

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA – UFJF

INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

Programa de Pós-Graduação em Ecologia - PGECOL

**Fatores determinantes da qualidade da água
na Bacia Hidrográfica do rio Preto (MG/RJ)**

Antoine Philippe Casquin

Juiz de Fora

2016

ANTOINE PHILIPPE CASQUIN

**Fatores determinantes da qualidade da água
na Bacia Hidrográfica do rio Preto (MG/RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Área de concentração: Ecologia Aquática;
Análise Ambiental

Orientador: Prof. Dr. César Henrique Barra
Rocha

Mestrando: Antoine Philippe Casquin

Juiz de Fora

2016

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Casquin, Antoine Philippe.

Fatores determinantes da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do Rio Preto (MG/RJ) / Antoine Philippe Casquin. -- 2016.

232 f. : il.

Orientador: C H B Rocha

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós Graduação em Ecologia, 2016.

1. Contaminação difusa. 2. Uso e cobertura da terra. 3. Estatística não paramétrica. 4. Eixo Paraibuna-Peixe-Preto. I. Rocha, C H B, orient. II. Título.

ANTOINE PHILIPPE CASQUIN

**Fatores determinantes da qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Preto
(MG/RJ)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. César Henrique Barra Rocha
Orientador – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Pedro José de Oliveira Machado
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Henrique da Silva Pizzo
Companhia de Saneamento Municipal – CESAMA

Dedico estas páginas aos brasileiros, e especialmente aos mineiros com quem eu convivo há alguns anos, é um povo acolhedor e trabalhador que eu tive o verdadeiro prazer de conhecer.

Dedico também à minha família, que sempre me incentivou na minha busca de conhecimentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, sem a qual nunca teria chegado até aqui. Foi provavelmente meu pai que despertou em mim essa curiosidade e esse apreço que eu tenho pela natureza. Eu quero agradecer muito à minha mãe, pelo apoio nos meus estudos e na vida. Eu penso particularmente nas minhas duas irmãs, das quais fico muito orgulhoso: Coline, pelo constante esforço e pela busca, na sua área, da excelência profissional; e Julia, minha irmã caçula que começou a sua vida “independente” quando eu estava no Brasil, e nunca deixa de me alegrar quando conversamos.

Agradeço especialmente à Ana Paula, uma pessoa muito especial para mim e cujo apoio foi fundamental na reta final desse mestrado.

Eu quero mencionar três amigos, Fabiano, Tiago e Mateus, que eu fiz no Brasil, e para a vida: companheiros nas mais variadas aventuras, com quem eu compartilhei os meus melhores momentos, minhas dúvidas, minhas penas, meus sonhos, minhas receitas francesas nem sempre acertadas e muito mais coisas ainda. Quero também agradecer à alguns amigos franceses: Thibaut e Thibault, que tive o prazer de ver por alguns dias no Brasil. O Jonathan e o Redha, com quem não parei de conversar apesar da distância.

Manifesto muita gratidão pelos bolsistas e pesquisadores que fazem ou fizeram parte do Núcleo de Análise GeoAmbiental (NAGEA): eu penso em particular no Hiago, que me impressionou pela sua dedicação e procura da excelência. Agradeço muito à Bruna, à Aline, à Amanda e à Isabela por terem ajudado a fazer uma parte das correções ortográficas e tornar mais legível essa dissertação. Agradeço ao Demétrius e ao Márcio, pela companhia e também pela ajuda e os conselhos na realização dessa dissertação. Ao funcionário terceirizado Sebastião, do qual o bom humor e o café ajudaram as pesquisas realizadas no NAGEA.

Eu quero agradecer muito a meu orientador, o Prof. Dr. Cézár Henrique Barra Rocha, que sem sombra de dúvida foi um pouco mais do que um orientador para mim no Brasil. Deixo aqui registrado minha admiração pelas suas ações dentro e fora da faculdade, sempre em busca de uma melhor coabitação entre o ser humano e o meio ambiente. Agradeço por ter acreditado em mim desde o dia que me encontrou: sem ele eu nunca estaria aqui hoje.

Obrigado também aos professores que participaram da minha banca de mestrado e que ajudaram a tornar melhor o manuscrito final desse trabalho: o Prof. Dr. Pedro José de Oliveira Machado e o Prof. Dr. Henrique da Silva Pizzo.

Meus reconhecimentos à Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais – PGECOL e seus excelentes professores, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa de mestrado.

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do rio Preto (BHRP) é uma bacia estratégica por representar 15% em superfície da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. A BHRP também é um território onde vivem 700.000 habitantes, sendo mais de 500.000 concentrados na área urbana de Juiz de Fora. As pequenas cidades e as florestas muito fragmentadas se destacam no meio das pastagens que dominam a paisagem. Os solos são em geral pobres e susceptíveis a erosão, além das declividades acentuadas. A qualidade da água é alterada por fontes pontuais (indústrias, lixões, aterros, incineradores) e fontes difusas mais difíceis de identificar. Essa pesquisa teve como objetivo relacionar a qualidade da água na BHRP com fatores físicos (relevo, solos, morfometria e pluviometria) e antrópicos (uso e cobertura da terra e densidade de população). Esses fatores foram quantificados com o emprego do Geoprocessamento para as 17 sub-bacias da BHRP, cobrindo seus quatro rios principais: rio Preto, rio do Peixe, rio Paraibuna e rio Cágado. Essas sub-bacias correspondem aos pontos de monitoramento de qualidade da água do IGAM. A evolução espacial da qualidade da água do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto foi avaliada ao atravessar a área urbana de Juiz de Fora e ao ser diluída a jusante pelos rios principais dessa Bacia. Essa primeira etapa permitiu determinar que os parâmetros OD e DBO foram os mais impactados pela área urbana de Juiz de Fora e que os parâmetros Ferro Dissolvido, Manganês Total, Fósforo Total e *Escherichia Coli* sofriram alterações crônicas na globalidade da BHRP, classificando assim a suas águas como incompatíveis com os usos pretendidos. Contaminações com metais (cádmio, chumbo e zinco) foram detectadas a montante e a jusante de Juiz de Fora, indicando o impacto pontual de indústrias nesses parâmetros. Correlações não paramétricas foram calculadas entre os fatores e as variáveis. Observou-se uma grande interdependência dos fatores físicos e antrópicos. A análise das correlações entre os fatores e as variáveis de qualidade da água apontou que o uso e cobertura da terra foi o fator mais determinante da qualidade da água da BHRP. Concentrações altas de manganês, de chumbo e de cianetos livres foram encontradas na BHRP sem explicação pelas características das suas sub-bacias. A classe “área urbana densa” piorou quase todos os parâmetros e a classe “vegetação arbórea e arbustiva” melhorou em quase todos. A classe “vegetação rasteira” piorou os parâmetros relativos a contaminação fecal e os nutrientes, sobretudo na estação chuvosa. Esses resultados indicam que as contaminações pontuais e difusas da água devem ser investigadas e fiscalizadas com mais efetividade na BHRP, com destaque para a difusa, e que, no mínimo, as leis de preservação e proteção dos recursos hídricos devem ser aplicadas.

Palavras-chave: Contaminação difusa. Uso e cobertura da terra. Estatística não paramétrica. Eixo Paraibuna-Peixe-Preto.

RESUMÉ

Le bassin hydrographique de la rivière Preto (BHRP) est un bassin stratégique représentant 15% de la surface du bassin hydrographique de la rivière Paraíba do Sul. La BHRP est aussi un territoire où vivent 700.000 habitants, dont plus de 500 000 concentrés dans la zone urbaine de Juiz de Fora. De petites villes et des fragments de forêts au milieu de vastes pâturages composent le paysage. Les sols sont généralement pauvres et sensibles à l'érosion, en plus des pentes raides. La qualité de l'eau est altérée par des sources ponctuelles (industries, décharges, incinérateur) et des sources diffuses plus difficiles à identifier. Cette étude a eu pour objectif de relier la qualité de l'eau dans BHRP à des facteurs physiques (topographie, sols, morphométries et précipitations) et anthropiques (occupation et utilisation du sol et densité de population). Ces facteurs ont été déterminés à travers l'utilisation de la géomatique pour les 17 sous-bassins de la BHRP couvrant ses quatre principaux fleuves : le rio Preto, le rio do Peixe, le rio Paraibuna et le rio Cágado. Ces sous-bassins correspondent aux points de contrôle de la qualité de l'eau de IGAM (Institut de Gestion des Eaux du Minas Gerais). L'évolution spatiale de la qualité de l'eau suivant un axe Paraibuna-Peixe-Preto a été étudiée de la traversée de la zone urbaine de Juiz de Fora et jusqu'aux dilutions en aval par les principales rivières de ce bassin. Cette première étape a permis de déterminer que les paramètres OD et de DBO ont été les plus touchés par la zone urbaine de Juiz de Fora et que les paramètres « fer dissous », « manganèse total », « phosphore total » et « *Escherichia Coli* » subissent des altérations chroniques dans la globalité de la BHRP, classifiant ainsi ses eaux comme incompatibles avec l'utilisation prévue par la législation. Des contaminations aux métaux (cadmium, plomb et zinc) ont été détectées en amont et en aval de Juiz de Fora, indiquant l'impact ponctuel des industries. Des corrélations non paramétriques ont été calculées entre les caractéristiques naturels et anthropiques des sous-bassins (facteurs) et les paramètres de qualité de l'eau. Une grande interdépendance des facteurs physiques et humains a été constatée. L'analyse des corrélations entre les facteurs et les paramètres de la qualité de l'eau a montré que l'occupation et l'utilisation du sol a été le facteur le plus déterminant de la qualité de l'eau de la BHRP. Des concentrations élevées de manganèse, de plomb et de cyanure libre ont été trouvés dans BHRP sans pouvoir être expliqués par les caractéristiques de leurs sous-bassins. La classe «aire urbaine dense» a empiré presque tous les paramètres et la classe «végétation arborée ou arbustive» classe les a presque tous améliorés. La classe «pâturage» a empiré les paramètres relatifs à la contamination fécale et augmenté les concentrations de macronutriments (azote et phosphore), en particulier pendant la saison des

pluies. Ces résultats indiquent que la contamination ponctuelle et particulièrement la contamination diffuse de l'eau doit être étudiée et surveillée de manière plus efficace dans la BHRP, et qu'au minimum, les lois de conservation et de protection des ressources hydriques doivent être appliquées.

Mots-clés : contamination diffuse ; occupation et utilisation du sol. Statistiques non paramétriques. Axe Paraibuna-Peixe-Preto.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	23
OBJETIVOS	26
Objetivo principal.....	26
Objetivos secundários	26
ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	26
CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA	28
1.1. VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA	28
1.1.1. Variáveis físicas	29
1.1.1.1. Cor verdadeira	29
1.1.1.2. Temperatura da água	30
1.1.1.3. Turbidez.....	30
1.1.1.4. Série de sólidos.....	31
1.1.2 Variáveis químicas	32
1.1.2.1. Alcalinidade Total	32
1.1.2.2. Condutividade elétrica.....	32
1.1.2.3. Dureza Total	33
1.1.2.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)	33
1.1.2.5. Oxigênio Dissolvido.....	34
1.1.2.6. Demanda Bioquímica de Oxigênio	35
1.1.2.7. Demanda Química de Oxigênio	35
1.1.2.8. Substâncias tensoativas	36
1.1.2.9. Metais pesados	36
1.1.2.10. Outros Metais	38
1.1.2.11. Nutrientes	40
1.1.2.12. Elementos simples não metálicos.....	43
1.1.3. Variáveis microbiológicas.....	47
1.1.3.1. Coliformes Totais	47
1.1.3.2. Escherichia coli	47
1.1.3.3. Estreptococos fecais ou enterococos	48
1.1.4. Variáveis hidrobiológicas.....	48

1.1.4.1. Clorofila-a	48
1.1.4.2. Feofitina-a	49
1.2. FATORES ANTRÓPICOS, FATORES FÍSICOS E QUALIDADE DA ÁGUA.....	50
1.2.1. Alterações da paisagem.....	50
1.2.2. Principais mecanismos influenciando a qualidade da água	50
1.2.3. Mapeamento do uso e cobertura da terra	52
1.2.4. Contaminação difusa e contaminação pontual.....	53
1.2.5. Escala da análise: <i>Buffer</i> ou <i>Bacia</i> ?	53
1.2.6. Ordem do curso d'água	54
1.2.7. Metodologias Estatísticas.....	56
1.2.7.1. Normalidade dos dados: estatística paramétrica e não paramétrica.....	58
1.2.7.2. Importância da visualização dos dados	61
1.2.7.3. Correlação e causalidade	63
1.2.7.4. Interações dos fatores	63
1.2.7.5. O valor-p não explica tudo	63
1.2.7.6. Variáveis quantitativas, variáveis qualitativas	64
1.2.7.7. Métodos implícitos	64
1.2.7.8. Métodos explícitos	66
CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	72
2.1. RIOS PRINCIPAIS	74
2.2. PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	76
2.3. DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS	78
2.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS SUB-BACIAS.....	80
2.4.1. Relevo e características morfométricas.....	80
2.4.1.1. Preenchimento do modelo digital de elevação (MDE)	80
2.4.1.2. Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente	83
2.4.1.3. Delimitação das sub-bacias	84
2.4.1.4. Índices morfométricos	88
2.4.1.5. Ordem dos rios	91
2.4.1.6. Hipsometria	93
2.4.1.7. Declividade.....	96
2.4.2. Pluviometria	99

2.4.3. Tipos de solos.....	101
2.5. CARACTERÍSTICAS ANTROPOGÊNICAS DAS SUB-BACIAS.....	106
2.5.1. Hidrografia de referência	106
2.5.2. Densidade de população e número de habitantes.....	107
2.5.3. Uso e cobertura da terra	111
2.5.3.1. Vegetação original.....	112
2.5.3.2. Base de dados GlobeLandCover30-2010.....	114
2.5.3.3. Base de dados da Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (AGEVAP)	119
2.5.3.4. Conclusão:.....	126

CAPÍTULO 3: REALIZAÇÃO DE UM MAPA DE USO E COBERTURA DA TERRA DA BHRP (2015).....	127
3.1. SATÉLITE LANDSAT 8, SENSOR OLI/TIRS	127
3.2. PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA A REALIZAÇÃO DO MAPA DE USO E COBERTURA DA TERRA	129
3.3. CORREÇÃO TOPOGRÁFICA	130
3.4. SEGMENTAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DAS CLASSES COM GEOBIA PARA ARCGIS	130
3.4.1. Segmentação	130
3.4.2. Definição das classes e classificação	131
3.4.3. Resultado da classificação	133
3.4.4. Comparação visual entre as bases e imagens LANDSAT 8 OLI.....	135
3.4.5. Validação da classificação	137
3.4.6. Uso e cobertura nas sub-bacias e nas faixas ripárias segundo mapa realizado ...	140
3.5. EMPREENDIMENTOS DE ALTO POTENCIAL DE IMPACTO NA BHRP.....	143

CAPÍTULO 4: QUALIDADE DA ÁGUA NA BHRP: EVOLUÇÃO ESPACIAL DA REPRESA DE CHAPÉU D’UVAS ATÉ A CONFLUÊNCIA COM O RIO PARAÍBA DO SUL	147
4.1. METODOLOGIA.....	147
4.2. USO E COBERTURA DA TERRA AO LONGO DO EIXO PPP.....	149
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	150
4.3.1. Variáveis Físicas	150

4.3.2. Variáveis Químicas	153
4.3.2.1. Metais Pesados e arsênio	157
4.3.2.2. Outros Metais	159
4.3.2.3. Elementos simples não metálicos	161
4.3.2.4. Nutrientes	165
4.3.3. Variáveis microbiológicas.....	167
4.3.4. Variáveis hidrobiológicas.....	169
4.4. CONCLUSÃO.....	170

CAPÍTULO 5: FATORES DETERMINANTES DA QUALIDADE DA ÁGUA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PRETO..... 171

5.1. INTERDEPENDÊNCIA DOS FATORES	172
5.1.1. Tipo de solo.....	172
5.1.2. Fatores geográficos	173
5.1.3. Características Morfométricas	173
5.1.4. População e densidade	174
5.1.5. Uso e cobertura da terra	175
5.1.6. Uso e cobertura da terra e tipo de solo.....	176
5.1.7. Uso e cobertura da terra e fatores geográficos	177
5.1.8. Uso e cobertura da terra e demografia	178
5.1.9. Outras correlações.....	180
5.2. CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA.....	181
5.2.1. Variáveis Físicas	183
5.2.2. Variáveis Químicas	184
5.2.3. Íons dissolvidos.....	185
5.2.4. Metais	186
5.2.5. Nutrientes	187
5.2.6. Variáveis biológicas.....	187
5.2.7. Considerações gerais.....	187
5.3. CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS DE QUALIDADE DA ÁGUA E CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS.....	188
5.3.1. Escolha dos fatores (variáveis independentes).....	188

5.3.2. Variáveis físicas	191
5.3.3. Variáveis químicas	195
5.3.4. Íons dissolvidos	199
5.3.5. Metais	203
5.3.6. Nutrientes	208
5.3.7. Variáveis biológicas	212
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	215
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo do nitrogênio.....	41
Figura 2: Coliformes totais, Coliformes fecais e <i>E. Coli</i>	47
Figura 3: Interações entre componentes das Bacias Hidrográficas e suas consequências na qualidade da água.	52
Figura 4: Três escalas espaciais amplamente usadas para relacionar características da paisagem com as condições físicas/químicas/biológicas encontradas no ponto de amostragem. Adaptado de Morley e Karr (2002).	54
Figura 5: Ordem dos cursos d'água segundo Strahler (1957)	55
Figura 6: Função de repartição de uma variável seguindo uma lei normal.	58
Figura 7: O estimador de declive de Theil-Sen é menos sensível à valores extremos	61
Figura 8: Representação gráfica do quarteto de Ascombe (1973).....	62
Figura 9: Métodos estatísticos para a avaliação de fatores determinando a qualidade da água.....	69
Figura 10: Procedimento para a delimitação das sub-bacias e suas caracterizações.....	79
Figura 11: O preenchimento de dados SRTM com o método escolhido evidencia resultados satisfatórios.....	80
Figura 12: Procedimento para o preenchimento dos vazios por interpolação a partir dos vizinhos para dados SRTM-4 / 1 ArcSec.....	82
Figura 13: Do MDE ao MDEHC.....	84
Figura 14: As sub-bacias correspondendo aos pontos de coleta são geradas a partir do MDEHC	85
Figura 15: Porcentagem de cada tipo de solo para as sub-bacias dos pontos monitorados....	105
Figura 16: O georeferenciamento da hidrografia 1:250.000 (roxo) foi melhor do que o georeferenciamento da hidrografia 1:50.000 (azul)	107
Figura 17: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.....	116
Figura 18: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.....	117
Figura 19: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.....	118
Figura 20: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.....	123

Figura 21: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.....	124
Figura 22: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.....	125
Figura 23: Etapas da realização do mapa de uso e cobertura da terra.....	129
Figura 24: Segmentação de uma imagem LANDSAT-8 (composição de bandas 6-5-4) com o plug-in GEOBIA.	131
Figura 25: Identificação das classes de uso e cobertura da terra: extratos da paisagem da BHRP	132
Figura 26: Comparação visual entre as três bases de uso e cobertura da terra.....	136
Figura 27: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.	141
Figura 28: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.	142
Figura 29: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.	142
Figura 30: Gráficos realizados para a avaliação da evolução espacial dos parâmetros de qualidade da água ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto (PPP).....	148
Figura 31: Evolução do uso e cobertura da terra ao longo do Eixo PPP a nível de bacia segundo mapa realizado para esse estudo.	149
Figura 32: Evolução espacial das variáveis físicas referentes aos sólidos e turbidez ao longo do Eixo PPP.....	151
Figura 33: Evolução espacial das variáveis físicas temperatura e cor verdadeira s ao longo do Eixo PPP.....	152
Figura 34: Evolução espacial de variáveis químicas de qualidade da água ao longo do Eixo PPP.	154
Figura 35: Evolução espacial de variáveis químicas de qualidade da água ao longo do Eixo PPP.	156
Figura 36: Evolução espacial dos metais pesados e do parâmetro arsênio total ao longo do Eixo PPP.	158
Figura 37: Evolução espacial dos elementos Bário, Ferro, Manganês e Zinco presentes na água ao longo do Eixo PPP.	160

Figura 38: Evolução espacial dos elementos Cálcio total, Cloreto total, Potássio dissolvido e Sódio dissolvido na água ao longo do Eixo PPP.....	162
Figura 39: Evolução espacial dos elementos Magnésio Total. Cianeto livre e Sulfato total na água ao longo do Eixo PPP.....	164
Figura 40: Evolução espacial dos elementos da série de nitrogênio na água ao longo do Eixo PPP.	166
Figura 41: Evolução do parâmetro Fósforo Total ao longo do Eixo PPP escala euclidiana (normal) e escala logarítmica	167
Figura 42: Evolução espacial das variáveis microbiológicas ao longo do Eixo PPP.....	168
Figura 43: Evolução espacial das variáveis hidrobiológicas ao longo do Eixo PPP.....	169
Figura 44: Densidade de habitantes em função do número de habitantes nas sub-bacias da BHRP.....	175
Figura 45: Densidade de população em função da ocupação urbana densa e da cobertura por vegetação rasteira com representação dos declives de Sen associados com nível de confiança de 95%.....	179
Figura 46: Densidade de população em função da cobertura por vegetação arbórea com representação dos declives de Sen associados com nível de confiança de 95%.	180
Figura 47: Gráficos de dispersão evidenciando as correlações muito fortes entre usos e coberturas a nível de bacia (Eixo x) e a nível de <i>buffer</i> de 200m (Eixo y).	190
Figura 48: Ocupação esparsa ou por pastagens (PaRuBac) em função da ocupação por área urbana densa (UrbaBac).	191
Figura 49: Cobertura por vegetação arbórea (ArboBac) em função da cobertura por vegetação arbustiva (ArbuBac).	191
Figura 50: Boxplot do parâmetro SST na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.....	194
Figura 51: Boxplot do parâmetro DBO (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.....	198
Figura 52 Boxplot do parâmetro Substâncias Tensioativas (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.	199
Figura 53: Boxplot do parâmetro Cianetos Livres (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha cinza marca a concentração limite aceita para águas de Classe 2 segundo o CONAMA.....	201

Figura 54: Boxplot do parâmetro Magnésio Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP	202
Figura 55: Boxplot do parâmetro Sulfatos Totais (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.	203
Figura 56: Boxplot do parâmetro Cádmi Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.	205
Figura 57: Boxplot do parâmetro Zinco Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.	205
Figura 58: Boxplot do parâmetro Chumbo Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.	206
Figura 59: Nas imagens multiespectrais é possível ver uma mancha de sombra em volta da usina Arcelor-Mittal.	206
Figura 60: Boxplot do parâmetro Ferro Dissolvido (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.	207
Figura 61: Boxplot do parâmetro Manganês Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.	208
Figura 62: Boxplot do parâmetro EColi (NMP/100mL) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2; as linhas azuis definem as classes de balneabilidade (BRASIL, 2000).	212

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1: Localização de estudos citados nessa dissertação	57
Mapa 2: Localização da área de estudo e sedes dos municípios inclusos.	73
Mapa 3: Estações de monitoramento da qualidade da água do IGAM funcionando em 2013 e 2014	78
Mapa 4: Sub-bacias correspondendo aos pontos monitorados pelo IGAM (1/2).....	86
Mapa 5: Sub-bacias correspondendo aos pontos monitorados pelo IGAM (2/2).....	87
Mapa 6: Ordem dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do rio Preto segundo Strahler (1957)	92
Mapa 7: Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do rio Preto.	95
Mapa 8: Declividades de acordo com as classes de relevo na Bacia Hidrográfica do rio Preto	98
Mapa 9: Precipitação média anual (1977-2006) em milímetros na Bacia Hidrográfica do rio Preto.....	100
Mapa 10: Tipo de solo por unidade de mapeamento segundo a EMBRAPA na Bacia Hidrográfica do rio Preto.....	103
Mapa 11: Solos da Bacia Hidrográfica do rio Preto, por percentagem de cada tipo de solo segundo as definições das unidades de mapeamento da EMBRAPA	104
Mapa 12: Densidade de população por setor censitário segundo dados do censo demográfico de 2010 na Bacia Hidrográfica do rio Preto (IBGE, 2010).....	109
Mapa 13: Vegetação original da Bacia Hidrográfica do rio Preto segundo projeto RADAMBRASIL(1983)	113
Mapa 14: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto – Base: GlobeLandCover30-2010	115
Mapa 15: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto – Base: AGEVAP/COHIDRO (2013).....	121
Mapa 16: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto em 2015, obtido pelo autor.....	134
Mapa 17: Validação da classificação de uso e cobertura da terra realizada pelo autor.....	139
Mapa 18: Principais empreendimentos de alto potencial poluidor a proximidade de Juiz de Fora	145
Mapa 19: Um incinerador se localiza no baixo curso da BHRP	146

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Abreviações e classificação das variáveis de qualidade da água.....	29
Tabela 2: Concentração máxima (em $\mu\text{g.L}^{-1}$) de fósforo permitida segundo ambiente e classe do corpo d'água	43
Tabela 3: Estatísticas descritivas do quarteto de Ascombe (1973)	62
Tabela 4: Nomes dos pontos de amostragem nesse trabalho.....	77
Tabela 5: Índices de bacia e seus significados	88
Tabela 6: Declividades dos rios e índices de bacia	90
Tabela 7: Ordem (Stralher) dos cursos d'água nos pontos monitorados	93
Tabela 8: Altitude e declividade média das sub-bacias da BHRP.....	99
Tabela 9: Precipitação média anual em mm para as sub-bacias da BHRP.....	101
Tabela 10: Número de habitantes (Pop) e densidade de população (Dens) nas sub-bacias da BHRP e faixas ripárias de 100 metros e 200 metros.	111
Tabela 11: Porcentagem de Vegetação arbórea e Área urbanizada nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo a base de dados GlobalLandCover30-2010.	119
Tabela 12: Classes de uso e cobertura definidas no mapa de uso e cobertura (AGEVAP/COHIDRO,2013).....	122
Tabela 13: Porcentagem de Vegetação arbórea densa e Área urbanizada nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo a base de dados AGEVAP/COHIDRO (2013).....	126
Tabela 14: Bandas e comprimentos de onda associados a imagens LANDSAT 8 OLI/TIRS	128
Tabela 15: Identificação das classes de uso e cobertura da terra: legenda	132
Tabela 16: Descrição das classes de uso e cobertura da terra adotadas para a realização do mapa da BHRP.....	133
Tabela 17: Matriz de validação do mapa de uso e cobertura da terra realizado para essa dissertação	138
Tabela 18: Classificação do k de Cohen.....	139
Tabela 19: Porcentagem de uso e cobertura para todas as classes definidas nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo Mapa 16, realizado pelo autor.	143
Tabela 20: Correlações entre tipos de solos na BHRP	172
Tabela 21: Correlações entre fatores geográficos na BHRP	173
Tabela 22: Correlações entre as características morfométricas das sub-bacias da BHRP	174

Tabela 23: Correlações entre população e densidade nas sub-bacias da BHRP	174
Tabela 24: Correlações entre os usos e coberturas em faixas ripárias e nas sub-bacias da BHRP	176
Tabela 25: Correlações entre o uso e cobertura e o tipo de solo nas sub-bacias da BHRP....	177
Tabela 26: Correlações entre o uso e cobertura da terra e fatores geográficos nas sub-bacias da BHRP.....	178
Tabela 27: Correlações entre o uso e cobertura da terra e demografia nas sub-bacias da BHRP	178
Tabela 28: Resumo das correlações entre os fatores investigados nessa Dissertação.....	181
Tabela 29: Correlações entre variáveis de qualidade da água.	182
Tabela 30: Ordem adotada para a análise das correlações entre variáveis de qualidade da água	183
Tabela 31: Porcentagem de correlações com nível de confiança superior a 95% entre as categorias de variáveis de qualidade da água	187
Tabela 32: Variáveis de qualidade da água ordenadas por número de correlações com nível de confiança superior a 95%	188
Tabela 33: Coeficientes de correlação associados à Figura 47	190
Tabela 34: Correlações e declives de Sen entre variáveis físicas e características das sub-bacias.	193
Tabela 35: Correlações e declives de Sen entre variáveis químicas e características das sub-bacias.	196
Tabela 36: Correlações e declives de Sen entre os íons dissolvidos não metálicos e características das sub-bacias.	200
Tabela 37: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de metais e características das sub-bacias.	204
Tabela 38: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de nutrientes e características das sub-bacias.	209
Tabela 39: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de nutrientes e características das sub-bacias.	213

Introdução

A Terra é as vezes chamada de “Planeta Azul” e é até hoje o único planeta conhecido contendo água no estado líquido cobrindo a maior parte da sua superfície. A água doce, porém, não é homogeneamente distribuída no planeta. Estima-se que 97% da água encontra-se nos mares e oceanos, sendo salgada, e que somente 3% seja doce. Desses 3%, uma fração de apenas 0,37% corresponde a águas superficiais de fácil acesso para o ser humano; o restante encontra-se dentro de geleiras, nos polos e em altitude, sob forma sólida ou em aquíferos profundos (GLEICK, 1993).

