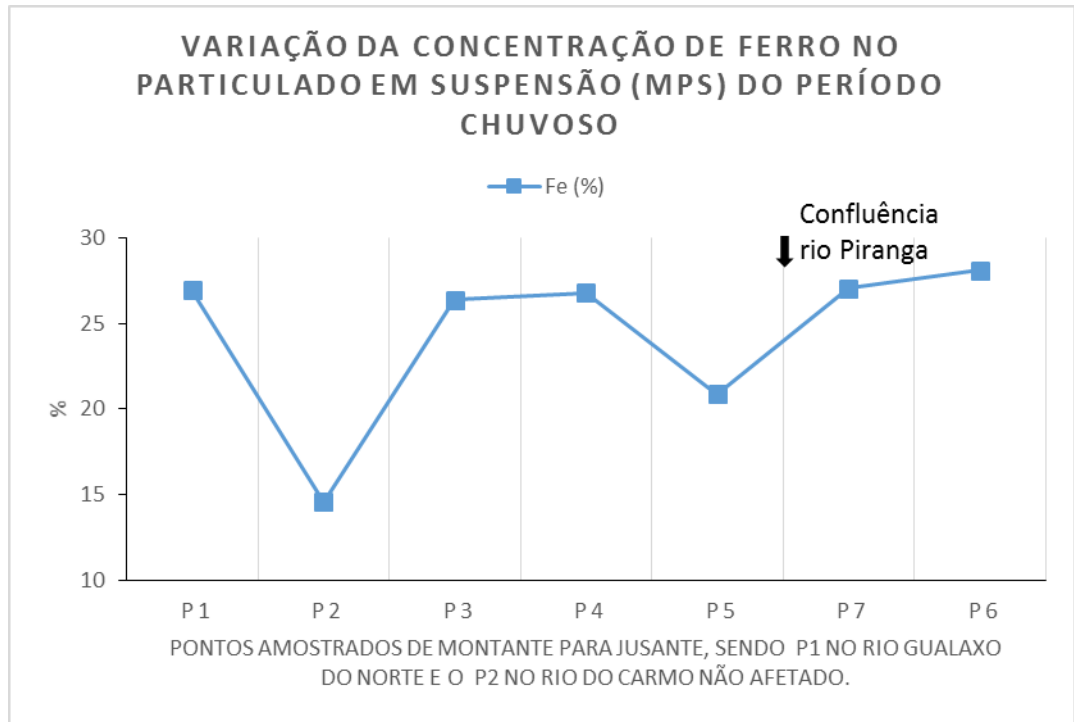


Figura 5.5 – Variação das concentrações de ferro no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

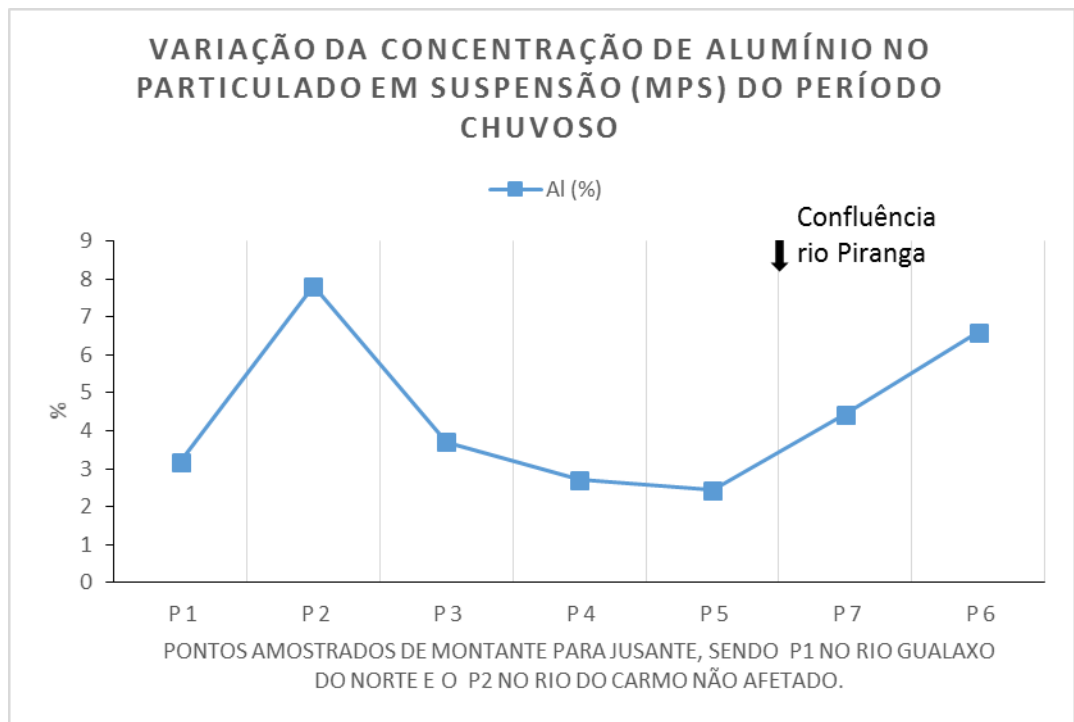


Figura 5.6 – Variação das concentrações de alumínio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

5.2.4 Manganês (Mn)

As concentrações de manganês nos rios estudados se manteve parcialmente constante, variando de 3447,52 a 3875,50 mg/kg, com pico anômalo no rio do Carmo não afetado pela lama, onde se registrou 7387,54 mg/kg de manganês no MPS (Figura 5.7).

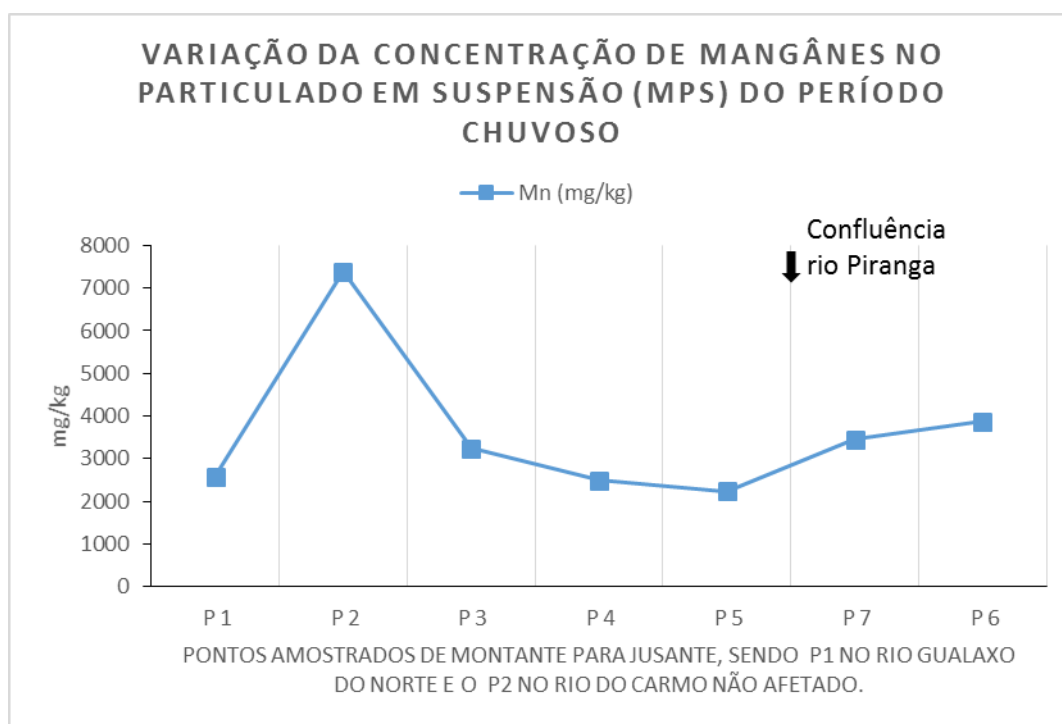


Figura 5.7 – Variação das concentrações de manganês no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

5.3 ELEMENTOS TRAÇO

5.3.1 Arsênio (As)

As concentrações de arsênio nos rios variaram de 24,70 mg/kg (rio Gualaxo do Norte) a 45,02 mg/kg (Barra Longa), com exceção do ponto P2 no rio do Carmo não afetado pela lama, que obteve concentração de 173,30 mg/kg (Figura 5.8). O limite para arsênio nos sedimentos segundo o CONAMA (2004), é de no máximo 17,00 mg/kg. Todos os pontos ficaram a cima dos limites estabelecidos por lei.

5.3.2 Bário (Ba)

As concentrações de bário nos rios variaram de 176,21 a 256,71 mg/kg, com exceção do rio do Carmo não afetado pela lama, que obteve concentração de 564,61 mg/kg (Figura 5.9). Houve um pequeno aumento das concentrações a partir do ponto P7, após a entrada do rio Piranga.

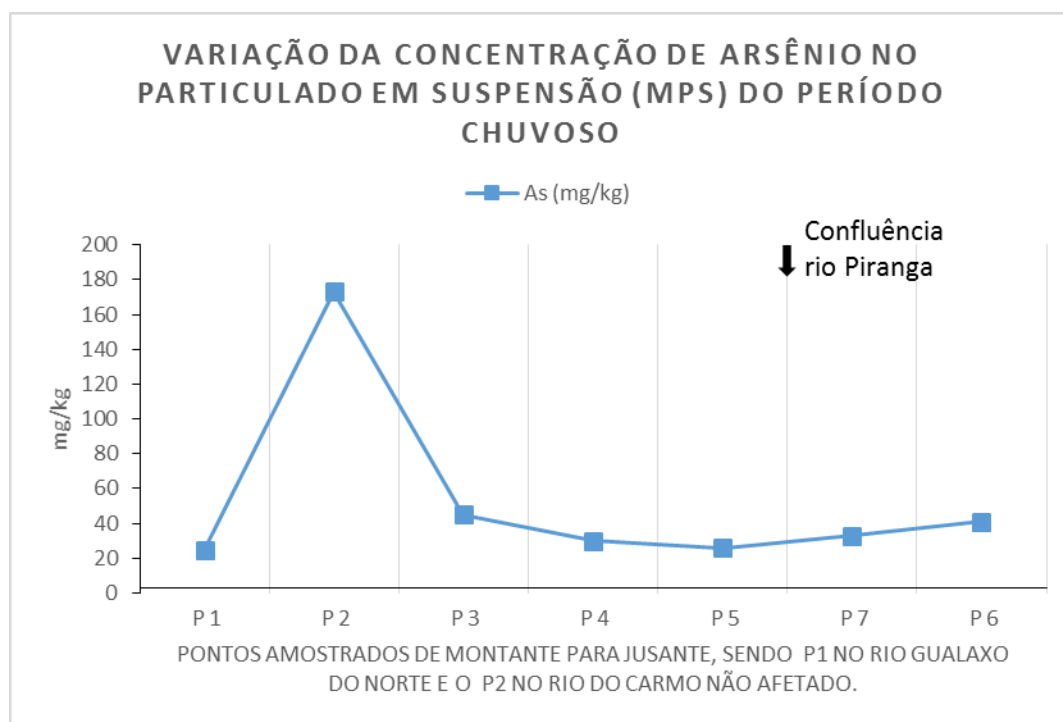


Figura 5.8 – Variação das concentrações de arsênio no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

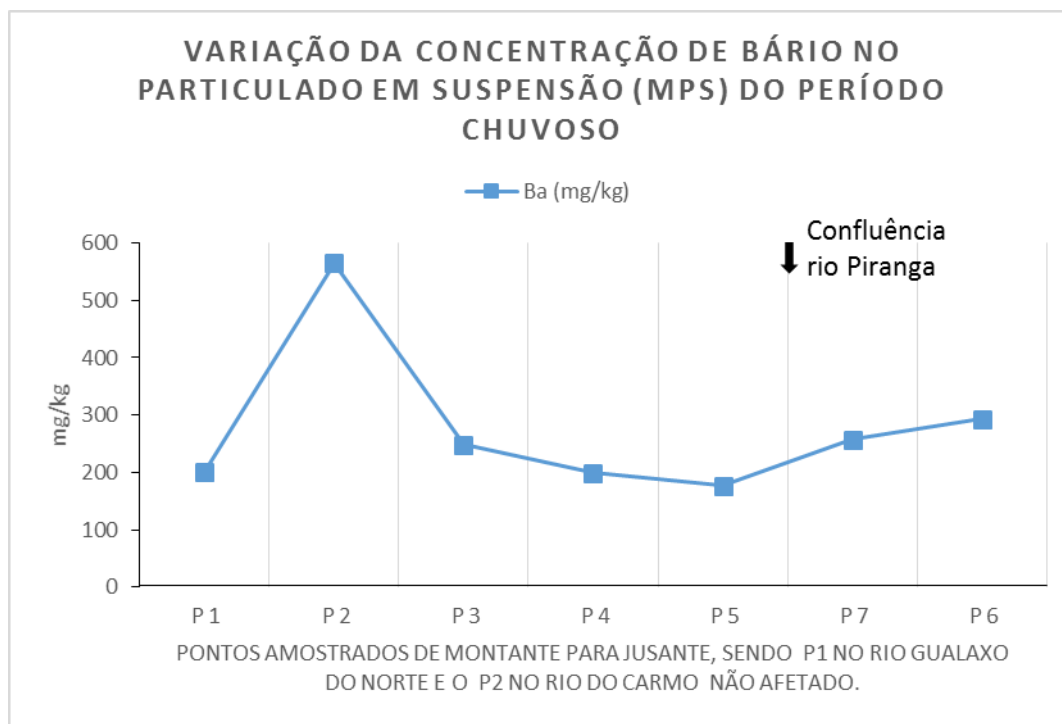


Figura 5.9 – Variação das concentrações de bário no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

5.3.3 Cobalto (Co)

As concentrações de cobalto nos rios variaram de 5,21 mg/kg (rio Gualaxo do Norte) a 15,78 mg/kg (UHE Risoleta Neves), com exceção do ponto P2 no rio do Carmo não afetado pela lama, que apresentou concentração de 24,99 mg/kg (Figura 5.10). Há um aumento das concentrações no barramento da UHE Risoleta Neves.

5.3.4 Cromo (Cr)

As concentrações de cromo nos rios variaram de 48,63 a 174,03 mg/kg (Figura 5.11). Houve picos de 174,03 mg/kg no rio do Carmo não afetado pela lama e de 108,11 mg/kg no barramento da UHE Risoleta Neves. O limite para cromo nos sedimentos segundo o CONAMA (2004), é de no máximo 90,00 mg/kg, ficando os pontos P2 e P6 acima dos limites máximos estabelecidos por lei.

5.3.5 Cobre (Cu)

As concentrações de cobre nos rios variaram de 17,06 a 56,59 mg/kg (Figura 5.11). Houve picos de 56,59 mg/kg no rio do Carmo não afetado pela lama e de 47,26 mg/kg no barramento da UHE Risoleta

Neves. O limite para cobre nos sedimentos segundo o CONAMA (2004), é de no máximo 197,00 mg/kg. Nenhum dos pontos extrapolou os valores máximos estabelecidos por lei.

5.3.6 Níquel (Ni)

As concentrações de níquel nos rios variaram de 20,31 a 88,12 mg/kg (Figura 5.11). Houve picos de 88,12 mg/kg no rio do Carmo não afetado pela lama e de 49,45 mg/kg no barramento da UHE Risoleta Neves. O limite para níquel nos sedimentos segundo o CONAMA (2004), é de no máximo 35,90 mg/kg, ficando os pontos P2 e P6 acima dos limites máximos estabelecidos por lei.

5.3.7 Vanádio (V)

As concentrações de vanádio nos rios variaram de 40,23 a 117,92 mg/kg (Figura 5.12). Houve picos de 117,92 mg/kg no rio do Carmo não afetado pela lama e de 106,29 mg/kg no barramento da UHE Risoleta Neves. Há um nítido aumento das concentrações de vanádio após a entrada do rio Piranga.

5.3.8 Zinco (Zn)

As concentrações de Zinco nos rios variaram de 32,52 a 136,29 mg/kg (Figura 5.12). Houve picos de 136,29 mg/kg no barramento da UHE Risoleta Neves e de 123,18 mg/kg no rio do Carmo não afetado pela lama. Diferentes dos outros elementos analisados, o zinco teve seu maior pico no P6. O limite para zinco nos sedimentos segundo o CONAMA (2004), é de no máximo 315 mg/kg. Nenhum dos pontos extrapolou os valores máximos estabelecidos por lei.

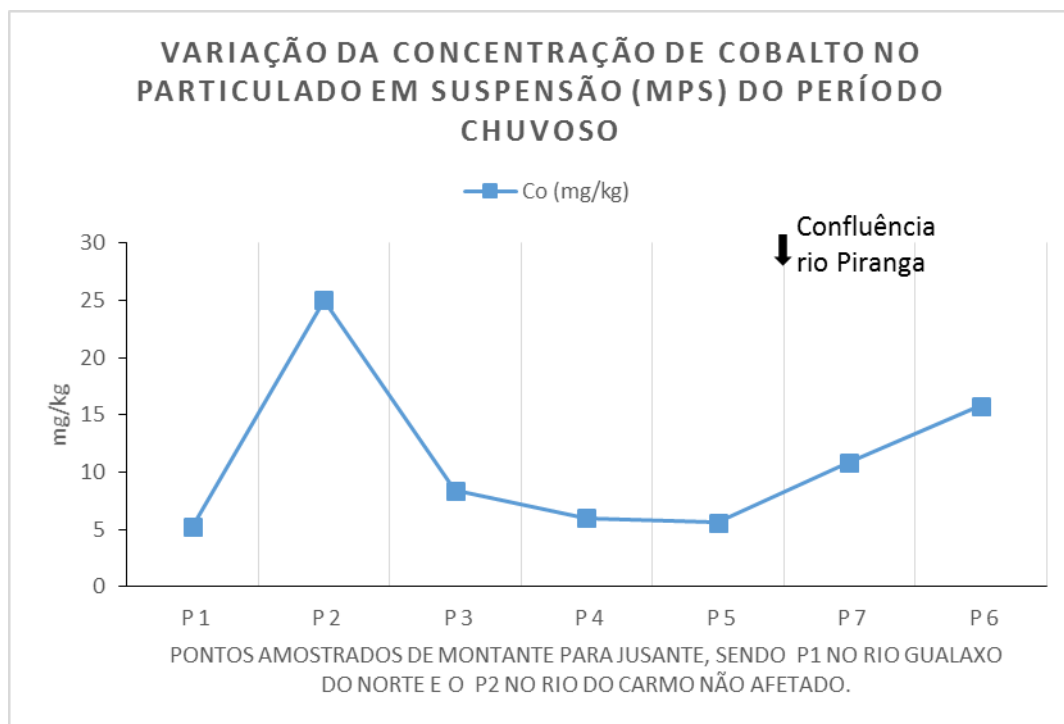


Figura 5.10 – Variação das concentrações de cobalto no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

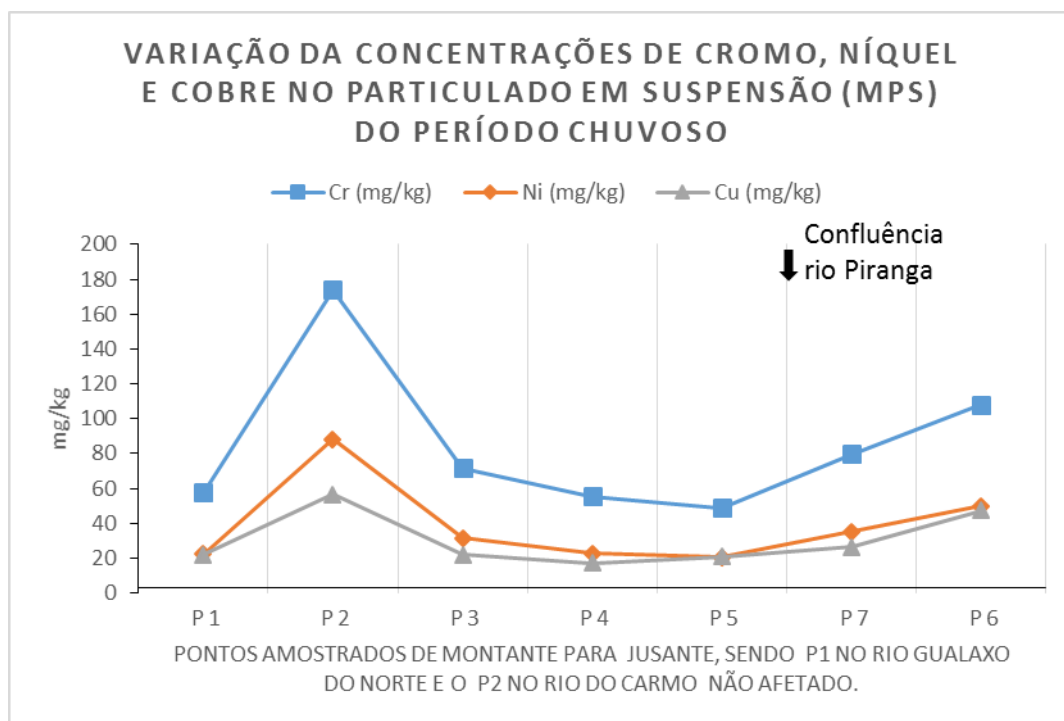


Figura 5.11 – Variação das concentrações de cromo, níquel e cobre no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

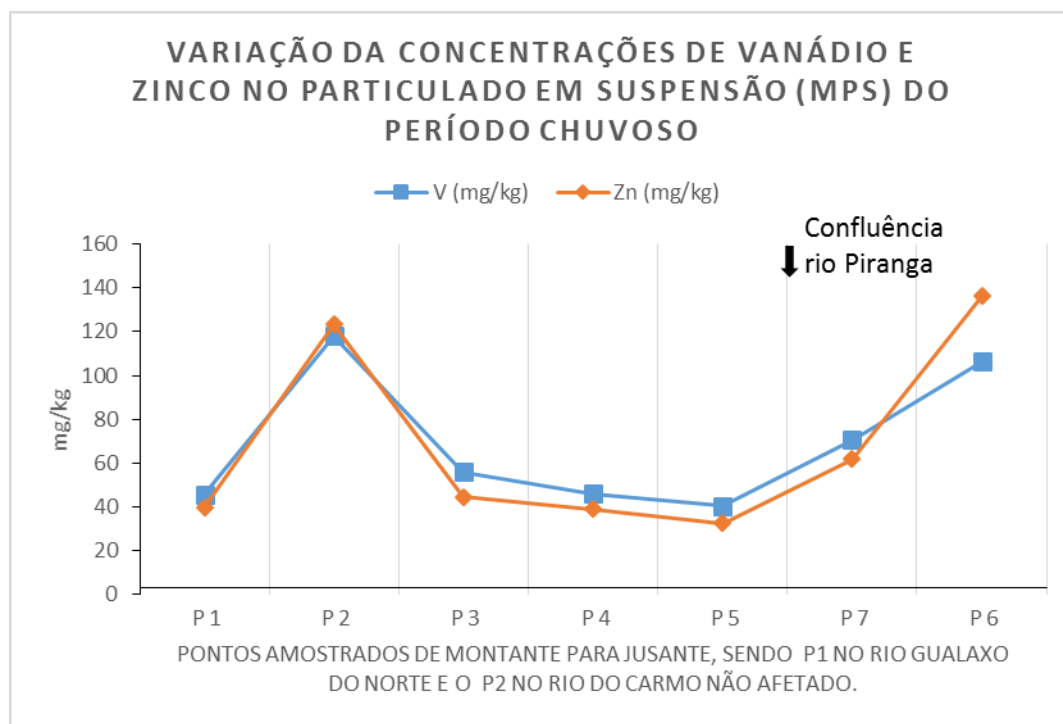


Figura 5.12 – Variação das concentrações de vanádio e zinco no material particulado em suspensão, determinados no período chuvoso.

