



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE METAIS PESADOS EM
SEDIMENTOS DO RIO SÃO FRANCISCO ENTRE TRÊS MARIAS E
PIRAPORA/MG: FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS**

AUTOR: Wallace Magalhães Trindade

ORIENTAÇÃO: Adolf Heinrich Horn

Wallace Magalhães Trindade

**CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE METAIS PESADOS EM
SEDIMENTOS DO RIO SÃO FRANCISCO ENTRE TRÊS MARIAS E
PIRAPORA/MG: FATORES NATURAIS E ANTRÓPICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientador: Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn

BELO HORIZONTE

30/07/2010

T833c Trindade, Wallace Magalhães.
2010 Concentração e distribuição de metais pesados em sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora/MG [manuscrito] : fatores naturais e antrópicos/ Wallace Magalhães Trindade. – 2010. xi, 111 f. : il., fots. (color), mapas (color.), tabs. (color.).

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2010.

Área de concentração: Geologia Econômica e Aplicada.

Orientador: Adolf Heinrich Horn.

Bibliografia: f. 91-99.

Inclui anexos.

1. Metais pesados – Teses. 2. Sedimentos (Geologia) – São Francisco, Rio – Teses. 3. Poluição – São Francisco, Rio – Teses. I. Horn, Adolf Heinrich. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 553(815.1)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



Dissertação intitulada “Concentração e distribuição de Metais Pesados em sedimentos no Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora – MG: fatores naturais e antrópicos.”, de autoria de Wallace Magalhães Trindade, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores.

Prof. Dr. Adolf Heinrich Horn– IGC/UFMG – Orientador

Profª. Dra Tânia Mara Dussin – IGC/UFMG

Prof. Dr. Hernando Baggio Filho – UNIMONTES

Prof. Dr. Jorge Carvalho de Lena – UFOP

Belo Horizonte - MG, 30 de Julho de 2010.

Av. Presidente Antônio Carlos, 6.627, sala 3056– Belo Horizonte, MG – 31270-901 – Brasil – tel. -
(031) 3409-5404 – fax (031) 3409-5404

A meus pais Joaquim e Joana...

Por tudo que representam na minha vida,
pelos ensinamentos e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Adolf Heinrich Horn, pela orientação, ensinamento, apoio e pela grande amizade construída juntamente com a realização da pesquisa.

Ao sempre “mestre” Professor Hernando Baggio Filho, pelas valiosas contribuições e ensinamentos.

À Marinha do Brasil (Capitânia Fluvial do São Francisco – Pirapora/MG), pelo suporte logístico nas amostragens.

À Votorantin Metais Zinco S/A – Unidade Três Marias, por apoiar a pesquisa, principalmente os trabalhos de campo e amostragens..

À FAPEMIG, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

A CAPES, pela bolsa de mestrado.

Ao programa de pós-graduação Geologia da UFMG, pela oportunidade de concretização do mestrado.

À UNIMONTES, pelo apoio logístico durante os trabalhos de campo e preparação das amostras.

À Rosalva, Natalia e acadêmicos do Campus Pirapora, por fazerem parte diretamente desta conquista.

As geólogas Julia e Luiza, pelo fundamental auxílio nos trabalhos laboratoriais.

Ao Dunas Bahia pela colaboração na preparação das amostras.

A Elis pelo companheirismo na vida acadêmica, no projeto de pesquisa, trabalhos de campo e pela grande amizade de todos os momentos.

Às técnicas do Laboratório de Raio-X CPMTC/UFMG, Kacia e Amanda pela dedicação na determinação da composição mineral dos sedimentos.

A Ana, serviços gerais do CPMTC, por todo cuidado e zelo na arrumação dos laboratórios e da sala dos pesquisadores.

Ao William, pelas leituras dos elementos selecionados no laboratório de ICP-OES/CPMTC-UFMG, e pelas inúmeras respostas nas questões laboratoriais e químicas.

À Juliana Santos, Mateus Barros e Giovanni Guerra pela acolhida e pela amizade construída nestas idas e vindas, sou eternamente grato a vocês.

A minha família pela compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

A Isabela (Beloca) pelos grandes e bons momentos compartilhados.

A Tati pelo companheirismo e apoio bem como por compreender a dimensão deste projeto e entender os muitos momentos de ausência.

Enfim aos amigos, colegas e todos que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	ii
SUMÁRIO	iv
LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS	vi
LISTAS DE FIGURAS	vii
LISTAS DE GRÁFICOS	viii
LISTAS DE TABELAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Trabalhos prévios	2
2 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	4
2.1 Localização.....	4
2.2 Aspectos fisiográficos	6
<i>2.2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO</i>	<i>6</i>
<i>2.2.2 ARCABOUÇO GEOLÓGICO</i>	<i>7</i>
<i>2.2.3 NEOPROTEROZOICO: SEDIMENTAÇÃO DO GRUPO BAMBUÍ</i>	<i>8</i>
<i>2.2.3.1 Formação Lagoa do Jacaré</i>	<i>8</i>
<i>2.2.3.2 Formação Serra da Saudade</i>	<i>8</i>
<i>2.2.3.3 Formação Três Marias</i>	<i>9</i>
<i>2.2.4 O CRETÁCEO NA ÁREA DE ESTUDO</i>	<i>11</i>
<i>2.2.4.1 Cretáceo Inferior: a sedimentação do Grupo Areado</i>	<i>11</i>
<i>2.2.5 CRETÁCEO SUPERIOR: O VULCANISMO MATA DA CORDA</i>	<i>14</i>
<i>2.2.6 CENOZOICO – TERCIÁRIO/QUATERNÁRIO</i>	<i>15</i>
2.3 Aspectos geomorfológicos	16
2.4 Geomorfologia Fluvial	20
2.5 Hidrografia	23
2.6 Aspectos climáticos da área de estudo	26
2.7 Coberturas vegetais da área de estudo	27
2.8 Caracterização dos solos encontrados na área de estudo	28
3 METAIS PESADOS, SEDIMENTOS E QUALIDADE AMBIENTAL	31
3.1 Origem dos metais pesados	32
3.2 Metais pesados nos sedimentos	33
3.4 Importância dos óxidos e hidróxidos	34
4 MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS	35
4.1 Primeira etapa: planejamento da pesquisa	36
<i>4.1.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA E GERAÇÃO DA MALHA DE ESTAÇÕES DE COLETA</i>	<i>36</i>
<i>4.1.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS</i>	<i>38</i>
4.2 Segunda etapa: trabalhos de campo e preparação das amostras	38
<i>4.2.1 PROCEDIMENTO DE COLETA E CONSERVAÇÃO DAS AMOSTRAS</i>	<i>38</i>
<i>4.2.2 TRATAMENTO DAS AMOSTRAS</i>	<i>39</i>
<i>4.2.2.1 Secagem das amostras</i>	<i>39</i>
<i>4.2.4 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA</i>	<i>39</i>

4.3 Terceira etapa: técnicas analíticas aplicadas na quantificação de metais em sedimentos	39
4.3.1 <i>DIGESTÃO ÁCIDA DAS AMOSTRAS</i>	40
4.3.2 <i>DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X</i>	40
4.3.3 <i>ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA - ICP-OES</i>	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 Distribuição granulométrica e determinação de ambientes deposicionais	41
5.2 Composição mineral dos sedimentos	46
5.2.1 <i>MINERAIS PESADOS NOS SEDIMENTOS</i>	49
5.3 Parâmetros físico-químicos analisados	51
5.3.1 <i>VARIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)</i>	51
5.3.2 <i>VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (C°) NO SEGMENTO ESTUDADO</i>	54
5.5 Limite de Quantificação e Índice de Geoacumulação	58
6 CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS ANALISADOS	59
6.1 Ferro (Fe)	59
6.2 Magnésio (Mg)	61
6.3 Alumínio (Al)	64
6.4 Manganês (Mn)	65
6.5 Cálcio (Ca)	67
6.6 Cobalto (Co)	69
6.7 Titânio (Ti)	71
6.8 Bário (Ba)	73
6.9 Cromo (Cr)	75
6.10 Cobre (Cu)	77
6.11 Níquel (Ni)	79
6.12 Chumbo (Pb)	81
6.13 Cádmio (Cd)	83
6.14 Zinco (Zn)	86
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
ANEXOS	100

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMIG – Companhia Energética do Estado de Minas Gerais
CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais
CMM – Companhia Mineira de Metais
CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
FDB – Faixa de Dobramento Brasília
ICDD – International Center for Diffraction Data
ICP-OES - Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy
IEF – Instituto Estadual de Florestas
IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IGEO – Índice de Geoacumulação
INONIBRÁS – Inoculantes e Ferro-ligas Nipo-Brasileiros S/A
JCPDS – Joint Committee on Powder Diffraction Standards
LIASA – Ligas de Alumínio S/A.
MINASLIGAS – Companhia de Ferroligas de Minas Gerais
NBR – Normas Brasileiras de Regulamentação
PGAGEM – Programa de Geoquímica Ambiental e Geologia Médica
PLANVASF - Plano diretor para o desenvolvimento do vale do São Francisco
SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SPRING – Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste
UFLA – Universidade Federal de Lavras
US EPA – United States. Environmental Protection Agency
USGS - United States Geological Survey

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	4
Figura 2 – Antiga barragem de rejeito da Votorantin Metais em Três Marias.....	5
Figura 3 – Poluentes atmosféricos e lançamento de efluente industrial (Pirapora–MG).....	6
Figura 4 – Cráton do São Francisco.....	7
Figura 5 – Formação Três Marias..	9
Figura 6 – Mapa geológico.	10
Figura 7 – Cascalhos demonstrando imbricamento da Formação Abaeté.....	12
Figura 8 – Estratificações cruzadas de grande porte.....	13
Figura 9 – Perfil litopedogênico da Formação Capacete.....	15
Figura 10 – Material detrítico inconsolidado e laterizado, de cor avermelhada.	16
Figura 11 – Modelo Digital de Elevação.....	17
Figura 12 – Vista geral das unidades geomórficas.....	18
Figura 13 – Formação Capacete.....	19
Figura 14 – Superfície Mata da Corda, com sequência de morrotes.....	19
Figura 15 – Unidades de Colinas bordejando a planície aluvial.....	20
Figura 16 – Perfil longitudinal do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora–MG.....	21
Figura 17 – Cachoeira Grande (Três Marias).....	21
Figura 18 – Ambientes fluviais com fluxo laminar.....	22
Figura 19 – Ambientes fluviais com fluxo turbulentos.....	22
Figura 20 – Terraços recentes próximos à confluência dos rios São Francisco e Velhas.....	23
Figura 21 - Mapa das sub-bacias que contribuem na área de estudo para Rio São Francisco.....	25
Figura 22 – Classes climáticas no Cráton São Francisco no estado de Minas Gerais.....	26
Figura 23 – Mapa de solos da área de estudo segundo SiBCS.....	29
Figura 24 – Esquema geral do projeto metodológico.....	35
Figura 25 – Estações de amostragem de sedimentos.....	37
Figura 26 – Distribuição das classes granulométricas.....	45
Figura 27 – Distribuição espacial dos minerais quartzo e muscovita.....	47
Figura 28 – Ocorrência de ortoclásio e microclina na área de estudo.....	48
Figura 29 - Ocorrência de caulinitas e gibbistas na área de estudo.....	49
Figura 30 – Ocorrência de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe).....	50
Figura 31 – Ocorrências de óxidos de titânio.....	51
Figura 32 – Distribuição espacial do pH ao longo do perfil de amostragem.....	53
Figura 33 – Mapa da evolução têmporo-espacial do uso e ocupação dos solos de 1980 a 2009...	56
Figura 34 – Variação do índice de geoacumulação para ferro.....	61
Figura 35 – Variação do índice de geoacumulação para magnésio.....	63
Figura 36 – Variação do índice de geoacumulação para alumínio.....	65
Figura 37 – Variação do índice de geoacumulação para manganês.....	67
Figura 38 – Variação do índice de geoacumulação do cálcio.....	69
Figura 39 – Variação do índice de geoacumulação para cobalto.....	71
Figura 40– Variação do índice de geoacumulação para titânio.....	73
Figura 41 – Variação do índice de geoacumulação para bário.....	75
Figura 42 – Variação do índice de geoacumulação para cromo.....	77
Figura 43 – Variação do índice de geoacumulação para cobre.....	79
Figura 44 – Variação do índice de geoacumulação para níquel.....	81
Figura 45 – Variação do índice de geoacumulação chumbo.....	83
Figura 46 – Variação do índice de geoacumulação para cádmio.....	86
Figura 47 – Variação do índice de geoacumulação para zinco.....	88

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultado da separação granulométrica na estação seca.....	43
Gráfico 2 – Resultado da separação granulométrica na estação úmida.....	43
Gráfico 3 – Valores do pH em distintas estações do ano de 2009.....	52
Gráfico 4 – Variação da Temperatura em 2009.....	54
Gráfico 5 – Resultado da quantificação do ferro nas estações seca e úmida	60
Gráfico 6 – Resultado da análise química para magnésio nas estações seca e úmida	62
Gráfico 7 – Resultado da análise química para alumínio nas estações seca e úmida	64
Gráfico 8 – Resultado da análise química para manganês nas estações seca e úmida	66
Gráfico 9 – Resultado da análise química para cálcio nas estações seca e úmida.....	68
Gráfico 10 – Resultado da análise química para cobalto nas estações seca e úmida.....	70
Gráfico 11 – Resultado da análise química para titânio nas estações seca e úmida	72
Gráfico 12 – Resultado da análise química para bário nas estações seca e úmida	74
Gráfico 13 – Resultado da análise química para cromo nas estações seca e úmida	76
Gráfico 14 – Resultado da análise química para cobre nas estações seca e úmida.....	78
Gráfico 15 – Resultado da análise química para níquel nas estações seca e úmida	80
Gráfico 16 – Resultado da análise química para chumbo nas estações seca e úmida.....	82
Gráfico 17 – Resultado da análise química para cádmio nas estações seca e úmida.....	85
Gráfico 18 – Resultado da análise química para zinco nas estações seca e úmida.....	87

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de classificação granulométrica de Wentworth (1922).....	42
Tabela 2 – Classificação granulométrica dos sedimentos.....	44
Tabela 3 – Classificação supervisionada para uso e ocupação dos solos de 1980 a 2009.....	57
Tabela 4 – Principais agroquímicos encontrados nos cultivos da área de estudo.....	57
Tabela 5 – Índice de geoacumulação (<i>Igeo</i>) de metais pesados.	59

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a concentração total e a distribuição dos metais pesados nos sedimentos do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora, buscando identificar os fatores naturais e antropogênicos que influenciam na liberação desses elementos para o meio aquático. A área de estudo localiza-se no alto-médio curso do Rio São Francisco na região Norte de Minas Gerais, onde os usos e ocupação dos solos, marcados pela presença das usinas de beneficiamento de Zn em Três Marias e Fe-Si em Pirapora, bem como pelas atividades agrícolas, comprometem a qualidade dos sedimentos do rio. Para avaliar os sedimentos foram estabelecidos 59 pontos de coleta, amostrados nas estações seca e úmida. Os parâmetros físico-químicos analisados em campo foram pH e temperatura. Em laboratório procedeu-se à separação granulométrica por peneiramento. As amostras foram preparadas para análises químicas através da abertura ácida (HNO_3) em microondas pelo método SW-846-3051 – US EPA (1998). A quantificação dos metais foi realizada por espectrometria de emissão óptica – ICP-OES. Os teores de metais encontrados nos sedimentos foram comparados com os valores orientadores estabelecidos pela resolução do CONAMA 344-04 e utilizados na geração e mapeamento dos índices de geoacumulação no *software* Arc Gis 9.2. Os valores de pH e temperatura encontram-se dentro dos limites típicos de águas superficiais. É notória a alteração no pH condicionada pelas fontes pontuais de poluição nos ambiente mais ácidos: (6,4), encontrado no P-4 (Córrego Consciência em Três Marias), e (8,72), no P-54 (efluente industrial em Pirapora). A mineralogia, distribuição espacial homogênea e o tamanho médio dos sedimentos indicaram que os sedimentos encontrados no rio são predominantemente retrabalhados da Formação Três Marias e carregados para o rio, constituindo um ambiente de deposição fluvial areno-siltoso. O resultado das análises químicas dos sedimentos mostraram uma contribuição natural (geológica) para os elementos Fe, Al, Mg, Co, Cr, Ti e Ba ao longo do perfil de amostragem e valores acima dos níveis I e II para Cd, Zn, Pb e Cu nos pontos 4, 5 e 6, onde foram amostrados os sedimentos classificados pelo *Igeo* como fortemente poluídos (Classe 6) – evidenciando a contribuição das atividades antropogênicas, especialmente as urbano-industriais, na contaminação dos sedimentos do Rio São Francisco.

Palavras-chave: Metais pesados, sedimentos, contaminação, Rio São Francisco.

ABSTRACT

The main goal of this work is to evaluate the total concentration and distribution of heavy metals in sediments of the São Francisco River between the course of Três Marias and Pirapora, aiming to identify natural and anthropogenic factors which influence the discharge of these elements to the aquatic environment. The area studied, upper-medium course of the São Francisco River on the North Region of Minas Gerais, presents soil use and occupation marked by Zn processing plants in Três Marias and Fe-Si in Pirapora, besides presenting agricultural activities which jeopardize the quality of river sediments. To assess the sediments, 59 collect points were chosen, sampled on the dry and rainy seasons. The physical-chemical parameters analyzed in field work were pH and the temperature. In laboratory, granulometric separation by sieving was performed. Chemical analysis was performed through acid open (HNO_3) microwave samples according to SW-846-3051 – US EPA (1998) and metal spectrometry optical emission – ICP-OES. The amount of metals found on sediments was compared to oriented values established by the resolution CONAMA 344-04. Chemical data were used to generate maps of geoaccumulation indexes through the use of the software Arc Gis 9.2. Values for pH and temperature are within the typical limits for superficial waters. However, the change in pH is remarkable at the points of pollution where the environment is more acid: (6, 4), found on P.4 (Consciência stream in Três Marias), and (8,72), on P.54 (Industry effluent in Pirapora). Homogeneous spatial distribution and the medium size of sediments suggest that sediments found in the river are carried from the Três Marias formation into the river, making it a fluvial depositional environment predominantly sand-silty. Chemical analysis of sediments showed a natural contribution (geologic) for elements Fe, Al, Mg, Co, Cr, Ti e Ba along the sample profile. At points 4, 5 and 6, sediments sampled by *Igeo* were classified as highly polluted (Class 6) for Cd, Zn, Pb and Cu, which also presented values above those of levels I and II – thus evidencing the results of anthropogenic activities, specially urban-industries, on the contamination of the sediments of São Francisco River's waters.

Key-words: Heavy metals, sediments, contamination, São Francisco River.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da sociedade atual, sem o devido planejamento e gestão inevitavelmente vem seguido de impactos negativos ao meio ambiente com efeitos deletérios à saúde humana. Dentre os impactos ambientais mais negativos, o efeito da contaminação dos recursos hídricos pela introdução de elementos químicos, particularmente metais pesados nos ambientes aquáticos, vem ganhando destaque no campo das geociências em virtude da sua interação com fatores naturais e antrópicos, que associados respondem pela qualidade dos diversos ambientes.

O conhecimento dos aspectos gerais dos contaminantes inorgânicos passa pela investigação da origem e comportamento químico desses elementos no meio físico natural, bem como pelo entendimento da interação das atividades antrópicas com os ciclos biogeoquímicos que representam a movimentação de um determinado elemento ou elementos químicos na atmosfera, litosfera, hidrosfera e biosfera, encontrando-se intimamente ligados aos processos geológicos, biológicos e hidrológicos.

Elementos químicos, como os metais pesados, ocorrem naturalmente na superfície terrestre, participando da constituição química das rochas, podendo ser liberados para outros ambientes pela ação do intemperismo. No entanto, o incremento das atividades industriais, de mineração e agricultura tem aumentado significativamente a concentração dos metais pesados na biosfera, com conseqüente contaminação da atmosfera, dos recursos hídricos, solos, plantas e animais. Dentre os ecossistemas mais degradados pelas atividades antrópicas, os ambientes aquáticos certamente são os mais afetados, em virtude de serem os corpos receptores dos efluentes industriais e dos agroquímicos.

Em ambientes aquáticos, os metais pesados encontram-se dissolvidos na água ou adsorvidos nos sedimentos. Em virtude das características físicas e químicas encontradas nos sedimentos, os teores de metais pesados podem superar em até 10.000 vezes os teores encontrados na água (Bisinoti *et al.* 2004). As altas concentrações de metais encontradas atualmente em sedimentos podem refletir um processo de contaminação recente, como também alterações ocorridas ao longo do histórico de ocupação. Desta forma, a composição química atual dos sedimentos é resultante de todos os processos ocorridos na bacia de drenagem.

A área de estudo, localizada no alto-médio curso do Rio São Francisco entre as cidades de Três Marias e Pirapora, apresenta um panorama socioambiental em que a associação dos fatores naturais com o modelo ocupacional desenvolvido a partir das décadas de 1970 e 1980 indica a necessidade de estudos específicos voltados para a caracterização da concentração e distribuição dos metais pesados em ambientes aquáticos. Na área em questão, as principais atividades econômicas estão voltadas para a exploração direta dos recursos naturais, sobretudo para o

beneficiamento de zinco pela Votorantim Metais Zinco S/A, em Três Marias; beneficiamento de Fe-Si e outras ligas metálicas pelas metalúrgicas Liasa, Minasligas e Inonibrás, em Pirapora; monoculturas de eucalipto, soja, milho e café, no segmento médio do rio; e produção têxtil, também em Pirapora. Essas atividades podem comprometer a qualidade dos sedimentos do Rio São Francisco e seus afluentes.

1.1 Objetivo geral

O objetivo fundamental deste trabalho é determinar a concentração total e distribuição dos elementos químicos (Pb, Cd, Cu, Co, Cr, Zn, Ba, Ni, Fe, Al, Ca, Mg, Ti e Mn) em sedimentos de corrente no Rio São Francisco, desde a cidade de Três Marias, a jusante de represa homônima, até a cidade de Pirapora, a montante da confluência desse rio com o Rio das Velhas; buscando identificar os fatores naturais e antropogênicos que influenciam a liberação dos metais pesados no ambiente aquático.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos estão subdivididos em cinco tópicos principais:

- a) analisar a composição química e mineral dos sedimentos de corrente e sua correlação com litotipos encontrados na área de estudo;
- b) avaliar o transporte e distribuição dos sedimentos ao longo do rio, identificando áreas preferenciais de acumulação de sedimentos silto-argilosos;
- c) analisar os parâmetros físico-químicos que influenciam no processo de adsorção dos metais nos sedimentos e sua possível relação com o uso e ocupação dos solos adjacentes;
- d) caracterizar a evolução tempo-espacial do uso e ocupação dos solos no segmento estudado no período de 1980 a 2010;
- e) gerar mapas de geoacumulação dos metais pesados analisados, a fim de dar suporte aos estudos ambientais.

1.3 Trabalhos prévios

A problemática ambiental no Rio São Francisco tem sido enfatizada pela mídia nacional, em virtude do programa federal de revitalização da bacia hidrográfica do São Francisco e do projeto de transposição das águas. Outro fato que despertou o interesse da sociedade civil organizada, e também dos geocientistas, foi o acidente ambiental ocorrido em 2005, que culminou com a uma grande mortandade de peixes. A partir de então, alguns trabalhos científicos desenvolvidos na

região de Três Marias e Pirapora buscam caracterizar os aspectos geoambientais e a influência das atividades antropogênicas na qualidade ambiental da bacia. .

Almeida (2010) analisou a gestão ambiental dos sedimentos de corrente do Rio São Francisco na região de Três Marias, apresentando estes, na área de lançamento dos efluentes da Votorantim Metais Zinco S/A, concentração de metais acima dos valores de Nível-1 e Nível-2 estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 344/2004.

Baggio (2008) estudou as contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em águas superficiais e sedimentos de corrente na Bacia do Rio do Formoso, onde as análises químicas dos metais pesados, tanto nas águas superficiais como nos sedimentos, demonstram que o cádmio e o cromo são os elementos cujas concentrações violaram respectivamente as Resoluções CONAMA nº 357/2005 (água) e a nº 344/2004 (sedimentos).

Trindade *et al.* (2008) estudaram a influência dos aspectos geoquímicos na formação dos leques arenosos na Bacia do Rio do Formoso, verificando a lixiviação diferenciada de Fe dos arenitos da Formação Três Barras.

Oliveira (2007) investigou a contaminação por metais pesados no solo, sedimentos e água no entorno da barragem de Três Marias e no próprio Rio São Francisco, cujas causas são uma indústria de refinamento de zinco – verificando uma pequena elevação da concentração de zinco na margem direita em relação à margem esquerda – e a jusante da Votorantim Metais Zinco S/A.

Trindade (2007) analisou a influência das condicionantes litoestruturais na origem e desenvolvimento de processos erosivos e arenização na Bacia do rio do Formoso, atestando a relativa fragilidade dos litotipos do Grupo Areado e a alta friabilidade desses arenitos.

Ribeiro (2007) analisou os níveis de contaminação por metais pesados em águas superficiais do Rio São Francisco em Pirapora e sua relação com as atividades industriais, demonstrando a correlação dos elementos Cd e Pb no rio e a localização das indústrias.

Trindade *et al.* (2006) descreveram a influência do Grupo Mata da Corda na estruturação dos aspectos geomórficos e pedogênicos na Bacia do Rio do Formoso.

Viana (2006) buscou avaliar a condição geoquímica ambiental das veredas na Bacia Hidrográfica do Rio do Formoso, sub-bacia do São Francisco e um dos maiores afluentes regionais da margem direita, sendo verificada a ocorrência de cobre e zinco nas áreas próximas a monoculturas.

Apesar dos trabalhos acima citados, trabalhos geoquímicos em escala regional apresentam-se de forma bastante incipiente, fato que contribui para a não integralização das atividades produtivas, licenciamentos ambientais e planos de manejo na Bacia do São Francisco e suas sub-bacias. Desta forma, este trabalho pretende dar suporte à tomada de decisão e contribuir para o engendramento de planos de manejo e implantação de indústrias e monoculturas em escala regional.

2 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIOGRAFICOS

2.1 Localização

A área de estudo encontra-se inserida na porção mineira da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, abrangendo uma área de 12.071,97km² (Figura 1). A porção mineira da bacia citada representa uma área de 234.559,67km², correspondendo a 34% de sua área total. Compreendida entre as coordenadas geográficas 19° 26' 36''S - 46° 21' 56''W e 17° 11' 43''S - 44° 29' 13''W, a área da pesquisa, mais especificamente, localiza-se no segmento do Rio São Francisco entre as cidades de Três Marias e Pirapora, com um canal fluvial de 160km de extensão. O acesso é feito percorrendo-se 275km pela BR-040 a partir de Belo Horizonte, ou ainda 334km pela BR-365, da cidade de Montes Claros até a cidade de Três Marias–MG.

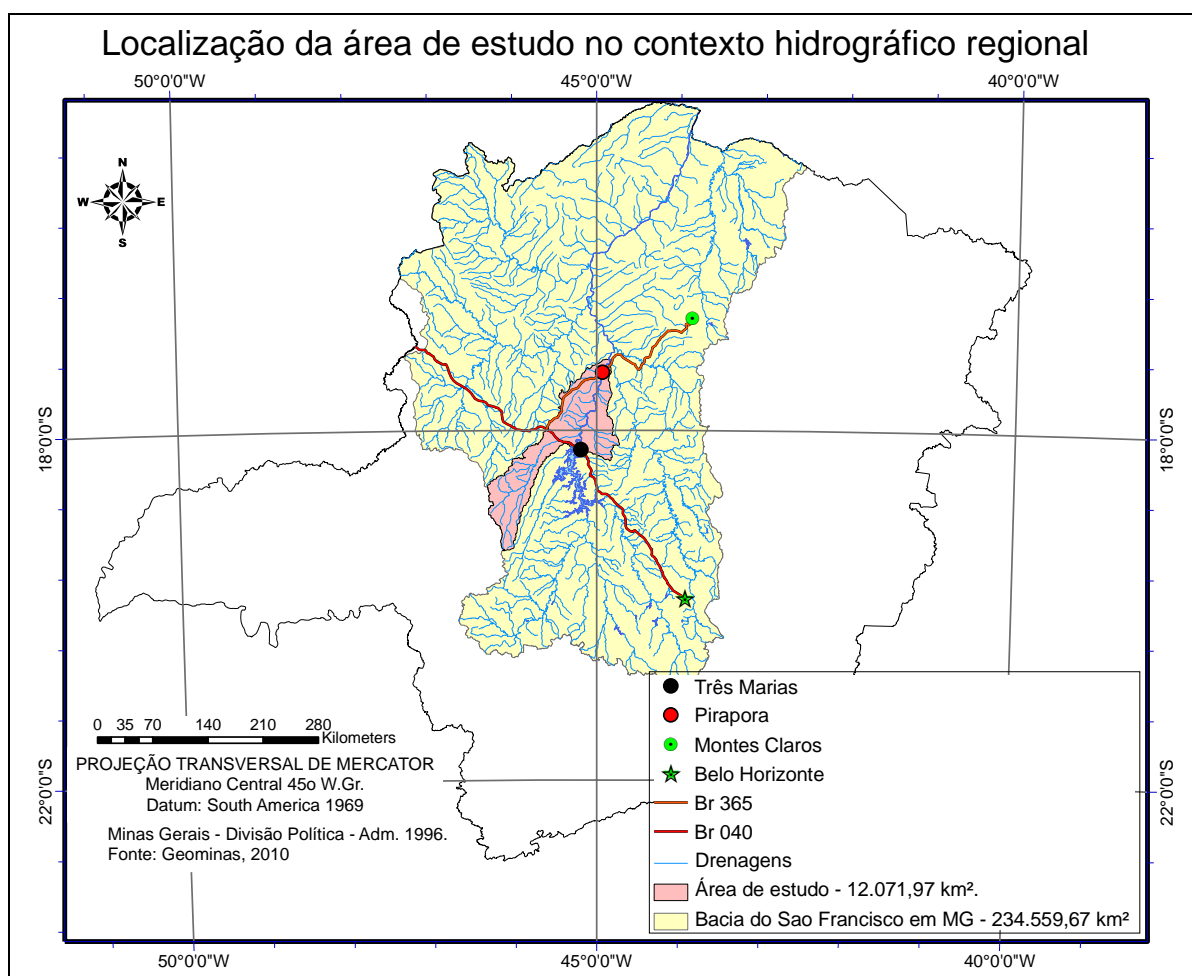


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. O mapa mostra as vias de acesso, rede de drenagem regional e área de abrangência da área de pesquisa na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e no Estado de Minas Gerais.

Formada pelos municípios de Três Marias, Pirapora, Buritizeiro, Várzea da Palma, São Gonçalo do Abaeté, Varjão de Minas, Lassance, Tiros, Matutina, São Gotardo, Lagoa Formosa, Patos de Minas, Carmo do Parnaíba e Arapuá, a área de estudo apresenta um cenário

socioambiental definido pelos múltiplos usos dos recursos naturais e impactos ambientais negativos envolvendo, sobretudo, os recursos hídricos.

No contexto histórico, sua evolução é marcada pela estruturação das políticas públicas da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) a partir de 1960, onde com a implantação das indústrias de beneficiamento de Fe-Si, zinco e das monoculturas de pinus e eucalipto, estabeleceu-se um novo modelo de uso e ocupação do solo. Na região de Três Marias, as principais alterações e fatores de pressão antrópica estão relacionados com o beneficiamento de zinco e chumbo (Figura 2), realizado atualmente pela Votorantin Metais; o garimpo de ouro e diamante no Rio Abaeté e a instalação da usina hidrelétrica Presidente Juscelino Kubitschek, pertencente à Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig).



Figura 2 – Antiga barragem de rejeito da Votorantin Metais em Três Marias. Atualmente a barragem está desativada; no entanto, os sedimentos depositados ao longo dos anos de funcionamento ainda podem apresentar altos teores de Pb, Cd e Zn.

Já na região de Pirapora, com a implantação do Distrito Industrial, em 1967, ocorre a principal mudança no uso e ocupação dos solos. Atualmente, o parque industrial conta com três indústrias metalúrgicas e quatro têxteis que lançam particulados atmosféricos e efluentes líquidos diretamente no Rio São Francisco (Figura 3).



Figuras 3 – Poluentes atmosféricos e lançamento de efluente industrial (Pirapora–MG). a) Liberação de poeira amorfa-cristalina de SiO_2 , Si e Fe_3O_4 , que se depositam no entorno das fabricas e diretamente no rio. b) Lançamento de efluentes residuais das atividades têxtis.

O município de Pirapora pode ser caracterizado como tipicamente urbano, não apresentando atividades rurais expressivas. No entanto, na porção norte localiza-se um projeto de fruticultura irrigada – principalmente de uva, banana, tangerina e laranja – implantado na década de 1970 através de convênio entre a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF) e SUDENE cujo uso de agroquímicos pode comprometer a qualidade dos sedimentos localmente.

As principais transformações no campo agrícola também ocorreram na década de 1970, com a introdução das monoculturas de pínus e eucalipto que se destinavam à produção de carvão para abastecer as metalúrgicas localizadas nos distritos industriais de Sete Lagoas e Pirapora. Posteriormente, na década de 1990, as atividades agrícolas se diversificaram, com o início da produção irrigada e sequeiro de grãos, dentre eles soja, milho, café e algodão.

2.2 Aspectos fisiográficos

2.2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

Do ponto de vista geotectônico, a área em estudo encontra-se na porção sul do Cráton do São Francisco (Figura 4), definido por Almeida (1977, 1981) como uma das porções da Plataforma Sul-Americana individualizada em decorrência dos processos orogênicos do Evento Brasileiro (± 600 Ma). Tais eventos originaram a leste a Faixa Araçuaí e a oeste a Faixa de Dobramento Brasília (FDB) durante o Neoproterozoico. Para Alkimim & Martins-Neto (2001), a FDB corresponde a um cinturão de dobramentos e cavalgamentos de antepaís que atinge uma largura máxima de cerca de 200km na parte sul da bacia. Nas proximidades da cidade de Três Marias–MG as linhas estruturais

condicionam as macro-feições geomórficas e exerce um forte controle no arranjo da rede de drenagem.

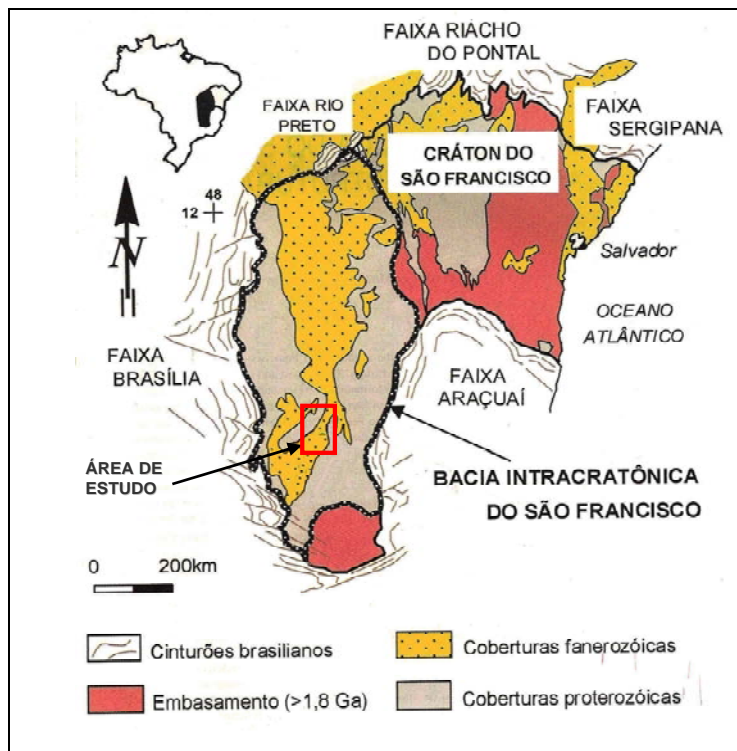


Figura 4 – Cráton do São Francisco. Mapa Geológico simplificado contendo as principais coberturas e Faixas de Dobramentos adjacentes.

Fonte: Alkmim *et al.* (1993).

O Cráton São Francisco encontra-se circundado por faixas neoproterozoicas: Faixa de Dobramento Brasília e Rio Preto, a oeste; Faixa Araçuaí, a leste. Nesse contexto, Alkmim *et al.* (1993, 1996) propõe uma compartimentação baseada nos elementos neoproterozoicos, distinguindo assim um Compartimento W, correspondente às faixas Brasília e Rio Preto; um Compartimento E, representado pela Faixa Araçuaí e, por fim, um Compartimento Central, onde se localizam as unidades pré-cambrianas com baixa deformação. Grande parte da área de estudo encontra-se no Compartimento Central, onde o relevo apresenta-se pouco movimentado, com declividades médias inferiores a 8%, fato que possibilita a implantação de monoculturas mecanizadas em grandes extensões de terra.

2.2.2 ARCABOUÇO GEOLÓGICO.

Localizada na parte meridional da Bacia do São Francisco, a área de estudo apresenta uma evolução paleogeográfica fortemente controlada pelos estágios tectônicos e magmáticos que condicionaram os períodos de deposição, diagênese e erosão dos litotipos encontrados na bacia. Esses estágios estão claramente representados no registro estratigráfico da bacia, com indicação de eventos que vão desde o Neoproterozoico até o Cenozoico.

2.2.3 NEOPROTEROZOICO: SEDIMENTAÇÃO DO GRUPO BAMBUÍ.

O Grupo Bambuí, na área de pesquisa, encontra-se representado pelas Formações Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Campos-Neto *et al.*, 2003). Destas formações são retrabalhados e transportados os sedimentos litogênicos mais antigos que chegam ao canal de drenagem do Rio São Francisco.

2.2.3.1 Formação Lagoa do Jacaré

A Formação Lagoa do Jacaré, composta por calcários, siltitos e margas, apresenta a menor distribuição espacial na área de estudo, cerca de 7,3km² (Figura 6). Suas exposições estão restritas aos afloramentos que ocorrem na Bacia do Rio Abaeté, a sudoeste da cidade de Três Marias. Esses afloramentos geralmente são estruturas alongadas no sentido SSE-NNW, localizados nas proximidades das linhas estruturais (lineamentos transbrasilianos) que bordejam a porção sul do Cráton do São Francisco.

Segundo Iglesias (2007), a deposição da Formação Lagoa do Jacaré teria ocorrido após a deposição da Formação Serra de Helena, quando uma regressão marítima possibilitou a deposição da sequência pelito-carbonática. Nesse sentido, a sedimentação teria ocorrido em uma plataforma de alta energia, sujeita a constante retrabalhamento (brechas intraclásticas) e episódios de tempestades (*hummocky*), intercalados por períodos de relativa calmaria (Iglesias 2007). Apesar da área restrita, esta formação contribui com os sedimentos de origem bioquímica encontrados no canal de drenagem do Rio São Francisco próximo à confluência com o Rio Abaeté.

2.2.3.2 Formação Serra da Saudade

As litofácies da Formação Serra da Saudade ocorrem, principalmente, no alto curso do Rio Abaeté; recobrimo uma área de 2.231km² representada pelos siltitos e argilitos verdes (Figura 6). Para Uhlein (2004 *apud* Iglesia 2007), a deposição dessa formação ocorreu provavelmente em um contexto plataformal com influência de correntes de turbidez e episódios de tempestades.

Em trabalhos realizados em áreas adjacentes à Bacia do Rio Abaeté, Lima *et al.* (2007) reconheceram cinco litofácies para a Formação Serra da Saudade: (1) ritmito pelito-arenoso; (2) carbonatos retrabalhados; (3) ritmito areno-pelítico verde (*verdete*); (4) arenito fino com *hummocky* e (5) ritmito fosfático.

As rochas terrígenas da Formação Serra da Saudade são imaturas, de deposição rápida e sedimentadas próximas à área fonte, em uma bacia sob influência de processos tectônicos colisionais (Guimarães 1997 *apud* Lima *et al.* 2007).

2.2.3.3 Formação Três Marias

A Formação Três Marias é a unidade do Grupo Bambuí que apresenta a maior distribuição geográfica na região: cerca de 3.271km² (Figura 6) entre os municípios de Três Marias, Pirapora e adjacências. Essa formação constitui uma espessa sequência tempestítica com relativa persistência lateral das suas litofácies, sendo representada por pacotes de arenitos arcoseanos de granulometria predominantemente fina a muito fina, intercalados por siltitos arcoseanos cinza-esverdeados e violáceos, com idade aproximada de 650 a 600 Ma (Chiavegatto 1992).

Os aspectos deposicionais da Formação Três Marias são marcados principalmente pelo caráter discordante erosivo, apresentando ainda ausência de deformações significativas; fato que atesta a relativa estabilidade tectônica do compartimento central durante a deposição.



Figura 5 – Formação Três Marias. Pacote evidenciando deposição cíclica fluvial de arenitos arcoseanos em organização plano-paralela.

Fonte: Trindade *et al.* (2006).

Para Chiavegatto (1992), a sedimentação da Formação Três Marias registra um ambiente deposicional característico de uma plataforma continental rasa dominada por tempestades e sujeita a uma ciclicidade dos eventos deposicionais, em que cada ciclo descreve períodos de alternâncias no suprimento sedimentar durante períodos calmos e tempestuosos.

Os depósitos pelíticos e areníticos da Formação Três Marias encontrados na área de estudo indicam que o paleoambiente, marcado por alternâncias deposicionais, favoreceu a intercalação de sedimentos finos a muito finos (areia fina a silte, respectivamente) e condicionou a baixa condutividade hidráulica dos arenitos arcoseanos, favorecendo o alto grau de compactação adquirido em resposta à deposição dos litotipos sotopostos da Formação Três Barras no Cretáceo Inferior.

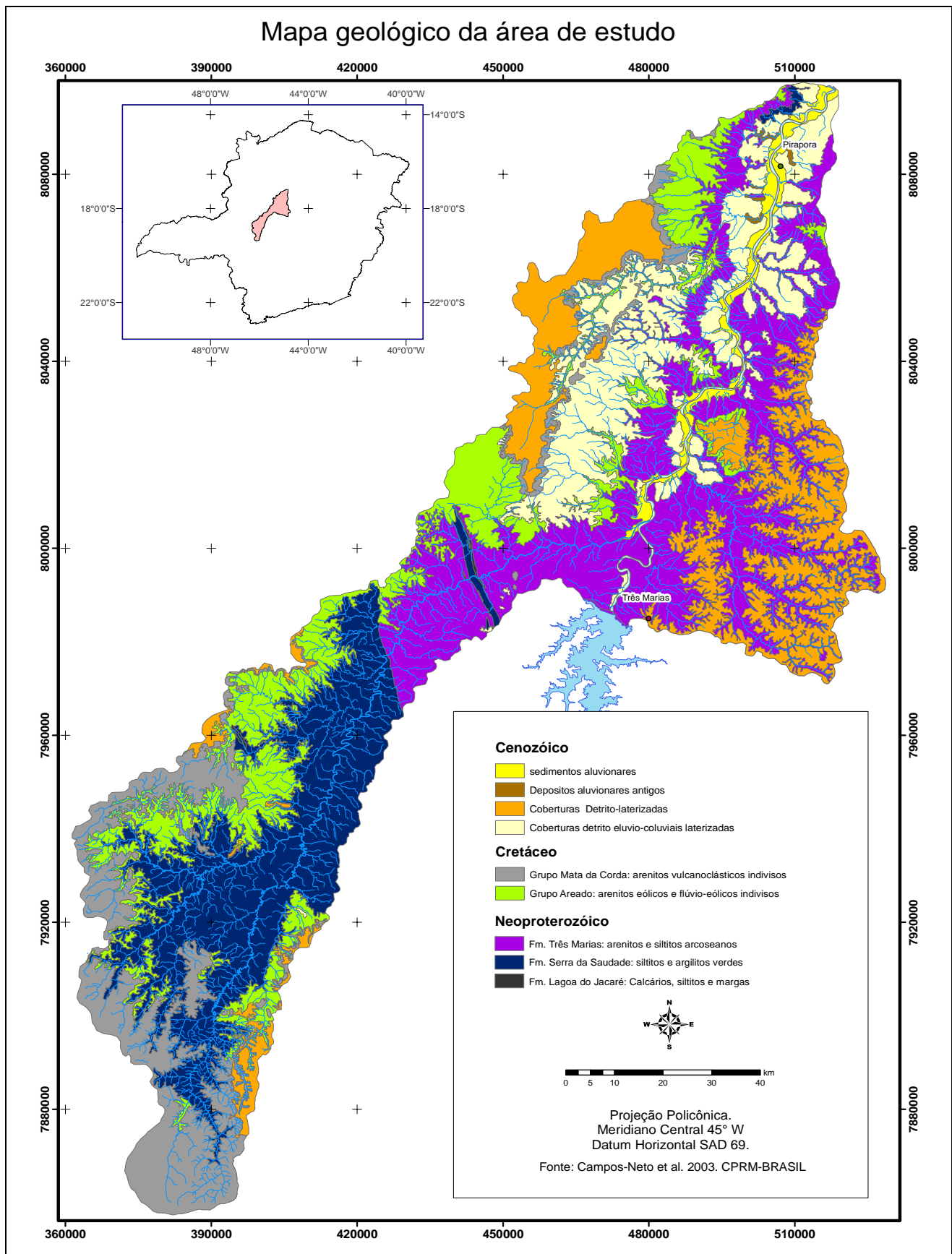


Figura 6 – Mapa geológico. Distribuição espacial das formações geológicas e coberturas descritas para a área de estudo.

2.2.4 O CRETÁCEO NA ÁREA DE ESTUDO

O cretáceo é caracterizado como período geológico melhor representado e estudado no Brasil, devido à presença de hidrocarbonetos nas bacias costeiras, a reconstituição paleogeográfica continental apresenta uma distribuição norte-sul das terras emersas separadas unicamente pelo mar equatorial de Tethys. Altos níveis marinhos e influência marcante da continentalidade e maritimidade também são traços do paleoambiente cretácico, já que, neste período, as terras continentais representavam apenas 18% das terras emersas – diferentemente dos atuais 28% (Sgarbi *et al.* 2001).

2.2.4.1 Cretáceo Inferior: a sedimentação do Grupo Areado

Na porção meridional da Bacia do São Francisco, o Cretáceo Inferior está representado por uma sequência de semigrábens instalados pela reativação de falhas do substrato pré-cambriano, que atuaram como receptores dos sedimentos basais do Grupo Areado em resposta à principal fase de tensões extensivas formadoras do Atlântico Sul, concomitantemente ao desmembramento do Gondwana (Sgarbi *et al.* 2001).

De acordo com Chaves (1991), sequências crono-correlatas do Grupo Areado são encontradas nos Sistemas Intercalares, em Angola, e no Grupo Lualabá, no Congo; atestando a magnitude da sedimentação do Grupo Areado. Registros paleoclimáticos descritos por estudos de geologia de superfície realizados por Sgarbi (1989) indicam um ambiente com aridez crescente, evidenciada na área de estudo pelas litofácies sedimentares da Formação Três Barras.

O Grupo Areado é composto pelas Formações Abaeté (conglomerados basais), Quiricó (sedimentos lacustres) e Três Barras (arenitos eólicos e flúvio-deltáicos). Seus litotipos recobrem cerca de 1.929km² (Figura 6).

A litofácie conglomerática da Formação Abaeté representa a unidade basal do Grupo Areado. Esses conglomerados jazem diretamente sobre o embasamento (Grupo Bambuí); o contato se fazendo segundo uma discordância angular e erosiva de âmbito regional (Sgarbi 1991). Para Ladeira & Brito (1968), os sedimentos rudíticos (seixos) da Formação Abaeté (Figura 7) foram depositados na Bacia Sanfranciscana ao longo de várias superfícies de denudação, formando discordâncias angulares e erosivas através da implantação dos sistemas deposicionais gravitacionais, na forma de lençóis de escoamento por leques aluviais e fluxos aquosos esporádicos e torrenciais, gerando depósitos do tipo "wadi".