A água representa 65 % da massa do corpo humano adulto e não se conhece nenhuma forma de vida na Terra sem água. Na sua vida cotidiana, o ser humano precisa de água potável a todos os instantes: dessedentação, lavagem e cozimento de alimentos, higiene pessoal, lavagem de roupa etc. Esse uso direto da água representa em torno de 200 litros por dia por habitante no Brasil (VON SPERLING, 2005). Entretanto, essa quantidade é quase desprezível se comparada com o uso indireto.

O *World Wildlife Fund* (WWF) definiu a pegada ecológica de uma entidade (país, cidade, pessoa ...) como: “o tamanho das áreas produtivas de terra e de mar, necessárias para gerar produtos, bens e serviços que sustentam seus estilos de vida”. Da mesma forma foi introduzido o conceito de “pegada hídrica”. Ele visa a avaliar a quantidade total de água necessária para a produção de um bem de consumo ou de um alimento. A pegada hídrica de um produto ou alimento leva em consideração a água incorporada, a água evaporada e a água poluída pelo processo de produção (HOEKSTRA et al., 2011).

Alimentos comuns tem uma pegada hídrica mais elevada do que o sentido comum levaria a pensar: o café tem uma pegada hídrica de 22,5 metros cúbicos de água por quilograma de produto final (CHAPAGAIN & HOEKSTRA, 2007); o leite de $1,19 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ e a carne bovina de $21,8 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2012a). A produção de energia hidrelétrica, que representa 66,2% da energia produzida no Brasil em 2015 (BRASIL, 2016), também tem uma forte pegada hídrica, através principalmente do aumento da evapotranspiração proporcionada pelos reservatórios (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2012b).

Entendemos, portanto, que a água é necessária para a sociedade moderna não somente diretamente dentro dos domicílios, mas também nas formas de produção que sustentam nosso modo de vida.

No Brasil, o clima é, na maior parte do território, tropical/sub-tropical úmido ou equatorial, com índices pluviométricos médios a muito elevados, garantindo teoricamente, do ponto de vista quantitativo, uma boa disponibilidade hídrica se comparada com a média do nosso Planeta. O “Polígono das secas” no Nordeste do Brasil, caracterizado pelo seu clima semiárido, é uma exceção. A disponibilidade hídrica é um conceito primeiramente quantitativo, mas podendo e devendo ser estendido a questões de qualidade, por ser o suporte de quase todas as atividades da vida e da produção humana, um dos fatores decisivos para o desenvolvimento econômico e social.

A Lei Federal nº 9433 de 1997 (BRASIL, 1997) instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e definiu no seu primeiro artigo a água como um bem de domínio público e um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; cujo uso prioritário é o consumo humano e a dessedentação animal em caso de escassez. Essa lei definiu a Bacia Hidrográfica como a unidade territorial para o gerenciamento dos recursos hídricos.

A PNRH (BRASIL, 1997) tem nos seus objetivos a necessária disponibilidade de água em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos para a atual e as futuras gerações. Os padrões de qualidade da água são definidos em função dos seus usos preponderantes na Resolução CONAMA nº 357 de 2005 do (BRASIL, 2005a) e existem 5 classes para as águas doces superficiais: da “Classe especial” para os usos mais exigentes até a “Classe 4” para os usos menos exigentes.

Em 2014 e 2015, quase 20 anos depois da publicação da PNRH, índices pluviométricos abaixo do normal na região Sudeste do Brasil levaram a se falar muito de “crise hídrica”: as represas para o abastecimento público da região metropolitana de São Paulo e de outras metrópoles do Sudeste estavam quase secas e os níveis dos reservatórios das hidrelétricas bem abaixo do normal, ameaçando o País de um blecaute e encarecendo a energia. A maior parte da população e a mídia generalista colocaram a “culpa” na falta de chuva. Se o papel da variabilidade interanual do clima e das mudanças climáticas não pode ser ignorado, o parâmetro que se destacou para os profissionais da área e áreas afins foi o descumprimento generalizado das leis de proteção dos mananciais e dos cursos d’água (BRASIL, 2012) e a falta de planejamento no Sudeste brasileiro.

Nas diretrizes da PNRH (BRASIL, 1997) a ênfase foi colocada na gestão sistêmica e na integração dos aspectos quantitativos e qualitativos, recomendando a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso e cobertura da terra. De fato, os dois aspectos são bastante ligados naturalmente. O maior florestamento da bacia hidrográfica permite, ao mesmo tempo,

manter um fluxo de base mais regular nos rios, mesmo em caso de seca prolongada, e também uma melhor qualidade da água. Esse papel da vegetação arbórea natural é um dos fundamentos científicos do Novo Código Florestal (BRASIL, 2012).

Nessa dissertação, a Bacia Hidrográfica do rio Preto (BHRP), situada nos estados de Minas Gerais (MG) e Rio de Janeiro (RJ), foi o objeto de estudo. Com o intuito de colaborar com o planejamento e gestão da água dessa Bacia, foram discutidos os fatores físicos e antrópicos que influíram sobre a qualidade das suas águas.

Segundo a Deliberação Normativa COPAM n° 016 de 1996 (MINAS GERAIS, 1996), as águas da BHRP são enquadradas em 3 classes: “Classe Especial”, “Classe 1” e “Classe 2”. A Classe 2 é a menos restritiva das três, e corresponde, então, ao padrão mínimo de qualidade a manter para qualquer água da BHRP. Os requisitos sobre a qualidade da água para águas de Classe 2 serviram de referencial para comparação das águas analisadas dentro dessa Bacia. As águas de Classe 2 são destinadas: “ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA n° 274 de 2000 (BRASIL, 2000); à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e à aquicultura e à atividade de pesca” (BRASIL, 2005a).

Para realizar esse trabalho, a tecnologia base foi o Geoprocessamento, definido como: “uma tecnologia transdisciplinar, que, através da axiomática da localização e do processamento de dados geográficos integra várias disciplinas, equipamentos, programas, processos, entidades, dados, metodologias e pessoas para coleta, tratamento, análise e apresentação de informações associadas a mapas digitais georreferenciados” (ROCHA, 2007). A montagem das bases de dados dessa Dissertação, toda parte espacial, dados físico-ambientais, sociais, principalmente a carta de uso e cobertura da terra, necessitaram dessa tecnologia.

O foco dessa dissertação também foi levantar os fatores determinantes da qualidade da água na BHRP. A abordagem geral foi estatística e não pretendeu modelar a qualidade da água na Bacia. Foi apresentada uma revisão baseada em artigos predominantemente recentes, detalhando várias escolhas metodológicas e ferramentas estatísticas usadas para determinar esses fatores, destacando resultados relevantes.

Objetivos

Objetivo principal

Identificar os fatores que determinam a qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Preto (BHRP).

Objetivos secundários

Realizar um mapa de uso e cobertura da terra da BHRP e comparar com bases existentes.

Caracterizar as sub-bacias que compõem a BHRP: uso e cobertura da terra, tipos de solos, características morfométricas das sub-bacias, relevo e densidade populacional.

Comparar o uso e cobertura da terra e a densidade populacional nas sub-bacias e em faixas ripárias de 100m e 200m.

Estudar a evolução da qualidade da água ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto, apresentando um gradiente de urbanização.

Determinar as interdependências entre uso e cobertura da terra, tipos de solos, morfometria das sub-bacias, relevo e densidade populacional a fim de melhor identificar os fatores determinantes.

Estudar a interdependência das variáveis de qualidade da água.

Comparar os resultados com a literatura.

Organização da dissertação

Essa dissertação está organizada em capítulos da seguinte forma:

Um capítulo de revisão de literatura, separado em duas partes. A primeira parte é uma apresentação das variáveis de qualidade da água, seus significados ambientais e as possíveis fontes das suas alterações na água. A segunda parte da revisão é focada sobre trabalhos visando a estabelecer correlações entre o uso e cobertura da terra ou outros fatores e a qualidade da água. Várias escalas espaciais e diferentes metodologias no que se refere ao uso da estatística foram abordadas.

O segundo capítulo se refere à caracterização da área de estudo. Os pontos de amostragem da água são descritos e as suas respectivas sub-bacias delimitadas. Para cada sub-bacia, o relevo, a densidade de população, os tipos de solos, as características morfométricas e

o uso e a cobertura da terra são caracterizados, numa abordagem principalmente numérica. Duas bases de uso e cobertura da terra preexistentes foram comparadas.

O terceiro capítulo trata da confecção de um Mapa de uso e cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do rio Preto. O capítulo apresenta e justifica as escolhas metodológicas e apresenta a validação desse mapa utilizado como base para os itens seguintes.

No capítulo 4 foi analisada a evolução espacial dos parâmetros de qualidade da água ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto, desde a Represa de Chapéu d'Uvas (cabeceira do rio Paraibuna) até a foz no rio Paraíba do Sul. Uma representação gráfica sintética e as informações obtidas no capítulo precedente permitiram a formulação de hipóteses sobre os fatores que determinam a qualidade da água. Os dados de qualidade da água foram comparados com a legislação vigente a fim de identificar as variáveis que mereceriam maior atenção.

O quinto capítulo utilizou os resultados de todos os precedentes. Numa primeira parte se analisa a interdependência dos fatores, permitindo reduzir o número deles para facilitar posteriores análises. As correlações entre as variáveis de qualidade da água na BHRP foram estudadas e a influência dos fatores restantes foi determinada através do uso de testes e indicadores estatísticos não paramétricos. A separação dos dados de qualidade em duas séries segundo a sazonalidade da pluviometria na BHRP permitiu avaliar a poluição difusa.

Capítulo 1: Revisão de literatura

1.1. Variáveis de qualidade da água

A água é considerada o solvente universal e poucos são os elementos que não são dissolvidos pela ação da água. Por essa razão tanto as águas superficiais como subterrâneas contém uma grande diversidade de elementos químicos, sendo dissolvidos ou particulados.

Uma seleção de parâmetros (Tabela 1), seus significados ambientais e suas possíveis fontes são apresentados nessa parte da revisão. Foram descritos 39 parâmetros, abrangendo quase todas as problemáticas de qualidade da água: contaminação por metais pesados, mineralização da água, eutrofização, contaminação bacteriológica, etc. Os poluentes emergentes (hormônios, cafeína, etc.) não foram abordados por não existir trabalhos nem dados sobre o assunto na BHRP.

Os parâmetros apresentados nessa parte da dissertação são discutidos ao longo desse trabalho, nos capítulos de evolução espacial da qualidade ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto e o capítulo tratando dos fatores determinantes da qualidade da água. Os parâmetros escolhidos, a classificação e as abreviações adotadas estão apresentados na Tabela 1.

As variáveis foram organizadas segundo a classificação que a CETESB adotou no seu documento intitulado “Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem.” (CETESB, 2009). Subclasses foram determinadas para as variáveis químicas e físicas de maneira a melhor organizar os resultados e as discussões.

Essa revisão se baseou principalmente na documentação técnica da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo) e da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), no livro de “Introdução à qualidade da água e tratamento de esgoto” de Von Sperling (2005), na legislação brasileira e do estado de Minas Gerais. Para os metais, os sumários técnicos da Organização Mundial da Saúde e da CETESB apoiaram essa revisão.

Tabela 1: Abreviações e classificação das variáveis de qualidade da água

Variáveis			
Físicas	Químicas	Microbiológicas	Hidrobiológicas
Cor verdadeira (Cor)	Alcalinidade Total (AlcaTot)	Coliformes Totais (ColiTot)	Clorofila-a (ClA)
Temperatura da água (Temp)	Dureza Total (DurTot)	Escherichia coli (Ecoli)	Feofitina-a (Feoft)
Turbidez (Tur)	Condutividade elétrica (Cond)	Estreptococos fecais (EstrFec)	
	Potencial Hidrogeniônico (pH)		
Serie de sólidos			
Sólidos em Suspensão Totais (SST)	Oxigênio dissolvido (OD)		
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)		
Sólidos Totais (ST)	Demanda Química de Oxigênio (DQO)		
	Substâncias tensoativas (SubTens)		
	Metais Pesados		
	Cádmio Total (CdTot)		
	Cobre Dissolvido (CuDiss)		
	Chumbo Total (PbTot)		
	Outros Metais		
	Bário Total (BaTot)		
	Ferro Dissolvido (FeDiss)		
	Manganês total (MnTot)		
	Zinco total (ZnTot)		
	Elementos não metálicos		
	Arsênio Total (AsTot)		
	Cálcio Total (CaTot)		
	Cloreto Total (ClTot)		
	Potássio dissolvido (Kdiss)		
	Sódio dissolvido (NaDiss)		
	Magnésio total (MgTot)		
	Cianetos Livres (CNLiv)		
	Sulfato Total (SulTot)		
	Nutrientes		
	Nitrato (NO3)		
	Nitrito (NO2)		
	Nitrogênio Orgânico Total (NOT)		
	Nitrogênio Amoniacal (NNH3)		
	Fósforo Total (FT)		

1.1.1. Variáveis físicas

1.1.1.1. Cor verdadeira

Uma qualidade fundamental para a água ser considerada potável é a ausência de cor. Naturalmente, na maioria dos corpos hídricos, a água apresenta uma cor. Ela pode ser devida à suspensão de matéria orgânica dissolvida: ácidos húmico e flúvico (decorrente da decomposição de vegetais); contaminação por esgoto doméstico e efluentes industriais (em particular, indústria de pigmentos, têxteis ...). A maioria dos íons dissolvidos não apresentam cor. Os óxidos de ferro e de manganês são duas exceções (VON SPERLING, 2005), dando uma cor marrom à água, existindo regiões onde eles estão naturalmente presente na água devido ao

tipo de solo ou de rocha. Deve-se distinguir entre cor aparente e cor verdadeira. No valor da cor aparente pode estar incluída uma parcela devida à turbidez da água. Quando esta é removida por centrifugação, obtém-se a cor verdadeira

A cor é medida com a escala de platina-cobalto e o resultado da análise é dado em equivalente mgPt.L⁻¹. Para águas doces superficiais, a Resolução CONAMA 357/2005 indica que a cor deve ser a “cor natural do corpo d’água” para águas de Classe 1; deve valer até 75 mgPt.L⁻¹, para corpos de Classe 2 (BRASIL, 2005a).

1.1.1.2. Temperatura da água

A temperatura da água é um fator importante quando se avalia a qualidade da água. A temperatura influi sobre a fotossíntese e o metabolismo de todos os seres vivos, que possuem limites de tolerância superior e inferior (CETESB, 2009), e tem também diversos impactos sobre as outras variáveis de qualidade da água.

Dentro dos impactos mais importantes, destaca-se: a influência negativa sobre a solubilidade do oxigênio na água (quanto mais quente a água, mais baixa é a concentração de saturação do oxigênio dissolvido); a influência positiva sobre a condutividade da água e solubilidade de muitos compostos minerais. Uma modificação da temperatura natural de um curso implica grandes modificações no ecossistema aquático.

O desmatamento da vegetação ripária impede o sombreamento do curso d’água e tem como consequência a elevação da temperatura média desse curso d’água; barragens também influem muito sobre a dinâmica diurna da temperatura da água. Uma alta da turbidez gera uma alta da temperatura por implicar uma maior absorção da luz. Outro fator que influencia é o lançamento de efluentes com elevadas temperaturas.

A legislação brasileira não enquadra a temperatura dos cursos d’água.

1.1.1.3. Turbidez

A turbidez de uma amostra de água é o grau de atenuação de intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la (CETESB, 2009). A turbidez de uma água se deve tanto à presença de sólidos em suspensão inorgânicos (areia, silte, argila) como à detritos orgânicos, tais como algas e bactérias, plâncton em geral, etc. A turbidez se mede em unidades nefelométricas de turbidez, abreviado em UNT.

Uma turbidez elevada aumenta a temperatura da água, diminui a concentração de oxigênio dissolvido, impede que a luz do sol atinja as plantas aquáticas submersas e também tem influência sobre a ictiofauna, podendo dificultar sua alimentação. A turbidez é um parâmetro simples de se avaliar e tem-se mostrado um bom indicador para a presença de bactérias *Escherichia coli*. Os sólidos em suspensão responsáveis pela turbidez da água podem servir de abrigo para microrganismos patogênicos e dificultar a desinfecção da água (VON SPERLING, 2005).

Na área de estudo, é comum ter uma alta da turbidez durante o período chuvoso devido às erosões presentes nesta Bacia e a erosão das margens dos cursos d'água, muitas vezes desprovidas da vegetação original. O aumento da vazão no período chuvoso também aumenta a turbidez através da resuspensão do sedimento.

Para águas doces superficiais de classe 1 e 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a), a turbidez deve ser inferior a 40 UNT e 100 UNT, respectivamente. A turbidez faz parte do cálculo do Índice de Qualidade da Água segundo o IGAM e a CETESB.

1.1.1.4. Série de sólidos

1.1.1.4.1. Sólidos Dissolvidos Totais

Os sólidos dissolvidos totais (SDT) são as partículas de menos de 2 µm presentes na coluna d'água. O método de medição é em geral gravimétrico (uso de balança de precisão) após secagem da amostra. A condutividade é muito ligada à concentração de sólidos dissolvidos totais e aparelhos de medição de qualidade da água *in situ* costumam calcular os sólidos dissolvidos totais a partir de uma medição de condutividade. A Resolução CONAMA 357/2005 limita a concentração de SDT a 500 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2005a).

1.1.1.4.2. Sólidos em Suspensão Totais

Os sólidos em suspensão totais (SST) são as partículas orgânicas ou inorgânicas de mais de 2 µm presentes na coluna d'água. A maior parte dos SST é inorgânica, porém algas e bactérias podem contribuir também. Um aumento de SST se traduz por um aumento de turbidez, com as consequências previamente estudadas.

A Deliberação Normativa COPAM/CERH 01/2008 limita a concentração de SST a 50 mg.L⁻¹ para a Classe 1 e 100 mg.L⁻¹ para as demais classes (MINAS GERAIS, 2008).

1.1.1.4.3. Sólidos Totais

Os sólidos totais (ST) correspondem à soma dos sólidos dissolvidos e em suspensão totais. Ele não é enquadrado nas legislações brasileiras, apesar das suas frações SDT e SST serem enquadradas por órgãos diferentes, CONAMA e COPAM/CERH de MG, respectivamente.

1.1.2. Variáveis químicas

1.1.2.1. Alcalinidade Total

A alcalinidade é a capacidade de uma água para neutralizar ácidos. Indica geralmente a presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Os resultados de alcalinidade são em geral expressos em miligrama de carbonato de cálcio ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$), mas isso não significa que carbonato de cálcio foi encontrado na amostra. Naturalmente, é raro encontrar valores de alcalinidade superiores a $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Águas costeiras tendem a ter baixa alcalinidade ($< 10 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$) e águas de regiões interiores podem ter alcalinidade na faixa de $30 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ a $500 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$.

A fonte natural mais comum de alcalinidade é o CO_2 atmosférico, as rochas também podem ser uma fonte natural de carbonato e assim ser responsável por altas alcalinidades naturais. Águas com alcalinidade elevadas são indesejáveis por estarem associadas à dureza excessiva e altas concentrações de íons dissolvidos, podendo originar de efluentes industriais ou da mineração. Em ausência de rochas carbonadas e de atividade industrial, valores altos de alcalinidade são associados a processos de decomposição de matérias orgânica, através da respiração bacteriana liberando CO_2 na água.

Para o equilíbrio do ambiente aquático, a alcalinidade é um parâmetro muito importante, sendo uma medida do poder de tamponamento da água. Águas com baixa alcalinidade são susceptíveis de ser facilmente acidificadas, o que pode danificar as comunidades hidrobiológicas.

A Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) não enquadra os valores de alcalinidade desejáveis nos cursos d'água no Brasil.

1.1.2.2. Condutividade elétrica

A condutividade é a expressão numérica da capacidade da água de conduzir a corrente elétrica. Ela depende do tipo das concentrações dos íons dissolvidos na água, e então pode ser

uma medida indireta de concentração de poluentes. Soluções ácidas, bases e sais inorgânicos são relativamente boas condutoras. As maiores partes da condutividade provem dos íons Mg, Ca, Cl e Na. Já as moléculas de compostos orgânicos que não dissociam em solução aquosa, em sua maioria, conduzem pouca corrente elétrica. As aplicações práticas para a tomada da medida da condutividade são: indicação do grau de mineralização da água e indicação rápida de variações nas concentrações de minerais dissolvidos (EMBRAPA, 2011).

Segundo a CETESB (2009), águas doces superficiais com condutividade acima de $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ podem ser suspeitas de estarem contaminadas. A condutividade elétrica também depende da temperatura. Para uma medida padronizada, adota-se a condutividade específica, que é a condutividade medida ou convertida para 25°C . Não existe limite de condutividade para as águas doces superficiais na legislação brasileira.

Sendo a soma de vários poluentes de origem mineral, é um parâmetro que se relaciona bem com a ação antrópica através do uso e cobertura da terra, sendo considerado um dos melhores indicadores gerais da qualidade da água (TU, 2011).

1.1.2.3. Dureza Total

A dureza da água é a medida da concentração dos íons com carga positiva dentro da água. Ela equivale em geral à soma das concentrações de magnésio e de cálcio. A dureza da água é tipicamente reportada em miligrama de carbonato de cálcio por litro ($\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$). Outros cátions como ferro, manganês, estrôncio, zinco e alumínio também podem conferir dureza à água (CETESB, 2009). De 0 a $70 \text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ a água é considerada muito mole, de 70 a $135 \text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ como mole, e como média dura, dura e muita dura acima dos limiares de $135 \text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, $200 \text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ e $350 \text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$ respectivamente. A água dura pode causar depósitos de calcite em máquinas de lavar e canos.

Para as águas doces superficiais, não há limite de dureza segundo a legislação brasileira.

1.1.2.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial Hidrogeniônico (pH) é uma medida da atividade química dos íons hidrogênio H^+ . Ele é um medidor da acidez ou basicidade de uma solução. Uma solução aquosa de pH igual a 7 é neutra, se o pH for inferior a 7, a água é considerada ácida e acima de 7 a água é considerada básica. O pH segue uma escala logarítmica, assim uma água com pH de 5 contém 10 vezes mais íons H^+ que uma água de pH igual a 6.

A influência do pH sobre os ecossistemas naturais se dá diretamente através de efeitos sobre os organismos de diversas espécies, e indiretamente porque ele influi sobre a precipitação dos metais, define a razão entre várias formas de íons como os de carbonato e influi sobre a solubilidade de nutrientes (CETESB, 2009). Valores de pH afastados da neutralidade tendem a afetar as taxas de crescimento dos microrganismos e influir sobre a composição dessa comunidade (VON SPERLING, 2005).

Para águas doces superficiais de classes 1 e 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005, o pH deve se manter entre 6 e 9. O pH faz parte das variáveis que entram no cálculo do Índice de Qualidade da Água segundo o IGAM e a CETESB. Quanto mais perto de 7 (água neutra), melhor é considerada a água.

1.1.2.5. Oxigênio Dissolvido

A concentração de oxigênio dissolvido na água se refere ao oxigênio livre e não composto na forma de O₂. É um parâmetro de qualidade da água muito importante por ser um parâmetro essencial à vida aquática: é necessário para várias formas de vida como peixes, invertebrados, bactérias, plantas, etc. Um nível baixo de oxigênio dissolvido prejudica o ecossistema aquático e é sintoma de uma água de má qualidade.

O oxigênio dissolvido entra na água pelo ar (aeração mecânica) e como produto da fotossíntese. O vento nos sistemas lênticos e as corredeiras em ambientes lóticos promovem uma melhor aeração da água e facilitam a oxigenação do meio aquático. Durante o dia, a fotossíntese propicia à oxigenação da água. É importante notar que a fotossíntese somente acontece na zona eufótica, que pode ser muita reduzida em caso de alta turbidez.

A concentração de saturação de oxigênio dissolvido decresce com a pressão atmosférica e a temperatura. Para uma altitude de 700m e uma temperatura da água de 25°C a concentração de saturação é de 7,58 mg.L⁻¹. Existem situações de supersaturação em oxigênio (acima de 100%), devidas à produção do oxigênio por algas durante o dia. Entre o dia e a noite, e seguindo a hora, a concentração de oxigênio num mesmo local pode variar de supersaturação à condições anaeróbias.

Para águas doces superficiais de classes 1 segundo a Resolução CONAMA 357/2005, o OD deve se manter acima de 6 mg.L⁻¹, e acima de 5 mg.L⁻¹ para águas de classe 2. O OD é a variável com maior peso no cálculo do Índice de Qualidade da Água segundo o IGAM e a CETESB. Quanto mais perto de 100 % de saturação quanto melhor é considerada a água.

1.1.2.6. Demanda Bioquímica de Oxigênio

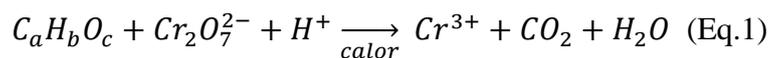
A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é tipicamente calculada para 5 dias mantendo uma temperatura de 20 graus Celsius (abreviada $DBO_{5,20}$), sendo reportada em miligrama por litro. A $DBO_{5,20}$ é uma medida da matéria orgânica presente na água podendo ser degradada pelas bactérias mediante consumo de oxigênio. O teste de $DBO_{5,20}$ não indica a presença de matéria não biodegradável, nem leva em consideração o efeito tóxico ou inibidor de materiais sobre a atividade microbiana (EMBRAPA, 2011).

Uma amostra com uma $DBO_{5,20}$ entre 1 e 2 $mgO_2.L^{-1}$ é considerada muito limpa, entre 2 $mgO_2.L^{-1}$ e 5 $mgO_2.L^{-1}$ moderadamente limpa e valores superiores à 5 $mgO_2.L^{-1}$ indicam geralmente uma contaminação por esgoto doméstico cuja $DBO_{5,20}$ média é de 220 $mgO_2.L^{-1}$. Considera-se um valor típico de 56g.hab⁻¹.dia⁻¹ de $DBO_{5,20}$ no Brasil. Outros efluentes tem altíssima $DBO_{5,20}$ como os efluentes de usina de açúcar e álcool (25.000 $mgO_2.L^{-1}$ no efluente bruto), laticínio (1000 - 1500 $mgO_2.L^{-1}$ no efluente bruto) ou de cervejaria (1700 $mgO_2.L^{-1}$ no efluente bruto), por exemplo (VON SPERLING, 2005). A lei impõe “somente” a retirada de 80 por cento da $DBO_{5,20}$ o que implica que são lançados efluentes com carga ainda muito alta de $DBO_{5,20}$. A presença de um alto teor de matéria orgânica pode induzir ao completo esgotamento do oxigênio na água, provocando o desaparecimento de peixes e outras formas de vida aquática (CETESB, 2009).