5.4 DISCUSSÕES FINAIS

A quantidade de material particulado em suspensão nos rios estudados durante o período chuvoso, é muito alta para ser comparada a um rio normal, ficando claro a contribuição do rompimento da barragem do Fundão neste parâmetro. Através da análise dos gráficos de particulado, fica claro a contribuição do Gualaxo do Norte (P1 com 1,47 g/L) nas altas concentrações encontradas a jusante no rio do Carmo. No período de seca, há um aumento da quantidade de MPS no ponto P5 superior ao rio Gualaxo do Norte, podendo estar relacionado a alguma obra de revitalização próxima, no qual aumentou a turbidez do rio neste trecho.

Em relação a composição química destes MPS's coletados no período chuvoso, ficou claro um certo padrão de concentração ao longo do trecho analisado. Todos os elementos estudados, com exceção do Fe, tiveram alta concentração no rio do Carmo, e baixas concentrações nos restantes dos pontos, principalmente no rio Gualaxo do Norte, de onde vieram os rejeitos do Fundão. Há um aumento das concentrações nos pontos P6 e P7, trechos coletados já no rio Doce, após a entrada do rio Piranga e na UHE Risoleta Neves. Todos os elementos obtiveram concentrações superiores aos encontrados nos sedimentos de corrente, possivelmente extrapolando os valores de *background* sugeridos para sedimentos nestes rios (Costa 2007, Rodrigues 2012). Em relação ao CONAMA (2004), ultrapassaram os valores máximos estabelecidos por lei o elemento As e os elementos Cr e Ni nos pontos P2 e P6. Os

valores elevados no ponto P2 podem estar relacionados a geologia diferenciada das cabeceiras do rio do Carmo, onde, através de estudos de fácies argilosas em terrações, Costa (2007) encontrou valores superiores aos das legislações. No ponto P6, o aumento das concentrações podem ser explicadas pelo armazenamento de todo rejeito e sedimento transportado pela onda de cheia ocasionada pelo rompimento do Fundão, na barragem da UHE Risoleta Neves. Pode-se também ter contribuições do MPS provindo do rio Piranga.

O elemento ferro, comportou-se de forma diferenciada dos outros elementos. Nos pontos P1, P2, P4, P6 e P7, as concentrações de ferro foram elevadas, mas de certo modo constantes, sendo em média 27%. Fica notório que a maior parte do ferro no MPS provem da barragem do Fundão, visto que no ponto P2, onde não há influência direta do Fundão, as concentrações foram de 14,57%, dentro do esperado para os rios que cortam formações ferríferas naturalmente. No ponto P5 há uma diminuição da concentração de ferro, mas é o segundo com mais MPS. Isto pode ser um indicio de que este MPS está misturado com algum outro material, não ligado ao rompimento. A montante do ponto P5, áreas adjacentes ao rio que foram cobertas com rejeitos, foram recobertas por solo (Figura 5.13) para tornarem-se agricultáveis novamente (Figura 5.14), podendo ser esta a origem deste material particulado com baixas concentrações de Fe. No ponto P1, ponto com a maior quantidade de MPS, foi realizado uma análise mineralógica através de difração de raio-X, resultando em quartzo, hematita, caulinita e muscovita (Figura 5.15). A presença de hematita (óxido de ferro) e não de goethita (hidróxido de ferro) como era esperado em rios, corrobora com a origem antrópica deste Fe, tendo origem da barragem do Fundão.



Figura 5.13 – Imagem de satélite de 01/08/2016 (um mês antes da coleta) nas imediações do ponto P5, destacando em amarelo as áreas recobertas com nova cobertura de solo para plantio. A e B se relacionam a figura 5.14. Google Earth 2018.

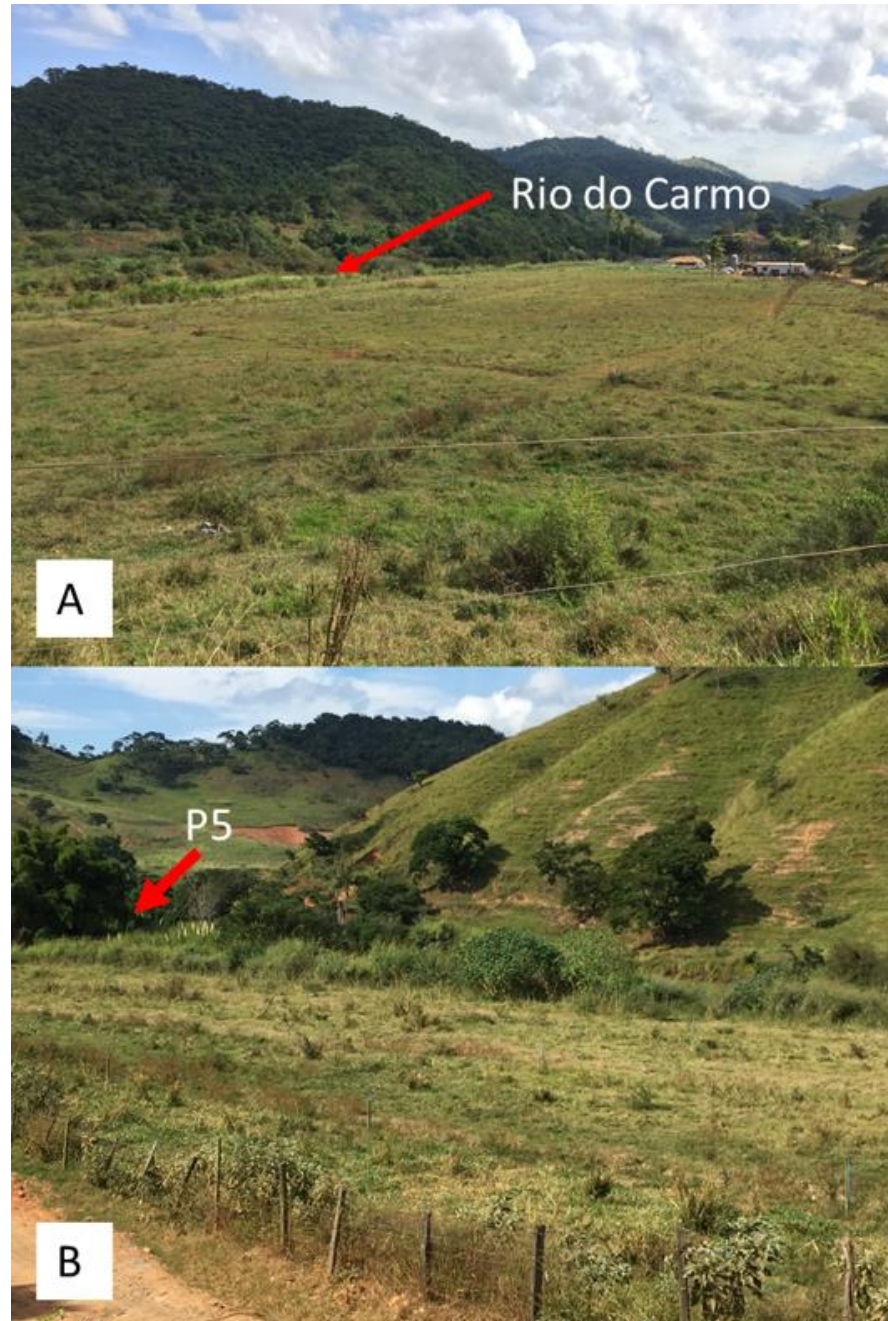


Figura 5.14 – Imagem com as áreas recuperadas com solo de empréstimo atualmente, a montante do ponto P5. A: Área mais a montante; B: Área mais próxima ao ponto P5. Ambas as áreas já com plantio de gramíneas para pasto com sofisticado sistema de irrigação. Imagem do autor de 19/05/2018.

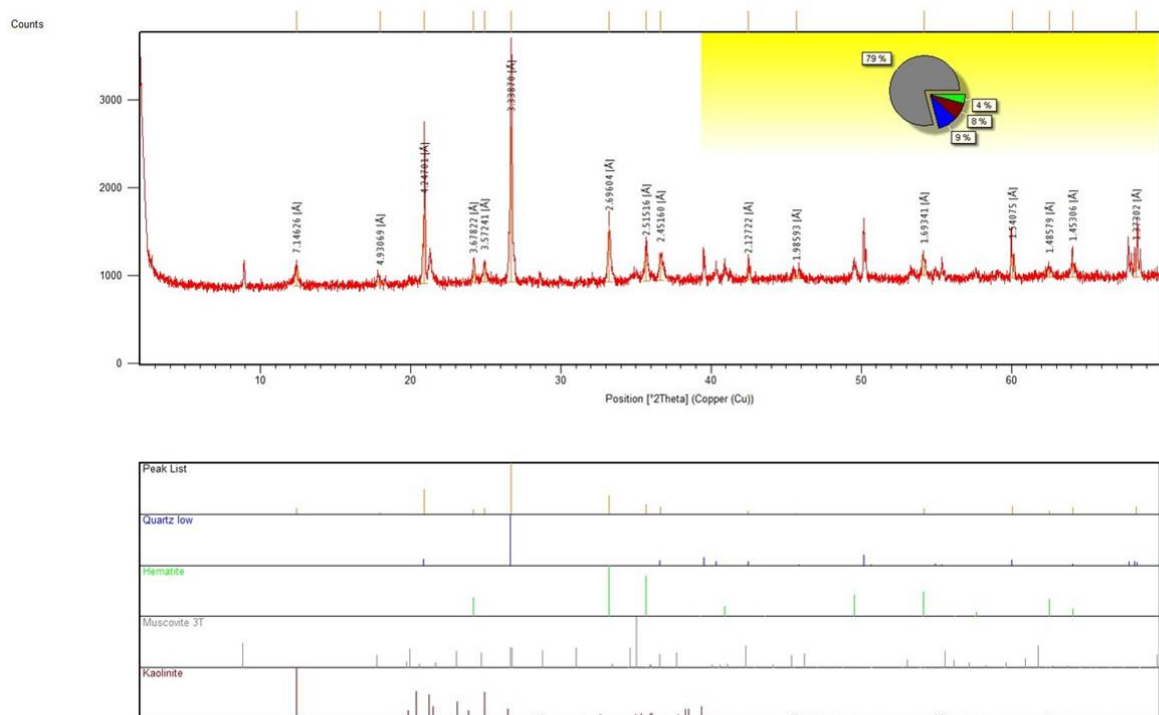


Figura 5.15 – Gráficos de difração de raios- X no MPS oriundo do ponto P1, destacando as mineralogias encontradas.

CAPÍTULO 6

SEDIMENTOS DE CORRENTE

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tratará das concentrações de elementos maiores, menores e traço nos sedimentos de corrente, determinados no trecho monitorado da bacia do alto rio Doce em um ano hidrológico. A quantificação destes elementos visa o entendimento da distribuição destes elementos ao longo da calha principal dos rios estudados e suas possíveis origens.

Ao final deste capítulo, se discutirá os resultados obtidos e suas relações com o rompimento da barragem do Fundão, utilizando-se de trabalhos anteriores realizados nos rios, onde se obteve valores de referência geoquímicos para o rio do Carmo (Costa 2007) e para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012). Trabalhos anteriores e posteriores ao rompimento também serão analisados juntos aos resultados. Também será utilizado para fins de comparação, o regimento CONAMA 344/2004 para sedimentos a serem dragados (CONAMA 2004), como parâmetro legislador do Brasil.

Os sedimentos de corrente passaram primeiramente por uma análise granulométrica a fim de se quantificar as frações granulométricas presentes nos trechos analisados (Apêndices 6 e 7). Foram determinados através da fração total dos sedimentos de corrente os elementos maiores e menores Ca, K, Mg, Na, Al, Fe e Mn e os traço As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn além dos ETR+Y (Apêndices 8 a 11), que serão apresentados nos gráficos abaixo. Também foram determinados as concentrações destes mesmo elementos (exceto ETR+Y) nas várias frações granulométricas, a modo de se entender em qual fração cada elemento está se concentrando (Apêndices 12 e 13).

6.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Os sedimentos amostrados, após secos, foram submetidos a análise granulométrica utilizando-se de peneiras nas granulometrias descritas na tabela 1.3. No período chuvoso, a quantidade de sedimentos de corrente na fração silte/argila e areia muito fina foi predominante em todos os pontos, exceto no ponto P7 na cidade de Rio Doce, sendo este um trecho de maior velocidade de fluxo (Figura 6.1). Os pontos que apresentaram sedimentos mais finos foram no rio Gualaxo do Norte (com mais de 50% de silte/argila) e no barramento da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves (57,3 % de silte/argila), trechos onde a quantidade de rejeito provenientes da barragem do Fundão é maior. Já no período de seca, a fração predominante nos rios foi a areia fina (Figura 6.2), com exceção dos pontos P1 e P3, onde predominou sedimentos mais finos. Novamente fica nítido a alta quantidade de materiais finos nos trechos afetados pelos rejeitos do Fundão, ultrapassando, em todos os pontos 50 % do total (Areia fina, muito fina, silte e argila).

Canatto (2017) ressaltou esta diferença ao estudar o rio Gualaxo do Norte, onde autores em trabalhos anteriores ao desastre, não registraram valores altos de sedimentos tão finos no rio. Segundo o autor, estes sedimentos finos estão diretamente ligados aos rejeitos do Fundão, que continham características granulométricas semelhantes às dos sedimentos amostrados nas áreas afetadas (predominância de silte/argila a areia muito fina).

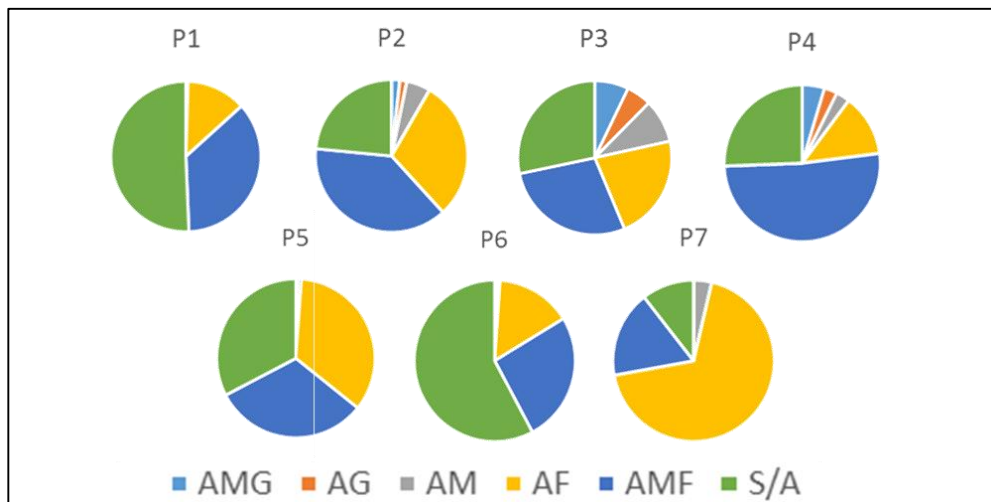


Figura 6.1 – Gráficos demonstrativos das frações granulométrica do sedimento de corrente por ponto amostrado no período chuvoso. AMG-Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; S/A – Silte/Argila.

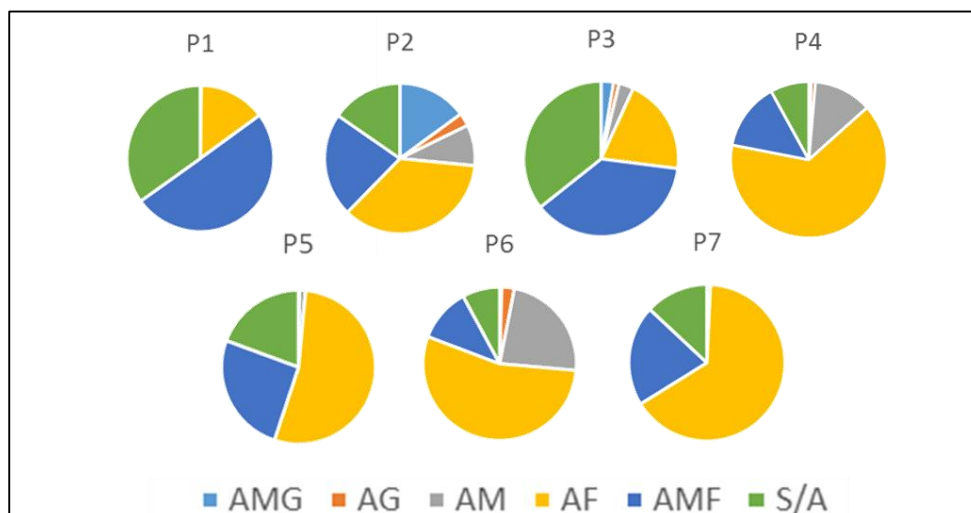


Figura 6.2 – Gráficos demonstrativos das frações granulométrica do sedimento de corrente por ponto amostrado no período de seca. AMG-Areia muito grossa; AG – Areia grossa; AM Areia média; AF – Areia fina; AMF – Areia muito fina; S/A – Silte/Argila.

6.3 ELEMENTOS MAIORES

6.3.1 Cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg) e sódio (Na)

Os elementos cálcio, magnésio, potássio e sódio, são facilmente encontrados em rochas ígneas e meta-ígneas. Em um clima tropical, estas rochas são facilmente intemperizadas, liberando os elementos maiores para o ambiente em forma de solução e partículas de argilominerais, nos quais são transformados (Canatto 2017). As quantidades destes elementos em forma de argilominerais nos rios é alta, sendo estes responsáveis por absorver e adsorver metais (Costa 2001).

O cálcio, no período chuvoso, variou de 314,29 a 985,17 mg/kg, com exceção do ponto P3, em Barra Longa, onde a concentração foi de 2866,67 mg/kg (Figura 6.3). Já no período de seca, a variação foi de 443,97 a 1579,85 mg/kg, sendo maior que as concentrações encontradas no período chuvoso, com o pico máximo no ponto P6, na UHE Risoleta Neves.

O potássio, no período chuvoso, variou de 188,27 a 896,25 mg/kg, com exceção dos pontos P2 no rio do Carmo não afetado pela lama e P3 em Barra Longa, onde as concentrações foram de 4572,57 mg/kg e 9635,01 mg/kg respectivamente (Figura 6.4). Já no período de seca, de certo modo, as concentrações foram maiores na maioria dos pontos, variando de 1283,15 a 4929,80 mg/kg, com pico de 5156,04 mg/kg no ponto P6 (UHE Risoleta Neves).

O magnésio, no período chuvoso, variou de 310,56 a 1606,60 mg/kg, com exceção do ponto P3 em Barra Longa que registrou concentração de 3257,60 mg/kg (Figura 6.5). No período de seca, as concentrações variaram de 348,78 a 1920,37 mg/kg, com pico máximo no ponto P6, no barramento da UHE Risoleta Neves.

O sódio, no período chuvoso, variou de 119,79 a 711,83 mg/kg, exceto no ponto P3 em Barra Longa, onde a concentração de sódio foi de 2141,38 mg/kg (Figura 6.6). No período de seca, as concentrações foram maiores em todos os pontos (exceto o P3), variando de 581,82 a 1173,20 mg/kg, com exceção do ponto P6 na UHE Risoleta Neves, com 2109,47 mg/kg de sódio.

Observando-se o comportamento deste quatro elementos nos rios durante o ano monitorado é perceptível uma certa semelhança entre suas distribuições, onde o P3 no período chuvoso e o P6 no período de seca apresentaram picos elevados de concentrações destes elementos. Também é nítida a contribuição das cabeceiras do rio do Carmo nas concentrações deste elementos no trecho estudado.

A análise das frações granulométricas destes elementos, nos mostra uma maior concentração destes nas frações mais grossas, o que não era esperado, visto que estes elementos se encontram em maior quantidade em argilominerais, de frações mais finas.