Figura 7 – Cascalhos demonstrando imbricamento da Formação Abaeté. Nos conglomerados dessa formação são descritas ocorrências diamantíferas na região de Três Marias e São Gonçalo do Abaeté.

Na área de estudo, a Formação Abaeté constitui a associação litofaciológica que melhor representa o caráter descontínuo do Grupo Areado, fato este que a torna, às vezes, extremamente difícil de ser detectada no campo; apresentando-se de formas muito restritas, sendo raramente encontradas nas paleodepressões do embasamento neoproterozoico; formando pequenos depósitos fluviais entrelaçados de alta energia, dominados por cascalhos representados pelas cascalheiras encontradas na bacia.

A crescente aridez ocorrida no Cretáceo Inferior condicionou a deposição da Formação Quiricó, atualmente caracterizada pelos sedimentos lacustres responsáveis pelo preenchimento de paleolagos, formados em depressões do embasamento e circundados por ruditos originários de depósitos de leques aluviais (Sgarbi *et al.* 2001). Suas litofácies sedimentares estão localizadas além dos limites da área de estudo, tendo como litotipos mais representativos os pelitos laminados, arenitos finos a médios e os calcários lacustres. Estes últimos, segundo Sgarbi (1989), atestam a atuação de um clima seco em que, pelo menos em algumas vezes, a taxa de evaporação superava o aporte de água ao lago, proporcionando a precipitação do excesso de sais concentrados.

A Formação Três Barras apresenta a maior distribuição geográfica na área investigada. Seus litotipos estão subdivididos em dois membros: Olegário (arenitos relacionados a um ambiente tipicamente eólico) e Quintinos (arenitos com predominância de sedimentação em ambientes flúvio-deltáicos), ambos representativos de climas desérticos do Cretáceo Inferior (Moraes *et al.* 1986).

Segundo Sgarbi *et al.*(2001) e Sgarbi (1989), todos os litotipos do Grupo Areado foram cimentados por carbonatos de cálcio, originados em parte pela alteração intempérica do evento magmático Mata da Corda, ocorrido no Cretáceo Superior. O autor faz uma distinção entre os

membros Olegário e Quintinos baseado, sobretudo, nas estruturas sedimentares relativas a cada ambiente deposicional, onde a fácies de arenitos eólicos do membro Olegário reflete a formação de dunas cujas estruturas direcionais indicam um transporte preferencial no sentido SW-NE, evidenciando estruturas sedimentares constituídas por intercalações milimétricas de areias claras, médias, arredondadas a bem arredondadas, com areias finas a muito finas, angulosas, róseas e com magnetita, marcadas localmente pela presença de estratificações cruzadas tangenciais de grande porte, além de deformações atectônicas.

Para os arenitos flúvio-deltáicos do membro Quintinos, tem-se uma intensa coloração avermelhada, típica de *red beds* continentais; como também uma granulometria mais fina, alta angulosidade e alto teor em argilas dispostas como matriz. Por serem considerados de origem mista flúvio-deltáica, exibem ausência de feições genéticas distintas de outro ambiente. Foram classificados como arenitos argilosos feldspáticos, finos e angulosos; dispostos em bancos e exibindo laminações plano-paralelas, estratificações cruzadas tabulares e acanaladas de pequeno, médio e grande porte (Figura 8); além de intercalações delgadas de folhelhos.



Figura 8 – Estratificações cruzadas de grande porte. Observam-se pequenos deslocamentos sinsedimentares, depósitos de minerais pesados e superfícies oxidadas da Formação Três Barras com presença de manchas de oxirredução de Fe. (BR-040).

No segmento de estudo, os membros Quintinos e Olegário estão interdigitados, fato que demonstra a variação do nível do mar durante o Cretáceo Inferior, tornando assim bastante complexa a identificação de suas respectivas litofácies no campo. Contudo, os aspectos diagenéticos atuantes na bacia conduziram os litotipos da sedimentação Areado a apresentarem, em caráter

indiviso, coloração rosada a esbranquiçada com manchas de oxirredução e, localmente, coloração esbranquiçada, devido aos processos de lixiviação.

2.2.5 CRETÁCEO SUPERIOR: O VULCANISMO MATA DA CORDA

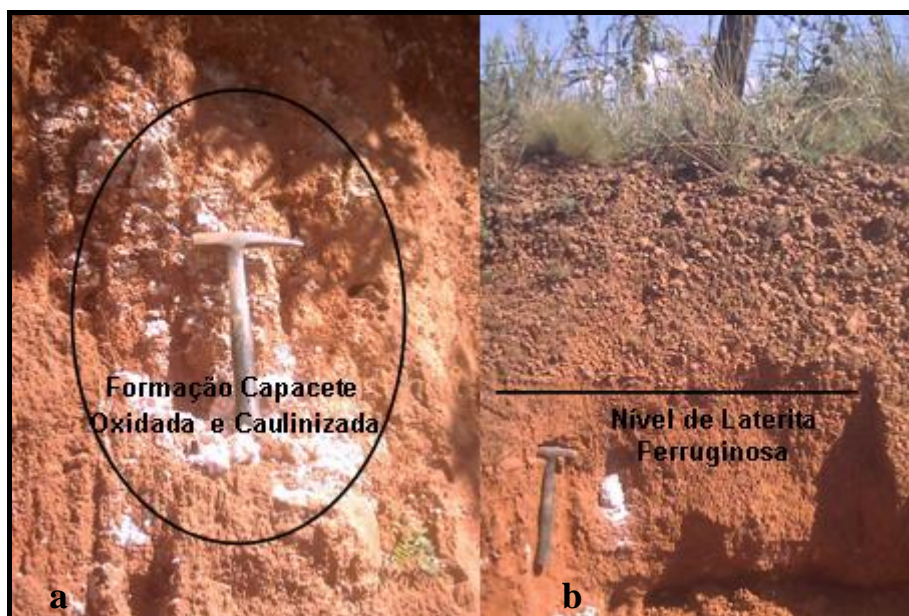
O vulcanismo Mata da Corda e suas litofácies sedimentares representam a reativação tectônica que ocorreu na Bacia Sanfranciscana no Cretáceo Superior, afetando o Arco do Alto Paranaíba, região situada a SW da área de estudo.

A ocorrência de diamantes nos aluviões da Bacia Sanfranciscana impulsionou os primeiros estudos relacionados a esse magmatismo (Guimarães 1927, 1933). Atualmente, o Grupo Mata da Corda encontra-se subdividido nas Formações Patos e Capacete, representando uma área de 1.461km² (Figura 6).

Segundo Sgarbi *et al.* (2001), a unidade basal deste grupo, a Formação Patos, faz parte do magmatismo alcalino máfico que constitui a grande Província Alcalina Minas-Goiás; englobando as rochas vulcânicas e subvulcânicas kamafungíticas – rochas muito raras, sendo reconhecidas somente em três localidades: (1) na África, no braço oeste do *rift* Leste Africano, ao longo da fronteira entre o sudoeste de Uganda e o Zaire; (2) na Itália, onde os kamafungitos têm sua ocorrência restrita a duas províncias de idade quarternária/neogênica localizadas na margem nordeste da Província Romana: San Venanzo e Cupaello; (3) No Brasil, onde o vulcanismo kamafungítico ocorre nas subprovíncias Mata da Corda e Alto Paranaíba, na Bacia Sanfranciscana.

Segundo Fischer (1961 *apud* Sgarbi *et al.* 2001), a Formação Capacete é composta essencialmente por rochas vulcanoclásticas, apresentando conglomerados e arenitos epiclásticos, materiais piroclásticos e aglomerados de borda de conduto, subdivididos respectivamente nas seguintes litofácies sedimentares: conglomerados suportados pela matriz, arenitos líticos vulcânicos, materiais piroclásticos e aglomerado de borda de conduto.

Na área de estudo, a Formação Capacete é composta pela fácies arenitos líticos, que foram transportados e depositados por leques aluviais. Segundo Trindade *et al.* (2006), essa formação encontra-se bastante oxidada e caulinizada (Figura 9), sendo o seu subproduto um material detrítico avermelhado com textura argilosa, no qual fragmentos de rochas vulcânicas aparecem como bolas caulinizadas e cujo topo é recoberto por níveis de lateritas ferruginosas de espessuras variadas.



Figuras 9 – Perfil litopedogênico da Formação Capacete. a) Em detalhe, formação de caulinita. b) Cobertura de laterita ferruginosa com espessura média de 80 cm. Fonte: Trindade *et al.* (2006).

2.2.6 CENOZOICO – TERCIÁRIO/QUATERNÁRIO

O período Cenozoico na Bacia Sanfranciscana ainda necessita de muitos estudos a fim de definir e classificar os ambientes deposicionais e aspectos diagenéticos dos sedimentos arenosos que constituem o arcabouço litopedológico desse período. De forma geral, os trabalhos relacionados ao Cenozoico na Bacia Sanfranciscana apresentam as coberturas aluvionares e sedimentos coluvionares como unidades faciológicas que representam uma área de 2.325km² (Figura 6).

Campos & Dardenne (1997) associam as coberturas aluvionares à área de influência das planícies de inundação das grandes drenagens regionais, resultantes do retrabalhamento fluvial recente e materiais detríticos diversos: cascalhos, areias e siltes. Os sedimentos coluvionares, por sua vez, decorrem de pequeno retrabalhamento das unidades fanerozoicas; sendo formados por areias vermelhas. Contudo, na área de estudo, esses sedimentos arenosos indicam, localmente, formação de espessos pacotes de sedimentos inconsolidados por eluvionamento, caracterizados pelos fragmentos líticos cauliniticos encontrados ao longo de perfis, representativos do alto estágio de intemperização das rochas subjacentes (Figura 10).



Figura 10 – Material detrítico inconsolidado e laterizado, de cor avermelhada. (Br-365/Buritizeiro).

Ainda no Cenozóico, tem-se a deposição dos aluviões recentes, sedimentos transportados pelo Rio São Francisco. Caracteristicamente, esses aluviões estão depositados nas confluências, onde a morfologia é mais plana e o gradiente de transportes dos afluentes é menor. Esses sedimentos inconsolidados, são essencialmente de textura arenosa, areno-argilosa, argilo-síltica e marcam os níveis de transgressão do rio em relação ao leito menor atual.

2.3 Aspectos geomorfológicos

A geomorfologia da área de estudo encontra-se diretamente influenciada pelo arcabouço litoestrutural que condiciona as macrofeições regionais. Segundo estudos geomorfológicos realizados por Valadão (1998), as principais feições geomórficas do segmento estudado ocorrem sobre um plano ligeiramente ondulado representativo das Superfícies Sul-Americanas II e III. Estas superfícies apresentam níveis topográficos médios entre 1.000 e 800 m/alt. Correlacionáveis com as grandes superfícies de aplainamentos do Aptiano e Mioceno Médio, respectivamente, essas feições são localmente representadas pelos Chapadões dos Gerais e Serra do Morro Vermelho, no município de Buritizeiro, Morro de Trinchet, em Pirapora, e Serra da Mesa, em Três Marias. A compartimentação geomorfológica foi baseada nas características litoestruturais, coberturas superficiais, morfologia e posição topográfica de Saadi & Magalhães (1991) e Baggio (2008); adaptadas à área da pesquisa neste trabalho.

O Modelo Digital de Elevação (Figura 11) gerado a partir da interpolação das curvas de nível e tratamento digital de imagens de radar SRTM evidencia a compartimentação do relevo em 3 das macro-unidades geomórficas, Depressão Sanfranciscana com morros residuais dos Planaltos do São Francisco, Superfície intermediária e Planaltos do São Francisco e suas respectivas unidades correlatas (Unidades de Terraços, Colinas e Chapadas).

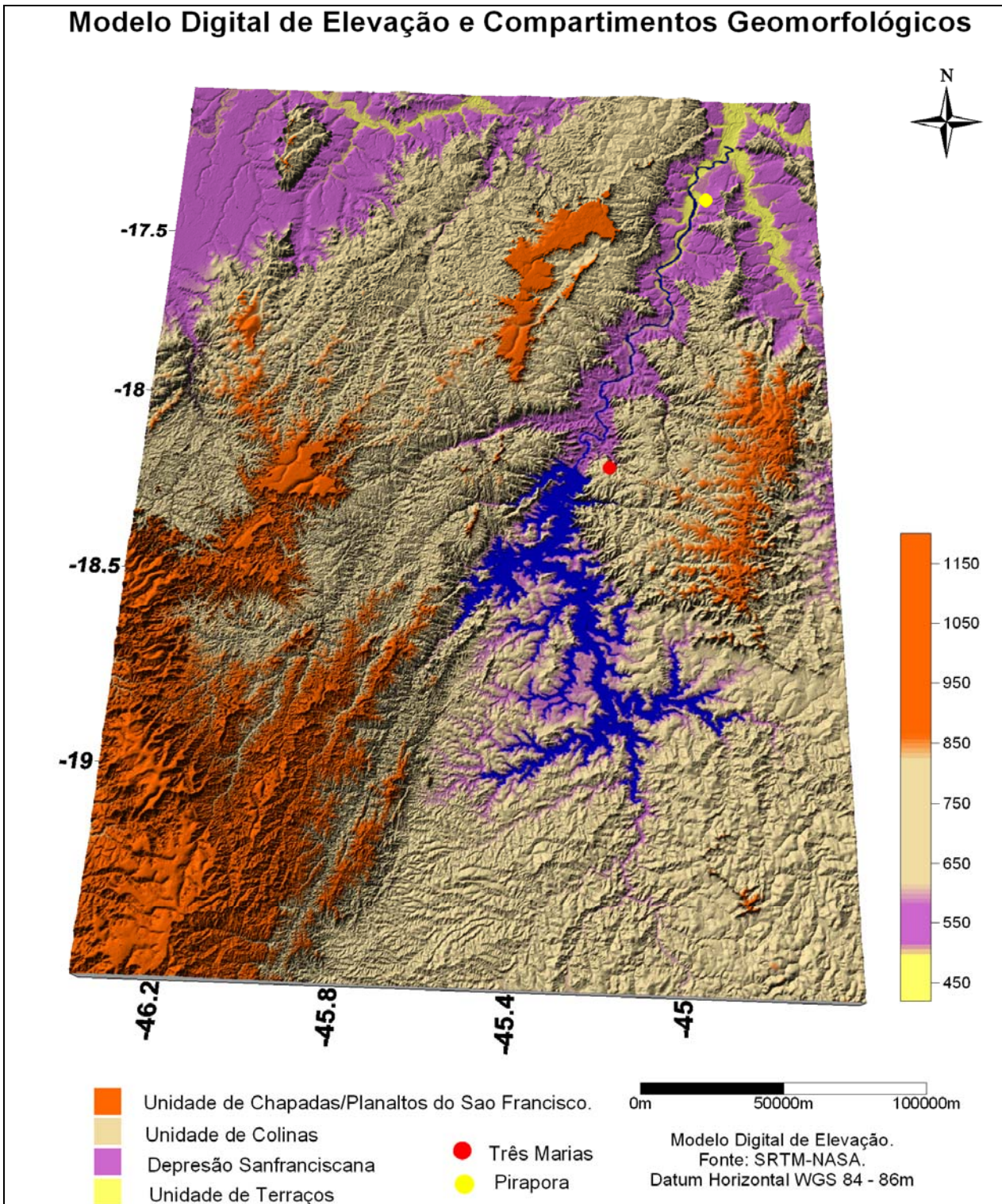


Figura 11 – Modelo Digital de Elevação. O modelo evidencia a relação dos compartimentos geomórficos e macrofeições com a altimetria em escala regional.

A unidade de chapadas é caracterizada pela presença de formas tabulares do Cretáceo Superior aplainadas no Terciário, recobertas, e por lateritas. Fazem parte do mesmo compartimento as escarpas abruptas sustentadas pela Formação Capacete. Tais feições geomórficas possuem expressiva espacialização geográfica, formando o Chapadão dos Gerais.

As chapadas testemunhos de aplainamentos terciários com coberturas lateríticas apresentam orientação SW-NNW e correspondem a remanescentes da Superfície Sul-Americana (King, 1956, Penteado & Ranzani, 1973, Valadão, 1998 apud Baggio 2008). Intensamente remodeladas a partir do intervalo Mioceno/Pleistoceno, suas altitudes médias variam de 1.000 a 950 m/alt.



Figura 12 – Vista geral das unidades geomórficas. Ao fundo, chapadas; correspondendo aos remanescentes da Superfície Sul-Americana (planaltos do São Francisco). Logo abaixo, a Superfície Intermédiária e, posteriormente, a depressão do São Francisco, com residuais.

Os aspectos pedogenéticos dessas chapadas indicam que o espesso pacote de material inconsolidado que as recobre é oriundo da alteração intempérica da Formação Capacete/Cretáceo Superior; constituída por material detrítico avermelhado de consistência areno/argilosa, caulinizado e laterizado, com relictos de material vulcânico, excedendo mais de 20 m de espessura. Apresentam topo plano e rebordo escarpado e, no fundo das depressões, corre um horizonte laterítico. Hidrologicamente, esse compartimento geomórfico representa importante área de recarga dos aquíferos cretáceos na área da pesquisa.

Escarpas abruptas sustentadas pela Formação Capacete formam um cinturão que capeia as chapadas testemunhos de aplainamentos terciários com coberturas lateríticas. Apresentam os maiores níveis de declividade da área de estudo e são constituídas basicamente por sedimentos vulcanoclásticos transportados por leques aluviais do Grupo Mata da Corda. Por possuírem maior estabilidade à ação erosiva, esses sedimentos protegem as rochas adjacentes, fazendo com que as escarpas se sobressaiam na topografia local. No contexto hidrológico, essa superfície é de grande importância, sendo caracterizada como área de descarga dos aquíferos cretáceos – evidenciado pelo grande número de nascentes e veredas localizadas nas bordas de escarpas.



Figura 13 – Formação Capacete. Visada frontal das escarpas abruptas. Ao longo das chapadas apresentam-se taludes com inclinação geralmente superior a 45° e formam-se taludes de aproximadamente 40 m de altitude.

Unidades de Colinas e Vales Cretáceos localizam-se ao longo do eixo de drenagem. Geomorfologicamente, as colinas apresentam formas convexas, esculpidas em rochas areníticas do Grupo Areado e Grupo Mata da Corda. Nesta mesma unidade geomórfica tem-se ainda sequências de morrotes convexos (Figura 14) com rampas curtas e íngremes, que se propagam até o fundo dos vales, correspondentes ao nível de aplainamento denominado Superfície Mata da Corda, por Baggio (2008).



Figura 14 – Superfície Mata da Corda, com sequência de morrotes. Vertentes convexas com rampas curtas recobertas por lateritas ferruginosas e sedimentos vulcanoclásticos.

Geralmente, essas sequências de morrotes se encontram posicionadas na mesma direção dos vales cretáceos, que são caracterizados pelo trabalho erosivo das cabeceiras de drenagens e paleodrenagens pertencentes à malha hidrográfica da bacia.

As Unidades de Colinas (Figura 15) prolongam-se aos fundos de vale, bordejando a planície aluvial, apresentando-se de forma convexo-côncavas com flancos ravinados e vales encaixados, resultantes da dissecação pleistocênica. Essas colinas são predominantemente esculpidas em litotipos do Grupo Bambuí – Formação Três Marias.



Figura 15 – Unidades de Colinas bordejando a planície aluvial. Nestas áreas nota-se pouco uso agrícola, devido às condições pedológicas e topomórficas.

As Unidades de Vales e Terraços Quaternários representam a sequência de encostas que interligam os níveis de chapadas e colinas às calhas fluviais, juntamente com os terraços aluviais.

2.4 Geomorfologia Fluvial

O canal fluvial do Rio São Francisco, na área de estudo, apresenta características morfológicas diferenciadas, em função dos aspectos geomorfológicos e estruturais encontrados ao longo dos 160km que compõem o perfil longitudinal (Figura 16).

Topograficamente, o segmento não apresenta grandes variações altimétricas. Em consonância com as declividades médias do relevo regional (5%), são encontradas as cotas altimétricas 513 e 475 m, respectivamente em Três Marias (próximo ao barramento da represa homônima) e Pirapora (próximo à confluência com o Rio das Velhas).

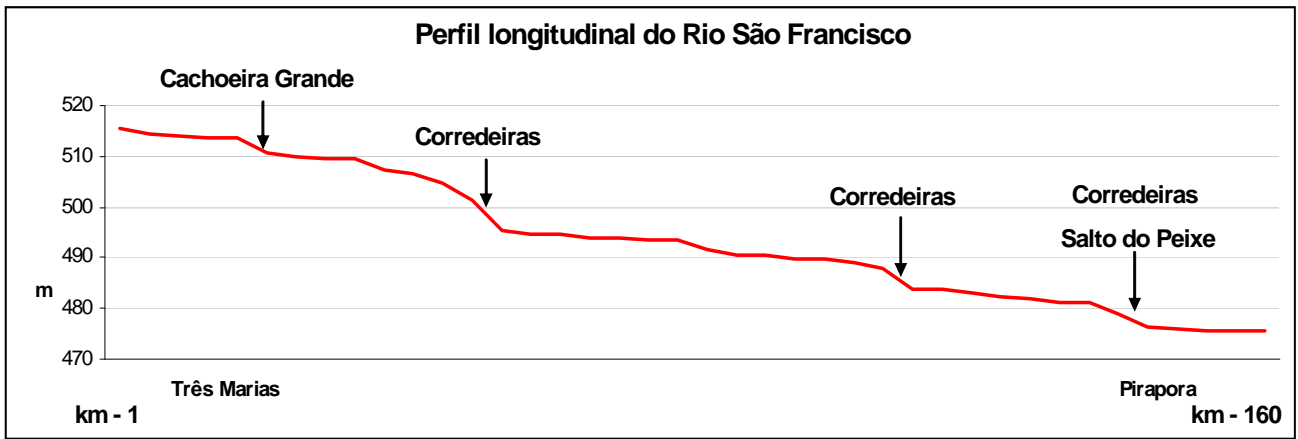


Figura 16 – Perfil longitudinal do Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora–MG. Ao longo do perfil observa-se um pequeno desnível de apenas 43 m, para os 160km de canal (0,03 % de declividade).

Nas proximidades do barramento da Represa de Três Marias, o fluxo é turbulento, em virtude do deflúvio da barragem. Nesse local o rio apresenta alto gradiente de transporte, sendo seixos e calhaus os sedimentos encontrados no leito.

A jusante do barramento (aproximadamente 10km), o canal apresenta um controle estrutural, exercido provavelmente por fraturamentos nas unidades da Formação Três Marias. Tais linhas de fraturas encontram-se bem representadas na Cachoeira Grande (Figura 17), onde o canal fluvial sofre uma inflexão de aproximadamente 90° para NW, com alternância do fluxo laminar para turbulento encachoeirado. Da Cachoeira Grande até a confluência com o Rio Abaeté, os indícios de controle estrutural são evidenciados pela morfologia do canal, que apresenta pequenos trechos retilíneos com bruscas alternâncias na direção do fluxo.



Figura 17 – Cachoeira Grande (Três Marias). Áreas com fluxo turbulento apresentando baixa concentração de sedimentos finos.

A jusante da confluência do Rio Abaeté com o São Francisco, os processos de sedimentação são evidenciados tanto pela formação de barras arenosas e ilhas bem como pelo caráter meandrante que o canal adquire (Figura 18). Nesse ponto o fluxo é predominantemente laminar – os sedimentos apresentando granulometria mais fina (areias finas) – e o leito menor é bordejado por terraços sobrepostos aos cascalhos da Formação Abaeté.



Figuras 18 - Ambientes fluviais com fluxo laminar. a) Terraços sobrepostos aos cascalhos Abaeté. b) Formação de ilhas no canal fluvial.

Ao longo dos 160km de canal fluvial, são observadas algumas alterações pontuais no regime de transporte e no fluxo do rio, ocasionadas pela presença de pequenas corredeiras. No entanto, na cidade de Pirapora, uma grande corredeira torna o fluxo do rio turbulento por uma distancia de 800 m, com grande deposição de sedimentos arenosos a jusante (Figura 19). A partir das corredeiras de Pirapora inicia-se a hidrovía oficial do São Francisco, seguindo por 1.371km até Juazeiro–BA/Petrolina–PE.



Figura 19 – Ambientes fluviais com fluxo turbulento. a) Corredeiras Salto do Peixe, em Pirapora. Indícios de movimentações tectônicas no semigráben de Pirapora. b) Deposição de sedimentos arenosos à jusante da corredeira.

Além do aprofundamento do canal fluvial (Hidrovia do São Francisco), terraços aluviais bem desenvolvidos são característicos no segmento entre as corredeiras de Pirapora e a foz do Rio das Velhas.



Figura 20 – Terraços recentes próximos à confluência aos rios São Francisco e Velhas. Os terraços são bastante utilizados como áreas de pastagem neste local.

2.5 Hidrografia

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco estende-se entre os estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e o Distrito Federal; em uma área de drenagem de 634.000km² – cerca de 8% do território nacional. O curso do Rio São Francisco apresenta uma extensão de 2.700km, com um perfil S-N até o norte da Bahia, onde converge na direção SE até sua foz, entre Aracaju e Maceió, com uma vazão média de 3.360 m³/s.

Segundo a divisão do PLANVASF (1989), baseada nas características fisiográficas, a bacia é compartimentada em quatro grandes áreas: O Alto Curso, das nascentes a Pirapora; Médio Curso, de Pirapora ao Lago de Sobradinho; Submédio Curso, de Remanso a Paulo Afonso; e Baixo São Francisco, que vai de Paulo Afonso até o Oceano Atlântico. Segundo o CETEC (1983), em Minas Gerais estão cerca de 39,8% da área total, que compreende o Alto São Francisco e parte do Médio São Francisco.

O Alto São Francisco engloba a área da nascente até a cidade de Pirapora, compreendendo as sub-bacias do Rio das Velhas, Paraopeba, Pará, Abaeté, Jequitaiá, Indaiá e a Represa de Três Marias. O Médio São Francisco vai de Pirapora até o lago de Sobradinho, à altura de Remanso,

compreendendo as sub-bacias dos rios Paracatu, Urucuia, Verde Grande, Carinhanha, Correntes, Grande e Paramirim; situados em Minas Gerais e Bahia.

A área de estudo está inserida no Alto/Médio Curso do São Francisco, onde a estruturação da drenagem regional e a dinâmica hidrológica estão diretamente relacionadas às litoestruturas que caracterizam a região. As principais áreas de recarga localizam-se nos aquíferos cretáceos do Grupo Areado e nas coberturas arenosas do Chapadão dos Gerais. Nos sopés das escarpas desenvolveram-se as cabeceiras de drenagem em ambientes de veredas, a partir das quais forma-se uma densa rede de drenagem.

No segmento em estudo, o Rio São Francisco recebe a contribuição de um grande número de córregos e rios (Figura 21). Dentre os maiores afluentes destacam-se, à margem direita, as sub-bacias do rio Abaeté e Rio do Formoso e, à margem esquerda, o Rio de Janeiro. O Rio Abaeté, que nasce na Serra da Saudade, em São Gotardo, apresenta uma área de drenagem de 5.825km², com um curso de 196km, e deságua no Rio São Francisco a 35km a jusante da Represa de Três Marias (Patrus *et al.* 2001). O Rio do Formoso nasce no Chapadão dos Gerais, no município de Buritizeiro. Ele tem uma área de drenagem de 826km², cerca de 90km de extensão e deságua no Rio São Francisco, próximo à cidade de Pirapora (Baggio 2008). O Rio de Janeiro é o maior afluente da margem esquerda do Rio São Francisco. Localiza-se na divisa dos municípios de Três Marias e Lassance, com um curso de 50km de drenagem. Sua foz está localizada a 54km a jusante da Represa de Três Marias.

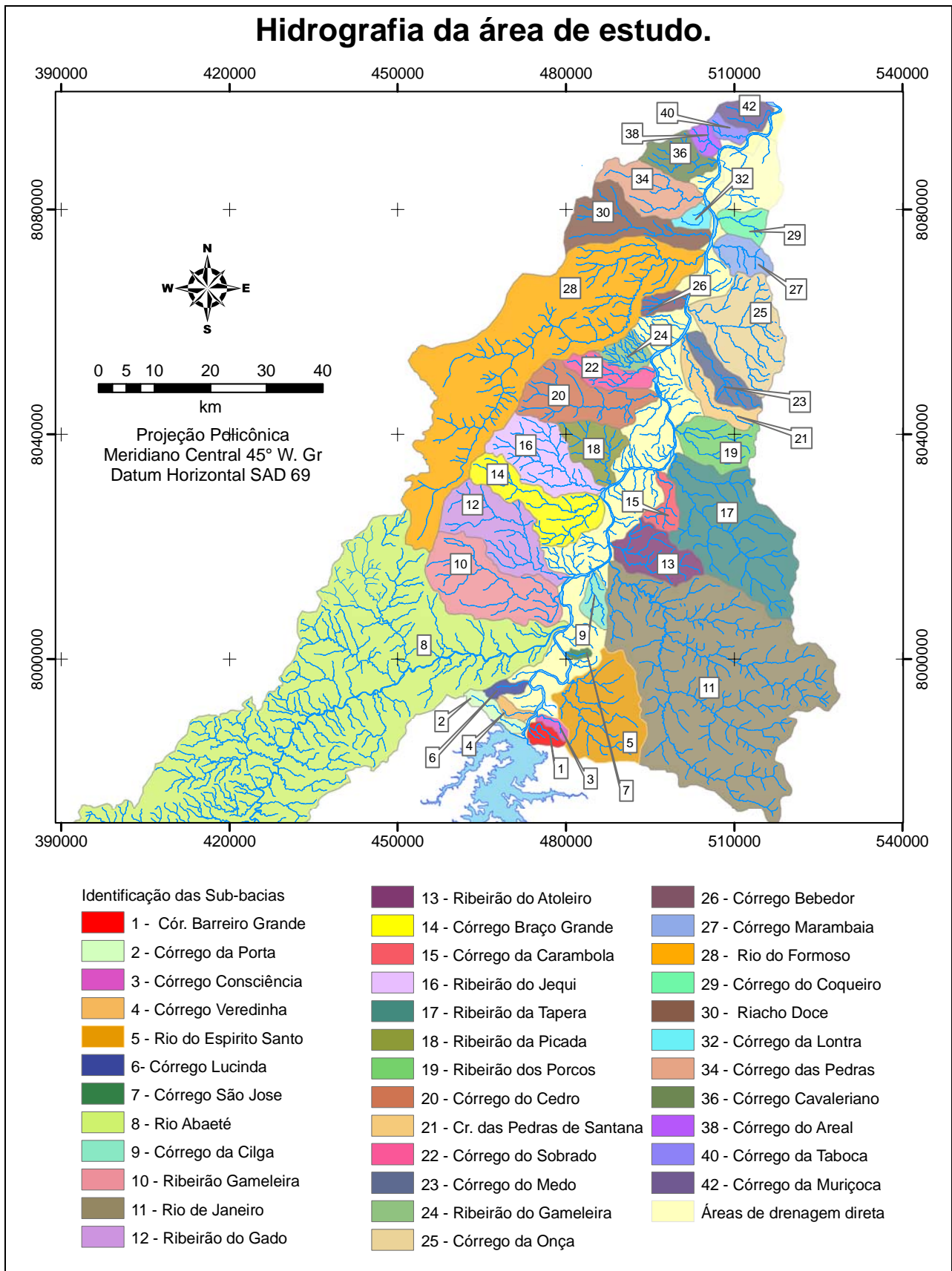


Figura 21. Mapa das sub-bacias que contribuem na área de estudo para o Rio São Francisco.

2.6 Aspectos climáticos da área de estudo

Segundo a classificação climática de Köppen, podem ser descritos três tipos climáticos para o Cráton do São Francisco (Patrus *et al.* 2001):

- Cwb – Clima temperado brando, com verão ameno e chuvoso e inverno brando. É definido pela temperatura do mês mais quente sempre inferior a 22°C e a do mês mais frio sempre inferior 18°C, como também pela ocorrência de estaca seca no inverno e verão chuvoso.
- Cwa – Clima temperado brando com verão quente e chuvoso e inverno brando; apresentando temperaturas médias do mês mais quentes sempre superiores a 22°C e a média do mês mais frio sempre inferior 18°C. A estação seca ocorre no inverno e o mês mais seco tem precipitação inferior à décima parte do mês mais chuvoso.
- Aw – Tropical chuvoso, quente úmido, com inverno seco e verão chuvoso. É caracterizado pela temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C.

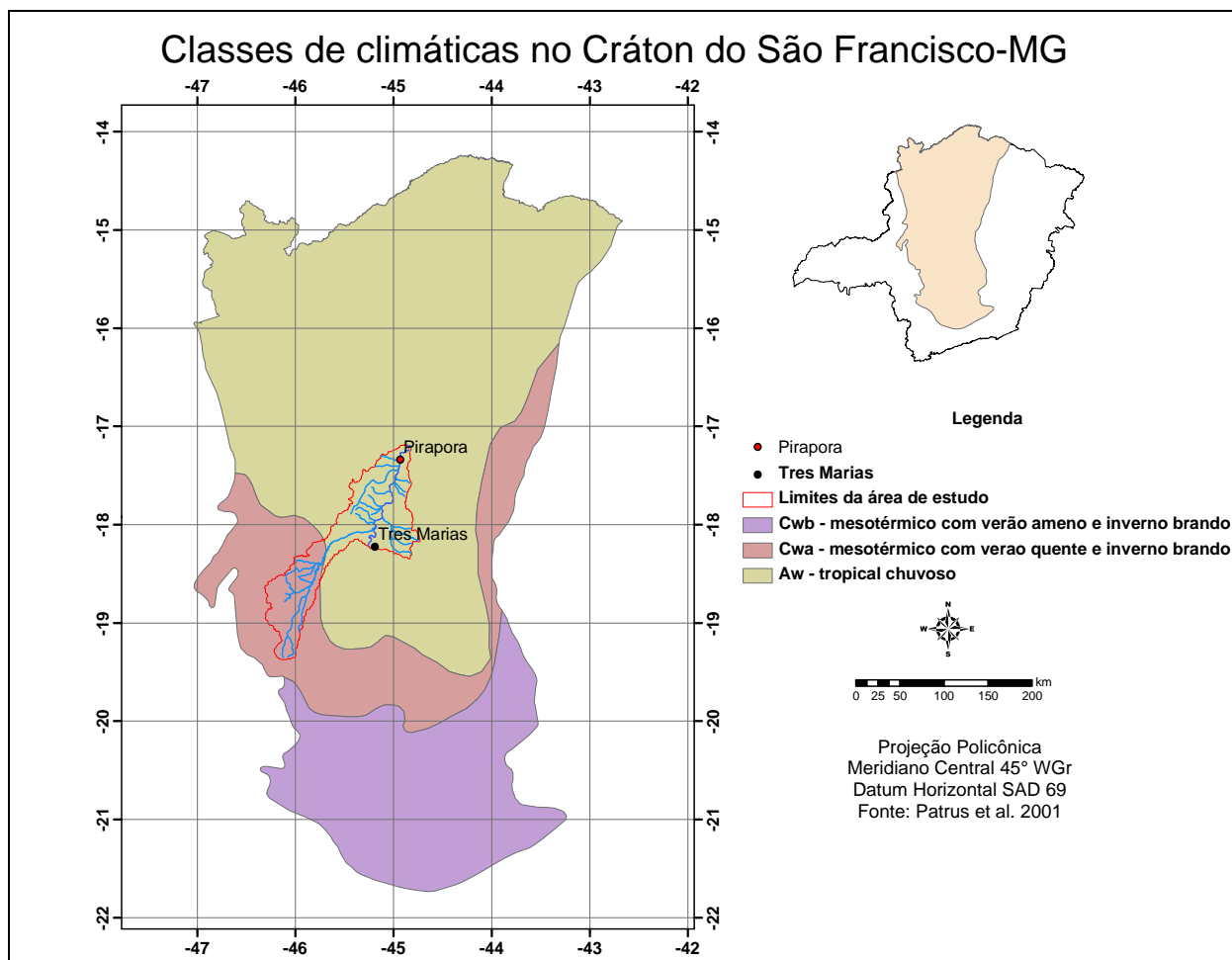


Figura 22 – Classes climáticas no Cráton São Francisco no estado de Minas Gerais. Notar-se-á que a bacia em questão faz parte de duas classes climáticas nas quais alterações nos índices pluviométricos podem culminar no avanço para sul da classe Aw.

Entre os fatores que condicionam o clima no Cráton, as temperaturas descritas para os meses mais frios e as médias pluviométricas são os mais discrepantes. As médias pluviométricas descritas regionalmente apontam índices superiores a 1.500 mm para a parcela referente ao clima Cwb, entre 1.200 a 1.500 mm para o clima Cwa e 1.000 a 1.200 mm para o clima Aw (Figura 22).

Para a área de trabalho são descritos dois tipos climáticos: o Cwa – mesotérmico com verão quente e inverno brando na porção sul, correspondente ao Alto Médio curso do Rio Abaeté – e o Aw – tropical chuvoso, para a porção setentrional. Tais fatores climáticos controlam o aporte de sedimentos no rio através do retrabalhamento hídrico dos solos e taxas de erosão, como também influenciam na amplitude térmica diária das águas superficiais.

2.7 Coberturas vegetais da área de estudo

O IEF (2005), em parceria com o Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal da Universidade Federal de Lavras (UFLA 2005), definiu para a área de estudo os seguintes tipos vegetacionais:

- a) *Floresta estacional semidecidual*: composta por comunidades que abrangem agrupamentos florestais úmidos e estacionais semidecíduais – são as florestas ciliares e de galeria ao longo dos cursos d'água;
- b) *Floresta estacional decidual*: engloba os agrupamentos remanescentes florestais tropicais caducifólios, caracterizados como matas secas ou mesófilas;
- c) *Savanas*: abrangem as diversas formações e fisionomias específicas que caracterizam a região do Cerrado;
- d) *Formações pioneiras*: nessas comunidades estão incluídos os buritizais ou veredas e a vegetação de várzea;
- e) *Tratos antrópicos*: caracterizados pelo reflorestamento com pínus e eucaliptos e sistemas agropecuários.

O mosaico vegetacional, associado ao uso e manejo dos solos, pode influenciar tanto na qualidade como na quantidade dos sedimentos que ocorrem na área de drenagem. Em particular, o tipo vegetacional descrito como tratos antrópicos é caracterizado regionalmente pelo uso de agroquímicos e fertilizantes.

2.8 Caracterização dos solos encontrados na área de estudo

As coberturas pedológicas são originadas da interação da rocha, clima, relevo, organismos e tempo. Os solos representam parte da identidade natural herdada do substrato local e estão inseridos entre as condicionantes naturais da qualidade ambiental dos sedimentos.

Os sedimentos pedogênicos ou secundários ocorrem comumente nas frações mais finas dos solos, estando associados aos metais pesados provenientes dos agroquímicos. As frações mais finas têm sido descritas na literatura, por sua grande área específica, como as que mais adsorvem os metais pesados.

Para Santos *et al.* (2006), os solos são coleções de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas; são também tridimensionais, dinâmicos e formados por materiais minerais e orgânicos; ocupando a maior parte do manto superficial das extensões continentais do nosso planeta. Para a Geoquímica Ambiental, as alterações intempéricas que ocorrem nos solos são importantes, já que conduzem à desintegração e transformação dos minerais.

Segundo o CETEC (2008), são descritas cinco classes de solo (Figura 23) em primeiro nível categórico (Neossolos, Gleissolos, Argissolos, Cambissolos e Latossolos), sendo que os Neossolos, Cambissolos e Latossolos apresentam subordens (segundo nível categórico) em conformidade com as condições de relevo e material parental de cada área.

Neossolos: São solos poucos evoluídos, constituídos por material mineral ou por material orgânico, apresentando menos de 20 cm de espessura (Santos *et al.* 2006). Tais solos ocorrem na área pesquisada nas subordens Flúvicos, Quartzarênicos e Litólicos.

Neossolos Flúvicos: Ocorrem ao longo das margens dos rios e córregos (em particular no leito menor do Rio São Francisco), associados às áreas de planícies de inundação e terraços. Ocupam 243.80km² da área e são caracterizados por derivarem dos sedimentos transportados pelas drenagens, apresentando localmente camadas estratificadas em grande parte do volume do solo.

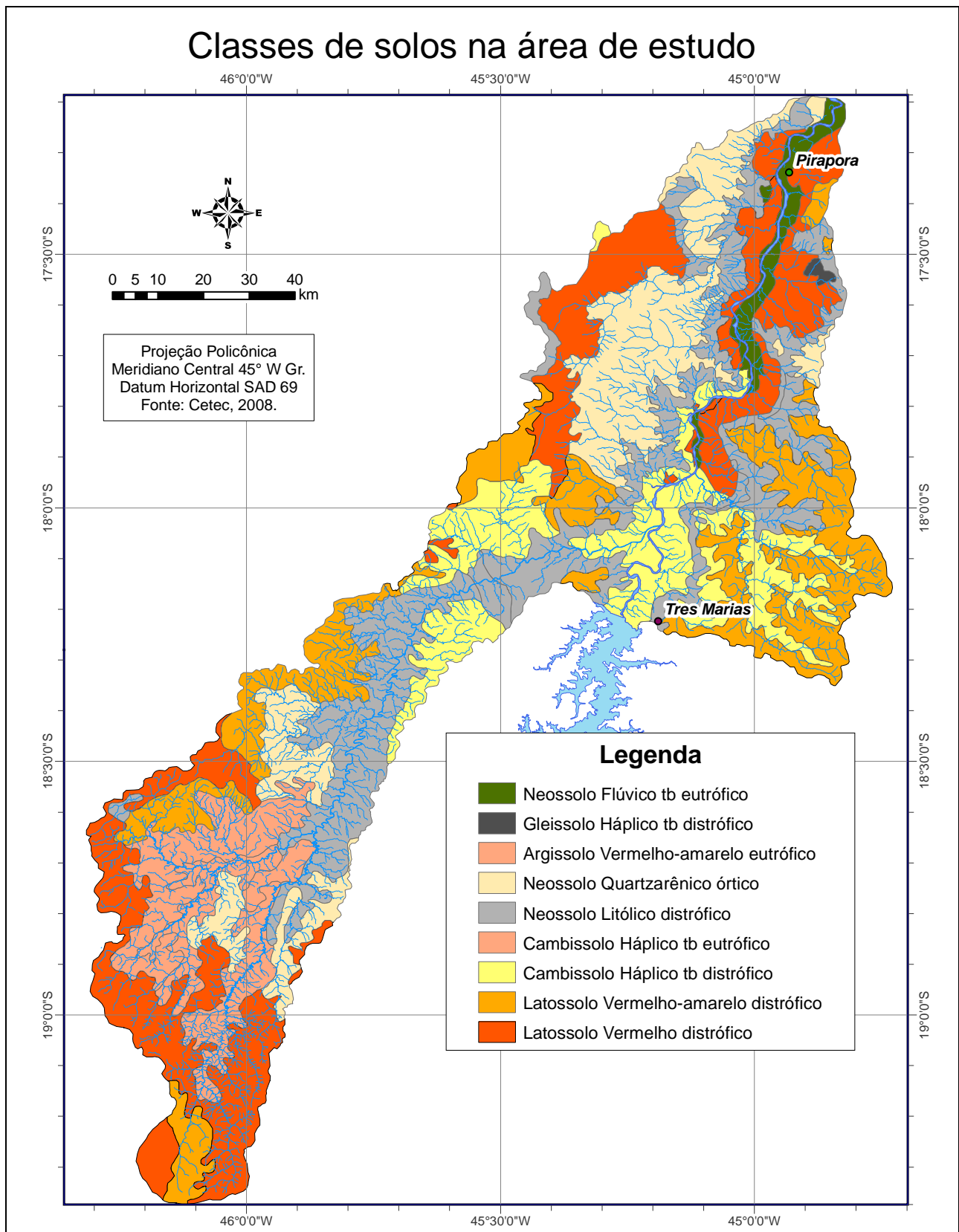


Figura 23 – Mapa de solos da área de estudo segundo SiBCS. As coberturas pedológicas, juntamente com as condições topomórficas, indicam áreas prioritárias para implantação de monoculturas que influenciam no aporte de sedimento para Rio São Francisco.
Fonte: CETEC (2008).

Neossolo Quartzarênico: São solos que não apresentam contato lítico dentro de 50 cm de profundidade, com sequência de horizonte A-C; com textura areia ou areia franca. São essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala (Santos *et al.* 2006). Na área de trabalho, ocorrem nas áreas onde predominam as coberturas detrito-ferruginosas, recobrimo cerca de 1.768,30km².

Neossolo Litólico: São solos com horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre horizonte C ou Cr; com 90% ou mais de sua massa constituída por fragmentos de rocha com diâmetro maior que 2 mm. Ocorrem nas áreas de domínio da Formação Três Marias (arenitos arcoseanos) e correspondem a 2.498,20km².

Gleissolos: Ocorrem principalmente nas áreas de influência das veredas encontradas no Chapadão dos Gerais, perfazendo cerca de 20km² da área de estudo. São caracterizados por serem constituídos de material mineral com horizonte glei (coloração acinzentada).

Argissolos: Ocorrem principalmente porção sul da área em estudo, nos domínios do Subgrupo Paraopeba. Recobrem 646,30km² e são caracterizados por apresentarem, no horizonte B, textural argilas de alta e baixa atividade.

Cambissolos: São constituídos por material mineral com horizonte B que sofreu alteração química e física em grau não muito avançado, porém suficiente para desenvolver características de cor ou texturas diferentes da rocha de origem. Na área de estudo, estes solos são definidos como eutróficos e distróficos, respectivamente encontrados na porção sul da área (Subgrupo Paraopeba) e nas proximidades da Represa de Três Marias (Formação Três Marias). Ambos recobrem 1.818,60km² da área de estudo.

Latossolos: São constituídos por material mineral apresentando horizonte B em avançado estágio de intemperização, com menos de 4% dos minerais primários alteráveis. Na área de estudo são encontrados os Latossolos Vermelho-Amarelo nos domínios das coberturas detrito-lateríticas, recobrimo 2.380km² da área total. Já o Latossolo Vermelho ocorre principalmente nas superfícies tabulares e interdigitado aos Neossolos Flúvicos, que recobrem cerca de 2697km² da área total.

O mosaico das classes de solos encontrado na região indica áreas preferenciais para implantação dos projetos agrícolas e, sobretudo, influencia na capacidade suporte de cada área e também na resistência que cada solo apresenta aos processos erosivos. As atividades agrícolas contribuem significativamente no aporte de sedimentos e agroquímicos para o canal fluvial do segmento analisado.

3 METAIS PESADOS, SEDIMENTOS E QUALIDADE AMBIENTAL

No Brasil, o conceito legal de meio ambiente encontra-se disposto no art. 3º, I, da Lei nº. 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, segundo a qual meio ambiente é “o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”. Dessa forma, a idéia de qualidade ambiental perpassa, dentre outros fatores, pela observância dos teores mínimos e máximos de substâncias e compostos químicos que podem causar efeitos nocivos à saúde humana e aos meios físico e biológico.

Para a determinação de áreas contaminadas ou de níveis elevados de elementos químicos, há de se considerar a Geodisponibilidade e os valores de *Background* de cada elemento. Para Lima (2008), Geodisponibilidade é o conteúdo total ou parcial de uma espécie química integrante de um material geológico (rocha, solo e sedimento) que é passível de ser liberado na superfície terrestre por processos físicos, químicos ou biológicos. Já valores de *Background* descrevem uma faixa de valores normais para rochas, solos, sedimentos e seus derivados (Mattoso e Formoso, 2007). Portanto, uma avaliação ambiental consistente deve passar inicialmente pelo entendimento dos aspectos geoambientais de cada área. Tais aspectos, em particular a constituição geoquímica dos litotipos, indicam valores de referência natural que têm sido empregados na literatura como sinônimos de valores de *background*.