No Brasil o limite autorizado é de 3 $mgO_2.L^{-1}$ para cursos d'água de Classe 1 e de 5 $mgO_2.L^{-1}$ para os de Classe 2. O parâmetro entra no cálculo do Índice de Qualidade da Água segundo a CETESB e o IGAM.

1.1.2.7. Demanda Química de Oxigênio

A Demanda química de oxigênio (DQO) é um teste similar ao teste de DBO. A diferença é que ele não é realizado em condições quase naturais, mas com calor e o uso de um oxidante forte denominado dicromato. Ele permite a oxidação de substâncias que seriam muito lentas de serem degradadas em águas naturais ou até que não seriam degradadas em águas naturais. Essas substâncias não são ameaças para o teor de oxigênio da água, porém, elas podem ser poluentes orgânicos tóxicos para o ecossistema aquático. O dicromato oxida substâncias que não seriam oxidadas na determinação da DBO segundo a equação 1. Devido a essa oxidação forte da matéria orgânica instável como estável, o valor da DQO é sempre maior que o valor da DBO. Em duas horas oxida-se em média 92% da matéria orgânica.



$C_aH_bO_c$ representa um composto orgânico

A razão entre a DQO e a DBO dá a fração “biodegradável” de uma amostra d’água. A DQO não é regulamentada nos cursos d’água no Brasil e não entra no cálculo dos índices de qualidade da água comumente utilizados.

1.1.2.8. Substâncias tensoativas

As substâncias tensoativas, ou surfactantes são empregadas em todos os detergentes com o objetivo de diminuir a tensão superficial da água e permitir a limpeza de roupas ou de utensílios de cozinha. Elas são constituídas por longas cadeias carbônicas (hidrofóbicas) com um grupo hidrofílico em uma de suas extremidades. Essa propriedade permite ao surfactante interagir tanto com substâncias polares (água) quanto com as apolares (sujeira).

De acordo com a metodologia analítica recomendada, detergentes ou surfactantes são definidos como compostos que reagem com o azul de metileno sob certas condições especificadas (CETESB, 2009).

As substâncias tensoativas causam problemas de ordem estética, podendo provocar formação de espumas em concentrações altas. Elas também têm um efeito negativo para a biodiversidade, exercendo um efeito tóxico sobre o zooplâncton e predadores naturais do zooplâncton. As substâncias tensoativas potencializam então o efeito eutrofizante do fósforo, também encontrado em concentrações altas nos detergentes.

Não existe limite de concentração aceita dentro da Resolução CONAMA 357/2005, mas a Portaria MS 518/2004 (BRASIL, 2004) fixa limites de potabilidade para surfactantes em 0,5 mg L.

1.1.2.9. Metais pesados

Os metais pesados foram entendidos como os metais cujos números de massa atômica estão entre os do cobre e do chumbo. Essa definição faz parte das definições comumente empregadas, mas hoje em dia a utilidade do conceito de metais pesados ainda está sendo discutida.

1.1.2.9.1. Cádmio Total

O cádmio é um metal similar ao zinco e é presente na água sob o seu estado oxidado, como Cd^{2+} . É naturalmente presente com zinco e chumbo em jazidas de minérios da família dos sulfetos. Ele é usado como anticorrosivo para o aço, sendo encontrado dentro de pigmentos para plásticos e também em vários componentes eletrônicos e baterias. Foi mostrado que os fertilizantes eram uma fonte de contaminação difusa do cádmio (CETESB, 2012a), com os fertilizantes fosfatados sendo extraídos de jazidas com concentrações variáveis de cádmio.

A solubilidade do cádmio na água depende de acidez e a maioria do cádmio no ambiente aquático se encontra sob forma particulada ou no sedimento. Um aumento da acidez do curso d'água pode então se traduzir por uma ressolubilização do cádmio presente no sedimento ou de forma particulada (WHO, 2011b).

Em longo prazo, pequenas quantidades de cádmio têm mostrado impactos sobre os rins, o fígado e os ossos. A ingestão de cádmio também tem efeitos agudos sobre a saúde, sendo uma dose de 350 a 3500 mg considerada letal para o ser humano (WHO, 2011b).

Ele é encontrado em baixas concentrações no ambiente natural, inferior a $1 \mu\text{g.L}^{-1}$, e é extremamente agressivo para o fitoplâncton e o zooplâncton. É um elemento bioacumulativo, o que significa que quanto mais alto na cadeia trófica (mais concentrado ele fica), maior a necessidade de controlar sua presença no ambiente aquático.

Os sistemas de tratamento tradicionalmente usados no Brasil não permitem a remoção de boa parte do cádmio, sendo então importante manter um nível baixo nas águas brutas. O limite segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) para as águas de classe 1 e 2 é de $0,001 \text{ mg.L}^{-1}$, abaixo ainda da recomendação de $0,003 \text{ mg.L}^{-1}$ da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011b) para água potável. Para águas de classe 3, o máximo permitido é de $0,01 \text{ mg.L}^{-1}$ e de $0,005 \text{ mg.L}^{-1}$ para água potável segundo a Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

1.1.2.9.2. Cobre Dissolvido

O cobre ocorre naturalmente nas águas em concentrações inferiores a $20 \mu\text{g.L}^{-1}$. Quando em concentrações elevadas, é prejudicial à saúde e confere sabor às águas. Concentrações de $2,5 \text{ mg.L}^{-1}$ já tornam a água impalatável (CETESB, 2012b).

Os peixes são extremamente sensíveis ao cobre e começam a morrer com dosagem de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$. Os peixes morrem pela coagulação do muco das brânquias e consequente asfixia. O cobre, porém, pode ser aplicado pelo ser humano ao ambiente como algicida.

O cobre se encontra no meio aquático principalmente devido ao homem, através da corrosão de tubulação, do uso de algicida aquático, de efluentes de estação de tratamento de esgoto, e também de maneira difusa, pelo escoamento superficial e subterrâneo, sendo utilizado como composto de fungicida e pesticida para vários cultivos e pela atmosfera (CETESB, 2009), podendo fazer parte de rejeitos industriais. O limite para águas de classe 1 e 2 é de $9 \mu\text{g.L}^{-1}$ segundo a CONAMA (BRASIL, 2005a).

1.1.2.9.3. Chumbo Total

O chumbo é um metal cinza-azulado encontrado em pequenas quantidades na crosta terrestre, geralmente associado a minérios, principalmente aos que contêm zinco. É um metal particularmente tóxico, porém, ainda muito usado, principalmente na indústria automóvel e siderúrgica. Antigamente, muitas tubulações eram feitas de chumbo. Hoje ainda é usado em farmacologia popular e em maquiagem. Uma das principais fontes para o ambiente aquático é atmosférica através da combustão de combustível contendo chumbo e de rejeitos de indústria. Lixões e aterro que também são fontes de chumbo.

As crianças são as mais expostas por absorver uma maior proporção que os adultos (WQA, 2013), e o chumbo foi relacionado com atrasos no desenvolvimento cognitivo. O chumbo apresenta efeito tóxico sobre o cérebro, os ossos, os rins o sistema nervoso e os glóbulos vermelhos. Foram verificados efeitos a partir de $0,2 \mu\text{g.L}^{-1}$ no sangue (CESTESB, 2012c).

O chumbo tende a se complexar e a precipitar com um grande número de substâncias na água, ele dificilmente migra do solo pelo subsolo e nas águas superficiais ele é concentrado no sedimento (WHO, 2011c). O limite segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) para as águas de classe 1 e 2 é de $0,01 \text{mg.L}^{-1}$. Para preservação da vida aquática, porém, a concentração máxima aconselhada é de $0,003 \text{mg.L}^{-1}$ para águas com baixa dureza (inferior a 8mg.L^{-1}).

1.1.2.10. Outros Metais

1.1.2.10.1. Bário Total

O Bário é presente como elemento traço em rochas ígneas e sedimentares (WHO, 2004). Apesar de não se encontrar de forma livre na natureza, ele se encontra em formato de compostos em alguns minerais, o mais comum sendo a barita (BaSO_4). Algumas atividades humanas tendem a colocar bário no ambiente aquático, podendo-se citar a perfuração de poços (usado

nas lamas como lubrificante), a fabricação de vidro, de pigmentos, papel, fogos de artifícios e também entra na composição de motores e acessórios de veículos, o que é relevante no nosso estudo, por conta da presença de uma montadora de veículos em Juiz de Fora.

É um elemento raro nas águas naturais, em teores de 0,0007 até 0,9 mg.L⁻¹. Pela Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a), o limite permitido de bário em águas de classe 1 e 2, é de 0,7 mg L⁻¹, seguindo as recomendações da Organização Mundial da Saúde. É um elemento muito tóxico, sendo que sua ingestão provoca elevação da pressão sanguínea por vasoconstrição e bloqueio do sistema nervoso.

1.1.2.10.2. Ferro Dissolvido

O ferro é o quarto elemento e o segundo metal mais abundante na superfície terrestre. Estima-se que ele represente 5% da massa da crosta terrestre. Na natureza, ele é achado em geral sob forma oxidada (Fe²⁺ e Fe³⁺) e formando composto com oxigênio e enxofre. Na água, o íon Fe²⁺ é instável, sendo a forma Fe³⁺ mais comum.

O ferro é usado em grande parte dos objetos manufaturados pelo homem, serve como material de construção e é também usado nas tubulações. O Brasil é um dos maiores produtores de ferro do mundo.

Naturalmente, concentrações na água da ordem de 0,7 mg.L⁻¹ (WHO, 2003) podem ser encontradas. Segundo a legislação brasileira, o valor permitido para cursos d'água de Classe 1 e 2 é de 0,3 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2005a). Esse valor corresponde ao valor ao partir do qual pode-se observar efeitos sobre canalização e lavanderias (WHO, 2003).

1.1.2.10.3. Manganês Total

O manganês é um metal abundante na crosta terrestre, ocorrendo em geral junto ao ferro. Ele é um elemento que se encontra naturalmente em mais de cem minerais, porém não existe na forma pura. É essencial no funcionamento do metabolismo humano e animal por ser componente de muitas enzimas (WHO, 2011d). Ele existe em onze estados de oxidação, os mais importantes sendo Mn²⁺, Mn⁴⁺ e Mn⁷⁺. Não há relato de casos de deficiência de manganês na população em geral. Em animais, a deficiência é associada com prejuízo do crescimento, anormalidades no esqueleto, diminuição na função reprodutora de fêmeas e degeneração testicular em machos (CETESB, 2012c).

O Manganês é principalmente utilizado na produção de ferro e de aço, mas é presente em numerosos outros produtos como baterias, vidros, fungicidas, detergentes industriais e

medicais (sob forma de permanganato de potássio), agente de tratamento de água, fertilizantes e até complemento alimentar nas rações destinadas ao gado (WHO, 2011d).

Em concentrações altas, ele é nocivo para a saúde humana e para a fauna, tendo efeitos negativos no sistema reprodutivo e no sistema nervoso central. Segundo a revisão feita pela Organização Mundial da Saúde, foram observados em ratos efeitos nocivos para exposições de curta duração a nível de 20 mg/kg/dia e a partir de 1-2 mg/kg/dia para exposições prolongadas ao manganês. Segundo a legislação brasileira, o valor permitido para cursos d'água de Classe 1 e 2 é de 0,1 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2005a), o padrão de lançamento máximo autorizado sendo de 1,0 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2011).

1.1.2.10.4. Zinco Total

O zinco ocorre em pequenas quantidades em quase todas as rochas ígneas (WHO, 2003b) e os solos contêm naturalmente teores compreendidos entre 1 e 300 mg/kg. O zinco e seus compostos têm muitos usos na indústria automobilística, de construção civil e de eletrodomésticos. É usado na fabricação de ligas resistentes à corrosão e na galvanização de produtos de ferro e aço (CETESB, 2012d).

As concentrações que acontecem em águas superficiais naturais são baixas, em geral inferiores a 10 microgramas por litro e até 40 microgramas por litro nas águas subterrâneas (WHO, 2003b). As concentrações nas águas chegando nas torneiras são muitas vezes bem superiores, devido a sua presença nas tubulações. A partir de 5 miligramas por litro, o zinco confere um gosto à água.

O zinco é um micronutriente essencial para a vida, mas pode ser tóxico em grandes concentrações. Sua toxicidade foi comprovada para vários mamíferos, tomando a forma de uma deficiência em cobre, já que o zinco ocupa o seu espaço no metabolismo.

O limite admitido é de 0,18 mg por litro nas águas superficiais de classe 1 e 2 (BRASIL, 2005a), porém o padrão máximo de lançamento é bem superior, com 5 mg.L⁻¹ (BRASIL, 2011).

1.1.2.11. Nutrientes

1.1.2.11.1. Série de Nitrogênio

O nitrogênio é um elemento de importância fundamental à vida dos organismos, uma vez que é necessário para a produção de aminoácidos, elementos constitucionais das proteínas e do DNA. É considerado um dos mais importantes e limitantes à vida dos organismos de água doce (RICLEFS, 2010). Na água, ele se encontra dissolvido sob diversas formas: íon amônio,

amônia (nitrogênio amoniacal), nitrito e nitrato. Ele é encontrado sob forma particulada como nitrogênio orgânico.

O ciclo do nitrogênio é complexo (Figura 1) devido a uma ampla reserva na atmosfera (70%). Existem vegetais, as leguminosas, com a capacidade de fixar no solo o nitrogênio atmosférico. As cianobactérias também são capazes de fixar o nitrogênio atmosférico, obtendo uma vantagem competitiva caso ele esteja limitante no meio (COELHO, 2012 p.106). Os principais processos envolvidos no ciclo do nitrogênio são a nitrificação, a desnitrificação e a fixação biológica.

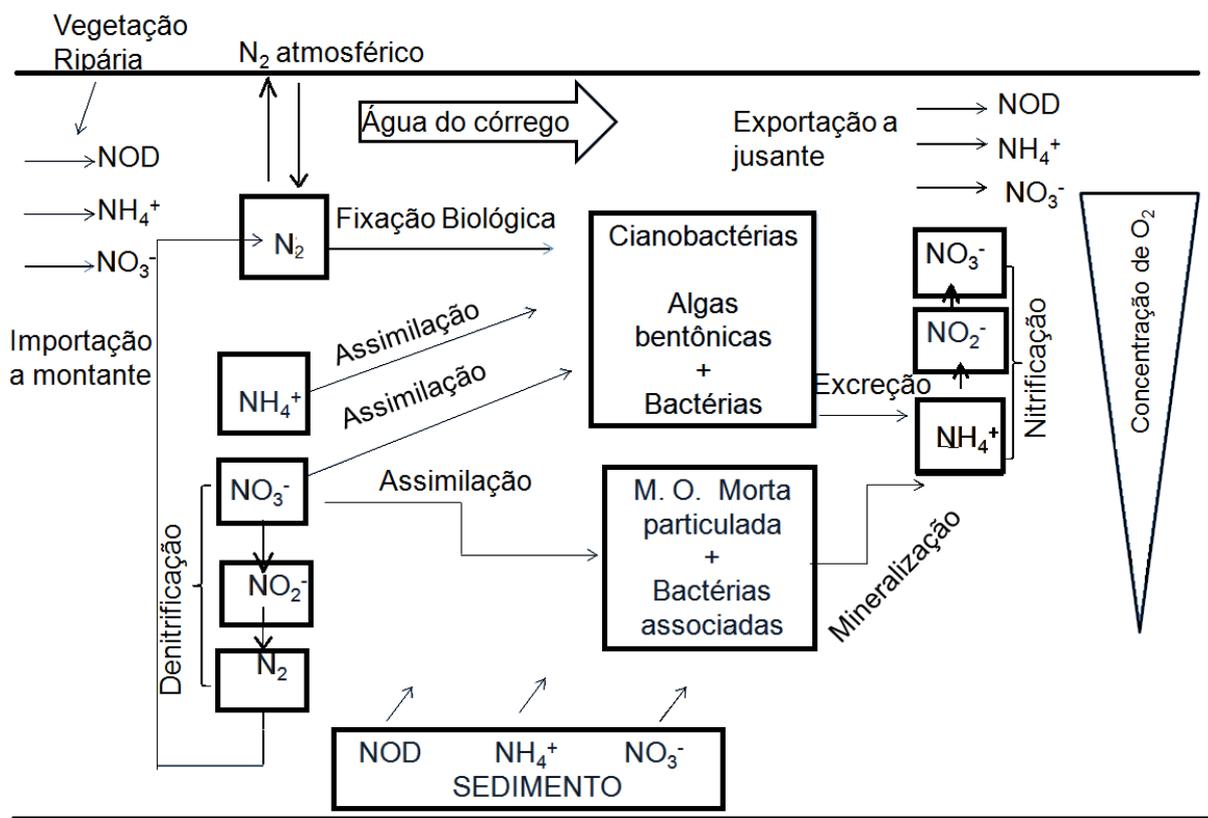


Figura 1: Ciclo do nitrogênio
Fonte: (ALLAN & CASTILLO, 2007 *apud* SANTOS, 2011)

A nitrificação ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) prevalece nos ambientes ricos em oxigênio, enquanto que a amonificação ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NH}_4^+$) prevalece com escassez de oxigênio, em condições anaeróbias ou anóxicas.

Nitrogênio Orgânico Total e Nitrogênio Amoniacal

Os esgotos sanitários constituem, em geral, a principal fonte, lançando nas águas nitrogênio orgânico devido à presença de proteínas e nitrogênio amoniacal pela hidrólise da ureia na água. Alguns efluentes industriais também concorrem para as descargas de nitrogênio orgânico e amoniacal nas águas, como algumas indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas, conservas alimentícias, matadouros, frigoríficos e curtumes.

O nitrogênio orgânico prove também de vegetais em decomposição na água (matéria orgânica morta). O teor de nitrogênio amoniacal permitido nas águas de Classe 2 depende do pH da água. Para um pH < 7,5 ele é de 3,7 mg.L⁻¹. Para um pH > 7,5 o limite é de 2,0 mg.L⁻¹, acima de um pH de 8, ele é de 1,0 mg.L⁻¹ e acima de um pH de 8,5 ele é de 0,5 mg.L⁻¹. Esse enquadramento especial do parâmetro é devido ao fato do nitrogênio amoniacal (íon amônio, NH₄⁺) se tornar amônia, mais tóxica, em águas com baixos pH.

Nitrito

O nitrito entra raramente diretamente no meio aquático. Ele é o produto da oxidação do íon amônio pela bactéria *Nitrosomas*. O nitrito é em seguida transformado em nitrato pela bactéria *Nitrobacter*. Por ser somente um produto intermediário, ele não tende a apresentar altas concentrações na água, porém altas concentrações de nitrito podem acontecer em condições particulares, e são perigosas para a saúde humana e o ecossistema aquático. Em cursos d'água de Classe 2, ele é limitado à 1,0 mg.L⁻¹.

Nitrato

O nitrato é um nutriente fundamental pela grande maioria dos vegetais aquáticos, sendo a única forma podendo ser assimilada por eles. Ele um nutriente potencialmente limitante em águas doces. Quando ele é o nutriente limitante, a estrutura da comunidade de algas é modificada e as cianobactérias são favorecidas. O limite aceito para águas de Classe 2 é de 10 mg.L⁻¹.

1.1.2.11.2. Fósforo Total

O fósforo não é encontrado em sua forma livre na natureza, apenas em combinações como os fosfatos, que representam 0,12% da composição da crosta terrestre. O fósforo pode então ser considerado um elemento bastante raro na superfície da terra.

O fósforo é essencial para o crescimento dos organismos. Ele é constituinte dos ácidos nucleicos, das membranas celulares, dos sistemas de transferência de energia e etc.. No ecossistema aquático, ele origina da dissolução das rochas, sendo reciclado pelo meio através da decomposição de matéria orgânica e de excrementos. Ele pode ser o nutriente limitante da produção de um corpo d'água (EMBRAPA, 2011).

Por ser um nutriente essencial e relativamente raro, pode se tornar um fator limitante ao crescimento de plantas, explicando sua utilização na agricultura como fertilizante (RICLEFS, 2010). Altas concentrações de fósforo se encontram dentro do esgoto doméstico, sendo usado na composição de detergentes. O problema da carga de fósforo do esgoto doméstico devido aos detergentes é levado muito a sério, e existe a Resolução 359/2005 do CONAMA (BRASIL, 2005b) que limita a concentração de fósforo nos detergentes vendidos no Brasil. É difícil avaliar o peso do esgoto doméstico frente a poluição difusa no Brasil.

Ele é muito ligado ao fenômeno de eutrofização, do qual a manifestação é o crescimento anormal de algas, sobretudo em represas, lagoas naturais e artificiais. O fenômeno de eutrofização é mais observado em sistemas aquáticos lênticos (parados) do que em águas correntes (lóticos). A Resolução CONAMA 357/2005 diferencia as concentrações aceitáveis segundo o tipo de ambiente aquático. Os valores podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2: Concentração máxima (em $\mu\text{g.L}^{-1}$) de fósforo permitida segundo ambiente e classe do corpo d'água

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
Fósforo total (ambiente lêntico)	20	30	50	50
Fósforo total (ambiente intermediário)	25	50	75	75
Fósforo total (ambiente lótico)	100	100	150	150

1.1.2.12. Elementos simples não metálicos

Dentro dos elementos simples não metálicos, muitos fazem parte do que é chamado de micronutrientes na área da ecologia. O cálcio, o magnésio, o potássio e o sódio são elementos essenciais para a formação de muitos organismos.

1.1.2.12.1. Arsênio Total

O arsênio é um elemento químico com densidade de 5,72. Ele não é dissolúvel na água, mas muitos dos seus compostos são. Ele tem efeitos de biotoxicidade para a fauna e flora desde níveis muito baixos, afetando também o ser humano. Os sistemas de tratamento convencionais

não conseguem retirar de maneira eficaz o arsênio. A sua concentração deve ser mantida baixa no ambiente por razões de saúde pública, além da ecológica.

Ele é produzido sob a forma de trióxido (As_2O_3). Para várias aplicações o trióxido de arsênio também é um rejeito de mineração (WHO, 2011a). Apesar da sua toxicidade, ele é encontrado em numerosos produtos como pesticidas, fármacos, preservativos para madeira, entre outros.

Intoxicações crônicas ou agudas podem ocorrer através do contato primário, a respiração ou a ingestão com vários sintomas como doenças da pele ou do sistema nervoso e câncer.

É raramente presente no ambiente natural, mas algumas rochas podem liberar. Sua presença é em geral antropogênica. Níveis em águas não poluídas não ultrapassam $2 \mu g.L^{-1}$ (CCME, 2003) e o limite autorizado nos cursos d'água do Canadá é de $5 \mu g.L^{-1}$. Segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) a concentração pode ser de até $10 \mu g.L^{-1}$ para águas de Classe 2 no Brasil.

1.1.2.12.2. Cálcio Total

O teor de cálcio nas águas superficiais não ultrapassa $15 mg.L^{-1}$ em geral (EMBRAPA, 2011), e é devido ao contato da água com rochas como plagioclásios cálcicos, calcita, dolomita, apatita, entre outros. O carbonato de cálcio é muito pouco solúvel em água pura. O cálcio ocorre nas águas na forma de bicarbonato e sua solubilidade está em função da quantidade de gás carbônico dissolvido.

Mais de 99% do cálcio dentro de um ser humano se encontra dentro dos ossos e dos dentes, dos quais ele é um elemento fundamental (WHO, 2009). Não há evidência que o cálcio, mesmo em altas concentrações, possa danificar à saúde, e um mínimo de cálcio na dieta é necessário para manter o organismo humano funcionando. Altas concentrações de cálcio, porém, podem causar problemas com tubulações e dificultam o uso de detergente. Cálcio e magnésio são responsáveis por o que é chamado de dureza da água. Não há limite especificado para a concentração de cálcio nas águas superficiais no Brasil. Para potabilidade, o máximo aceitável é de $500 mgCaCO_3.L^{-1}$ no Brasil (BRASIL, 2011a).

1.1.2.12.3. Cloreto Total

O cloreto é um elemento presente sob a forma de Cl^- na água. Em média, sua concentração na água doce em ambiente não poluídos não ultrapassa $10 mg.L^{-1}$, e valores acima

de 15 mg.L^{-1} podem indicar uma poluição por esgoto ou efluentes industriais. Em quantidade razoável, ele não prejudica à saúde humana, fazendo parte da dieta. O Cloreto de Sódio e Cloreto de Potássio são dois tipos de “sais” encontrados nas mesas ao redor do mundo.

No ambiente aquático, o cloreto é um elemento fundamental para a vida aquática, sendo o íon que mais influi sobre a salinidade da água. No Brasil, 250 mg.L^{-1} é o limite das classes 1 a 3 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005). Pode-se notar que a concentração autorizada é bem além da concentração encontrada naturalmente no ambiente aquático doce (25 vezes), o que nos leva a acreditar na necessidade de revisão das legislações.

1.1.2.12.4. Potássio dissolvido

O potássio é um micronutriente importante para o crescimento e a sobrevivência das plantas. Sua fonte natural é a dissolução de rochas. Sua presença é importante no solo para determinar a fertilidade dele. A sua principal função dentro da planta é de manter a pressão osmótica, e assim, ele influencia a fotossíntese. É também um elemento necessário para o ser humano.

Uma fonte antrópica do potássio provém da dieta humana, sendo também encontrado em fertilizantes. Ele pode conferir um gosto salgado à água em altas concentrações. A Resolução CONAMA 357/2005 não estipula limite para as concentrações de potássio admissível nas águas doces superficiais.

1.1.2.12.5. Sódio dissolvido

O sódio também é um elemento necessário para o ser humano e as plantas. Ele ocorre naturalmente na maior parte das rochas e dos solos. As fontes antrópicas são a própria dieta humana (efluentes domésticos), lixões ou aterros com falha ou falta de impermeabilização. Em bacias costeiras, o sódio pode indicar a influência por infiltração ou efeito de maré do meio marino sobre as águas doces.

Pessoas com problemas nos rins ou hipertensão tem que vigiar a quantidade de sódio ingerida. Uma água rica em sódio pode, para esse grupo de pessoas, ter consequências sobre a saúde. O sódio também pode conferir um gosto salgado à água (o sal de mesa é, quimicamente, cloreto de sódio). A Resolução CONAMA 357/2005 não estipula limite para as concentrações de sódio admissível nas águas doces superficiais.

1.1.2.12.6. Magnésio Total

O magnésio é corresponsável com o cálcio para a dureza da água. É também um elemento necessário para os vegetais e a dieta humana. Foi mostrado que uma certa quantidade de magnésio na água potável ajudava a prevenir doenças cardiovasculares. É um elemento abundante na crosta terrestre, sendo o oitavo mais abundante. A fonte natural é então a dissolução de rochas com magnésio. Em altas concentrações, ele pode conferir um gosto amargo à água.

A Resolução CONAMA 357/2005 não estipula limite para as concentrações de magnésio admissível nas águas doces superficiais.

1.1.2.12.7. Cianetos Livres

Os cianetos livres são tóxicos para a vida animal e humana. Os cianetos livres, à diferença dos cianetos totais, são os únicos que representam perigo para a saúde, por isso são eles que são considerados nas pesquisas de qualidade da água. Eles são particularmente nocivos para a ictiofauna. A maior parte do cianeto prove da indústria e da mineração, em particular a mineração de ouro (WHO, 2007). Tem impacto agudo e crônico para o ser humano.

Os cianetos influem sobre o metabolismo humano através da redução da produção da vitamina B12 e modificações sobre a produção de uma enzima necessária a respiração celular. Sua concentração é limitada a 0,005 mg.L⁻¹ em águas de classe 1 e 2 pela Resolução CONAMA 357/2005.