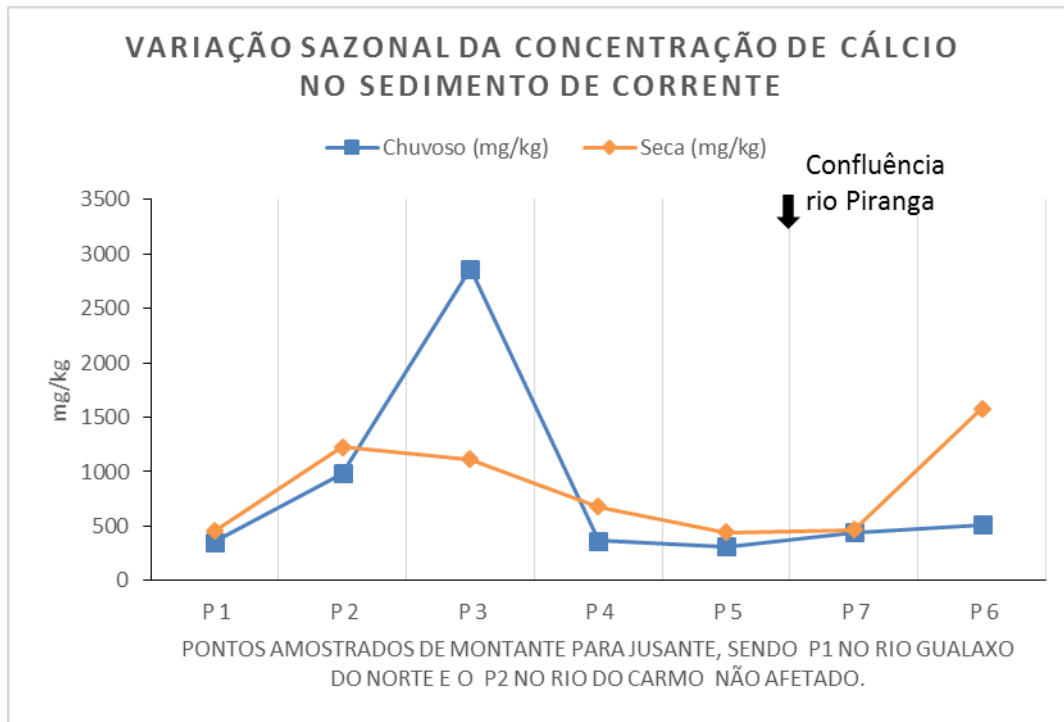


Figura 6.3 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cálcio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

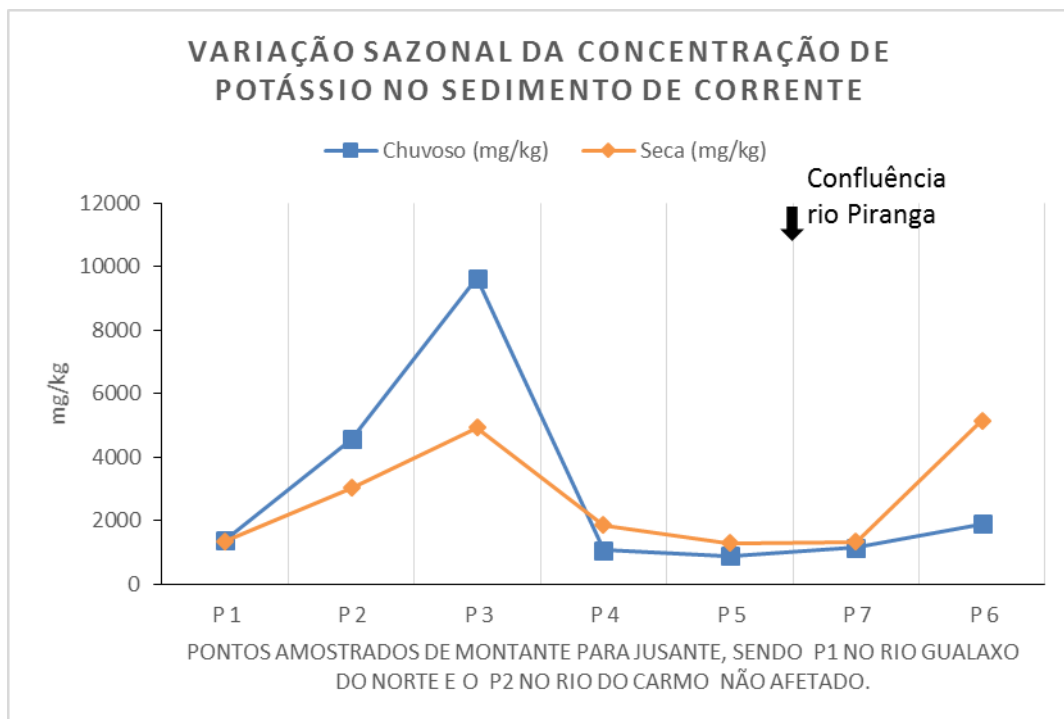


Figura 6.4 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de potássio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

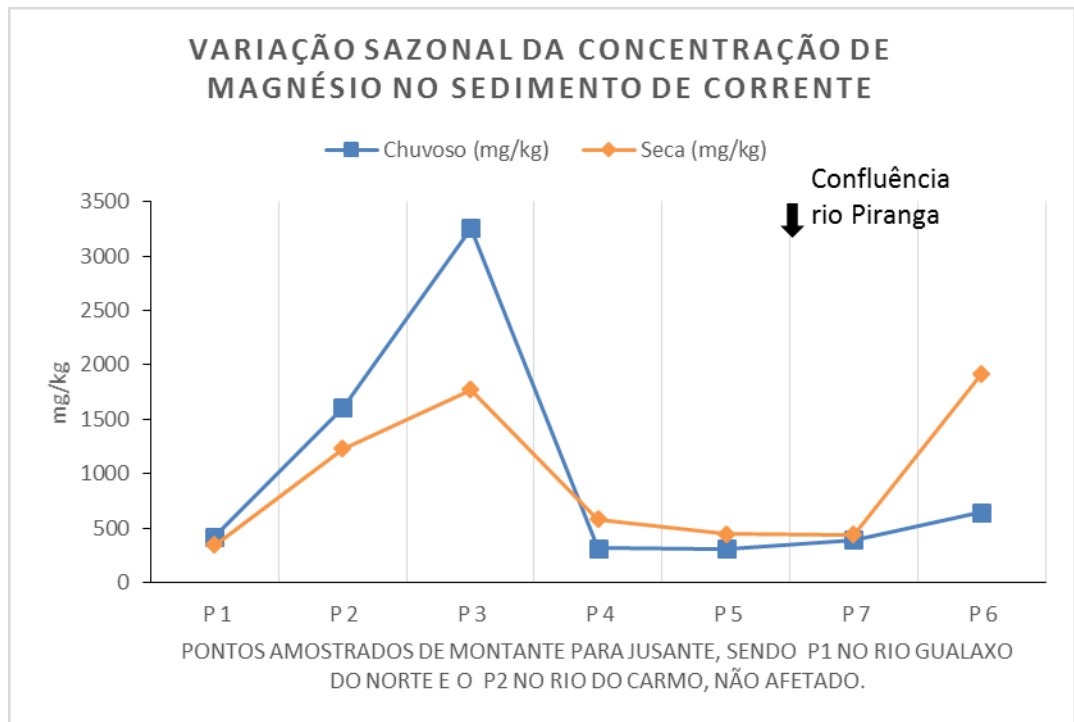


Figura 6.5 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de magnésio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

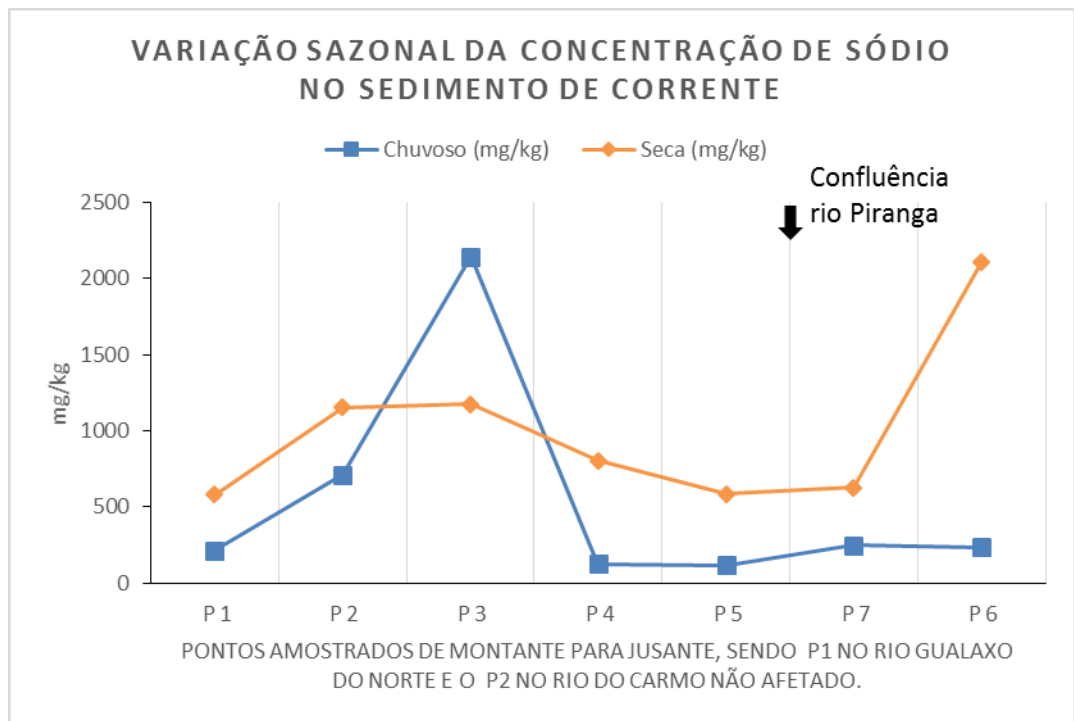


Figura 6.6 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de sódio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.3.2 Alumínio (Al)

O Alumínio, no processo de intemperismo, possui solubilidade baixa, tendendo-se a concentrar em solos residuais, muitas vezes associados a óxidos e hidróxidos de Fe-Mn (Costa 2001). Em sedimentos, o alumínio tende a ser carreador de metais. O valor de *background* para o alumínio no rio do Carmo é de 3,84%, sendo este valor considerado de origem geogênica (Costa 2007).

No período chuvoso, as concentrações de alumínio variaram de 0,36 a 4,80 %, sendo os maiores picos encontrados nos pontos P3, P6 e P2 respectivamente. No período de seca, a variações acompanharam a distribuição do período chuvoso, com concentrações variando de 0,49 a 2,92% (Figura 6.7). O alumínio apresentou-se em concentrações acima do valor de referência local apenas no ponto P3, situado em Barra Longa (período chuvoso). Nos demais pontos as concentrações de alumínio não ultrapassaram o valor de referência local.

As maiores concentrações de alumínio foram determinadas nas frações mais grosseiras (areia grossa a muito grossa) e na fração silte/argila.

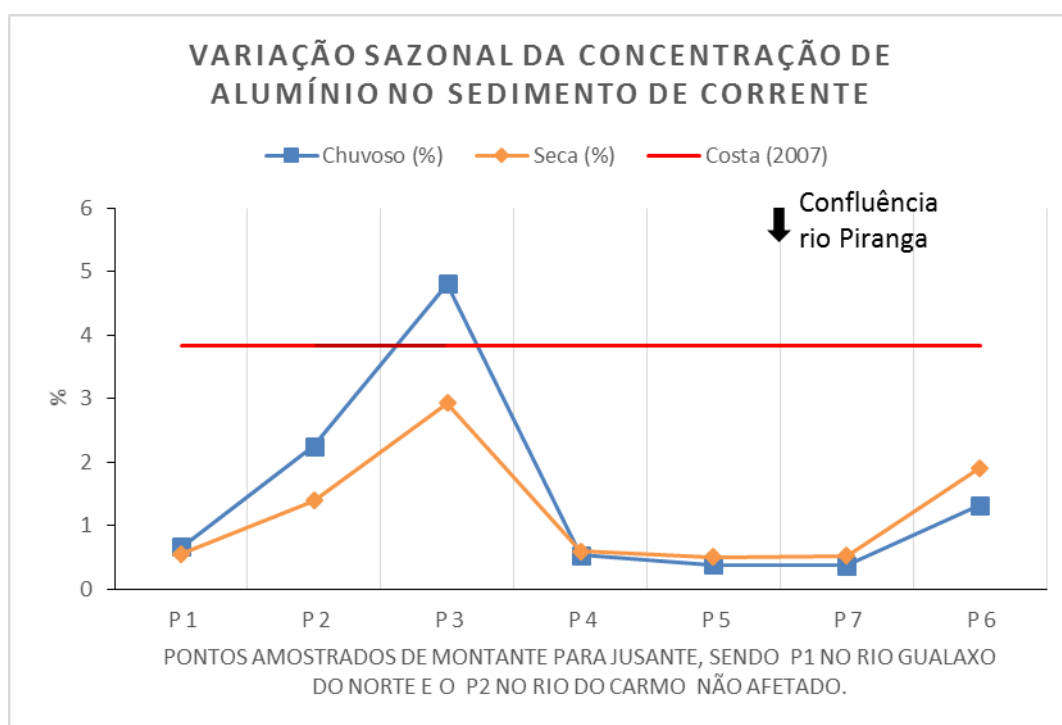


Figura 6.7 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de alumínio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.3.3 Ferro (Fe)

Costa (2001), diz que os hidróxidos de ferro, em sistemas aquáticos, possui influente controle sobre as distribuições de metais pesados. Possui grande capacidade de adsorção e complexação dos metais pesados, ao qual ocorrem associados (Costa 2001).

No rio do Carmo, o valor de *background* para o ferro é de 9,88% (Costa 2007) e de 8,2% no rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012), valores altos devido a abundância de ferro nas rochas supracrustais do quadrilátero ferrífero.

No período chuvoso, as concentrações de ferro variaram de 9,98 % a 21,16 %, sendo os pontos P4, P1 e P6 os de maiores concentrações de ferro (Figura 6.8). O ponto P3 e P7 aparecem com um pico negativo, de forma anômala, o que é estranho, visto que são pontos atingidos pela lama. No período de seca, as concentrações foram menores, variando de 4,66% a 16,87 %, com pico positivo no ponto P3, decaindo até a UHE Risoleta Neves.

Em relação ao ponto do rio Gualaxo do Norte, as concentrações de ferro determinadas apresentaram-se muito acima do valor de *background* sugerido, chegando a ser o dobro. Já no rio do Carmo, apenas os pontos P6 e P7 do período de seca ficaram abaixo do valor de referência local sugerido, mostrando alto impacto do rompimento de Fundão nas concentrações de ferro. As maiores concentrações estão relacionadas as frações mais finas, principalmente a silte/argila, frações características encontradas em barragens de rejeitos minerários (Canatto 2017).

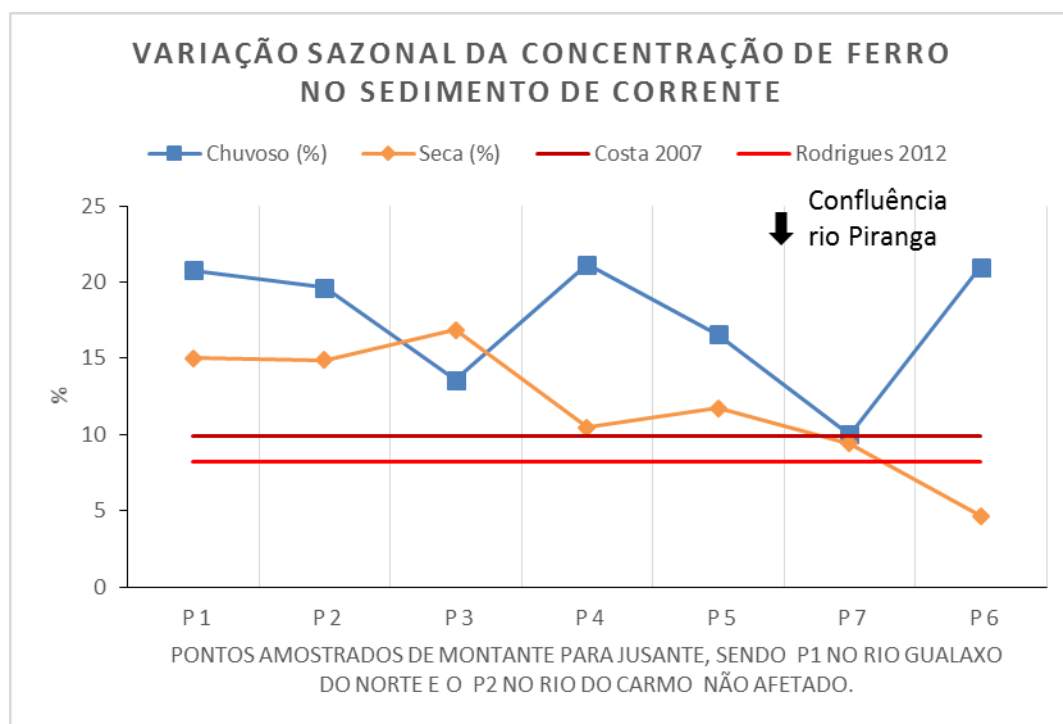


Figura 6.8 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de ferro nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.3.4 Manganês (Mn)

O manganês, por suas características químicas semelhantes ao do ferro, forma hidróxidos juntamente ao ferro, que em rios, podem ser carreadoras de metais. Na região do Quadrilátero Ferrífero, o manganês ocorre principalmente na forma de óxidos (Costa 2001). No rio Gualaxo do Norte, o manganês possui *background* geoquímico de 1636,0 mg/kg (Rodrigues 2012), e de 189,8 mg/kg no rio do Carmo (Costa 2007).

No período chuvoso, as concentrações de manganês variaram de 400,84 a 1681,92 mg/kg, sendo os pontos P2 no rio do Carmo não atingido e o P3 em Barra longa os mais elevados (Figura 6.9). Já no período de seca, as concentrações variaram de 451,41 a 1437,91 mg/kg, sendo novamente o P2 e o P3 os mais elevados. Em ambos os períodos, há um aumento da concentração no barramento da UHE Risoleta Neves.

As concentrações de manganês nos sedimentos, em relação ao valor de referência para o rio do Carmo, foram elevadas em todos os pontos. Costa 2007 afirma que este valor pode variar até 5600 mg/kg, dependendo das litologias ao qual o trecho está condicionado. Já em relação ao rio Gualaxo do Norte, o ponto P1 ficou dentro dos limites estabelecidos. O manganês registrou maiores concentrações na fração areia muito grossa/grossa e na fração silte/argila nos dois períodos monitorados.

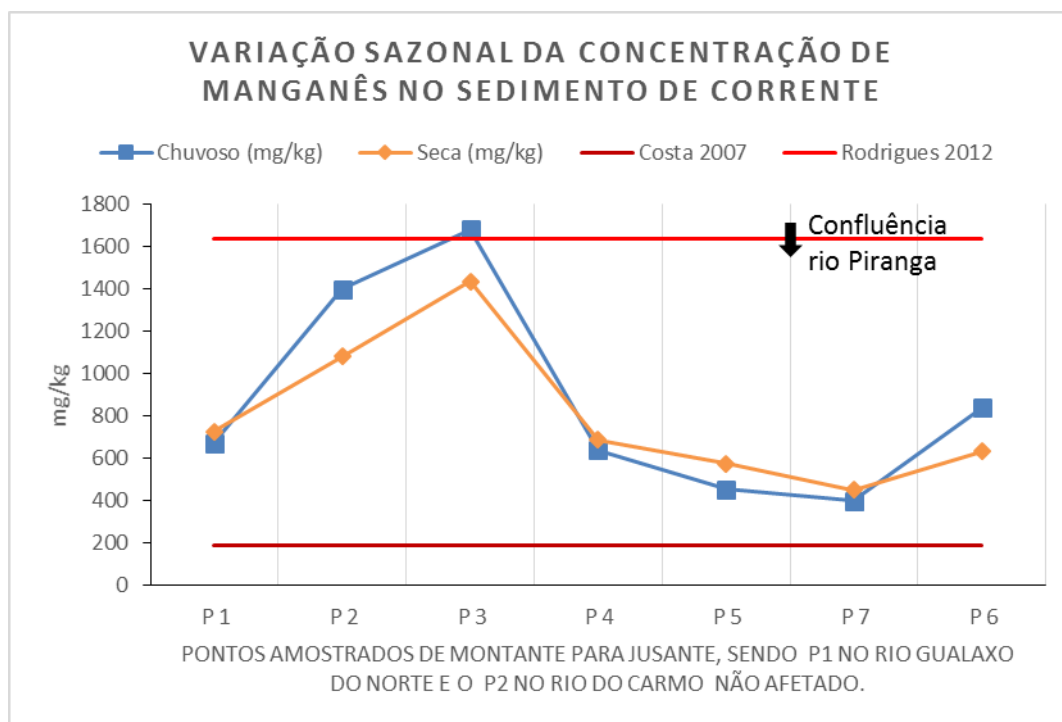


Figura 6.9 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de manganês nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4 ELEMENTOS TRAÇO

6.4.1 Arsênio (As)

O arsênio, como exemplificado no capítulo três, é um dos elementos mais bem estudados na bacia do rio do Carmo, sendo este, um exemplo de rio com altas concentrações de arsênio em suas cabeceiras, relacionados a extração de ouro em garimpos ao longo de seu curso (Eleutério 1997, Costa 2007). O *background* geoquímico para este elemento no rio do Carmo é de 35,3 mg/kg (Costa 2007) e de 64,2 mg/kg para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012).

As concentrações de arsênio nos rios ficaram abaixo do limite de quantificação em todos os pontos (<30,33), com exceção dos pontos P2 (rio do Carmo não afetado pela lama) e P3 (Barra Longa) no período chuvoso, que apresentaram concentrações de 40,53 mg/kg e 42,26 mg/kg respectivamente. No período de seca, estes pontos também ficaram abaixo do limite de quantificação. As concentrações de arsênio nestes pontos foram maiores na fração areia muito grossa/grossa e na fração silte/argila.

Os valores registrados ficaram acima do valor de referência do rio do Carmo para o elemento arsênio, mas segundo Costa (2007) este valor de referência pode variar até 810 mg/kg. Ambos os valores ficaram acima do máximo permitido por lei, que é de 17,0 mg/kg. (CONAMA 2004).

6.4.2 Bário (Ba)

O elemento bário, presente nas estruturas de feldspatos e micas, é facilmente complexado em argilas (caulinita, montmorilonita) e óxidos-hidróxidos de ferro e manganês (Wedepohl 1978). O *background* geoquímico para o rio do Carmo é de 18,5 mg/kg (Costa 2007) e de 141,4 mg/kg para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012).

No período chuvoso, as concentrações de bário variaram de 43,62 a 337,84 mg/kg, sendo os pontos P2 e P3 os de maiores concentrações (Figura 6.10). Já no período chuvoso, as concentrações variaram de 56,26 a 194,30 mg/kg, sendo novamente os pontos P2 e P3 os mais elevados. Neste período houve também uma elevação nas concentrações de bário na UHE Risoleta Neves. As frações mais grossas foram as que apresentaram maiores concentrações de bário.

Para o valor de referência para bário determinado no rio do Carmo, todos os pontos estão acima do seu valor geogênico. Já as concentrações no ponto P1 localizado no rio Gualaxo do Norte, ficaram abaixo do valor de referência estabelecido para este rio.

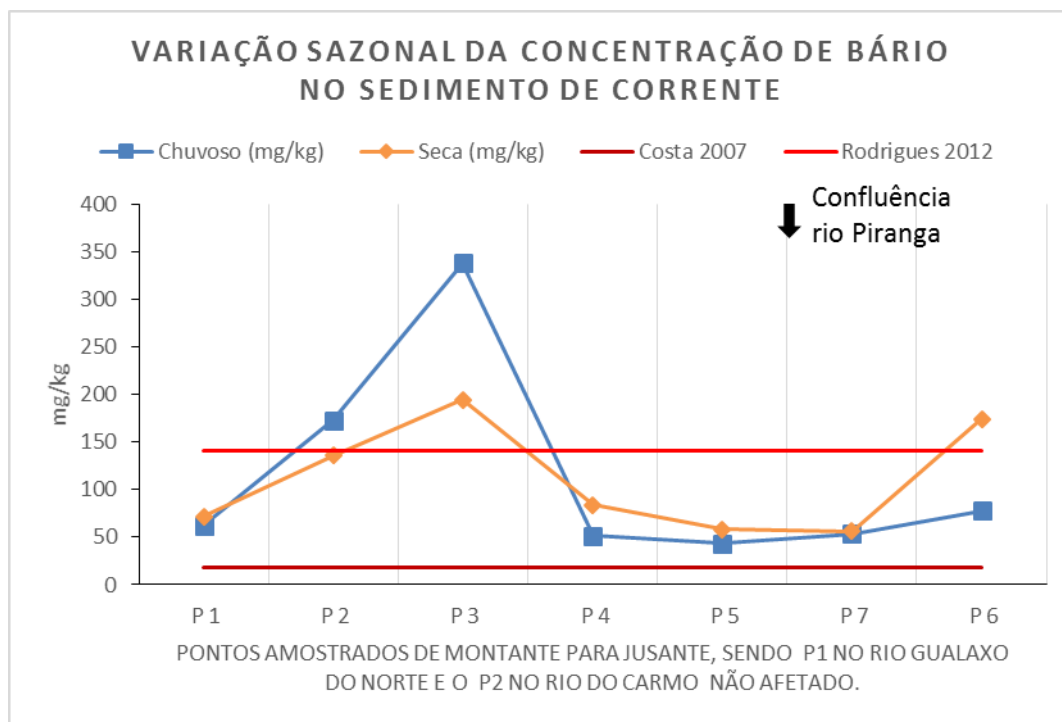


Figura 6.10 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de bário nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.3 Cádmi (Cd)

O cádmio é um elemento muito tóxico e de fácil absorção pelos tecidos de plantas e animais. Apresenta características calcófilas, tendo muita afinidade com S e Zn (Wedepohl 1978). No rio do Carmo, o *background* geoquímico para o cádmio é de 14,06 mg/kg (Costa 2007). Segundo o CONAMA (2004), um sedimento de Nível 2 deve conter no máximo 3,5 mg/kg de Cd.