Até o presente momento, o Brasil não possui uma legislação específica para a determinação de metais e da qualidade dos sedimentos que considere os efeitos nocivos à biota. No entanto, os trabalhos realizados no território nacional geralmente são balizados pela CONAMA nº 344/2004, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras.

A leitura da CONAMA nº 344/04 permite entender que os níveis de classificação do material a ser dragado citados para As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn têm como referência a legislação canadense (Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life) elaborada pelo CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment) em 1995. Neste protocolo são encontrados os valores-guias de qualidade dos sedimentos, representados por dois valores: TEL (*threshold effect level*) e PEL (*probable effect level*), respectivamente Nível-1 e Nível-2 na CONAMA nº 344/04. Segundo o CCME (1995), os valores-guias foram gerados a partir de informações químicas e toxicológicas disponíveis na América do Norte, onde através dos resultados dos dados químicos e biológicos estabeleceram-se relações existentes entre a concentração de cada composto medido no sedimento e algum efeito adverso na biota. Ainda segundo o CCME (1995), os valores de TEL representam a média geométrica da fração inferior a 15% de concentração dos

dados de efeito e da fração de 50% da concentração dos dados de não efeito. Já os valores de PEL foram calculados como a média geométrica de 50% da concentração dos dados de efeito e 85% da concentração dos dados de não efeito. Dessa forma, cabe ressaltar que para uma melhor caracterização da qualidade dos sedimentos no Brasil existe a necessidade de realização de estudos voltados para a determinação de valores-guias que contemplem as relações dos ciclos geoquímicos em clima tropical.

3.1 Origem dos metais pesados

Os metais pesados ocorrem naturalmente na superfície terrestre, geralmente como elementos traços (baixas concentrações) presentes na constituição geoquímica das rochas e, antropicamente, a partir das atividades industriais, agropecuárias e domésticas. O termo *metal pesado* tem sido amplamente utilizado para se referir aos elementos com densidade maior que $5,0 \text{ g/cm}^3$ ou que possuam número atômico maior que 20 (Wild 1993, Malavolta 1994, Amarante 1997, Eleutério 1997). Malavolta (1994) observa que esta definição de *metais pesados* engloba metais, semimetais e até mesmo metaloides.

Atualmente, os estudos científicos envolvendo metais pesados têm ganhado maior representatividade, devido ao possível potencial carcinogênico desses elementos como, também, ao incremento dos teores médios no meio ambiente em virtude dos processos industriais e agrícolas.

Para Novotny (1995), 59 elementos presentes na tabela periódica podem ser classificados como metais pesados e são potencialmente tóxicos. Contudo, o mesmo autor propõe uma distinção dos metais, segundo sua toxicidade. Neste sentido, aponta que 17 metais são considerados muito tóxicos (As, Co, Bi, Ni, Cu, Zn, Sn, Se, Te, Pd, Ag, Cd, Pt, Hg, Tl, Pb e Sb) e disponíveis em lugares específicos com concentrações em nível de toxicidade. Dentre os 17 metais tóxicos, dez (Ag, As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn e Zn) são principalmente mobilizados no ambiente pelo homem, em taxas que excedem as dos processos geológicos naturais.

Muito embora os principais aspectos observados nos metais pesados sejam os da contaminação e impacto ambiental negativo, os processos fisiológicos e bioquímicos envolvidos no metabolismo das plantas e animais necessitam dos elementos tidos como essenciais. Segundo Silva *et al.* (2006), o corpo humano necessita de 25 elementos, subdivididos em macro e micronutrientes. O grupo dos macronutrientes é representado principalmente pelos quatro elementos mais importantes para a manutenção da vida, sendo que o principal deles é o carbono (C), seguido o oxigênio (O), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) – uma vez que participam praticamente de todas as proteínas e do DNA. Ainda no grupo dos macronutrientes estão os elementos Ca, Cl, P, K, Na e S, considerados como constituintes osmóticos que ocorrem na massa corporal em concentrações maiores que 0,1%. No grupo dos micronutrientes estão os elementos que participam das reações

enzimáticas como ativadores e são encontrados naturalmente no organismo em concentrações corpóreas inferiores a 0,1% (Mg, Si, Fe, F, Zn, Cu, Mn, Sn, I, Se, Ni, Mo, V, Cr, Co). Além dos essenciais, são encontrados nos alimentos, nas águas e no ar os elementos classificados como não essenciais (Al, Ba, Cd, Pb, As, Hg, Sr, U, Ag e Au), que se depositam no corpo humano segundo afinidades químicas por determinados tecidos (Emsley 2001).

Os efeitos adversos ocasionados por elementos químicos aos organismos são evidenciados tanto pelas altas concentrações como pela sua deficiência na dieta alimentar. Selinus (2006) aponta como aspectos deletérios à saúde humana: a exposição crônica do arsênio inorgânico, com complicações para a pele, membranas mucosas, sistema nervoso, medula óssea, fígado e coração; a ligação do bócio (crescimento da glândula tireoide) com a deficiência de iodo no organismo; ocorrência de fluorose em comunidades que dependem do abastecimento de água subterrânea enriquecida com flúor e problemas com cáries e dentes manchados onde há deficiência desse elemento.

3.2 Metais pesados nos sedimentos

A origem do termo *sedimento* vem do latim, associado à raiz *sedis*, que nessa língua significa “assentamento”, “deposição”. Dessa forma, numa tradução etimológica literal, o termo é utilizado para descrever o que está disponível para o transporte, aquilo que se deposita ou se depositou ou, ainda, o que é passível de se depositar. Os sedimentos, por sua gênese, são classificados em terrígenos, clásticos e litogênicos, quando são originados por fragmentos de rochas pré-existentes, ou bioquímicos quando decorrem de precipitação de elementos químicos. Submetidos ao transporte físico das águas, ventos, gelo e ações antrópicas, os sedimentos chegam aos lagos, rios e oceanos, onde são incorporados à carga transportável destes corpos hídricos. Para Mudroch & Macknight (1991), ao serem incorporados ao ambiente aquático, os sedimentos sofrem processos de acumulação, reprocessamento e transferência dos seus constituintes, através dos processos químicos e biológicos nos rios, lagos e águas oceânicas.

Os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreadores e como agentes fixadores para outros agentes poluidores. O sedimento sozinho degrada a qualidade da água para consumo humano, para recreação, para o consumo industrial, infraestruturas hidroelétricas e vida aquática (Carvalho *et al.* 2000).

Para Silvério (2003), os sedimentos têm agregados valores econômicos sociais e ecológicos. Esse autor afirma que os sedimentos correspondem a um dos principais componentes de ecossistema aquático – eles suportam a vida, formando uma variedade de *habitats* e ambientes.

Inicialmente, o interesse por estudos sedimentológicos se baseava no monitoramento e medições quantitativas do material transportado fisicamente e sua acumulação. No entanto, por suas

características fixadoras, admite-se atualmente que os sedimentos desenvolvem um importante papel na qualidade da vida aquática. Para Massutti (1999), o estudo da composição química dos sedimentos pode indicar, além das condições ambientais atuais, impactos decorridos ao longo do tempo.

Na relação dos sedimentos com os metais pesados, um dos aspectos físico-químicos mais notáveis é a capacidade daqueles de acumular tais elementos. Os contaminantes, como os metais pesados, acumulam-se nos sedimentos através dos processos de adsorção, complexação, precipitação e assimilação biológica. Entretanto, o processo predominante na acumulação dos contaminantes em sedimentos ocorre via adsorção (Lima 2008). Para Sawyer *et al.* (2003), a adsorção pode ser definida como o processo de acumulação de um elemento ou substância na interface entre a superfície sólida e a solução adjacente. A capacidade dos sedimentos em adsorver compostos faz com que se tornem um importante compartimento na geração de diagnósticos ambientais para bacias de drenagem.

Os sedimentos que chegam até os corpos hídricos são constituídos de diversas frações granulométricas. Os mais comumente encontrados vão desde seixos até as argilas e coloides orgânicos. Segundo Lima (2008), um dos mais importantes fatores que influenciam na adsorção dos metais é a dimensão da partícula, já que a fração fina ($63\ \mu\text{m}$) é eletricamente ativa e possui uma grande superfície específica para adsorver os metais. Nesse sentido, estudos realizados por Förstner & Wittmann, (1981) indicam uma redução acentuada dos teores de metais nas frações $>63\ \mu\text{m}$. Considerando o exposto, é possível analisar a existência da correlação dos teores de metais em sedimentos com os ambientes preferenciais de deposição fina e a hidrodinâmica do canal fluvial.

3.4 Importância dos óxidos e hidróxidos

Juntamente com os processos gerais da adsorção dos metais nos sedimentos, a presença dos óxidos e hidróxidos de Fe, Mn, Mg e Al desempenha um importante papel na concentração e distribuições dos metais nos ambientes aquáticos, uma vez que em condições oxidantes são os principais captadores de metais-traços em ambientes aquáticos (Tessier *et al.* 1979 *apud* Rodrigues, 2007). Em determinadas condições de pH e temperatura os óxidos e hidróxidos co-precipitam grandes quantidades de metais, especialmente Co, Zn e Cu, que precipitam na presença de Fe e Mn a taxa aproximada de 67, 86 e 98%, respectivamente (Förstner & Wittmann 1981). Desta maneira, os óxidos e hidróxidos de Fe, Al, Mg e Mn funcionam como elementos suporte; influenciando a concentração dos metais assim como os processos de remoção e disponibilidade. Atuam carreando os metais, entre as fases dissolvida e particulada, por processos de adsorção e co-precipitação (Dornfeld 2002, Anjos 2003, Rodriguez 2001, Tomazelli 2003).

4 MATERIAIS, MÉTODOS E TÉCNICAS

Os procedimentos metodológicos adotados buscam a determinação da concentração total e distribuição dos metais pesados dos sedimentos de corrente no Rio São Francisco, entre os municípios de Três Marias e Pirapora. A fase de quantificação dos metais pesados foi embasada por métodos e normalizações reconhecidos e validados internacionalmente, como o método US EPA 3051 (1998), da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, que visa à determinação de elementos traços extraíveis. O método é bastante utilizado na construção de diagnósticos ambientais baseados na investigação dos teores de metais pesados em solos e sedimentos, e apresenta-se de acordo com o que determina a CONAMA n° 344/2004, que será a instrução normativa usada como referência no presente trabalho.

Para a obtenção e controle dos dados geoquímicos analíticos, o projeto metodológico foi subdividido em três etapas (Figura 24):

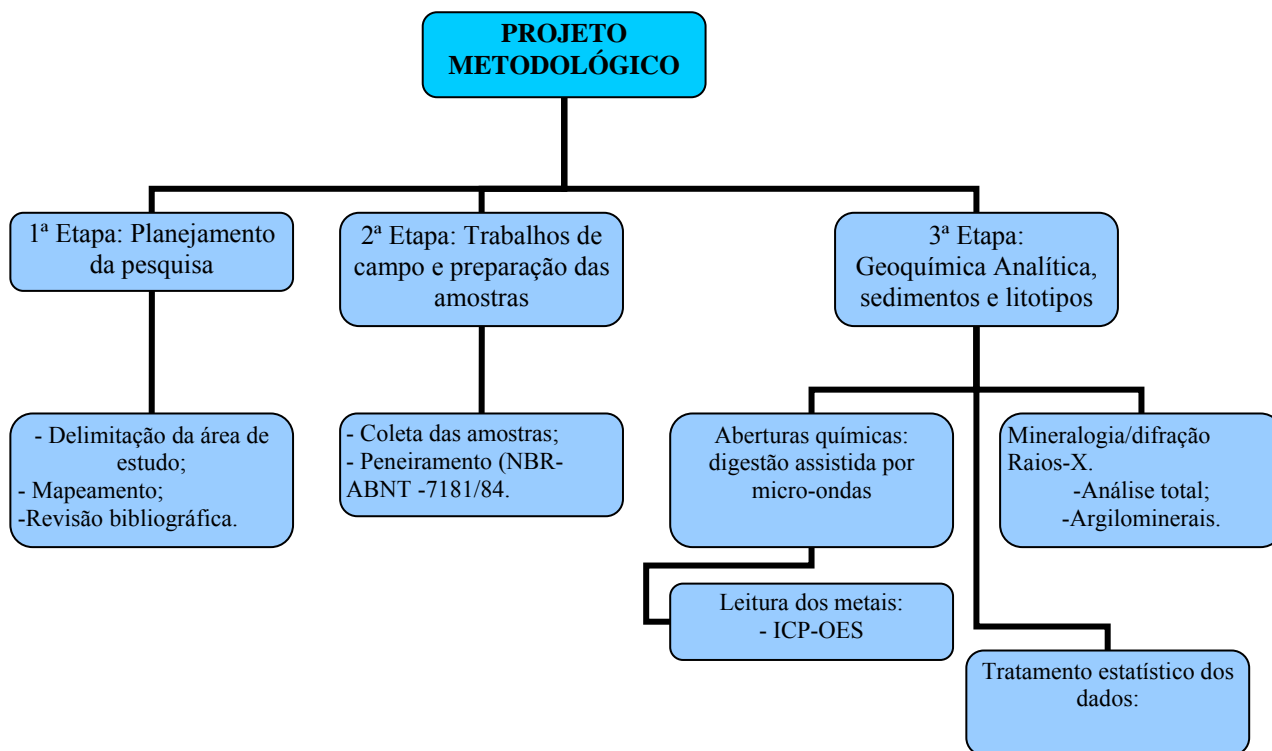


Figura 24 – Esquema geral do projeto metodológico. Diagrama mostrando os procedimentos e atividades realizadas durante as diferentes etapas do projeto.

4.1 Primeira etapa: planejamento da pesquisa

As características ambientais e ocupacionais da área de estudo permitem a segmentação da bacia hidrográfica em setores distintos. A existência do barramento da Represa Presidente Juscelino Kubitschek (Represa de Três Marias), limite sul do segmento estudado, funciona como divisor de águas, de modo que, conhecendo os contaminantes que chegam ao lago da represa, é possível verificar a introdução de metais pesados a partir daquele ponto. Já o limite norte é caracterizado pela confluência do Rio São Francisco com o Rio das Velhas, onde, a jusante da sua foz, tem-se uma dinâmica ambiental condicionada pelos contaminantes oriundos basicamente do lançamento de efluentes domésticos e industriais a partir da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

4.1.2 DELIMITAÇÃO DA ÁREA PESQUISADA E GERAÇÃO DA MALHA DE ESTAÇÕES DE COLETA

Para a delimitação da área de estudo, foi realizada a interpolação das curvas representativas dos interflúvios (linhas de cumeada), o que permitiu a individualização dos limites da área de drenagem direta. Nessa fase foram utilizadas imagens de radar obtidas pela Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) na escala 1/250.000 – Datum WGS 1984, distribuídas pelo United States Geological Survey (USGS) com resolução espacial de 86 m. O processamento digital das imagens SRTM, realizado no Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas – Spring Versão 4.3.3 –, resultou na geração e calibração de isolinhas de altimetria (curvas de nível), utilizadas também na construção do Modelo Digital de Elevação (MDE) no software SURFER 8.0, distribuído pela Golden Software.

Para mapear o contexto hidrográfico regional, foram utilizados dados topológicos vetoriais (arcos e nós) representativos da malha de drenagem, obtidos através da vetorização de imagens orbitais em escala de 1:50.000, permitindo o planejamento das campanhas de campo (plotagem dos pontos de amostragem e localização das principais confluências).

A partir da análise morfológica e da densidade da rede hidrográfica, adotou-se a metodologia descrita no Programa de Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM) da CPRM onde mapeamentos geoquímicos de sedimentos de corrente em escalas regionais de baixa densidade devem adotar um espaçamento entre as estações de coleta de aproximadamente 200km² (Lins *et al.* 2003). Seguindo esta proposta, os 12071km² que compõem a área de estudo foram divididos por 200km² estabelecendo-se assim um total de 59 estações de coletas distribuídas ao longo dos 160km de extensão do canal fluvial (Figura 25). Mais especificamente foram locadas estações de coleta nas proximidades de fontes pontuais de poluição e confluências.

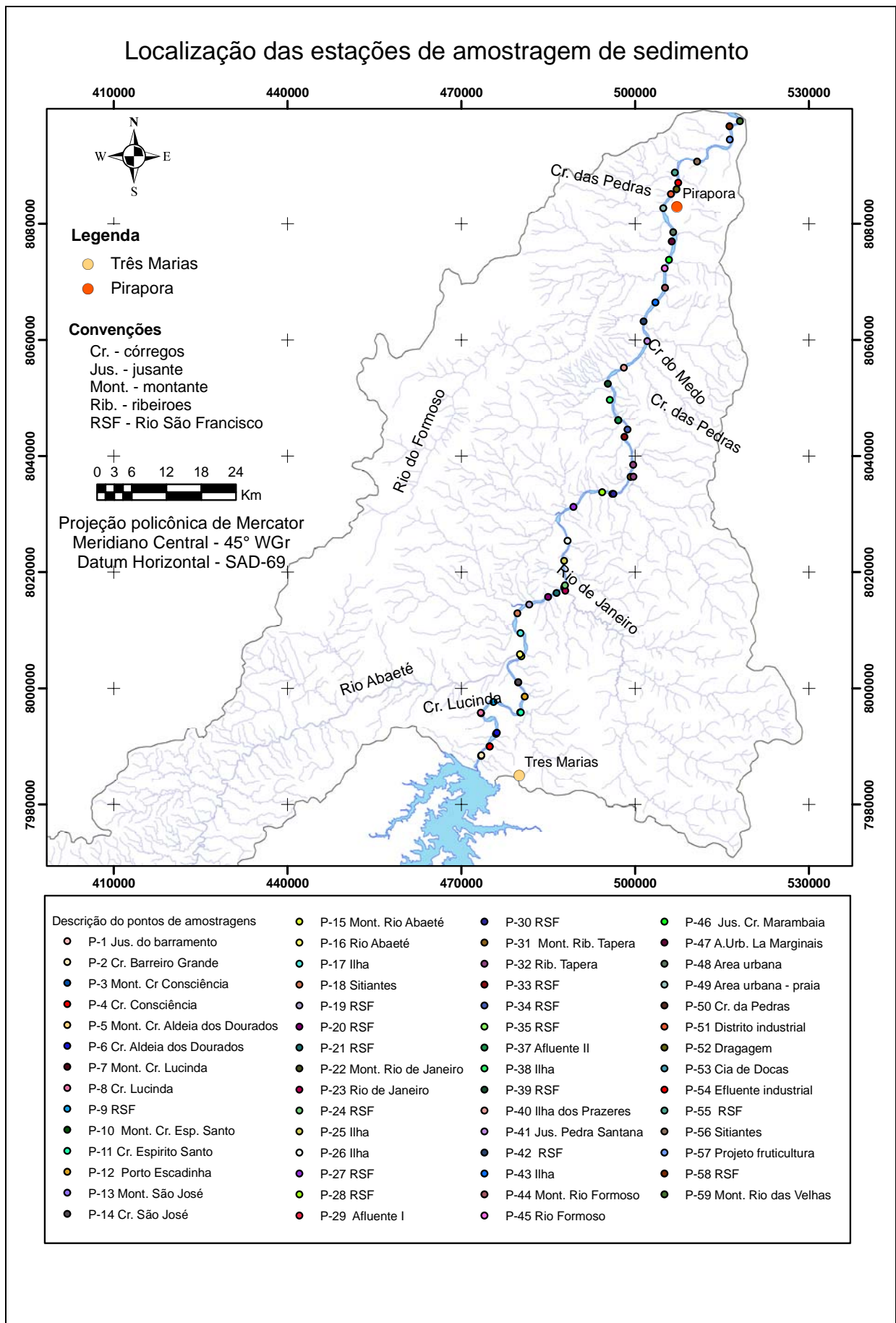


Figura 25 – Estações de amostragem de sedimentos. A figura demonstra os principais afluentes no segmento estudado (maior detalhamento no anexo I).

4.1.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS

A base cartográfica e os aspectos topomórficos regionais derivaram do estudo das cartas topográficas do Serviço Geográfico do Exército na escala 1:100.000 – impressão 1969 – Datum Córrego Alegre.

A descrição dos grupos e formações geológicas ocorrentes na área de trabalho foi realizada com base nos mapas do Projeto São Francisco – Folha SE.23-Y-B – TRÊS MARIAS Escala 1:250.000 – CPRM – 2002; Folha SE.23-V-D – JOÃO PINHEIRO Escala 1:250.000 – CPRM – 2002; Folha SE.23-V-D-III – SERRA DO JATOBÁ Escala 1:100.000 – CPRM – 2002; Folha SE.23-V-D-VI – CHAPADÃO DOS GERAIS Escala 1:100.000 – CPRM – 2002–, como também no Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais – CODEMIG/CPRM na escala 1/1.000.000 – impressão 2005. O mapa geológico apresentado neste trabalho é resultado de técnicas de geoprocessamento introduzidas nos polígonos (regiões) que formam os limites das formações geológicas na área. Os vetores (polígonos) foram obtidos no banco de dados geológicos da CPRM-Geobank, sendo tratados e inseridos nos limites da área pesquisa com utilização do software Arc Gis 9.2, pelo qual também foi feito o cálculo da área total de cada formação.

Para a análise da evolução têmico-espacial da área, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto (Classificações Supervisionadas) em imagens orbitais dos anos 1980 a 2009; respectivamente, Landsat III sensor ETM⁺ e Landsat VII sensor TM. Como resultado, obteve-se mapas de uso e cobertura dos solos que permitiram uma análise geoespacial baseada na alteração do uso e ocupação dos solos.

4.2 Segunda etapa: trabalhos de campo e preparação das amostras

Na segunda etapa foram realizadas as campanhas de campo, determinação dos parâmetros físico-químicos e preparação do material coletado. No período de 12 meses foram realizadas duas campanhas de campo (janeiro e julho de 2009) no leito do Rio São Francisco, resultando em 118 amostras sedimentos, sendo duas amostras por estação de coleta com peso aproximado de 1 kg cada.

4.2.1 PROCEDIMENTO DE COLETA E CONSERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

A bordo de embarcações de pequeno porte, procedeu-se a coleta de sedimentos com uso do amostrador Rock-Island de penetração horizontal, do tipo caçamba de dragagem no canal e coleta direta a 30 cm das margens.

Metais pesados em sedimentos apresentam maior capacidade de adsorção em condições ambientais específicas. Deste modo, buscou-se determinar parâmetros físico-químicos (pH e temperatura) que podem influenciar na adsorção ou dessorção dos metais. Tais parâmetros foram

determinados através de leitura direta utilizando um medidor multiparâmetros HANNA – modelo HI 98129. Todo material coletado foi identificado, acondicionado em sacos plásticos, conservado em caixa térmica com gelo, em campo e, posteriormente, em geladeira, à temperatura de 4°C.

4.2.2 TRATAMENTO DAS AMOSTRAS

4.2.2.1 Secagem das amostras

Após a coleta das amostras, os sedimentos foram submetidos à decantação e posterior separação da água; sendo esta filtrada em filtros de nitrato de celulose 45 µm e descartada, evitando a perda de material sólido. Em seguida, as amostras foram colocadas em tabuleiros de plástico previamente descontaminados com HNO₃ e água deionizada (1:1), depositadas sobre a bancada e secas à temperatura ambiente e à sombra, para não haver perdas de metais por volatilização. Posteriormente, o material foi desagregado em almofariz, sendo retirados restos de raízes, folhas e pedregulhos que não fazem parte do compartimento sedimento.

4.2.4 SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA

Para a quantificação dos metais em sedimentos, a utilização da fração mais fina (< 0,063 mm) é destacada, devido à relação da área específica dos sedimentos com a capacidade de adsorver os metais pesados.

Os procedimentos da separação granulométrica foram norteados pela NBR 7181, de 1984 – Análise Granulométrica de Solos (ABNT 1984) –, que consiste na pesagem de 500 g da amostra e separação mecânica por 30 minutos, com a utilização de um agitador dedicado Fritsch e cinco peneiras nas malhas 60 mesh (0,25 mm) até 220 mesh (0,063 mm). O resultado da separação granulométrica indicará aspectos gerais da distribuição e deposição de sedimentos ao longo do perfil longitudinal estudado.

4.3 Terceira etapa: técnicas analíticas aplicadas na quantificação de metais em sedimentos

A terceira etapa do projeto metodológico engloba a fase analítica realizada nos laboratórios de Geoquímica Ambiental, espectrometria de emissão óptica – ICP-OES – e Difractometria de Raios-X do CPMTIC-IGC-UFMG bem como o tratamento estatístico dos dados geoquímicos.

Procedimentos analíticos para a determinação da concentração de metais pesados em sedimentos através de espectrometria de emissão óptica necessitam de digestão prévia das amostras. No presente trabalho foi adotado o método de digestão ácida assistida por micro-ondas, devido a sua eficiência e baixo grau de contaminação.

4.3.1 DIGESTÃO ÁCIDA DAS AMOSTRAS

A digestão foi realizada no microondas MARS-CEM através do método SW-846-3051 – US EPA (US EPA 1998), que trata da digestão ácida de solos e sedimentos para obtenção da fração extraível dos metais.

Depois de peneirada, 0,50 g da fração mais fina (220mesh-0,063mm) das amostras, juntamente com 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO₃), foram transferidos para tubos de digestão de Teflon do tipo X-Press; sendo os tubos fechados, travados e levados à digestão ácida assistida por micro-ondas em sistema fechado, com monitoramento de temperatura e pressão.

O método SW-846-3051 – US EPA consiste em um aquecimento gradual por radiação de micro-ondas por 10 minutos (tempo de rampa) e estabilização da temperatura a 180°C e pressão (350 psi) por 4' 30" (tempo de Hold), até a digestão da amostra.

Ao término da programação e resfriamento procedeu-se à filtração em filtros de nitrato de celulose 0,45µm e transferência para balões volumétricos de 50ml com adição de água deionizada, para completar o volume.

4.3.2 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X

Os sedimentos encontrados nos corpos hídricos decorrem geralmente da ação direta do intemperismo sobre a rocha, litogênicos ou clásticos e do carreamento dos solos e sedimentos pedogenéticos. Tais sedimentos carregam em sua composição mineralógica informações que podem ser correlacionadas com a mineralogia dos litotipos e solos adjacentes na tentativa de determinar sua área fonte. Além disso, os minerais que ocorrem na fração argila, denominados argilominerais, exibem características físico-químicas que influenciam na mobilização e concentração dos metais pesados em corpos hídricos. Neste sentido, buscou-se, através de técnicas de difratometria de Raios-X, a caracterização mineralógica dos sedimentos; utilizando-se o aparelho difratômetro de Raios-X de fabricação Rigaku, modelo Geigerflex, semiautomático e com tubo de Raios-X de cobre. As condições de operação foram as seguintes: fator de escala (8×10^3), constante de tempo (0,5 s), velocidade do registrador (40mm/min), velocidade do goniômetro ($8^\circ 2\theta/\text{min}$), intensidade de corrente (30 mA) e tensão (40KV). A identificação das fases cristalinas (minerais) foi obtida por comparação dos difratogramas de Raios-X das amostras com o banco de dados do ICDD – International Center for Diffraction Data / Joint Committee on Powder Diffraction Standards – JCPDS (Sets 01 – 50; 2000). Para as análises das fases cristalinas (minerais), levou-se em consideração a intensidade da principal reflexão e a comparação entre as mesmas.

4.3.3 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA - ICP-OES

A leitura dos metais pesados nos sedimentos foi realizada através de ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy*), com Plasma de Argônio Acoplado Indutivamente – aparelho modelo M 4165 – Epectroflame – *Spectro* –. Para validação do método analítico foi utilizado uma amostra padronizada (padrão geoquímico) para solos distribuído pelo United States Geological Survey (USGS). Os valores encontrados foram comparados com a Resolução do CONAMA nº 344, de 25 de março de 2004, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado em águas jurisdicionais brasileiras (Nível-1 e Nível-2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como citado anteriormente a composição química dos sedimentos reflete os impactos gerados em toda bacia de drenagem. A capacidade de registrar o aporte de contaminantes oriundos das atividades desenvolvidas ao longo do histórico de ocupação permite que os elementos adsorvidos nos sedimentos sejam associados a atividades específicas bem como contextualizados no processo de evolução têmico-espacial da bacia do São Francisco. Desta maneira, além da toxicidade, os elementos analisados neste trabalho apresentam uma estreita relação com as atividades antrópicas encontradas na área de estudo. Com exceção dos elementos Fe, Al, Mn, Mg, analisados em virtude de serem elementos suporte e atuarem diretamente na adsorção de outros elementos, o Cu, Zn, Pb, Co, Cd, Ni, Cr, Ti e Ba são frequentemente associados as atividades de mineração e indústria. Os demais elementos (Ca, Cu, Zn, Ni, Mn, Mg e Co) são basicamente macros e micronutrientes encontrados nas atividades agrícolas.

5.1 Distribuição granulométrica e determinação de ambientes deposicionais

A granulometria dos sedimentos depositados ao longo do canal fluvial indica a hidrodinâmica do ambiente aquático, de maneira que as partículas mais finas (silte e argila) se depositam em ambientes mais abrigados dos fluxos e as partículas médias e grossas (areias) são encontradas em ambientes mais dinâmicos. Áreas do canal fluvial que apresentam menor capacidade de transporte, sobretudo, podem representar áreas preferenciais para a concentração dos metais pesados, tendo em vista a relação observada entre o tamanho médio das partículas e a capacidade de adsorver metais (Salomons & Förstner 1980).

Atualmente, a escala granulométrica mais utilizada em geociências é a de Wentworth (1992), que apresenta uma classificação nominal dos sedimentos mais grosseiros até os mais finos (Tabela 1) – respectivamente, de matações até argilas (Teixeira *et al.* 2000).

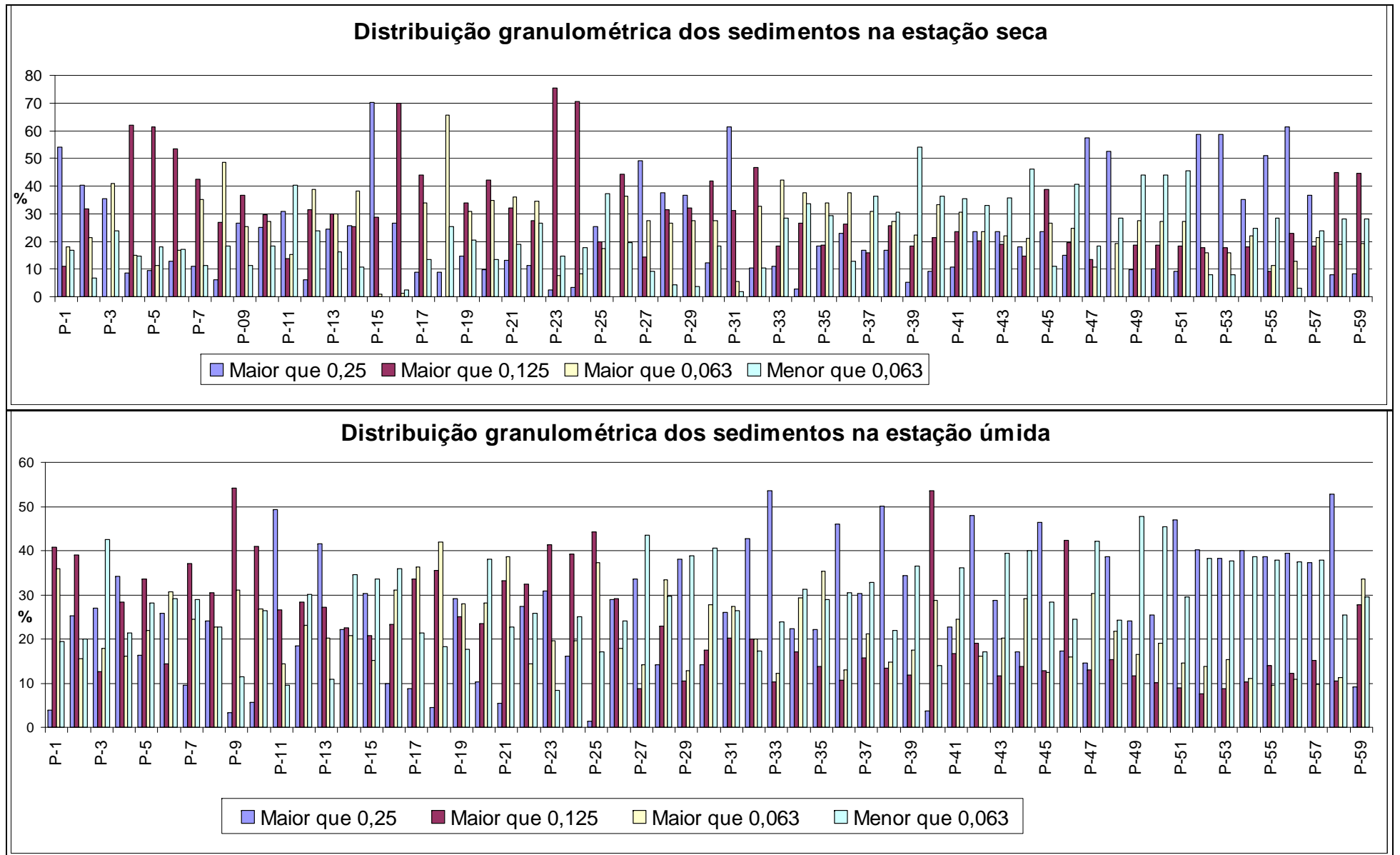
Tabela 1 – Escala de classificação granulométrica segundo Wentworth (1922)

Intervalo Granulométrico (mm)	Classificação nominal			
	Proposição original (inglês)		Tradução usual (português)	
> 256	<i>Gravel</i>	<i>Boulder</i>	CASCALHO	Matação
256-64		<i>Cobble</i>		Bloco ou calhau
64-4,0		<i>Pebble</i>		Seixo
4,0-2,0		<i>Granule</i>		Granulo
2,0-1,0	<i>Sand</i>	<i>Very coarse sand</i>	AREIA	Areia muito grossa
1,0-0,50		<i>Coarse sand</i>		Areia grossa
0,50-0,250		<i>Medium sand</i>		Areia média
0,250-0,125		<i>Fine sand</i>		Areia fina
0,125-0,062		<i>Very fine sand</i>		Areia muito fina
0,062-0,031	<i>Silt</i>	<i>Coarse silt</i>	SILTE	Silte grosso
0,031-0,016		<i>Medium silt</i>		Silte médio
0,016-0,008		<i>Fine silt</i>		Silte fino
0,008-0,004		<i>Very fine silt</i>		Silte muito fino
<0,004	<i>Clay</i>	Clay	ARGILA	Argila

A variação granulométrica encontrada nas amostras coletadas ao longo do perfil de amostragem (Gráficos 1 e 2) indica o incremento da deposição de sedimentos finos à jusante do barramento da Represa de Três Marias (P-1) até a confluência com o Rio das Velhas (P-59); a deposição de finos a partir do barramento possivelmente reflete a predominância dos processos naturais de transporte, marcados principalmente pela redução do gradiente hidráulico e consequente deposição de finos para jusante.

De maneira geral os sedimentos se apresentam de forma bastante homogênea ao longo de todo o perfil; demonstrando a predominância dos sedimentos retrabalhados da Formação Três Marias do Grupo Bambuí, uma vez que em termos granulométricos a Formação Três Marias é composta por depósitos pelíticos e areníticos com intercalações de sedimentos finos a muito finos – respectivamente areia fina (> 0,125 mm), silte e, mais restritamente, argilas (< 0,063 mm a < 0,004 mm) em concordância com a granulometria predominante dos sedimentos encontrados no rio.

Gráficos 1 e 2 – Resultado da separação granulométrica nas estações seca e úmida



De acordo com as classes granulométricas encontradas, compartimentou-se os ambientes de deposição dos sedimentos. Em conformidade com a porcentagem média de cada fração, foram descritos quatro áreas preferenciais em: ambientes arenosos onde mais de 35% dos sedimentos apresentam-se na fração areia grossa ($> 0,25$ mm); areno-siltosos para locais onde a fração areia fina ($> 0,125$ mm) representa mais de 25% da amostra; silto-arenosos para locais onde a fração areia muito fina ($> 0,063$ mm) está acima da faixa de 25% da amostra e, finalmente, o ambiente silto-argiloso, onde os sedimentos da fração fina ($< 0,063$ mm) representam mais de 35% do total da amostra (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação granulométrica dos sedimentos

Granulometria (mm)	Arenoso	Areno-siltoso	Silto-arenoso	Silto-argiloso
Maior que 0,250	> 35%	-	-	-
Maior que 0,125	-	> 25	-	-
Maior que 0,063	-	-	> 25%	-
Menor que 0,063	-	-	-	> 35%

A partir da definição dos pontos preferenciais para deposição dos sedimentos grosseiros e finos, foi possível gerar um mapa de distribuição da granulometria ao longo do perfil (Figura 26). A localização de cada classe granulométrica apresenta uma boa relação entre o tamanho dos sedimentos, a variabilidade dos fluxos (turbulento e laminar), aporte de afluentes e uso e ocupação dos solos no entorno do rio. No entanto, foram detectados nove pontos de deposição extremamente arenosa (P-1, P-15, P-31 P-47 P-48, P-52, P-53, P-55 e P-56), onde os sedimentos grosseiros superam 50% da amostra. No P-1, na jusante do barramento da Represa de Três Marias, tem-se a alteração antrópica do nível de base do rio, ocasionando um ambiente de grande turbulência que impede a deposição dos sedimentos finos. Os pontos 15 e 31 são marcados respectivamente pelo aporte de sedimentos dos córregos São José e Tapera que, além de drenarem os litotipos do Grupo Areado que apresentam granulação mais grosseira que a da Formação Três Marias, também têm suas nascentes em áreas de cultivo de eucaliptos, onde é comum a aragem e o desmatamento de grandes áreas. No ponto 47, cerca de 52,52% dos sedimentos estão na classe $> 0,250$ mm. A principal característica observada nesse ponto é a ocupação da várzea do rio por sitiantes que revolvem os solos no período de plantio, deixando os sedimentos disponíveis para carreamento. Nos pontos 48, 52, 53, 55 e 56 na área urbana do município de Pirapora, nota-se uma alteração na morfodinâmica fluvial condicionada pela ocupação urbana e pela presença das corredeiras que criam um fluxo turbulento, restringindo a deposição dos sedimentos finos.

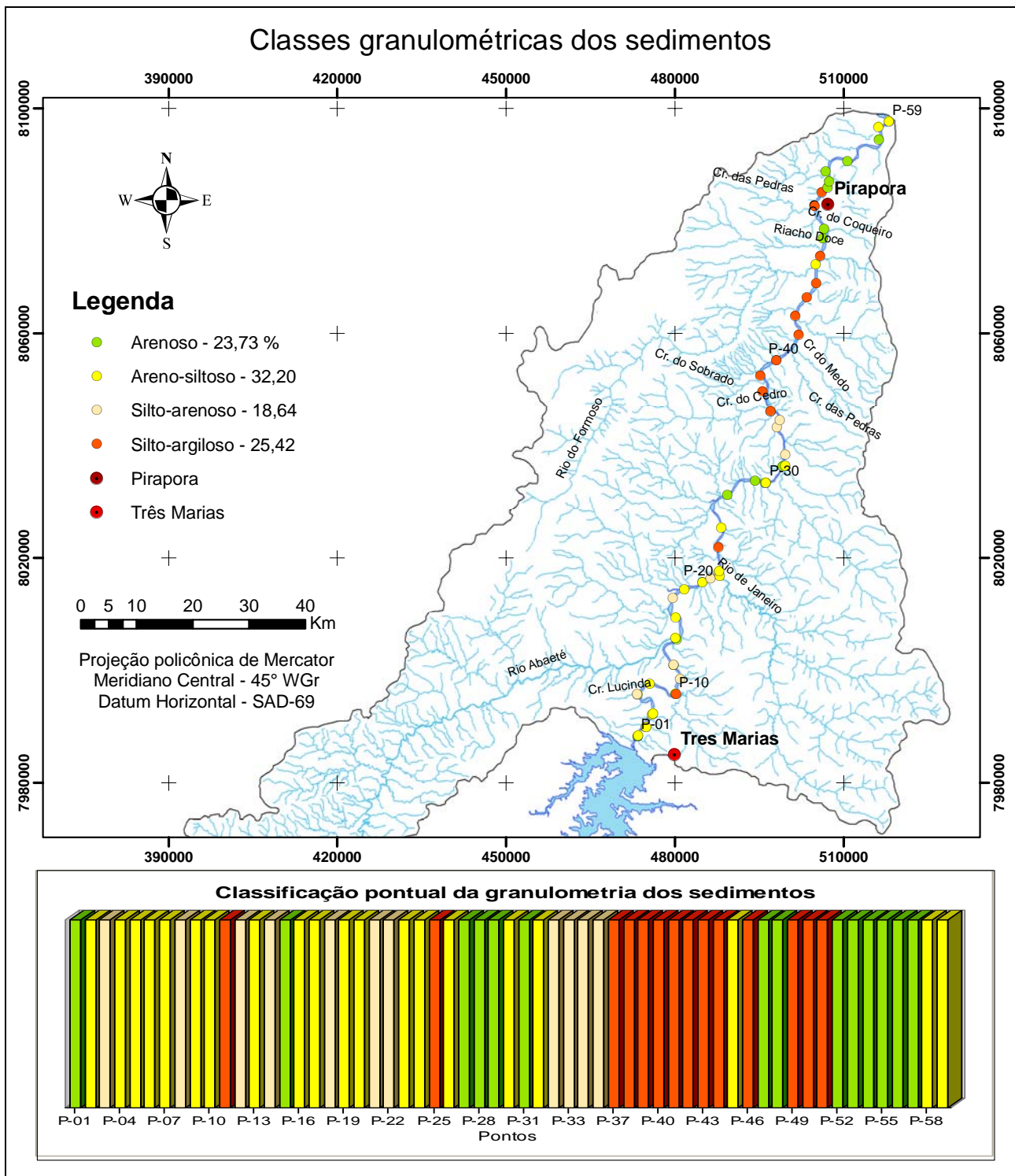


Figura 26 – Distribuição das classes granulométricas. O mapa mostra os pontos preferenciais para a deposição de sedimentos, que vão desde frações $>0,250\text{mm}$, em ambientes arenosos, até sedimentos $<0,063\text{mm}$, em ambientes silto-argilosos.

A avaliação dos valores encontrados na análise granulométrica indica que as atividades antrópicas (obras de engenharias e uso do solo local) alteram pontualmente a carga sedimentar transportada pelo rio. No entanto, cabe ressaltar que os resultados permitem classificar o segmento estudado como um ambiente fluvial areno-siltoso, em virtude da predominância (32,20%) da fração

>0,125mm – areia muito fina –, e que, por sua homogeneidade na distribuição granulométrica, os ambientes, de uma forma geral, apresentam capacidade similar para adsorver metais pesados.

5.2 Composição mineral dos sedimentos

A caracterização mineralógica dos sedimentos geralmente possibilita identificação das possíveis áreas fontes, uma vez que os minerais neles encontrados são herdados da alteração dos litotipos e solos que recobrem as sub-bacias de drenagens adjacentes ao Rio São Francisco. Com o uso da Difractometria de Raios-X (DRX), foi identificado o conjunto de minerais presentes nos sedimentos do segmento fluvial em questão. Nas 59 estações de amostragens, foram encontrados quartzo, feldspato, argilominerais e minerais pesados representativos do aporte de sedimentos de distintas formações geológicas que são carregados pelo rio e seus afluentes.

Os siltitos e arenitos arcoseanos da Formação Três Marias (Grupo Bambuí) representam os litotipos com maior distribuição areal, estando presentes em grande quantidade de afloramentos rochosos na região estudada. Sobretudo, esses litotipos representam o nível de base regional para a rede de drenagem e estão submetidos ao retrabalhamento hídrico do Rio São Francisco e seus afluentes. O termo *arcóseo* é utilizado para descrever os arenitos feldspáticos, significando que apresentam quantidades de feldspatos, principalmente microclina, superiores a 25% (Sgarbi *et al.* 2001).

Os minerais, quartzo (SiO_2), ortoclásio (KAlSi_3O_8), microclina (KAlSi_3O_8) e muscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$), frequentemente descritos nos litotipos da Formação Três Marias (Baggio 2008), foram identificados nos sedimentos ao longo de todo o perfil estudado (Figura 27); sendo que o quartzo e a muscovita ocorrem em todos os pontos de coleta.