1.1.2.12.8. Sulfato Total

O sulfato (SO₄²⁻) é um dos íons mais abundantes na natureza. Em águas naturais, o sulfato ocorre através da dissolução de solos e rochas. As fontes antrópicas são os efluentes industriais e os combustíveis fósseis. É um contaminante que pode ser encontrado na água meteórica.

Em condições anaeróbias, algumas bactérias podem respirar através da fixação de sulfato, liberando dióxido de enxofre gasoso. Esse gás é característico do mau odor encontrado nas estações de tratamento de esgoto ou em cursos d'água muito poluídos.

A Resolução CONAMA 357/2005 estipula um limite de 250 mg.L⁻¹ como concentração de sulfato admissível nas águas doces superficiais de Classe 2.

1.1.3. Variáveis microbiológicas

1.1.3.1. Coliformes Totais

Os coliformes são um tipo de bactérias que estão presentes no ambiente e nas fezes de todos os animais de sangue quente, incluindo o ser humano. Os coliformes, em geral, não são causadores de doenças, portanto, a sua presença na água indica que patógenos possam estar presentes na água. A maioria dos patógenos que contaminam a água vem de fezes de animais e de humanos, mas testar todos eles um por um tem custo alto, não indicado correntemente. Entretanto, é fácil e relativamente barato testar a presença ou ausência de coliformes (sem contagem). Ele é um parâmetro indicador da existência de possíveis microrganismos patogênicos que são responsáveis pela transmissão de doenças pelo uso ou ingestão da água, tais como a Hepatite A, febre tifoide, febre paratifoide, disenteria bacilar e cólera.

A legislação brasileira não coloca limites para os coliformes totais, porém existem limites para os coliformes termotolerantes, melhor indicador de contaminação fecal. A Figura 2 explica a separação entre coliformes totais, termotolerantes e *Escherichia Coli*.

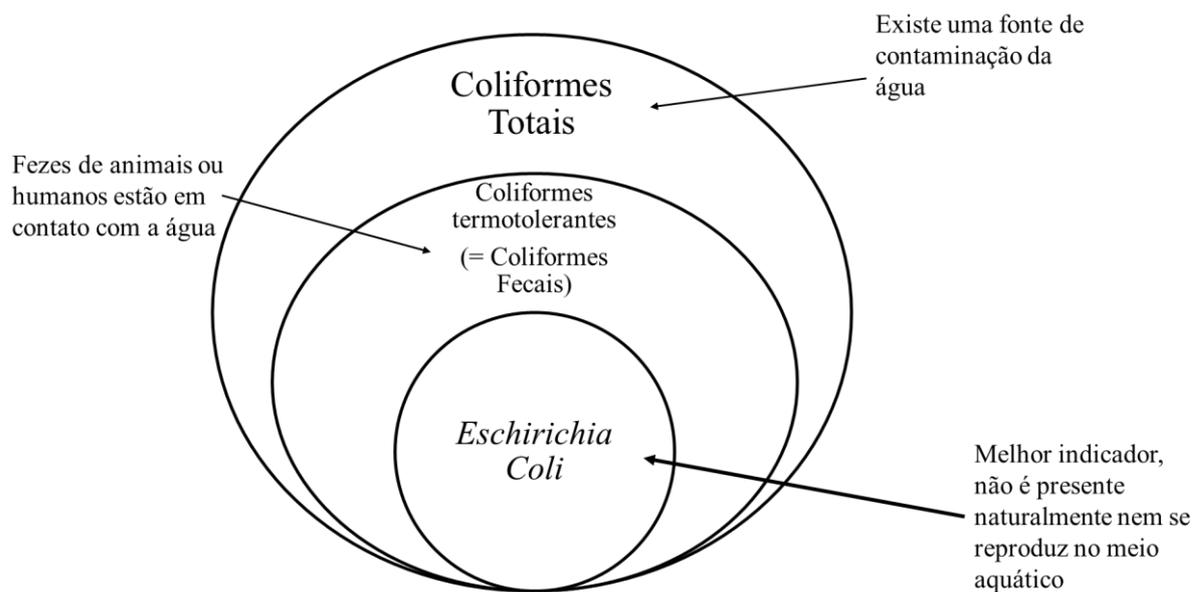


Figura 2: Coliformes totais, Coliformes fecais e *E. Coli*.

1.1.3.2. *Escherichia coli*

Escherichia coli (*E. coli*) é a principal espécie do grupo dos coliformes fecais. Dos cinco grupos que formam a família dos coliformes totais, somente a *E. Coli* não se encontra crescendo e se reproduzindo no meio ambiente. Consequentemente, ela é considerada a melhor espécie de

coliformes para indicação de contaminação fecal e, por extensão, da possível presença de patógenos. A Figura 2 mostra como se posiciona a bactéria *E.Coli* em relação aos coliformes totais e fecais/termotolerantes.

A Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) limita o número de coliformes fecais na água: o limiar é de 200 NMP/100mL para a Classe 1. Para a Classe 2 o limite é de 1000 NMP/100mL. A Resolução CONAMA 357/2005 estipula que o parâmetro “Coliformes Fecais” pode ser substituído pelo parâmetro “*Escherichia coli*”

1.1.3.3. Estreptococos fecais ou enterococos

Os enterococos são um subgrupo dos Estreptococos representados por *S. faecalis*, *S. faecium*, *S. gallinarum* e *S. avium* (CETESB, 2009). As bactérias do grupo de estreptococos fecais, são pertencentes ao gênero *Enterococcus*, caracterizado pela alta tolerância às condições adversas de crescimento, tais como capacidade de crescer na presença de 6,5% de cloreto de sódio, em pH ótimo de 9,6, (de 4,8 a 10,6), e nas temperaturas de 10°C e 45°C, sendo a maioria de origem fecal humana, embora, podendo ser isolada de fezes de animais.

Tem-se mostrado o melhor indicador para casos de gastroenterites no caso de contato primário com a água (CETESB, 2009). Não está enquadrada na legislação brasileira para águas doces. Ele é o parâmetro fundamental para avaliar a água para recreação de contato primário em ambientes marinho (BRASIL, 2000).

1.1.4. Variáveis hidrobiológicas

1.1.4.1. Clorofila-a

A Clorofila-a é o pigmento fotossintético mais comum, encontrado em todas as plantas, algas e cianobactérias. É o pigmento que permite a transformação do dióxido de carbono e luz em oxigênio e carboidratos, necessários à estrutura e crescimento vegetal. Essa reação é chamada de fotossíntese. Por isso, ela é muitas vezes usada para medir a produtividade vegetal e das algas de um corpo hídrico (JONES & LEE, 1982).

Um crescimento excessivo de algas devido à eutrofização do meio é indesejável num manancial de abastecimento ou qualquer água que sirva para a dessedentação de animais. Pode também prejudicar o funcionamento de usinas hidrelétricas, provocando o desgaste precoce das turbinas. Em águas destinadas ao consumo humano ou animal, as algas causam problemas de cor e odor na água e, uma elevação dos teores de cianotoxinas.

As algas, em particular as cianobactérias, não são removidos por sistemas convencionais de tratamento da água. O custo de tratamento é muitas vezes elevado para pequenas comunidades (KANSAS, 2011) e até cidades maiores no Brasil.

As cianotoxinas são hepatotóxicas e neurotóxicas. No Brasil, aconteceu o maior acidente de contaminação por cianobactérias com 52 mortes em pacientes de uma clínica de hemodiálise (USP, 2008). Ocorrem também muitos casos de morte bovina por contaminação de cianobactérias. Desde estes acidentes, a vigilância sobre a concentração de cianobactérias nos mananciais é reforçada.

Segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a), a concentração máxima autorizada de cianobactérias é de 20.000 cel.mL⁻¹ para corpos hídricos de Classe 1 e de 50.000 cel.mL⁻¹ para corpos hídricos de Classe 2. A concentração de Clorofila-a, portanto, está disponível e também está enquadrada pela Resolução CONAMA 357/2005 com um máximo de 10 ug.L⁻¹ para águas de Classe 1 e 30 ug.L⁻¹ para águas de Classe 2.

Não há um monitoramento padronizado das cianobactérias na área de estudo. Soares et al. (2007) encontraram concentrações altas, sobretudo na estação seca, a jusante da Represa de Chapéu D'Uvas, decrescendo a medida que o rio Paraibuna desce.

1.1.4.2. Feofitina-a

A feofitina-a é um produto da degradação da Clorofila-a. Se trata do mesmo elemento que a Clorofila-a à diferença de um íon de magnésio (Mg²⁺), perdido por oxidação. Ela pode interferir na medição da Clorofila-a porque ela absorve na mesma região do espectro que esse último. Em decorrência disso, o resultado da análise de Clorofila-a deve ser corrigida para não incluir a feofitina-a. Não está enquadrada na legislação brasileira e é um assunto pouco debatido na literatura.

1.2. Fatores antrópicos, fatores físicos e qualidade da água

1.2.1. Alterações da paisagem

Observou-se na escala global uma transição de uma paisagem inalterada para uma paisagem dominada pelo homem, impactando mundialmente os ecossistemas. O uso e cobertura da terra é então um bom indicador do estado dos ecossistemas. No Sudeste brasileiro, como em outras regiões do mundo, a cobertura original do solo foi amplamente alterada, passando em sua maioria de mata para vegetação rasteira.

Na área de estudo, a Bacia Hidrográfica do rio Preto - BHRP, a cobertura original era uma floresta densa chamada de Mata Atlântica. O desmatamento começou no século XVIII, com o início da colonização da região. No início, as florestas foram cortadas para abrir caminhos para a mineração em Minas Gerais, pequenas lavouras e criação de gado de modo a sustentar os trabalhadores das minas. Um viajante, Von Martins, ao atravessar a região das minas e passando pelo nordeste de São Paulo foi levado a pensar que nunca havia tido floresta por onde ele passou em 1810 (COELHO, 2012 p.197). No Vale do Paraíba, a ocupação mais densa da área começou no século XIX, como ilustrado pelo crescimento da população da região Sudeste, passando de 1 milhão de habitantes em 1808 para 6,4 milhões em 1890 (COELHO 2012, p. 198). Com o esgotamento das minas de ouro, o café virou a nova base da economia brasileira, definindo-se o “ciclo do café”. Durante esse período, para abrir espaço para as extensas lavouras de café, a Mata Atlântica foi queimada, deixando uma paisagem parecida com a atual: apenas fragmentos em locais impróprios para o cultivo do café ou criação de gado.

Na BHRP encontram-se duas áreas urbanas importantes: Juiz de Fora, com mais de 559.636 habitantes concentra a maior parte da população da bacia, e Valença, com 73.997 habitantes que é o outro centro urbano de importância na BHRP (IBGE,2016).

1.2.2. Principais mecanismos influenciando a qualidade da água

A mudança radical de cobertura da terra tem consequências sobre as características hidrológicas das bacias. As matas ciliares são importantes para evitar a erosão das margens através da redução da velocidade de escoamento da água e da estabilização das mesmas. A vegetação arbórea permite também uma melhor infiltração da água, além de amortecer a velocidade dos pingos. O desmatamento tem, entre outras consequências, o assoreamento de pequenos cursos d'água, a diminuição da profundidade e o consequente aumento da velocidade

de escoamento. Quando a velocidade da água aumenta, o regime natural de escoamento, muitas vezes fluvial, pode passar a ser torrencial.

O uso e cobertura da terra influi através de vários mecanismos nos ecossistemas lóticos. As principais alterações e suas consequências foram classificadas assim por Allan (2004):

- O enriquecimento do meio em nutrientes promovendo a proliferação de algas e a consequente diminuição de oxigênio dissolvido dentro d'água, aumento da taxa de decomposição, aumento da presença de espécies invasoras e ameaça as espécies mais sensíveis;
- Modificações no processo de sedimentação através do aumento da velocidade de escoamento, levando a um aumento da turbidez;
- A contaminação por poluentes com o aumento das concentrações de metais pesados e outros tóxicos dissolvidos ou em suspensão na água, com consequências para toda a cadeia trófica;
- Alterações hidrológicas: modificação do escoamento superficial e do balanço de evapotranspiração, diminuição da vazão média e da frequência das enchentes, transporte acelerado dos nutrientes. A compactação do solo em caso de uso agrícola e a impermeabilização do solo pela urbanização promovem forte alterações hidrológicas;
- Remoção da vegetação ripária: aumento da temperatura do corpo d'água e da penetração da luz, favorecendo o crescimento de algas. Diminuição da estabilidade das margens dos rios com o aumento da erosão do leito (aumento da velocidade escoamento). Observa-se também uma diminuição da retenção dos sedimentos, dos contaminantes e dos nutrientes, além da redução do aporte de madeira e serrapilheira no curso d'água.

A Figura 3 mostra como a paisagem, da escala regional para uma escala local, pode influenciar sobre a qualidade da água de um lago. Nessa Dissertação, os pontos de monitoramento se localizam em ambientes lóticos, porém há ambientes lênticos na BHRP, principalmente nos barramentos criados para abastecimento ou geração de energia.

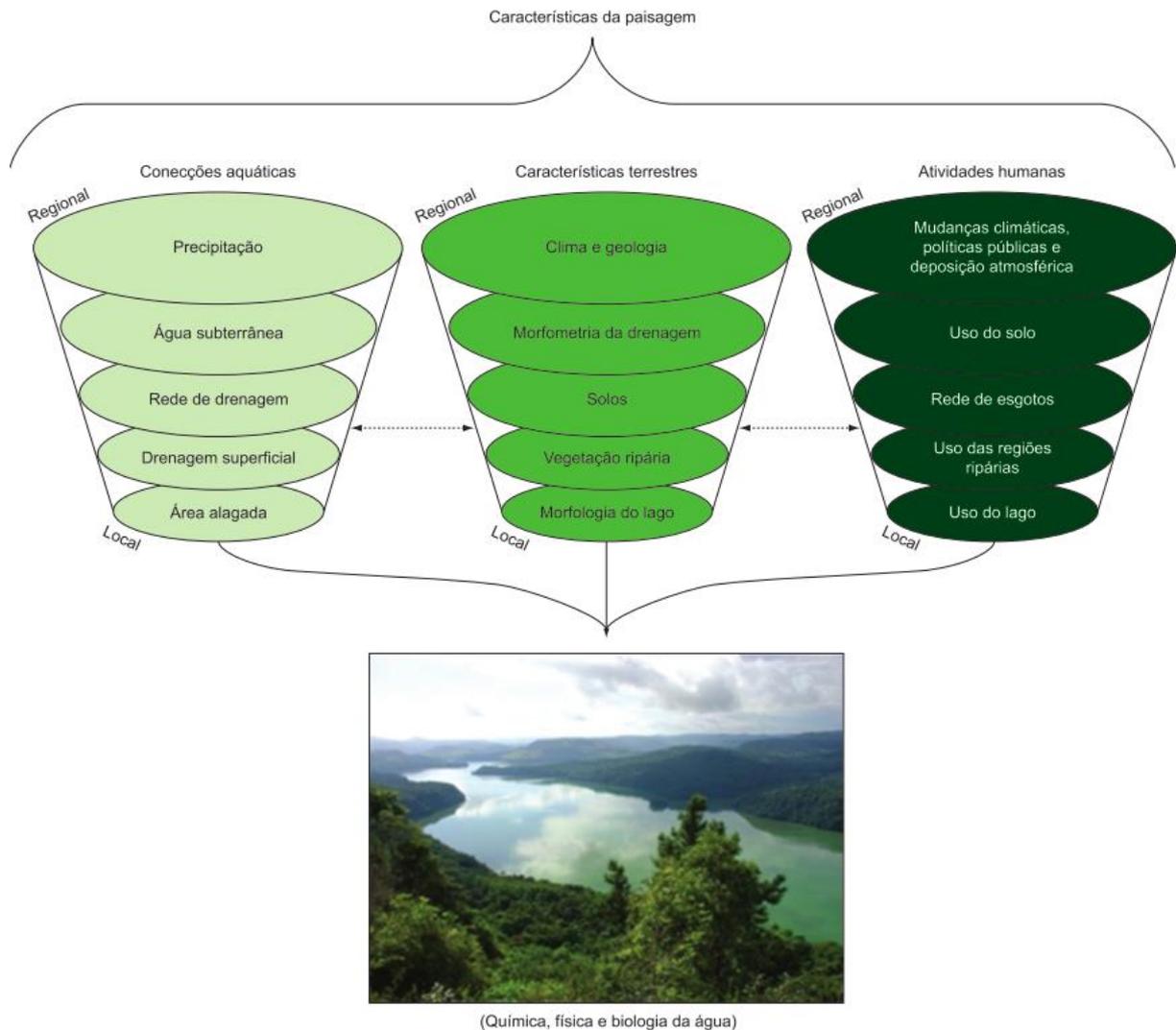


Figura 3: Interações entre componentes das Bacias Hidrográficas e suas consequências na qualidade da água.
Fonte: Tundisi & Tundisi (2010), modificado por Sorano et al. (2009)

1.2.3. Mapeamento do uso e cobertura da terra

Para entender a qualidade da água numa dada bacia hidrográfica, é então de suma importância a obtenção de um mapa de uso e cobertura da terra. Para a realização de mapas de uso e cobertura da terra em grandes escalas, utilizam-se satélites de observação da Terra. Mapas de pequenas escalas podem ser realizados através de imagens obtidas por voos aerofotogramétricos. O lançamento do satélite ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*) em 1972 permitiu a realização de mapas de uso e cobertura da terra em larga escala assim como o seu monitoramento. O programa americano de satélite de observação da Terra continua até os dias de hoje com o nome de programa LANDSAT - *Land Satellite* e novos satélites são regularmente lançados. Hoje em dia existem vários programas de observação da Terra, o

programa Sentinel – europeu, SPOT – francês (Satélite Para a Observação da Terra) ou CBERS -sino-brasileiro- são outros exemplos.

1.2.4. Contaminação difusa e contaminação pontual

O uso e cobertura da terra influi sobre a qualidade da água dentro de uma determinada bacia hidrográfica através do escoamento superficial, sub-superficial e até subterrâneo. O uso e cobertura da terra é o principal fator para explicar o que se chama de poluição difusa, que possui significado oposto a poluição pontual. Uma poluição pontual é facilmente identificável como no caso de uma tubulação de lançamento de esgoto ou de efluente. Os efluentes industriais ou os esgotos domésticos são muitas vezes rejeitados sem tratamento ou com tratamento inadequado nos cursos d'água no Brasil. As fontes de poluição difusa não são tão fáceis de ser identificadas. A contaminação difusa pode ser, por exemplo:

- Escoamento superficial laminar sobre as superfícies impermeáveis urbanas, levando resíduos sólidos e resíduos de combustível;
- Escoamento superficial sobre o solo exposto ou pastagens degradadas carregando sólidos em suspensão nos cursos d'água;
- Contaminação dos lençóis freáticos pelo uso de fertilizantes;
- Em grandes escalas, o uso urbano e o esgoto doméstico podem ser considerados como uma fonte difusa, já que se distribuem no espaço (MAILLARD & SANTOS, 2008).

1.2.5. Escala da análise: *Buffer* ou Bacia?

A utilização dos sistemas de informações geográficas para avaliar a importância da poluição difusa nos cursos d'água começa nos anos setenta (NASA, 1974; OMERNIK, 1976), com foco sobre a eutrofização do meio aquático, e se desenvolve nos anos oitenta e noventa (DELREGNO & ATKINSON, 1988; HAKAMATA et al., 1992; MORSE et al., 1994; WHITE et al., 1992). A maturação dos programas de processamento digital de imagens e de geoprocessamento, a preocupação crescente para o controle da poluição difusa e a crescente digitalização e disponibilização das informações geográficas levaram a popularizar esse campo de estudo.

Existem várias escalas para relacionar o uso e cobertura da terra com a qualidade da água. A Figura 4 ilustra os três métodos mais usados para esses estudos.

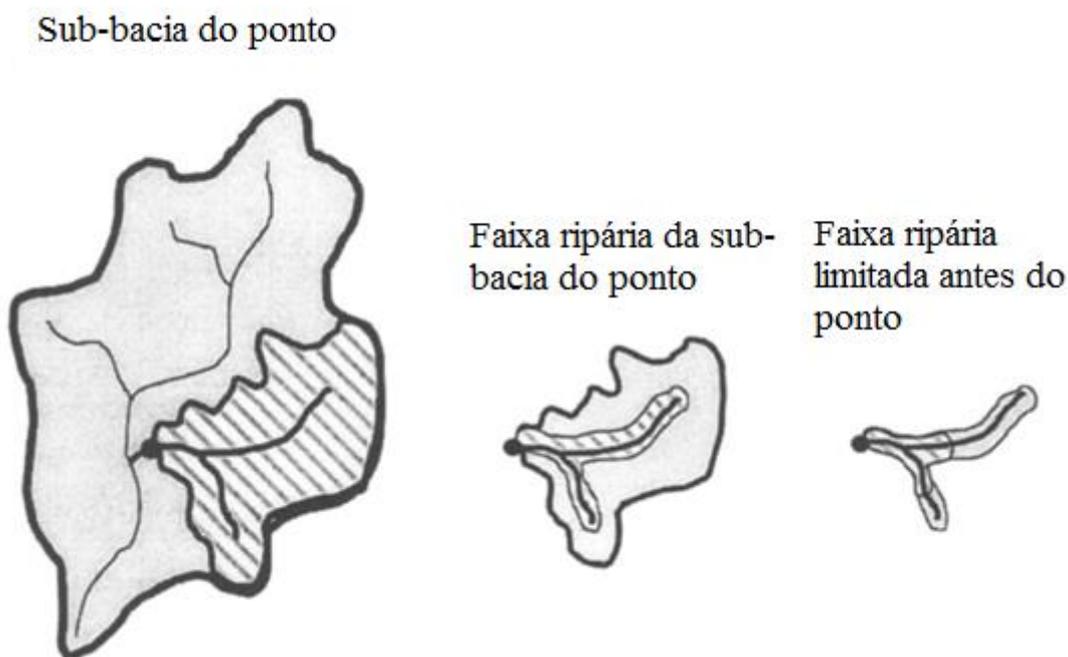


Figura 4: Três escalas espaciais amplamente usadas para relacionar características da paisagem com as condições físicas/químicas/biológicas encontradas no ponto de amostragem. Adaptado de Morley e Karr (2002).

Uma pergunta interessante nesse campo de pesquisa é saber se o uso e cobertura da terra longe das margens do curso d'água influi tanto como o uso nas margens dele. Essa questão ainda é aberta e tema de pesquisas atuais. É também um fato conhecido que as legislações ambientais tendem a colocar ênfase na proteção das zonas ripárias (BRASIL, 2012). Sliva e Williams (2001) demonstraram que o uso numa faixa ripária de 100 metros influi ligeiramente mais do que o uso no restante da bacia. Esse estudo fez o uso da estatística multivariada: análise de redundância e regressão múltipla após normalização dos dados. Outros autores encontraram resultados diferentes: segundo Morley e Karr (2002), foi a escala da bacia hidrográfica que mais explicou a variação da biodiversidade, resultante teoricamente da qualidade da água de um ambiente lótico.

1.2.6. Ordem do curso d'água

Um paradigma importante no estudo ecológico do meio lótico é a Teoria do Rio Contínuo - River Continuum Complex. Vanote et al. (1980) observaram que nos ecossistemas lóticos ocorre um gradiente de condições físicas que por sua vez influenciam nas características estruturais das comunidades de organismos distribuídas no gradiente do rio. Segundo essa teoria, os gradientes fluviais são classificados em três grupos: 1) riachos de cabeceira, 2) riachos

pequenos ou médios e 3) grandes rios. Os riachos de cabeceira e os grandes rios são meios heterótrofos (a respiração é superior à produção, a matéria orgânica é em maioria alóctone), os riachos pequenos ou médios são meios autótrofos (a produção primária é superior à respiração, a matéria orgânica é em maioria autóctone).

De maneira a ordenar os cursos d'água, vários autores propuseram metodologias diferentes. Uma das mais usadas e simples de se calcular é a metodologia proposta por Strahler (1957). Da nascente até encontrar com outro córrego, o córrego é considerado de ordem 1. Quando dois córregos de ordem 1 se encontram, o resultado é um córrego de ordem 2. Por fim, um córrego de ordem 2 que se encontra com um outro de ordem 2, o resultado é um córrego de ordem 3 (Figura 5). De maneira geral quando um córrego de ordem "n" encontra-se com um córrego de ordem "n" resulta um córrego de ordem "n+1", e quando um córrego de ordem "n" encontra-se com um córrego de ordem inferior a "n" resulta um córrego de ordem "n".

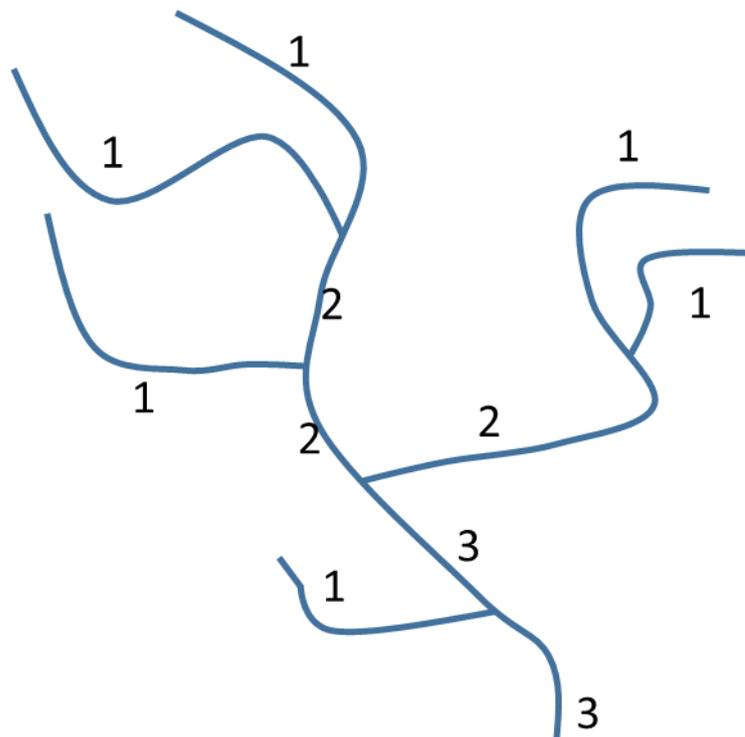


Figura 5: Ordem dos cursos d'água segundo Strahler (1957)

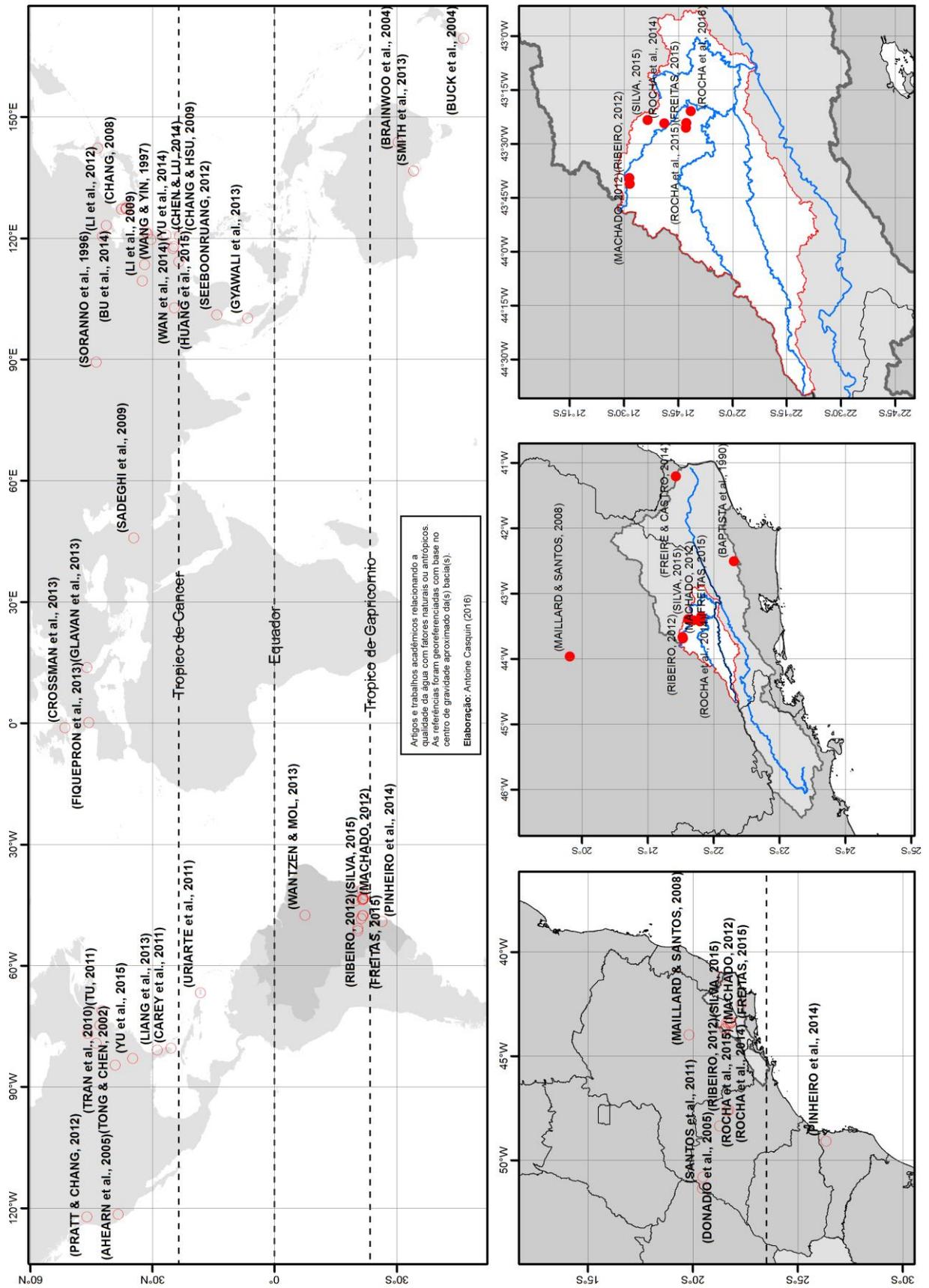
No Brasil, no mesmo bioma dessa área de estudo, o estudo dos insetos aquáticos (BAPTISTA et al., 1990) permitiu estabelecer a relação entre ordem do curso d'água segundo Strahler (1957) e os grupos de rio segundo a teoria do rio contínuo. Segundo esse estudo, a

transição de “riacho de cabeceira” para “riachos pequenos ou médios” acontece na ordem 4 e a transição para “grandes rios” acontece na ordem 6.