As concentrações de cádmio no período chuvoso variaram de <0,037 a 0,099, apresentando valores acima do limite de quantificação apenas nos pontos P2, P3 e P6 (Figura 6.11). Já no período de seca, as concentrações variaram de 0,031 a 0,092, sendo os maiores valores encontrados nos pontos P1, P2 e P3, na região de Barra Longa.

As concentrações determinadas em todos os pontos amostrados ficaram abaixo do valor de referência determinado para o rio do Carmo e abaixo dos valores estabelecidos por lei.

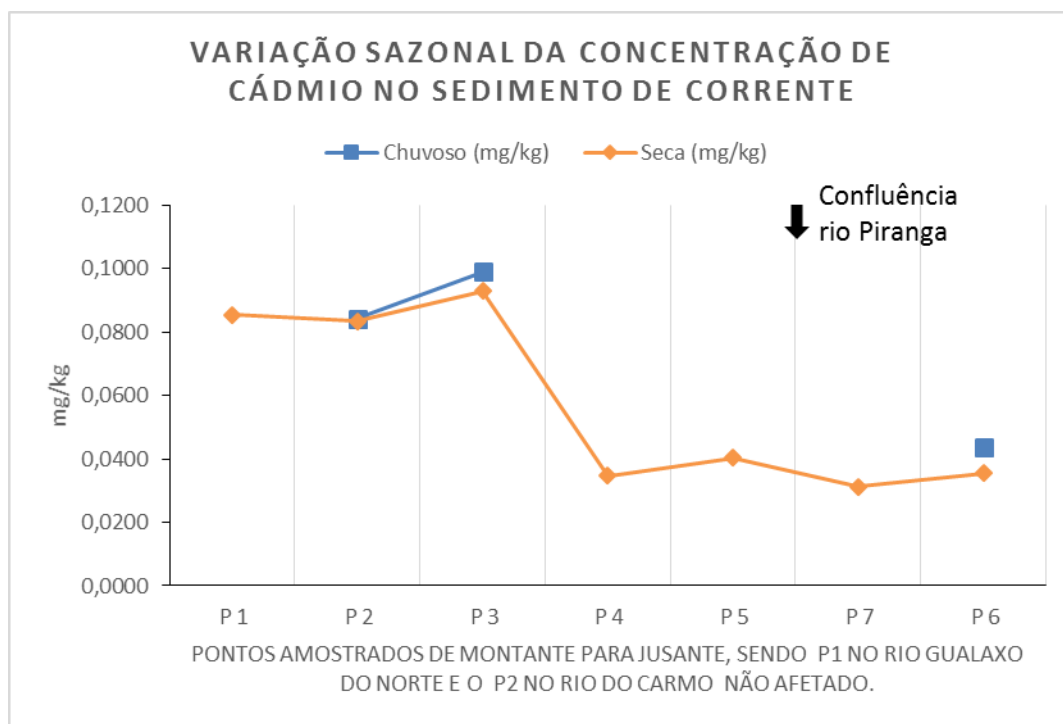


Figura 6.11 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cádmio nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.4 Cobalto (Co)

O cobalto é um elemento traço em rochas máficas-ultramáficas, correlacionados com o Fe-Mn e em rochas graníticas correlacionado com o Mg (Wedepohl 1978). Não há valores de referência locais para o cobalto, nem uma concentração máxima determinada pelo CONAMA.

As concentrações de cobalto no período chuvoso variaram de 7,82 a 24,18 mg/kg, com exceção do ponto P1 no rio Gualaxo do Norte que registrou 61,22 mg/kg (Figura 6.12). Já no período de seca, as variações foram menores ficando entre 6,99 a 22,45 mg/kg, sendo o P3 (Barra Longa) o ponto de maior concentração. As frações mais grossas foram as que apresentaram as maiores concentrações de cobalto.

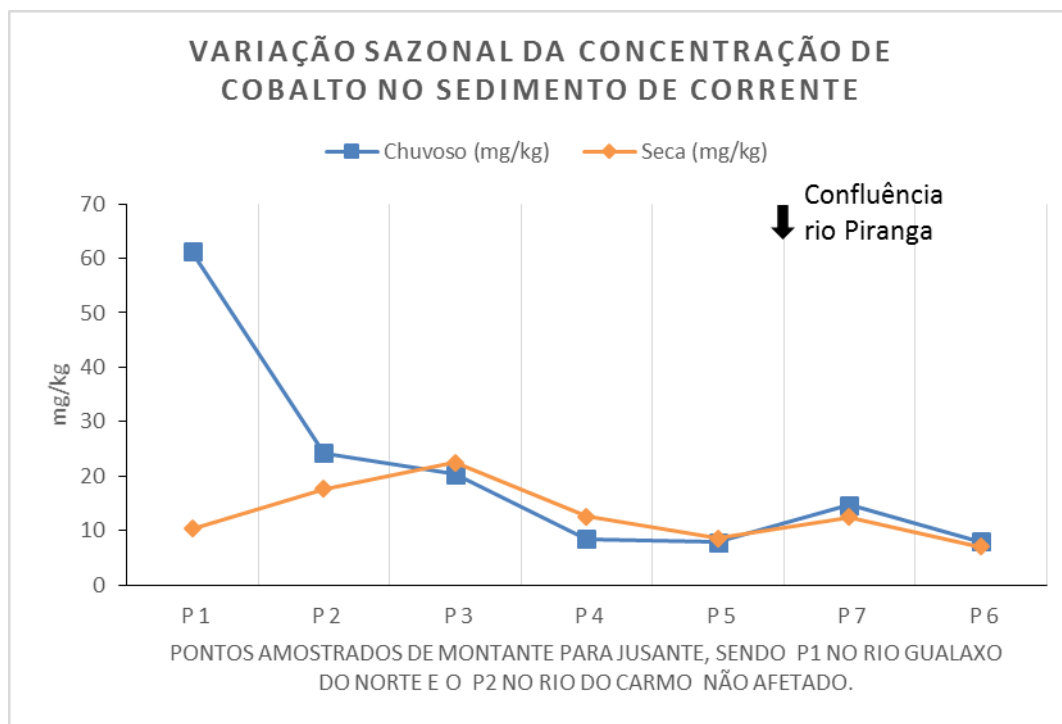


Figura 6.12 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cobalto nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.5 Cromo (Cr)

O cromo, assim como o cobalto, é encontrado com mais abundância em rochas máficas-ultramáficas, mas pode ser encontrado em todos os tipos de rochas (Wedepohl 1978). O *background* geoquímico para o elemento cromo no rio do Carmo é de 111,0 mg/kg (Costa 2007). Segundo o CONAMA (2004) um sedimento de nível 2 deve conter até 90 mg/kg de cromo.

No período chuvoso, as concentrações de cromo variaram de 9,25 a 65,01 mg/kg (Figura 6.13), sendo os picos mais altos encontrados no ponto P2 e P3 (59,26 e 65,01 mg/kg respectivamente). Já no período de seca, as variações ficaram entre 11,40 a 55,88 mg/kg, com os picos também localizados nos pontos P2 e P3. Há em ambos os períodos, um aumento de concentração no barramento da UHE Risoleta Neves. As frações mais grossas foram as que apresentaram as maiores concentrações de cromo.

Em nenhum dos pontos estudados, as concentrações de cromo foram superiores ao valor de referência determinado para o rio do Carmo, e nem superior ao máximo estabelecido por lei.

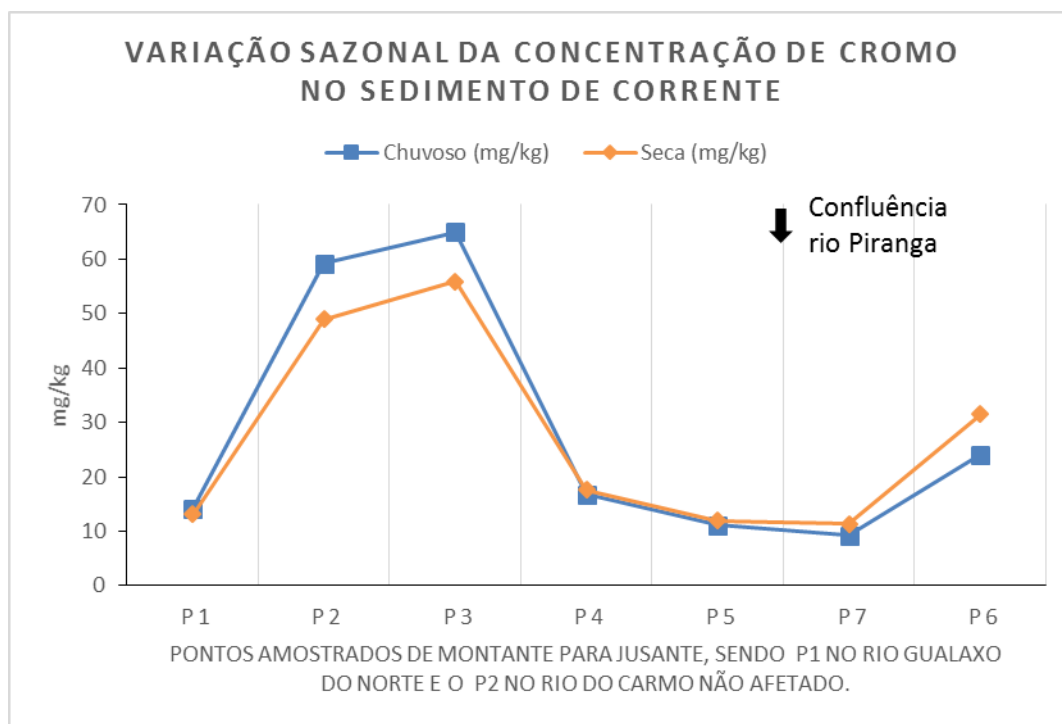


Figura 6.13 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de cromo nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.6 Cobre (Cu)

O cobre, elemento calcófilo, é um dos mais abundantes na litosfera, formando minerais primários (sulfetados) ou secundários (oxidados), sendo de fácil solubilização (Wedepohl 1978). O *background* geoquímico para o elemento cobre no rio do Carmo é de 135,1 mg/kg (Costa 2007). Em sedimentos de nível 2, o máximo de cobre permitido é de 197 mg/kg (CONAMA 2004).

No período chuvoso, as concentrações de cobre nos rios variou de 2,75 a 16,04 mg/kg, sendo as maiores concentrações registradas nos pontos P2 e P3 (Figura 6.14). Houve um pequeno aumento das concentrações no ponto P6 (UHE Risoleta Neves). As frações mais grossas foram as que apresentaram maiores concentrações de cobre. No período de seca, não houve valores acima do limite de quantificação (<3,27).

Em todos os pontos estudados, nenhuma concentração ficou acima do valor de referência local para o Cu. Todos os pontos ficaram abaixo da concentração máxima determinada por lei.

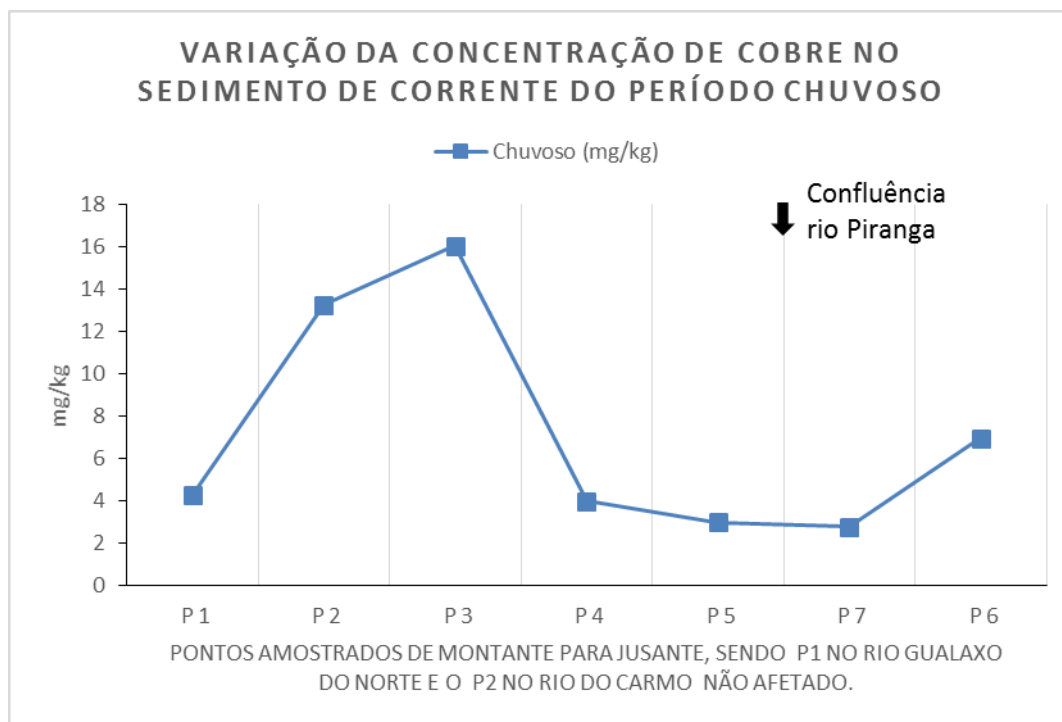


Figura 6.14 – Gráfico com a variação das concentrações de cobre nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios no período chuvoso.

6.4.7 Níquel (Ni)

O níquel é um elemento siderófilo que pode ser encontrado em diversos minerais, ocorrendo em altas concentrações em minerais ferromagnesianos e sulfetos, possuindo grande dispersão em meios aquosos (Wedepohl 1978). O *background* geoquímico para o elemento níquel no rio do Carmo é de 53,10 mg/kg (Costa 2007). Já no rio Gualaxo do Norte, este valor cai para 39,00 mg/kg (Rodrigues 2012). Segundo o CONAMA (2004), a concentração máxima de níquel em sedimentos deve ser de 35,9 mg/kg.

No período chuvoso, as concentrações de níquel nos rios variaram de 4,09 a 30,17 mg/kg (Figura 6.15), sendo os pontos P2 e P3 os de concentrações mais elevadas (24,06 e 30,17 mg/kg respectivamente). Já no período de seca, as concentrações variaram de 3,72 a 23,72 mg/kg, sendo os mesmos pontos P2 e P3 o de maiores concentrações. Nos dois períodos, houve um aumento das concentrações na UHE Risoleta Neves. As frações mais grossas foram as que apresentaram as maiores concentrações de níquel.

Em nenhum dos pontos, as concentrações de níquel ultrapassaram os valores de referência local para este elemento, nem o valor máximo estabelecido por lei.

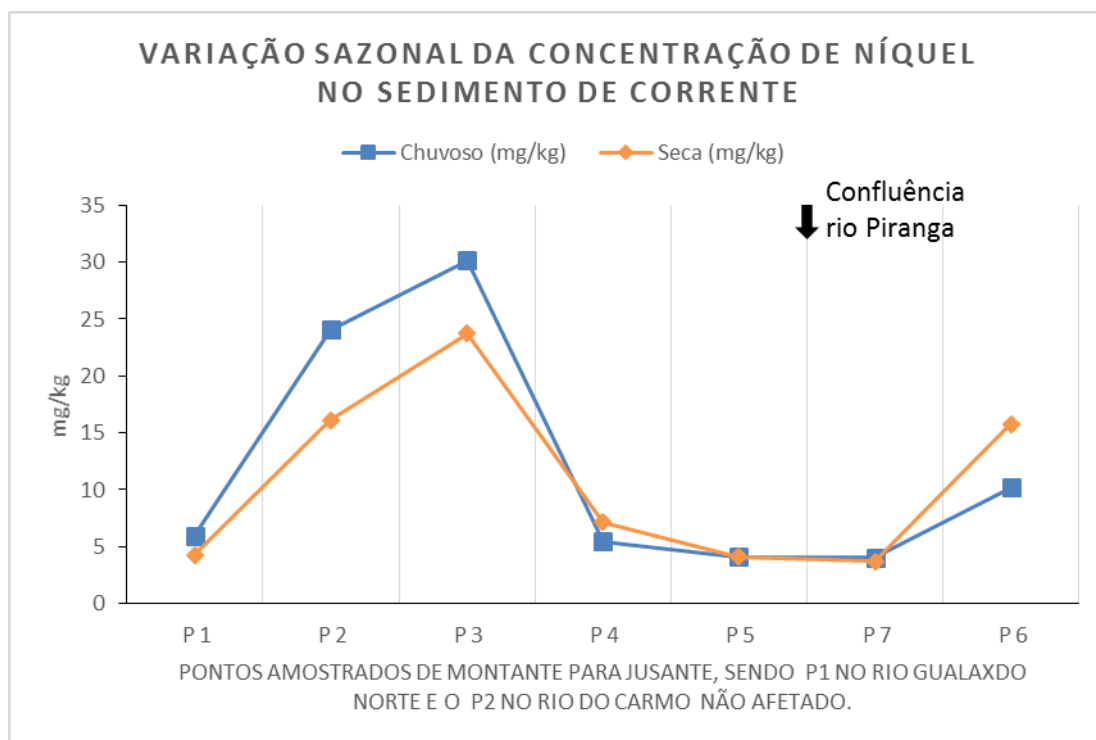


Figura 6.15 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de níquel nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.8 Chumbo (Pb)

Segundo Costa (Wedepohl 1978), o chumbo é um elemento de ampla distribuição na crosta terrestre, ocorrendo em mais de 200 minerais em todos os tipos de rochas. O chumbo forma complexos estáveis em matéria orgânica, óxidos e minerais de argila. As concentrações máximas de chumbo em sedimentos fica entre 35,00 a 91,30 mg/kg (CONAMA 2004). O *background* geoquímico para este elemento no rio Gualaxo do Norte é de 43,80 mg/kg (Rodrigues 2012).

No período chuvoso, as concentrações de chumbo variaram de 2,35 a 13,73 mg/kg, sendo os pontos P2 e P3 os de maiores concentrações (Figura 6.16). Já no período de seca, as concentrações variaram de 2,65 a 10,95 mg/kg, sendo novamente os pontos P2 e P3 os de maiores concentrações. Houve um aumento nas concentrações na UHE Risoleta Neves nos dois períodos. As frações mais grossas foram as que apresentaram as maiores concentrações de chumbo no período chuvoso (no período seco as concentrações ficaram abaixo do limite de quantificação).

Em nenhum dos pontos estudados, as concentrações ultrapassaram os valores máximos permitidos por lei, nem o valor de referência proposto para o rio Gualaxo do Norte.

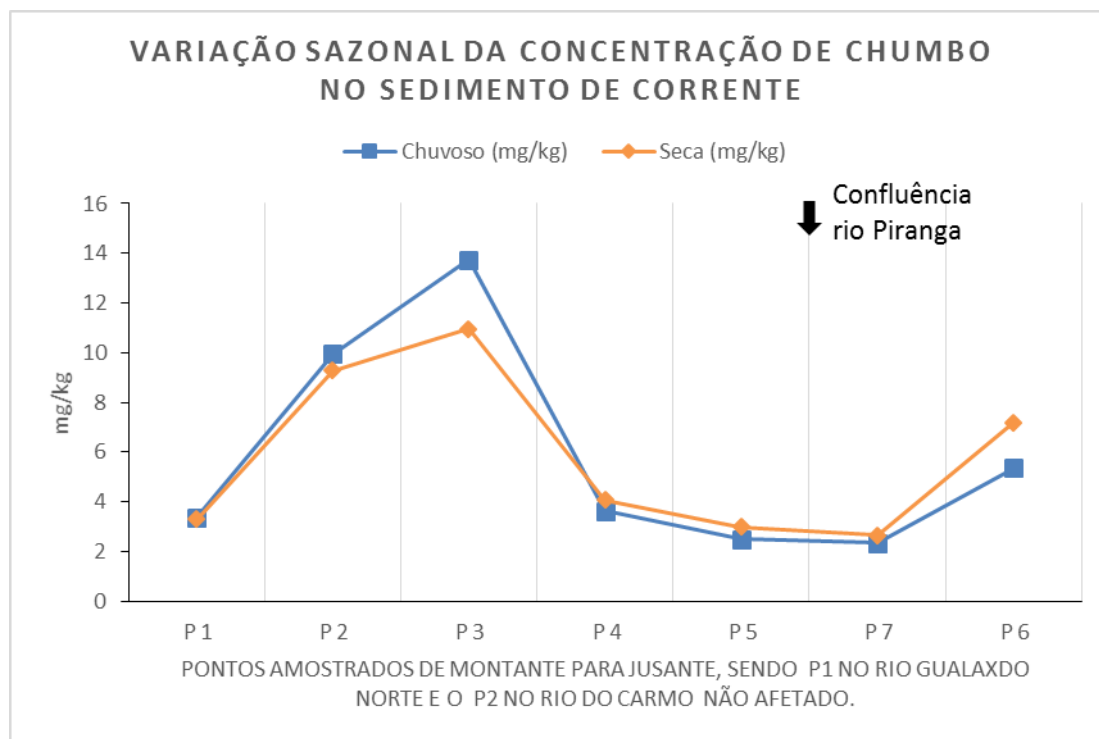


Figura 6.16 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de chumbo nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.4.9 Zinco (Zn)

O zinco é um elemento abundante na crosta terrestre. Altas concentrações de zinco podem estar diretamente relacionadas a lançamento de esgoto doméstico, causado sérios danos ambientais, apesar de ser um elementos essencial para os seres vivos (Costa 2001). O *background* geoquímico para o zinco no rio do Carmo é de 124 mg/kg (Costa 2007) e de 65,3 mg/kg para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012). A concentração máxima estabelecido por lei para o elemento zinco em sedimentos é de 315 mg/kg (CONAMA 2004).

No período chuvoso, as concentrações de zinco nos rios variaram de 6,70 a 34,85 mg/kg, sendo as maiores concentrações encontradas nos pontos P2 e P3 (Figura 6.17). Já no período de seca, as concentrações variaram de <0,042 a 0,36 mg/kg, com concentrações acima do limite de quantificação apenas nos pontos P2, P3, P6 e P7. As concentrações neste período foram muito menores que no período chuvoso. As frações mais grossas foram as que apresentaram as maiores concentrações de zinco.

Em nenhum dos pontos estudados as concentrações foram superiores aos valores de referência local para o elemento zinco. As concentrações foram menores que máximo permitido por lei.