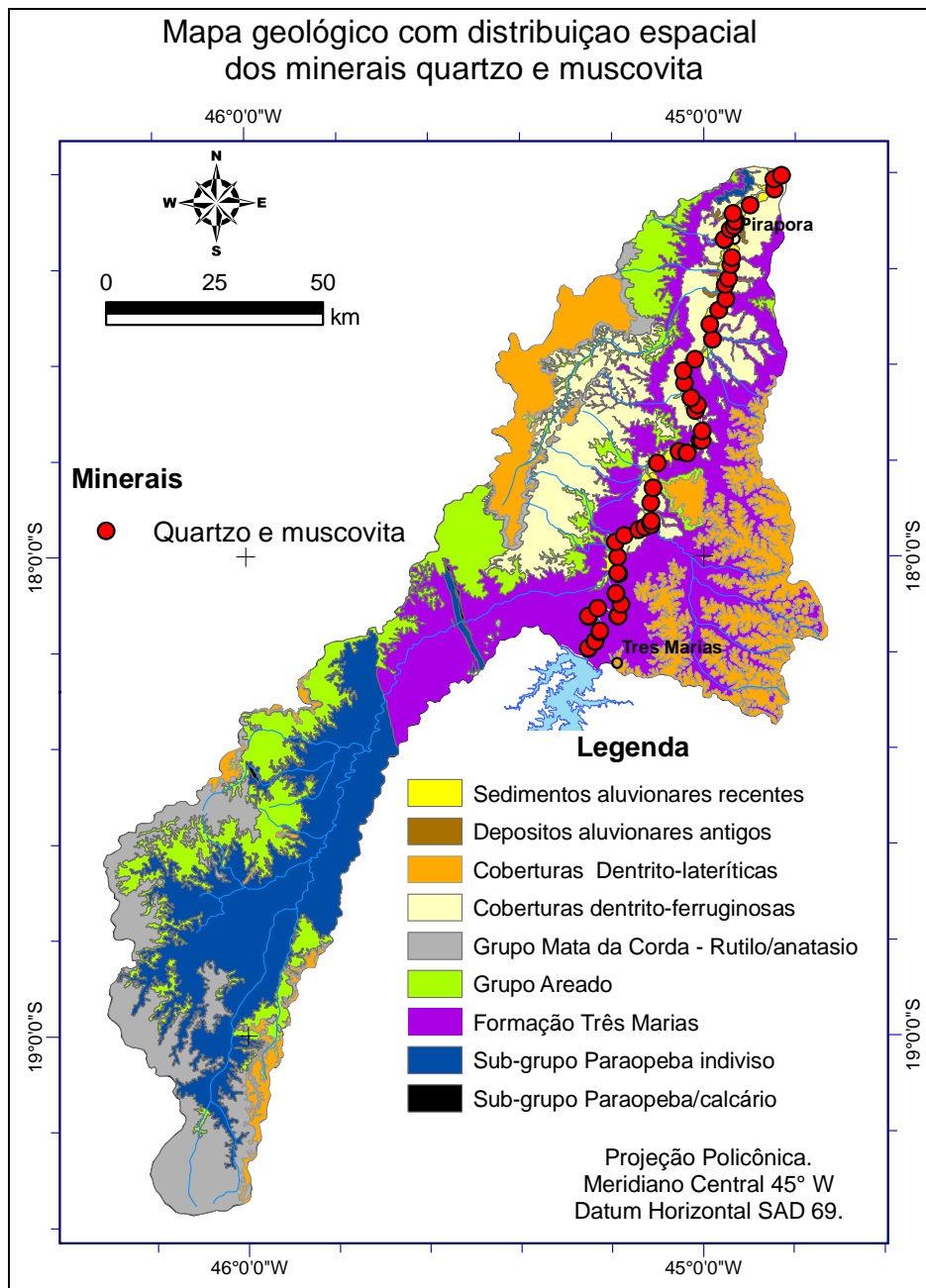
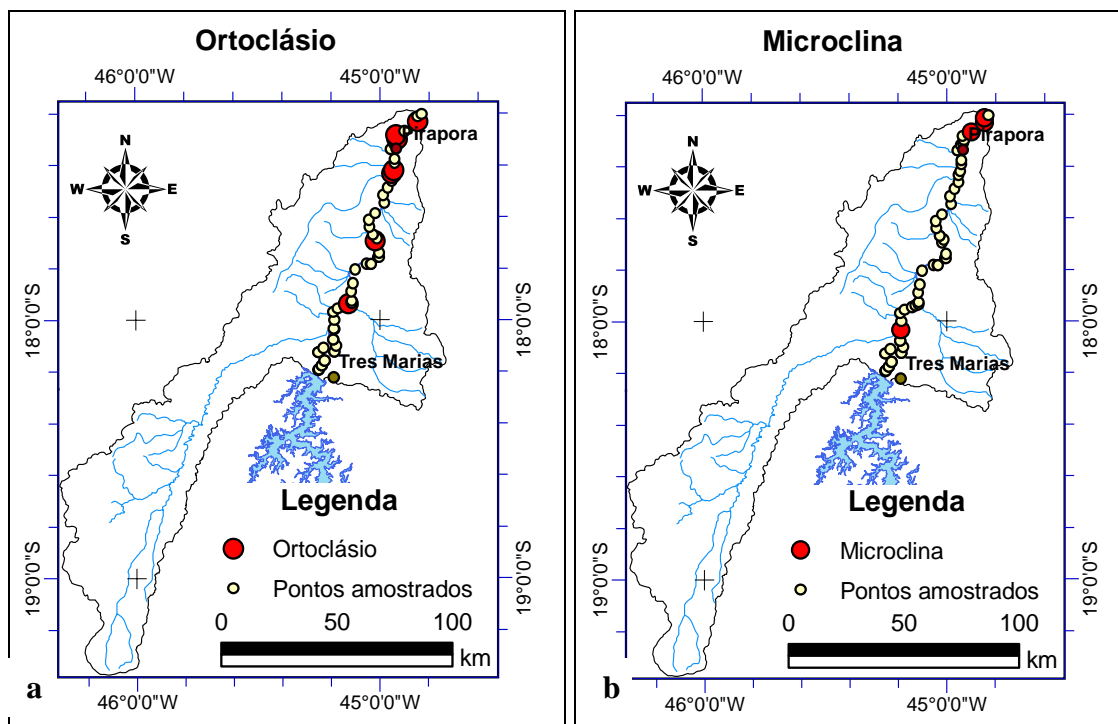


Figura 27 – Distribuição espacial dos minerais quartzo e muscovita. Estes minerais ocorrem associados à presença dos arenitos arcoseanos da Formação Três Marias ao longo do segmento estudado.

Os minerais microclina e ortoclásio, também associados regionalmente aos arenitos arcoseanos, são descritos de forma mais pontual (Figura 28) – fato explicado pela alteração química que esses minerais sofrem em águas ligeiramente ácidas, como as superficiais, sendo substituídos por argilominerais ou muscovita (Fernandes 2007). No segmento estudado, a caulinita e a muscovita aparecem em todos os pontos de coleta; corroborando a possível substituição acima indicada.

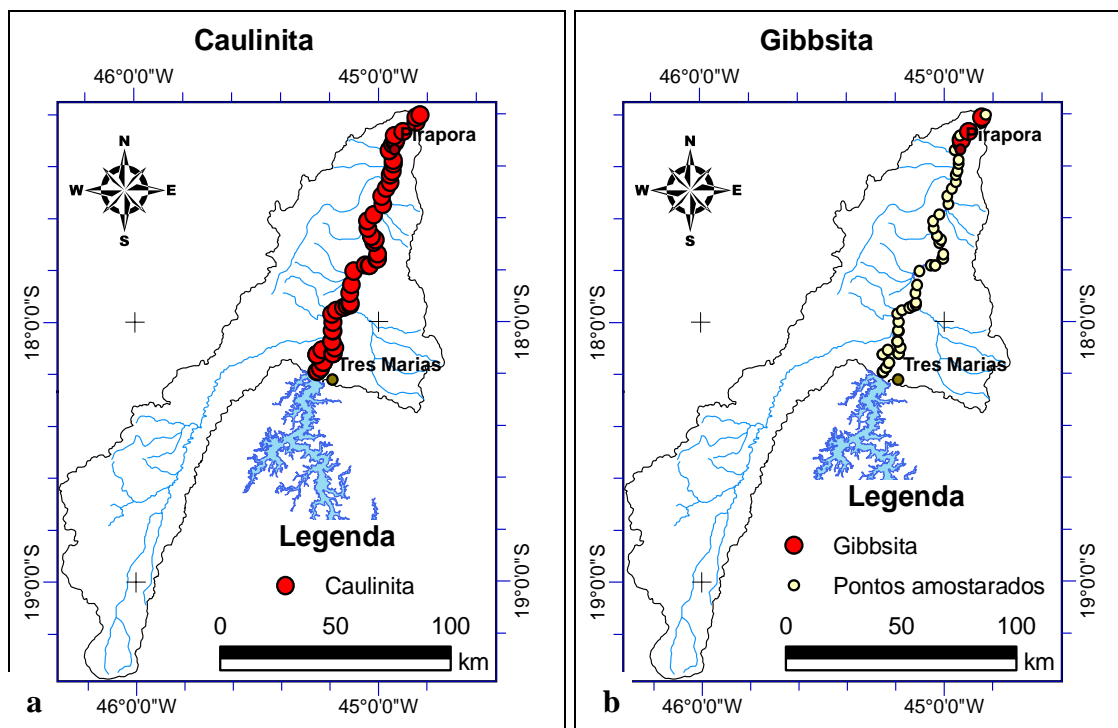


Figuras 28– Ocorrência de ortoclásio e microclina na área de estudo. **a)** Ortoclásio nos pontos 21, 34, 45, 46, 54,55 e 57. **b)** Microclina nos pontos 16, 56, 57 e 58. Ambos minerais são descritos em pontos correlatos à Formação Três Marias.

Minerais hidratados que ocorrem predominantemente na fração argila são descritos como argilominerais, sendo que o mais comumente encontrado é a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{O H})_4$). Como a grande maioria das argilas, as caulinitas são minerais secundários formados principalmente pela alteração hidrotermal e intemperismo de feldspatos e feldspatóides (Fernandes 2007). No estudo dos metais pesados em sedimentos, as argilas são de grande interesse, em virtude da grande área superficial e sua relação com os processos de adsorção.

A caulinita é identificada sistematicamente em todos os pontos de coleta, tendo como possíveis áreas fontes os arenitos feldspáticos (arcoseanos) da Formação Três Marias, que forma o substrato rochoso do rio, e os arenitos vulcanoclásticos da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda), que são carregados pelos afluentes que tem suas nascentes nos domínios dessa formação.

Além das alterações já descritas para feldspatos, os argilominerais podem originar-se pela remoção do material existente entre as lâminas de filossilicatos, como a mica (Inda Jr. *et al.* 2006). De acordo com os mesmos autores, a remoção continuada do K^+ e do Si pode transformar a caulinita em gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), que representa o produto final da alteração dos argilominerais. Tais alterações encontram-se possivelmente representadas no Rio São Francisco pela presença da gibbsita nas proximidades da cidade de Pirapora – baixo curso do segmento estudado.



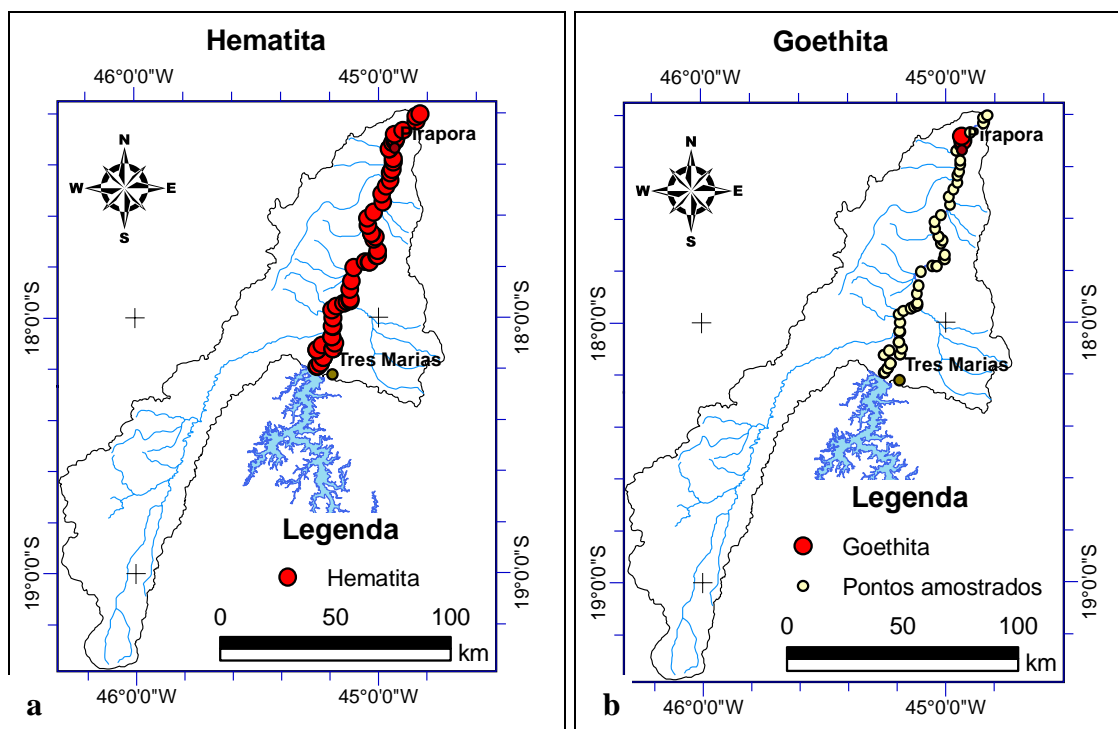
Figuras 29. Ocorrência de caulinitas e gibbistas na área de estudo. **a)** O argilomineral caulinita é encontrado em todos os 59 pontos de coleta. **b)** Gibbsita, encontrada nos pontos 54, 56 e 58 em virtude da possível alteração que a caulinita sofrem em temperaturas mais elevadas.

5.2.1 MINERAIS PESADOS NOS SEDIMENTOS

A designação de minerais pesados é dada aos minerais detríticos originados de rochas ígneas, sedimentares ou metamórficas que, após litificação, apresentam peso específico maior que $2,85 \text{ g/cm}^3$. Tais minerais geralmente ocorrem nas rochas como constituintes menores ou minerais acessórios. Para Addad *et al.* (2001), a presença dos minerais pesados em determinados locais depende da sua abundância na área fonte e da intensidade do processo de transporte. Já Inda Jr. *et al.* (2006) salientam que os teores de hematita e goethita encontrados nos ambientes fluviais representam uma relação direta entre o teor encontrado no material de origem e o grau de alteração dos solos – quanto mais avançado o estágio de intemperização dos solos, maior será a concentração dos óxidos de ferro. Na área de estudo foram identificados dois grupos de minerais pesados (Figura 29): os óxidos e hidróxidos de ferro hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e os dióxidos de titânio anatásio (TiO_2) e rutilo (TiO_2).

Com ampla distribuição espacial, a hematita, encontrada em todos os pontos, e a goethita, de ocorrência mais restrita (P-54 e 55), podem estar associadas ao retrabalhamento de arenitos da Formação Três Marias – como os dos Grupos Areado e Mata da Corda. Além da presença desses minerais nos litotipos, a hematita e goethita estão presentes na maioria dos solos, em virtude da intensa pedogênese verificada em climas tropicais (Inda Jr. *et al.* 2006). Os mesmos autores

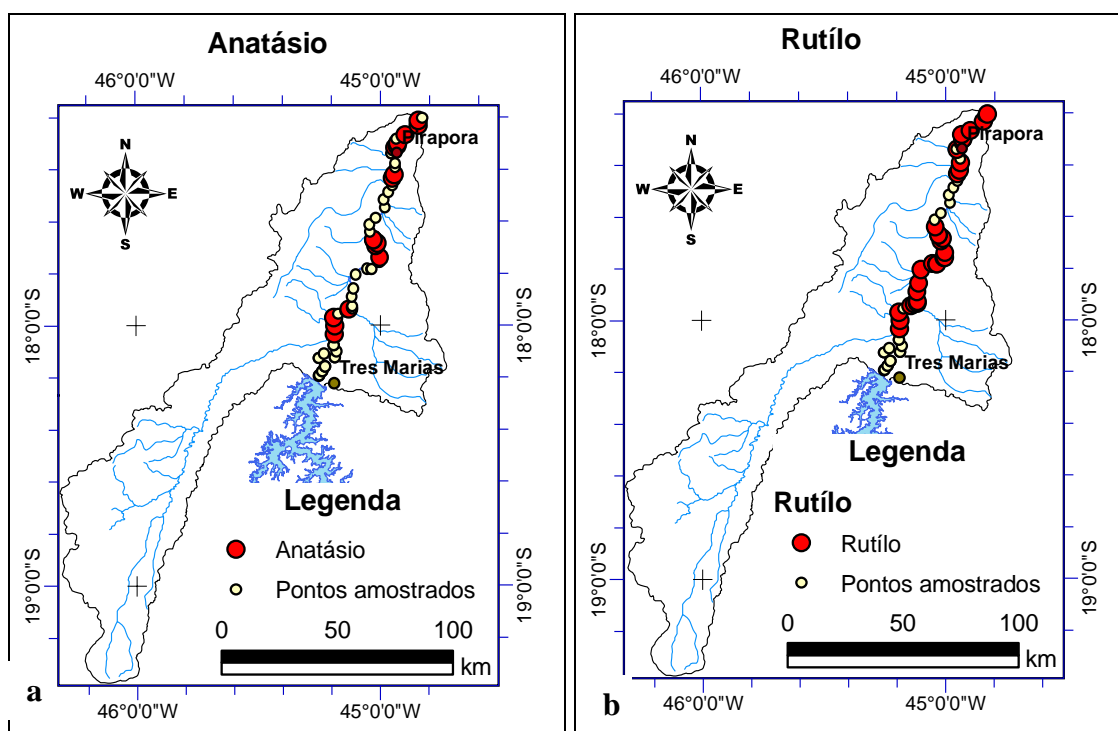
indicam que a hematita ocorre em maior proporção do que a goethita nos latossolos das regiões mais quentes, corroborando a ocorrência mais restrita da goethita no segmento estudado.



Figuras 30 – Ocorrência de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe). **a)** Vê-se a ampla distribuição da hematita, que pode estar associada aos litotipos adjacentes, como também às alterações pedogenéticas ocorridas nos latossolos. **b)** A goethita ocorre de forma restrita possivelmente em virtude das elevadas temperaturas regionais favorecerem a presença de hematitas.

Em contraposição à ampla ocorrência dos óxidos e hidróxidos de ferro, os dióxidos de titânio anatásio e rutilo ocorrem de forma mais pontual; indicando uma correlação entre sua presença e a de afluentes que drenam áreas sob os domínios dos arenitos vulcanoclásticos do Grupo Mata da Corda. Sgarbi *et al.* (2001) encontraram teores de titânio (TiO_2) superiores a 5% em peso nos arenitos da Formação Capacete.

Tanto o anatásio como o rutilo são encontrados nas amostras de sedimentos a partir do ponto 16, correspondente ao aporte de sedimentos do Rio Abaeté, maior afluente da margem esquerda na área de estudo, tendo grande parte da sua área de drenagem nos domínios dos arenitos vulcanoclásticos da Formação Capacete (Grupo Mata da Corda).



Figuras 31 – Ocorrências de óxidos de titânio. **a)** Presença de anatásio nos pontos 16, 17, 18, 21, 33, 34, 35, 36, 37, 45, 46, 51, 52, 54, 56, 57 e 58; coincidentes com as áreas de influência do Grupo Mata da Corda. **b)** A partir do ponto 16 (Rio Abaeté), tem-se a presença do rutílo em todos os pontos, exceto nos pontos 17, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 48, 50, 51 e 58.

A partir da composição mineralógica, verificou-se, em termos qualitativos, que os sedimentos encontrados no canal fluvial do Rio São Francisco pertencem predominantemente aos litotipos da Formação Três Marias. O Grupo Mata da Corda (Formação Capacete), apesar de ter afloramentos mais pontuais, quando relacionado com os litotipos da Formação Três Marias (Grupo Bambuí) é responsável pela presença dos minerais de titânio na jusante do Rio Abaeté (ponto 16).

5.3 Parâmetros físico-químicos analisados

Os processos de adsorção e dessorção de metais pesados nos sedimentos são controlados em parte pelos parâmetros físico-químicos característicos do ambiente aquático. Desta forma, no presente trabalho, foram determinados os valores de pH e temperatura com intuito de verificar a influência destes parâmetros na liberação e concentração dos metais nos sedimentos do Rio São Francisco. Para Novotny (1995) alterações físico-químicas, em particular as de pH e temperatura, ocorridas no ambiente aquático podem remobilizar os metais pesados dos sedimentos tornando-os novamente biodisponíveis.

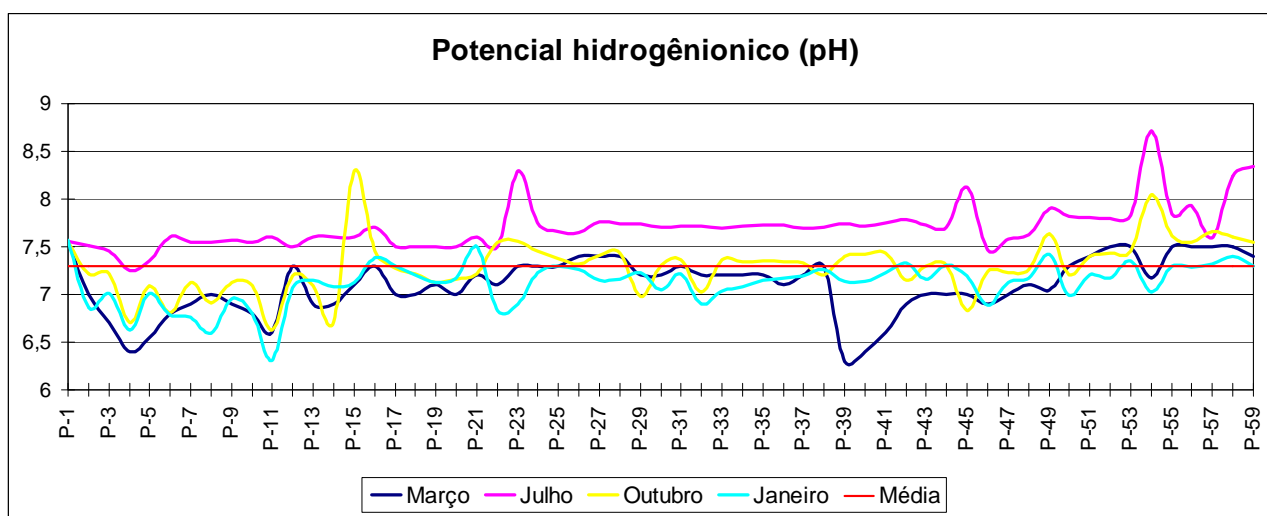
5.3.1 VARIAÇÃO DO POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (pH)

Os processos de adsorção de metais pesados são diretamente afetados pelas variações de pH e pela concentração de elementos suporte. Desta forma, em ambientes de pH ácidos, poucos metais

são adsorvidos; enquanto que em valores de pH mais alcalinos a maioria dos metais é adsorvida (Souza 2007).

Durante o período de 12 meses foram feitas campanhas de campo do Rio São Francisco com o intuito de monitorar os valores de pH em cada estação do ano (Gráfico 3) para todas as 59 estações de amostragem. Os valores encontrados, de uma maneira geral, indicam um ambiente neutro (pH 7,3) durante o ano todo. No entanto, a avaliação dos dados por estação demonstra que alterações pontuais, em virtude do uso e ocupação dos solos, relacionam-se com valores discrepantes da média encontrada

Gráfico 3 – Valores do pH em distintas estações do ano de 2009



As condições climáticas encontradas na região de estudo permitem o agrupamento da sazonalidade em apenas duas estações a se considerar: a estação úmida nos meses janeiro e março e a estação seca para julho e outubro.

A estação úmida (janeiro e março) é caracterizada por apresentar os menores valores de pH no ponto 4, Córrego Consciência (pH 6,4); ponto 11, Córrego do Espírito Santo (pH 6,13) e ponto 39, talvegue do Rio São Francisco (pH 6,3). Além do Córrego Consciência (P-4), que recebeu durante anos os resíduos do beneficiamento de zinco da CMM, os demais pontos podem estar associados, respectivamente, à construção da nova barragem de rejeito da Votorantim e à recente introdução de dois pivôs de café.

A estação seca apresenta, em todos os pontos, o pH ligeiramente alcalino; sendo que os valores mais acentuados são descritos no ponto 15, montante do Rio Abaeté (pH 8,3); ponto 23, Rio de Janeiro (pH 8,3); ponto 45, Rio do Formoso (pH 8,1) e ponto 54, efluente industrial (pH 8,7). Com exceção do efluente industrial, discutido adiante, o pH mais básico nos pontos citados pode estar relacionado a uma menor quantidade de matéria orgânica e/ou sólidos em suspensão transportados pelos afluentes na estação seca.

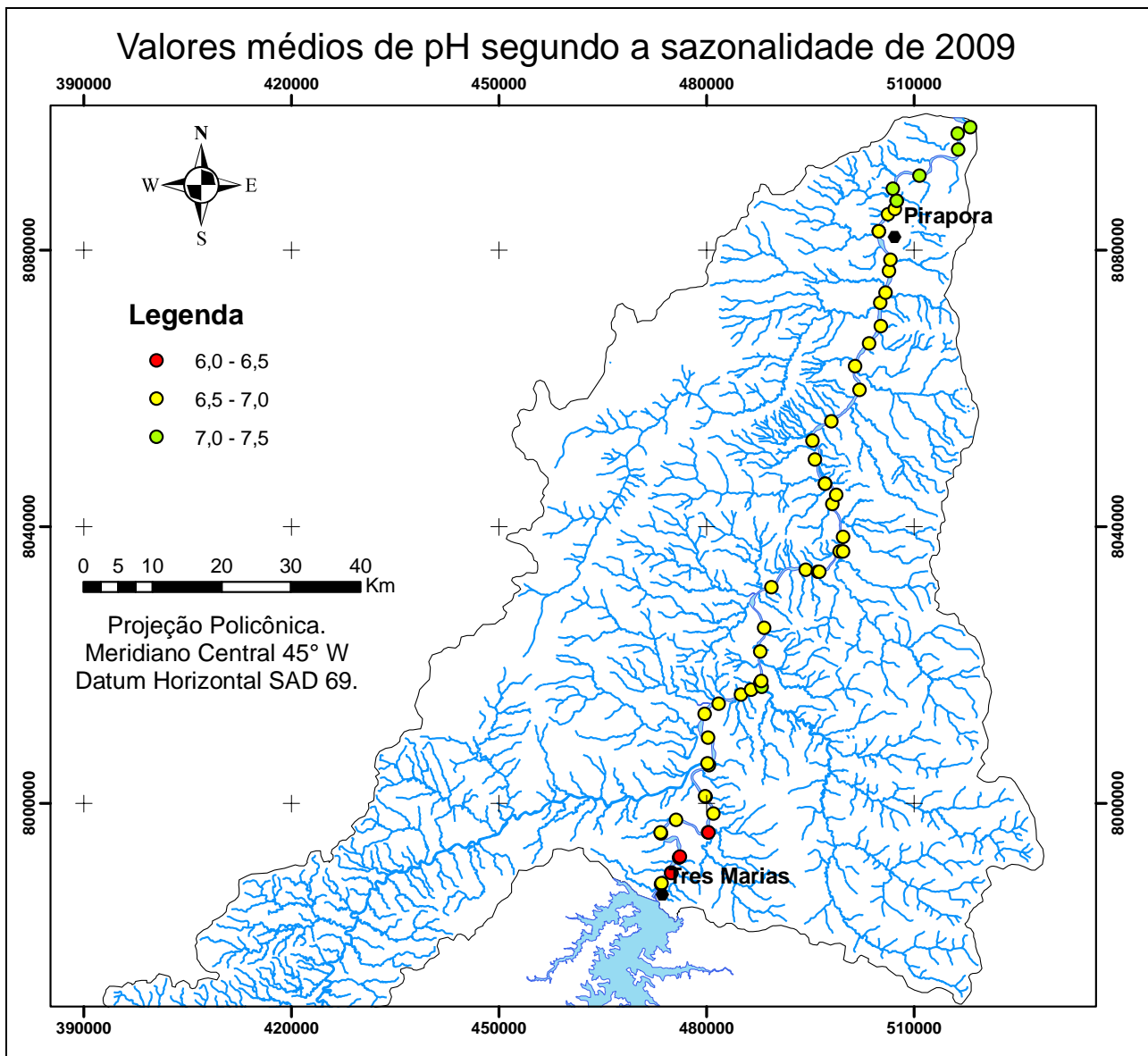


Figura 32 – Distribuição espacial do pH ao longo do perfil de amostragem. Os valores de pH encontrados no mapa demonstram que as atividades industriais e urbanas em Três Marias e Pirapora alteram o pH localmente, tornando-o ligeiramente ácido em Três Marias e mais alcalino em Pirapora.

A partir dos valores encontrados em cada estação, foi calculado a média aritmética e visualizada em um mapa de valores médios anual (Figura 32) que demonstra a influência das atividades industriais e urbanas no pH do rio.

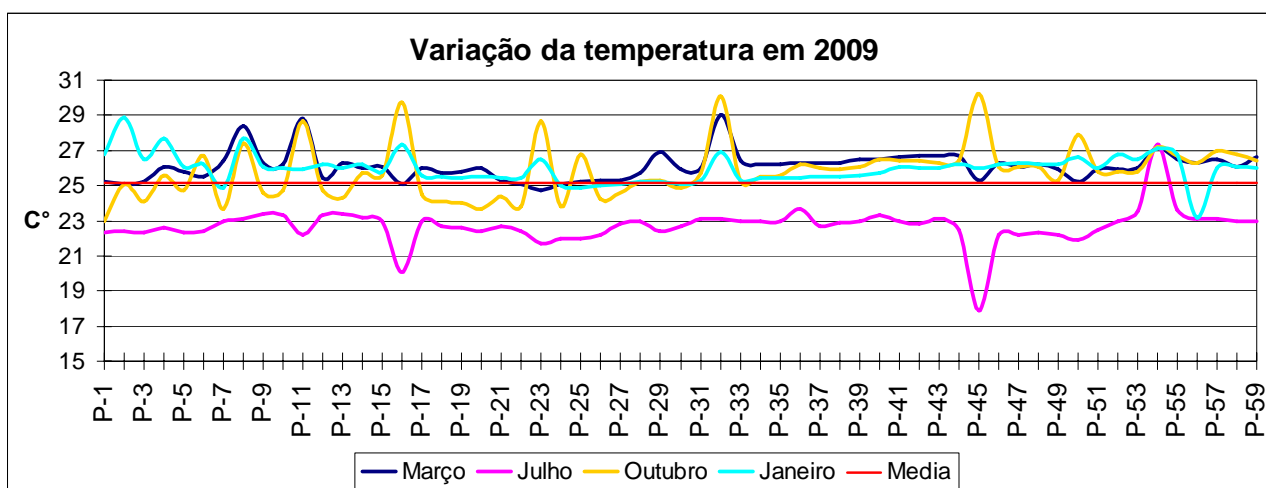
Nas áreas urbanas e industriais próximas à cidade de Três Marias (do P-1 ao P-15), a média aritmética das estações de amostragem ao longo do período monitorado ficou entre 6,0 e 6,5. Essa área é caracterizada pela presença da indústria de beneficiamento de Zn da Votorantim Metais e pelo lançamento de esgoto doméstico *in natura*. No segmento médio, entre Três Marias e Pirapora, o uso e ocupação do solo são marcados pelas monoculturas de eucalipto, soja e café. Nesse segmento estão localizadas 33 das 59 estações de amostragem (do P-16 ao P-48); sendo que para a média do pH, tais estações indicam um ambiente bem próximo da neutralidade, com valores entre 6,5 e 7,0. Já na região de Pirapora, entre os pontos 54 e 59, são descritos os valores de pH mais

alcalinos de todo o segmento. O ponto 54 corresponde à área de lançamento do efluente das indústrias de beneficiamento de Fe-Si e das indústrias têxteis que, para adequação ambiental dos valores pH, utilizam ácido sulfúrico (H₂SO₄) nas águas residuais antes do lançamento no rio. Os demais pontos coincidem com as áreas de fruticulturas, onde é observado uso de insumos agrícolas para a correção do pH dos solos na área de influência do rio.

5.3.2 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (C°) NO SEGMENTO ESTUDADO

A determinação da temperatura do meio aquático é uma importante variável, cuja variação altera os processos bioquímicos, densidade, viscosidade e tensão superficial; além de ser uma variável que atua de forma diretamente proporcional na solubilidade dos sais minerais e, inversamente, na solubilidade dos gases (McCutcheon *et al.* 1993).

Gráfico 4 – Variação da Temperatura em 2009



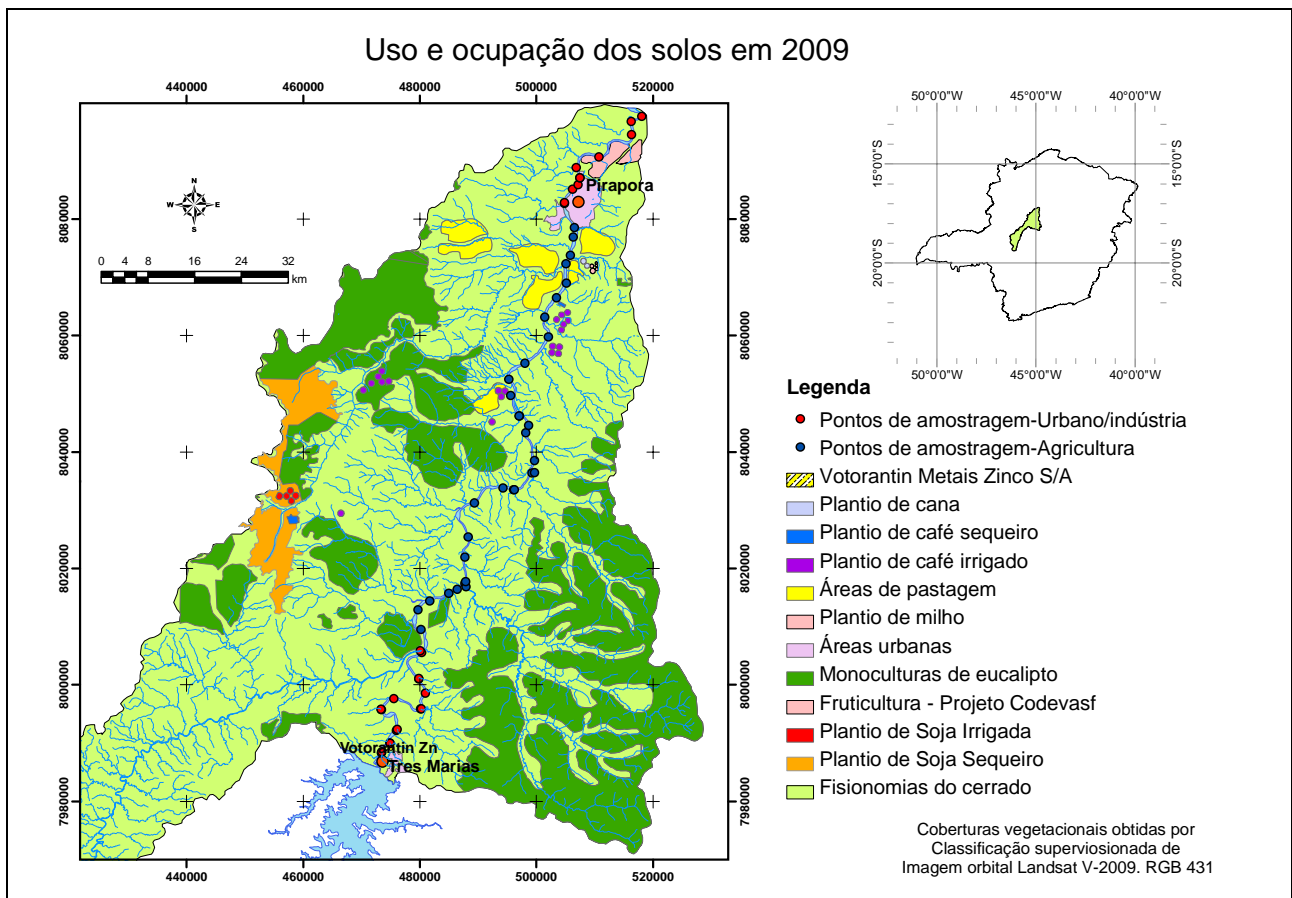
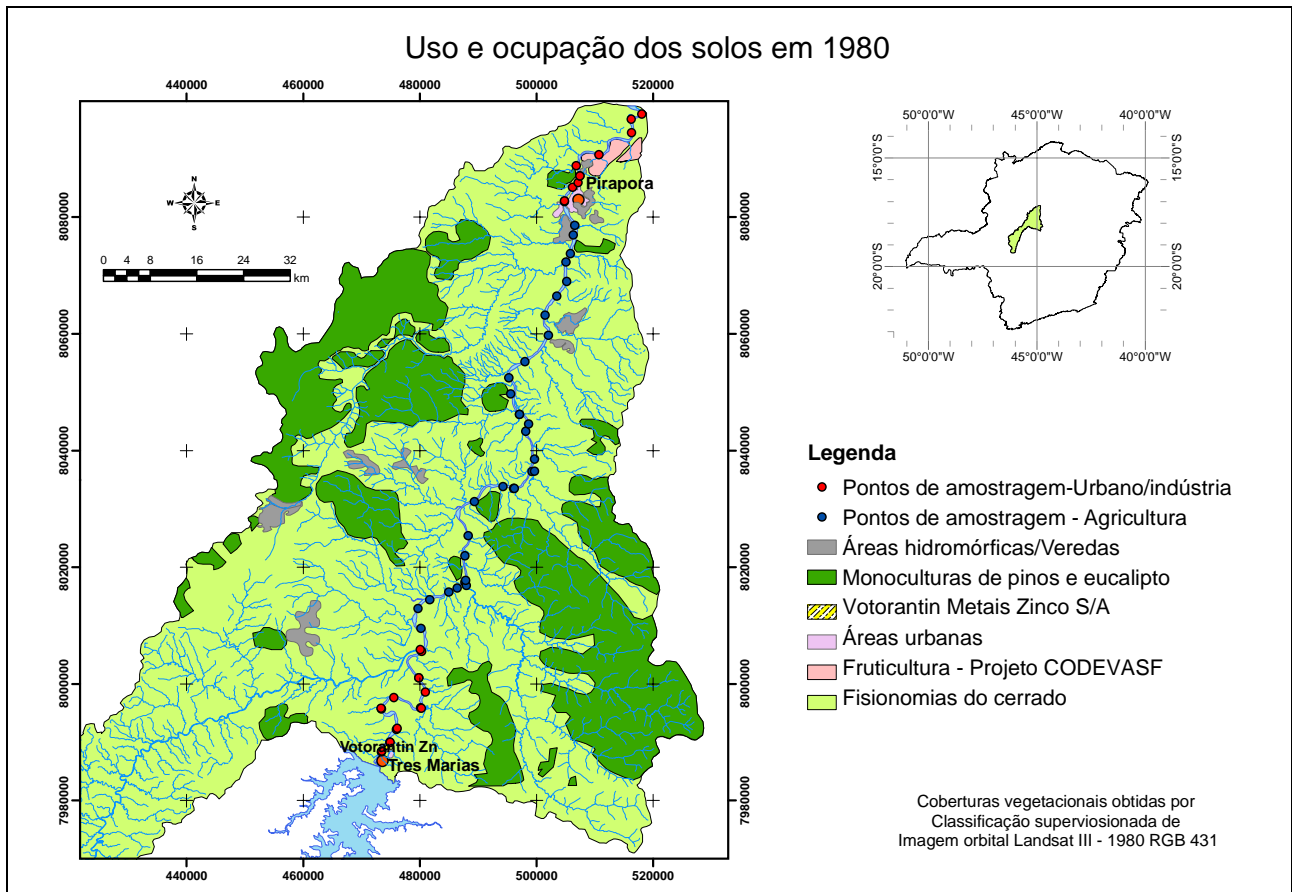
No segmento do rio estudado, a temperatura durante o ano de monitoramento não apresentou variações significativas para as estações amostragem. Os principais aspectos foram observados no Rio do Formoso, que apresenta a maior amplitude entre as estações em virtude de grande parte do leito menor se encontrar bastante encaixado com boa cobertura vegetal (mata ciliar) diminuindo a intensidade de radiação solar nas águas do Rio do Formoso. No entanto, a pouca variação da temperatura em cada estação do ano permite que seja dado um tratamento de certa forma homogêneo à influência desse parâmetro nos processos de adsorção de metais pesados nos sedimentos do Rio São Francisco.

5.4 Alterações no uso e ocupação dos solos entre 1980 e 2009

Os usos e ocupações dos solos na área estudada podem ser definidos pela presença das atividades urbano-industriais na cidade de Três Marias (alto curso); agricultura no médio curso e, novamente, atividades urbano-industriais em Pirapora (baixo curso). Tais atividades, historicamente, têm sido associadas à introdução de metais pesados no meio ambiente, em particular nos corpos hídricos.

De maneira geral, as principais alterações na paisagem natural ocorreram nas décadas de 1960-1970, quando no meio urbano/industrial foram implantadas a usina de beneficiamento de zinco (antiga Companhia Mineira de Metais – CMM –, atual Votorantim Metais Zinco S/A) em Três Marias e as metalúrgicas (beneficiamento de Fe-Si) em Pirapora. No meio agrícola, as alterações referem-se à supressão da vegetação nativa e à introdução das monoculturas de pinus e eucalipto, quando, por intermédio da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (Sudene), os governos estadual e federal implantaram um modelo desenvolvimentista para o cerrado norte mineiro. Outra alteração significativa é observada na década de 1990, quando houve a diversificação dos cultivos com a introdução das monoculturas de grãos – soja, milho e feijão –, como também de cana, algodão e aberturas de vastas áreas de pastagens.

A classificação supervisionada das imagens orbitais Landsat III-1980 e Landsat V-2009 permitiu identificar e avaliar a evolução têmporo-espacial do uso e ocupação dos solos na área de estudo (Figuras 33). Em termos quantitativos (Tabela 3), é possível verificar a redução da área de cobertura do cerrado e suas fisionomias na ordem de 12,2%, bem como o aumento de 7,8% da área coberta pelas monoculturas de eucalipto. Verifica-se, ainda, que com a introdução dos cultivos, principalmente de grãos, em meados de 1990, as áreas que anteriormente eram cobertas pelo cerrado sofreram uma redução de 6,5%. De maneira geral, o contexto vegetacional encontrado no segmento ainda preserva predominantemente as fisionomias do bioma cerrado. Entretanto, salienta-se que boa parte dessas fisionomias se encontra em estágio inicial a médio de regeneração, conforme verificado nas campanhas de campo.



Figuras 33 – Mapa da evolução têmpero-espaçial do uso e ocupação dos solos de 1980 a 2009 (maior detalhamento no anexo – E).

Tabela 3 – Classificação supervisionada para uso e ocupação dos solos de 1980 a 2009

Classe (uso e ocupação)	Frequência relativa (%) em	Frequência relativa (%) em
	1980	2009
Fisionomias do cerrado	81,2	69,1
Monoculturas de eucaliptos	16,7	24,5
Áreas hidromórficas/veredas	1,3	*
Áreas urbanas	0,5	0,8
Projeto de fruticultura	0,2	0,2
Áreas com plantio de cana	0,0	0,6
Plantios com café sequeiro	0,0	*
Plantio de café irrigado	0,0	0,2
Áreas com pastagens	0,0	1,6
Plantios de soja sequeira	0,0	1,7
Plantios de soja irrigada	0,0	0,4
Outros usos indivisos	0,1	1,0
Total	100	100

* - Valores não determinados em virtude da resolução espacial das imagens (30 m).

A problemática ambiental envolvendo os metais pesados e a agricultura faz-se presente no segmento, tanto pela introdução dos contaminantes via fertilizantes e pesticidas, como pela maneira difusa com que esta poluição se apresenta. Isso dificulta o diagnóstico ambiental e, sobretudo, as possíveis formas de controle e remediação dos impactos negativos gerados pela mobilização e carreamento dos metais para os corpos hídricos.

Através das campanhas foram identificados os principais agroquímicos manejados e seus respectivos cultivos. Verifica-se que as áreas de cultivo de café e soja merecem atenção, em virtude dos agroquímicos classe I e II (Tabela 4) que ali são manejados como inseticidas e herbicidas.

Tabela 4 – Principais agroquímicos encontrados nos cultivos da área de estudo

Cultivo	Agrotóxico (marca comercial)	classe	Ingrediente ativo	Classificação toxicológica
Café	Ramexane 850 PM	Fungicida	Oxicloreto de cobre	IV – Pouco tóxico
Café	Temik 150	Inseticida	Aldicarbe	I – Extremamente tóxico
Café	Thiodan CE	Inseticida	Endossulfam	II – Altamente tóxico
Soja	Rhodiauram 700	Fungicida	Tiram	III – Medianamente tóxico
Soja	Triclorfon 500 Milena	Inseticida	Triclorfom	II – Altamente tóxico
Soja	Trifluralina Nortox	Herbicida	Trifluralina	II – Altamente tóxico
Milho	Decis 25 CE	Inseticida	Deltametrina	III – Medianamente tóxico
Milho	Mirex-S	Formicida	Sulfluramida	IV – Pouco tóxico
Eucalipto	Mirex-S	Formicida	Sulfluramida	IV – Pouco tóxico

Consideradas as modalidades – sequeiro e irrigada –, cerca de 2,3% da área de estudo referem-se aos cultivos de soja e café. Muito embora, como verificado, o manejo de agroquímicos extremamente tóxicos tenha sido encontrado nestas áreas agrícolas, as concentrações de metais pesados nelas detectados são significativamente inferiores às encontradas nas áreas urbanas e industriais.

5.5 Limite de Quantificação e Índice de Geoacumulação

Através da espectrometria de emissão óptica de plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), foram determinadas as concentrações de metais pesados nos sedimentos. Os resultados foram confrontados com os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) apresentados para cada elemento, sendo que o limite de quantificação foi adotado neste trabalho como limite de corte das repostas analíticas obtidas. Segundo Miller & Miller (1993), o limite de detecção (LD) é definido como a concentração mínima pela qual se consegue obter uma resposta analítica significativamente diferente do ruído de fundo, ou de um branco. Já o limite de quantificação (LQ) é a concentração mínima pela qual se consegue obter uma resposta significativa. O cálculo do LQ a partir do LD é definido pela International Organization for Standardization (ISO 1996) como sendo dez vezes o valor do desvio padrão calculado a partir de dez medições do “branco”, e pode ser expresso em função do LD. Dessa forma, pelo desdobramento das medições e cálculo das incertezas considera-se que:

$$LQ = 4,7.LD \quad \text{equação (1)}$$

5.5.1 INDICE DE GEOACUMULAÇÃO

O índice de geoacumulação de Muller (1979) *apud* Calmano & Förstner (1996), permite classificar os níveis de enriquecimento dos metais em sete classes distintas. Esse índice estabelece a relação entre os teores de metais encontrados na região em análise e um valor referencial equivalente à média mundial para metais associados às argilas, logo:

$$\text{Índice de geoacumulação (Igeo)} = \log_2 C_n / (1,5 \times C_b) \quad \text{equação (2)}$$

Onde, C_N é a concentração do elemento N na fração fina; C_B é a concentração média de *background* geoquímico do elemento e 1,5 é o fator usado para minimizar variações do *background* causadas por diferenças litológicas.

Tabela 5 – Índice de geoacumulação (*Igeo*) de metais pesados (modificado de Müller 1979 *apud* Calmano & Förstner 1996).

Intensidade de poluição	Acumulo no sedimento (<i>Igeo</i>)	Classe (<i>Igeo</i>)
Muito fortemente poluído	> 5	6
Forte a muito fortemente poluído	4-5	5
Fortemente poluído	3-4	4
Moderado a fortemente poluído	2-3	3
Moderadamente poluído	1-2	2
Pouco a moderadamente poluído	0-1	1
Praticamente não poluído	<0	0

Concentrações médias de *background* (CB) em escalas globais podem apresentar valores bem diferentes das concentrações encontradas localmente. Tal fato, de certa forma, dificulta a aplicação sistemática do índice de geoacumulação (*Igeo*) na maioria dos trabalhos geoquímicos. No entanto, para Loska & Wiechula (2003), a substituição da concentração média de *background* (CB) pela menor concentração encontrada do respectivo elemento químico pode apresentar resultados mais significativos para a aplicação do *Igeo* localmente. Neste trabalho, em virtude da inexistência de trabalhos científicos voltados para determinação dos valores de *background* regionais, as concentrações de *background* (CB) foram substituídas pela menor concentração do elemento encontrado na área de estudo, conforme metodologia dos autores acima citados.

6 CONCENTRAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS ANALISADOS

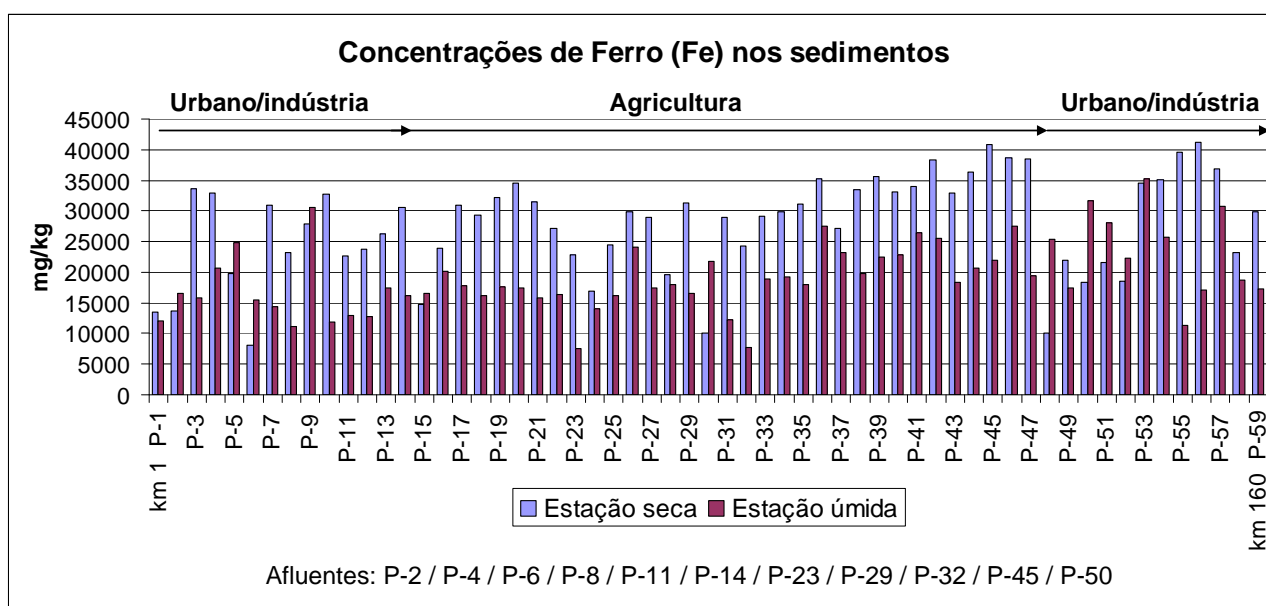
6.1 Ferro (Fe)

O ferro é naturalmente encontrado em concentrações elevadas na crosta, sendo que os principais minerais de origem sedimentar são a hematita (Fe_2SO_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e pirita (FeS_2). Segundo Cortecci (2002), é um elemento essencial, constituinte da hemoglobina, da mioglobina e de complexos enzimáticos; além de ser fundamental para a geração de energia em nível celular e para a integridade do sistema imunológico.