Num estudo na Nova-Zelândia, foi investigada a influência da ordem do curso d’água na relação entre uso do solo e qualidade da água. Segundo Buck et al. (2004), a ordem do curso d’água deve ser considerada. Nessa pesquisa baseada em 60 pontos de coletas repartidos em córregos da primeira à quarta ordem, foi mostrado que os nutrientes e os coliformes fecais se relacionavam mais com o uso do solo na bacia inteira - porcentagem de pasto – em córregos da quarta ordem do que em córregos da primeira ordem. Outro resultado encontrado foi que a zona ripária era mais importante para córregos de menor ordem. Esses resultados completam aqueles encontrados por Sliva e Willams (2001) e Morley e Karr (2002).

1.2.7. Metodologias Estatísticas

Essas relações entre uso e cobertura da terra e qualidade da água foram estudadas por muitos autores. Outros fatores da paisagem também são estudados por alguns autores. Os estudos correlacionando uso e cobertura da terra e qualidade da água, relevantes na revisão de literatura ou ao longo da discussão dos resultados e possuindo uma referência geográfica do lugar de estudo, foram compilados no Mapa 1.



Mapa 1: Localização de estudos citados nessa dissertação

Desde os primeiros estudos relacionando a paisagem com variáveis de qualidade da água, várias metodologias estatísticas foram utilizadas. Uma primeira separação existe entre métodos chamados aqui de implícitos e os métodos explícitos. Outras separações podem ser feitas entre estatística paramétrica e não paramétrica, ou a estatística univariada e multivariada.

Antes de abordar essas metodologias e os resultados produzidos no âmbito de pesquisas relacionando características da paisagem e qualidade da água, alguns conceitos e “boas práticas” relativas à estatística em geral serão mencionados.

1.2.7.1. Normalidade dos dados: estatística paramétrica e não paramétrica

Helsel (1987) afirma que dados de qualidade da água muitas vezes não seguem uma distribuição normal. Uma variável seguindo uma lei normal (Figura 6) possui algumas propriedades importantes:

- Sua distribuição é simétrica, o que significa que a ela é distribuída de maneira similar dos dois lados da média, o que implica também que a média e a mediana estejam próximas ou iguais.

- O desvio-padrão é representativo da amplitude da variável. Para uma variável seguindo uma lei normal 95% dos seus valores estão num intervalo de ± 2 desvios-padrões da média e 99,7% num intervalo de ± 3 desvios-padrões.

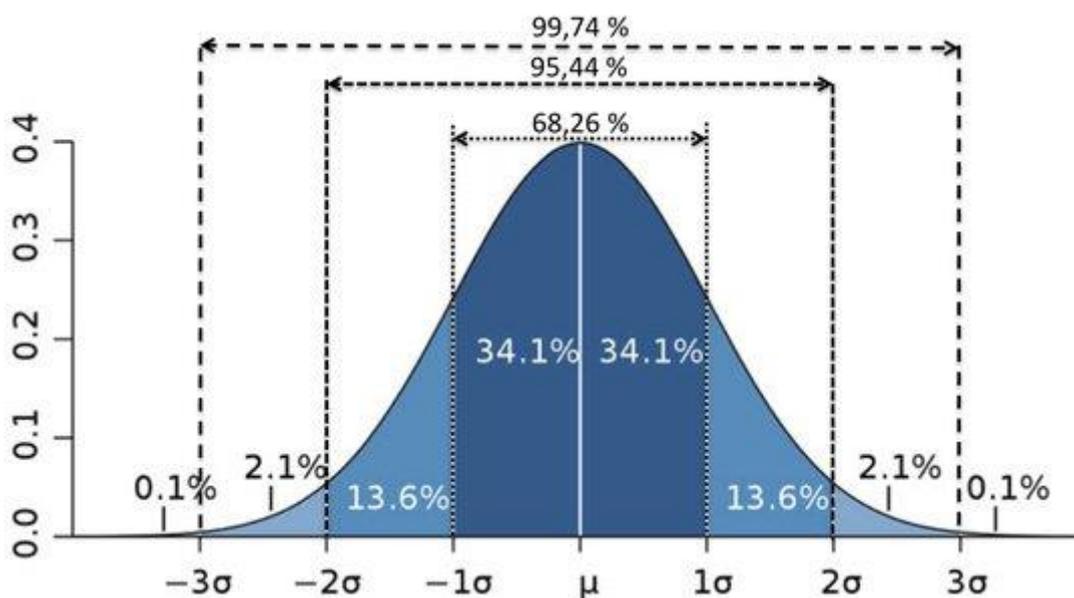


Figura 6: Função de repartição de uma variável seguindo uma lei normal.

Para avaliar se uma variável segue ou não uma lei normal, existem vários testes estatísticos. Um dos mais usados historicamente é o teste de Kolmogorov-Smirnov, por ser antigo e ensinado nas escolas e universidades até hoje. Testes mais poderosos foram, portanto, desenvolvidos, e o teste de Shapiro-Wilk é um dos melhores (RAZALI & WAH, 2011). Os testes de normalidade, porém não são eficientes abaixo de 30 amostras (RAZALI & WAH, 2011), o que pode dificultar a análise estatística dos resultados. Para determinar a normalidade de pequenas amostras, recomenda-se fazer uso do bom senso, do conhecimento sobre o assunto e de representações gráficas dos dados como o gráfico Quantil-Quantil (*Q-Q Plot*).

Quando as variáveis seguem uma distribuição normal, o R de Pearson é utilizado para medir se há ou não uma correlação. O R é chamado de coeficiente de correlação linear, quando há uma correlação linear evidenciada entre duas variáveis (X a porcentagem de uso urbano e Y a condutividade por exemplo), significa que a relação entre as duas pode se escrever da seguinte forma: $Y=aX + b$ (a e b constantes, $a \neq 0$). Para uma correlação negativa perfeita o $R = -1$; para uma correlação nula, ou seja, a independência perfeita das duas variáveis, $R=0$ e para uma correlação positiva perfeita, $R=1$. Na realidade o R quase sempre está diferente desses valores.

Como saber se as duas variáveis estudadas estão correlacionadas? $R=0,5$ indica uma correlação ou uma independência? Para resolver essa questão um teste estatístico é aplicado sobre o próprio coeficiente de correlação, e depende do tamanho da amostra. O resultado desse teste é o valor-p ou *p-value* (p), e é em geral interpretado da seguinte maneira:

- $p < 0,05$: há uma correlação significativa entre as duas variáveis (nível de confiança de 95%)
- $p < 0,01$: há uma correlação muito significativa entre as duas variáveis (nível de confiança de 99%)

Como mencionado previamente, o cálculo do valor-p é sensível ao tamanho da amostra. Por exemplo um R de 0,6 para 5 amostras (X e Y são dois vetores com 5 valores) tem um valor-p associado de 0.285, o que não é significativo. Nesse caso, conclui-se que a hipótese nula (não há correlação) não é rejeitada, significando que para 5 amostras não foi evidenciado uma correlação significativa entre as variáveis X e Y. Não denota que não há correlação entre essas variáveis, mais significa que, conforme os dados apresentados, a hipótese nula não pode ser descartada com uma margem de confiança razoável. Para poder evidenciar um resultado com correlação estatisticamente significativa, o pesquisador precisa ampliar o número de amostras.

Para o mesmo R de 0,6 e 50 amostras, o valor-p associado é inferior a 0,0001, o que significa que há uma correlação muito significativa. Conclui-se que pode rejeitar a hipótese nula com mais de 99.9% de confiança.

Entende-se, então, que para evidenciar correlações entre o uso e cobertura da terra e variáveis de qualidade da água, o número de pontos de amostragem é um parâmetro chave. Uma pesquisa baseada em poucos pontos tem poucas chances de evidenciar correlações significativas. Para poucos pontos, existe a possibilidade de fazer várias medições, aumentando assim o número de amostras.

Quando os dados não são normalmente distribuídos, é possível aplicar uma transformação aos dados para “normalizar-lhes”. A transformação em geral aplicada é a função logaritmo ou exponencial (SLIVA & WILLIAMS, 2011; PRATT & CHANG, 2012). A remoção de um ou vários valores extremos da série de dados é uma outra opção. Ao estudar a distribuição dos valores de uso e cobertura da terra, Tu & Xia (2008) mostram que eles também não seguem uma distribuição normal. Para permitir o uso da estatística paramétrica multivariada (regressão linear múltipla) foi aplicado uma transformação logarítmica ou “raiz quadrada” nesses dados.

A outra possibilidade é de aplicar testes estatísticos não paramétricos. Esses testes, ao invés de se basear nos valores da série de dados, se baseiam na ordem relativa deles. Dois testes equivalentes ao R de Pearson são bastante usados: o Tau (τ) de Kendall e o ρ de Spearman. O teste de Kendall e o teste de Spearman tem um poder similar e a escolha de um ou outro não influirá sobre os resultados encontrados (YUE et al., 2002). Esses dois testes também podem ser aplicados a dados normalmente distribuídos, mas cuja correlação não é linear, mas monótona. Por exemplo $Y=aX^2 + b$ (a e b constantes; a e $X >0$) é uma relação monótona, mas não linear entre as variáveis X e Y.

De maneira geral, as estatísticas descritivas são diferentes para dados seguindo uma distribuição normal ou não. Para uma variável não normalmente distribuída, a mediana indica o valor central dela (ao invés da média) e a distância interquartil é um melhor indicador de variabilidade do que o desvio-padrão.

Os métodos estatísticos também são diferentes e os testes de correlação foram evocados. Para avaliar se um conjunto de dados é significamente diferente de um outro conjunto de dados, utiliza-se o Teste T baseado na média e o desvio-padrão em estatística paramétrica. Na estatística não paramétrica pode-se usar o Teste de Mann-Whitney. No caso de uma regressão, o método “clássico” para dados normalmente distribuídos é o método dos menores quadrados.

Um estimador linear não paramétrico é o estimador de declive de Theil-Sen. Uma grande vantagem dos métodos não paramétricos reside nas suas relativas insensibilidades à valores extremos (HEISEL, 1987). A Figura 7 ilustra por exemplo a diferença de resultado entre uma regressão linear pelo método “clássico” e de uma regressão utilizando o estimador de declive de Theil-Sen numa série de dados na qual valores errados foram voluntariamente adicionados.

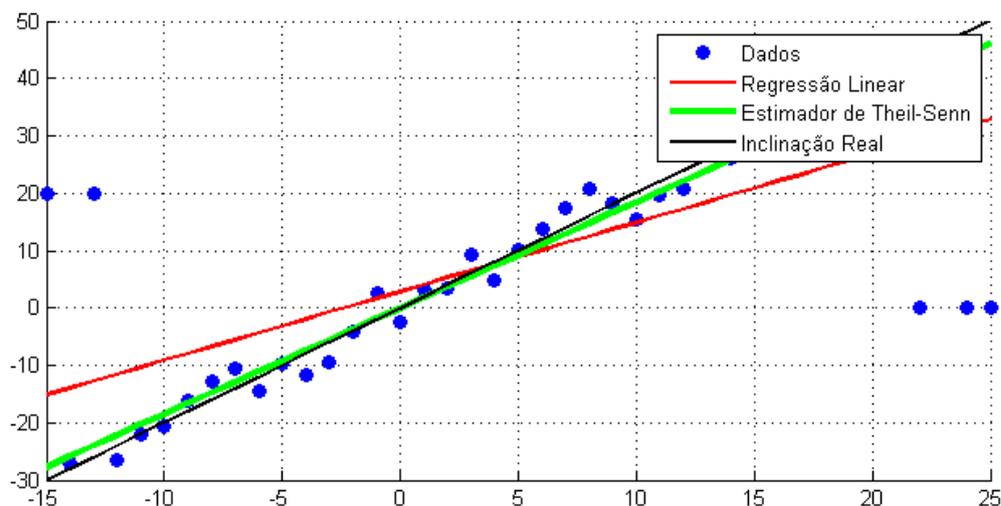


Figura 7: O estimador de declive de Theil-Sen é menos sensível à valores extremos

Essa sensibilidade limitada para *outliers* justifica a apelação de “regressão robusta” as vezes encontrada para o estimador de Theil-Sen.

1.2.7.2. Importância da visualização dos dados

A utilização de testes estatísticos pode induzir a erros se a distribuição dos dados recolhidos não é “humanamente” avaliada. A visualização dos dados é fundamental para entender as observações recolhidas depois de uma experimentação (SHORESH & WONG, 2012). Já em 1973, antes da informática ter entrada na rotina da maioria dos pesquisadores, Ascombe (1973) avisava que os indicadores estatísticos podiam esconder dados relevantes ou induzir ao erro quando utilizados sem precaução. Demonstrou essa afirmação através de um quarteto de séries de dados possuindo as mesmas estatísticas descritivas (Tabela 3) porém distribuições diferentes (Figura 8).

Tabela 3: Estatísticas descritivas do quarteto de Ascombe (1973)

Propriedade	Valor
Média de x em cada caso	9 (exato)
Variância de x em cada caso	11 (exato)
Média de y em cada caso	7,50 (em até duas casas decimais)
Variância de y em cada caso	4,122 ou 4,127 (em até 3 casas decimais)
Correlação entre x e y em cada caso	0,816 (em até 3 casas decimais)
Valor-p	0,002191 (p<0,01)
Linha de regressão linear em cada caso	$y = 3,00 + 0,500 x$

O caso 1 representa uma correlação e sua regressão associada respeitando os pré-requisitos. Os casos 2 e 4 evidenciam que o coeficiente de correlação elevado não está traduzindo a realidade da interação entre as variáveis X e Y. O caso 3 mostra como um *outlier* desvia a reta de regressão no caso da regressão “clássica”.

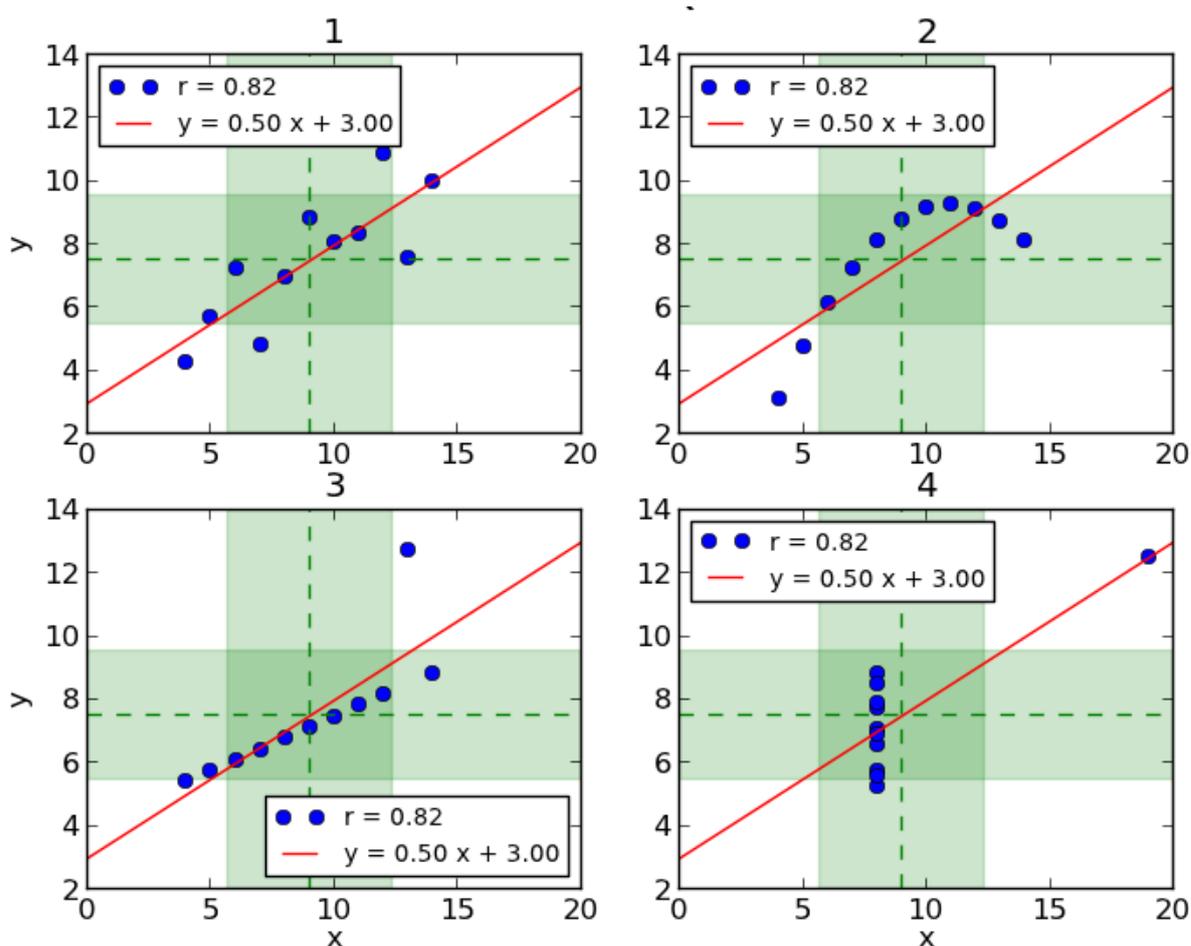


Figura 8: Representação gráfica do quarteto de Ascombe (1973)

Fonte: Valores numéricos segundo Ascombe (1973); Ilustração de *Wikimédia Commons*

1.2.7.3. Correlação e causalidade

A correlação entre duas séries de dados não implica uma relação de causalidade. Por exemplo, pode se imaginar que há uma correlação entre as vendas de óculos escuros e as vendas de sorvetes. Seria, portanto, errado de concluir que a venda de óculos escuros teria influência sobre a venda de sorvetes. Nesse caso, a correlação é devida à um terceiro fator: o clima. Pode haver correlação entre duas variáveis que não tem explicação plausível.

1.2.7.4. Interações dos fatores

Quando as variáveis de qualidade da água são correlacionadas com variáveis geográficas, essas características geográficas são muitas vezes consideradas variáveis independentes. Na realidade os fatores geográficos são muitas vezes interdependentes. As áreas urbanas maiores se desenvolvem em áreas planas (correlação positiva), as pastagens são desenvolvidas acima da vegetação arbórea (correlação negativa), as áreas altas e com declividade acentuadas são protegidas pelo Código Florestal (BRASIL, 2012), implicando uma provável correlação positiva entre altitude e a presença de vegetação arbórea. As áreas com alta declividade são mais susceptíveis a erosão, mas elas também são mais florestadas: a correlação entre declividade e sólidos em suspensão total nos cursos d'água pode ser difícil de se medir, já que está influenciada por dois fatores diferentes e contraditórios, mas possuindo entre eles uma correlação positiva. Allan (2004), entre outros, relata essa dificuldade de associar estatisticamente a um fator uma consequência sobre a qualidade da água.

A análise da interação entre as variáveis supostamente independentes (fatores geográficos) é fundamental para não se cometer um erro de análise. A análise das interações entre os fatores geográficos é realizada no Capítulo 5.

1.2.7.5. O valor-p não explica tudo

Um valor omnipresente hoje em dia nas revistas científicas e abrangendo todos as disciplinas: ecologia, medicina, ciências sociais, psicologia etc. é o $p < 0,05$. O mundo científico começou a se questionar sobre um fenômeno qualificado por alguns de *p < 0.05 or perish* (NUZZO, 2014; ROCHA & MONTEIRO, 2015). É importante lembrar aqui que o valor de 0,05 é um limiar arbitrário correspondendo um nível de confiança de 95% de rejeição da hipótese nula, mas que um valor-p de 0,06 ou 0,07 não significa que a correlação não esteja significativa. A Associação Americana de Estatísticas publicou um alerta sobre o abuso e o mau

uso do valor-p (BAKER, 2016), lembrando que o conhecimento da área científica e a plausibilidade da hipótese do estudo são mais importantes do que um $p < 0,05$.

O Capítulo 4, no qual se estuda a evolução da qualidade da água ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto permitirá uma visualização dos dados e a realização de hipóteses a partir da caracterização da área de estudo (Capítulo 2) e das propriedades das variáveis de qualidade da água (Capítulo 1).

1.2.7.6. Variáveis quantitativas, variáveis qualitativas

No que se refere a variáveis caracterizando as sub-bacias, faixas ripárias ou entorno dos pontos onde se avalia a qualidade da água, a abordagem qualitativa é usada na maior parte dos estudos. Uma variável qualitativa pode ser, por exemplo, “mata ciliar preservada a montante do ponto”; “declividade baixa na maior parte da bacia” ou “presença de solo exposto na cabeceira da bacia devida a obras”. As variáveis quantitativas correspondentes aproximadamente seriam: “70 % da mata ripária original é preservada nos 200 metros a montante do ponto”; “a declividade média da bacia é de 6%, sendo inferior a 3% em 90% da bacia”; “O solo exposto ocupa 7% da sub-bacia correspondendo ao ponto estudado”.

1.2.7.7. Métodos implícitos

Os métodos que chamados nesse trabalho de implícitos se referem a estudos relacionando o uso e cobertura da terra e as variáveis de qualidade da água:

- 1) Sem quantificação do uso e cobertura da terra nas sub-bacias ou proximidades dos pontos; ou sem cálculo de coeficiente de correlação entre as propriedades da paisagem e as variáveis de qualidade da água, podendo se estudar um ponto só ou poucos pontos, acarretando que o uso da correlação não seja recomendada pelo tamanho da amostra;
- 2) Quando o uso e cobertura da terra é definido de maneira qualitativa para vários pontos. O uso e cobertura da terra entra como variável qualitativa na análise dos dados de qualidade da água, separando-se, por exemplo, os pontos com “floresta predominante no entorno do ponto” dos pontos com “pastagem predominante no entorno do ponto”

Com o método 1) A qualificação da bacia é necessária, já que é o objetivo desses estudos. Os estudos se baseiam sobre as variáveis químicas de qualidade da água e suas correlações e evoluções espaciais ou temporais, podendo ou não levar um outro fator em consideração como a pluviometria. O estudo é possível com um único ponto de amostragem, mas é necessário ter séries de dados completas e vários parâmetros de qualidade da água marcadores de fenômenos identificados, por exemplo: Nitrogênio amoniacal marcador de poluição pontual próxima; Nitrato de poluição difusa mais distante, etc.

Uma análise de componente principal / análise fatorial (ACP/AF) permite agrupar as variáveis de qualidade da água que possuam variações similares; os grupos assim feitos são chamados de fatores. A ACP/AF permite determinar também os fatores que mais influenciam na qualidade da água, já que os primeiros fatores concentram a maior parte da variância dos dados de qualidade da água. A ACP/AF é um método multivariado já que ele trata os dados de qualidade da água como um conjunto. Cada fator traduz um fenômeno acontecendo na sub-bacia do ponto. Foi uma metodologia aplicada por Rocha et al. (2014) e Rocha & Costa (2015) para determinar como o uso e cobertura da terra influía sobre a qualidade da água em mananciais de Juiz de Fora. A pluviometria foi utilizada como dado auxiliar. Nos dois mananciais estudados, o primeiro fator indica o escoamento superficial nas pastagens como principal influência sobre a qualidade da água nos mananciais. Freitas (2015) e Silva (2015) estudaram mais pontos das bacias de contribuição desses mananciais e encontraram resultados similares, destacando-se mais a ocupação antrópica no caso de um tributário. Esses estudos fizeram uso de dados tanto qualitativos como quantitativos referente aos possíveis impactos sobre a qualidade da água. Outras referências são Andrade et al. (2007) ou Guedes et al. (2012).

O método 2) é ilustrado no estudo de Hakamata et al. (1992), onde ele classifica o uso e cobertura da terra predominante ao redor de 130 pontos de amostragem. Análises de agrupamento dos pontos baseados nos valores dos parâmetros de qualidade da água coincidem com os agrupamentos por grupo de uso e cobertura, demonstrando por exemplo que os pontos dentro de florestas apresentam baixas concentrações de nutrientes e baixas condutividades, ou que as plantações de arroz eram sumidouros de nitrato oriundo das pastagens. Rocha et al. (2016), ao estudar o impacto do Campus Universitário de Juiz de Fora sobre a qualidade da água utiliza também um método que pode ser classificado como implícito. As áreas de drenagem de 5 cursos d'água foram delimitadas e cada uma foi qualificada. A estatística escolhida foi não paramétrica. A comparação das medianas de dados de Turbidez ao longo de

12 meses de monitoramento destacou o impacto de obras sobre esse parâmetro em uma seção específica dessa Bacia (P5); para foz de outro tributário (P4), a DQO indicou impactos devido as falhas em redes de efluentes de laboratórios da UFJF. Um outro estudo implícito baseado no mesmo princípio é o estudo de Pinheiro et al. (2014), onde o uso e cobertura foi calculado para 5 sub-bacias, mas não entrou de maneira quantitativa na análise estatística proposta pelos autores. Tanaka et al. (2013), para 16 pontos, usa representações gráficas e o cálculo de intervalos de confiança no período seco e no período chuvoso para evidenciar o papel do escoamento superficial sobre superfícies agrícolas nas concentrações muito elevadas de nitrato e nitrogênio total.