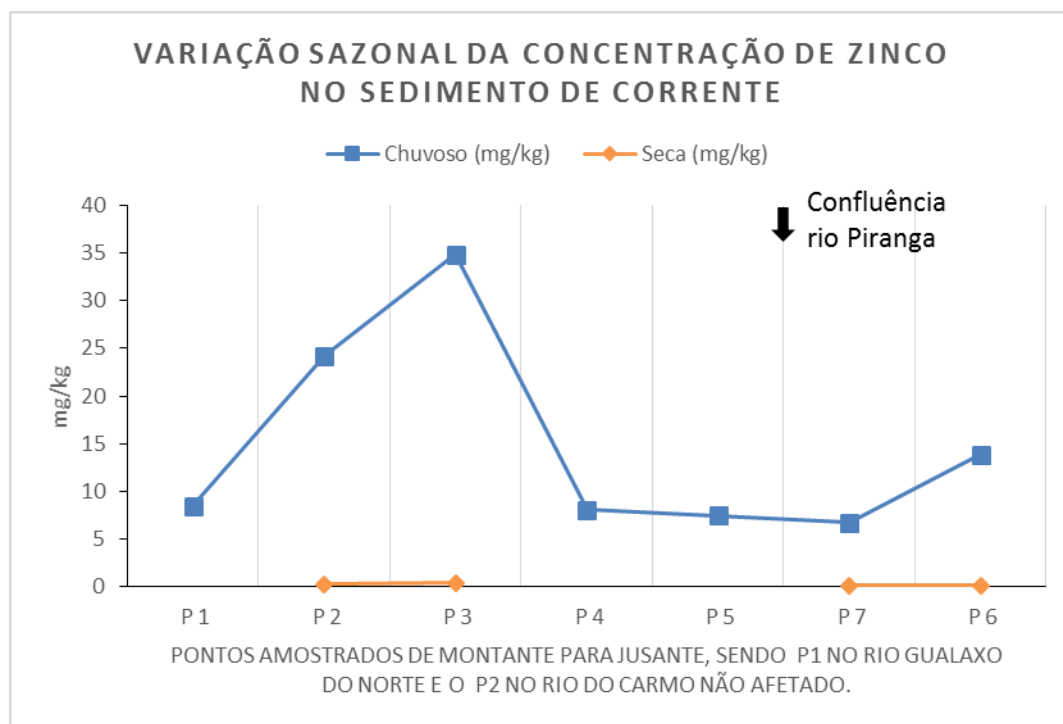


Figura 6.17 – Gráfico com a variação sazonal das concentrações de zinco nos sedimentos de corrente, determinados nos pontos amostrados ao longo dos rios.

6.5 ELEMENTOS TERRAS RARAS (ETR + Y)

Os elementos terras raras (ETR) mais o ítrio (considerado elemento gêmeo idêntico por semelhança de carga iônica e raio atômico), foram determinados nos pontos estudados e normalizados pelo *Post-Arquean Australian Shale* (PAAS) (McLennan 1989) para se obter um perfil de distribuição destes em cada sitio amostral. Os perfis são essenciais para a interpretação destes, mostrando com clareza as anomalias existentes. Em caso de anomalias, se utilizou de cálculos para se confirmar a presença destas (Tabela 6.1). Os ETR são elementos imóveis e pouco fracionados durante os processos de intemperismo, concentrando-se no material em suspensão e no sedimento de corrente em detrimento da fração dissolvida dos rios (Taylor & McLennan 1985), sendo útil na identificação da rocha mãe destes elementos.

Os espectros do período chuvoso (Figura 6.18) apresentam uma relação linear do ETR+Y, com um pequeno enriquecimento dos ETR médios. Há anomalias positivas bem marcadas do elemento Cério e Európio, confirmadas pela razão $Eu/Eu^* > 1$ e $Ce/Ce^* > 1$ (Tabela 6.1). O ponto P3, localizado em Barra Longa, apresentou, diferente dos outros pontos, uma anomalia positiva em lantânio. Já no período de seca, a relação linear dos ETR+Y com enriquecimento em ETR médios continua (Figura 6.19). Há,

além das anomalias de Cério e Európio já registradas no período chuvoso, anomalias extremamente positivas em ítrio, principalmente nos pontos P1, P4, P5 e P7.

O rio do Carmo não afetado pela lama, representando pelo ponto P2 é o que possui maiores concentrações em ambos os períodos analisados. A razão entre as concentrações no ponto P2 e a do ponto P1 no rio Gualaxo do Norte confirma isto (Figura 6.20 indicando razão superior a 1,0) evidenciando um pico no elemento Y, de igual valor em ambos os rios. Já a razão entre as concentrações do ponto P6, coletado na UHE Risoleta Neves e as concentrações do ponto P2 mostram que as concentrações diminuem de montante para jusante na área estudada (Figura 6.21)

Leão (2016) estudou as assinaturas geoquímicas das formações ferríferas bandadas da Formação Cauê localizadas no Sinclinal Conta História, uma das cabeceiras do rio Gualaxo do Norte. Através da análise dos ETR+Y, foram identificadas anomalias positivas em Eu, Ce e Y nas porções superficiais dos testemunhos de sondagem, sendo estas típicas das FFB do Paleoproterozoico no mundo (Leão 2016). Sendo assim as anomalias encontradas nos sedimentos podem estar diretamente ligada as assinaturas dos itabiritos (FFB's), que se concentraram nos sedimentos de corrente após o rompimento da barragem do Fundão.

A anomalia positiva de La na região de Barra Longa, pode estar relacionada a ação antrópica (Klaver *et al.* 2014), podendo estar relacionado a fertilizantes fosfatados (Santos 2018), que provavelmente foram utilizados no processo de recuperação de vegetação das margens do rio do Carmo após o rompimento da barragem.

Tabela 6.1 – Tabela com os valores das razões Eu/Eu* e Ce/Ce* do período chuvoso (C) e do período de seca (S), realçando as anomalias positivas nestes elementos em todos os pontos estudados.

Razão	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Eu/Eu*(C)	1,4395	1,5124	1,3457	1,4217	1,4991	1,4928	1,6705
Ce/Ce* (C)	1,1687	1,2743	1,1314	1,0814	1,1336	1,1585	1,1790
Eu/Eu*(S)	1,3677	1,3526	1,3173	1,3838	1,1332	1,5210	1,4227
Ce/Ce* (S)	1,1300	1,3416	1,1546	1,4214	1,1411	1,2631	1,1617

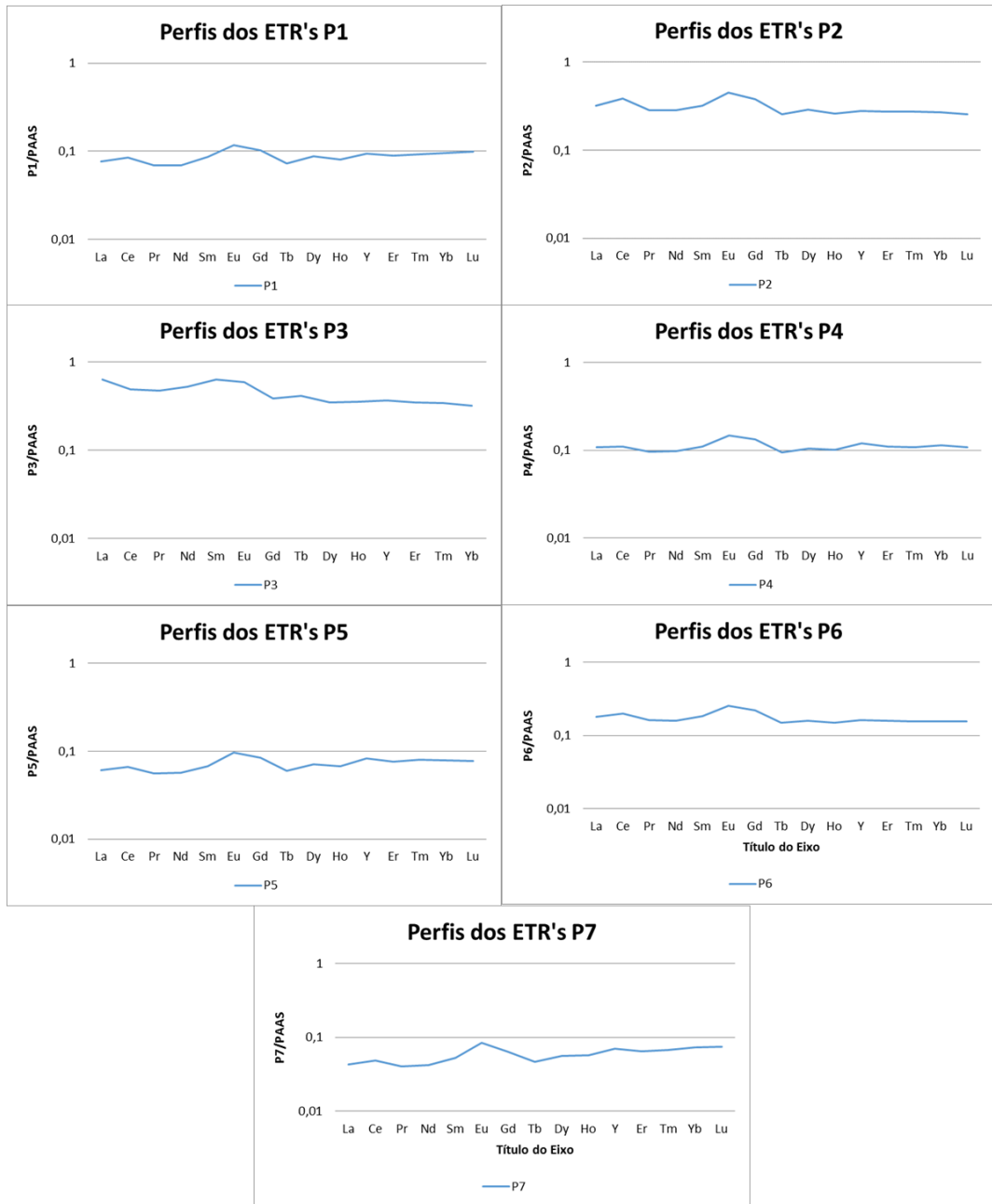


Figura 6.18 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y normalizado pelo PAAS, dos pontos estudados ao longo dos rios no período chuvoso.

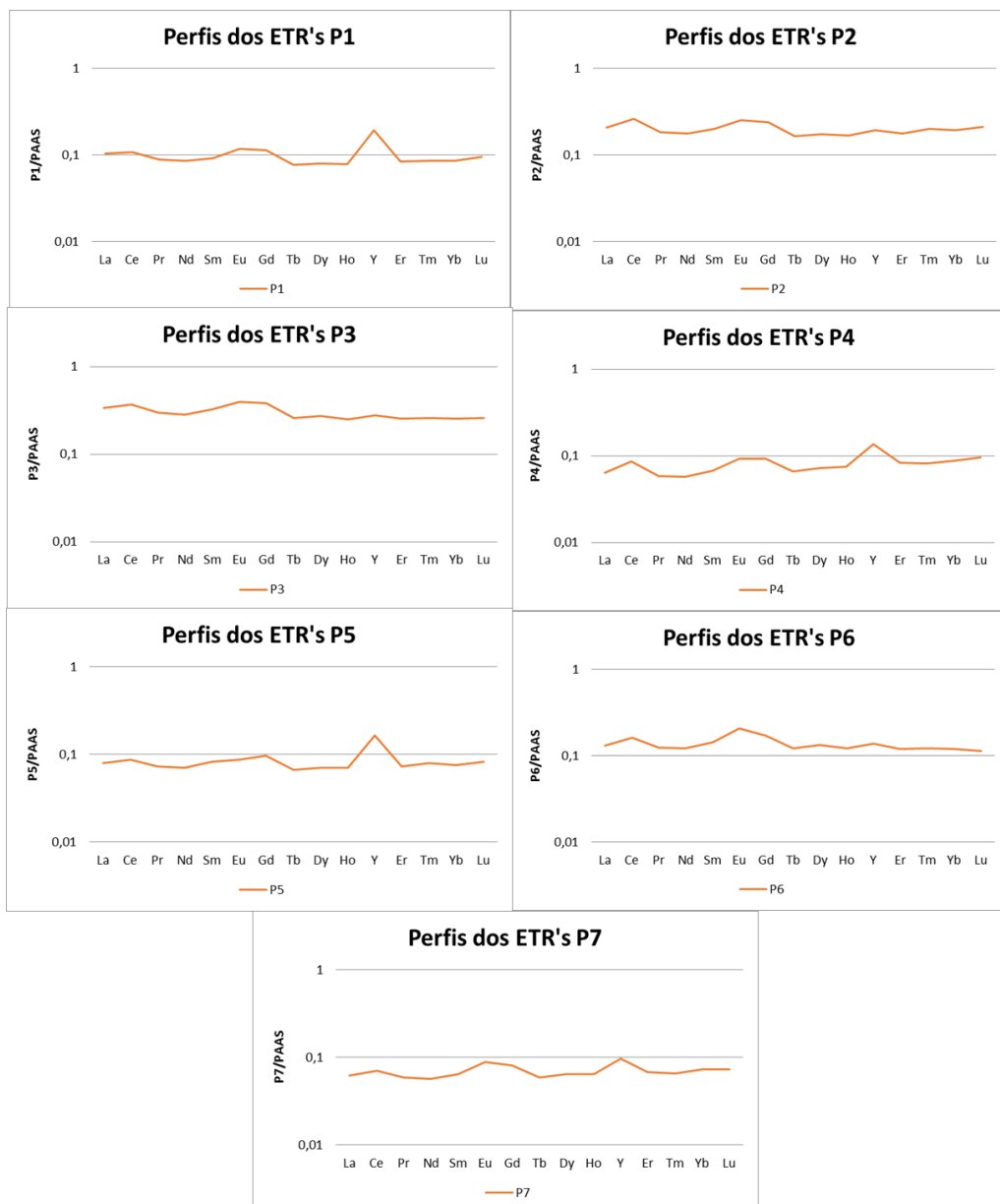


Figura 6.19 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y normalizado pelo PAAS, dos pontos estudados ao longo dos rios no período de seca.

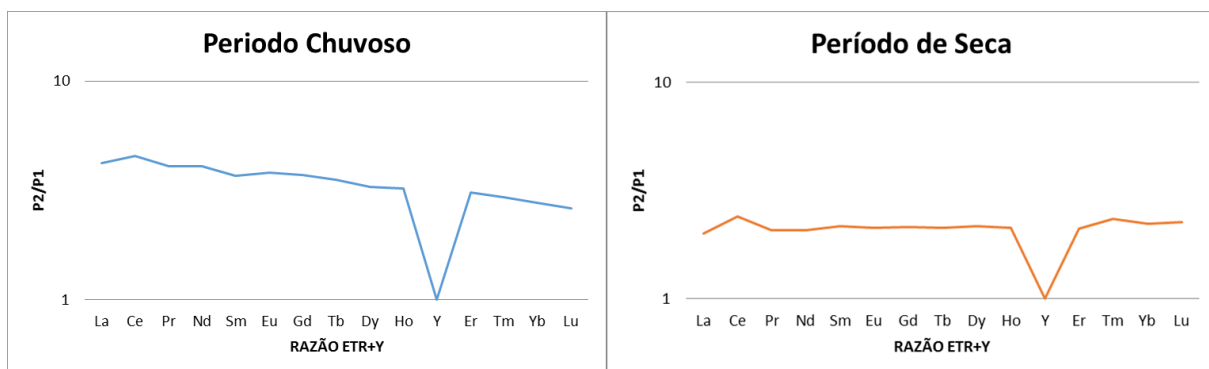


Figura 6.20 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y na razão P2/P1 evidenciando a maior carga de ETR provenientes do rio do Carmo.

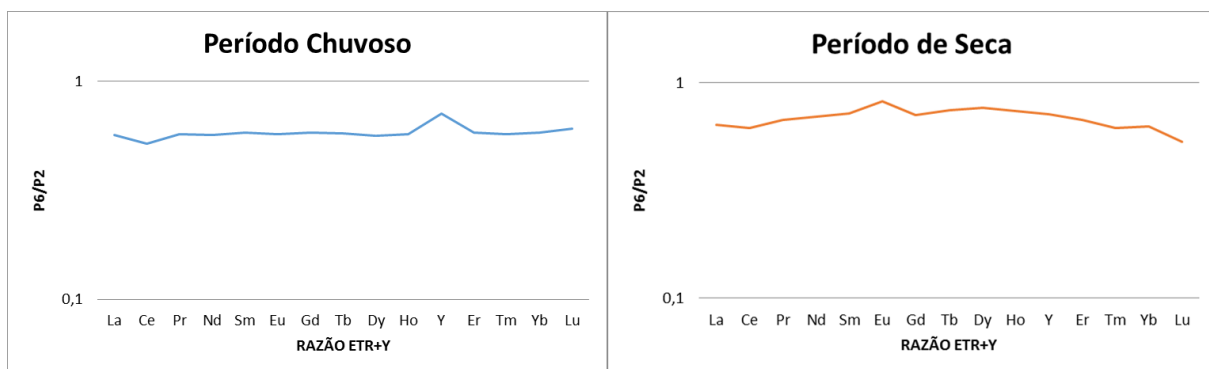


Figura 6.21 – Espectros com as concentrações dos Elementos Terras Raras + Y na razão P6/P1 evidenciando uma diminuição das concentrações de montante para jusante no trecho estudado.

6.6 DISCUSSÕES FINAIS

Relacionando os resultados descritos acima, a maior parte do elementos estudados não ultrapassaram os máximos previstos pelo CONAMA 344 (2004) e ficaram dentro dos valores de referência local para o rio do Carmo (Costa 2007) e para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012). Apenas os elementos Al, Fe, Mn, As e Ba foram determinados em valores superiores ao *background* local, em alguns pontos ou por todo o trecho estudado.

A distribuição dos elementos químicos nos rios seguem um certo padrão de concentração (com exceção do Fe e Co), sendo nítido este padrão nos gráficos apresentados neste capítulo. Este padrão mostra os pontos P2 e P3 (rio do Carmo não afetado pela lama e Barra Longa respectivamente) como os mais concentrados em elementos maiores e traço, diferentemente do ponto P1, com sedimentos oriundos exclusivamente do rio Gualaxo do Norte. As concentrações decaem do ponto P4 (após Barra

Longa) ao ponto P7 (Rio Doce), onde se obteve as menores concentrações. Já no ponto P6, localizado na UHE Risoleta Neves (a jusante do ponto P7), os sedimentos voltam a ficar concentrados pelo fato de acúmulo de sedimentos e rejeitos pelo barramento da UHE Risoleta Neves.

As frações granulométricas que apresentaram maiores concentrações nos elementos estudados foram as frações areia muito grossa e silte/argila. A concentração nas frações grossas podem estar relacionado a grãos de argilominerais e óxidos/hidróxidos de Fe e Mn, que absorvem e adsorvem estes elementos.

O alumínio, aparece fora dos valores de referência apenas no ponto P3 localizado em Barra Longa no período chuvoso. As altas concentrações de alumínio podem ser provenientes das rochas do embasamento cristalino, que afloram na região de drenagem do rio do Carmo e Rio Gualaxo do Norte. O alumínio possui correlações positivas para os elementos K, Ca, Mg e Na (Figura 6.22), elementos típicos de rochas meta-ígneas, formadoras do embasamento cristalino e da suíte calci-alcalina de Barra Longa (Granito Barra Longa). Isto corrobora com a origem geogênica do alumínio nos rios.

O bário ficou acima dos valores de referência locais para o rio do Carmo, mas dentro dos valores de referência estabelecidos por Rodrigues (2012) para o rio Gualaxo do Norte. Fica claro, através da análise dos gráficos, que a maior contribuição de Ba é oriunda do rio do Carmo, antes da entrada do rio Gualaxo do Norte. Estas altas concentrações de Ba foram registradas por Costa (2007) ao estudar o ribeirão do Carmo, com uma forte correlação entre os elementos Ba e Mn, mostrando a captura do bário após a oxidação de baritas pelos óxidos de manganês. Esta correlação é presente nos sedimentos de corrente analisados (Figura 6.23).

O arsênio foi detectável apenas em dois pontos durante o período chuvoso, sendo registrados valores superiores ao valor de referência local para ele. A alta concentração de As nos sedimentos do rio do Carmo já foram alvos de estudos por diversos autores (Eleutério, 1997, Costa 2007), que mostram uma origem geogênica para este, com intensificação por ação antrópica de garimpos e minerações auríferas. Apesar de Fernandes (2017) afirmar uma aumento das concentrações de As nos sedimentos do alto rio do Carmo, não fica claro a contribuição dos rejeitos do Fundão nas altas concentrações encontradas.

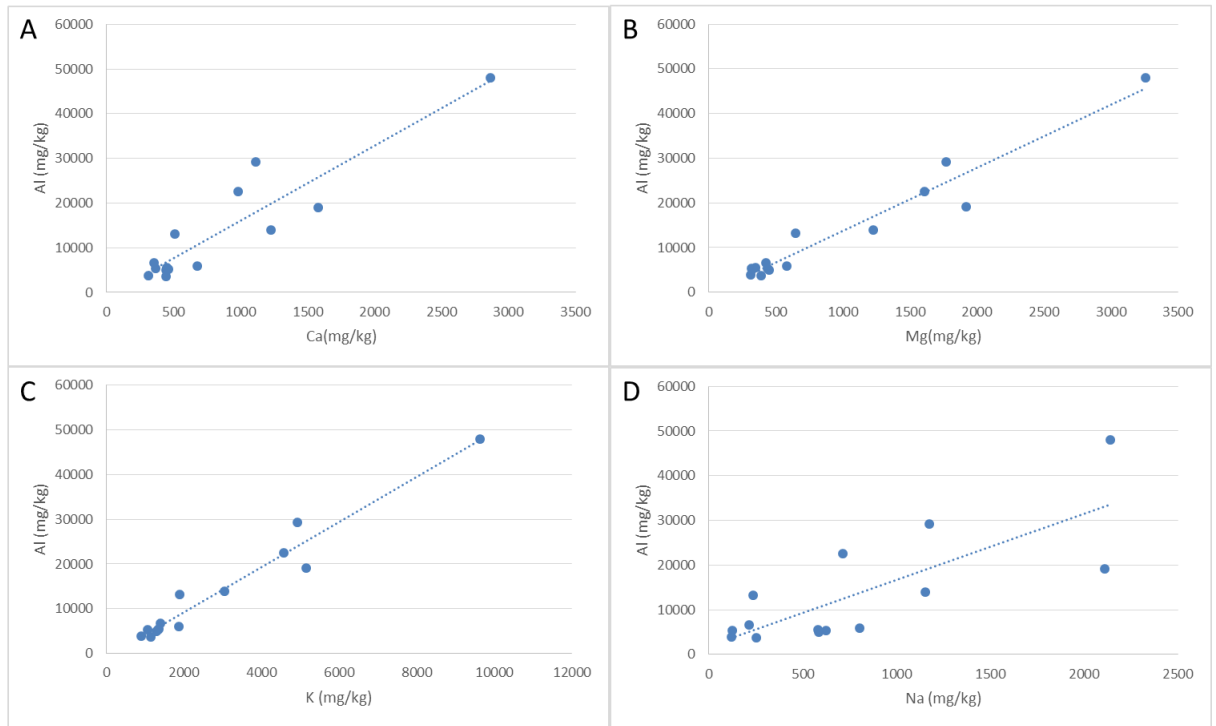


Figura 6.22 – Gráficos de correlação dos elementos maiores Ca, Mg, K e Na com o alumínio, apresentando tendências positivas através de regressão linear. A: Al x Ca; B: Al x Mg; C: Al x K; D: Al x Na.