A CONAMA nº 344/04 não apresenta valores-guias para ferro nos sedimentos. Entretanto, Thomas (1987) sugere que, ressalvadas as anomalias naturais, em concentrações inferiores a 17.000mg/kg de ferro, os sedimentos podem ser considerados como não poluídos; em concentrações de 17.000 a 25.000mg/kg encontram-se moderadamente poluídos e acima de 25.000mg/kg os sedimentos encontram-se altamente poluídos. Pelo exposto, apenas sete pontos dos 59 analisados não apresentam contaminação para esse elemento, 14 pontos estão moderadamente poluídos e, por fim, 28 pontos distribuídos desde o ponto 3 até o ponto 59 encontram-se altamente poluídos.

A quantificação do ferro (Fe) foi substancialmente maior na estação seca, onde a distribuição espacial das concentrações no perfil de amostragem (Gráfico 5) indica que dos sete pontos não poluídos, cinco pontos estão localizados no alto curso do segmento (P-1, jusante do barramento; P-2 Córrego Barreiro Grande; P-6, Córrego Aldeia dos Dourados; P-15, Montante do Rio Abaeté e P-24, a jusante do Rio de Janeiro), estando os demais pontos no curso médio (P-30 e P-48). No entanto, as altas concentrações que se distribuem por todo perfil de amostragem dão indícios de condicionantes naturais, já que os argilitos e arenitos da Formação Três Marias analisados em áreas adjacentes apresentaram, respectivamente, 24.000 e 29.000mg/kg (Trindade 2007, Baggio 2008).

Gráfico 5 – Resultado da quantificação do ferro nas estações seca e úmida



A ampla distribuição espacial e relativa homogeneidade das concentrações são aspectos geralmente associados aos elementos com forte influência litológica. Neste as concentrações de Fé encontradas nos sedimentos indicam uma forte relação com aspectos geoambientais naturais. Esta relação tem sido observada no Índice de Geoacumulação (Figura 34) em virtude da pouca variação apresentada na intensidade de poluição. Dessa maneira, foram verificadas apenas três classes ao longo do Rio São Francisco.

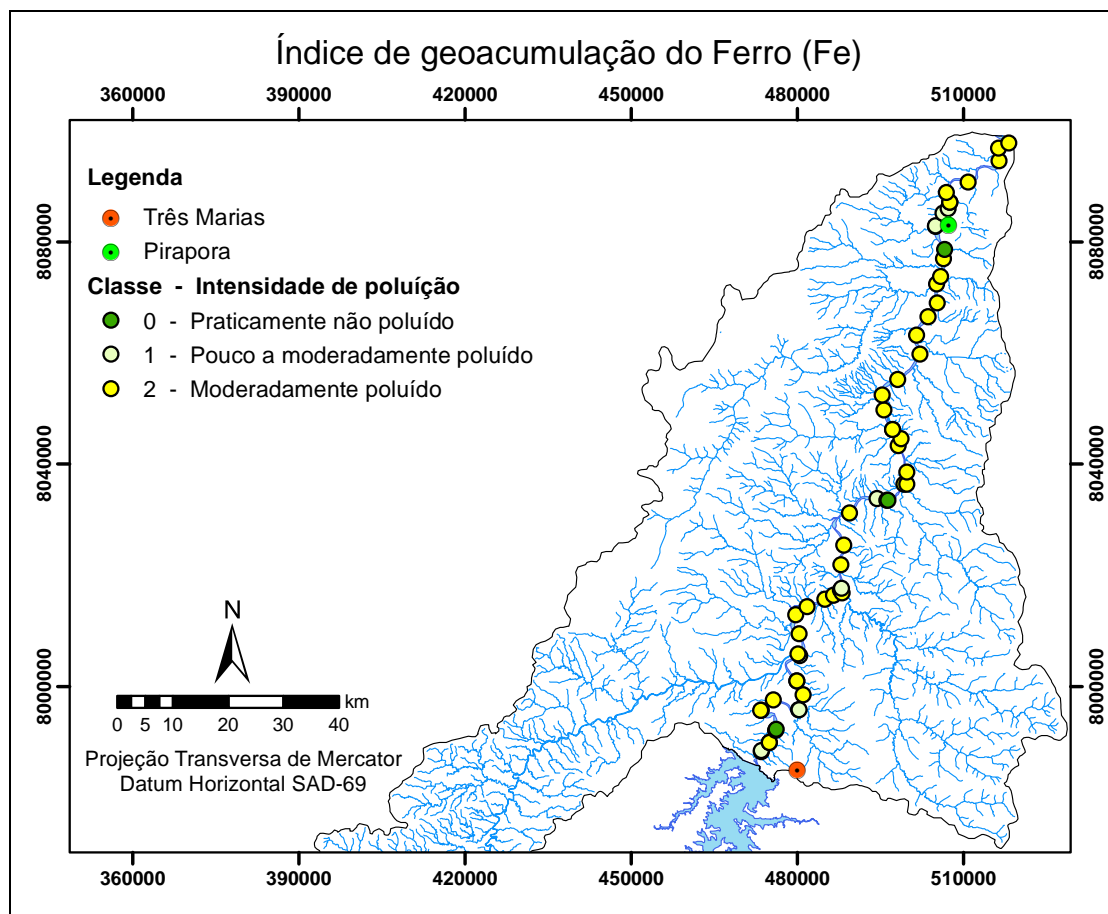


Figura 34 – Variação do índice de geoacumulação para ferro. A distribuição visualizada no mapa indica forte homogeneidade das concentrações de Fe nos sedimentos. Dos pontos analisados, 3 são classe 0, 11 são classe 1 e 45 pontos são classe 2.

Os pontos 6 (Córrego Aldeia dos Dourados), 30 (leito do Rio São Francisco) e 48 (início da área urbana de Pirapora) foram os únicos a serem classificados como praticamente não poluídos (classe 0); não apresentando uso comum dos solos que possa justificar as menores concentrações de ferro. Para a classe 1 (pouco a moderadamente poluído), foram encontrados 11 pontos nos cursos alto, médio e baixo. Já para classe 2 (moderadamente poluído), foram verificados 45 pontos distribuídos por todo perfil de amostragem.

6.2 Magnésio (Mg)

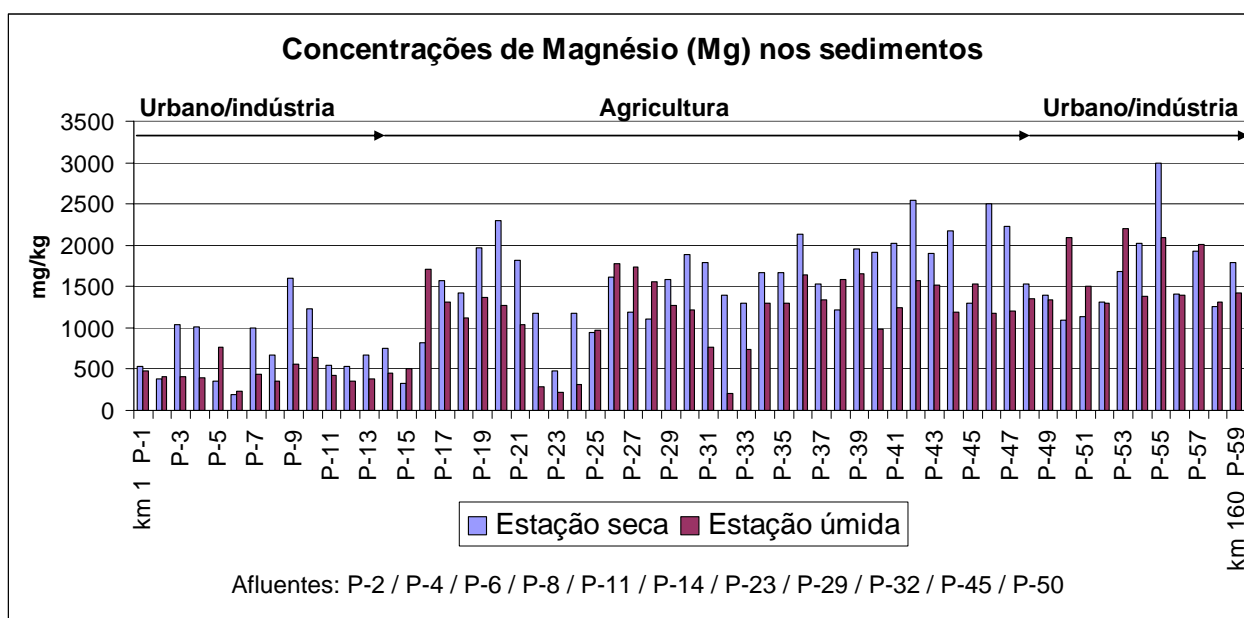
Na natureza, os minerais que concentram a maior quantidade de magnésio são a magnesita ($MgCO_3$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), biotita ($K(Mg,Fe_{2+})_3(Al,Fe_{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$), granada, piroxênio, clorita e alanita. Segundo Wedepohl (1978), as rochas ultramáficas, carbonáticas sedimentares e marinhas e suas equivalentes metamórficas são as que concentram maiores quantidades de magnésio.

O magnésio, encontrado em quantidades aproximadas de 25 g no corpo humano, é considerado um elemento essencial, uma vez que atua na estruturação óssea dos indivíduos, regula a passagem de substâncias através das membranas celulares, participa como cofator de cem enzimas

e, também, na fabricação de proteínas, sendo importante no processo de crescimento e desenvolvimento normal (Silva *et al.* 2006.).

Na área de estudo, nota-se, tanto na estação seca como na úmida, um aumento das concentrações de magnésio nos sedimentos da jusante do barramento da Represa de Três Marias (P-1) até o ponto 55 (a jusante do efluente industrial em Pirapora), onde se tem um decréscimo gradual até ao ponto 59. Possivelmente, as concentrações crescentes na jusante do barramento da represa refletem um aspecto natural, marcado pelo aumento da taxa de sedimentação de finos no rio – fato verificado na análise granulométrica das amostras (Gráficos 1 e 2). No entanto, as concentrações acima de 2.000mg/kg encontradas nos pontos 20, 36, 42, 44, 46 e 55 podem estar associadas ao uso e ocupação dos solos, uma vez que se configura pratica comum a aplicação desse elemento nos cultivos.

Gráfico 6 – Resultado da análise química para magnésio nas estações seca e úmida



Concentrações mínimas e máximas são encontradas na estação seca, sendo, respectivamente, 189,2mg/kg no Córrego Aldeia dos Dourados (P-6, afluente da margem direita) e 2.996mg/kg no ponto 55 (a jusante do efluente industrial em Pirapora). Outro fator observado com relação ao comportamento desse elemento é o fato de em ambas as estações os afluentes, tanto da margem esquerda como da direita, apresentarem menores concentrações quando comparados com as concentrações encontradas no leito do Rio São Francisco.

O índice de geoacumulação para magnésio ao longo do perfil de amostragem variou entre as classes 0 e 3 (praticamente não poluído a moderado a fortemente poluído), sendo que os pontos classificados como praticamente não poluídos se concentram nas proximidades da Represa de Três Marias e da Votorantim Metais Zinco S/A (pontos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8).

Os valores médios referentes às classes 1 e 2 (respectivamente, pouco a moderadamente poluído e moderadamente poluído) são descritos, em grande parte, nas áreas adjacentes às monoculturas de café, soja e milho. Já os mais altos índices de geoacumulação para magnésio referem-se à classe 3 (moderado a fortemente poluído), sendo descrita nos pontos 20 (leito do Rio São Francisco), 42 (leito do Rio São Francisco), 46 (ilha) e 55 (leito do Rio São Francisco) – todos plotados próximos ao talvegue do rio, fato que dificulta a relação dessas concentrações com as atividades antrópicas localizadas às margens do rio.

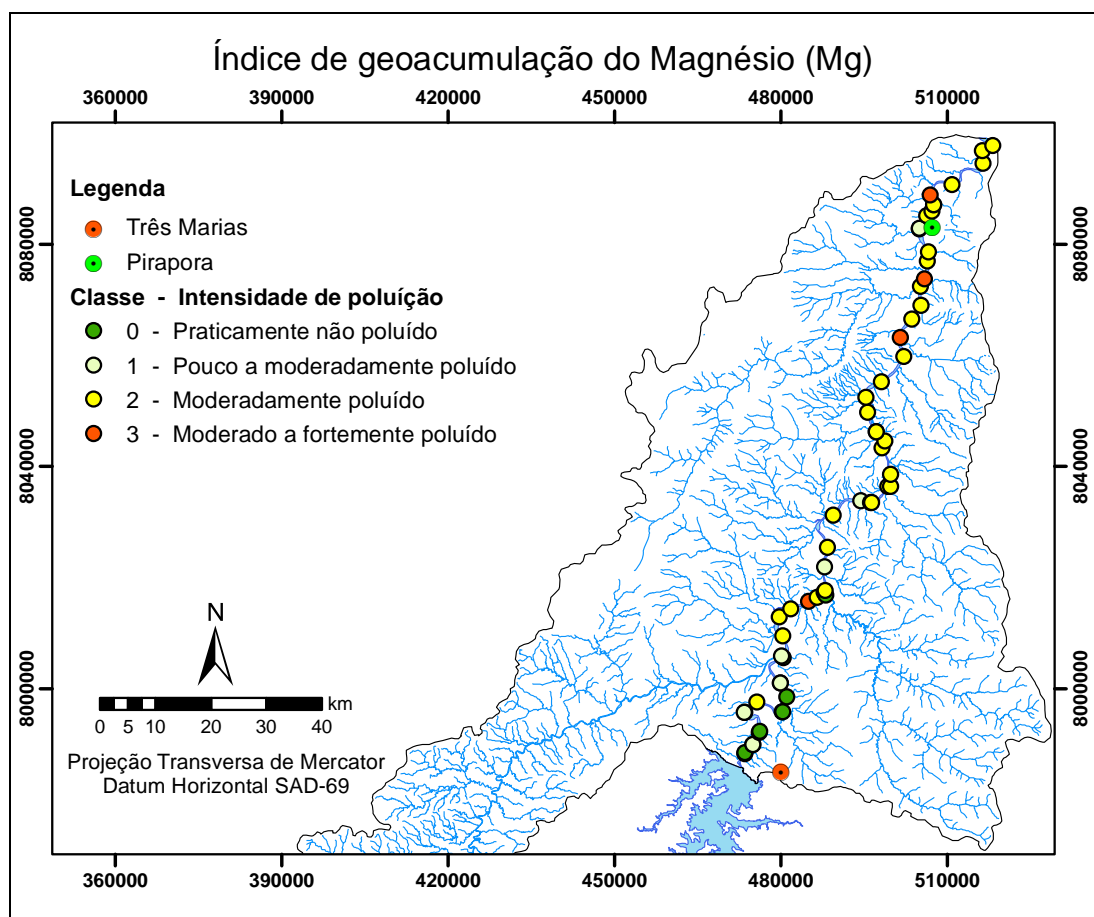


Figura 35 – Variação do índice de geoacumulação para magnésio. Dos 59 pontos existentes no perfil de amostragem, 37 pontos estão na classe 2, indicando um ambiente moderadamente poluído para magnésio.

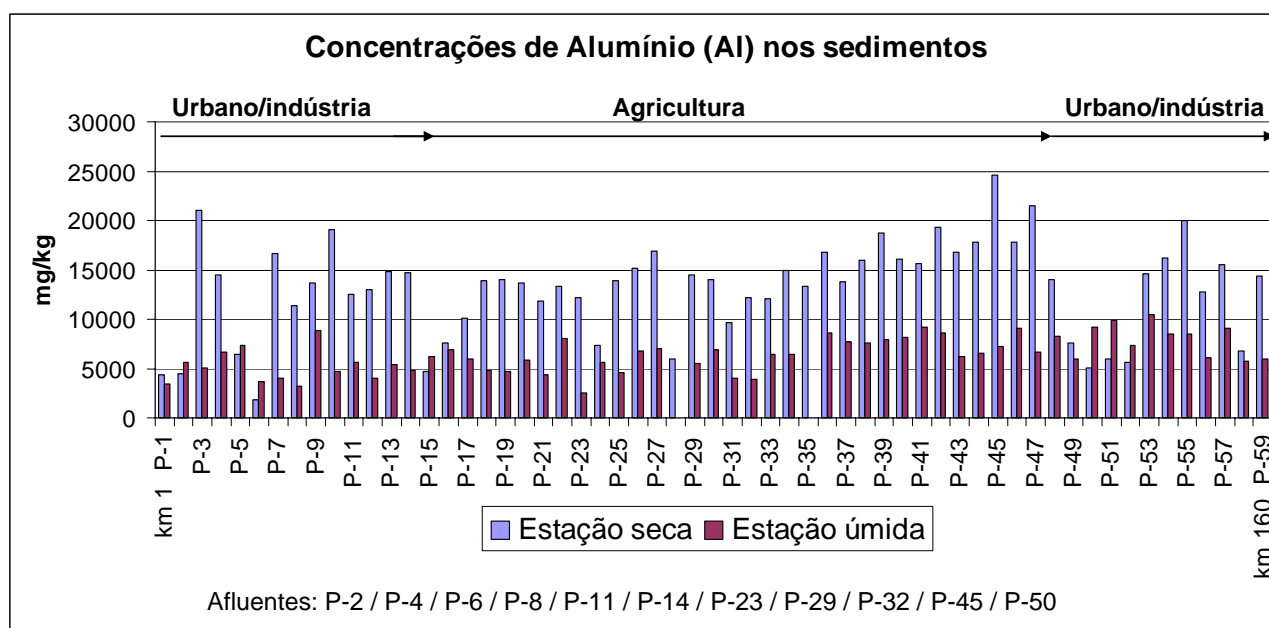
Dentre os pontos analisados, 37 indicam que o enriquecimento de magnésio encontra-se na classe 2 (moderadamente poluído), 11 estão na classe 1 (pouco a moderadamente poluído), sete estão praticamente não poluídos (classe 0) e quatro se encontram moderados a fortemente poluídos por magnésio (classe 3). Dessa forma, é possível afirmar que, pelos aspectos abordados no índice de geoacumulação, o Rio São Francisco se configura como um ambiente moderadamente poluído para magnésio.

6.3 Alumínio (Al)

O alumínio está presente em elevadas concentrações na bauxita e na crosta terrestre de uma forma geral – principalmente nos silicatos, óxidos, hidróxidos e argilominerais. Por suas características físico-químicas, capacidade de remoção dos metais por oxidação e baixa solubilidade, o sulfato de alumínio é amplamente utilizado no tratamento de esgotos. Sem função biológica definida, a presença de altas concentrações de alumínio no corpo humano tem sido associada ao desenvolvimento da doença de Alzheimer (Selinus 2006).

Em âmbito nacional, a CONAMA nº 344/04 não estabelece valores-guias de concentração para a avaliação de alumínio nos solos e sedimentos; fato que dificulta a análise e gestão ambiental desse elemento nos corpos hídricos. No entanto, a análise das concentrações de alumínio nos sedimentos do Rio São Francisco indica que as mais elevadas concentrações são encontradas na estação seca e que existem discrepâncias locais, possivelmente em decorrência das atividades antrópicas, uma vez que tais concentrações apresentam-se de forma bastante pontual (Gráfico 7), não sendo verificada nenhuma mudança significativa nos aspectos geológicos e pedológicos capaz de explicar tais alterações.

Gráfico 7 – Resultado da análise química para alumínio nas estações seca e úmida



Concentrações de alumínio acima de 20.000mg/kg são encontradas nos pontos 3 (21.057,31mg/kg), 45 (24.600,59mg/kg), 47 (21.498,02mg/kg) e 55 (20.029,64mg/kg), respectivamente, Córrego Barreiro Grande (esgoto doméstico de Três Marias), Rio do Formoso (monoculturas e pecuária), sitiantes e lagoas marginais em Pirapora e, finalmente, o ponto localizado à jusante do efluente industrial e a montante do projeto de fruticultura.

Através do estabelecimento do índice de geoacumulação (Figura 36) é possível verificar que o Rio São Francisco, em grande parte, é classificado como moderado a fortemente poluído para alumínio, uma vez que dos 59 pontos analisados, 43 encontram-se na classe 3 (moderado a fortemente poluído), dez pontos na classe 2 (moderadamente poluído), quatro pontos na classe 1 (pouco a moderadamente poluído), um ponto na classe 0 (praticamente não poluído) e um ponto na classe 4 (fortemente poluído).

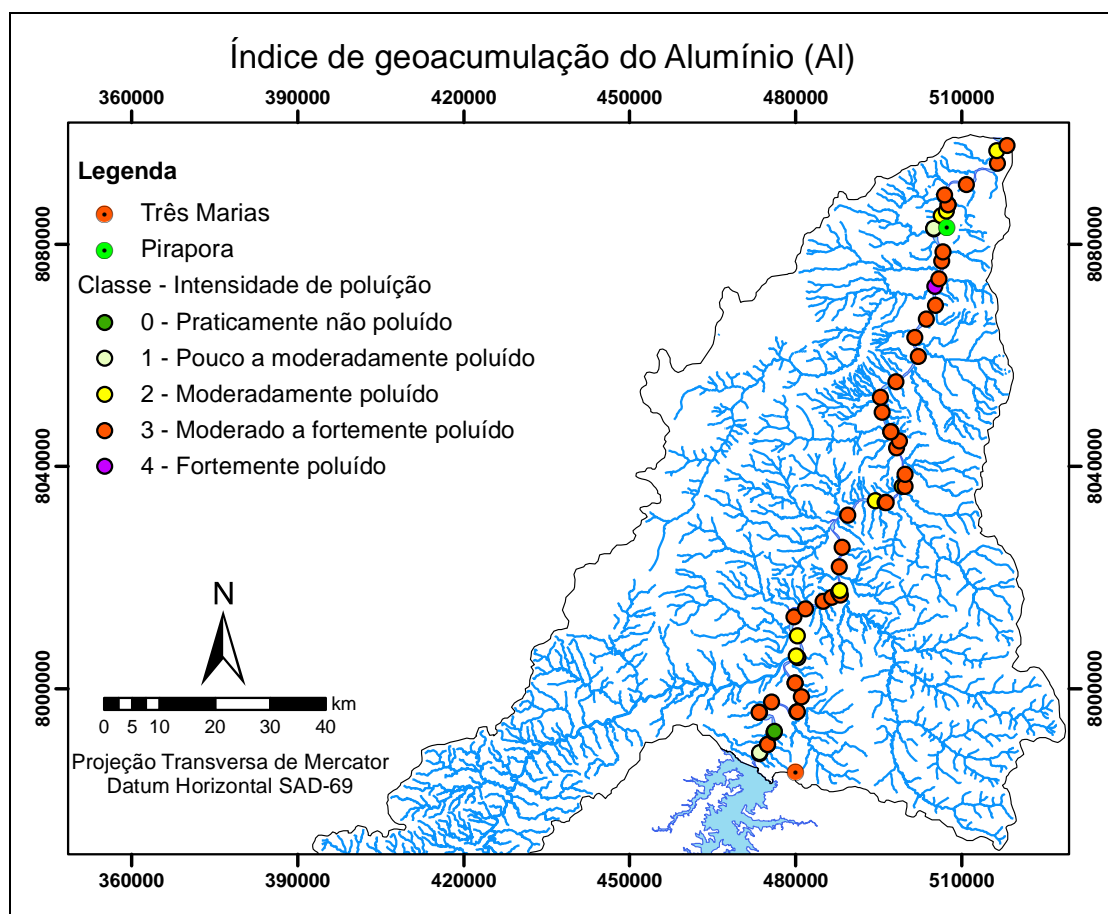


Figura 36 – Variação do índice de geoacumulação para alumínio. O *Igeo* do Al indica comportamento típico dos elementos cujas concentrações têm forte condicionante litogênica. Dessa forma, dos 59 pontos analisados, 43 se encontram na classe 3.

Os pontos classe 3 e classe 2 localizam-se no curso médio do segmento estudado, onde as atividades antrópicas são aquelas ligadas às monoculturas de soja, milho e café. Os pontos da classe 1 e 0 são afluentes (Córrego Barreiro Grande, Rio Abaeté, Córrego Aldeia dos Dourados e Córrego das Pedras). O único ponto referente à classe 4 também é um afluente (Rio do Formoso) cujos aspectos geoambientais não se diferenciam dos encontrados no leito do Rio São Francisco.

6.4 Manganês (Mn)

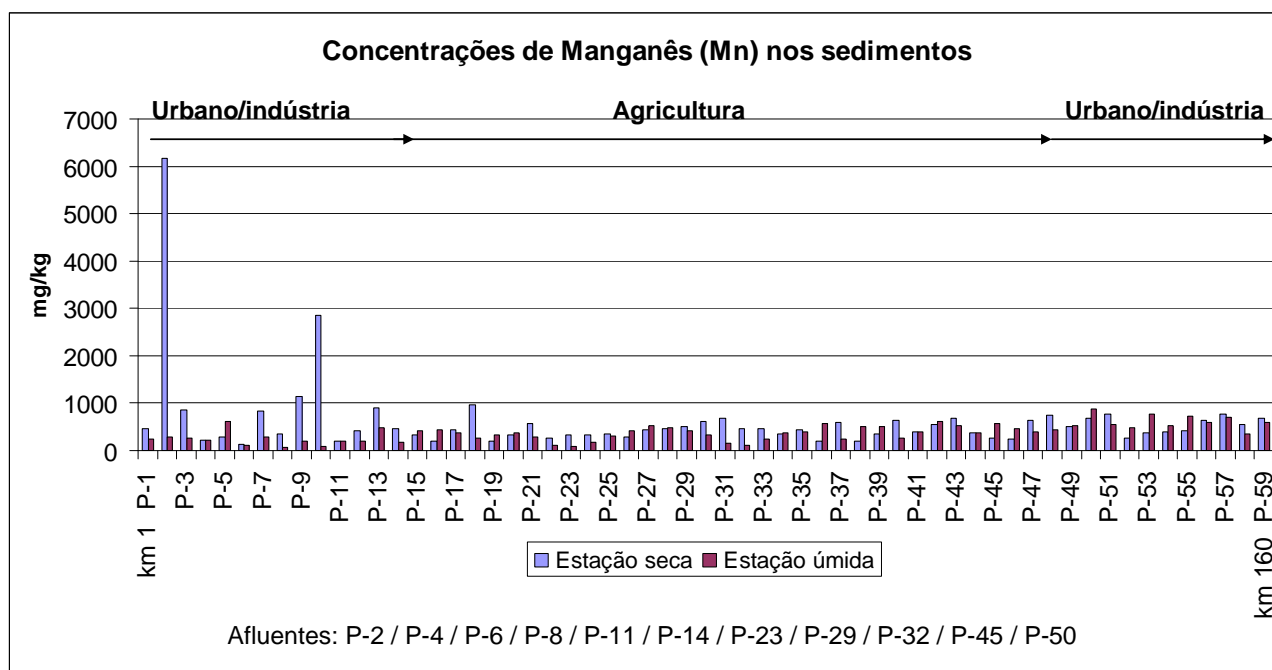
Considerado um micronutriente essencial para todos os organismos, raramente ocorre em concentrações perigosas. Nas plantas, é essencial para produção de clorofila – sua deficiência pode

causar distúrbios de crescimento e desordens, como descoloração das folhas e das agulhas coníferas. Em animais, a deficiência de manganês conduz a anormalidades esqueléticas, complicações no crescimento e dificuldades reprodutivas (Koljonem *et al.* 1992). No entanto, quando expostos a altas quantidades de Mn por longos períodos de tempo, os indivíduos desenvolvem distúrbios mentais e emocionais, além de movimentos lentos do corpo, podendo desenvolver a doença conhecida manganismo.

O manganês naturalmente é encontrado em altas concentrações na litosfera, com teores variando de 350mg/kg a 2.000mg/kg, principalmente em rochas máficas (Kabata-Pendias & Pendias 1992). Em rochas sedimentares, como as encontradas na área de estudo, os teores de Mn são controlados tanto pela geoquímica quanto pelas condições de oxidação-redução do ambiente deposicional (Wedepohl 1978).

A quantificação de manganês nos sedimentos (Gráfico 8) demonstra concentrações bastante similares, tanto para estação seca como para a estação úmida. A variação dos teores dentre os pontos amostrados também demonstra certa homogeneidade – fato que indica influência litológica na distribuição e concentração de manganês em grande parte dos sedimentos.

Gráfico 8 – Resultado da análise química para manganês nas estações seca e úmida



As maiores variações para manganês descritas no perfil estão no ponto 2 – Córrego Barreiro Grande – , que recebe os esgotos domésticos da cidade de Marias, com concentrações de 6.166mg/kg; e no ponto 10 (montante do Rio Espírito Santo), com 2.849,20mg/kg e cuja única atividade antrópica observada é a construção de estradas vicinais às margens do Rio São Francisco.

O índice de geoacumulação para manganês (Figura 37) indica que 40 amostras de sedimentos do Rio São Francisco distribuídos basicamente no médio e baixo curso estão enquadrados na classe 2 (22 pontos, moderadamente poluído) e classe 3 (28 pontos, moderado a fortemente poluído). As anomalias pontuais, associadas às atividades antrópicas anteriormente descritas nos pontos 2 e 10, elevam os níveis de enriquecimento de manganês nos sedimentos, fazendo com que esses sejam classificados, respectivamente, como muito fortemente poluído e forte a muito fortemente poluído.

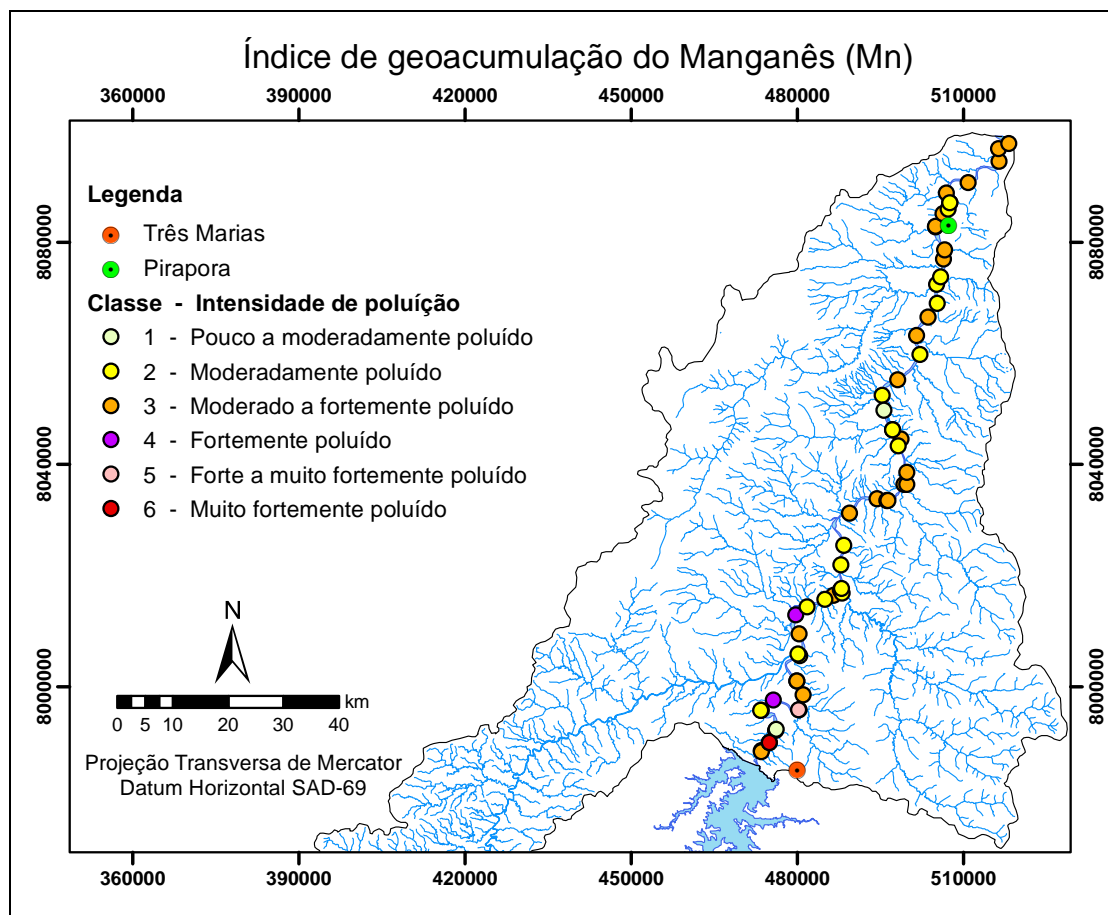


Figura 37 – Variação do índice de geoacumulação para manganês. O mapa do *Igeo* demonstra que os sedimentos mais enriquecidos por Mn (classes 4, 5 e 6) concentram-se na área de influência urbana/industrial em Três Marias. A partir do ponto 14 os índices apresentam-se bem divididos entre as classes 1, 2 e 3.

6.5 Cálcio (Ca)

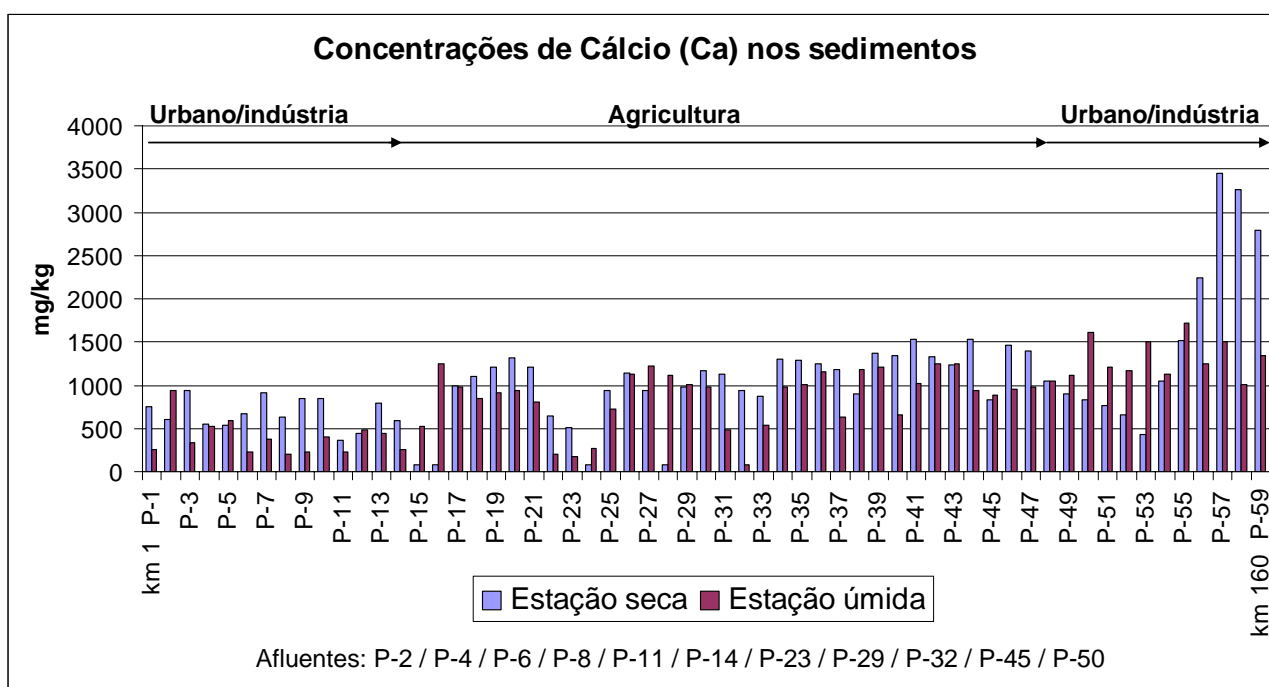
Para Silva *et al.* (2006), o cálcio é o metal mais abundante no corpo humano, com quantidade média de 1.200mg de fosfato de cálcio encontrados nos ossos e dentes. É considerado essencial na regulação da atividade de membranas celulares, especialmente na contração muscular e na condução dos estímulos nervosos; além de participar da coagulação sanguínea, divisão celular e liberação de hormônios.

Presente em concentrações elevadas na crosta terrestre, o cálcio (Ca) é constituinte da maioria dos minerais formadores de rochas (plagioclásios, feldspatos, piroxênios, anfibólios,

calcita, dolomita, anidrita e gipsita). Habitualmente descrito nos mármore e calcários, o cálcio também é encontrado em quantidades significativas nos argilitos, siltitos e arenitos.

As principais variações do cálcio no Rio São Francisco ocorrem na estação seca, nos pontos 56, 57, 58 e 59, onde as concentrações são, respectivamente, 2.243,67mg/kg, 3.445,54mg/kg, 3.267,98mg/kg e 2.786mg/kg e o uso e ocupação dos solos são marcados pela presença do projeto de fruticultura às margens do rio. Dessa forma, as elevadas concentrações descritas podem estar associadas à introdução do elemento nos cultivos; uma vez que este é considerado um macronutriente secundário que favorece o crescimento e fortalecimento das raízes e reduz a toxicidade dos solos provocada pelo alumínio, cobre e manganês.

Gráfico 9 – Resultado da análise química para cálcio nas estações seca e úmida



As elevadas concentrações encontradas na área da fruticultura em Pirapora têm influência direta nos valores do índice de geoacumulação (Figura 38), indicando enriquecimento de cálcio nos sedimentos. As amostras coletadas nos pontos 56, 57, 58 e 59 foram classificadas como forte a muito fortemente poluídas pelo elemento cálcio.

Além da classe 5, descrita na área da fruticultura, ao longo do perfil de amostragem foram encontrados quatro pontos classe 0 (praticamente não poluído) no alto-médio curso do segmento e três pontos classe 2 (moderadamente poluído) localizados no Córrego do Espírito Santo (P-11), Córrego da Escadinha (P-12) e no ponto 53, próximo à área de dragagem em Pirapora.

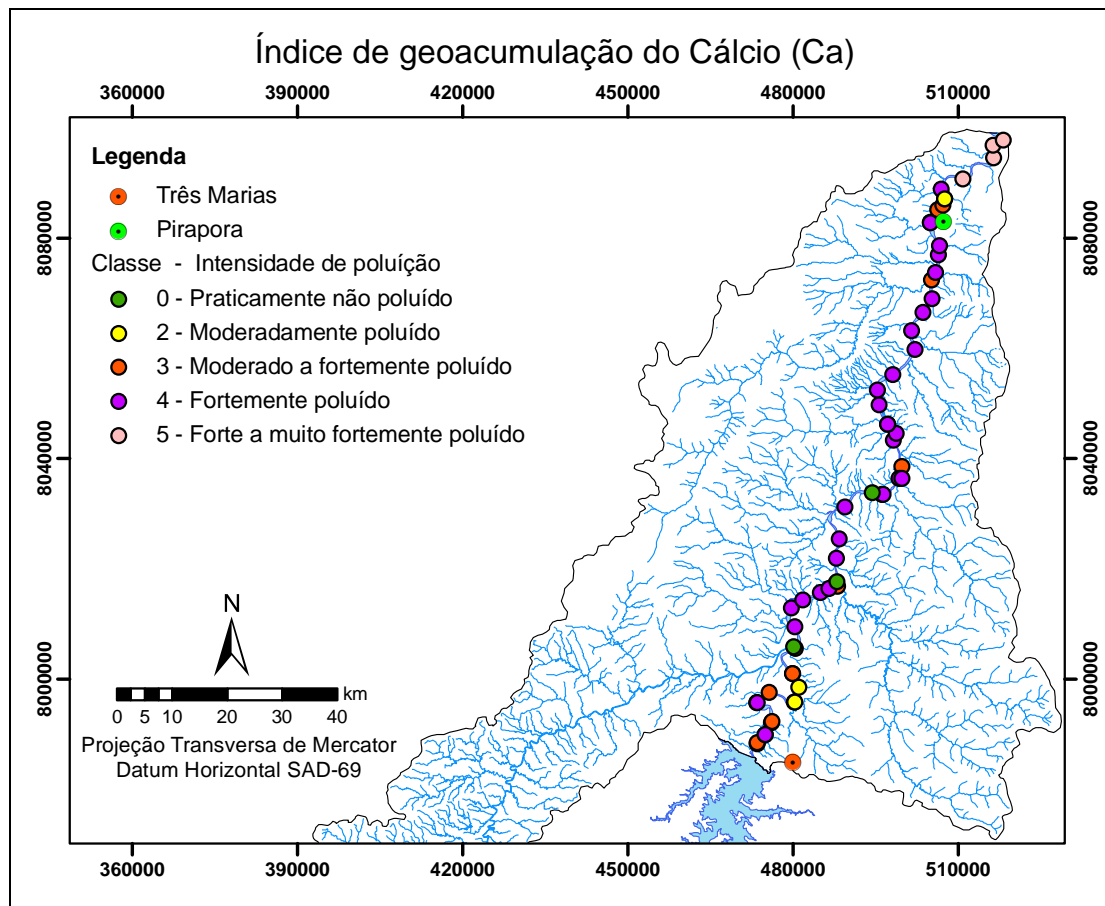


Figura 38– Variação do índice de geoacumulação do cálcio. Dos pontos analisados, 31 encontram-se na classe 4, com ampla distribuição espacial no segmento (típico dos elementos litogênicos). Apenas na área de fruticultura em Pirapora os sedimentos são classe 5.

Grande parte dos 59 dos pontos amostrados foram classificados como classe 3 (moderado a fortemente poluído) e classe 4 (fortemente poluído), sendo que 17 pontos são classe 3 e 31 pontos são classe 4, de maneira que contribuem para determinar que o Rio São Francisco entre Três Marias e Pirapora encontra-se fortemente poluído por cálcio.

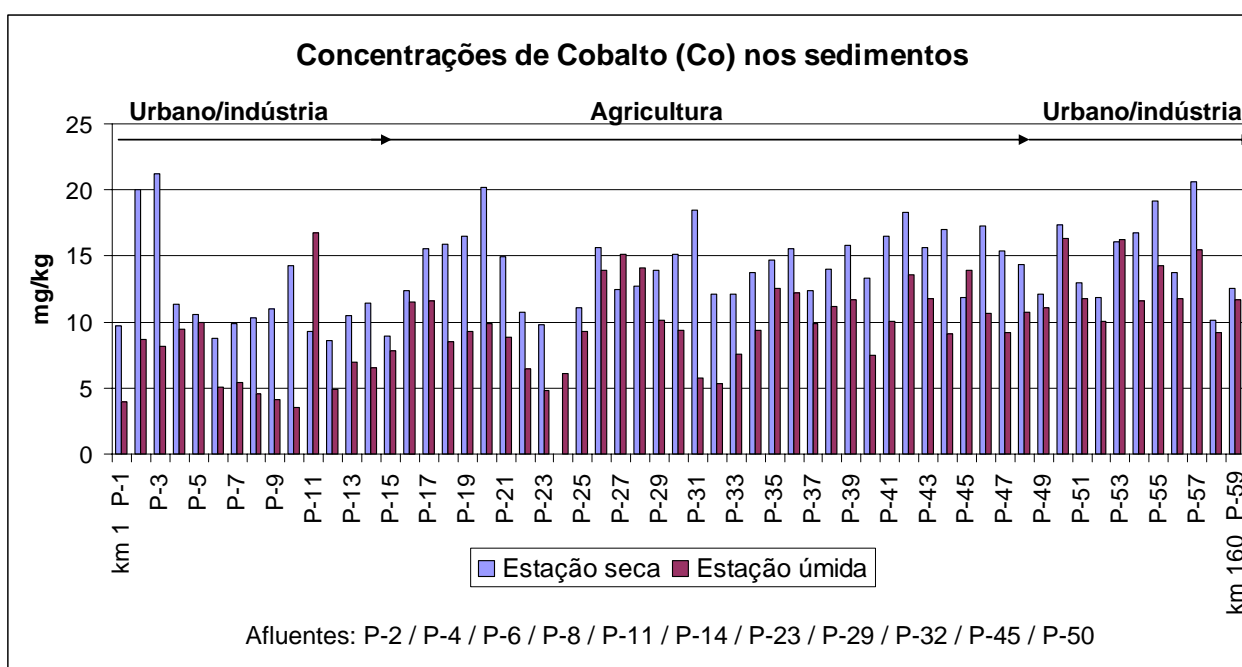
6.6 Cobalto (Co)

O cobalto (Co) é considerado um nutriente essencial, sendo fundamental na produção da vitamina B12, envolvida na manutenção da integridade do sistema nervoso e na produção de glóbulos vermelhos. No entanto, em altas concentrações, torna-se tóxico e carcinogênico aos seres humanos. Na natureza, o cobalto é encontrado em diversos minerais: siegenita $[(Co,Ni)_3S_4]$, esfalerita, heterogenita (óxido básico de Co), linneíta $[(Co, Ni)3S_4]$ – da série linneíta-polidimita, cobaltita (CoAsS), esmaltita $(CoNiAs_{3-x})$, cobalto-pirita (variedade de pirita com Co), pentlandita $[(Fe,Ni)_9S_8]$, glaucodoto $[(Co,Fe)AsS]$, carrolita (Co_2CuS_4) , eritrita (arsenato hidratado de Co) e saflorita $(CoAs_2)$ (Branco 1982). Em rochas ultramáficas, o cobalto apresenta concentrações elevadas, entre 100 e 200mg/kg – em contraste com as rochas ácidas, que apresentam concentrações entre 1 e 15mg/kg (Kabata-Pendias & Pendias 1992). Nas rochas sedimentares, como as

encontradas na área de estudo, o Co tende a acompanhar o Fe e o Mn, concentrando-se nas frações finas. Os arcóseos e grauvacas são mais enriquecidos com cobalto, em virtude da presença dos minerais máficos presentes nessas rochas (Ure & Berrow 1982 *apud* Licht 2001).

A quantificação de cobalto nos sedimentos (Gráfico 10) indica que as concentrações são mais elevadas na estação seca. Os maiores teores de cobalto (Co) são descritos nos pontos 2 (montante do Córrego Barreiro Grande), 3 (Córrego Barreiro Grande), 20 (leito do Rio São Francisco) e 57 (Rio São Francisco na área de influência da fruticultura). No entanto, cabe salientar que, em virtude da afinidade geoquímica do cobalto (Co) com Fe e Mn, possivelmente os teores médios são de origem natural. Trindade (2007) e Baggio (2008) encontram concentrações de 27mg/kg nos argilitos e 45mg/kg nos arenitos arcoseanos, ambos da Formação Três Marias. (Grupo Bambuí).