Um estudo interessante realizado no Brasil foi realizado por Silva et al. (2007) no qual as correlações das variáveis de qualidade da água entre elas mesmo são estudadas em função do uso maioritário de 5 sub-bacias: Vegetação natural (cerrado), Eucalipto ou plantação de cana de açúcar. Os resultados evidenciaram grandes impactos dessas coberturas artificiais sobre a qualidade da água.

Os métodos implícitos podem ser aplicados para poucos pontos ou até um ponto só de amostragem, mas precisam de séries históricas para serem validados.

1.2.7.8. Métodos explícitos

Duas categorizações podem ser feitas: abordagem paramétrica ou não paramétrica e abordagem univariada ou abordagem multivariada. Muitas vezes os autores vão abordar as correlações entre as variáveis e os fatores com a estatística univariada e propor regressões com métodos multivariados. A ACP/AF é utilizada como auxílio ao entendimento da dinâmica dos parâmetros de qualidade da água em alguns estudos (LI et al., 2009; TRAN et al., 2010; BU et al., 2014). Um método relativamente recente, baseado na geolocalização dos pontos de coletas, permite definir relações não estacionárias (TU & XIA, 2008) entre os fatores geográficos e a qualidade da água.

1.2.7.8.1. Abordagem univariada

Wang e Yin (1997) defendem a utilidade do Sistema de Informação Geográfica (SIG em português, GIS em inglês) ao estudar a relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros de qualidade da água numa bacia de 9700 km² situada em Ohio, Estados Unidos e com dados abrangendo quase 30 anos. Em 6 pontos, eles correlacionaram a condutividade específica (Cond) com o uso (6 classes) nas sub-bacias desses pontos. A medida de Cond serve de

indicador para avaliar a qualidade geral da água, sendo correlacionada (com o ρ de Spearman) com 60 das 199 variáveis de qualidade da água disponíveis no banco de dados dos autores. É escolhida a estatística paramétrica com o cálculo do R de Pearson para a relação entre a Cond e o uso e cobertura da terra nas sub-bacias dos pontos. Somente a classe “uso urbano” mostrou uma correlação significativa com a Cond ($R=0,823$, $p=0,0448$).

No Brasil, Vanzela et al. (2010) relacionaram o uso e cobertura da terra a nível de bacia em 5 pontos com a qualidade da água, utilizando o coeficiente R de Pearson para avaliar a correlação. Como a qualidade da água foi medida durante 24 meses, o número total da amostra para o cálculo dos valores-p é de 120, permitindo destacar correlações significativas. Evidenciou-se, por exemplo, que a classe “Mata” tinha uma correlação positiva com a vazão específica e o teor de oxigênio dentro d’água. Uma crítica que pode ser feita a esse trabalho é que o autor não mencionou a questão da normalidade dos dados, nem de interdependência dos fatores, levando a apresentar correlações intrigantes, por exemplo, OD sendo melhorado pela classe urbana, sem tecer mais comentários. Um trabalho de Santos & Hernandez (2013) utilizou uma metodologia similar, baseando-se na escala da bacia e das faixas ripárias, evidenciando, por exemplo, a correlação positiva das pastagens e assentamentos sobre as concentrações de coliformes; ou a correlação negativa das matas em áreas de APP sobre os coliformes e a condutividade. Outro trabalho de Rocha et al. (2014) evidenciou correlações entre o uso e cobertura da terra de 8 pontos nos córregos de dois mananciais de Juiz de Fora e parâmetros de qualidade da água, aplicando a estatística não paramétrica

Buck et al. (2004) usaram o tau de Kendall para avaliar as correlações entre variáveis de qualidade da água, e o R de Pearson, após normalização dos dados, para as correlações entre uso e cobertura da terra e variáveis de qualidade da água na escala do *Buffer* e da bacia para córregos de ordem 1 a 4. Esse estudo evidenciou o papel da vegetação natural na retenção dos nutrientes (Fósforo Total e Nitrogênio Total) nos corredores ripários e a contribuição positiva da classe “Pastagem” para esses parâmetros. Outros estudos baseados nos mesmos métodos estatísticos são: Gyawali et al. (2013), interessante por mencionar a dependência das classes de uso e cobertura; Lee et al. (2009), estudando o impacto do uso e cobertura para as épocas secas e chuvosas; ou Li et al. (2012), mostrando o impacto da agricultura (a nível de bacia, com o uso do ρ de Spearman) sobre os parâmetros DBO, DQO, quantidade de sedimentos, dureza e nitrato.

Bu et al. (2014) verificaram a normalidade dos dados de qualidade da água amostrados em 69 pontos da bacia hidrográfica do rio Taizi e calcularam as correlações com o R de Pearson entre 7 classes de uso e cobertura da terra e 15 parâmetros de qualidade da água para a estação

seca (frio com temperaturas negativas e seco) e a estação chuvosa (quente com temperatura média máxima superior a 25°C). O clima dessa bacia é continental úmido com a influência da monção. A pluviometria e as temperaturas são elevadas durante o verão, tendo, para essa época do ano, similaridades com o clima do Sudeste brasileiro. O artigo de Bu et al. (2014) se destaca dos demais por propor o estudo da correlação de métricas da paisagem com as variáveis de qualidade da água. As métricas são, por exemplo, o número de fragmentos de uso e cobertura da terra, o tamanho do maior fragmento, o índice de diversidade de Shannon aplicado aos fragmentos de uso e cobertura da terra. Utilizando a regressão múltipla *stepwise* determinou-se os usos mais impactantes para cada variável de qualidade da água. No período chuvoso, o uso agrícola foi o mais impactante e no período seco, foi o uso urbano.

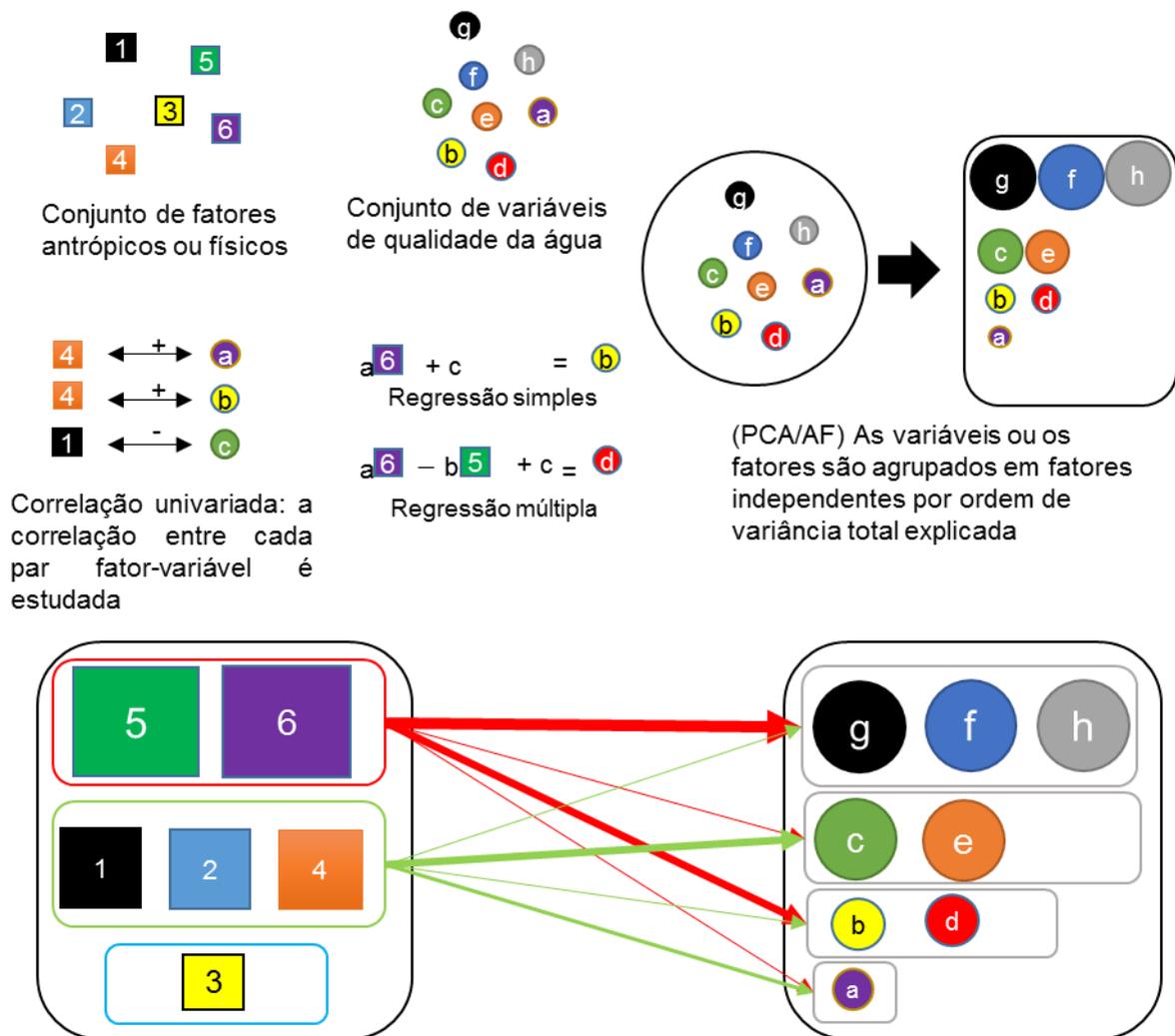
A regressão múltipla foi também usada por Maillard & Santos (2008) para a bacia hidrográfica do rio das Velhas, em que parte dessa bacia contém a área metropolitana da cidade de Belo Horizonte. A relação entre variáveis de qualidade da água e uso e cobertura da terra foi feita para a escala do *buffer*, para várias larguras (de 90m até 510m) e é limitada à área exclusiva de contribuição de cada ponto. Um dos resultados dessa pesquisa foi que o fósforo total se relacionava mais com o uso e cobertura da terra no menor *buffer* durante a estação chuvosa.

1.2.7.8.2. Abordagem multivariada

A abordagem multivariada é muitas vezes utilizada em complemento de outras análises univariadas, com os resultados fornecidos pela análise multivariada, em geral, mais difíceis de se interpretar do que os resultados fornecidos por correlações “simples” entre fatores geográficos e variáveis de qualidade da água (Figura 9).

A Análise de Redundância (*Redundancy Analysis*), abreviada em RDA e a Análise de Correlação Canônica (*Canonical Correlation Analysis-CCA*) apresentam similaridades com o método da ACP/AF. Elas permitem analisar o conjunto de relações existentes entre os fatores e as variáveis de qualidade da água. Essas metodologias multivariadas são particularmente utilizadas em ecologia, por permitir a análise de relações complexas entre fatores e variáveis “respostas”. A partir de uma RDA, é possível determinar a proporção da variância da qualidade da água explicada pelos fatores escolhidos. Foi baseado na RDA por exemplo que Sliva e Willams (2001) mostraram que na bacia que eles estudaram, o uso e cobertura nas margens influenciava mais sobre a qualidade da água do que o uso e cobertura na totalidade da bacia. Baseando-se na RDA, Chen & Lu (2014) mostraram que para uma bacia rural chinesa, fatores socioeconômicos explicavam 44% da variabilidade da qualidade da água, a topografia 30% e

30% somente pelo uso e cobertura da terra. A soma dos fatores é superior a cem, já que existe também uma dependência entre os fatores. O conjunto dos fatores conseguiu explicar 86,1% da variância da qualidade da água da bacia estudada.



RDA ou CCA os dados referentes aos fatores e às variáveis de qualidade da água são analisadas em conjunto. Os eixos de fatores definidos na RDA influenciam de maneira global, com diferentes graus, a totalidade das variáveis de qualidade da água.

Figura 9: Métodos estatísticos para a avaliação de fatores determinando a qualidade da água

No Brasil, Freire & Castro (2014) explicaram as variações dos parâmetros Coliformes totais, Oxigênio Dissolvido, Fósforo, Nitratos e Amônia em 13 pontos de uma bacia em maioria rural com a utilização da CCA. O primeiro Eixo da CCA (fator), que mais influenciou sobre a qualidade da água foi chamado de “índice de uso do solo” e se correlacionou positivamente ($r=0,87$) com o “índice de degradação das águas”, primeiro Eixo das variáveis de qualidade.

1.2.7.8.3. Metodologias inovadoras

No caso do estudo de amplas bacias hidrográficas apresentando um gradiente marcado de urbanização ou de altitude por exemplo, a correlação entre o uso e cobertura da terra e as variáveis de qualidade da água pode ser não estacionária. Isso significa que ela varia dependendo do lugar onde é feita a correlação. Para investigar essas correlações variando no espaço, Tu & Xia (2008) implementaram a Regressão Geograficamente Ponderada (*geographically weighted regression – GWR*); Brundson et al. (1998) para estudos ligando a qualidade da água com fatores da bacia hidrográfica ou das faixas ripárias; Tu & Xia (2008) mostraram, por exemplo, que áreas agrícolas na proximidade das cidades tendiam a melhorar a qualidade da água e que longe delas, ao contrário, pioravam a qualidade da água. Pratt & Chang (2012) enfatizam que a GWR pode ser útil para o planejamento dos recursos hídricos a nível local.

De um modo similar, Arslan (2013), propõe uma ACP com uma componente espacial, e encontra resultados diferentes da ACP clássica, concluindo na validade do conceito e em benéficos na análise dos resultados, ao combinar as duas metodologias.

1.2.7.8.4. Diversos fatores influenciam na qualidade da água

Segundo Bu et al. (2014), como já comentado, a diversidade da paisagem tem uma influência sobre a qualidade da água. Há uma grande diversidade de fatores, além do uso e cobertura da terra, que podem explicar variações de qualidade da água. Utilizando os vários métodos estatísticos apresentados anteriormente: Hwang et al. (2007) e Park et al. (2014) calcularam correlações com índices morfométricas de reservatórios e de bacia para explicar uma parte da variabilidade da qualidade da água; Lorz et al. (2012) ao estudar a evolução da qualidade da água dos tributários do Lago Paranoá no Distrito Federal de Brasília encontram uma relação entre a turbidez e a área da bacia; Wan et al. (2014) introduzem na análise o *Curve Number* (número de curva, importante em estudos hidrológicos por definir o potencial de infiltração de um tipo de solo em função do uso e cobertura) e a declividade média da bacia; a pluviometria média ou dos últimos dias é levada em consideração por Seeboonruang (2012), Tanaka et al. (2013), Smith et al. (2013) e Yu et al. (2014). O estudo de Smith et al. (2013) é bastante original, ligando a produção de leite com a qualidade da água; Tu & Xia (2008) destacaram a densidade de população como o fator que mais explicou a variabilidade da qualidade da água na bacia estudada; Tanaka et al. (2016) demonstram a importância da estrutura

ripária para as variáveis de qualidade da água e os índices biológicos relativos à biodiversidade; Chen & Lu (2014) encontraram como melhora da variável explanatória condutividade, o Produto Interno Bruto das sub-bacias, sendo que o número de cabeças de gado explicou a variação de fósforo total e de turbidez.

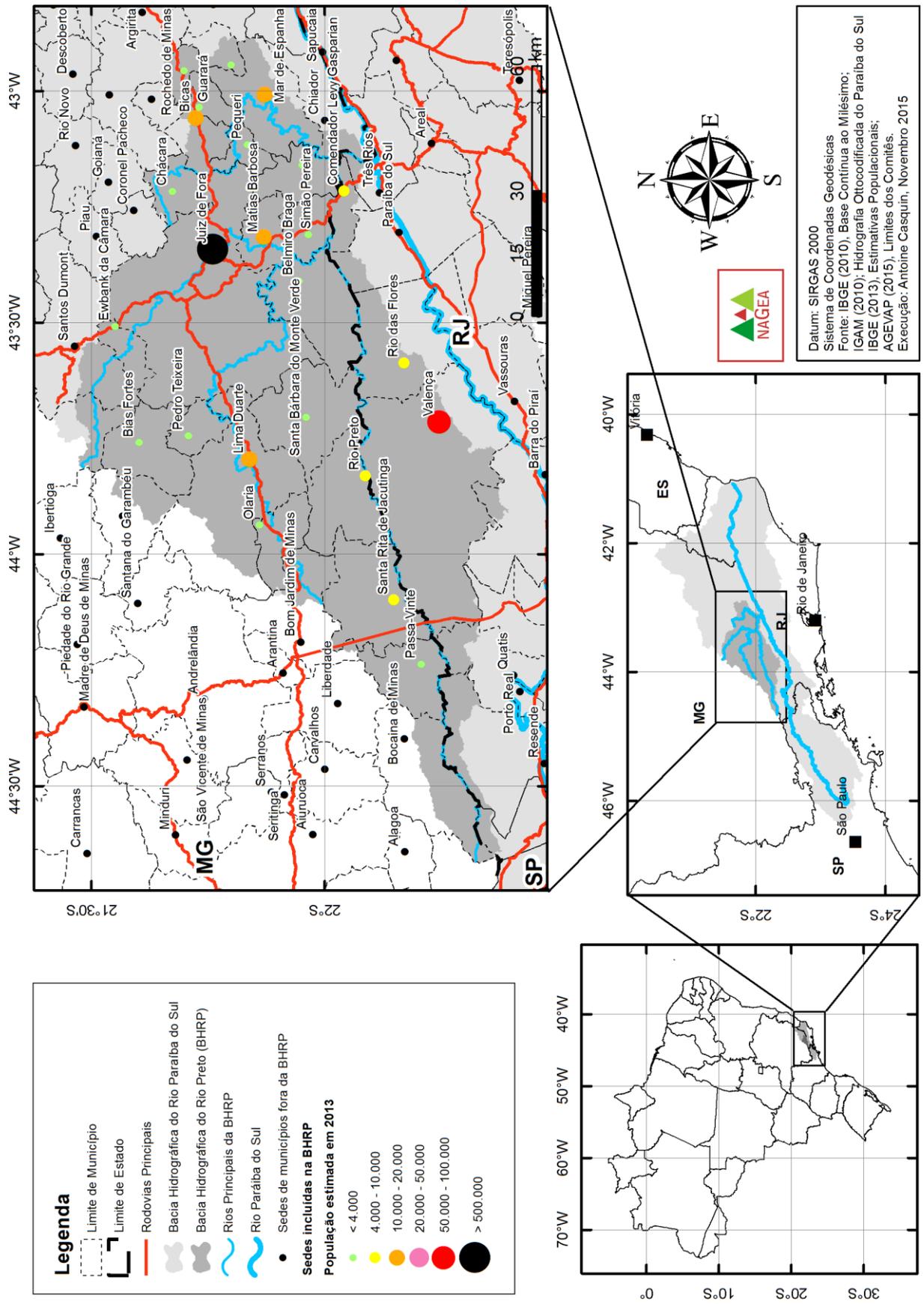
Capítulo 2: Caracterização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do rio Preto (BHRP) é inserida na região Sudeste do Brasil. O rio Preto deságua no rio Paraíba do Sul, do qual é afluente direto da margem esquerda. A bacia do rio Preto encontra-se essencialmente em Minas Gerais, e nela distinguem-se 4 rios principais: o rio Preto, o rio do Peixe, o rio Paraibuna e o rio Cágado. A maior cidade da bacia é Juiz de Fora, situada na planície do rio Paraibuna com uma estimativa de 559.636 habitantes em 2016 (IBGE,2016).

Em sua maioria, esta Bacia situa-se no estado de Minas Gerais, na mesorregião da Zona da Mata com inclusões nas mesorregiões do Campo das Vertentes e do Sul/Sudoeste de Minas. O rio Preto separa os Estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro até a junção com o rio Paraibuna. O Sul da Bacia do rio Preto se encontra em uma parte do estado do Rio de Janeiro, ao norte da Região Sul Fluminense. A região do baixo Preto-Paraibuna se divide entre a Zona da Mata mineira e o Centro Fluminense.

A Bacia Hidrográfica do rio Preto ocupa uma área de 8.560 km², correspondendo a aproximadamente 15% da Bacia do rio Paraíba do Sul, em local estratégico para o abastecimento de água de algumas das cidades contidas nessa Bacia. O rio Preto é o maior afluente de margem esquerda do rio Paraíba do Sul e tem um comprimento aproximado de 262 quilômetros. A Bacia Hidrográfica estudada contempla dois Estados, sendo diferente da divisão efetuada pelo Comitê de Bacia do Paraíba do Sul – CEIVAP, onde o Subcomitê PS1-Bacia do Preto-Paraibuna só cobre a parte da Bacia dentro do Estado de Minas Gerais. Do ponto de vista administrativo, a parte fluminense da Bacia fica no Subcomitê do Médio Vale do Paraíba do Sul. Historicamente, a Bacia foi chamada de Bacia do rio Paraibuna devido à importância histórica no desenvolvimento da região e por parecer mais central na Bacia.

A ocupação da Bacia do rio Preto é essencialmente rural, com a paisagem típica sendo composta de pastagens e remanescente de mata atlântica. O relevo predominante é fortemente ondulado e montanhoso, impedindo a mecanização da agricultura e assim o cultivo intensivo. As declividades acentuadas observadas na Bacia e a ocorrência de sobrepastoreio levam a observação de pastagens degradadas, com solo compactado exposto ou quase exposto, e erosões. O reflorestamento comercial vem sendo desenvolvido nesses últimos anos. O impacto sobre os recursos hídricos do plantio e manejo de Eucalipto (espécie exótica) é muito polêmico, e é comum ler ou escutar que esse cultivo diminui a vazão nas nascentes e nos córregos.



Mapa 2: Localização da área de estudo e sedes dos municípios incluídos.

O mapa de localização (Mapa 2) mostra a localização das sedes das cidades que pertencem à Bacia Hidrográfica do rio Preto (BHRP). Somente duas cidades contam com mais de 50.000 habitantes segundo o IBGE (2016): Juiz de Fora com 559.636 hab. na bacia do rio Paraibuna; e Valença com 73.997 hab. na parte sul da Bacia do rio Preto. As demais cidades não passam de 20.000 como visto no Mapa 2. O fato de ter somente duas cidades com mais de 20.000 habitantes na BHRP é interessante porque significa que somente duas cidades precisam de um plano diretor. Isso reforça também a ideia de que a bacia é essencialmente rural.

2.1. Rios principais

O rio Paraibuna nasce nos contrafortes da Serra da Mantiqueira no município de Antônio Carlos a cerca de 1180 m de altitude e banha a cidade de Juiz de Fora, importante polo industrial de Minas Gerais e maior município da Bacia Hidrográfica do rio Preto. Seu percurso é orientado no sentido Norte-Sul. O curso do Paraibuna é barrado após percorrer 50 km desde a nascente (CESAMA, 2015) no território de Ewbank da Câmara na divisa com o município de Juiz de Fora, formando a Represa de Chapéu d'Uvas. Essa Represa foi planejada para o controle das enchentes em Juiz de Fora e para garantir o futuro abastecimento desta cidade (MACHADO, 2012). Foi inaugurada em 1994 e está atualmente (em 2015) sendo integrada à matriz de abastecimento público da cidade.

Segundo critérios hidrológicos (tamanho da bacia, comprimento do rio principal e etc.), o rio Paraibuna não é o rio principal da bacia que por muito tempo levou seu nome. Até sua foz no rio do Peixe, ele tem um comprimento de 119 km, área de bacia de 1250 km², ocupando a terceira posição na hierarquia. Sua confluência com o rio do Peixe marca a divisa entre três municípios: Belmiro Braga, Simão Pereira e Matias Barbosa.

Possui destacada importância histórica, pois foi ao longo dele que foram abertas estradas que iniciaram a colonização e o desenvolvimento de Minas Gerais e da Zona da Mata mineira. Um marco histórico importante para a região é a abertura do Caminho Novo das Minas em 1707. Um Eixo histórico é a Estrada União e Indústria em 1861 ligando Juiz de Fora a Petrópolis e sendo a primeira rodovia do Brasil. A atual BR-040 acompanha, até hoje, esse trecho. O Vale do Paraibuna também é atravessado pela Estrada de Ferro Central do Brasil. Outro destaque histórico desse Rio foi a construção da primeira usina hidrelétrica do Brasil no seu curso, Usina de Marmelos em 1889 em Juiz de Fora.

O rio do Peixe nasce nos contrafortes da Serra da Mantiqueira no município de Bom Jardim de Minas, a 1300m de altitude, com uma extensão de aproximadamente 190 km; a sua

vazão média é de 55 m³/s, tem área de 2400 km² até a confluência com o rio Paraibuna e recebe suas águas pela margem esquerda (ORLANDO, 2006). A maior sede de município banhada pelo rio do Peixe, é Lima Duarte e metade do seu percurso se dá dentro da zona rural de Juiz de Fora. O rio do Peixe tem vários afluentes importantes como o rio das Rosas, o córrego Sossego, o rio Grão Mongol, o rio Monte Verde e o rio Vermelho. Ele conta com uma Usina Hidrelétrica (UHE) desde 2006 com 50MW de potência instalada, próximo ao distrito de Torreões, pertencendo à cidade de Juiz de Fora. Essa UHE pertence à Votorantim Metais Zinco, empresa localizada perto do Distrito Industrial de Juiz de Fora. O reservatório da UHE ocupa 1,1 km², tem extensão de 7 km e sofre com o processo de eutrofização.

O rio Preto nasce na Serra de Itatiaia, próximo ao Pico das Agulhas Negras, numa altitude de aproximadamente 2700 metros. Ele corre no sentido Oeste-Leste até receber as águas do rio Cágado, e do Norte ao Sul até sua foz com o rio Paraíba do Sul. Até receber as águas do rio do Peixe percorreu 225 km para uma bacia de aproximadamente 3400 km² e uma vazão média aproximada de 90 m³/s. A parte superior da Bacia é bem preservada por fazer parte do Parque Nacional de Itatiaia, primeiro parque nacional criado em 1937. O curso superior do rio Preto apresenta uma declividade acentuada e trechos encachoeirados, que são atrativos turísticos na região. O desenvolvimento acelerado de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) na BHRP tende a submergir muitas cachoeiras, locais propícios para tais instalações. O rio Preto divide os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro da sua nascente até sua foz no rio Paraíba do Sul, esse último passando a marcar a fronteira entre os dois estados. Por essa razão, ele é considerado como de domínio federal.

O quarto rio de maior importância na BHRP é o rio Cágado. Ele é afluente de margem esquerda do rio Preto, próximo à foz no Paraíba do Sul. Nasce no município de Chácara numa altitude de 750m, tem comprimento de aproximadamente 137 km para uma área de drenagem de 1131 km² e uma vazão média de 15 m³.s⁻¹ (RIBEIRO, 2012). Sua foz no rio Paraibuna se localiza entre os municípios de Santana do Deserto e Chiador. A origem do nome desse rio está associada a lentidão de suas águas, lembrando uma espécie de tartaruga lenta – o Cágado.

Há controvérsias sobre o rio principal da área de estudo: segundo Araújo (2009), que usou vários critérios para determinar o rio principal, o rio Preto é o rio principal dessa bacia hidrográfica. O próprio nome do comitê de bacia no qual se insere boa parte da área de estudo: “PS1- Comitê da Bacia Hidrográfica dos Afluentes Mineiros dos rios Preto e Paraibuna” indica também que o rio Preto é considerado o rio principal, já que o rio do Peixe, nem sequer é mencionado no nome do comitê. Porém, segundo o critério da Resolução ANA 399/2004, o rio

do Peixe deveria ser considerado o rio principal. De fato, o único critério mencionado nessa resolução é o seguinte: “Em cada confluência será considerado curso d’água principal aquele cuja bacia hidrográfica tiver a maior área de drenagem”. Segundo essa resolução o rio do Peixe é o rio principal, já que no seu encontro com o rio Preto, ele tem uma bacia hidrográfica cuja área é um pouco maior.

Segundo diferentes critérios, o rio do Peixe ou o rio Preto ocupam o primeiro lugar da hierarquia fluvial da área de estudo. O fato do rio Paraibuna ocupar o terceiro lugar e do rio Cágado o quarto lugar é mais consensual.