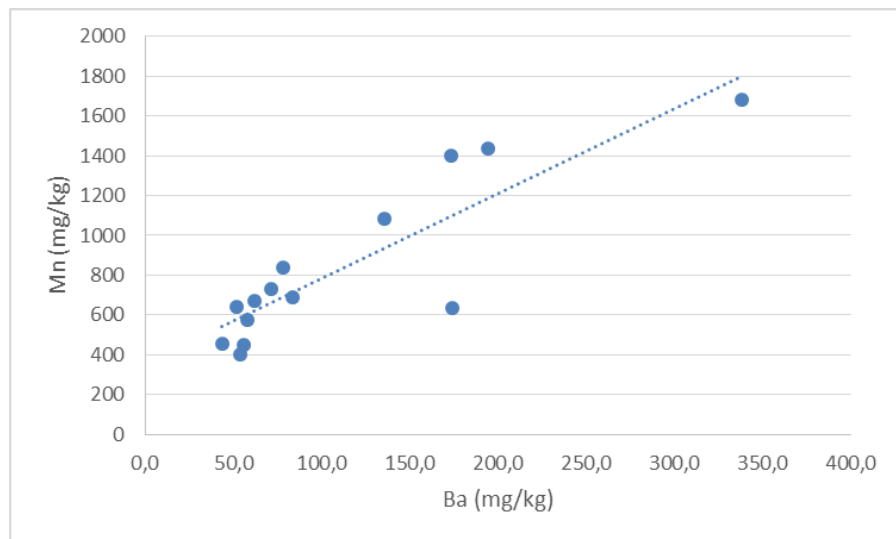


Figura 6.23 – Gráfico de correlação entre Mn x Ba, mostrando uma forte tendência positiva entre os dois elementos, através de regressão linear.

O manganês aparece em todos os pontos acima dos valores de referência local determinados para o rio do Carmo (Costa 2007) e dentro dos valores propostos para o rio Gualaxo do Norte (Rodrigues 2012). As concentrações de manganês foram elevadas principalmente nos pontos P2 e P3, mostrando uma influência maior dos sedimentos do rio do Carmo anterior a entrada do rio Gualaxo do Norte.

Apesar de estar acima do *background* sugerido, Costa (2007) registrou altas concentrações de Mn devido a rochas manganêsíferas encontradas nas bacias do rio do Carmo e do rio Gualaxo do Norte (Costa 2001, Rodrigues 2012). No trecho onde há este tipo de rocha aflorante, o *background* chega a ser de até 5800 mg/kg (Costa 2007). Costa 2001 mostra concentrações de Mn elevadas em barragens localizadas na cabeceira do rio Gualaxo do Norte, com origem em minerações antigas de Mn residual a montante. O manganês possui correlação positiva com o Ba (Figura 6.23), como já indicado em diversos trabalhos realizados anteriormente na área (Costa 2001, Rodrigues 2012, Canatto 2017).

O ferro ficou acima dos valores de referência estabelecidos para ambos os rios, tendo uma distribuição desinforme em relação aos outros elementos. As maiores concentrações foram obtidas nos pontos P1, P2, P4 e P6. No ponto P1, no rio Gualaxo do Norte, o ferro é, em sua grande parte, proveniente da barragem do Fundão. Canatto (2017) mostrou em seus estudos que o Fe está alto por todo o rio Gualaxo do Norte, diferentemente do encontrado por Rodrigues (2012) antes do rompimento. No ponto P2, temos uma elevada concentração de ferro, mas a mesma não está no fluxo da lama, visto que foi atingida apenas momentaneamente por fluxo reverso durante a cheia provocada pelo rompimento. Costa (2007) já salientava altas concentrações de Fe no rio do Carmo, por conta da geologia de suas cabeceiras. As altas concentrações no ponto P6 é reflexo do acúmulo de rejeitos pelo barramento da UHE Risoleta Neves. Houve uma baixa das concentrações nos pontos P3 e P7. No ponto P7, esta baixa, não apenas do Fe, mas da maioria dos elementos, podem estar relacionada a morfologia do rio, que anteriormente era uma área de remanso da barragem de Risoleta Neves, mas após seu esvaziamento, transformou-se em área de corredeiras com elevada taxa de erosão e não deposição de sedimentos (Figura 6.24). Já no ponto P3, a baixa nas concentrações ocorrem de forma anômola, visto a proximidade com dois pontos de alta concentração a montante e um a jusante. Os resultados dos espectros de ETR+Y nos mostra a relação destes sedimentos ricos em ferro com as FFB's da formação Cauê, apresentando anomalias em Eu, Ce e Y, típico destas rochas (Leão 2016)

O ponto P3, localizado no centro urbano de Barra Longa, fica a poucos quilômetros da junção do rio do Carmo com o rio Gualaxo do Norte, e apresentou resultados anômolos para quase todos os elementos nos dois períodos hidrológicos. As concentrações no período chuvoso aumentaram significativamente e a do Fe abaixou. Foi observado, durante trabalhos de campo, a colocação de *topsoils* (solos superiores fertilizados, utilizados para recuperação ambiental e plantio), de composição desconhecida, em terrenos adjacentes e margens do rio em Barra Longa (Figura 6.25). Este solo, visto que estava no período chuvoso, pode ter sido erodido e ajudado na diluição do Fe e no aumento das concentrações dos outros elementos nos sedimentos de corrente. A anomalia de La encontrada apenas neste ponto corrobora com a influencia deste *topsoils*, visto que esta anomalia está sendo ligada ao uso de fertilizantes como visto anteriormente.

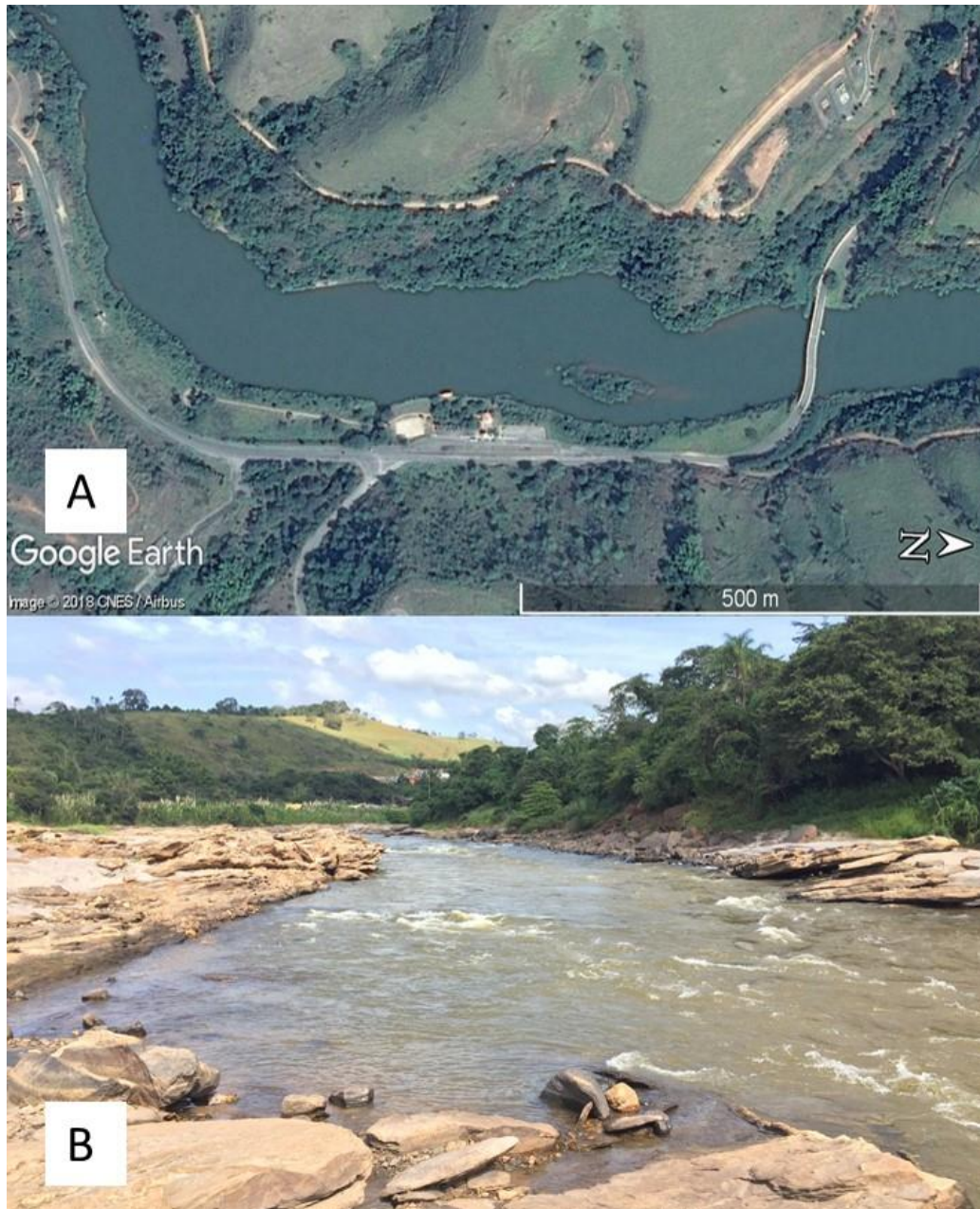


Figura 6.24 – Imagens mostrando a modificação do regime de velocidade (remanso para corredeiras) no trecho amostrado após o rompimento do Fundão e o esvaziamento da barragem da UHE Risoleta Neves. A: Imagem de satélite no ponto P7 em 31/05/2014, Google Earth 2018; B: Imagem com visada para o ponto P7 (Sul) atualmente, imagem do autor em 19/05/2018.



Figura 6.25 – A: Imagem no topo da margem retaludada do rio do Carmo em Barra Longa, mostrando a camada de *topsoils* com fertilizantes colocada acima da camada de solo original, protegidos por uma geomanta biodegradável; B: Imagem na base da margem retaludada, mostrando a desposição de sedimentos recentes acima da geomanta. É visível pela coloração, a mistura dos sedimentos (mas escuros por causa do ferro) com o *topsoils* (mais claro), comprovando a justificativa apresentada. Imagem do autor de 19/05/2018.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Após a realização das metodologias aplicadas e análise dos resultados obtidos neste trabalho, foi possível entender a distribuição e concentração dos elementos químicos maiores e traço em água, material particulado em suspensão e sedimentos de corrente. Utilizando-se de trabalhos anteriores, onde valores de referências foram determinados para as bacias estudadas e de legislações vigentes no Brasil, foi realizado o estudo comparativo, visando entender os impactos do rompimento do Fundão na geoquímica dos rios.

Na análise hidroquímica, todos os valores determinados para os parâmetros físico-químicos estão dentro dos limites máximos estabelecidos pelo CONAMA 357 (2005). Os elementos químicos apresentaram um certo padrão de distribuição nos rios estudados, ficando o Fe, Al, Cu e Ni acima dos limites do CONAMA 357 (2005) somente no ponto P2 (rio do Carmo não afetado pela lama).

É perceptível que as águas oriundas da bacia do ribeirão do Carmo possuem concentrações extremamente elevadas em relação as águas oriundas da bacia do rio Gualaxo do Norte, sendo ela responsável por aumentar as concentrações destes elementos no rio Doce. Estas altas concentrações podem estar relacionadas a complexa geologia de suas cabeceiras. O rompimento da barragem do Fundão em nada afetou a hidroquímica das águas fluviais no trecho monitorado.

Com a solubilização e análise do material particulado em suspensão (MPS) coletado no período chuvoso, foi possível quantificar as concentrações de elementos químicos neste tipo de sedimento. A barragem do Fundão foi a principal responsável por aumentar absurdamente as quantidades de MPS nos rios, principalmente no rio Gualaxo do Norte no período chuvoso, onde a concentração de MPS chegou a 1,47 g/L, sendo em maior parte composta de quartzo e hematita, materiais típicos das barragens de rejeito de ferro (Costa 2001). A geoquímica deste material apresentou concentrações de elementos superiores às do sedimento de corrente, sendo o ponto P2 (rio do Carmo não afetado pela lama) o de maior concentração, apesar de possuir baixa quantidade de MPS. Isto pode ser explicado pela complexa geologia de sua cabeceira. Os elementos As, Cr e Ni apresentaram valores acima do máximo permitido por lei, se comparado com o CONAMA 344 (2004).

O elemento ferro no MPS apresentou concentração de até 28% no rio Gualaxo do Norte e média de 27% no trecho monitorado, mostrando que o rompimento da barragem do Fundão teve impacto direto nas concentrações deste elemento no MPS dos rios.

As análises granulométricas realizadas nos sedimentos de correntes, demonstraram a predominância de sedimentos mais finos, diferente do encontrado anteriormente nos rios e comprovando

o trabalho de Canatto (2007). Este aumento pode ser relacionado a barragem do Fundão, visto que a maior parte dos rejeitos de minério de ferro possuíam esta granulometria (Canatto 2007). A solubilização das frações granulométricas indicou que os elementos estudados se concentram em frações mais grossas e em frações silte/argila.

As análises geoquímicas realizadas nos sedimentos de corrente demonstraram que a maioria dos elementos analisados ficaram abaixo dos valores de referência locais (Costa 2007; Rodrigues 2012), ficando acima somente os elementos Fe, Al, Mn, As e Ba em todos ou alguns dos pontos amostrados. Os elementos que vieram com altas concentrações do rio Gualaxo do Norte foram apenas o Fe e Co, sendo perceptível que o rompimento da barragem de Fundão tenha aumentado apenas as concentrações de Fe nos rios, atingindo valores de até 21%. A diminuição das altas concentrações encontradas nos rios antes do rompimento, pode ser entendida pela diluição ou carreamento destes elementos pela força da lama.

Em relação ao valor de *background* do Quadrilátero Ferrífero (Vicq 2015) para o elemento Fe, os pontos P1, P2, P4 e P6 no período chuvoso ficaram acima deste limite. Os elementos As, Al e Co ficaram acima de seus valores regionais no período chuvoso em pelo menos um ponto. Já o Mn ficou dentro do seu valor de referência.

Os elementos terras raras mostraram assinatura típica das formações ferríferas bandadas da região a montante do rio Gualaxo do Norte, fonte dos rejeitos oriundos da barragem do Fundão, com um pequeno enriquecimento em La em Barra Longa, que pode estar associado ao uso de fertilizantes na re-vegetação das margens degradadas.

Houve um certo padrão de distribuição das concentrações nos sedimentos de corrente pelos rios, sendo os pontos P2 e P3 os que apresentaram maiores concentrações. Há também um aumento das concentrações no barramento da UHE Risoleta Neves, o que é entendível pelo fato do barramento ter estocado grande quantidade de material da onda de cheia provocada pelo rompimento. As altas concentrações em Barra Longa (ponto P3) podem estar relacionadas ao material utilizado para recuperação das margens do rio (*topsoils*), que pode estar sendo erodido e misturado ao sedimento de corrente local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F. F. & Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90** (1/2):29-58.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Mar. Petrol. Geol.* **33**:127–139.
- Almeida, F. F. M. de. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, **7**: 349-364.
- Baltazar O.F. & Raposo F.O. 1993. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Mariana (SF.23-X-B-I), escala 1:100000, Estado de Minas Gerais. CPRM. 183 p.
- Borba R. P. 2002. *Arsênio em ambiente superficial: processos geoquímicos naturais e antropogênicos em uma área de mineração aurífera*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Dissertação de Mestrado, 111p.
- Brandalisi L. A. 1991. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Folha Ponte Nova (SF.23-X-B-II), escala 1:100000, Estado de Minas Gerais. CPRM. 161 p.
- Buscher D P. 1991. *Mercury in River Systems from Garimpeiro Activities in the Vicinity of Ouro Preto, Minas Gerais Brazil*. Colorado School of Mines, Colorado, dissertação de Mestrado, 140 p.
- Busher, D. & Roeser, H. 1992. Mercury in Rivers Systems from garimpeiro Activities in the Southerastern área of the iron Quadrangle, M.G., Brazil – 13. *Geowissenschaftliches Lateinamerika Kolloquium*. Abstracts; Münster.
- Cabral A. R., Zeh A., Koglin N., Gomes Jr. A. A. S., Viana D. J., Lehmann B. 2012. Dating the Itabira ironformation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga: depositional U–Pb age of zircon from a metavolcanic layer. *Precambrian Research*, **204-205**: 40-45.
- Cannato, B. F. 2017. Caracterização Geoquímica dos Sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. Trabalho Final de Graduação, 83p.
- Cavalcanti J.A.D. 2003. *Origem dos turmalinitos auríferos na região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG: Evidências de campo, petrografia, química mineral e dados isótopos de Nd e Sr*. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. Tese de Doutorado, 176p.
- CETESB 1998. Avaliação do grau de contaminação do sedimento ao longo do canal de navegação do porto de Santos. São Paulo, 26p.
- Colombini, M. P. 2008. Poluição atmosférica e seu impacto no sistema cardiovascular. *Einstein*, **6**(2):221-226
- CONAMA.1986 Resolução nº 20. Ministério do Meio Ambiente. 1986. Conselho Nacional do Meio Ambiente. 18/06/1986. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>> Acessado em 17 Jun 2017
- CONAMA.2004. Resolução nº 344. Ministério do Meio Ambiente. 2004. "Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras, e dá outras providências". - Data da legislação: 25/03/2004 - Publicação DOU nº 087, de 07/05/2004, págs. 56-57. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=445> Acessado em 05 Mar 2017
- CONAMA. 2005. Resolução nº 357.Ministério do Meio Ambiente. 2005. "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.". - Data da legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>. Acessado em 05 Mar 2017.
- CONAMA. 2012. Resolução nº 454. Ministério do Meio Ambiente. 2012. "Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional." - Data da legislação: 01/11/2012 - Publicação DOU, de 08/11/2012, Seção 1, pag. 66. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=693>> Acessado em 05 Mar 2017

Araújo, G. S. 2018, Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo....

Costa A. T. 2001. *Geoquímica das águas e dos sedimentos da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, leste –Sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG): Estudo de uma área afetada por atividade de extração mineral*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 146p.

Costa A. T., Nalini Jr. H.A., Lena J. C., Castro P. T., Friese K., Morgenstern P. 2006. Sediment contamination as na historical register of auriferous exploitation in floodplains and alluvial terraces in Carmo River basin, Southeast Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Revista Acta hydroquímica and hydrobiologica*, **34**: 245-256.

Costa, A. T. 2007. *Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais*. Tese de Doutorado. Ouro Preto: UFOP.

Costa A.T., Nalini-Jr H.A., Castro P.T.A., Tatumi S.H. 2010. Análise estratigráfica e distribuição do arsênio em depósitos sedimentares quaternários da porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, bacia do Ribeirão do Carmo, MG. *REM: Revista Escola de Minas*, **63**(4):703-714.

CPRM. 1993. Gerenciamento Integrado da Bacia do Rio Doce: Diagnóstico, Plano Diretor, Simulação Financeira. Projeto Rio Doce, Ministério das Minas e Energia, 254p.

CPRM; CODEMIG, 2014. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil. Belo Horizonte. Disponível em < <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/> > . Acessado em 2 Out 2017.

CPRM; ANA, 2015. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce: Relatório 02: Geoquímica. Brasília. 35p. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/eventos_criticos/riodoce_relatorio2.pdf > . Acessado em: 10 Jan 2018

Cunha, S. B. 1996. Geomorfologia Fluvial. In: Cunha S. B. e Guerra. A. J. T. (orgs) Geomorfologia: Exercícios, técnicas e aplicações. Editora Bertrand do Brasil: Rio de Janeiro.

Dopico, C. I. M. Lana, C. C.; Moreira, H. S.; Cassino, L. F.; Alkmin, F. F. 2017. U–Pb ages and Hf-isotope data of detrital zircons from the late Neoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. *Precambrian Research*. **291**:143-161

Dorr II J.V.N. Gair J.E., Pomerene J.B., Rynearson G.A. 1957. *Revisão da estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. Brasil*. DFPM, DNPM 81. 31p.

Dorr II J. V. N. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS/DNPM. *Professional Paper*, 641-A. 110p.

Eleutério L. 1997. *Diagnóstico da Situação Ambiental da Cabeceira da Bacia do Rio Doce, MG, no Âmbito das Contaminações por Metais Pesados, em Sedimentos de Fundo*. Ouro Preto. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado. 154 p.

Endo I. 1997. *Regimes Tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa San Franciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, MG*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 243 p.

Endo I. & Machado R. 2002. Reavaliação e Novos Dados Geocronológicos (Pb/Pb e K/Ar) da Região do Quadrilátero Ferrífero e Adjacências. *Revista Geologia USP Série Científica*, **2**:23-40.

Eschwege W. L. von, 1833. *Pluto Brasilienses*. Ed. Itatiaia-Edusp, Belo Horizonte, 2v. Publicado em 1979. Tradução de Domício de Figueiredo Murta.

Fernandes, K. N. 2017. *Qualidade das águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo - Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): metais, metaloides e Índice de Qualidade das Águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundação da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 223p.

Förstner, U., Salomons, W; Stigliani, W. M., In: *Biogedynamics of Pollutants in Soils and Sediments* eds.; Springer: Berlin, 1995, cap. 11.

Gaillardet J., Viers, J. & Dupré, B. 2004. Trace Elements in River Waters. In: Drever, J.I. (ed.) *Treatise on geochemistry - surface and ground water, weathering, and soils*. Oxford, Elsevier Pergamon, p.225-272.

- Garrels R.M. & Christ C.L. 1965. *Solutions, minerals and equilibria*. London, Harper & Row. 450p. In: Szikszay, M. 1993. *Geoquímica das águas*. Bol. IG-USP, Sér. didát., 5:1-166.
- Gerrits L. & Edelenbos J. 2004: Management of sediments through stakeholder involvement - the risks and value of engaging stakeholders when looking for solutions for sediment related problems. *Journal of Soils and Sediments* **213**: 239-246.
- Guilherme L.R.G. *et al.* 2005. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. *Tópicos Ci. Solo*, **4**:345-390.
- Harder, E.C., Chamberlin, R.T. 1915. A Geologia da região central de Minas Gerais. B. *Geográfico*. P. 492-543.
- Hursthouse, A. S. The relevance of speciation in the remediation of soils and sediments contaminated by metallic elements-an overview with specific examples from central Scotland. *Journal Environmental Monitoring*, **3**:49-60, 2001.
- IBGE. 2006a. Mapa de clima do Brasil, escala 1:5. 000.000. Rio de Janeiro. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/clima.pdf > Acessado em 05 Jan 2018
- IBGE. 2006b. Mapa de vegetação do Brasil, escala 1:5. 000.000 Rio de Janeiro. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf>Acessado em 05 Jan 2018
- Jordt-Evangelista H. 1984. *Petrologische Untersuchungen im Gebiete zwischen Mariana und Ponte Nova, Minas Gerais, Brasilien*. Universidade Técnica de Clausthal, Alemanha, Tese de doutoramento, 183p.
- Jordt-Evangelista H. 1992. O Grupo Dom Silvério, SE de Minas Gerais: petrografia, metamorfismo, geoquímica e geologia econômica. *Revista Escola de Minas*, **45**(1/2):140-142.
- Klaver, G., Verheul, M., Bakker, I., Petelet-Giraud, E., Négrel, P. 2014. Anthropogenic Rare Earth Element in rivers: Gadolinium and lanthanum. Partitioning between the dissolved and particulate phases in the Rhine River and spatial propagation through the Rhine-Meuse Delta (the Netherlands). *Applied geochemistry*, **47**: 186-197.
- Ladeira, E. A. 1980. *Metallogenesis of gold at the Morro Velho Mine and in Nova Lima district, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Tese (PhD), University of Western Ontario, London, 272p.
- Lana, C., Alkimin, F. F., Armstrong, R., Scholz, R. A., Romano, R. C. 2013 The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, **230**: 1-30.
- Leão, L. P. 2014. *Caracterização Geoquímica de Sedimentos da Bacia do Rio Maynard, MG*. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. Trabalho Final de Graduação, 93p.
- Leão, L. P. 2016. *Estudo mineralógico e químico das formações ferríferas bandadas da área do Sinclinal Conta História*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 137p.
- Lima, J.G.A., Ferreira C.M., Schmidt J.C., D'Elboux C.V., Moreira M.D., Oliveira Júnior J.O.1974. Relatório do mapeamento do setor G da geotransversal E-W. Ouro Preto, Conv DNPM/UFOP
- Lobato L.M., Ribeiro-Rodrigues L.C., Vieira L.W.R. 2001. Brazil's premier gold province. Part II: geology, and genesis of gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita*, **36**:249-277.
- Machado N., Schrank A, Noce C.M., Gauthier G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeastern Brazil. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **141**:259-276.
- Magalhães, R. A. 2001. Erosão: definições, tipos e formas de controle. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, ANAIS. Disponível em :< https://pt.scribd.com/doc/76585431/EROSAO>. Acesso em 05 Jan 2018
- Makkaveyev N. I. 1986. Channel process as a feature of erosion-accumulative process, Papers of Channel Processes Section, Scientific Committee "Integrated Exploitation and Protection of Water Resources", Vol.1. General Problems of Channel Process Theory, Hydrometeoizdat Publ., Leningrad, pp.56-65 (in Russian).
- Matschullat J., Ottenstein R., Reimann C. 2000. Geochemical background – can we calculate it? *Environmental Geology*, **39**(9):990-1000.