Gráfico 10 – Resultado da análise química para cobalto nas estações seca e úmida



A pouca variação do índice de geoacumulação (Figura 39) reflete a influência dos aspectos geológicos na concentração e distribuição do cobalto ao longo do perfil amostragem. Dos pontos analisados, somente o ponto 3 (montante do Córrego Consciência) encontra-se moderado a fortemente poluído por cobalto. Nos demais pontos amostrados, os sedimentos são classificados como classe 1 e classe 2 – respectivamente, pouco a moderadamente poluído e moderadamente poluído. Quarenta e oito pontos, distribuídos ao longo do alto, médio e baixo curso do Rio São Francisco, são classificados como moderadamente poluídos por cobalto.

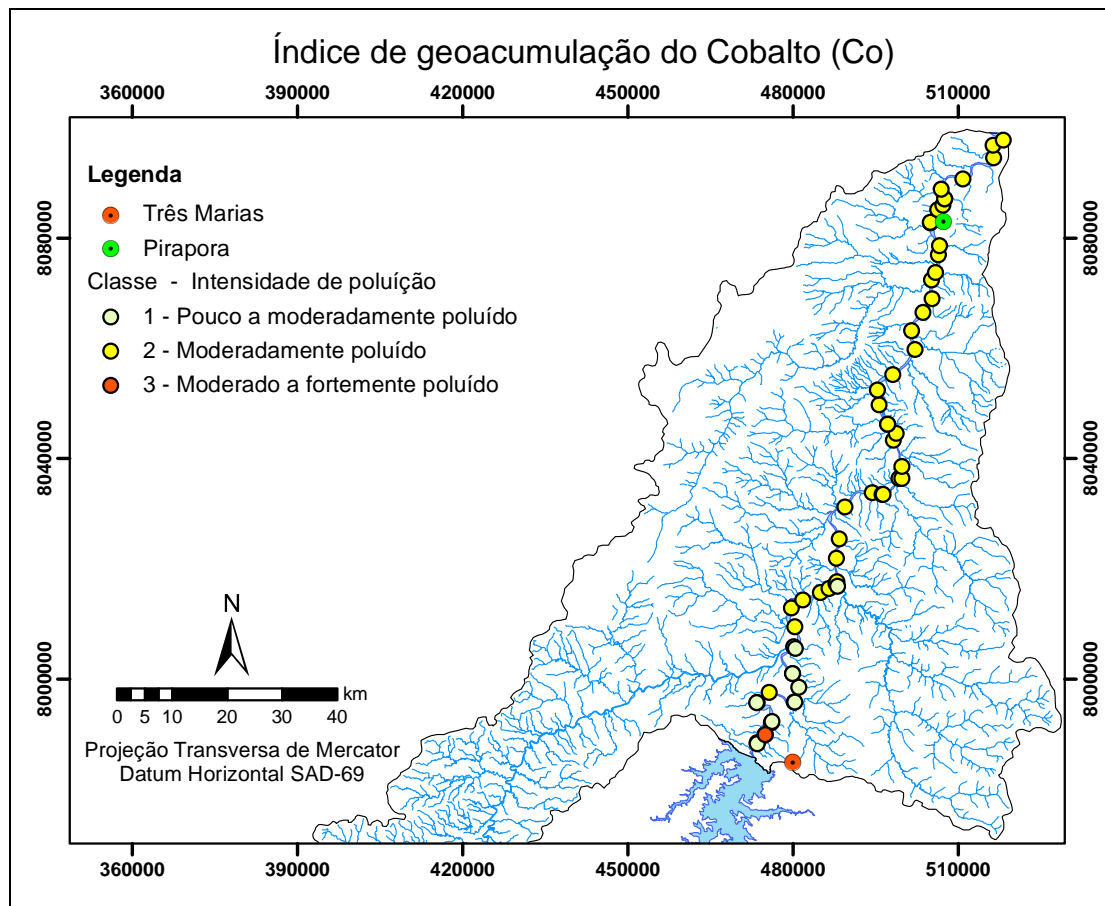


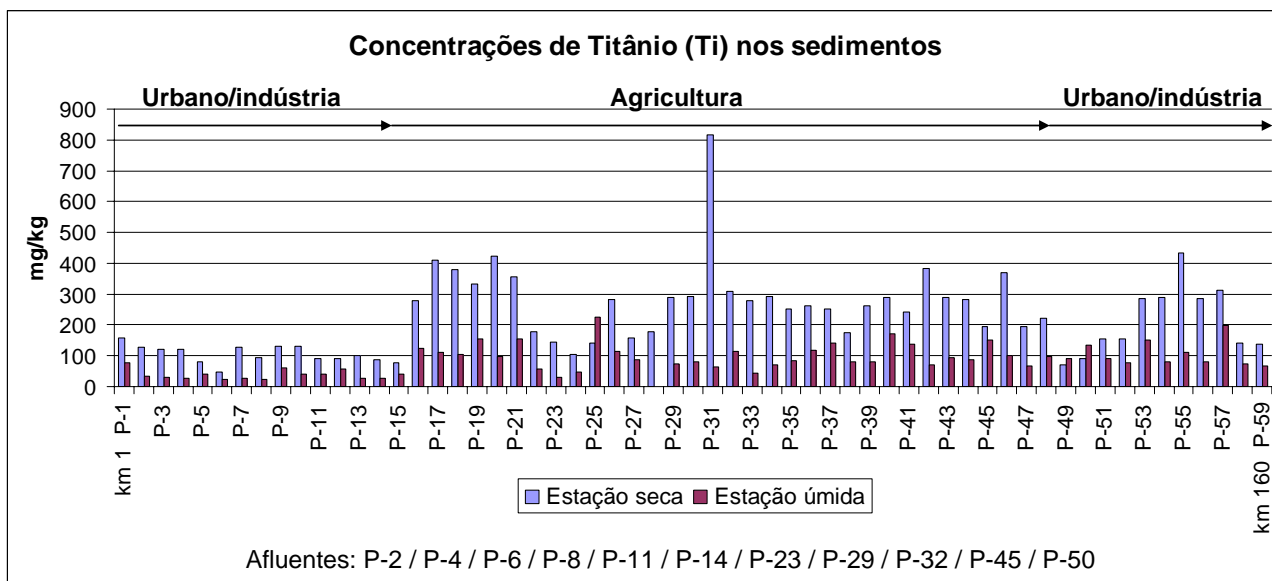
Figura 39 – Variação do índice de geoacumulação para cobalto. Em relação ao cobalto, 48 pontos foram descritos como moderadamente poluídos, com uma forte associação aos aspectos litogênicos, sendo notado enriquecimento diferenciado no ponto 3.

6.7 Titânio (Ti)

O titânio (Ti) não é um elemento tóxico, mas, esporadicamente, tem sido citado como carcinogênico. No corpo, esse elemento tende a se acumular em tecidos ricos em Si (Winter 1998). Na natureza, quando puro, o titânio é um metal branco e brilhante, com uma baixa densidade, boa resistência mecânica e uma excelente resistência à corrosão; podendo ser encontrado principalmente no rutilo, ilmenita, loparita, perovskita (CaTiO_3) e esfênio. Em rochas sedimentares, a concentração de TiO_2 é determinada pela abundância de óxidos detríticos, argilominerais e fases diagenéticas, como o anatásio (Branco 1982).

As concentrações de Ti encontradas no perfil de amostragem são mais elevadas na estação seca (Gráfico 11), com valores que decrescem do ponto 1 até o ponto 15. Do ponto 16, referente ao Rio Abaeté, até o ponto 21, observa-se que as concentrações se elevam bastante, saindo de 78,42mg/kg no ponto 15 para 278,54mg/kg, em virtude do aporte de sedimentos oriundos do Grupo Mata Corda cuja composição mineralógica apresenta os polimorfos de titânio, rutilo e anatásio.

Gráfico 11 – Resultado da análise química para titânio nas estações seca e úmida



A maior concentração de titânio nos sedimentos (815,73mg/kg) ocorre no ponto 31, uma pequena ilha a montante da corredeira Bananeira, onde o único uso observado é a presença de pescadores, não ficando explícitas as condicionantes que conduzem à anomalia. Outro ponto que apresenta concentração diferenciada é o ponto 55, a jusante do efluente industrial, possivelmente associado ao lançamento de águas residuais da produção têxtil – sendo que os óxidos de Ti são reconhecidamente utilizados na pigmentação do índigo (*jeans*).

O índice de geoacumulação para titânio (Figura 40) apresenta uma boa relação com o aporte de sedimentos do Grupo Mata da Corda, uma vez que foi observado que os sedimentos amostrados à montante do Rio Abaeté (P-16) se encontram moderadamente poluídos (classe 2), em contraposição aos amostrados à jusante, que estão fortemente poluídos por Ti (classe 4).

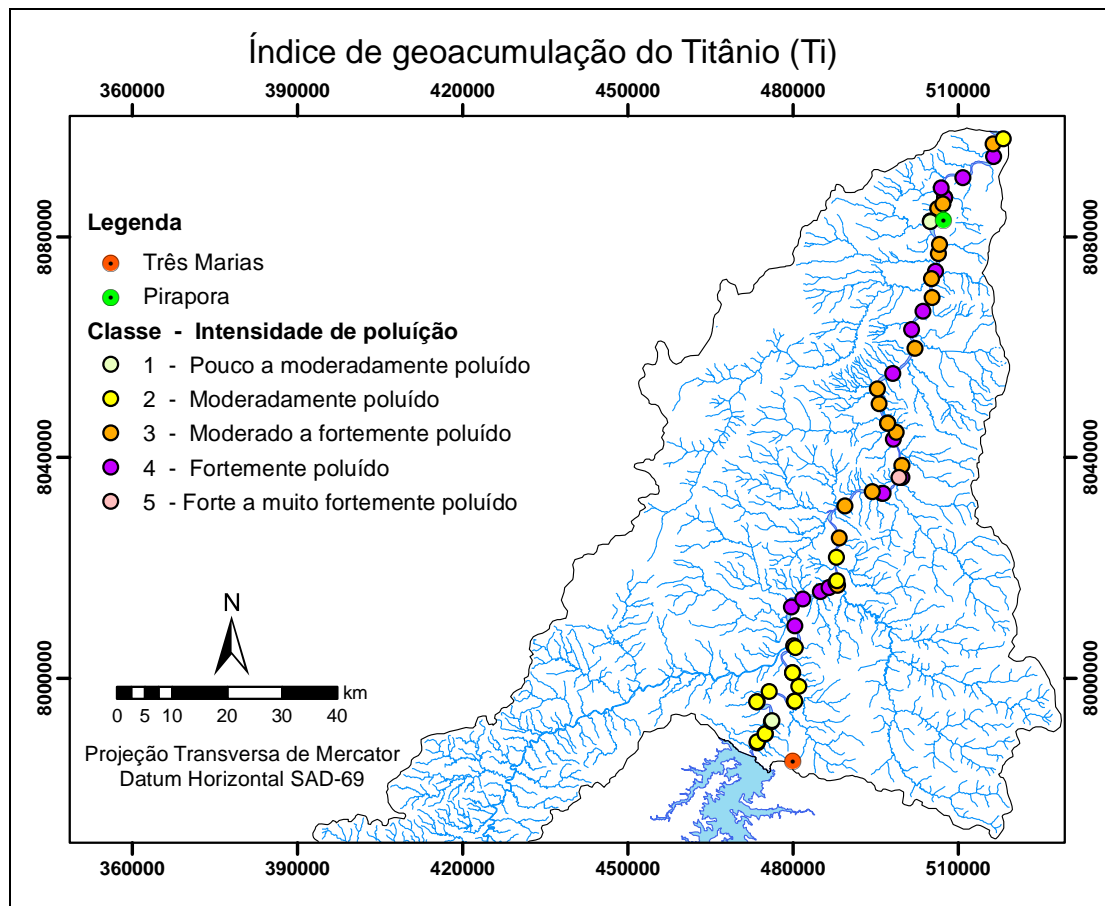


Figura 40 - Variação do índice de geoacumulação para titânio. O *Igeo* do Ti apresenta-se bastante heterogêneo (típico dos elementos de origem antrópica); entretanto, as maiores concentrações estão relacionadas ao aporte dos sedimentos do Grupo Mata da Corda.

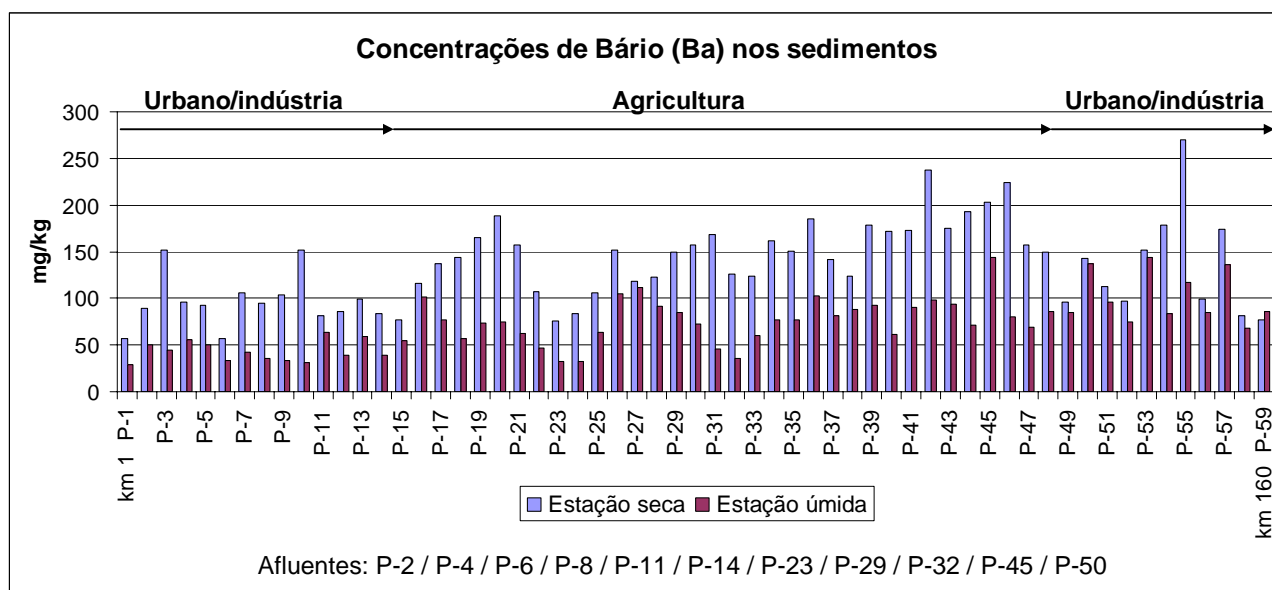
6.8 Bário (Ba)

O bário (Ba) não apresenta função biológica conhecida. Seus compostos insolúveis não são perigosos à saúde, sendo, por isso, utilizados pela medicina para contraste aos raios-X. No entanto, os compostos solúveis em água podem causar efeitos danosos à saúde humana (Winter 1998, Koljonen *et al.* 1992). A principal fonte mineral de bário é a barita ($BaSO_4$) e a witherita (Branco 1982). Em rochas sedimentares, as concentrações de Ba estão relacionadas à abundância dos feldspatos potássicos de Fe e Mn, que podem adsorver esse elemento. Nos sedimentos de drenagem, as micas e a barita são os principais portadores de Ba (Wedepohl 1978). Litologicamente, os argilitos marinhos, granitos não feldspáticos e folhelhos apresentam as maiores concentrações de Ba (Maia 2003).

Como já citado, as litologias arcoseanas, como as encontradas na área de estudo, concentram quantidades significativas de bário. Dessa forma, em contraposição aos elementos que apresentam teores condicionados pelas atividades antrópicas, as concentrações de bário nos sedimentos do Rio São Francisco são bastante uniformes – tanto na estação seca como na estação úmida, ao longo de todo perfil de amostragem. As variações pontuais, basicamente, são representadas pelos afluentes

cujos sedimentos ali coletados demonstram um empobrecimento do elemento, quando comparados com os do Rio São Francisco.

Gráfico 12 – Resultado da análise química para bário nas estações seca e úmida



Dentre os principais aspectos observados na distribuição espacial do Ba em sedimentos (Gráfico 12), concentrações acima de 180mg/kg são descritas entre os pontos 36 e 46, onde a agricultura é mais intensa, como também no ponto 55 (jusante do efluente industrial), onde a concentração fica acima de 250mg/kg. Tal fato pode estar associado à precipitação de particulados atmosféricos das indústrias de beneficiamento de Fe-Si, localizadas à montante da estação de amostragem, uma vez que tais indústrias utilizam a barita como matéria prima na produção de algumas ligas metálicas.

O índice de geoacumulação do Ba (Figura 41) demonstra comportamento análogo ao dos outros elementos, com forte influência litológica e, sobretudo, pouca variação na intensidade da poluição e poucas classes de enriquecimento. Entretanto, cabe chamar atenção para a classe 3, cuja maioria dos pontos estão localizados no segmento do rio onde as atividades agrícolas são mais intensas. Dos 59 pontos amostrados, 38 foram classificados como moderadamente poluídos por bário (classe 2)

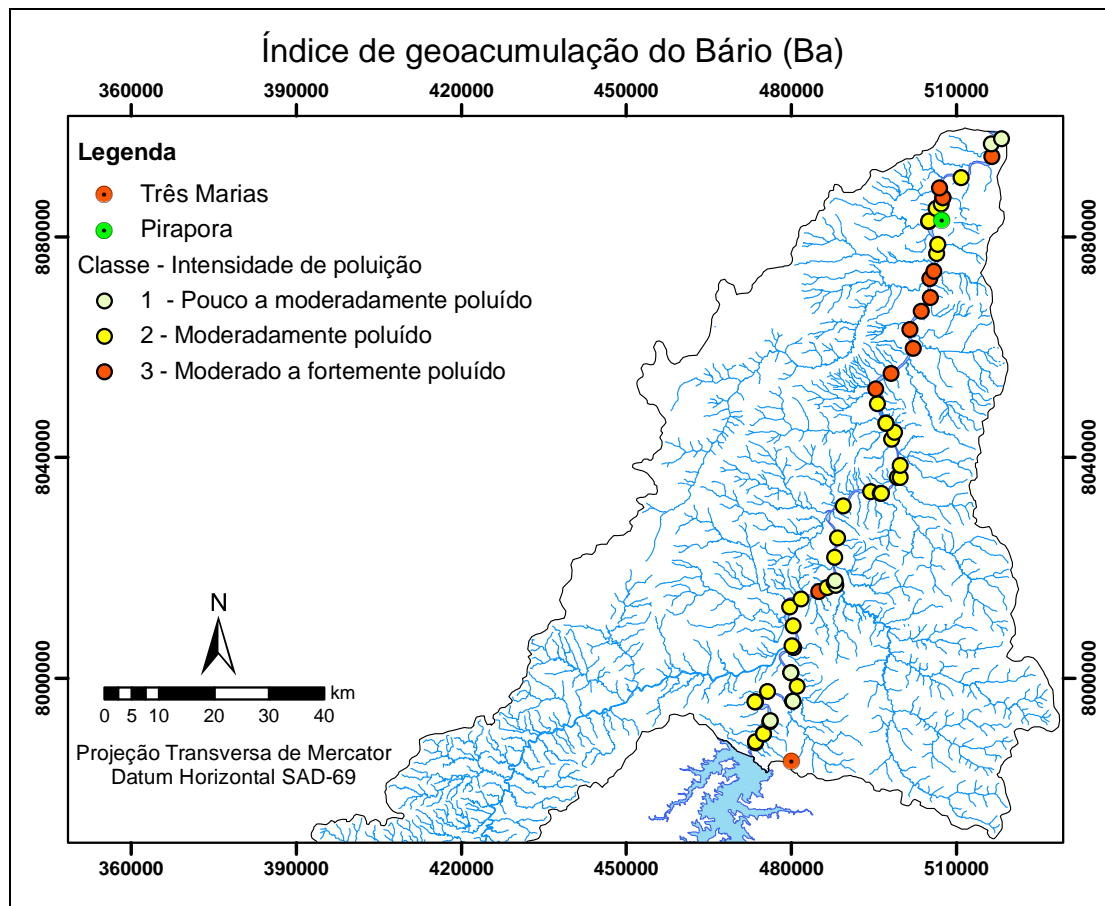


Figura 41 – Variação do índice de geoacumulação para bário. De maneira análoga aos elementos de origem litogênica, o bário também demonstra uma homogeneidade na sua distribuição espacial. A principal variação para o elemento está na área onde a agricultura é mais intensa.

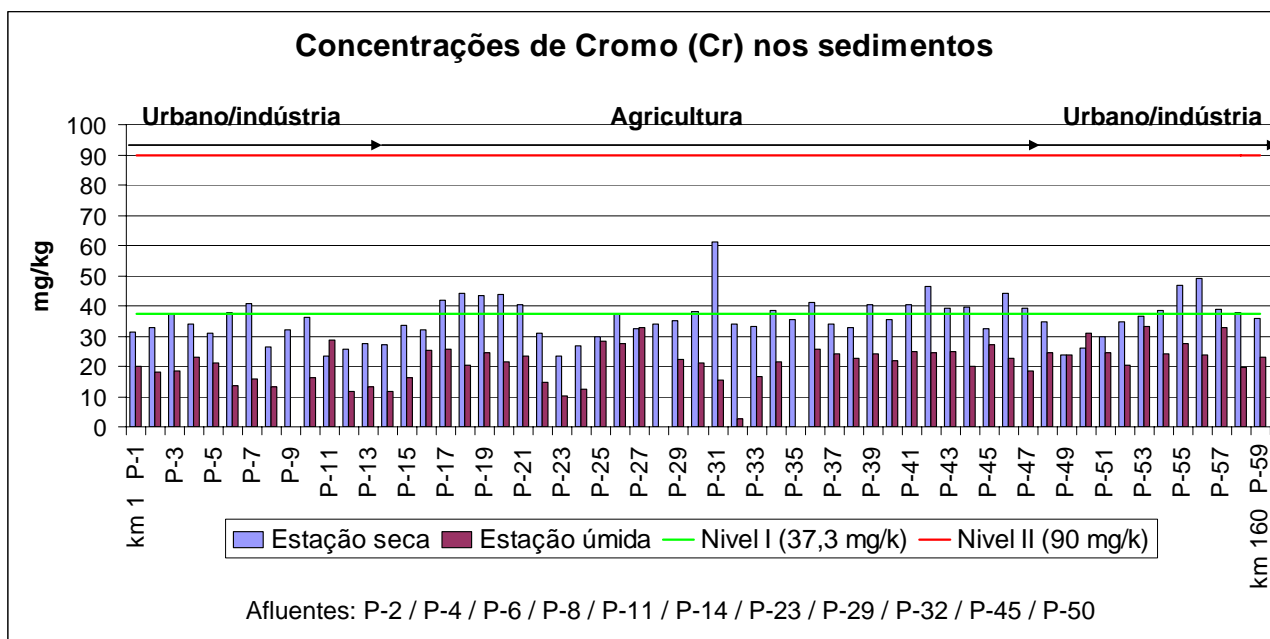
6.9 Cromo (Cr)

O cromo (Cr) é considerado um elemento traço essencial para o ser humano. Entretanto, se encontrado em altas concentrações, também pode ser tóxico aos indivíduos. A intoxicação geralmente conduz à corrosão do aparelho digestivo, diarreia, náusea, efeitos cutâneos, danos aos rins, fígado e pulmão, hemorragias internas e desenvolvimento de carcinomas. Para Silva *et al.* (2006), a principal função biológica do cromo é sua relação com o metabolismo dos açúcares.

Encontrado naturalmente nas rochas e solos, o principal mineral de ocorrência é a cromita (FeCr_2O_4), comum em rochas ultramáficas. Para Maia (2003), as principais fontes de contaminação de cromo estão nos rejeitos industriais e urbanos: fabricação de tinta, corante e explosivos, como também produção de cerâmica e papel.

A quantificação dos teores de cromo nos sedimentos do rio indica que 24 pontos apresentam concentrações acima do nível I da CONAMA nº 344/04 (37,3mg/kg) na estação seca. A violação do nível I indica que tais concentrações produzem incertezas quanto aos efeitos nocivos à biota.

Gráfico 13 – Resultado da análise química para cromo nas estações seca e úmida



De forma geral, as concentrações de cromo (Cr) encontradas ao longo do perfil de amostragem não apresentam grandes variações, com algumas exceções pontuais: na estação seca a amplitude entre os valores mínimos e o nível I é da ordem de 14mg/kg, fato que pode indicar concentrações naturais de cromo nos litotipos da área estudada. Em trabalhos realizados na Bacia do Formoso, que apresenta os mesmos litotipos descritos para o segmento do rio em estudo, Trindade (2007) e Baggio (2008) encontraram concentrações máximas de 89mg/kg de cromo em argilitos da Formação Três Marias e concentrações mínimas de 11mg/kg nos arenitos do Grupo Mata Corda. No entanto, as concentrações mais elevadas, encontradas no ponto 17 (41,83mg/kg), ponto 20 (43,73mg/kg), ponto 21 (40,23mg/kg), ponto 31 (61mg/kg), ponto 36 (41,08mg/kg), ponto 41 (40,30mg/kg), ponto 42 (46,41mg/kg) e ponto 46 (44,28mg/kg) podem estar associadas à presença de pastagens. Outro fator a se considerar sobre a influência do uso e ocupação dos solos na quantificação de cromo nos sedimentos diz respeito às concentrações encontradas na área da fruticultura, pontos 55 e 56, que apresentam valores bem próximos aos descritos nas áreas de pastagens – 46, 78mg/kg e 48,98mg/kg, respectivamente.

Em virtude da possível contribuição natural que os argilitos e arenitos da Formação Três Marias exercem nas concentrações de cromo nos sedimentos, o índice de geoacumulação apresenta-se bastante homogêneo para todo o perfil de amostragem, apresentando apenas um ponto na classe 5, 11 pontos na classe 3 e 47 pontos na classe 4 (Figura 42).

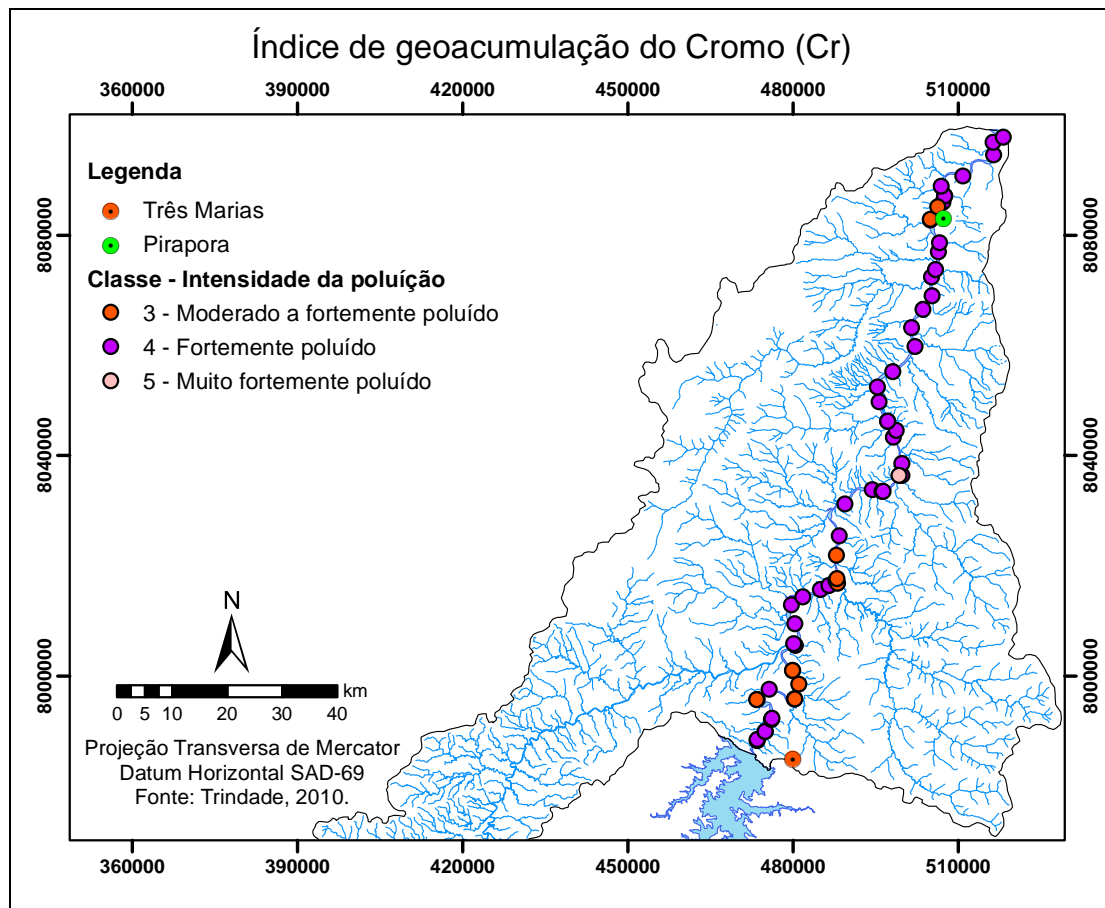


Figura 42 – Variação do índice de geoacumulação para cromo. O cromo apresenta comportamento similar ao dos elementos litogênicos, com a grande maioria dos pontos classificados como fortemente poluídos.

Dos pontos analisados, apenas o ponto 31, referente à área de pastagem no médio curso do segmento, apresenta-se fortemente poluído (classe 5). Os 11 pontos descritos como classe 3 (moderado a fortemente poluídos) referem-se ao Córrego Lucinda (P-8), Córrego do Espírito Santo (P-11), Córrego São José (P-14), Rio de Janeiro (P-23) e Córrego das Pedras (P-50), e suas respectivas áreas de influência. Assim sendo, através da avaliação do índice de geoacumulação pode-se classificar o Rio São Francisco no segmento analisado como fortemente poluído por cromo.

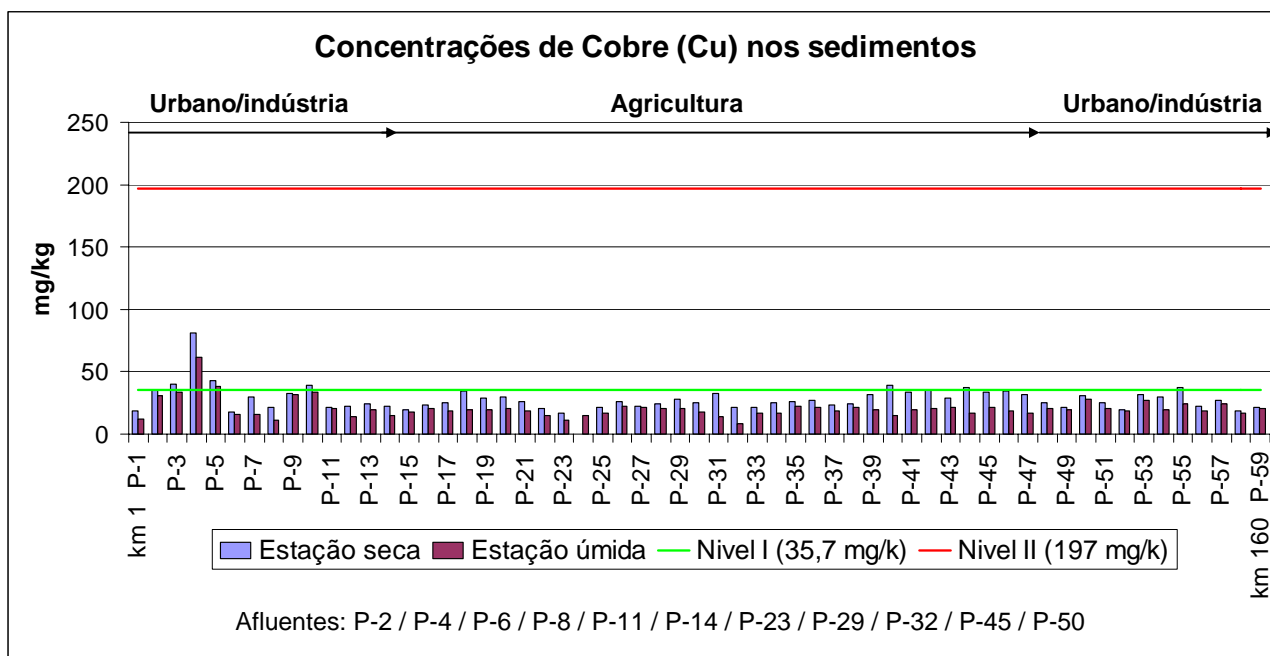
6.10 Cobre (Cu)

O cobre (Cu) é considerado um micronutriente essencial para todos os organismos, por atuar no metabolismo energético, ser constituinte de enzimas oxidantes, atuar na síntese da hemoglobina, nas funções neurocerebrais e na queratinização e pigmentação da pele e do cabelo. A deficiência de cobre no organismo leva ao surgimento da osteoporose, deficiência de glóbulos brancos e à redução da defesa imunológica (Cortecci 2002). Quando encontrado em concentrações elevadas, esse elemento pode ser letal aos animais. Em seres humanos, os teores no sangue são de 1,01mg/dm³, nos ossos de 1 a 26mg/kg, no fígado de 30mg/kg e nos músculos de 10mg/kg. Em uma pessoa de 70 kg a quantidade de Cu não deve ser maior que 72mg (Winter 1998).

Nos minerais, o cobre é encontrado principalmente na calcocita (Cu_2S), bornita (Cu_5FeS_4) calcopirita (CuFeS_2) e cuprita (Cu_2O). Nas rochas, as maiores concentrações estão nos argilitos marinhos, folhelhos, cabornatos e granitos feldspáticos. As fontes antrópicas de cobre geralmente estão associadas ao uso de fertilizantes, pesticidas, algicidas, indústrias de tintas e ligas metálicas (Maia 2003).

Para sedimentos, a CONAMA n° 344/04 define como nível I (limiar abaixo do qual não se observa efeito adverso à biota) a concentração de 35,7mg/kg, e para o nível II (valor acima do qual provavelmente se observa efeito adverso à biota), a concentração de 197mg/kg. Dos pontos analisados, nenhum apresentou valores acima do nível II; no entanto, oito pontos distribuídos no perfil de amostragem apresentaram-se acima do nível I (Gráfico 14).

Gráfico 14 – Resultado da análise química para cobre nas estações seca e úmida



Sazonalmente, as mais altas concentrações de cobre são encontradas na estação seca, nos pontos 2, 3, 4 e 5. O ponto 2, com 35,57mg/kg, refere-se ao Córrego Barreiro Grande, que recebe os esgotos da cidade de Três Marias. O ponto 3, com 40,57mg/kg, localiza-se à montante do Córrego Consciência. O ponto 4, que apresenta a maior concentração de cobre (81,41mg/kg), refere-se ao Córrego Consciência, que historicamente recebeu os rejeitos do beneficiamento de zinco da Votorantim Metais Zinco S/A. Ainda no alto curso do segmento, os pontos 5 (entre o Córrego Consciência e Aldeia dos Dourados) e 10 (a montante do córrego Espírito Santo) apresentam, respectivamente, concentrações de 42,74mg/kg e 39,46mg/kg. Os demais pontos que apresentaram concentrações acima do nível I são os pontos 40 (Ilha dos Prazeres), com 39,35mg/kg, P-44 (a montante do Rio do Formoso), com 37,72mg/kg, e P-55 (montante do efluente industrial em Pirapora), com 36,90mg/kg.

O índice geoacumulação (Figura 43) indica que, de uma forma geral, os sedimentos amostrados no Rio São Francisco estão moderadamente poluídos por cobre (classe 2). Para o ponto 4 (Córrego Consciência), as altas concentrações encontradas indicam que os sedimentos estão moderadamente a fortemente poluídos por cobre (classe 3 do *Igeo*).

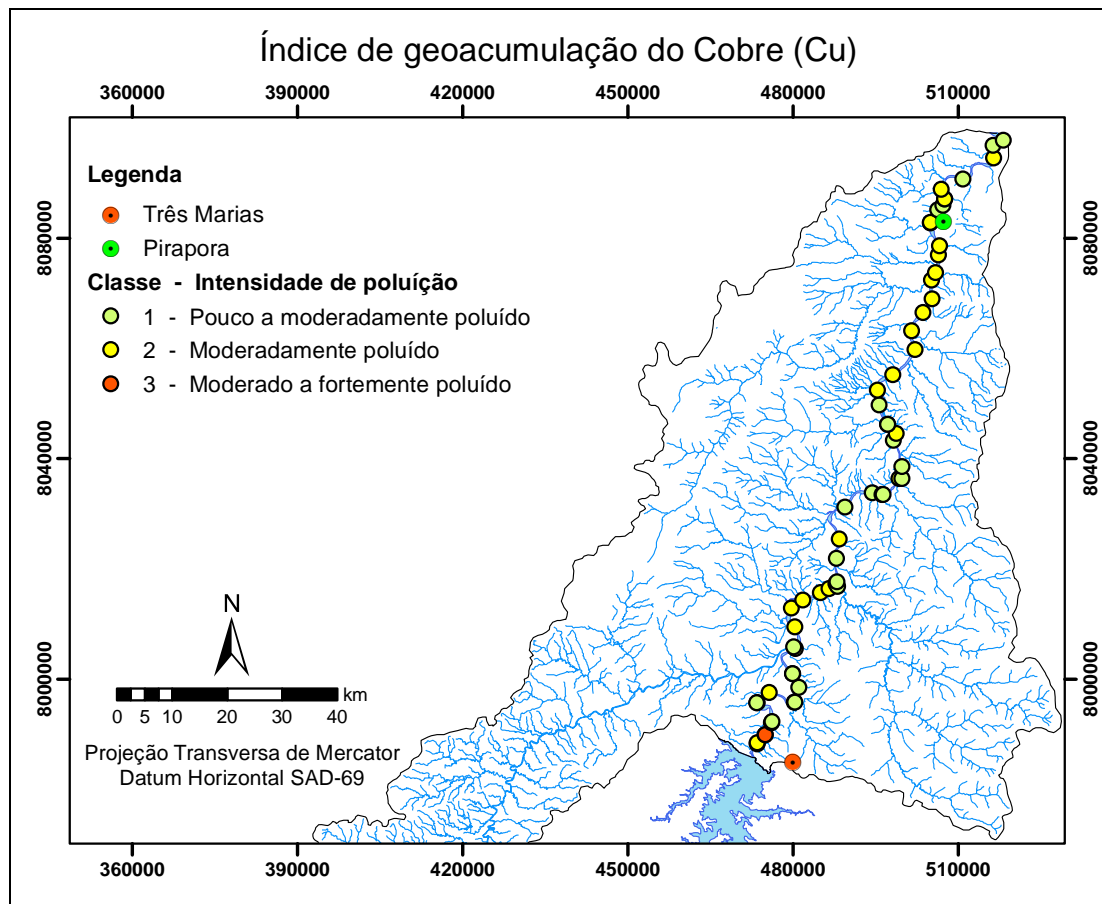


Figura 43 – Variação do índice de geoacumulação para cobre. As maiores concentrações, referentes à classe 3 (moderado a fortemente poluído), estão localizadas na área de influência da usina de Zn e Pb, em virtude da afinidade geoquímica do Cu com estes elementos.

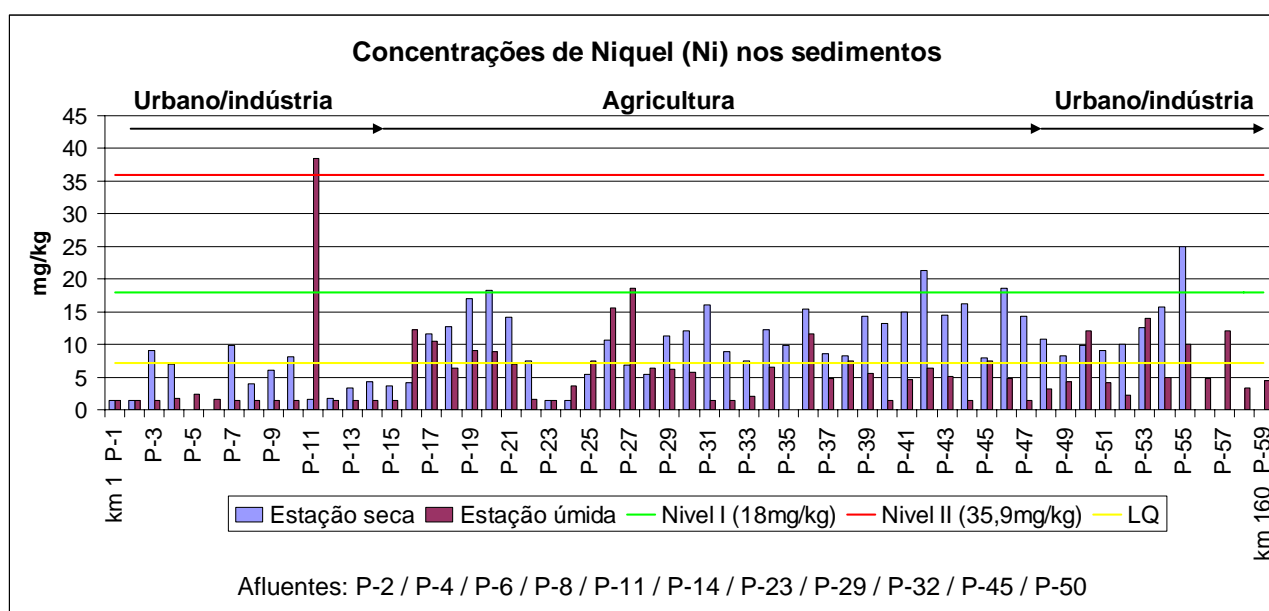
6.11 Níquel (Ni)

O níquel é considerado um micronutriente essencial para a vida de diversas espécies. Bastante utilizado na agricultura, em particular nas monoculturas de soja, o elemento pode aumentar a atividade da uréase foliar, impedindo a acumulação de quantidades tóxicas de ureia. Quando encontrado na natureza em estado puro, o níquel é um metal prateado que admite um elevado grau de polimento; no entanto, é considerado um mau condutor de calor e eletricidade (Koljonen *et al.* 1992). Os principais minerais para a obtenção do níquel são pentlandita, polidimita (Ni_3S_4), heazlewoodita (Ni_3S_2), nicolita (NiAs), cloantita [$(\text{Ni},\text{Co})\text{As}_3$], gersdorfita, bravoíta [$(\text{Ni},\text{Fe})\text{S}_2$], millerita (NiS), rammelsberguita (NiAs_2), revdanskita (silicato de níquel do grupo das serpentinatas), nontronita (aluminossilicato básico hidratado de Fe), pirrotita e garnierita (Branco

1982). Nos sedimentos de drenagem, grande quantidade de Ni^{2+} são encontradas nos silicatos e óxidos detríticos, e sua solubilidade associa-se a condições de pH baixo (Ure & Berrow 1982 *apud* BGS 1991).

Dentre os elementos analisados, o níquel foi o que apresentou maior variação sazonal, com alternâncias nas concentrações mais elevadas ora na estação seca, ora na estação úmida – fato não verificado em nenhum dos outros elementos analisados (Gráfico 15). Além da variação das maiores concentrações, observou-se também uma ampla variação nas menores concentrações; sendo que, na estação seca, 22 pontos ao longo do perfil de amostragem estão abaixo do limite de quantificação (LQ), e na estação úmida o número de pontos abaixo do limite de quantificação aumenta para 47, também distribuídos ao longo do perfil de amostragem.

Gráfico 15 – Resultado da análise química para níquel nas estações seca e úmida



Apesar da maior quantidade de pontos, na estação seca, apresentarem-se acima do limite de quantificação, é na úmida que se tem as maiores concentrações. O ponto 11 (Córrego Espírito Santo), com concentração de 38,41mg/kg, violou o nível II da CONAMA nº 344/04 (35,9mg/kg). A principal alteração antrópica observada na área de influência do Córrego do Espírito Santo é a construção da nova barragem de rejeito de da Votorantim Metais Zinco S/A, fato que chama atenção em virtude da adsorção competitiva do Ni com o Zn, uma vez que a presença do zinco em altas concentrações pode inibir a adsorção do Ni nos sedimentos (Moreira 2004). Isso explica as baixas concentrações encontradas nos pontos 4 (Córrego Consciência) e 5 (jusante do Córrego Consciência), onde foram detectados altos valores de Zn nos sedimentos.

Na estação seca, os pontos 20, 42, 46 e 55 violaram o nível I da CONAMA nº 344/04 (18mg/kg). No entanto, cabe destacar a elevação dos teores de Ni no intervalo do ponto 39 ao 47, onde as atividades agrícolas são mais intensas.

De maneira geral, o índice de geoacumulação do Ni nos sedimentos do Rio São Francisco indica que, em virtude de 21 pontos estarem na classe 2, o segmento encontra-se moderadamente poluído por Ni. A maior discrepância na distribuição espacial do *Igeo* está no ponto 11 (Córrego do Espírito Santo), que foi classificado como muito fortemente poluído (classe 6), possivelmente em decorrência da implantação da barragem de rejeito citada anteriormente.

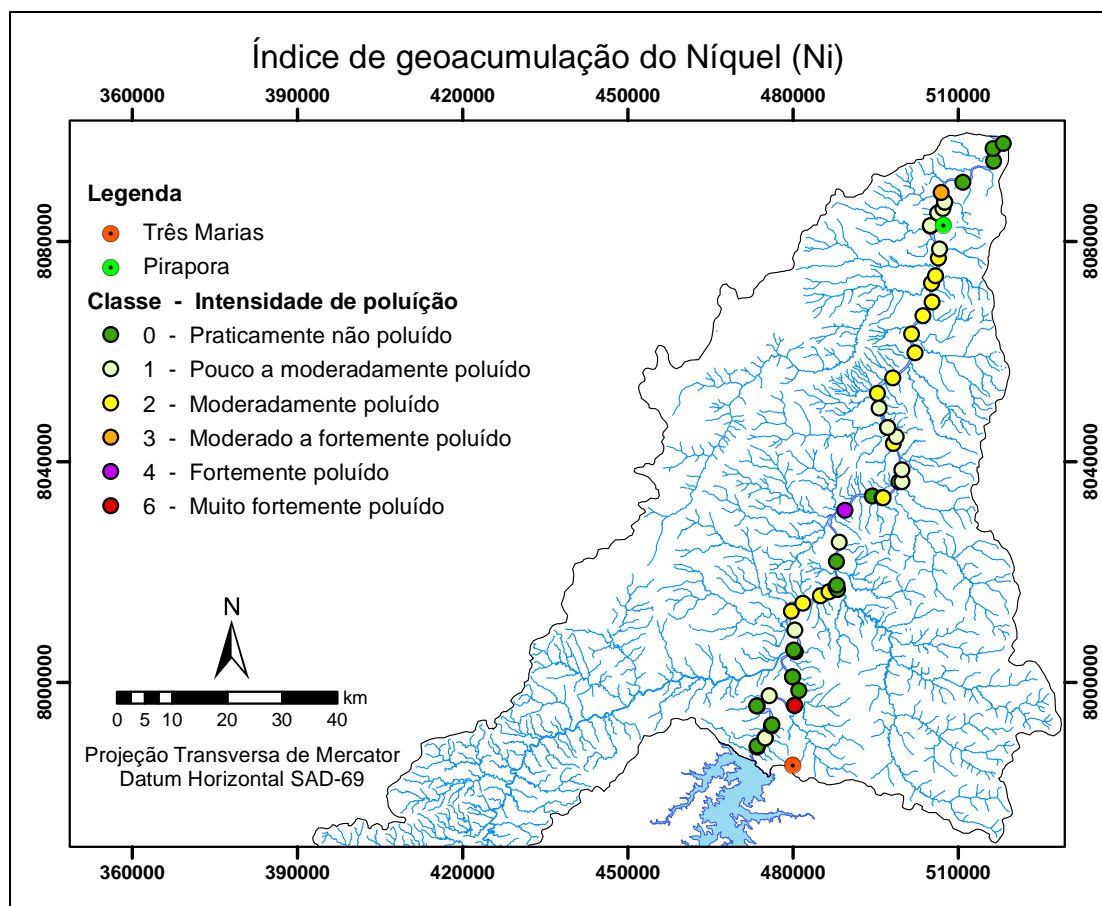


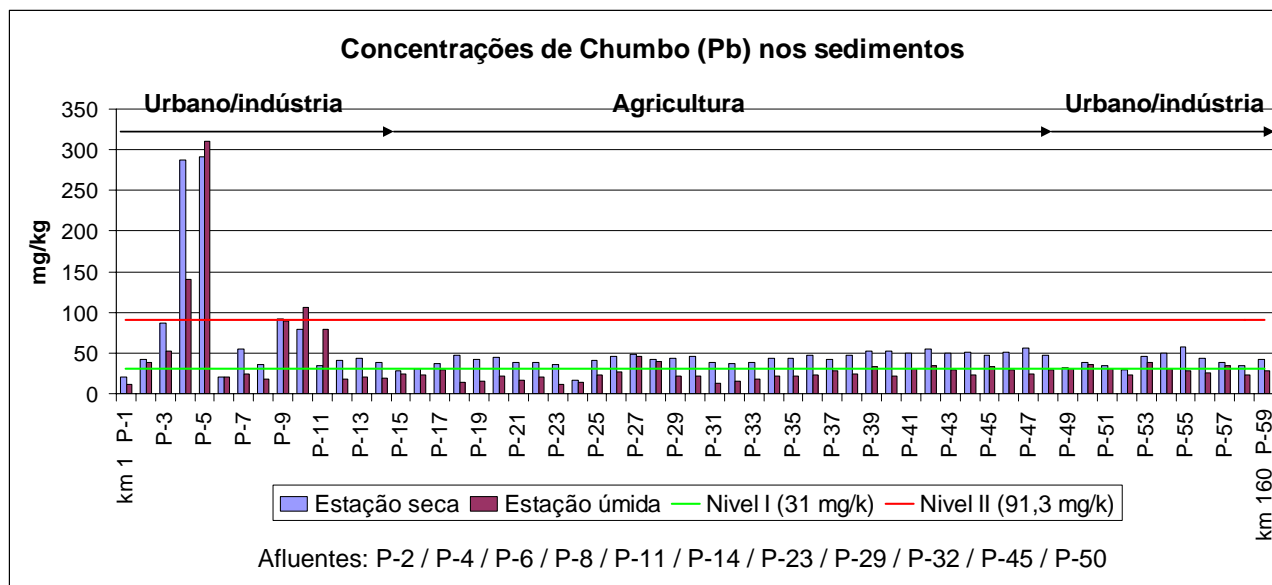
Figura 44 – Variação do índice de geoacumulação para níquel. Verifica-se que, no ponto 11, os sedimentos estão amplamente enriquecidos por Ni, em detrimentos dos demais pontos.