2.2. Pontos de amostragem

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), no portal InfoHidro <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/gestao-das-aguas/monitoramento/agua-superficial>, disponibiliza dados de qualidade da água e os metadados referentes aos pontos de coleta.

A Bacia do rio Preto conta com 17 estações de monitoramento funcionando em 2013 e 2014. Cada estação tem um código começando por BS seguido de dois números. Os números não codificam o curso d’água, nem a posição do ponto, e parece que eles foram determinados a partir da data de início de operação da estação. Nos metadados encontra-se:

- Código da Estação;
- Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH), nesse caso todos fazem parte da UPGRH PS1: Comitê do rio Preto-Paraibuna;
- Data de estabelecimento e data eventual de desativação da estação;
- O Nome da bacia (Paraíba do Sul) e da sub-bacia (Paraibuna) segundo o comitê de Bacia;
- O Nome do curso d’água: Paraibuna, Vermelho (afluente do rio do Peixe), Peixe, Preto ou Cágado. O rio Paraibuna é considerado como o rio principal da bacia segundo os metadados;
- O Estado e o Município onde se encontra a estação;
- As coordenadas geodésicas em Graus Minutos Segundos da estação;
- A altitude da estação;
- A descrição do ponto de amostragem e o acesso rodoviário para o ponto;
- O tipo do corpo d’água (lótico ou lântico).

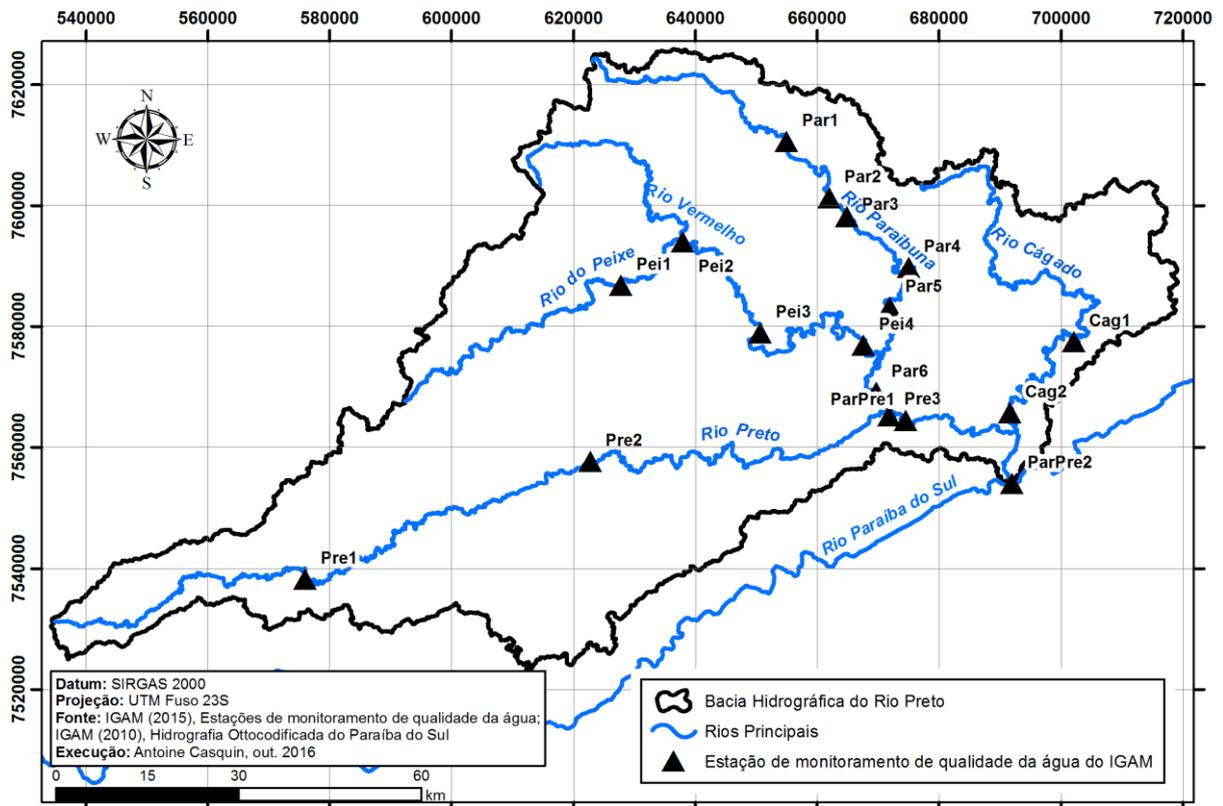
Para facilitar a leitura desse trabalho, as estações de monitoramento foram renomeadas (NomeDiss – Nome nessa dissertação) com prefixo correspondendo ao rio principal no qual elas se encontram e um número crescendo de montante para jusante. A Tabela 3 apresenta esses nomes. A classe 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 é usada como padrão de comparação ao longo desse trabalho, mas é importante notar que dois trechos do rio do Peixe e um trecho do rio Cágado estão enquadrados na Classe 1, mais restritiva.

As coordenadas e as descrições das estações permitiram suas geolocalizações, necessárias para posteriores análises. O Mapa 3 apresenta a localização das estações de monitoramento ao longo dos rios principais da BHRP. É importante notar que o ponto BS024, renomeado **Par6** é situado a jusante da confluência do rio Paraibuna e do rio do Peixe. O rio nessa porção é chamado de rio Paraibuna, apesar do rio do Peixe ser aproximadamente duas vezes maior em termo de área de contribuição e conseqüentemente de vazão. **A sigla deveria remeter ao rio do Peixe.** Para evitar alterações de monta nessa Dissertação, foi decidido manter essa nomenclatura. O leitor deve ficar atento que esta seção **Par6** está no rio do Peixe. As estações depois da confluência do Peixe-Paraibuna com o rio Preto foram renomeadas com o prefixo “ParPre” para “Paraibuna-Preto”.

Tabela 4: Nomes dos pontos de amostragem nesse trabalho

Estação	NomeDiss	Descrição	Classe de Enquadramento
BS002	Par1	Rio Paraibuna em Chapéu dUvas	Classe 2
BS006	Par2	Rio Paraibuna na ponte da antiga BR-040 em Juiz de Fora	Classe 2
BS083	Par3	Rio Paraibuna na ponte de acesso à represa João Penido	Classe 2
BS017	Par4	Rio Paraibuna a jusante de Juiz de Fora	Classe 2
BS018	Par5	Rio Paraibuna a jusante da UHE de Paciência	Classe 2
BS024	Par6	Rio Paraibuna em Sobragi	Classe 2
BS085	Pei1	Rio do Peixe a jusante de Lima Duarte	Classe 1
BS088	Pei2	Rio Vermelho a montante de sua foz no rio do Peixe.	Classe 2
BS090	Pei3	Rio do Peixe a jusante da UHE de Picada.	Classe 2
BS061	Pei4	Rio do Peixe próximo de sua foz no rio Paraibuna	Classe 1
BS026	Pre1	Rio Preto no município de Passa Vinte	Classe 2
BS027	Pre2	Rio Preto a jusante da cidade de Rio Preto.	Classe 2
BS028	Pre3	Rio Preto a montante de sua foz no Rio Paraibuna	Classe 2
BS030	Cag1	Rio do Cágado a jusante da cidade de Mar de Espanha	Classe 2
BS031	Cag2	Rio Cágado próximo de sua foz no Rio Paraibuna	Classe 1
BS029	ParPre1	Rio Paraibuna a jusante do Rio Preto	Classe 2
BS032	ParPre2	Rio Paraibuna próximo de sua foz no rio Paraíba do Sul	Classe 2

Fonte: IGAM, 2014



Mapa 3: Estações de monitoramento da qualidade da água do IGAM funcionando em 2013 e 2014

2.3. Determinação das características das sub-bacias

Um dos objetivos desse trabalho foi de caracterizar tanto os fatores naturais (“físicos”) como artificiais (“antropogênicos”) das sub-bacias dos pontos de amostragem de qualidade da água. Outro objetivo foi avaliar o uso e cobertura da terra nas faixas ripárias para esses mesmos pontos. A Figura 10 ilustra os procedimentos adotados no caso do uso e cobertura da terra. Procedimentos parecidos foram empregados para todas características calculadas para as sub-bacias. Os procedimentos utilizados para a produção dos mapas e o cálculo das características das sub-bacias serão detalhados ao longo desse capítulo.

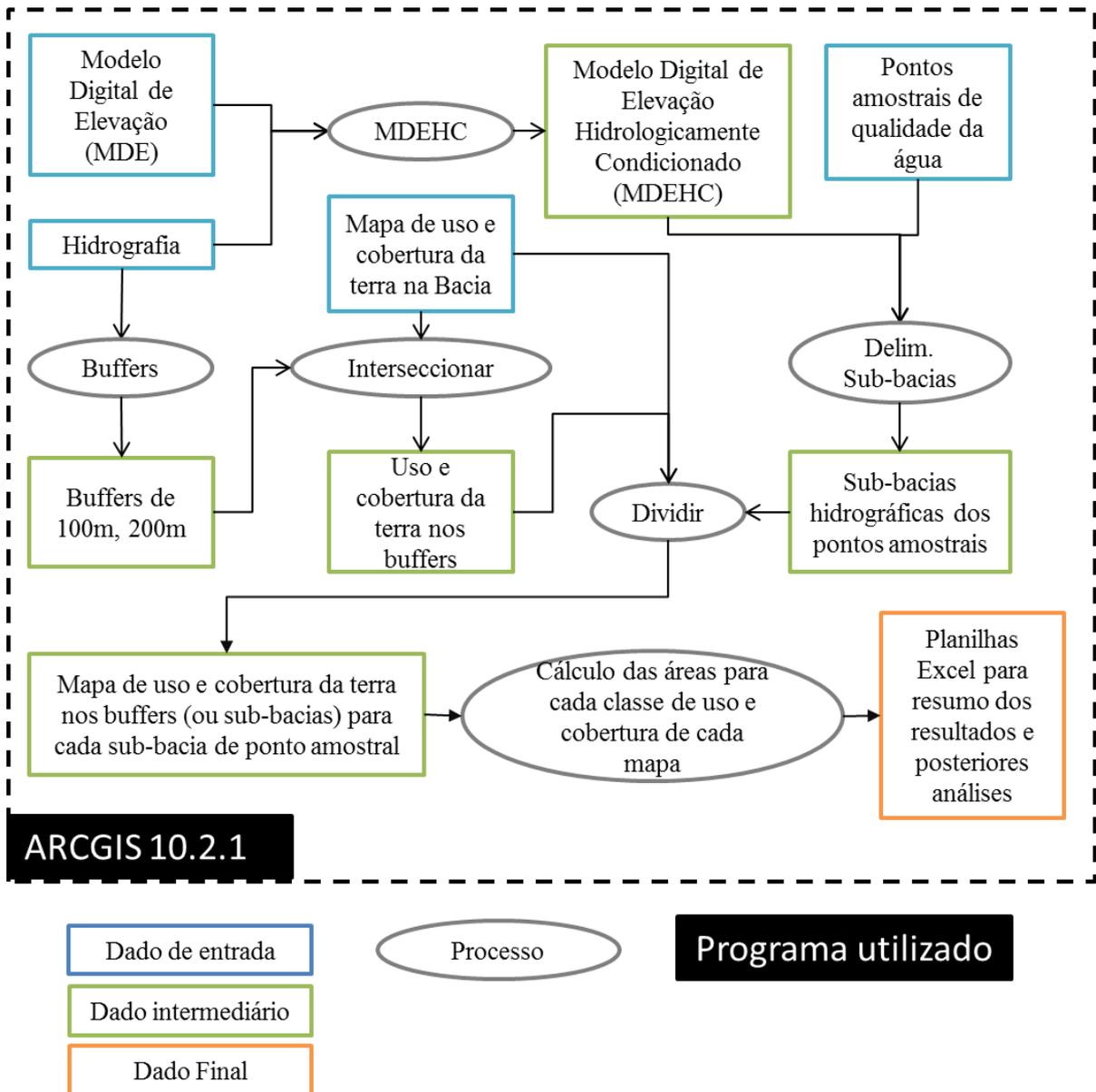


Figura 10: Procedimento para a delimitação das sub-bacias e suas caracterizações

O programa utilizado para esses procedimentos foi ArcGIS 10.2.1, sendo o programa comercial de Sistema Informações Geográficas mais amplamente usado. A obtenção do MDE e a conversão para um MDE Hidrologicamente Consistente são detalhados nos itens a seguir.

2.4. Características físicas das sub-bacias

2.4.1. Relevo e características morfométricas

2.4.1.1. Preenchimento do modelo digital de elevação (MDE)

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação matricial regular das altitudes. Ele é uma camada de dados fundamental para a delimitação das sub-bacias. Ele também foi utilizado para a caracterização das altitudes médias, das declividades (Capítulo 2) e para a correção topográfica das imagens de satélite (Capítulo 3). Ele pode ser obtido por interpolação das curvas de nível de mapas topográficas realizadas a partir levantamento altimétrico convencional (topografia ou aerofotogrametria) ou por técnicas de sensoriamento remoto.

O Modelo Digital de Elevação da área de estudo foi obtido a partir de dados SRTM⁻¹, com resolução nativa de 1 arco-segundo (USGS, 2010) disponibilizadas através do site *Earth Explorer do United States Geological Survey*. O MDE é disponível em formato GeoTiff de 1°lat*1°long e um arco-segundo de resolução especial horizontal, equivalente a aproximadamente 30 metros. O erro vertical absoluto para América do Sul foi de 6,2 m (RODRIGUEZ et al., 2006), melhor do que o objetivo da missão que era de 16 metros (FARR et al., 2007). Na área de estudo, o MDE comporta pequenos vazios (Figura 11a) principalmente em locais altos e com declividades acentuados. Essas lacunas do SRTM são comuns nos dados SRTM (DOWDING et al., 2004; REUTER et al., 2007). Esses vazios precisam ser preenchidos antes do uso do MDE para correção topográfica, mapa hipsométrico e de declividade.

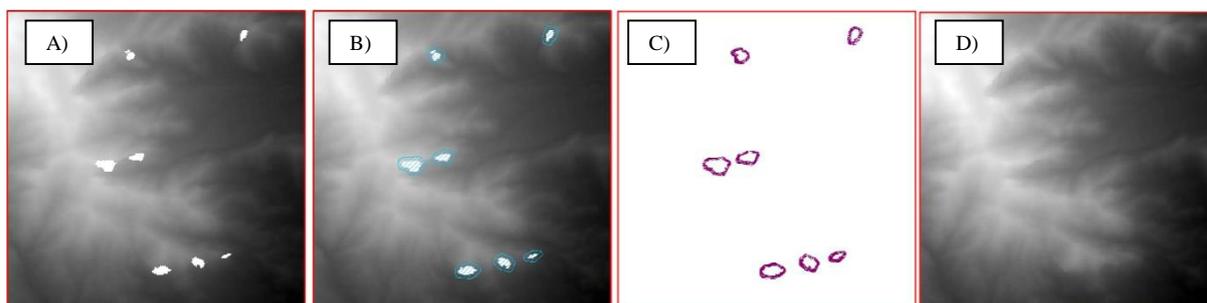


Figura 11: O preenchimento de dados SRTM com o método escolhido evidencia resultados satisfatórios.

O procedimento para o SRTM foi feito segundo a Figura 12, com o algoritmo de interpolação *Topo to Raster* do Arcgis, sendo uma ferramenta adequada e desenvolvida especialmente para interpolação de dados de MDE. A metodologia, uma interpolação baseada

nos valores próximos aos vazios, é adequada (DOWDING et al., 2004) para o preenchimento de pequenos vazios.

O MDE SRTM é disponibilizado em formato GeoTiff com datum WGS84 e sem projeção, no sistema de coordenadas geodésicas. O primeiro passo é projetar-lhe segundo a Projeção Universal Transversal de Mercator (UTM) no fuso 23S (no qual está inserida a área de estudo) e mudar o datum para SIRGAS 2000, sendo o datum oficial unificado das Américas. A reclassificação do raster permite a criação de uma camada valendo 1 onde tinha “NoData” no SRTM original e valendo “NoData” para os dados presentes originalmente no SRTM. A camada raster obtida na etapa precedente é transformada para polígono e um buffer de 120 metros, correspondendo a 4 pixels é aplicado (Figura 11b). Esse buffer englobando os vazios e os pixels vizinhos serve como máscara para extração dessas áreas no SRTM original reprojeto. O raster extraído é convertido para curvas de nível com espaçamento de 10 metros (Figura 11c), e é interpolado com a ferramenta *Topo to Raster* com o tamanho de pixel do SRTM reprojeto e ajustado com esse mesmo raster, para que os pixels coincidam. A etapa final para obter o MDE SRTM sem vazios é de usar a ferramenta *Mosaic to NewRaster* com operador “*First*” e colocando em primeiro o SRTM original reprojeto e em segundo os dados interpolados (Figura 11d). O resultado obtido é satisfatório conforme verificação visual (Figura 11d).

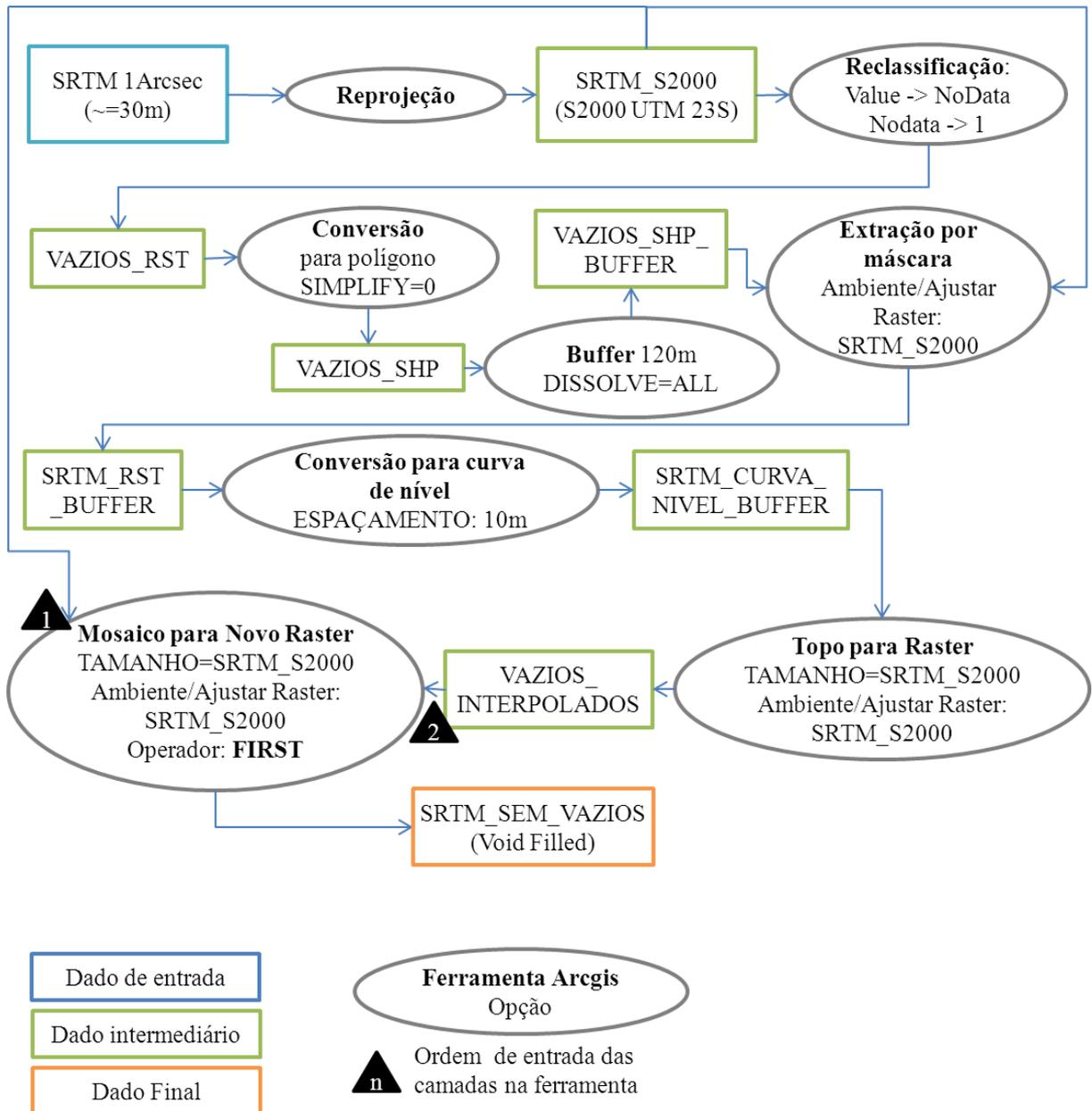


Figura 12: Procedimento para o preenchimento dos vazios por interpolação a partir dos vizinhos para dados SRTM-4 / 1 ArcSec.

Existem outros métodos para preencher um MDE como usar dados auxiliares de mapas topográficos ou mesmo outro MDE. Essa metodologia foi escolhida porque é simples e possui resultados satisfatórios. Se a bacia fosse exclusivamente dentro do Estado de Minas Gerais, ter-se-ia optado pelo uso das curvas de nível derivadas dos mapas topográficos do IBGE processadas pelo IGAM.

2.4.1.2. Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente

Um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC) pode se definir como: “a melhor representação digital do relevo capaz de reproduzir, com precisão, o caminho preferencial de escoamento da água superficial observado no mundo real” (ESRI, 1997).

Para obter o MDEHC, é preciso dispor de uma hidrografia georeferenciada no formato polilinha, sem lagos ou polígonos fechados, com as linhas desenhadas de montante para jusante (ESRI, 2015). A hidrografia utilizada nesse processo foi a hidrografia ottocodificada do Paraíba do Sul, disponível no portal InfoHidro do IGAM (IGAM, 2016). Essa hidrografia é baseada em mapas topográficas 1:50.000 do IBGE para a parte mineira da bacia e no mapa 1:1.000.000 da Agência Nacional das Águas (ANA) para os trechos paulistas e fluminenses do Paraíba do Sul. A ottocodificação é uma hierarquização dos cursos d’água e das sub-bacias associadas de maneira a facilitar a gestão dos recursos hídricos, ajudando nos processos de divisão de comitês, avaliações de impacto, outorgas etc. A ottocodificação foi proposta por Pfafstetter (1989) e é amplamente usada hoje em dia. Um extenso trabalho de vetorização, remoção de erros topológicos e codificação semiautomática das ottobacias foi realizado para o Estado de Minas Gerais (Luiz & Faria, 2013) para as escalas 1:50.000 e 1:100.000.

O MDEHC foi obtido através da imposição forçada da hidrografia vetorial, obtida no portal InfoHidro (IGAM, 2016), através do aprofundamento do relevo ao longo desta hidrografia no MDE (Figura 13). Esta etapa foi realizada através da aplicação do algoritmo ANUDEM, parte da ferramenta *Topo to Raster* do ArcGIS, desenvolvido por Hutchinson et al. (2009, 2011). Para a parte carioca da bacia, foi necessário importar e juntar a hidrografia das cartas topográficas (2712-4, 2713-2, 3 e 4, 2714-1, 2, 3 e 4, 2715-1 e 2) disponível em formato vetorial, porém não georeferenciadas na escala 1:50.000 no servidor ftp do IBGE. Os rios principais simbolizados por uma linha dupla tiveram que ser convertidos para uma linha simples. O trabalho de remoção de erros topológicos e de ottocodificação ficou fora do escopo dessa Dissertação, sendo esforço institucional como no caso do IGAM em Minas Gerais.

A diferença entre o MDE original e o MDEHC é visível na Figura 13. As cores mais obscuras simbolizam altitudes mais baixas.

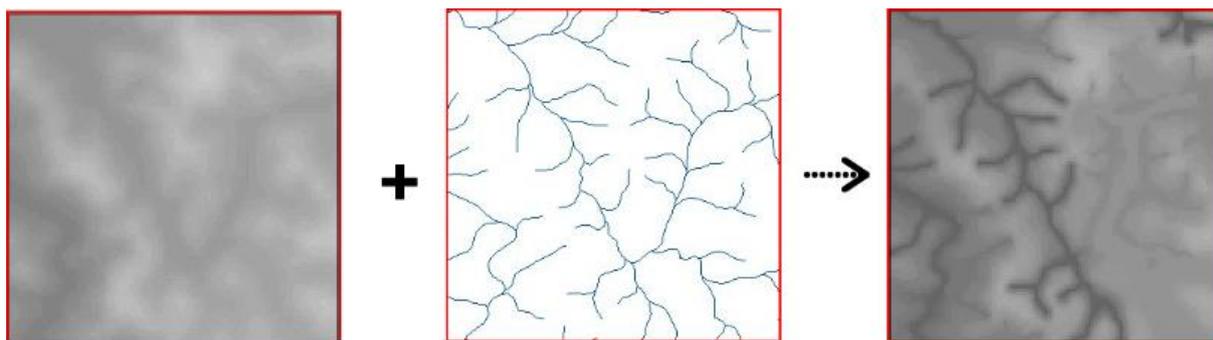


Figura 13: Do MDE ao MDEHC

2.4.1.3. Delimitação das sub-bacias

Para delimitar as sub-bacias foi utilizado a extensão ArcHydro v2.0 para ArcGIS 10.2.1. A Figura 14 ilustra todas as etapas do processo:

O MDEHC serve de dados de entrada (Figura 14a)

Um primeiro passo é a remoção de depressões espúrias (Figura 14b) com o comando *Fill* (Preenchimento).

As direções de escoamento são determinadas com o comando *Flow Direction* (Direção de Fluxo). Cada cor indica uma direção de escoamento (Figura 14c).

A partir do raster de direção de fluxo, é possível determinar o fluxo acumulado para cada pixel da BHRP (Figura 14d). O comando é *Flow Accumulation* (Fluxo Acumulado).

O comando *Stream Definition* (Definição dos córregos) permite definir os cursos d'água da bacia. Esse comando requer um parâmetro que é o limiar do número de células, ou a área de contribuição necessária para definir um córrego. Comparando com a hidrografia 1:50.000, o limiar de 0,5 km² foi considerado aceitável (Figura 14e). O comando *Stream Segmentation* permite associar a cada segmento de córrego um valor único.

A partir da camada de Córregos e da camada de Direção de Fluxo, o comando *Catchment Grid Deliniation* (Delimitação das Bacias no formato Grid, um tipo raster) é usado para definir cada sub-bacia elementar (Figura 14f),

Essa camada de raster é convertida para o formato vetorial com a ferramenta *Catchment Polygon Processing* (Processamento dos Polígonos das Bacias) como evidenciado na Figura 14g, Os comandos *Drainage Line Processing* (Processamento da drenagem) e *Adjoint Catchment Processing* (Processamento das Bacias Adjuntas) permitem hierarquizar os córregos e as bacias.