Araújo, G. S. 2018, Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo....

Maxwell, C.H., Simmons, G.C. 1958. The Batatal Formation. Boletim da Sociedade Brasileira De Geologia, São Paulo, v.7, n.2, p. 60-61

McLennan S.M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: B.R. Lipin & G.A. McKay (eds). Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. *Reviews in Mineralogy*, **21**: 169-200.

Medeiros Júnior E.B. & Jordt-Evangelista H. 2010. Petrografia e geoquímica dos granulitos do Complexo Acaiaca, região centro-sudeste de Minas Gerais. *Revista Escola de Minas*, **63**(2): 219-228.

Medeiros Júnior E. B. 2016. Evolução Petrogenética de Terrenos Granulíticos nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Tese de doutorado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 167p.

Miall A.D. 1992. Alluvial Deposits. In: Walker, R.G. & James, N.P. (ed.) Facies Models: response to sea level change. Stittsville, Geological Association of Canada, 119-142.

Nalini Jr H. A. 1993. Análise Estrutural descritiva e cinemática do flanco sul e terminação periclinal do anticlinal de Mariana e adjacências, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. IGC/UFMG, Dissertação de Mestrado, 132p.

Noce, C.M.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Alkmin, F.F. 2007a. O embasamento arqueano e paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí. *Geonomos*, **15**: 17-23

Noce, C.M.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Armstrong, R., Piuzana, D. 2007b. Evolution of polycyclic basement complexes in the Araçuaí Orogen, based on U-Pb SHRIMP data: Implications for Brazil – Africa links in paleoproterozoic time. *Precambrian Research*.

Oliveira M. R. 1998. Investigação por Contaminação por Metais Pesados no Sedimento de Corrente e Água do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais e Arredores. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 180p.

OMEE – Ontário Ministry of the Environment and Energy. 1974. Guidelines and Criteria For Water Quality Management in Ontario. Toronto: Ontário Ministry of the Environment and Energy, 1974. 26p.

OMEE – Ontário Ministry of the Environment and Energy. 1993. *Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontário*. Toronto: Ontário Ministry of the Environment and Energy, 1993. 27p.

Pimentel H S. 2001. *Caracterização Geoquímica da Contaminação das Águas da Serra de Ouro Preto, Minas Gerais*. Universidade federal de Ouro Preto, Dissertação de mestrado, 113 p.

Ramos, T. S. 2017. *Análise química das águas do rio Gualaxo do Norte após o rompimento da Barragem de Fundão*. Departamento de Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Trabalho Final de Graduação, 41p.

Renger, F. E.; Noce, C. M.; Romano, A. W., Machado, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2**(1):1-11.

Rhodes, V. P. 2010. *Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo de ouro – Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG*. 2010. 93 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 93p.

Ribeiro R. K. 1998. *Mineralogia, Geoquímica e Gênese das ocorrências Auríferas no Flanco Norte do anticlinal de Mariana, Quadrilátero Ferrífero: Uma Nova Tipologia de Minério denominada Bugre*. Brasília, Universidade de Brasília. Dissertação de Mestrado, 116p.

Rodrigues A. S. L. 2012. *Caracterização da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, Mg, Brasil: Avaliação Geoquímica Ambiental e Proposição de Valores de Background*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 190p.

Salomons, W., Förstner, U. *Environ. Technol. Lett.* 1980, **1**, 506.

Samarco, 2016. Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado. Acesso em :<http://www.samarco.com/wp-content/uploads/2016/10/prai-agosto.pdf>.

- Sampaio, G. M. S. 2012a. *Determinação de elementos-traço em amostras de formações ferríferas por ICP-MS e produção de um material de referência para controle de qualidade*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 56p.
- Sampaio, F. E. 2008b. *Metais associados ao material particulado na região central da cidade de Goiânia e os possíveis agravos à saúde da população*. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 124 p.
- Santos A.C. 1997. *Noções de Hidroquímica*. In: Feitosa F.A.C., Manoel Filho J. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. Fortaleza, CPRM: LABHID-UFPE, p.81-108.
- Santos, R. L. 2017. *Caracterização geoquímica das águas e sedimentos da Bacia do Ribeirão Sardinha, porção sul do Quadrilátero Ferrífero (MG)*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 173p.
- Santos, M. G. 2018. *Caracterização da rocha fosfática de angico dos dias (BA) visando a recuperação de cério, lantânio e neodímio*. Dissertação de Mestrado. Escola politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 153p.
- Silva, A. M. da, Schulz, H. E.; Camargo, P. B. de. *Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas*. São Carlos: RiMa, 2003. 320 p.
- Stevens Jr. H. H. & Yang, C. T. 1989. *Summary and use of selected fluvial sediment discharge formulas*. USGS, Water Resources Investigations Report 89 – 4026. Denver, CO.
- Szikszy, M. 1993. *Geoquímica das águas*. Bol. IG-USP, Sér. didát., 5:1-166.
- Taylor, S. R.; McLennan, S.M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 pp.
- Tarvainen, T. & Kallio E. 2002. Baselines oferta in bioavailable and total heavy metal concentration sin Finland. *AppliedGeochemistry* **17**(8): 975-980
- Teixeira W.1982. Geochronology of the Southern parto f the São Francisco Cráton. In: ISAP, Salvador. *Revista Brasileira Geociências*, São Paulo, **12**(1/3):268-277
- Teixeira, Wilson. Fairchild, Thomas Rich. Toledo, M. Cristina Motta de. Taioli, Fabio. 2003 *Decifrando a Terra*. Ed. 2. Companhia Editora Nacional. USP. São Paulo.
- USEPA – U.S. Environmental Protection Agency, (1985) Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses. In Stephan, C. E.. Mount, D. I., Hansen, D. J., Gentile, J. H., Chapman, G. A. e Brungs, W. A. (eds). *Office of research and development. Environmental research laboratories*, Duluth, MN.
- USEPA. 1994. *Water Quality Standards Handbook*. Office of Water Regulations and Standards. 2 Ed. Washington, DC. 202
- Varejão E.V.V., Bellato C.R., Mello J.W.V., Fontes M.P.F. 2009. Otimização das condições de pré-redução do As(V) em extratos do método BCR para quantificação de As por Hg-AAS. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **33**: 875-883.
- Varejão E.V.V, Bellato C.R., Fontes M.P.F., Mello J.W.V. 2011. Arsenic and trace metals in river water and sediments from the southeast portion of the Iron Quadrangle, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, **172**: 631-642.
- Vicq, R. F. C.2015. *Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero*. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado. 190p.
- Zeferino J., Heitzmann Jr. J. F., Tobschall H.J., Roeser H. 1998. Acumulação e transporte de mercúrio devido à atividade garimpeira em sistemas fluviais no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Zbl. Geol. Paläont. Teil I*, **3**(6): 847 – 854.
- Wallace, H. M. 1958. The Moeda formation. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, São Paulo, v.7 , n.2, p. 59-60.
- Ward A. D. & Trimble S. W.1995. *Environmental hydrology*. 2ed. NewYork: Lewis Publishers.475p.
- Wedepohl K.H. 1878. *Handbook of Geochemistry*. Berlim. Vol II/3-4.

Araújo, G. S. 2018, Análise geoquímica de sedimentos e águas na bacia do rio do Carmo....

Wentworth, C. K. 1992. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*. **5**:377-392

WHO. World Health Organization.2011. *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4ed. Geneva. 541p.

Apêndice(s)

Apêndice 1 – Tabela de valores dos parâmetros físico-químicos determinados através da análise de águas do período chuvoso nos sítios amostrais estudados.

ID	STD (mg/L):	CE (µS/cm):	pH:	Eh (mV):	Temperatura (°C):	Alcalinidade (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Particulado (mg/L)
P1	33,38	51,94	7,27	251	25,6	26,86	5,59	<LQ*	1470,3
P2	47,20	73,33	6,80	250	26,5	21,49	5,59	11,8	72,2
P3	44,68	69,55	6,90	266	26,6	22,83	6,10	11,7	351,8
P4	44,70	69,70	7,00	250	28,5	24,18	4,57	9,8	597,0
P5	44,20	68,90	6,98	253	31,2	24,18	4,57	6,4	760,4
P6	38,67	60,32	7,20	251	29,5	24,18	5,08	<LQ	121,6
P7	52,20	81,20	6,90	234	29,5	25,52	5,08	<LQ	205,4

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 2 – Tabela de valores dos parâmetros físico-químicos determinados através da análise de águas do período de seca nos sítios amostrais estudados.

ID	STD (mg/L):	CE (µS/cm):	pH:	Eh (mV):	Temperatura (°C):	Alcalinidade (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Particulado (mg/L)
P1	48,26	74,98	7,16	251	22,7	41,64	4,06	<LQ*	21,2
P2	59,23	92,35	7,55	239	22,7	28,88	5,59	17,8	1,6
P3	57,43	89,5	7,06	246	23,2	30,89	5,08	12,0	9,4
P4	55,57	86,62	7,18	262	24,3	32,24	4,57	10,9	25,9
P5	54,97	85,52	7,18	251	24,3	30,89	4,57	10,8	81,8
P6	45,00	69,9	7,06	267	24,0	26,86	6,60	<LQ	33,0
P7	45,37	70,61	7,08	269	24,1	28,21	5,59	<LQ	6,8

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 3 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através de análise de águas do período chuvoso por ICP-MS e ICP-OES.

ID	Ca mg/L	K mg/L	Na mg/L	Mg mg/L	Al ug/L	Fe ug/L	Mn ug/L	As ug/L	Ba ug/L	Co ug/L	Cr ug/L	Cu ug/L	Ni ug/L	Pb ug/L	V ug/L	Zn ug/L
P1	3,70	1,28	3,30	1,34	45,36	83,36	20,51	0,228	23,28	0,084	0,105	7,57	0,493	2,87	0,201	2,56
P2	3,81	1,18	7,77	1,26	313	900	291	5,70	21,50	0,931	0,722	6,28	1,24	2,31	1,07	4,11
P3	3,72	1,20	7,10	1,23	48,28	156	21,02	2,04	16,53	0,089	0,162	<LQ	0,588	1,39	0,315	4,14
P4	3,89	1,19	6,70	1,32	53,13	158	29,06	1,04	22,23	0,119	0,140	<LQ	0,490	1,18	0,336	2,47
P5	3,92	1,25	6,41	1,34	39,97	143	27,22	0,979	22,25	0,098	0,084	<LQ	0,358	0,139	0,312	0,989
P6	3,39	2,14	4,54	1,25	70,99	441	38,17	0,782	22,53	0,127	0,228	<LQ	0,571	0,493	0,835	2,12
P7	3,60	2,10	4,94	1,33	51,41	378	16,49	0,872	21,78	0,101	0,216	<LQ	0,484	0,181	0,618	1,89
LQ*	0,022	0,171	0,048	0,020	10,9	7,04	2,28	0,0214	0,480	0,0047	0,0395	5,37	0,290	0,033	0,0022	0,331

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 4 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através de análise de águas do período de seca por ICP-MS e ICP-OES.

ID	Ca mg/L	K mg/L	Na mg/L	Mg mg/L	Al ug/L	Fe ug/L	Mn ug/L	As ug/L	Ba ug/L	Co ug/L	Cr ug/L	Cu ug/L	Ni ug/L	Pb ug/L	V ug/L	Zn ug/L
P1	5,344	0,971	4,373	2,397	34,545	86,943	12,445	0,215	28,799	0,084	0,209	0,986	0,9305	0,0672	0,157	42,071
P2	3,449	0,992	10,351	1,450	22,892	62,461	11,992	3,811	10,350	0,064	0,209	41,141	44,900	0,863	0,237	16,193
P3	4,031	1,004	8,623	1,726	61,100	197,481	45,003	2,460	17,583	0,193	0,274	1,075	0,432	0,415	0,347	29,316
P4	4,152	0,989	8,217	1,776	49,436	128,236	21,359	1,831	15,596	0,047	0,148	0,737	0,481	0,049	0,219	11,107
P5	4,082	1,018	8,157	1,751	53,012	139,811	6,349	1,769	15,033	0,063	0,184	2,656	0,475	0,658	0,234	11,038
P6	3,269	1,704	6,099	1,368	51,344	200,153	8,032	0,838	15,813	0,054	0,169	4,942	0,315	1,443	0,431	<LQ
P7	3,303	1,659	6,308	1,365	59,023	289,112	29,715	1,016	16,480	0,196	0,270	1,359	0,482	0,241	0,592	8,288
LQ*	0,0217	0,171	0,0484	0,0197	8,82	7,04	2,28	0,015	0,480	0,004	0,014	0,006	0,021	0,032	0,010	6,21

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 5 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através de análise do material particulado em suspensão (MPS) do período chuvoso por ICP-OES.

ID	Ca mg/kg	K mg/kg	Na mg/kg	Mg mg/kg	Al mg/kg	Fe mg/kg	Mn mg/kg	As mg/kg	Ba mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Ni mg/kg	V mg/kg	Zn mg/kg
P1	791,2	4608,7	439,0	1028,3	31802,7	269332,7	2579,45	24,7053	201,150	5,2185	57,779	21,749	22,411	45,627	39,713
P2	3747,2	13458,5	2049,7	3765,4	78083,7	145737,3	7387,54	173,302	564,610	24,996	174,038	56,599	88,128	117,928	123,185
P3	866,7	6295,7	452,8	1437,9	36981,6	263865,1	3246,80	45,027	248,776	8,418	71,724	21,978	31,418	55,996	44,586
P4	680,1	4999,8	423,3	1164,8	27030,3	268052,7	2490,56	30,103	199,132	5,967	55,562	17,063	22,570	45,937	38,967
P5	649,7	4621,2	438,0	1123,2	24338,3	208597,7	2236,67	25,792	176,21	5,613	48,631	20,73	20,312	40,236	32,528
P6	1567,7	6001,0	345,9	1829,5	65856,8	280960,7	3875,50	40,855	293,410	15,782	108,118	47,261	49,959	106,298	136,293
P7	933,2	5934,6	359,3	1509,5	44321,1	270605,5	3447,52	32,817	256,716	10,863	79,800	26,481	35,163	70,416	61,718

Apêndice 6 – Análise granulométrica em porcentagem dos sedimentos de corrente amostrados no período chuvoso.

%	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
AMG	0,01	1,73	7,11	4,61	0,21	0,37	0,00
AG	0,07	1,46	5,21	2,69	0,22	0,15	0,03
AM	0,39	5,05	9,11	2,85	0,71	0,53	3,61
AF	12,79	29,57	22,04	12,74	34,54	15,09	68,29
AMF	35,96	37,87	27,87	51,19	31,52	25,82	17,27
S/A	50,50	23,22	28,16	25,45	32,61	57,35	10,50
Total	99,73	98,89	99,50	99,53	99,81	99,31	99,71

AMG - Areia muito grossa; AG - Areia Grossa; AM – Areia Média; AF – Areia Fina; AMF – Areia muito fina; S/A – Silte e Argila.

Apêndice 7 – Análise granulométrica em porcentagem dos sedimentos de corrente amostrados no período de seca.

%	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
AMG	0,01	14,86	2,59	0,52	0,05	0,44	0,00
AG	0,05	2,78	1,16	0,84	0,12	2,62	0,01
AM	0,15	8,74	3,09	12,00	1,32	23,27	0,74
AF	14,65	35,55	20,06	64,58	53,81	54,22	65,31
AMF	50,02	22,18	37,24	13,95	25,58	11,30	20,72
S/A	34,81	15,26	35,55	7,98	19,46	7,87	13,04
Total	99,70	99,37	99,68	99,86	100,33	99,74	99,82

AMG - Areia muito grossa; AG - Areia Grossa; AM – Areia Média; AF – Areia Fina; AMF – Areia muito fina; S/A – Silte e Argila.

Apêndice 8 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através da análise de sedimento de corrente do período chuvoso por ICP-MS e ICP-OES.

ID	Ca	K	Mg	Na	Al	Fe	Mn	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
P1	357,17	1390,53	425,38	214,69	6656,59	207805,2	671,76	<LQ	62,13	<0,037	61,227	14,161	4,244	5,963	3,387	8,447
P2	985,17	4572,57	1606,60	711,83	22518,98	196376,4	1401,36	40,53	173,08	0,084	24,182	59,269	13,239	24,067	9,948	24,186
P3	2866,67	9635,01	3257,49	2141,38	48052,70	135621,3	1681,92	42,26	337,84	0,099	20,290	65,017	16,043	30,177	13,736	34,852
P4	367,06	1068,23	316,40	126,12	5335,41	211669,6	641,05	<LQ	51,75	<0,037	8,433	16,737	3,966	5,455	3,645	8,046
P5	314,39	896,25	310,53	119,79	3824,30	165620,0	455,39	<LQ	43,64	<0,037	7,823	11,141	2,962	4,092	2,505	7,427
P6	513,37	1889,72	646,85	235,14	13154,47	209900,8	838,99	<LQ	77,99	0,044	14,718	24,123	6,952	10,189	5,368	13,810
P7	444,12	1148,94	391,03	250,76	3651,11	99833,3	400,84	<LQ	53,61	<0,037	8,001	9,258	2,759	4,065	2,355	6,705
LQ*	17,10	49,00	12,20	14,00	97,90	29,00	22,20	30,33	0,071	0,009	0,001	0,138	3,274	0,252	0,122	0,042

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 9 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através da análise de sedimento de corrente do período de seca por ICP-MS e ICP-OES.

ID	Ca	K	Mg	Na	Al	Fe	Mn	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
P1	452,27	1346,17	348,78	581,86	5498,43	150193,62	728,15	<LQ	71,750	0,0854	10,347	13,129	<LQ	4,259	3,294	<LQ
P2	1226,32	3037,97	1228,09	1152,87	13911,62	148808,67	1081,75	<LQ	135,499	0,0834	17,614	48,933	<LQ	16,123	9,276	0,213
P3	1113,36	4929,80	1771,44	1173,20	29256,71	168787,70	1437,91	<LQ	194,307	0,0929	22,454	55,880	<LQ	23,729	10,951	0,361
P4	676,04	1862,56	583,68	803,09	5924,78	104471,21	687,28	<LQ	83,894	0,0347	12,613	17,621	<LQ	7,129	4,063	<LQ
P5	443,97	1283,15	446,86	583,71	4991,33	117211,98	577,60	<LQ	58,307	0,0403	8,565	11,904	<LQ	4,114	3,001	<LQ
P6	1579,85	5156,04	1920,37	2109,47	19084,92	46688,43	633,38	<LQ	174,250	0,0355	12,505	31,563	<LQ	15,759	7,204	0,133
P7	465,23	1337,41	438,77	625,61	5264,61	94163,55	451,41	<LQ	56,269	0,0313	6,991	11,402	<LQ	3,722	2,655	0,107
LQ*	17,10	49,00	12,20	14,00	97,90	29,00	22,20	30,33	0,071	0,009	0,001	0,138	3,274	0,252	0,122	0,042

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 10 – Tabela de concentração de Elementos Terras Raras (ETR) + Y, determinados através da análise de sedimento de corrente do período chuvoso por ICP-MS.

ID	La mg/kg	Ce mg/kg	Pr mg/kg	Nd mg/kg	Sm mg/kg	Eu mg/kg	Gd mg/kg	Tb mg/kg	Dy mg/kg	Ho mg/kg	Y mg/Kg	Er mg/kg	Tm mg/kg	Yb mg/kg	Lu mg/kg
P1	2,9056	6,7533	0,6104	2,3563	0,4803	0,1262	0,4740	0,0565	0,4098	0,0801	2,5530	0,2526	0,0375	0,2709	0,0427
P2	12,2842	30,6360	2,4942	9,6235	1,7690	0,4824	1,7659	0,1992	1,3416	0,2587	7,5708	0,7846	0,1108	0,7537	0,1114
P3	23,9423	50,3656	4,3418	16,1846	2,9170	0,6908	2,7469	0,3013	1,9225	0,3455	9,6211	1,0542	0,1409	0,9690	0,1382
P4	4,1348	8,8110	0,8519	3,3233	0,6140	0,1597	0,6251	0,0727	0,4904	0,1001	3,2466	0,3146	0,0442	0,3232	0,0473
P5	2,3282	5,2674	0,4927	1,9247	0,3734	0,1039	0,3948	0,0464	0,3298	0,0671	2,2200	0,2179	0,0321	0,2226	0,0333
P6	6,9388	15,8356	1,4287	5,4499	1,0255	0,2757	1,0257	0,1150	0,7527	0,1483	4,4200	0,4556	0,0635	0,4375	0,0677
P7	1,6326	3,8929	0,3552	1,4149	0,2906	0,0903	0,2969	0,0363	0,2599	0,0569	1,8882	0,1848	0,0274	0,2066	0,0323
LQ*	<i>0,029</i>	<i>0,039</i>	<i>0,010</i>	<i>0,015</i>	<i>0,011</i>	<i>0,002</i>	<i>0,012</i>	<i>0,002</i>	<i>0,012</i>	<i>0,004</i>	<i>0,012</i>	<i>0,006</i>	<i>0,001</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 11 – Tabela de concentração de Elementos Terras Raras (ETR) + Y, determinados através da análise de sedimento de corrente do período de seca por ICP-MS.