6.12 Chumbo (Pb)

O chumbo (Pb) não é considerado um elemento essencial na nutrição, e sua concentração na natureza é muito baixa. Ainda assim, sua presença no meio ambiente configura-se um risco a todos os organismos terrestres. Os animais absorvem chumbo por ingestão e inalação, cujos efeitos adversos são os mesmos; a partir de então o elemento se acumula nos tecidos ricos em cálcio, fígado e rins (Koljonen *et al.* 1992). Nos seres humanos, o Pb pode afetar quase todos os órgãos internos e sistemas, sendo que o mais sensível é o sistema nervoso central. Apesar de ser considerada bastante, a maior parte do chumbo ingerido passa pelo organismo sem ser absorvida; entretanto, o efeito cumulativo do elemento o torna carcinogênico e teratogênico (Winter 1998).

Na natureza, o chumbo é extraído principalmente da galena e, secundariamente, da cerussita ($PbCO_3$), anglesita ($PbSO_4$), boulangerita (Pb_4SbS_{11}), bournonita, piromorfita, jamesonita e wulffenia ($PbMoO_4$) (Branco 1982). Em rochas sedimentares como as encontradas na área de estudo, a distribuição do Pb é controlada pela presença de minerais detríticos (tais como o feldspato, micas e sulfetos) e argilominerais (BGS 1991). Em sedimentos de drenagem, as principais fases são os feldspatos potássicos, as micas, os plagioclásios e os silicatos ferromagnesianos.

Gráfico 16 – Resultado da análise química para chumbo nas estações seca e úmida



Na área de estudo, as maiores concentrações de chumbo têm uma forte condicionante antrópica, em particular na área de influência urbana/industrial em Três Marias (Gráfico 16). No entanto, é notória uma ampla distribuição desse elemento ao longo de todo o perfil de amostragem. Segundo a CONAMA nº 344/04, os níveis I e II para chumbo nos sedimentos são, respectivamente, 31 mg/kg e 91,3 mg/kg.

Os pontos 4 (Córrego Consciência – 287,67mg/kg), e 5 (jusante do Córrego Consciência – 290,65mg/kg) e 9 (leito do Rio São Francisco – 91,43mg/kg) apresentaram concentrações acima do nível II, tanto na estação seca como na úmida, demonstrado a efetiva contribuição da indústria de beneficiamento de Zn e Pb na composição química dos sedimentos localizados no seu entorno. No entanto, o aspecto que mais chama atenção na distribuição espacial do chumbo no perfil de amostragem são os 50 pontos que estão acima do nível I (31mg/kg), uma vez que tal comportamento, como verificado ao longo do trabalho, associa-se aos elementos com condicionante litogênica.

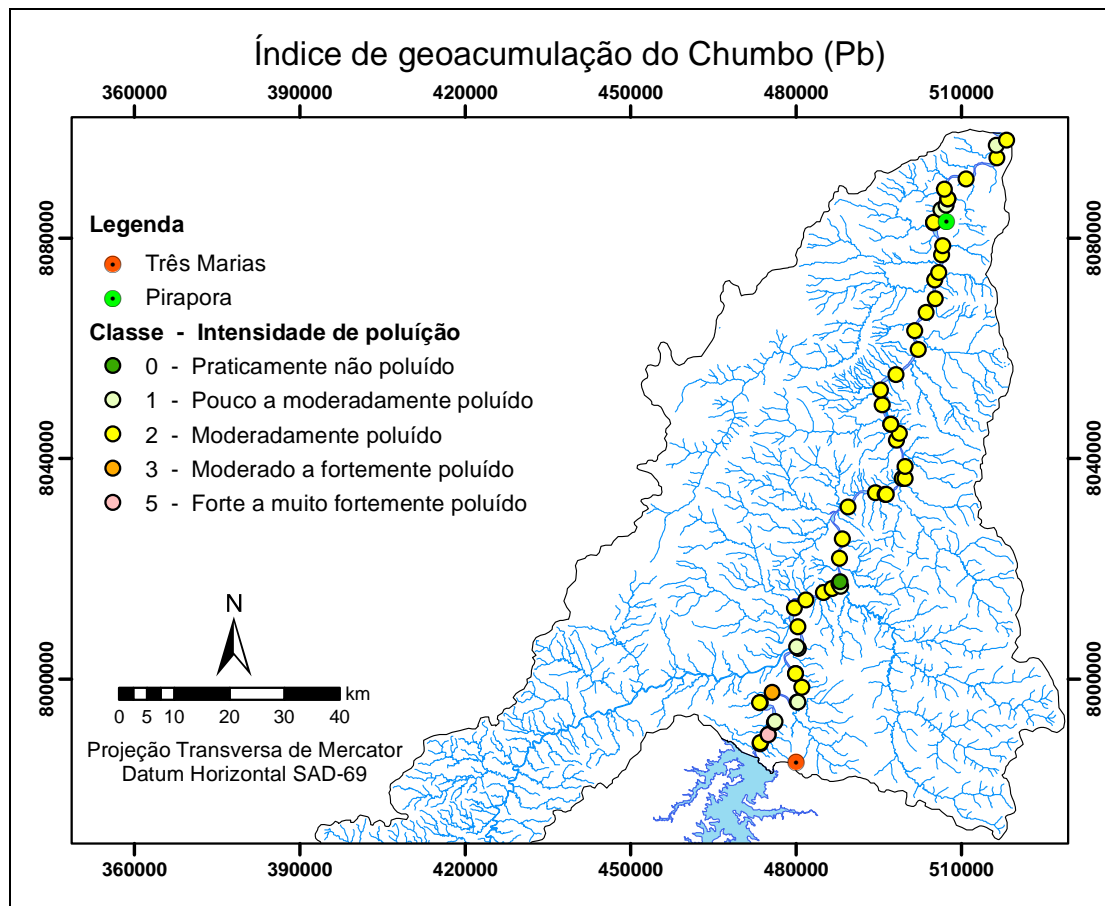


Figura 45 – Variação do índice de geoacumulação chumbo. Os sedimentos mais enriquecidos por chumbo estão na área da usina em Três Marias; entretanto, ao longo de todo o perfil, tem-se a presença do elemento em concentrações geralmente acima do nível I da CONAMA n° 344/04.

Na geração do índice de geoacumulação para chumbo (Figura 45), verificou-se que, apesar das altas concentrações na área de influência industrial em Três Marias, a amplitude das classes de enriquecimento foi minimizada pelo comportamento similar ao dos elementos de origem litogênica apresentado pelo chumbo ao longo do perfil de amostragem. Dessa forma, apenas os pontos 4 e 5 foram classificados como forte a muito fortemente poluídos (classe 5). Também em virtude do comportamento apresentado, 43 pontos foram classificados como moderadamente poluídos por chumbo (classe 2). No entanto, apesar das particularidades do *Igeo* e das concentrações descritas no Gráfico 18 indicarem um comportamento litogênico para Pb, a atribuição do elemento aos aspectos geológicos merece maiores investigações, uma vez que em estudos realizados nos litotipos da Formação Três Marias, Grupo Areado e Mata da Corda, na Bacia do Rio do Formoso, por Baggio (2008), não foram verificadas concentrações elevadas de chumbo.

6.13 Cádmio (Cd)

O cádmio é um metal não essencial branco-azulado e muito mole, bastante similar ao Zinco, metal com o qual apresenta alta afinidade geoquímica. Em quantidades reduzidas, o cádmio pode ser um importante estimulante do metabolismo. No entanto, por sua toxicidade, deve ser

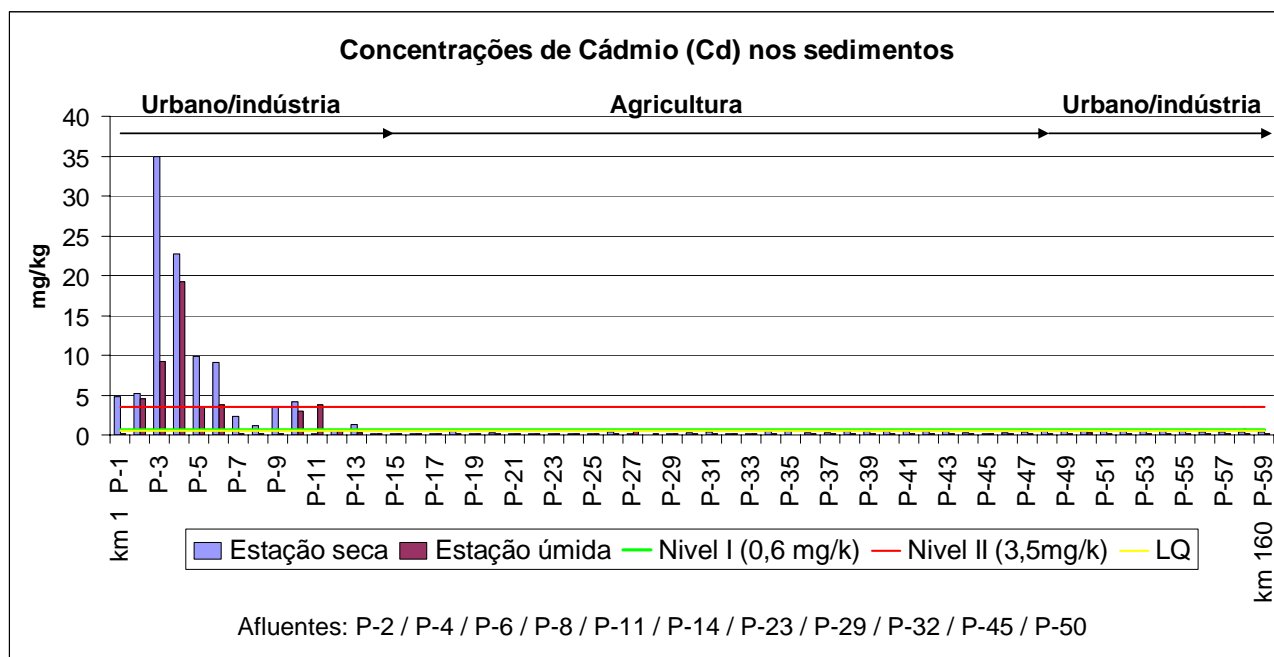
considerado bastante nocivo aos indivíduos. Os compostos de cádmio podem entrar na corrente sanguínea ao serem absorvidos pelo estômago ou intestino por ingestão de água e alimentos, ou absorvidos pelos pulmões.

Na natureza, o cádmio geralmente ocorre associado aos minérios de zinco, como a esfalerita (ZnS); sendo que a greenockita (CdS) é um dos poucos minerais conhecidos por conter cádmio (Winter 1998). As principais fontes antrópicas de cádmio são as baterias, pigmentos de tintas e atividades de mineração de Zn e Pb, como ocorre em mineradoras de Zn e Pb na Formação Vazante (Baird 1999).

Dos 59 pontos analisados, 31 localizam-se no médio e baixo curso, ficando abaixo do limite de quantificação – ou seja, apresentaram concentrações abaixo de 0,47mg/kg (Gráfico 12). Já a quantificação de cádmio na área de influência da Votorantim Metais Zinco S/A apresenta concentrações que estão acima do nível II da CONAMA n° 344/04 (3,5mg/kg), valor acima do qual provavelmente se observa efeito adverso à biota. As altas concentrações verificadas nessa área, inequivocamente, estão relacionadas ao aporte histórico dos rejeitos do beneficiamento dos minérios de Zn e Pb que são lavrados nas unidades da Votorantim Metais Morro Agudo e Vazante, geologicamente localizadas nos domínios do Grupo Vazante e, também, possivelmente relacionadas ao lançamento de esgotos domésticos a montante.

Os pontos que apresentam os maiores teores de cádmio no alto curso do segmento são, pela ordem, o P-3 (confluência do Córrego Consciência com Rio São Francisco), com 34,89mg/kg; P-4 (Córrego Consciência – antigo lançamento de rejeito da Votorantim Metais), com 22,75mg/kg; P-5 (jusante do Córrego Consciência), com 9,8mg/kg; P-6 (Córrego Aldeia dos Dourados), com 9,07mg/kg; P-2 (Córrego Barreiro Grande), com 5,17mg/kg; P-1 (jusante do barramento), com 4,8mg/kg; P-10 (montante do Espírito Santo), com 4,18mg/kg e P-9 (leito do Rio São Francisco), com 3,51mg/kg.

Gráfico 17 – Resultado da análise química para cádmio nas estações seca e úmida



Além dos pontos que mostraram concentrações acima do nível II, foi observado que oito amostras de sedimentos violaram o nível I, cuja concentração limite é 0,6mg/kg. Dentre essas amostras, o P-7 e P-8 ainda estão na área de influência da usina de beneficiamento de Zn; já os pontos 12,13 e 18 se localizam próximos a áreas de pastagens e, finalmente, os pontos 51, 52, 53 e 54 (efluente industrial) estão na área urbana em Pirapora.

Na geração do índice de geoacumulação do cádmio (Figura 46), a diversificação das classes de enriquecimento chama atenção, já que o metal apresenta desde a classe 0 até a classe 6 – fato não verificado nos metais que possivelmente estão associado ao *background* natural.

A distribuição espacial do *Igeo* no perfil de amostragem demonstra que, de uma forma geral, os sedimentos do Rio São Francisco podem ser classificados como praticamente não poluídos por Cd (classe 0); sendo que os sedimentos amostrados na área de influência da Votorantim apresentam-se muito fortemente poluídos por cádmio (classe 6).

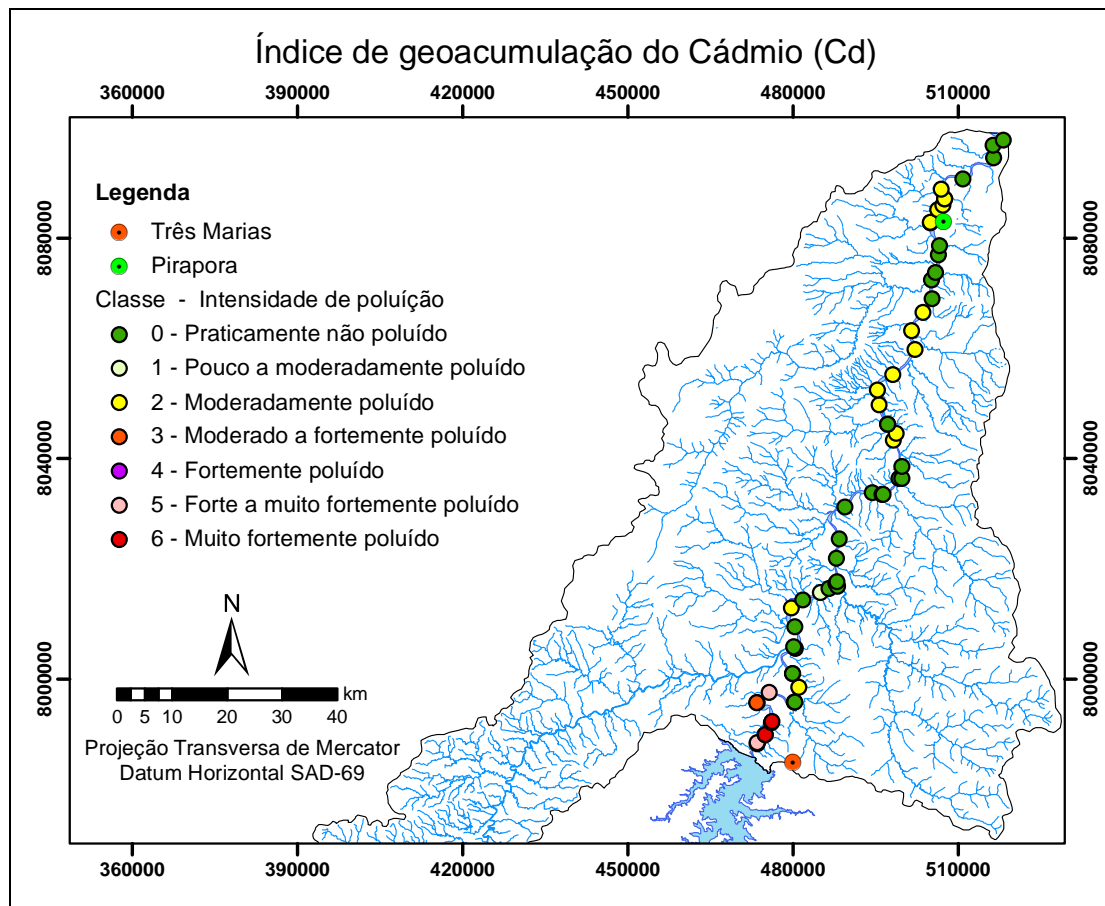


Figura 46 – Variação do índice de geoacumulação para cádmio. O *Igeo* aponta claramente a influência da Votorantim Metais Zinco S/A no enriquecimento dos sedimentos – à montante da área de influência da usina, grande quantidade de pontos está abaixo do LQ.

6.14 Zinco (Zn)

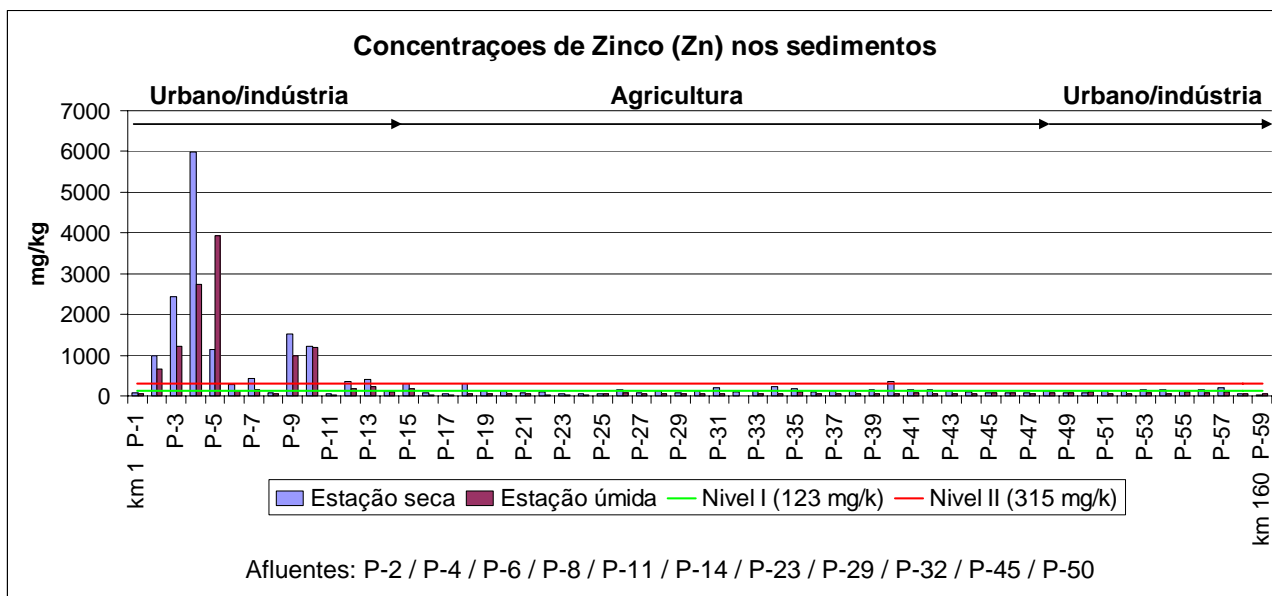
O zinco é considerado um elemento traço essencial em todos os sistemas vivos, desempenhando um papel importante nas atividades enzimáticas, metabolismo dos ácidos nucleicos, síntese de proteínas, manutenção da estrutura e função das membranas, atividade hormonal, reprodução e maturidade sexual (Koljonen *et al.* 1992). No corpo humano, o elemento é encontrado em todos os tecidos e fluidos; no entanto, quando ingerido em grandes doses em um período curto, pode causar convulsões estomacais, vômitos e náusea. Se ingerido por longo período de tempo pode causar anemia e decréscimo do nível de colesterol. A inalação de grandes quantidades de Zn pode causar uma doença chamada febre da poeira metálica, bem como câncer de pulmão (Winter 1998).

Na natureza, o zinco tem como principais minerais a esfalerita (ZnS), smithsonita (ZnCO₃), hemimorfita (silicato básico hidratado de Zn) e franklinita (espinélio de Zn e Fe – ZnFe₂O₄). Em rochas sedimentares, sua distribuição é, em princípio, controlada pela abundância de silicatos ferromagnesianos, magnetita e argilominerais (Wedepohl 1978). Dentre as unidades litológicas, os argilitos marinhos, folhelhos e filitos são os que apresentam maiores concentrações de Zn. As

principais fontes antrópicas estão relacionadas com indústrias metalúrgicas, elétricas, galvanizadoras, mineradoras e práticas agrícolas (Maia 2003).

Nos sedimentos amostrados, os teores de zinco são mais elevados na estação seca (Gráfico 18), sendo notórias as anomalias desse elemento na área industrial referente à usina de beneficiamento de Zn em Três Marias. Em termos legais, a CONAMA n° 344/04 define como nível I (limiar abaixo do qual não se observa alterações na biota) a concentração de 123mg/kg, que foi violada em 24 pontos localizados tanto na área industrial como na agrícola. Para o nível II (valor acima do qual se observa alterações na biota), é recomendado que as concentrações de Zn nos sedimentos não ultrapassem 315mg/kg – sendo esta concentração violada nos pontos 2 (987,98 mg/kg), 03 (2.433,79mg/kg), 04 (5.974,15mg/kg), 05 (1.137,72mg/kg), 07 (424,3mg/kg), 09 (1.520,91mg/kg), 10 (1.209,32mg/kg), 12 (346,93mg/kg), 13 (417,55mg/kg) e 40 (365,35mg/kg); predominantemente localizados na área de influência industrial da Votorantim Metais Zinco S/A, que se prolonga do ponto 3 até o ponto 13, descrevendo um perfil contaminado por Zn de 22,45km de extensão. Os pontos 6, 8 e 11, que mesmos localizados na área de influência industrial ainda assim apresentam concentração abaixo do nível II (315mg/kg), referem-se aos córregos Aldeia dos Dourados, Lucinda e Espírito Santo.

Gráfico 18 – Resultado da análise química para zinco nas estações seca e úmida



Como esperado para os elementos que têm alterações pontuais de origem antrópica, o índice de geoacumulação de Zn (Figura 47) apresenta-se de forma bastante heterogênea, variando desde a classe 1 (pouco a moderadamente poluído), na área referente a fruticultura em Pirapora, até os sedimentos classe 5 (forte a muito fortemente poluídos) e classe 6 (muito fortemente poluídos),

localizados na área industrial de Três Marias – como também no ponto 40, onde as atividades agrícolas (café, milho e soja) são mais intensas.

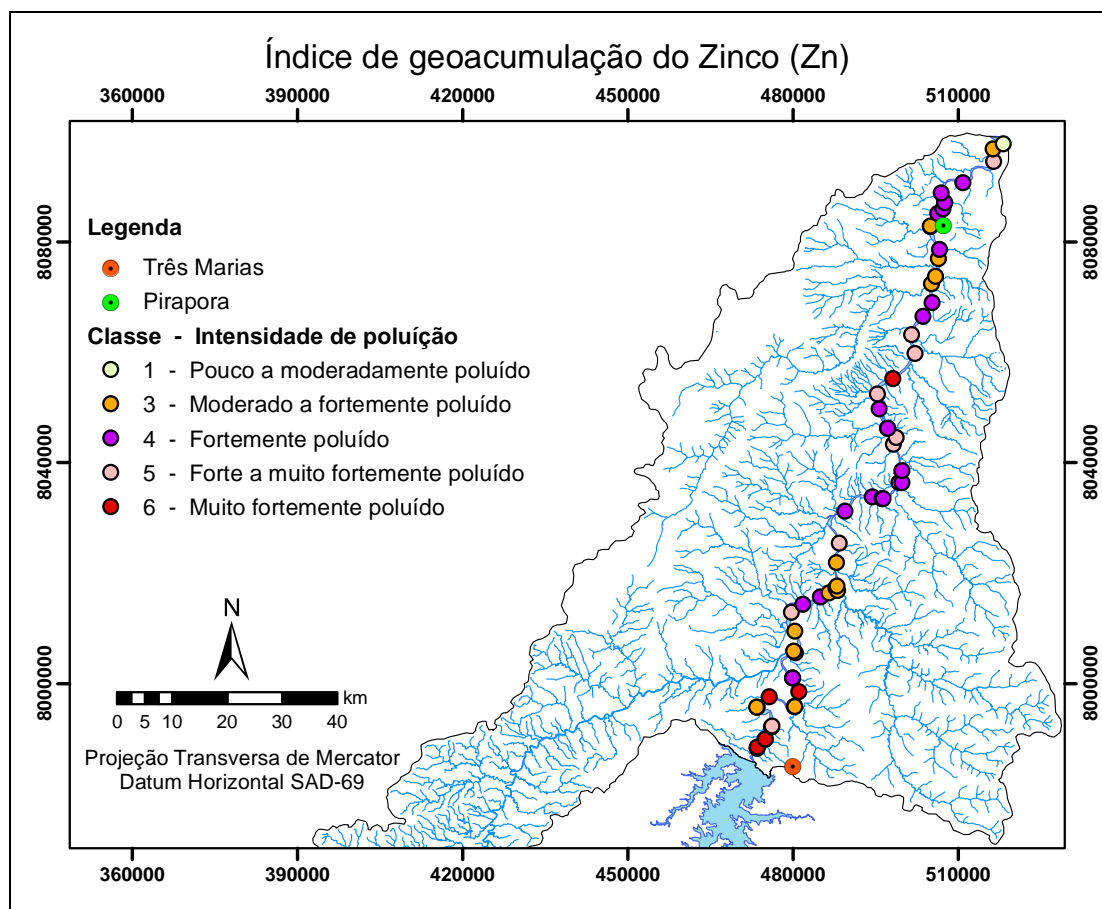


Figura 47 – Variação do índice de geoacumulação para zinco. Distribuição espacial do *Igeo*, indicando que as atividades antrópicas em Três Marias e a agricultura no segmento médio do rio concorrem para o enriquecimento dos sedimentos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os teores de metais pesados encontrados nos sedimentos e a análise dos parâmetros físico-químicos no Rio São Francisco mostram a influência dos aspectos naturais (litogênicos) e antrópicos encontrados ao longo do perfil longitudinal. Os aspectos naturais são caracterizados pela homogeneidade dos valores e ampla distribuição geográfica. Já os antrópicos são marcados pelas fontes pontuais de poluição que apresentam teores de metais anômalos no perfil de amostragem.

A análise granulométrica dos sedimentos permitiu classificar o rio como um ambiente de deposição fluvial tipicamente areno-siltoso, em virtude dos sedimentos coletados apresentarem-se predominantemente (32,20%) na fração $>0,125\text{mm}$. O predomínio desta fração granulométrica como também a composição mineralógica, típica dos arenitos arcoseanos, encontrada no perfil longitudinal do rio indica que a grande maioria dos sedimentos tem como área fonte os litotipos da Formação Três Marias.

Os valores de pH apresentam-se de forma bastante homogênea no Rio São Francisco. As principais variações ocorrem na área urbano/indústria em Três Marias onde se torna ligeiramente ácido (6,4 no córrego Consciência) e na área urbano/indústria em Pirapora onde os valores descritos nas proximidades do efluente industrial (P-54) são os mais básicos (8,72) de todo perfil de amostragem. Claramente estes valores estão relacionadas as alterações antrópicas já descritas, no entanto, cabe ressaltar que os menores valores de pH ocorrem associados as maiores concentrações de Cu, Cd, Zn, e Pb encontrados ao longo do perfil de amostragem.

Dentre os aspectos ocupacionais da área de estudo verificou que a segmentação do perfil de amostragem em áreas de uso urbano/industrial (no alto e baixo curso do rio) e agricultura (no médio curso), contempla a grande maioria das atividades potencialmente poluidoras. A avaliação da contribuição de cada uso e ocupação indicou os sedimentos amostrados na área urbano/indústria encontram-se enriquecidos por Cu, Cd, Pb, Mn e Zn e os amostrados na área agrícola, ainda que em concentrações inferiores as encontradas na área urbano/industria, encontram enriquecidos por Cr, Ni, Ti e Pb.

Sazonalmente verificou-se que as concentrações dos metais nos sedimentos, com exceção do níquel, são menores na estação úmida, possivelmente em virtude do maior volume de água no rio e do fenômeno da ressuspensão que os sedimentos sofrem nesta estação.

Os elementos Fe, Al, Mg, Co, Cr e Ba apresentam o comportamento esperado para metais com grande influência dos aspectos litogênicos. Ambos com concentrações relativamente similares e ampla distribuição geográfica. Esses elementos são frequentemente descritos para os litotipos da Formação Três Marias. O manganês (Mn) que também é frequentemente associado aos litotipos da Fm Três Marias apresenta concentração anômala no córrego Barreiro Grande (P-2 com 6166mg/kg) evidenciando a alteração ocasionada pelo lançamento dos esgotos vindos da cidade de Três Marias. Para os demais pontos é verificado um comportamento similar ao dos elementos litogênicos onde as concentrações Mn são sempre inferior a 1000mg/kg.

As análises químicas dos sedimentos confirmaram a contribuição da usina de beneficiamento de Zn e Pb da Votorantim Metais na contaminação dos sedimentos amostrados na área de influência urbano/indústria em Três Marias. Tanto na estação úmida como na estação seca os sedimentos amostrados no córrego Consciência apresentaram concentrações acima dos níveis I e II para Cu, Cd, Pb e Zn. Dos metais citados o Cu foi o único que violou somente o nível I (35,7 mg/kg) com 81,41mg/kg ficando na faixa de incerteza de efeitos adversos a biota. O Cd violou o nível II (3,5mg/kg) apresentando concentrações de 34,89mg/kg. Para Pb a concentração encontrada (287,69mg/kg) se apresenta muito acima dos 91,3mg/kg estabelecidos no nível II. Por fim o Zn, com 5974,14mg/kg em detrimento das 315mg/kg preconizadas no nível II da CONAMA 344/04 aponta real contribuição da Votorantin Metais Zinco S/A no enriquecimento dos sedimentos pelos

metais citados e indicam a necessidade de se criar um plano de remediação em particular no córrego Consciência, atualmente a principal área fonte de sedimentos contaminados encontrados no rio São Francisco.

Na área de agricultura as análises químicas dos sedimentos demonstraram que os elementos Pb, Cu e Zn possuem concentrações acima do nível I da CONAMA 344/04, respectivamente, 31, 35,7 e 123mg/kg. No entanto apesar de serem reconhecidamente empregados nas monoculturas de café e soja a simples associação da presença destes metais com as atividades agrícolas descrita requer bastante cautela uma vez que por ocasião do presente trabalho foi observado que em locais onde tais cultivos não se fazem presentes também são encontradas concentrações acima do nível I.

A aplicação do Índice de geoacumulação com a substituição dos teores globais de *background* pelas menores concentrações encontradas na área de pesquisa apresentou-se bastante ajustado a avaliação de enriquecimento de metais pesados em sedimentos em escalas regionais. A heterogeneidade ou a homogeneidade das classes verificadas no *Igeo* indica se o elemento analisado possui um comportamento antropogênico ou natural. Corrobora com o exposto, a aplicação do *Igeo* nos metais com concentrações de origem antropogênica Zn, Cd e Ni cujo nível de enriquecimento vai da classe 0 até a classe 6, bem como os elementos litogênicos Fe, Ba, Co e Mg que apresentam apenas 3 classes de enriquecimento ao longo do perfil de amostragem.

Dentre os aspectos observados no *Igeo* a pouca variação das classes de enriquecimento para Pb chama a atenção uma vez que reconhecidamente este elemento associa-se as atividades urbano/industrial na região de Três Marias. Tal fato indica um enriquecimento possivelmente natural para o elemento na área de estudo. Entretanto fica claro que para uma melhor caracterização do Pb faz-se necessários estudos mais específicos no sentido de definir os valores de *background* regionais para este elemento.

De maneira geral verificou-se que além da pronunciada contaminação dos sedimentos na área de influência da usina da Votorantin Metais Zinco S/A, onde dos teores de metais violaram o nível II CONAMA 344/04, a qualidade dos sedimentos também está bastante comprometida para os metais Zn, Cu, Pb, Ni e Cr que violaram ou estão bem próximos do nível I em grande parte dos sedimentos amostrados no Rio São Francisco. Cabe ainda salientar que dos valores-guias contemplados na CONAMA 344/04, devem ser usado apenas em uma avaliação inicial, pois estes foram estabelecidos a partir de informações químicas e toxicológicas disponíveis na América do Norte que condicionou a existência de três faixas de concentrações químicas onde raramente, ocasionalmente e frequentemente são observados efeitos adversos a biota. Neste sentido torna-se cada vez mais urgente a geração de valores-guias a partir de informações químicas e toxicológicas coletadas em regiões tropicais com intuito de tornar mais eficaz a utilização dos valores-guia em diagnósticos de qualidade dos sedimentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). 1984. *NBR 7181: Solo – análise granulométrica (método de ensaio)*. Rio de Janeiro. 13 pg.

Addad J., Scholz R., Karfunkel J., Martins M. S. 2001. Mapas químicos por microsonda eletrônica: caracterização e relação cor-substituição de minerais. *In: 6º Cong. Geoq. Países de Língua Port, Anais...* p. 85-87.

Alkimim F.F., Brito-Neves B.B., Alves J.A.C. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco – Uma Revisão. *In: Dominguez J.M.L., Misi A. (eds.). O Cráton do São Francisco*. Salvador: SBG/NúcleoBA/SE. p.: 45-62.

Alkimim F.F., Martins-Neto M.A.A. 2001. Bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. *In: Pinto C.P., Martins-Neto M. (eds). Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte, p.: 9-30.

Almeida D.F. 2010. Gestão ambiental dos sedimentos de corrente do Rio São Francisco na região de Três Marias/Minas Gerais. Belo Horizonte-MG. Minas Gerais. 2010. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 104 p.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*,7: 285-295.

Almeida F.F.M. 1981. O Cráton do Paranaimirim e sua relação com o do São Francisco. *In: SBG/Núcleo BA/SE – Simpósio do Cráton do São Francisco e suas Faixas Marginais –, Anais*, p. 1-10.

Amarante A. 1997. Comportamento geoquímico de metais pesados em sedimentos argilosos da Bacia de São Paulo – estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 98 p.

Anjos J.A.S.A. 2003. Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (*wetland*) no controle da poluição por metais pesados: o caso de Plubum em Santo Amaro da Purificação/BA. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 183 p.

Baggio H. 2002. Alterações na paisagem natural e agrícola do município de Buritizeiro-MG: implicações do plantio generalizado de pinus e eucalipto no meio físico, biológico e sócio-econômico. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 154 p.

Baggio H. 2008. Contribuições naturais e antropogênicas para a concentração e distribuição de metais pesados em água superficial e sedimento de corrente na Bacia do Rio do Formoso, município de Buritizeiro, MG. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 216 p.

Baird C. 1999. The Chemistry of Natural Waters. *In: Baird C. Environmental Chemistry*. 2. ed. W.H. Freeman, USA, p. 421-459.

Baird C. 2002. *Química Ambiental*. 2 ed. Bookman, Porto Alegre. 622 p.

- Benjamim M.M., Honeyman B.D. 1994. Trace Metal. In: Butcher S.S. *Global Biogeochemical Cycles*. London, Academic Press, p. 317-352.
- BGS (British Geological Survey). 1991. *Regional Geochemical Atlas Series*. Grampians. British Geological Survey, Keyworth, 95 p.
- Bisinoti M.C., Yabe M.J.S., Gimenez S.M.N. 2004. Influência de metais pesados no sistema aquático da bacia hidrográfica da cidade de Londrina-PR. *Revista Analytica*, **8**: 22-27.
- Braga L.L. 2007. Avaliação do impacto ambiental da usina de beneficiamento de Fe e Si, Várzea da Palma, MG, Brasil: distribuição e Transporte de contaminantes. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 120 p.
- Branco P.M. 1982. *Dicionário de mineralogia*. Editora da UFRGS, Porto Alegre, 264 p.
- Branco S.M., Rocha A.A. 1977. *Poluição, proteção e usos múltiplos de represas*. Edgard Blucher, CETESB, São Paulo. 185 p.
- Brito Neves B.B. 1999. América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. *Revista Brasileira Geociências*, **29**(3):379-392.
- Brito Neves, B.B. Kawashita, K., Delhal, J. 1979. A evolução geocronológica da Cordilheira do Espinhaço – dados novos e integração. *Revista Brasileira Geociências*, **9**(1):71-85.
- Brito Neves B.B., Sá J.M., Nilson N.F. 1996. A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subseqüentes. *Geonomos*, **3**:1-21.
- Butcher S.S., Charlson R.J., Orians G.H., Wolfe G.V. 1992. *Global Biogeochemical Cycles*. Academic Press Limited, London, 379 p.
- Calmano W., Förstner U. 1996. *Sediments and Toxic Substances: Environmental Effects and Ecotoxicity*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 332 p.
- Campos J.E.G., Dardenne M.A. 1997. Distribuição estratigráfica e sistemas deposicionais do Grupo Urucuaia Cretáceo Superior da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, **18**:481-499.
- Campos Neto M.C., Pedrosa Soares A.C., Noce C.M., Alkmim F.F., Ebert H. 2003. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, escala 1:1.000 000.
- Campos-Neto M.C. 2000. Orogenic System from Southwestern Gondwana: An approach to Brasiliano-Pan African Cycle and Orogenic Collage in Southeastern Brazil. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (Eds.). *Tectonic Evolution of South America*. Geological Society, Rio de Janeiro, p.: 195-230.
- Carvalho N.O., Filizola Júnior N.P., Santos P.M.C., Lima J.E.F.W. 2000. *Guia de práticas sedimentométricas*. ANEEL, Brasília, 154 p.
- Castro P.T.A. 2004. Características estratigráficas e sedimentológicas dos conglomerados e rochas associadas da Formação Samburá (Grupo Bambuí), região do Alto Rio São Francisco, SW do Cráton do São Francisco. *Geo.br* **1**:1-18.

CETEC (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS). 1983. *Diagnóstico ambiental do estado de Minas Gerais*. CETEC/COPAM, Belo Horizonte, 1 v. (Inclui oito mapas temáticos).

CETEC (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS). 2008. *Mapa de solos do estado de Minas Gerais: escala 1:600.000*. CETEC, Belo Horizonte.

Chaves M.L. 1991. Sequências cretácicas e mineralizações diamantíferas no Brasil Central e África Centro-Meridional: considerações preliminares. *Revista Brasileira de Geociências*, **10**:231-277.

Chiavegatto J.R.S. 1992. Análise estratigráfica das seqüências tempestísticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco. 1992. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 216 p.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 2004. *Resolução CONAMA nº 344, de 25 de março de 2004*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama>. Acessado em 1 jul. 2010.

CONAMA (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE). 2005. *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/conama>. Acessado em 1 jul. 2010.

Cortecci G. 2002. Geologia e saúde. Trad. Wilson Scarpelli. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/pgagem/artigoind.htm>. Acessado em 10 maio 2010.

Cotrim M.E.B. 2006 Avaliação da qualidade da água na bacia hidrográfica do Ribeira de Iguapé com vistas ao abastecimento público. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. 250 p.

Cotta J.A.O. 2003. Diagnóstico ambiental do solo e sedimento no parque estadual turístico do alto Ribeira (PETAR). Dissertação de Mestrado, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. 116 p.

CSeQGs (Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life). 2002. Canadian Environmental Quality Guidelines 2002. Disponível em: <http://www.ec.gc.ca/ceqg-rcqe/English/Ceqg/Sediment/default.cfm>. Acessado em 25/10/2008.

Cunha F.G. 2003. Contaminação humana e ambiental por chumbo no vale do Ribeira nos estados de São Paulo e Paraná. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 111 p.

Cunha F.G., Figueiredo B.R., Capitani E.M. 2006. Diagnóstico ambiental e de saúde humana: contaminação por chumbo em Adrianópolis, no Estado do Paraná, Brasil. In: Silva C.R. (ed.). *Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente*. CPRM, Rio de Janeiro, p.: 97-103.

Dornfeld C.B. 2002. Utilização de análises limnológicas, bioensaios de toxicidade e macroinvertebrados bentônicos para o diagnóstico ambiental do reservatório de Salto Grande (Americana, SP). Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 211p.

- Dussin I.A. Dussin T.M. 1995. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. *Geonomos*, **3**(1):19-26.
- Eleutério L. 1997. Diagnóstico da situação ambiental da cabeceira do Rio Doce, MG, no âmbito das contaminações por metais pesados em sedimentos de fundo. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 137 p.
- Emsley J. 2002. *Nature's Building Blocks : An A-Z Guide to the Elements*. Oxford University Press, Oxford. 538p.
- Enzweiler J., Duarte M.A.I. 2007. Geoquímica analítica. In: Licht O.A.B., Mello C.S.B., Silva C.R. (eds.) *Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos*. SBGq/CPRM, Rio de Janeiro, p.: 279-307.
- Esteves F.A. 1980. *Fundamentos de liminologia*. 2. ed. Interciência, Rio de Janeiro. 574p
- Fellenberg G. 1980. *Introdução aos problemas da poluição ambiental*. EPU/Springer/Edusp, São Paulo.
- Figueiredo B. R., Borba R. P., Angélica R. S. 2006. Arsênio no Brasil e exposição humana. In: Silva C.R. (ed.). *Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente*. CPRM, Rio de Janeiro, p.: 64-70.
- Förstner U., Wittmann G. 1981. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, New York, 486 p.
- Gonçalves J.A.C., Pereira M.A., Paiva J.F., Lena J.C. de. 2006. O arsênio nas águas subterrâneas de Ouro Preto. In: Silva C.R. (ed.). *Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente*. CPRM, Rio de Janeiro, p.: 71-77.
- Guimarães D. 1933. *Província magmática do Brasil Meridional*. DNPM/SGM, Rio de Janeiro, 70 p.
- IEF (INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS). 2005. *Mapeamento da cobertura vegetal e uso do solo do Estado de Minas Gerais*.
- Iglesias M. 2007. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 121 p.
- Inda Jr. A.V., Klamt E., Nascimento P.C. 2006. Composição da fase mineral do solo. In: Meurer E. J. (ed.). *Fundamentos de química do solo*. Evgraf, Porto Alegre, p.31-60.
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION). 1996. General Guidelines for Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry. *Journal of Geology*, **30**:377-392.
- Kabata-Pendias A., Pendias H. 1992. Trace elements in soils and plants. 2. ed. London: CRC, 1992. 315p.
- Koljonen, T. (ed.) 1992. The Geochemical Atlas of Finland. Part 2: Till. Espoo. Geological Survey of Finland. 218 p.

Ladeira E.A., Brito O.E.A. 1968. Contribuição à geologia do Planalto do Mata da Corda. *In: SBG, Congresso Brasileiro Geologia, 22, Anais*, p. 181-199.

Licht O.A.B. 2001. A geoquímica multielementar na gestão ambiental: identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no Estado do Paraná, Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 236 p.

Licht O.A.B. 2001. *Atlas geoquímico do Estado do Paraná - sedimentos de fundo e águas superficiais*. Mineropar, Curitiba. 80p.

Licht, O.A.B. 1998. *Prospecção geoquímica: Princípios, técnicas e métodos*. Rio de Janeiro: CPRM. 236p.

Lima E.A.M. 2008. Avaliação da qualidade dos sedimentos e prognóstico geoquímico ambiental da zona estuarina do rio Botafogo, Pernambuco. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 204 p.

Lima O.N.B., Ulhein A., Britto W. 2007. Estratigrafia do Grupo Bambuí na Serra da Saudade e geologia do depósito fosfático de Cedro do Abaeté, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências* 4(suplemento):204-215.

Lima S.A.A. 1997. Fácies, ambiente deposicional e aspectos diagenéticos das rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas na região norte de Minas Gerais, Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 121 p.

Lopes I., Figueiredo B.R., Enzweiler J., Vendemiatto M.A. 2006. Chumbo e arsênio nos sedimentos do Rio Ribeira de Iguapé, SP/PR. *In: Silva C.R. (ed.). Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente*. CPRM, Rio de Janeiro, p.: 88-96.

Loska K., Wiechula D. 2003. Application of Principal Component Analysis for the Estimation of Source of Heavy Metal Contamination in Surface Sediments from the Rybnik Reservoir. *Chemosphere*, 51(8):723-733.

Macedo J.A.B. 2002. *Introdução à química ambiental*. Jorge Macedo, Juiz de Fora, 487 p.

Machado N., Schrank A., Abreu F.R., Knauer L.G., Abreu P.A. 1989. Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço meridional. *In: SBG-Nucleo-MG, Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 5, Anais*, p. 171-174.

Maia P.D. 2003. Estudo geoquímico de metais em sedimentos no Lago Paranoá-DF. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 129 p.

Malavolta E. 1994. *Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos*. ProduQuímica, São Paulo, 153 p.

Martins-Neto M.A., Alkimim F.F. 2001. Estratigrafia e Evolução tectônica das bacias Neoproterozóicas do Paleocóntinente São Francisco e suas Margens: registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. *In: Pinto C.P., Martins-Neto M.A. (eds.) Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte, p.: 31-54.

- Mason B.H. 1971. *Princípios de geoquímica*. Polígono/Edusp, São Paulo. 371p.
- Massutti B.M. 1999. O manguezal do Itacorubi como barreira biogeoquímica: estudo de caso. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 196 p.
- Mattoso S.Q., Formoso M.L.L. 2007. Princípios básicos para prospecção geoquímica. *In*: Licht O. A.B., Mello C.S.B., Silva C.R. (eds). Prospecção geoquímica. Depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás. Sociedade Brasileira de Geoquímica e Serviço Geológico do Brasil CPRM, pp. 97-152.
- McCutcheon S.C., Martin J.L., Barnwell Jr. T.O. 1993. Water Quality. Chapter 11 *In*: Maidment D.R. (ed.). *Handbook of Hidrology*. McGraw-Hill Inc., New York, p.: 1-73
- Miller J.C., Miller J.N. 1993. *Statistics for Analytical Chemistry*. 3. ed. Prentice Hall, Chichester. 233p.
- Moraes L.C., Seer H.J., Fogassa A.C.C., Sgarbi P.B., Sgarbi G.N.C. 1986. Geologia das unidades cretácicas da área compreendida entre Lagoa Formosa e Carmo do Paranaíba – MG. *In*: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 34, *Anais*, 1: 337-345.
- Mudroch A., Macknight S.D (eds.). 1991. *Handbook of Techniques for Aquatic Sediments Sampling*. CRC Press, Boca Raton. 210p.
- Novotny V. 1995. Diffuse Sources of Pollution by Toxic Metal and Impact on Receiving Water. *In*: Salomons W., Förstner U. (eds.). *Heavy Metals: Problems and Solutions*. Spring, Berlin, p.: 33-53.
- Oliveira M.R. 2007. Investigação da contaminação por metais pesados da água e do sedimento de corrente nas margens do Rio São Francisco e tributários, a jusante da represa da CEMIG, no município de Três Marias, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 149 p.
- Patrus L.R.A., Santos A.C.S., Figueiredo V.L.S., Matos A.R., Menezes I.C.R. 2001. Parcela mineira da Bacia do São Francisco: caracterização hidroclimática e avaliação dos recursos hídricos de superfície.. *In*: Pinto C.P., Martins-Neto M. (eds.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte, p.: 285-326.
- Pimentel M.M., Fuck R.A., Jost H., Ferreira Filho C.F., Araujo S.M. 2000. The Basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. *In*: Cordani U.G., Milani E.J., Thomas Filho A., Campos D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America*. International Geologic Congress, Rio de Janeiro, p.: 195-230.
- Pimentel M.M., Fuck R., Botelho N.F. 1999. Granites and the Geodynamic History of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil: A Review. *Lithos*, 46:463-483.
- Pinto C.P., Martins-Neto M.A. (eds.). 2001. *A Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte. 349p.
- Pinto C.P., Martins-Neto M.A. 2001. A Bacia do São Francisco: definição de base e dados. *In*: Pinto C.P., Martins-Neto M.A. (eds.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais*. SBG-MG, Belo Horizonte, p.: 1-8.

PLANVASF (PLANO DIRETOR PARA O DESENVOLVIMENTO DO VALE DO SÃO FRANCISCO) 1989. *Relatório final*. PLANVASF, Brasília, 515 p.

Rashed M.N. 2004. Biomakers as Indicator for Water Pollution with Heavy Metal in Rivers, Seas and Oceans. Disponível em: www.wrrc.dpri.kyoto. Acessado em 25 ago. 2008.

Ribeiro E.V. 2007. Níveis de contaminação por metais pesados em águas superficiais do Rio São Francisco em Pirapora e sua relação com as atividades industriais. Monografia, Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Montes Claros, 101 p.

Rietzler A.C., Fonseca A.L., Lopes G.P. 2001. Heavy Metals in Tributaries of Pampulha Reservoir, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Biology*, **61**(3): 363-370.

Rodriguez M.P. 2001. Avaliação da qualidade da água da bacia do alto Jacaré-Guaçu/SP (Ribeirão do Feijão e Rio do Monjolinho) através de variáveis físicas químicas e biológicas. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, 175 p.

Rodrigues M.L.K. 2007. Origem, distribuição e mobilidade potencial de metais pesados em ambiente fluvial impactado por curtume. Tese de doutorado. Instituto de Geociências-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 256 p.

Saadi A., Magalhães Jr., Marques M.R. 1991. *Estudos Básicos da Fase de Viabilidade da UHE de Irapé-MG*: relatório de geomorfologia da área de influência. CEMIG/ENERCONSULT, Belo Horizonte. (mais de 70 mapas).

Salomons W., Förstner U. 1980. Trace Metal Analysis on Polluted Sediments, Part II: Evaluation of Environmental Impact. *Environmental Technology Letters*, **1**:506-517.

Santos H.G., Jacomine P.K., Anjos L.H.C., Oliveira V.A., Oliveira J.B., Coelho M.R., Lumberras J.F., Cunha T.J.F. 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2. ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

Sawyer C.N., McCarty P.L., Parkin G.F. 2003. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*. 5. ed. MacGraw-Hill, New York, 752 p.

Schobbenhaus C., Hoppe A., Lork A. 1994. Idade U/Pb do vulcanismo Rio dos Remédios, Chapada Diamantina, Bahia. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, *Bol. Res. Expand.*, **2**:397-399.

Selinus O. Geologia médica. In: Silva C.R. (ed.). *Geologia médica no Brasil*: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente. CPRM, Rio de Janeiro, p.: 1-5.

Sgarbi G.N.C., Sgarbi P.B. de A., Campos J.E.G., Dardenne M.A., Penha U.C. 2001. Bacia Sanfranciscana: o registro fanerozóico da bacia do São Francisco. In: Pinto C.P., Martins-Neto M.A. (Eds) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*. Belo Horizonte, SBG/ MG, p. 93-138.

Sgarbi G.N.C. 1989. Geologia da Formação Areado, Cretáceo Médio a Inferior da Bacia do São Francisco, oeste do Estado de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 324 p.

Sgarbi G.N.C. 1991. Arenitos eólicos da Formação Areado (Bacia Cretácea do São Francisco): caracterização, diagênese e aspectos. *Revista Brasileira de Geociências*, **21**(4): 342-354.

Silva C.R., Figueiredo B.R., Capitani E.M. 2006. Geologia médica no Brasil. *In: Silva C.R. (ed.). Geologia médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana, animal e meio ambiente.* CPRM, Rio de Janeiro, p.: 6-14.

Silvério P.F. 2003. Bases técnico-científicas para derivação de valores-guia de qualidade de sedimentos para metais: experimentos de campo e laboratório. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, 145 p.

Souza V.L.B. 2007. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos da Lagoa Olho D'Água: uma ferramenta para avaliação da contaminação ambiental. Tese de Doutorado, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, 154 p.

Lins C.A.C., Souza C.J.M., Cunha F.G., Machado G.J., Lopes I. 2003. Manual Técnico-PGAGEM - Brasil. São Paulo – CPRM. 28 p.

Teixeira W., Toledo M.C.M., Fairchild T.R., Taioli F. (orgs.). 2000. *Decifrando a Terra*. Oficina de Textos, São Paulo, 568 p.

Thomas R.L. 1987. A Protocol for the Selection of Process-Oriented Remedial Options to Control in situ Sediments Contaminants. *Hydrobiologia*, **149**:247-258.

Tomazelli A.C. 2003. Estudo comparativo das concentrações de cádmio, chumbo e mercúrio em seis bacias hidrográficas do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 124 p.

Trindade W. M. 2007. Condicionantes litoestruturais na origem e desenvolvimento de processos erosivos e arenização na Bacia do Rio do Formoso-MG. Monografia, Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Montes Claros, 97 p.

Trindade W.M. Ribeiro E.V., Baggio H., Horn A.H. 2008. Aspectos geoquímicos que controlam a formação de leques arenosos na Bacia do Formoso-MG/Brasil. *Geografias*, **4**(2):37-44.

Trindade W.M., Ribeiro E.V., Baggio H.F., Horn A.H. 2006. O Grupo Mata da Corda na Bacia Hidrográfica do Rio do Formoso e suas Feições Morfológicas Correlatas. *In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia Regional – Conference on Geomorphology*, Anais p. 01 -09

Trompette R. 1994. *Geology of Gondwana (2000-500 Ma): Pan-African-Brasiliano Aggregation of South America and Africa*. Balkema, Rotterdam, 350 p.

UFLA (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS) 2005. *Inventário florestal de Minas Gerais*. Setor de Geoprocessamento e Análises de Imagens – LEMAC, Lavras.

Valadão R.C. 1998. Evolução de longo-termo do relevo do Brasil Oriental (denudação, superfícies de aplanamento e soerguimento crustais). 1998. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, 242 p.

Viana V.M.F.C. 2006. Estudo geológico ambiental das veredas do Rio do Formoso no município de Buritizeiro-MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 71 p.

Wedepohl K.H. (ed.). 1978. *Handbook of Geochemistry*. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, v. 2. 618p.

Wentworth C.K. 1922. *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments*. *J. Geology* 30:377–392.

Wild A. 1993. *Soils and the Environment: Introduction*. Cambridge University, New York, p. 189-210.

Winter M. 1998. WebElements. Disponível em: <http://www.shef.ac.uk/~chem/web-elements>. Acessado em 10 maio 2010.

ANEXO A - PONTOS DE AMOSTRAGEM

PONTO	X - UTM	Y - UTM	Altitude	COMENTÁRIO
P-1	473386,714	7988336,043	508,18	A JUSANTE DO BARRAMENTO
P-2	473435,713	7988477,07	512,74	CR. BARREIRO GRANDE
P-3	474848,803	7989999,519	509,62	BARREIRO GRANDE - CONSCIENCIA
P-4	474888,503	7989960,816	508,90	CONSCIENCIA
P-5	475965,216	7992172,356	514,19	CONSCIENCIA - ALDEIA DOS DOURADOS
P-6	476100,304	7992339,606	517,31	ALDEIA DOS DOURADOS
P-7	473372,199	7995699,95	512,99	ALDEIA DOS DOURADOS-LUCINDA
P-8	473333,556	7995791,047	515,63	CR. LUCINDA
P-9	475537,838	7997631,06	512,74	RIO SÃO FRANCISCO
P-10	480141,799	7995850,688	524,28	MONT. DO ESPIRITO SANTO
P11	480227,558	7995826,358	520,44	CR. ESPIRITO SANTO
P-12	480930,189	7998563,852	503,37	PROX. SITIANTES -PORTO DA ESCADINHA
P-13	479810,129	8001006,845	508,90	MONT. SÃO JOSE
P-14	479787,933	8001045,65	513,47	CR. SÃO JOSE
P-15	480336,777	8005527,101	516,59	MONT. ABAETÉ
P-16	480074,663	8005848,783	515,63	RIO ABAETÉ
P-17	480198,946	8009511,343	504,09	ILHA
P-18	479652,601	8012910,21	505,05	BAR DO GETULIO SITIANTES
P-19	481676,855	8014408,07	492,08	ILHA
P-20	484939,994	8015726,896	492,08	RIO SÃO FRANCISCO
P-21	486405,054	8016427,325	497,84	RIO SÃO FRANCISCO
P-22	487715,673	8017401,789	493,76	MONT. RIO DE JANEIRO
P-23	487946,394	8016827,995	493,04	RIO DE JANEIRO
P-24	487864,55	8017723,175	494,00	JUS RIO DE JANEIRO
P-25	487741,785	8021950,168	495,44	ILHA
P-26	488312,765	8025414,386	493,52	ILHA
P-27	489357,836	8031229,147	493,28	RIO SÃO FRANCISCO
P-28	494279,834	8033804,101	493,76	RIO SÃO FRANCISCO
P-29	496067,625	8033490,178	487,99	AFLUENTE
P-30	496217,862	8033483,503	494,96	RIO SÃO FRANCISCO
P-31	499200,749	8036394,193	491,36	CANAL ANASTOMOSADO/ENTRELAÇADO
P-32	499682,877	8036444,487	490,88	RIBERAO DA TAPERA
P-32	499644,353	8038521,84	491,84	JUS RIBEIRAO DA TAPERA
P-33	498139,142	8043311,842	490,15	RIO SÃO FRANCISCO
P-34	498681,579	8044577,98	487,51	RIO SÃO FRANCISCO
P-35	497061,026	8046187,983	487,75	AFLUENTE
P-37	497055,477	8046205,212	487,51	JUS DO AFLUENTE
P-38	495596,811	8049700,155	487,75	ILHA
P-39	495267,937	8052467,211	482,94	RIO SÃO FRANCISCO
P-40	498029,847	8055215,801	488,47	ILHA DOS PRAZERES
P-41	502055,253	8059781,208	485,11	JUS COMUNIDADE PEDRA DE SANTANA
P-42	501449,142	8063191,471	485,11	RIO SÃO FRANCISCO
P-43	503466,925	8066483,748	483,43	ILHA
P-44	505155,409	8069009,961	477,66	RIO SÃO FRANCISCO

P-45	505071,806	8072348,162	482,22	RIO DO FORMOSO
P-46	505823,754	8073790,123	481,26	ILHA JUS CR. MARAMBAIA
P-47	506315,426	8076945,423	482,46	RSF LAGOAS MARGINAIS
P-48	506538,375	8078584,231	484,63	INICIO DA AREA URBANA
P-49	504826,242	8082699,238	465,64	AREA URBANA - PRAIA
P-50	504804,519	8082839,467	467,89	CR. DAS PEDRAS
P-51	506176,894	8085153,601	469,01	DISTRITO INDUSTRIAL
P-52	507119,335	8085940,062	474,53	CODEBA
P-53	507447,282	8087094,218	470,23	DRAGA
P-54	507447,282	8087094,218	468,28	EFLUENTE INDUSTRIAL
P-55	506839,436	8088854,217	475,25	JUS DO EFLUENTE
P-56	510705,325	8090704,511	473,81	SITIOS
P-57	516327,508	8094502,886	477,18	PROJETO AGRICOLA DE FRUTICULTURA
P-58	516257,58	8096792,899	475,01	RIO SÃO FRANCISCO
P-59	518074,461	8097696,912	473,09	MONTANTE DA FOZ DO RIO DAS VELHAS

ANEXO B - CONCENTRAÇÕES (mg/kg) DE METAIS PESADOS EM SEDIMENTOS NA ESTAÇÃO SECA

Pontos	Mg	Al	Ca	Cr	Fe	Co	Cu	Cd	Ti	Mn	Ni	Zn	Ba	Pb
P-1	535,07	4389,78	751,50	31,25	13426,85	9,67	18,95	4,81	157,99	456,65	1,51	83,03	56,88	19,80
P-2	379,60	4507,00	600,00	32,77	13670,00	20,05	35,76	5,18	128,99	6166,01	1,51	987,98	89,65	42,79
P-3	1039,53	21057,31	939,72	37,27	33695,65	21,19	40,57	34,89	120,45	847,86	9,13	2433,79	151,38	86,86
P-4	1007,95	14473,16	554,67	33,98	32862,82	11,34	81,41	22,75	121,87	223,56	6,94	5974,16	96,12	287,67
P-5	357,78	6477,05	532,93	30,77	19830,34	10,57	42,75	9,88	80,99	282,44	0,00	1137,72	92,17	290,65
P-6	189,20	1843,00	675,00	37,88	8130,00	8,77	17,35	9,07	46,99	134,57	0,00	287,98	56,77	20,62
P-7	992,00	16720,00	918,00	40,79	30950,00	9,89	30,16	2,36	127,80	827,00	9,93	424,30	106,00	55,00
P-8	673,00	11380,00	631,00	26,60	23230,00	10,31	21,53	1,20	92,40	340,80	4,01	69,40	94,40	36,19
P-9	1601,59	13635,46	840,64	32,14	27928,29	11,04	32,27	3,52	130,08	1147,41	6,09	1520,92	103,39	91,43
P-10	1233,13	19037,70	846,23	36,14	32708,33	14,26	39,64	4,19	131,65	2849,21	8,09	1209,33	151,29	78,87
P-11	548,10	12535,07	363,43	23,42	22595,19	9,30	21,06	0,10	90,68	204,51	1,51	46,64	81,26	34,66
P-12	535,64	13029,70	440,50	25,74	23732,67	8,59	22,62	0,67	89,11	425,05	1,67	346,93	85,64	41,29
P-13	667,65	14861,93	791,91	27,45	26232,74	10,51	24,23	1,24	99,51	906,31	3,38	417,55	99,21	43,72
P-14	748,00	14670,00	591,00	27,00	30620,00	11,40	22,17	0,13	86,80	470,80	4,22	130,30	83,20	38,17
P-15	333,70	4731,39	75,45	33,53	14778,67	8,91	19,35	0,10	78,42	334,87	3,66	293,76	76,53	28,67
P-16	816,73	7529,88	74,70	32,16	23934,26	12,34	23,47	0,10	278,54	200,20	4,10	72,46	115,87	30,99
P-17	1569,72	10079,68	987,05	41,83	30956,18	15,53	25,04	0,10	409,56	435,86	11,59	61,16	136,65	37,37
P-18	1416,00	13960,00	1106,00	44,15	29410,00	15,91	34,17	0,62	380,20	970,00	12,71	299,70	144,20	46,73
P-19	1962,08	14002,00	1209,58	43,40	32275,45	16,51	28,72	0,19	333,63	205,59	17,05	136,53	165,07	42,03
P-20	2291,91	13658,78	1309,66	43,73	34585,80	20,19	29,54	0,23	421,50	332,35	18,22	135,50	188,36	44,67
P-21	1818,73	11802,79	1207,17	40,24	31503,98	14,99	26,53	0,10	357,17	564,74	14,11	64,54	157,17	37,72
P-22	1172,58	13382,64	650,89	30,90	27110,45	10,76	20,91	0,10	179,29	266,57	7,51	110,85	107,50	38,23
P-23	476,90	12210,00	507,00	23,57	22800,00	9,81	17,11	0,10	143,30	338,10	1,51	40,67	75,50	35,21
P-24	1175,30	7410,36	74,70	26,88	16972,11	5,67	0,00	0,10	102,74	324,77	1,51	38,75	83,87	16,54
P-25	941,24	13894,42	936,25	29,67	24412,35	11,05	21,76	0,10	141,43	342,53	5,42	57,97	105,48	40,88
P-26	1611,78	15219,56	1137,72	37,47	29840,32	15,65	26,16	0,43	281,54	284,43	10,60	153,99	151,40	45,51
P-27	1183,43	16844,18	941,81	32,30	29023,67	12,48	22,66	0,14	158,78	435,70	6,79	77,81	118,54	47,91
P-28	1111,33	6003,98	74,55	33,99	19662,03	12,67	24,36	0,00	179,29	453,76	5,43	116,30	123,12	42,12

P-29	1589,82	14461,08	985,03	35,22	31287,43	13,89	27,90	0,17	289,82	499,00	11,32	85,83	149,20	43,25
P-30	1885,07	14037,33	1172,89	37,97	10019,65	15,11	24,87	0,30	291,16	611,98	12,15	126,92	157,37	45,77
P-31	1785,86	9701,20	1123,51	61,16	28954,18	18,48	32,74	0,35	815,74	673,31	16,07	190,94	168,43	38,07
P-32	1388,34	12193,68	933,79	34,10	24347,83	12,11	21,40	0,10	308,20	458,50	8,91	92,49	126,28	37,56
P-33	1299,00	12020,00	875,00	33,37	29230,00	12,10	21,61	0,10	279,80	468,90	7,51	123,50	123,80	38,36
P-34	1668,00	14930,00	1308,00	38,54	29960,00	13,74	24,76	0,47	290,60	362,00	12,17	225,50	161,80	43,88
P-35	1670,97	13290,26	1288,27	35,58	31123,26	14,72	26,05	0,52	252,58	449,30	9,85	181,51	150,89	42,92
P-36	2127,74	16766,47	1251,50	41,09	35339,32	15,51	27,38	0,27	263,57	201,60	15,38	110,18	185,13	47,55
P-37	1536,78	13777,34	1177,93	34,09	27097,42	12,41	22,98	0,29	251,49	583,50	8,64	132,31	141,15	41,72
P-38	1221,34	15968,38	899,21	32,76	33418,97	13,98	23,81	0,51	173,52	190,71	8,19	130,43	123,81	46,81
P-39	1951,49	18792,08	1364,36	40,40	35643,56	15,81	31,50	0,55	263,27	351,49	14,24	161,49	178,91	52,18
P-40	1914,85	16108,91	1335,64	35,47	33198,02	13,34	39,36	0,51	289,80	634,65	13,21	364,26	171,98	51,78
P-41	2026,57	15620,08	1528,54	40,30	34025,59	16,51	33,36	0,53	241,14	392,72	14,92	157,97	173,03	49,21
P-42	2536,85	19272,91	1333,67	46,41	38386,45	18,32	35,69	0,48	382,17	549,80	21,25	160,56	238,05	54,98
P-43	1899,20	16756,49	1229,54	39,29	32984,03	15,66	28,47	0,57	289,92	687,62	14,48	137,92	174,55	50,40
P-44	2174,60	17827,38	1534,72	39,52	36408,73	17,00	37,73	0,28	281,75	376,98	16,15	89,29	192,66	51,69
P-45	1293,89	24600,59	833,33	32,31	40927,02	11,89	33,65	0,10	193,79	265,78	8,00	72,68	203,16	47,12
P-46	2507,98	17804,39	1463,07	44,27	38652,69	17,26	34,38	0,22	368,06	239,52	18,57	71,16	223,75	50,80
P-47	2235,12	21498,02	1395,83	39,34	38511,90	15,41	31,38	0,34	193,25	625,99	14,37	69,84	156,85	56,05
P-48	1528,83	14005,96	1053,68	34,90	10139,17	14,38	25,35	0,46	222,17	738,57	10,80	125,25	149,70	47,89
P-49	1394,48	7534,52	902,37	23,70	21873,77	12,15	21,35	0,59	70,71	501,97	8,27	87,28	96,35	32,10
P-50	1089,00	5080,00	830,00	25,86	18390,00	17,35	30,65	0,50	89,38	678,98	9,87	73,00	142,36	38,65
P-51	1139,00	5940,00	765,98	29,88	21680,00	12,99	24,86	0,60	153,90	765,54	9,12	124,00	112,98	33,99
P-52	1309,00	5680,00	654,24	34,65	18520,00	11,84	19,84	0,61	154,84	255,00	10,00	116,00	97,47	29,00
P-53	1684,89	14542,74	427,44	36,76	34592,45	16,09	31,56	0,68	284,59	375,75	12,61	161,43	152,19	45,68
P-54	2028,83	16172,96	1048,71	38,31	35119,28	16,77	29,82	0,62	287,18	400,53	15,73	143,34	178,23	50,00
P-55	2996,05	20029,64	1522,73	46,79	39575,10	19,16	36,91	0,56	433,30	421,94	24,98	115,81	269,37	57,21
P-56	1408,18	12724,55	2243,67	48,98	41297,41	13,76	22,54	0,40	286,83	642,88	0,00	141,72	99,09	43,99
P-57	1932,67	15475,25	3445,54	38,98	36900,99	20,66	27,10	0,41	312,85	762,75	0,00	201,98	174,00	38,65
P-58	1264,53	6763,53	3267,98	37,65	23156,31	10,10	18,55	0,42	142,29	545,85	0,00	53,11	81,12	35,03
P-59	1789,26	14353,88	2786,00	35,99	29801,19	12,56	21,65	0,44	138,96	678,94	0,00	12,92	76,90	42,65

ANEXO C - CONCENTRAÇÕES (mg/kg) DE METAIS PESADOS EM SEDIMENTOS NA ESTAÇÃO ÚMIDA

Pontos	Mg	Al	Ca	Cr	Fe	Co	Cu	Cd	Ti	Mn	Ni	Zn	Ba	Pb
P-1	478,70	3458,00	261,40	20,05	12080,00	3,96	12,07	0,10	75,70	249,40	1,51	40,90	28,54	12,04
P-2	408,08	5648,70	941,12	18,18	16586,83	8,65	30,61	4,60	33,56	291,12	1,51	667,66	50,40	38,35
P-3	416,27	5089,82	340,92	18,41	15818,36	8,13	33,92	9,24	31,38	258,38	1,51	1220,56	44,40	52,69
P-4	401,50	6700,00	523,00	23,16	20640,00	9,42	61,20	19,26	28,49	229,90	1,77	2751,00	55,40	141,00
P-5	764,47	7355,29	587,82	21,28	24760,48	9,95	37,83	3,47	40,56	606,79	2,36	3920,16	49,67	310,28
P-6	231,36	3682,36	233,07	13,40	15420,84	5,05	15,82	3,76	23,69	113,63	1,51	117,74	33,70	20,62
P-7	431,90	4022,00	381,70	15,76	14350,00	5,41	16,30	0,18	25,95	294,90	1,51	140,20	42,52	24,37
P-8	350,00	3193,61	201,90	13,21	11177,64	4,54	11,41	0,10	24,50	65,97	1,51	41,01	35,37	18,21
P-9	555,99	8907,82	234,47	0,00	30561,12	4,12	31,55	0,10	60,46	206,41	1,51	987,23	34,00	89,65
P-10	642,71	4680,64	397,50	16,40	11926,15	3,54	33,21	3,04	41,56	94,51	1,51	1187,62	31,28	106,49
P-11	420,20	5600,00	226,00	28,63	13020,00	16,73	20,57	3,78	40,33	201,40	38,41	32,42	63,70	79,80
P-12	353,59	3977,05	479,44	11,64	12774,45	4,91	13,91	0,59	55,69	192,81	1,51	171,36	38,49	17,61
P-13	388,00	5410,00	443,40	13,28	17410,00	6,99	19,62	0,29	27,58	491,10	1,51	233,80	59,10	20,62
P-14	454,99	4879,24	248,60	11,79	16247,50	6,49	14,81	0,10	26,04	178,74	1,51	111,88	39,56	18,97
P-15	507,00	6180,00	520,00	16,10	16620,00	7,84	17,73	0,10	39,49	424,80	1,51	168,60	54,80	23,67
P-16	1708,00	6940,00	1252,00	25,13	20150,00	11,49	20,64	0,10	122,90	433,80	12,18	36,14	101,50	22,96
P-17	1316,00	5920,00	984,00	25,67	17750,00	11,60	18,74	0,10	112,10	364,30	10,42	37,79	76,60	29,39
P-18	1118,76	4845,31	842,32	20,26	16237,52	8,48	19,24	0,10	103,49	266,37	6,38	50,00	56,49	14,46
P-19	1364,00	4686,00	908,00	24,70	17660,00	9,25	19,37	0,10	155,30	334,90	9,03	50,80	73,40	15,87
P-20	1273,90	5876,49	935,26	21,59	17410,36	9,90	20,36	0,10	95,72	378,59	8,94	56,67	75,00	22,27
P-21	1036,22	4423,54	805,84	23,44	15885,31	8,84	18,42	0,10	154,83	279,58	7,07	63,28	62,68	16,24
P-22	291,08	8026,05	202,81	14,83	16322,65	6,41	14,47	0,10	57,21	112,73	1,51	21,37	46,36	20,95
P-23	217,63	2536,85	175,60	10,34	7619,52	4,81	11,01	0,10	31,85	89,34	1,50	14,47	32,49	11,81
P-24	313,00	5620,00	262,20	12,53	14050,00	6,12	14,71	0,10	46,04	186,20	3,59	18,95	32,45	14,62
P-25	968,88	4543,17	725,90	28,20	16265,06	9,32	16,58	0,10	226,20	315,16	7,43	59,24	63,05	23,61
P-26	1777,00	6800,00	1133,00	27,56	24170,00	13,93	22,60	0,10	113,00	419,00	15,55	75,10	104,70	27,42

P-27	1737,47	6983,97	1224,45	32,72	17505,01	15,14	21,30	0,69	85,67	516,03	18,61	47,03	111,62	46,05
P-28	1554,89	0,00	1109,78	0,00	17964,07	14,13	20,75	0,10	0,00	487,85	6,39	45,96	91,24	38,99
P-29	1269,08	5461,85	1006,02	22,23	16506,02	10,14	20,78	0,10	73,69	407,23	6,28	47,19	84,54	21,14
P-30	1221,44	6873,75	976,95	21,31	21853,71	9,36	17,67	0,10	81,46	338,68	5,77	59,02	72,55	22,02
P-31	762,00	4039,00	481,60	15,55	12200,00	5,79	13,65	0,10	62,30	154,20	1,51	53,40	45,41	13,29
P-32	205,78	3939,24	81,37	2,56	7679,28	5,35	8,33	0,10	114,44	110,76	1,50	6,39	36,21	15,14
P-33	745,02	6474,10	535,86	16,54	18874,50	7,55	17,01	0,10	42,59	237,85	2,03	53,98	60,36	18,00
P-34	1304,61	6422,85	985,97	21,38	19338,68	9,38	16,64	0,10	71,44	369,94	6,48	47,13	76,85	21,36
P-35	1300,40	0,00	1002,00	0,00	18036,07	12,52	22,76	0,00	82,37	402,35	0,00	91,36	76,80	21,57
P-36	1638,17	8638,17	1156,06	25,82	27624,25	12,20	21,78	0,10	117,20	577,53	11,59	58,75	102,29	22,69
P-37	1346,00	7730,00	629,00	24,32	23310,00	9,86	18,98	0,10	142,50	245,00	4,74	55,20	81,50	27,61
P-38	1590,00	7560,00	1176,00	22,64	19840,00	11,16	21,43	0,10	81,40	512,00	7,51	48,80	88,00	24,04
P-39	1649,70	7874,25	1212,57	24,10	22554,89	11,68	19,82	0,10	81,04	500,00	5,63	53,49	92,91	32,78
P-40	990,04	8177,29	655,38	21,70	22888,45	7,46	15,01	0,10	172,91	267,23	1,50	48,47	61,16	21,10
P-41	1248,50	9171,66	1014,97	24,93	26457,09	10,06	19,86	0,10	136,73	404,29	4,60	75,65	89,92	30,06
P-42	1566,00	8620,00	1253,00	24,58	25480,00	13,59	20,85	0,10	69,40	613,00	6,42	63,10	98,40	34,33
P-43	1515,90	6163,02	1254,47	24,78	18300,20	11,73	21,74	0,10	92,54	527,83	5,13	61,83	93,64	29,97
P-44	1195,00	6590,00	935,00	19,85	20790,00	9,11	16,49	0,10	88,00	378,20	1,51	57,70	71,20	23,45
P-45	1531,94	7245,51	885,23	27,05	21876,25	13,90	21,56	0,10	150,70	578,84	7,41	64,47	143,91	32,82
P-46	1180,36	9068,14	957,92	22,72	27545,09	10,68	18,83	0,10	100,60	458,82	4,76	74,15	80,26	28,86
P-47	1197,00	6650,00	975,00	18,45	19410,00	9,17	16,44	0,10	68,00	387,50	1,51	51,10	69,10	24,40
P-48	1348,61	8266,93	1052,79	24,61	25338,65	10,71	20,10	0,10	98,80	446,41	3,21	65,94	86,35	29,99
P-49	1334,00	5930,00	1112,00	23,79	17410,00	11,08	19,19	0,10	90,90	522,00	4,34	76,50	84,70	30,22
P-50	2092,37	9156,63	1611,45	30,87	31636,55	16,29	27,62	0,20	135,94	884,54	12,08	92,57	136,85	35,51
P-51	1506,00	9930,00	1212,00	24,40	28080,00	11,75	20,18	0,10	91,40	539,00	4,13	59,50	96,10	30,81
P-52	1293,17	7369,48	1173,69	20,53	22259,04	10,01	18,64	0,10	77,71	490,26	2,19	60,94	74,30	23,47
P-53	2203,19	10498,01	1503,98	33,16	35278,88	16,26	27,48	0,10	150,80	776,89	14,00	73,71	143,82	37,89
P-54	1379,00	8470,00	1121,00	24,18	25710,00	11,58	19,95	0,10	79,30	532,00	4,93	59,90	83,40	30,75
P-55	2097,19	8507,01	1711,42	27,39	11302,61	14,22	24,45	0,10	112,42	721,44	10,00	90,48	117,33	28,74
P-56	1394,00	6140,00	1247,00	23,96	17050,00	11,78	18,56	0,10	80,80	582,00	4,74	66,50	84,90	25,35
P-57	2004,00	9060,00	1500,00	32,72	30750,00	15,44	24,55	0,10	197,60	707,00	12,10	93,50	136,00	34,29

P-58	1318,00	5780,00	1013,00	19,80	18680,00	9,19	16,55	0,10	73,90	342,90	3,37	40,32	67,50	23,21
P-59	1418,16	5928,14	1340,32	22,97	17275,45	11,69	20,38	0,10	66,77	594,81	4,39	60,28	86,03	27,50

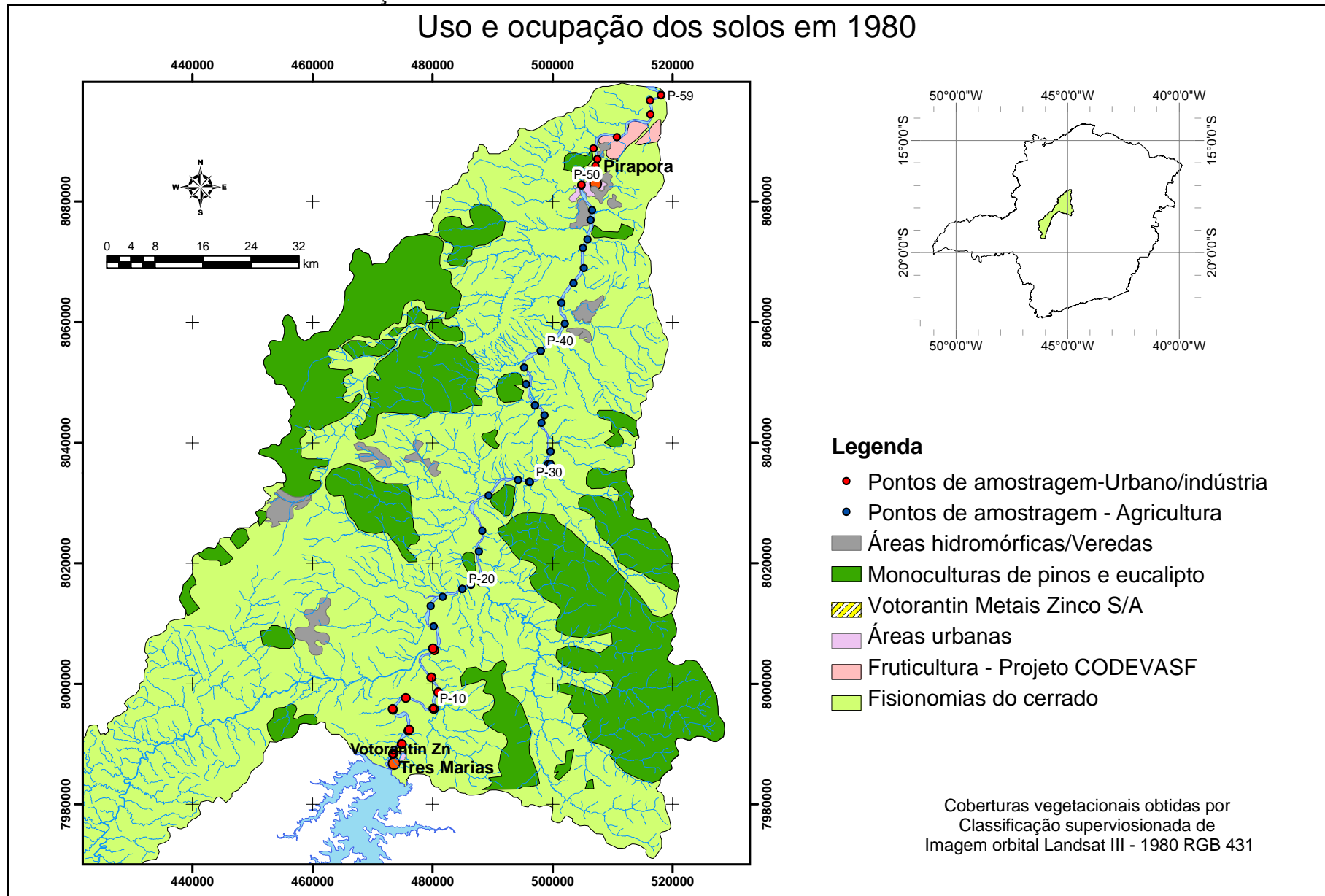
ANEXO D – PARAMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

		FOLHA DE TRABALHO PARA PARAMETROS FÍSICO-QUÍMICOS							
		Ph				TEMPERATURA			
Ponto	Março	Julho	Outubro	Janeiro	Ponto	Março	Julho	Outubro	Janeiro
P01	7,56	7,56	7,55	7,57	P01	25,2	22,3	23	26,8
P02	7	7,51	7,22	6,86	P02	25,1	22,4	25,1	28,9
P03	6,7	7,46	7,22	7,01	P03	25,2	22,3	24,1	26,5
P04	6,4	7,25	6,7	6,62	P04	26,1	22,6	25,6	27,7
P05	6,55	7,36	7,09	7,01	P05	25,8	22,3	24,7	26,1
P06	6,8	7,60	6,81	6,78	P06	25,5	22,4	26,7	26,2
P07	6,9	7,54	7,12	6,76	P07	26,4	23	23,7	24,9
P08	7	7,54	6,91	6,59	P08	28,4	23,1	27,4	27,7
P09	6,9	7,57	7,13	6,96	P09	26,3	23,4	24,6	26,1
P10	6,8	7,54	7,09	6,79	P10	26,2	23,3	24,7	26
P11	6,6	7,60	6,62	6,31	P11	28,8	22,2	28,7	25,9
P12	7,3	7,50	7,19	7,07	P12	25,4	23,3	24,7	26,2
P13	6,9	7,60	7,09	7,15	P13	26,3	23,4	24,3	26
P14	6,9	7,60	6,72	7,08	P14	26	23,2	25,7	26,2
P15	7,1	7,60	8,3	7,12	P15	26,1	23	25,6	25,8
P16	7,3	7,70	7,45	7,39	P16	25,1	20,1	29,7	27,3
P17	7	7,50	7,27	7,3	P17	26	23	24,5	25,6
P18	7	7,50	7,22	7,21	P18	25,7	22,7	24,1	25,5
P19	7,1	7,50	7,13	7,13	P19	25,8	22,6	24	25,4
P20	7	7,50	7,16	7,17	P20	26	22,4	23,7	25,5
P21	7,2	7,60	7,22	7,5	P21	25,3	22,7	24,4	25,4
P22	7,1	7,50	7,54	6,83	P22	25,1	22,4	23,8	25,4
P23	7,3	8,30	7,56	6,9	P23	24,7	21,7	28,7	26,5
P24	7,3	7,75	7,45	7,23	P24	25,1	22	23,8	25

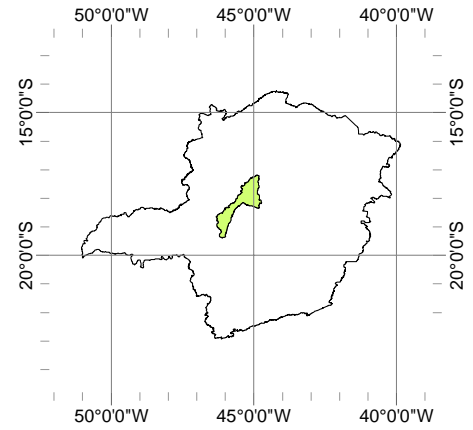
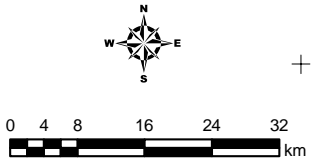
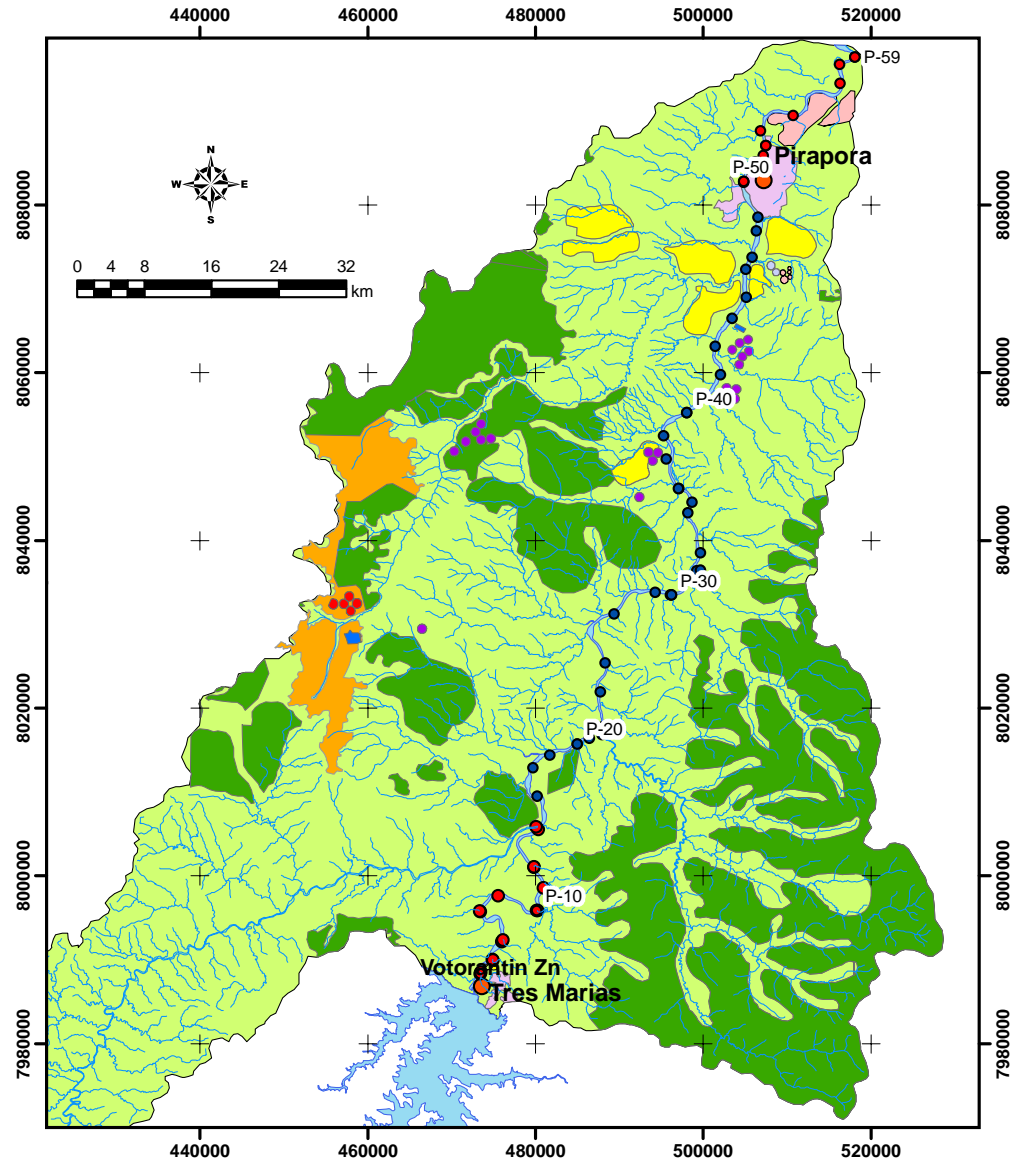
P25	7,3	7,66	7,37	7,3	P25	25,2	22	26,8	24,9
P26	7,4	7,65	7,32	7,26	P26	25,3	22,2	24,2	25
P27	7,4	7,76	7,41	7,15	P27	25,3	22,8	24,6	25,1
P28	7,4	7,74	7,43	7,16	P28	25,7	23	25,2	25,2
P29	7,2	7,74	6,98	7,23	P29	26,9	22,4	25,3	25,2
P30	7,2	7,71	7,31	7,05	P30	25,9	22,7	24,9	25,1
P31	7,3	7,72	7,36	7,22	P31	26	23,1	25,7	25,3
P32	7,2	7,72	7,02	6,9	P32	29	23,1	30,1	26,9
P33	7,2	7,69	7,36	7,03	P33	26,4	23	25,2	25,3
P34	7,2	7,72	7,34	7,08	P34	26,2	23	25,5	25,4
P35	7,2	7,73	7,35	7,15	P35	26,2	23	25,6	25,4
P36	7,1	7,73	7,34	7,17	P36	26,3	23,7	26,2	25,4
P37	7,2	7,69	7,33	7,19	P37	26,3	22,7	26	25,5
P38	7,3	7,71	7,21	7,26	P38	26,3	22,9	25,9	25,5
P39	6,3	7,74	7,4	7,14	P39	26,5	23	26,1	25,6
P40	6,4	7,72	7,42	7,14	P40	26,5	23,3	26,5	25,7
P41	6,6	7,75	7,43	7,23	P41	26,6	23	26,4	26,1
P42	6,9	7,78	7,15	7,33	P42	26,7	22,8	26,4	26
P43	7	7,73	7,29	7,16	P43	26,7	23,1	26,3	26
P44	7	7,70	7,31	7,31	P44	26,7	22,5	26,4	26,2
P45	7	8,13	6,83	7,19	P45	25,3	17,9	30,2	26
P46	6,9	7,47	7,24	6,89	P46	26,3	22,2	26,1	26,2
P47	7	7,58	7,23	7,13	P47	26,1	22,2	26,1	26,3
P48	7,1	7,63	7,26	7,17	P48	26,2	22,3	26,1	26,2
P49	7,05	7,90	7,64	7,42	P49	25,9	22,2	25,3	26,2
P50	7,3	7,82	7,2	6,99	P50	25,2	21,9	27,9	26,6
P51	7,4	7,81	7,4	7,2	P51	25,9	22,45	25,8	26
P52	7,5	7,80	7,43	7,17	P52	25,9	23	25,8	26,8
P53	7,5	7,83	7,46	7,35	P53	26	23,5	25,8	26,5
P54	7,17	8,72	8,05	7,02	P54	27,2	27,3	27,2	27,1

P55	7,5	7,84	7,61	7,3	P55	26,5	23,6	26,7	26,8
P56	7,5	7,93	7,55	7,28	P56	26,3	23,1	26,3	23,2
P57	7,5	7,59	7,66	7,32	P57	26,5	23,1	27	26
P58	7,5	8,24	7,6	7,4	P58	26,1	23	26,8	26,1
P59	7,4	8,34	7,55	7,3	P59	26,6	23	26,4	26
Média	7,0	7,7	7,3	7,1	Média	26,1	22,7	25,8	25,9
Desvio Padrão	0,3	0,2	0,3	0,2	Desvio Padrão	0,8	1,0	1,5	0,8
Mínimo	6,3	7,2	6,62	6,3	Mínimo	24,7	17,9	23	23,2
Máximo	7,6	8,7	8,3	7,6	Máximo	29	27,3	30,2	28,9

ANEXO E – MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DOS SOLOS EM 1980 E 2009



Uso e ocupação dos solos em 2009



Legenda

- Pontos de amostragem-Agricultura
- Pontos de amostragem-Urbano/indústria
- ▨ Votorantin Metais Zinco S/A
- Plantio de cana
- Plantio de café sequeiro
- Plantio de café irrigado
- Áreas de pastagem
- Plantio de milho
- Áreas urbanas
- Monoculturas de eucalipto
- Fruticultura - Projeto Codevasf
- Plantio de Soja Irrigada
- Plantio de Soja Sequeiro
- Fisionomias do cerrado

Coberturas vegetacionais obtidas por Classificação supervisionada de Imagem orbital Landsat V-2009. RGB 431