ID	La mg/kg	Ce mg/kg	Pr mg/kg	Nd mg/kg	Sm mg/kg	Eu mg/kg	Gd mg/kg	Tb mg/kg	Dy mg/kg	Ho mg/kg	Y mg/Kg	Er mg/kg	Tm mg/kg	Yb mg/kg	Lu mg/kg
P1	3,9464	8,6654	0,7892	2,8886	0,5136	0,1281	0,5266	0,0601	0,3757	0,0775	5,2575	0,2408	0,0348	0,2433	0,0410
P2	7,8771	20,8744	1,6311	5,9848	1,1084	0,2721	1,1246	0,1278	0,8158	0,1653	5,2701	0,5094	0,0810	0,5424	0,0925
P3	12,9144	29,3359	2,6519	9,6358	1,7926	0,4251	1,7760	0,2008	1,2658	0,2464	7,4869	0,7269	0,1047	0,7164	0,1124
P4	2,4270	6,9048	0,5167	1,9450	0,3760	0,0992	0,4313	0,0507	0,3386	0,0739	3,6614	0,2373	0,0328	0,2481	0,0416
P5	3,0734	6,9997	0,6505	2,3807	0,4584	0,0936	0,4504	0,0515	0,3323	0,0704	4,4639	0,2079	0,0322	0,2158	0,0359
P6	5,0051	12,8266	1,0960	4,1413	0,8003	0,2230	0,7972	0,0952	0,6240	0,1217	3,7503	0,3432	0,0500	0,3388	0,0491
P7	2,3913	5,6146	0,5195	1,9418	0,3599	0,0956	0,3806	0,0455	0,3001	0,0640	2,6292	0,1946	0,0266	0,2061	0,0317
LQ*	<i>0,029</i>	<i>0,039</i>	<i>0,010</i>	<i>0,015</i>	<i>0,011</i>	<i>0,002</i>	<i>0,012</i>	<i>0,002</i>	<i>0,012</i>	<i>0,004</i>	<i>0,012</i>	<i>0,006</i>	<i>0,001</i>	<i>0,006</i>	<i>0,002</i>

*LQ =Limite de Quantificação

Apêndice 12 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através de análise por ICP-OES, das frações granulométricas do sedimento de corrente coletado no período chuvoso (mg/kg). *LQ =Limite de Quantificação

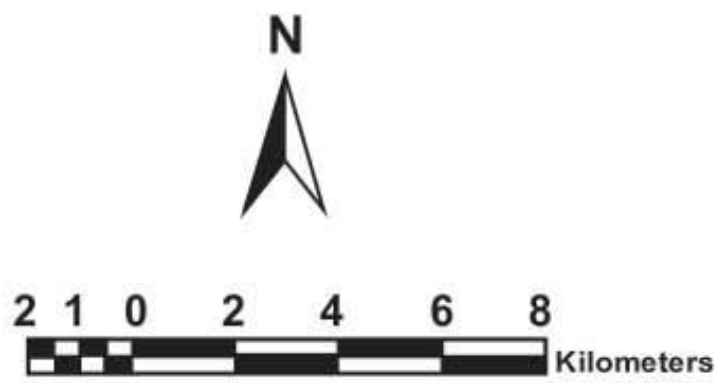
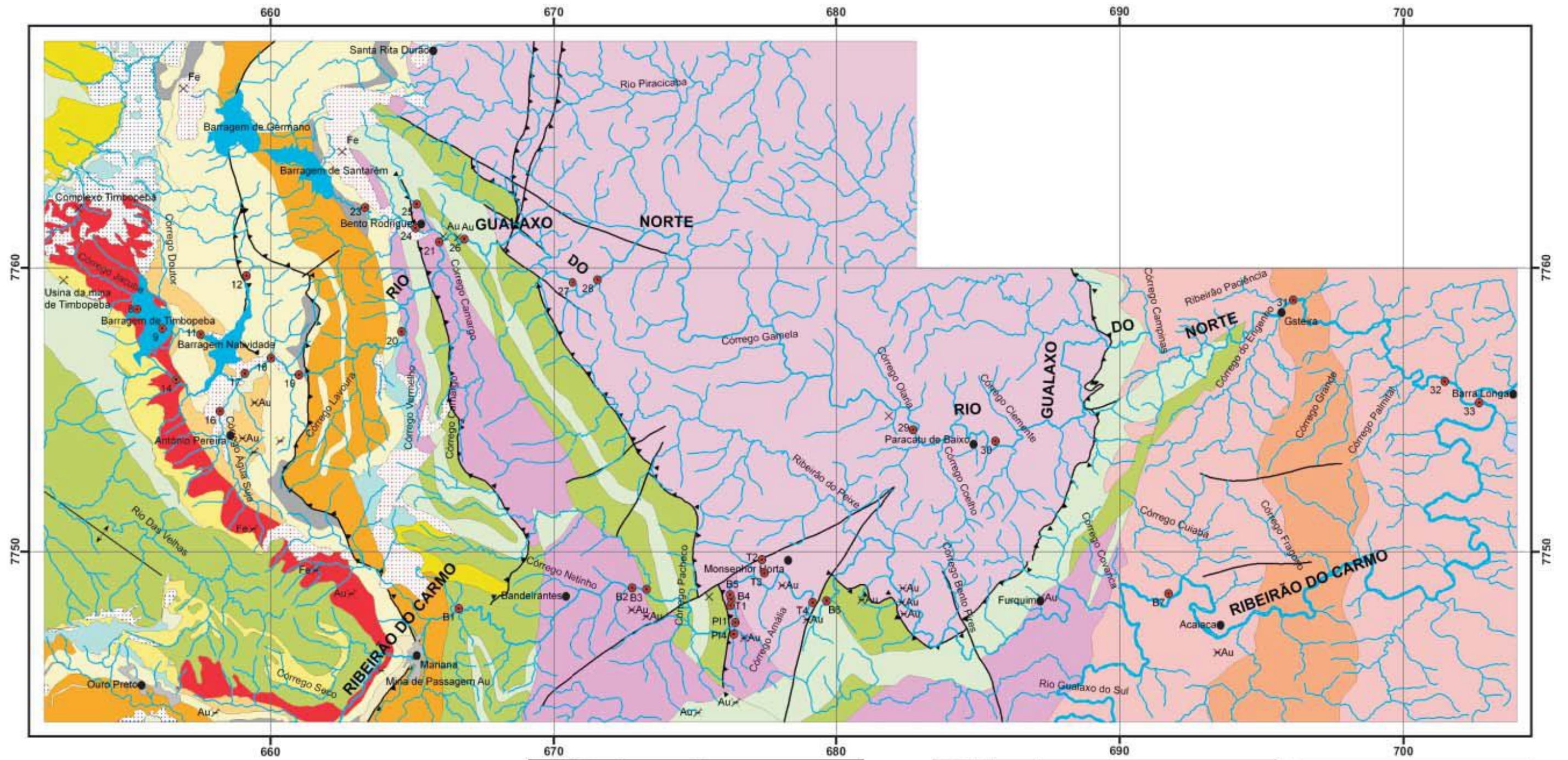
ID - Fração	Ca	K	Mg	Na	Al	Fe	Mn	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P1 #60	644,91	1932,79	2361,31	<LQ	8852,61	123746,02	2937,73	<LQ	260,602	11,117	36,385	29,500	21,524	12,097	46,330
P1 #120	182,19	435,01	510,66	<LQ	1747,15	36921,39	356,61	<LQ	23,810	<LQ	7,981	6,769	4,180	<LQ	13,775
P1 #230	157,79	149,88	174,94	<LQ	1032,58	36749,02	350,15	<LQ	17,375	<LQ	2,772	3,920	<LQ	<LQ	10,728
P1 #<230	185,24	41,81	105,48	<LQ	1375,99	201449,55	692,73	<LQ	20,684	<LQ	9,313	4,943	<LQ	<LQ	16,473
P2 #18	1106,86	867,94	1060,62	11,57	12261,51	125720,48	1977,70	50,508	87,678	8,242	77,859	24,863	20,928	9,854	39,292
P2 #35	1271,42	953,61	1338,64	6,32	10146,28	113091,41	4816,52	12,138	308,862	19,831	76,718	42,060	39,837	14,464	45,046
P2 #60	680,27	2387,69	2748,33	<LQ	10033,02	98006,18	2040,43	43,191	108,861	10,154	51,985	22,200	26,100	<LQ	41,287
P2 #120	313,99	848,33	971,86	<LQ	3872,66	76371,52	822,73	32,465	39,314	3,790	24,078	25,101	10,554	<LQ	20,094
P2 #230	426,57	316,52	456,23	<LQ	4488,19	145737,83	1139,94	33,063	38,517	3,487	27,032	11,763	9,789	<LQ	23,147
P2 #<230	456,09	217,35	385,00	<LQ	6445,58	269811,66	1773,55	37,182	52,840	5,635	37,009	15,846	12,399	11,280	32,391
P3 #18	2081,37	1217,09	1546,97	14,79	20684,19	74655,14	1852,76	29,503	117,843	9,326	59,910	21,105	18,948	15,987	38,543
P3 #35	1874,40	1970,80	2250,56	<LQ	13412,31	11049,97	1282,57	<LQ	100,012	7,509	19,261	15,642	15,441	10,667	56,247
P3 #60	1279,82	3222,76	3380,65	4,82	14437,13	16584,80	1274,76	<LQ	124,494	9,701	26,685	22,987	19,227	9,538	40,363
P3 #120	998,56	2423,96	2602,48	<LQ	10557,58	58685,32	1162,28	23,944	109,343	7,639	37,778	14,983	16,984	9,776	34,569
P3 #230	1013,02	1186,70	1419,38	<LQ	8335,75	75372,84	1231,07	27,492	86,855	6,027	34,914	14,369	13,743	<LQ	28,244
P3 #<230	2030,47	798,71	1127,83	11,32	15233,04	181641,27	2104,51	43,270	118,070	8,767	63,903	21,163	19,283	12,866	38,836
P4 #18	318,00	<LQ	84,24	<LQ	3822,86	241834,44	1126,15	424,826	27,701	9,840	26,673	27,185	10,216	10,256	29,691
P4 #35	387,22	101,69	232,53	<LQ	4313,62	192171,48	1573,31	54,564	60,780	7,944	48,664	21,706	11,553	<LQ	31,366
P4 #60	384,23	364,55	507,18	<LQ	3997,37	216427,81	1648,63	39,868	71,756	3,659	38,325	21,129	10,935	<LQ	32,652
P4 #120	185,76	205,25	258,07	<LQ	1799,51	87340,85	471,18	<LQ	19,256	<LQ	10,449	13,345	3,443	<LQ	15,303
P4 #230	216,98	33,01	78,90	<LQ	1204,97	134843,70	493,41	7,631	14,746	<LQ	8,118	5,601	<LQ	<LQ	15,481
P4 #<230	229,16	<LQ	65,09	<LQ	1556,57	253095,72	835,10	9,911	19,139	<LQ	12,499	5,659	<LQ	<LQ	23,860
P5 #18	178,36	121,85	117,81	<LQ	4250,10	164591,64	5928,31	152,977	254,170	7,921	281,514	39,818	43,408	27,443	52,110
P5 #35	220,46	407,41	558,80	<LQ	3494,78	83722,94	3509,55	150,620	156,955	11,657	53,909	27,573	17,309	<LQ	26,227
P5 #60	258,56	1241,67	1484,44	<LQ	3802,23	68591,86	1132,24	41,496	89,845	6,347	36,574	21,623	18,153	<LQ	28,995
P5 #120	99,50	153,85	188,90	<LQ	765,02	30586,41	190,96	<LQ	10,724	<LQ	4,294	2,572	<LQ	<LQ	7,193
P5 #230	97,52	63,96	94,66	<LQ	739,19	100160,18	314,49	<LQ	10,542	<LQ	4,347	3,966	<LQ	<LQ	11,089
P5 #<230	181,21	22,33	82,85	<LQ	1227,69	231728,91	548,79	<LQ	14,096	<LQ	7,626	4,625	<LQ	<LQ	20,372
P6 #18	1920,93	1291,68	2023,20	65,15	18507,20	149158,16	4650,76	<LQ	223,968	16,536	59,652	36,716	24,432	17,659	67,593
P6 #35	2048,55	1679,07	2420,45	63,89	23161,35	202580,78	4171,15	25,183	224,598	16,844	79,925	39,221	26,618	19,613	73,887
P6 #60	812,63	3103,84	3569,53	4,75	12710,71	106403,16	1567,00	17,422	126,311	12,436	51,848	29,429	24,945	7,935	54,035
P6 #120	234,26	402,57	472,29	<LQ	1932,60	31622,67	354,25	<LQ	22,273	2,219	10,314	10,501	4,096	<LQ	16,977
P6 #230	198,75	296,64	364,38	<LQ	2481,46	60480,41	439,20	<LQ	23,729	1,696	9,771	5,376	3,725	<LQ	14,772
P6 #<230	363,89	188,78	318,01	<LQ	4744,84	235111,20	1019,15	11,303	36,261	2,655	20,751	9,406	4,548	<LQ	27,390
P7 #60	232,01	1034,20	1227,92	<LQ	3393,07	17992,74	537,58	18,096	45,994	4,598	20,759	13,755	10,822	<LQ	17,741
P7 #120	151,11	80,40	101,66	<LQ	450,59	29051,50	182,76	<LQ	10,244	<LQ	3,448	4,072	<LQ	<LQ	7,806
P7 #230	119,26	24,53	54,01	<LQ	400,00	102378,17	340,81	<LQ	12,066	<LQ	3,430	2,789	<LQ	<LQ	9,161
P7 #<230	199,63	31,79	89,23	<LQ	902,21	167081,41	489,26	<LQ	14,761	<LQ	7,090	6,421	<LQ	<LQ	17,016
LQ	4,28	12,24	3,04	53,51	24,5	7,24	5,55	7,58	0,55	1,56	1,08	1,23	3,02	7,08	0,308

Apêndice 13 – Tabela de concentração de elementos maiores, menores e traço, determinados através de análise por ICP-OES, das frações granulométricas do sedimento de corrente coletado no período de seca (mg/kg). *LQ =Limite de Quantificação

ID - Fração	Ca	K	Mg	Na	Al	Fe	Mn	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P1 #60	347,22	571,15	884,37	53,33	4066,33	249102,03	8837,42	52,318	1261,924	8,145	40,275	38,254	21,245	<LQ	61,764
P1 #120	150,87	152,77	193,52	39,72	1153,98	23446,52	347,21	<LQ	22,414	<LQ	4,330	<LQ	<LQ	<LQ	8,937
P1 #230	135,84	65,26	94,35	49,85	1021,14	55591,77	398,39	<LQ	21,795	<LQ	3,851	<LQ	<LQ	<LQ	8,620
P1 #<230	231,58	42,33	130,18	45,53	1702,96	205898,03	872,72	<LQ	37,696	<LQ	10,295	1,790	<LQ	<LQ	20,514
P2 #18	145,73	<LQ	65,53	54,51	7128,82	287185,47	3324,58	<LQ	54,540	63,470	20,659	47,293	21,646	<LQ	39,014
P2 #35	270,75	254,11	328,32	56,86	11292,10	228583,16	4821,11	63,094	342,208	32,445	35,998	47,421	35,658	<LQ	40,149
P2 #60	198,72	625,36	766,22	53,41	5821,78	124713,17	1744,88	74,253	125,126	10,642	29,365	24,962	24,554	<LQ	32,018
P2 #120	224,68	380,81	463,80	58,37	2851,14	76586,51	462,23	22,869	22,294	<LQ	16,151	7,009	6,673	<LQ	16,214
P2 #230	194,35	214,34	293,03	44,09	3125,48	127115,68	553,52	26,267	20,975	<LQ	22,371	8,593	6,177	<LQ	18,308
P2 #<230	315,13	226,70	363,42	51,71	5877,95	200595,70	1272,57	24,065	50,419	2,054	30,772	16,378	8,327	<LQ	29,827
P3 #18	1072,82	1298,77	1903,64	99,85	29874,28	106790,20	3416,12	65,023	181,349	18,578	94,553	31,235	38,665	<LQ	69,061
P3 #35	2186,92	1369,16	1948,36	92,77	21219,56	89544,44	3536,51	54,124	155,681	15,776	86,488	26,264	29,767	<LQ	54,826
P3 #60	973,98	2747,01	3585,71	79,65	19440,57	91112,77	2832,60	43,108	155,614	14,991	66,536	23,599	32,779	<LQ	63,298
P3 #120	449,37	1271,18	1655,95	56,30	9576,82	49988,79	1127,24	16,385	72,239	4,357	34,346	10,792	16,219	<LQ	33,304
P3 #230	334,45	388,83	564,88	50,54	6564,84	95403,27	865,29	15,666	44,286	<LQ	24,421	5,538	9,095	<LQ	21,939
P3 #<230	538,25	294,83	508,75	57,28	10164,26	201862,72	1499,39	30,498	88,170	2,726	39,429	10,580	11,802	<LQ	38,821
P4 #18	176,09	86,53	122,32	42,48	3269,85	144619,50	1140,19	103,082	84,583	<LQ	51,130	21,737	10,049	<LQ	30,184
P4 #35	298,85	1334,66	1851,96	51,80	7472,02	100315,36	2156,17	119,312	217,343	27,718	80,697	23,047	29,443	<LQ	32,608
P4 #60	176,12	682,63	895,44	43,11	3825,94	30142,83	764,32	13,897	70,543	2,163	18,357	6,247	11,153	<LQ	14,370
P4 #120	82,44	124,25	156,48	38,52	847,12	41270,58	410,09	<LQ	32,146	<LQ	5,502	<LQ	<LQ	<LQ	5,733
P4 #230	94,65	25,65	64,37	40,40	816,08	154475,80	524,84	<LQ	19,888	<LQ	6,530	<LQ	<LQ	<LQ	13,813
P4 #<230	148,50	48,65	132,02	42,02	2310,60	263624,22	868,14	<LQ	27,770	<LQ	12,999	3,415	3,813	<LQ	25,124
P5 #35	518,53	1817,41	2652,62	130,43	8964,74	60962,09	3219,09	106,536	420,928	50,747	76,518	1063,865	52,701	<LQ	609,970
P5#60	281,18	1888,42	2414,70	58,79	6421,86	46618,57	1386,30	33,097	168,674	7,369	36,224	16,244	20,125	<LQ	110,188
P5 #120	200,28	197,53	241,65	73,98	1279,91	36721,73	325,36	<LQ	22,484	<LQ	5,799	<LQ	<LQ	<LQ	15,840
P5 #230	187,87	52,64	69,86	68,38	835,32	86292,45	368,19	<LQ	15,725	<LQ	4,426	<LQ	<LQ	<LQ	13,119
P5 #<230	245,10	25,66	89,74	72,50	1672,74	253899,00	732,64	<LQ	22,497	<LQ	11,053	1,732	<LQ	<LQ	26,089
P6 #18	1554,76	2216,89	4288,03	109,00	23245,63	65703,96	1481,58	<LQ	171,447	16,496	116,862	32,719	36,000	<LQ	64,817
P6 #35	1401,65	7968,26	10919,48	126,06	27972,49	61789,87	1794,99	<LQ	292,737	38,642	142,219	36,253	67,123	<LQ	97,819
P6 #60	654,03	3032,16	3730,62	86,53	14947,91	29205,14	1031,10	<LQ	139,709	22,208	57,071	20,264	27,728	<LQ	45,139
P6 #120	239,93	223,90	256,22	62,24	1647,48	15355,85	257,98	<LQ	20,303	<LQ	7,318	<LQ	3,551	<LQ	8,580
P6 #230	206,90	85,91	103,72	62,54	984,54	47784,74	302,01	<LQ	17,103	<LQ	4,562	<LQ	<LQ	<LQ	9,313
P6 #<230	188,96	131,92	210,26	61,80	2597,61	162564,89	748,73	<LQ	40,322	<LQ	13,560	4,933	3,820	<LQ	18,650
P7 #60	611,50	3962,14	5013,63	94,12	14281,62	39141,46	935,39	<LQ	146,555	10,442	55,987	23,365	30,037	<LQ	51,511
P7 #120	177,01	139,33	173,39	57,82	1201,94	29927,71	255,91	<LQ	17,005	<LQ	4,246	<LQ	<LQ	<LQ	13,141
P7 #230	157,46	45,57	75,38	57,21	781,35	85791,97	346,30	<LQ	17,343	<LQ	4,525	<LQ	<LQ	<LQ	9,217
P7 #<230	266,71	61,00	150,18	67,45	2456,64	238901,54	716,31	<LQ	25,728	<LQ	12,948	<LQ	<LQ	<LQ	26,020
LQ	4,28	12,25	3,05	3,50	24,48	7,25	5,55	7,58	0,55	1,56	1,09	1,23	3,03	7,08	0,31

Anexos

Anexo 1 - Mapa geológico da bacia do rio do Carmo e Gualaxo do Norte antes de Barra Longa, MG. Retirado de Costa *et al.* (2010).



Divisão Estratigráfica		Simbologia	Litologia
Proterozóico Inferior	Grupo Itabira	Formação Gandarela (Pimig)	Mámore
		Formação Cauê (Plmic)	Itabirito
		(Pimi)	Itabirito dolomítico
	Grupo Caraça	Formação Batatal (Plmcb)	Filito; filito grafitoso
		Formação Moeda (Plmcm)	Quartzito, quartzito conglomerático, quartzito-mica-xisto e filito
		(Plmc)	Quartzito, filito, algum conglomerado
Arqueano	Supergrupo Rio das Velhas	Grupo Maquiné (Arm)	Quartzito
		Grupo Nova Lima (ArnI)	Xisto, itabirito, rocha metabásica e quartzito
	Complexo Santa Bárbara (Asb)	Gnaíse	
	Complexo Santo Antônio de Pirapetinga (Asap)	Talco xisto, rocha metabásica, gnaíse e granito	
	Complexo Mantiqueira (Am)	Gnaíse e rocha metavulcânica	
	Complexo Acaiaca (Aac)	Gnaíse, granito e rocha metabásica	

Divisão Estratigráfica		Simbologia	Litologia
Quaternário	Depósitos Aluvionares Coluviais e Eluviais (Qal)	Qal	Areia, silte, argila e cascalho
	Depósitos Residuais e Detríticos Recentes (Ql)	Ql	Laterita, bauxita e cobertura detrítica-ferruginosa
Tércio-Quaternário	Coberturas Detríticas (Tqca)	Tqca	Canga
Proterozóico Indiferenciado	Granito Barra Longa (Plyb)	Plyb	Granito alcalino de composição monzonítica
	Grupo Itacolomi (Pi)	Pi	Quartzito, quartzito conglomerático, conglomerado com seixos de itabirito
Proterozóico Inferior	Supergrupo Minas Piracicaba	Formação Sabará (Plmps)	Xisto, itabirito, quartzito
		Formação Barreiro (Plmpb)	Grafito xisto, mica xisto filito
		Formação Fecho do Funil (Plmpf)	Quartzito-ferruginoso com lentes de dolomito ferruginoso
		Formação Cercadinho (Plmpc)	Quartzito, xisto

Legenda

- Amostragem
- × Garimpo
- ✕ Garimpo inativo
- ✕ Mina ativa
- ✕ Mina inativa
- Cidades
- Mancha Urbana
- Barragens
- ~ Drenagem
- ↕ Anticlinal
- Zona de cisalhamento
- Zona de cisalhamento (Empurrão)