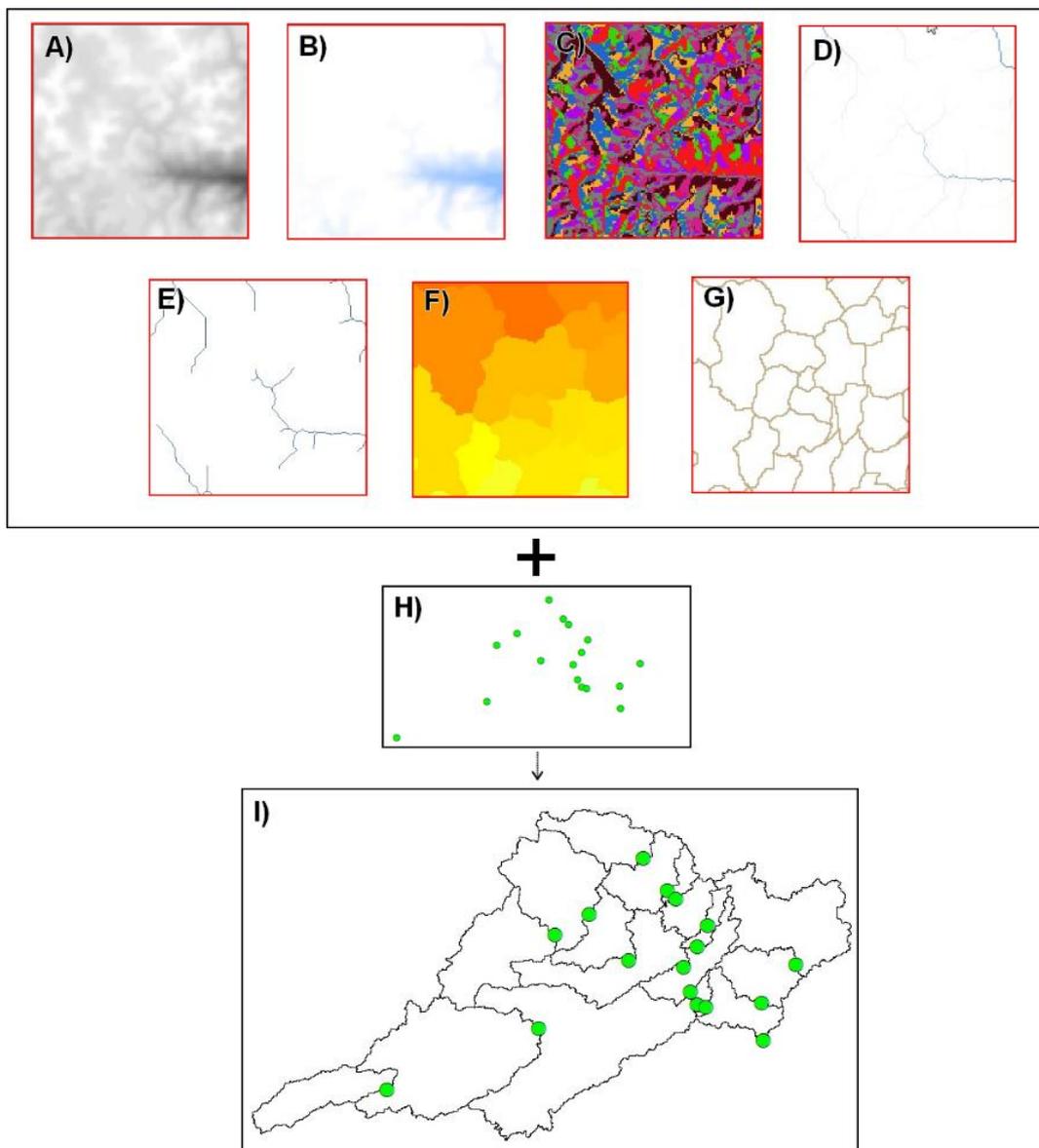
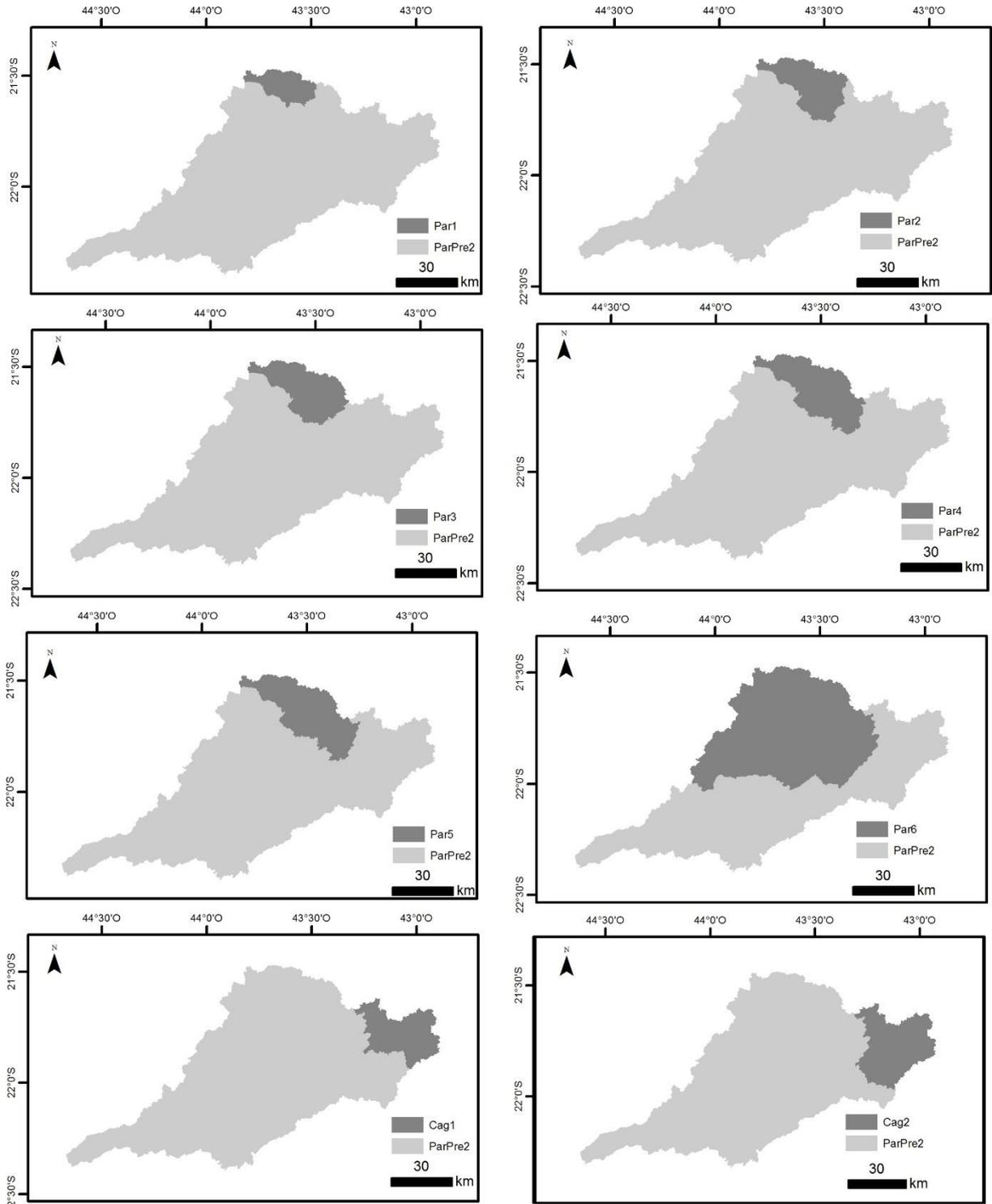


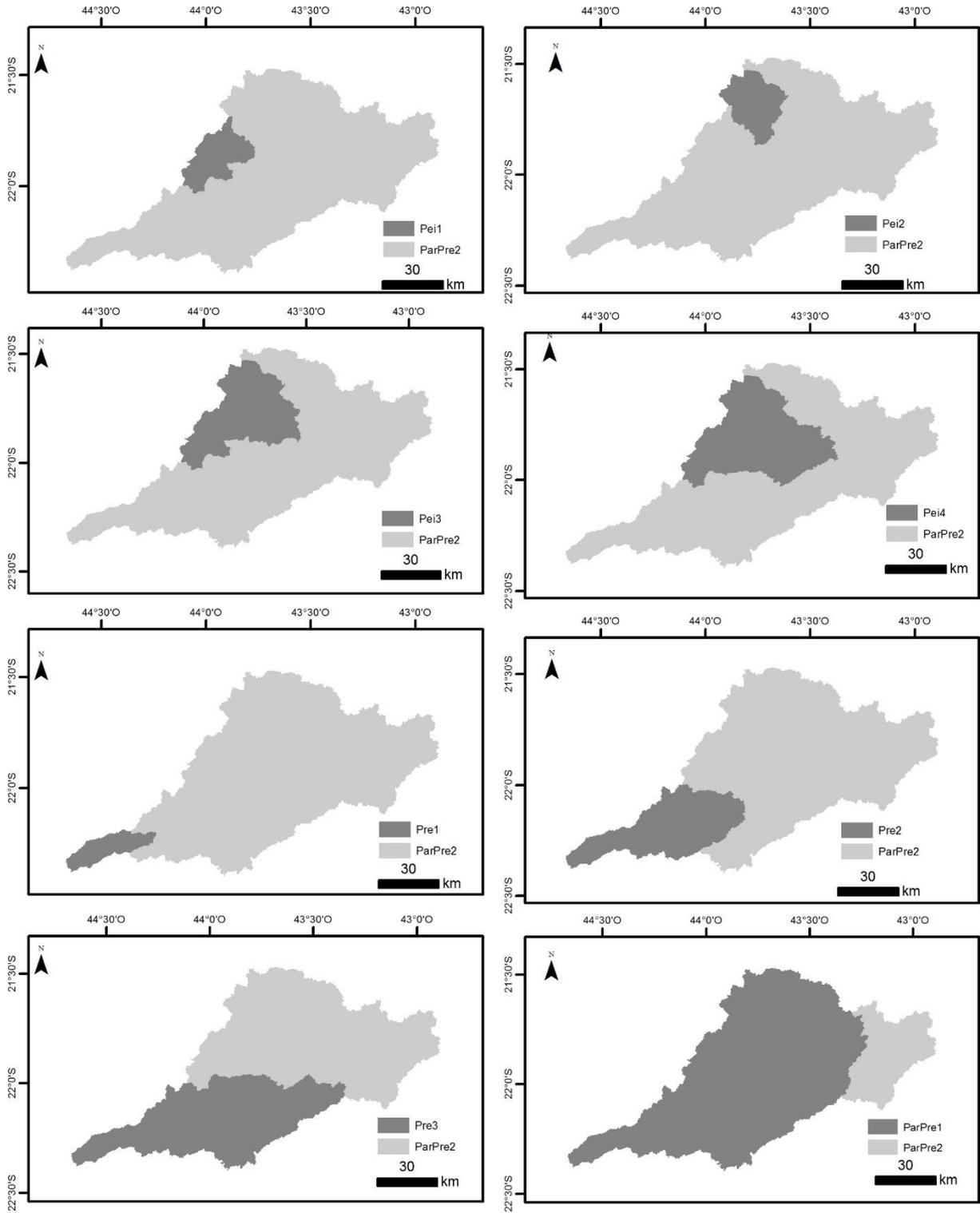
Figura 14: As sub-bacias correspondendo aos pontos de coleta são geradas a partir do MDEHC

Uma camada com os pontos de amostragem do IGAM foi criada (Figura 14h). Os pontos foram primeiramente importados segundo as coordenadas fornecidas nos metadados. Muitas vezes ficavam fora dos cursos d'água, com erros superiores à 100 metros. As descrições dos pontos e dos seus acessos, assim como informações sobre a área de drenagem disponíveis no site Hidroweb da ANA foram utilizados para posicionar com precisão os pontos em relação à hidrografia. O comando *Batch Watershed Delineation* (Delimitação de Bacias Hidrográficas em Lote) foi utilizado para criar as bacias de contribuição dos pontos de amostragem. As bacias assim delimitadas são representadas nos Mapas 4 e 5. Observa-se que as bacias dos pontos de amostragem são muitas vezes inclusas uma na outra. Por exemplo, a bacia do ponto Par1 é incluída na bacia do ponto Par2, e assim por diante.



Projeção: Sistema de coordenadas Geográficas
 Datum: SIRGAS 2000
 Fonte:
 IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas
 USGS (2004), Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second
 Execução:
 Antoine Casquin, Novembro 2015

Mapa 4: Sub-bacias correspondendo aos pontos monitorados pelo IGAM (1/2)



Projeção: Sistema de coordenadas Geográficas
 Datum: SIRGAS 2000
 Fonte:
 IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas
 USGS (2004), Shuttle Radar Topography Mission, 1 Arc Second
 Execução:
 Antoine Casquin, Novembro 2015

Mapa 5: Sub-bacias correspondendo aos pontos monitorados pelo IGAM (2/2)

2.4.1.4. Índices morfométricos

O comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica é função de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo, dentre outros) e do tipo de cobertura vegetal. Índices de bacia podem trazer informações relevantes sobre o comportamento hidráulico das bacias como a sua susceptibilidade a enchentes ou a qualidade da sua rede de drenagem.

Na revisão de literatura, foi mostrado que fatores morfométricos de reservatórios (HWANG et al., 2007; PARK et al., 2014) têm correlações com a qualidade da água. A mesma questão foi investigada nessa Dissertação para a morfometria das bacias hidrográficas. A Tabela 5 apresenta alguns índices de bacia amplamente usados e simples de se calcular.

Tabela 5: Índices de bacia e seus significados

Índice	Definição	Fórmula	Variáveis	Significado
Coefficiente de compacidade (Kc)	Relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual a da bacia	$Kc = 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	P, Perímetro em km A, Área em km ²	Mede a irregularidade da bacia. Quanto mais próximo a um círculo, mais o Kc fica perto de 1, mais a bacia é sensível a enchentes.
Fator de forma (Kf)	Relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (da foz ao ponto mais longínquo do espigão)	$Kf = \frac{A}{Lx^2}$	A, área da bacia em km ² Lx é o comprimento axial da bacia em km	Uma bacia com fator de forma baixo indica que a mesma é menos sujeita a enchentes que outra, de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior
Índice de circularidade (Ic)	Mede a circularidade da bacia, similar ao Kc	$Ic = 12,57 \cdot \frac{A}{P^2}$	A é a área em km ² P é o perímetro em km	Ele tende para a unidade à medida que a bacia se aproxima da forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada
Densidade de drenagem (Dd)	Resultado da divisão entre o comprimento total dos cursos d'água pela área da bacia.	$Dd = \frac{Lt}{A}$	Lt, Comprimento total dos canais (km) A, Área em km ²	Esse índice pode variar de 0,5 km.km ² em bacias com drenagem pobre a 3,5 km.km ² ou mais em bacias bem drenadas

Fonte: Adaptado de Villela & Mattos (1975) *apud* Ferreira et al. (2010)

Para o cálculo dos índices de bacia foram utilizados o *Shapefile* obtido anteriormente para os limites de bacias e a hidrografia 1:50.000. Uma *Toolbox* foi criada com o *ModelBuilder* do ArcGIS 10.2.1 a fim de automatizar o cálculo desses índices. A suavização das bordas das bacias foi realizada antes do cálculo dos índices de bacia.

A declividade do rio principal também foi calculada em duas escalas: da nascente do rio principal ao ponto de amostragem, característica chamada de declividade média do Rio

(DecMedRio) e do ponto de amostragem precedente do mesmo rio principal até o ponto de amostragem, característica chamada de declividade média do trecho (DecMedTrecho). Para as sub-bacias de “cabeceira” nesse trabalho (Par1, Pei1, Pei2, Pre1, Cag1), o cálculo de DecMedTrecho é efetuado a partir da nascente. Para esses pontos, a característica DecMedRio equivale então à característica DecMedTrecho.

O rio principal foi extraído da hidrografia com base no maior comprimento. A maior área de contribuição é um critério de determinação do rio principal, sendo o método oficial no Brasil segundo a Resolução ANA 399/2004 (BRASIL, 2004). Os rios principais dessa dissertação correspondem à trabalhos realizados anteriormente (ORLANDO, 2006; ARAÚJO, 2009; MACHADO, 2012; RIBEIRO, 2012). Segundo o trabalho de Araújo (2009), o rio Preto é o rio principal da área de estudo. O cálculo das distâncias foi efetuado ao longo dos rios com base na hidrografia 1:50.000, encontrando-se comprimentos de rios superiores a valores as vezes encontrados em outros trabalhos sobre a BHRP. Isso se explica pelo maior detalhamento dessa hidrografia (1:50.000, há trabalhos utilizando a hidrografia na escala 1:250.000 ou 1:1.000.000 disponíveis no site da ANA), representando com mais precisão os percursos, as vezes, meandrosos, dos rios.

A declividade de um rio é expressa em metros por quilômetros ($m.km^{-1}$), sendo equivalente a um permilagem (‰). A declividade é calculada dividindo a diferença de altitude pela distância percorrida pelo rio. As altitudes foram extraídas do MDE não hidrologicamente consistente, tendo o MDEHC as altitudes alteradas nas calhas dos cursos d’água. A declividade média de um rio é um parâmetro muito interessante de levar em consideração quando se trata de qualidade da água. Ela tem influência sobre a capacidade de (re) oxigenação da água, processos de sedimentação, de velocidade escoamento e de erosão das margens. A declividade de um rio pode influenciar tanto positivamente como negativamente a qualidade da água do mesmo.

Os índices de bacia e as declividades médias para cada sub-bacia são compiladas na tabela 6.

Tabela 6: Declividades dos rios e índices de bacia

	AreaBac	DecMedTrecho	DecMedRio	FacForm	DensDren	IndCir	CoefComp
Par1	382	9,68	9,68	0,27	2,74	0,28	1,88
Par2	726	1,28	7,46	0,31	2,68	0,27	1,90
Par3	814	0,80	7,00	0,29	2,62	0,28	1,89
Par4	1006	1,75	5,87	0,26	2,51	0,24	2,03
Par5	1095	11,21	6,57	0,25	2,47	0,22	2,14
Par6	3722	2,09	4,35	0,40	2,51	0,31	1,78
Pei1	661	9,42	9,42	0,36	2,61	0,30	1,82
Pei2	722	13,03	13,03	0,32	2,71	0,27	1,89
Pei3	1719	1,03	5,40	0,40	2,64	0,25	1,97
Pei4	2330	2,97	4,62	0,38	2,57	0,27	1,90
Pre1	418	22,89	22,89	0,19	2,48	0,30	1,80
Pre2	1796	1,41	11,04	0,21	2,05	0,26	1,95
Pre3	3402	1,01	7,45	0,17	1,94	0,20	2,24
Cag1	784	4,85	4,85	0,35	2,53	0,20	2,22
Cag2	1120	2,95	4,23	0,48	2,59	0,24	2,01
PP1	7176	10,22	7,39	0,26	2,24	0,24	2,04
PP2	8564	1,73	6,61	0,22	2,27	0,20	2,22
Unidade	km ²	m.km ⁻¹	m.km ⁻¹	-	km.km ⁻²	-	-

Obs: para os pontos Par6, ParPre1 e ParPre2 o rio Paraibuna foi considerado o principal.

A área das bacias varia de 382 km² (Par1) para 8.564 km² (ParPre2). Observamos que há 17 estações de monitoramento para essa superfície, obtendo uma média de 2 estações por 1.000 quilômetros quadrados. Esse valor é superior ao mínimo aconselhado pela União Europeia e meta do monitoramento do IGAM, que é de 1 estação por 1.000 km² (MINAS GERAIS, 2006). Para cada rio principal, encontrou-se altas declividades no trecho das cabeceiras; também se destacaram as declividades dos trechos entre o ponto Par4 e o ponto Par5, assim como entre os pontos Par6 e ParPre1, superiores a 10m.km⁻¹. Os outros trechos apresentam dados de declividades inferiores a 5m.km⁻¹. Com declividades da ordem de 1m.km⁻¹, os trechos Par1-Par2, Par2-Par3, Pei2-Pei3 e Pre2-Pre3 são os mais planos da bacia.

Os índices Coeficiente de Compacidade (CoefComp) e Índice de Circularidade (IndCir) são bastante uniformes para sub-bacias estudadas e significativamente diferentes de 1. Isso significa que a forma das sub-bacias é pouco propícia a enchente, lembrando, porém, que há vários outros fatores influenciando o fenômeno (tipo de vegetação, grau de declividade, grau de permeabilidade do solo etc.). O fator de forma apresentou valores diferenciando melhor os pontos, variando de 0,17 (Pre3, menos sujeita a enchentes) para 0,48 (Cag2, mais sujeita a enchentes). As áreas das bacias são, porém, significativamente diferentes.

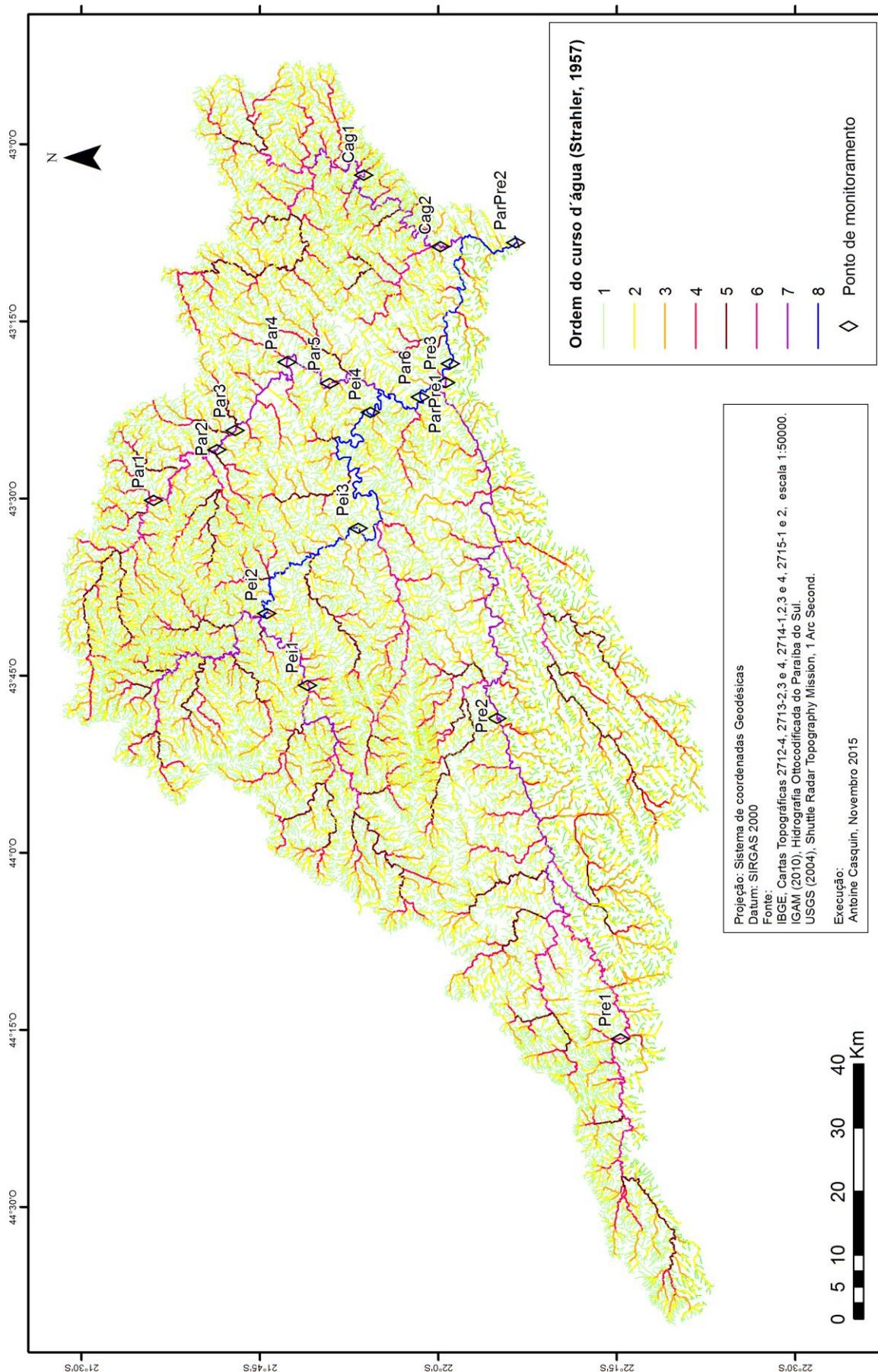
As densidades de drenagem giram em torno de $2,5 \text{ km.km}^{-2}$ em todas as sub-bacias delimitadas, indicando que a BHRP é uma bacia uniformemente bem drenada. As sub-bacias de cabeceira apresentaram densidades de drenagem um pouco mais altas que as demais sub-bacias.

2.4.1.5. Ordem dos rios

A ordem de um curso d'água é um parâmetro importante a se levar em consideração quando se estuda a qualidade da água. Os trabalhos de Buck et al. (2004), por exemplo, mostraram que o uso e cobertura da terra influencia de maneira diferente os córregos de ordem distintos.

Para a realização do mapeamento da ordem (Strahler, 1957) dos cursos d'água da BHRP foi necessário usar duas fontes diferentes. Na hidrografia ottocodificada disponibilizada pelo IGAM, a ordem dos cursos d'água já é calculada para a parte mineira da BHRP. Para a parte situada no Estado do Rio de Janeiro, a hidrografia foi derivada do MDEHC (ele mesmo derivando das cartas topográficas 2712-4, 2713-2, 3 e 4, 2714-1, 2, 3 e 4, 2715-1 e 2) e a ordem do curso d'água foi calculada com a ferramenta *Assign River Order* do ArcHydro 2.0

O mapa resultante é o Mapa 6. Observa-se uma diferença no traçado da hidrografia entre a parte mineira da BHRP e a parte fluminense. Essa se deve aos métodos utilizados: a parte mineira é derivada de dados primários sistematicamente verificados num amplo projeto (Luiz & Faria, 2013) e a parte fluminense foi realizada nesse trabalho de maneira semiautomática (a ottocodificação e a correção sistemática dos erros topológicos ficando fora do escopo desse trabalho). Ao observar o mapa, observam-se que variações de densidades de drenagem parecem devidas mais às diferenças na qualidade do levantamento dos cursos d'água no momento da realização dos mapas topográficos do que às variações naturais. Destaca-se, por exemplo, um “quadrado” com a drenagem muito densa ao sul do ponto Pei1. Essa imperfeição implica que há um erro não quantificado na densidade de drenagem anteriormente calculada.



Mapa 6: Ordem dos cursos d'água da Bacia Hidrográfica do rio Preto segundo Strahler (1957).

A partir do Mapa 6, foi levantado a ordem do curso d'água nos pontos de monitoramento da BHRP (Tabela 7).

Tabela 7: Ordem (Stralher) dos cursos d'águas nos pontos monitorados

	Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	PP1	PP2
Ordem	6	7	7	7	7	8	7	7	8	8	6	7	7	7	7	8	8

A ordem dos rios em todos os pontos monitorados é superior a 6, classificando eles como “grandes rios” segundo o conceito de Vannote et al. (1980) e pesquisa de Baptista et al. (1990) validando o conceito para o bioma da área de estudo em bacias adjacentes à área de estudo. Esse resultado tem uma certa importância para o Capítulo 5 porque a ordem dos rios influi sobre o mecanismo pelo qual o uso e cobertura da terra interage com a qualidade da água (BUCK et al., 2004). Como todos os pontos monitorados correspondem a “grandes rios”, a bacia hidrográfica influi “teoricamente” mais que as imediações do ponto na qualidade da água.

2.4.1.6. Hipsometria

O mapa hipsométrico (Mapa 7) foi realizado a partir do DEM obtido anteriormente. O número de classes de altitudes foi escolhido de maneira a evidenciar os principais acidentes geográficos na BHRP. As classes foram delimitadas com o método das “Quebras Naturais” e arredondados para a centena mais próxima. No Mapa 7 foram adicionados também os cursos d'água principais (ordem 5 ou maior), de maneira a ajudar na localização.

O limite noroeste da BHRP é constituído dos contrafortes da Serra da Mantiqueira que percorre os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, e cujo relevo constitui parte das fronteiras entre esses estados. Duas serras e dois maciços se destacam pelas suas altitudes elevadas em vista dos seus entornos.

No Maciço de Itatiaia, encontra-se a nascente do rio Preto, um pouco abaixo do Pico das Agulhas Negras culminando a 2971 metros. A Lei Federal nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012) define que locais acima de 1800 metros de altura são áreas de preservação permanente, qualquer que seja a vegetação nativa e seu estado de conservação. O alto-curso do rio Preto é localizado na parte mais alta, de longe, da BHRP. Podemos notar, portanto, que após percorrer aproximadamente 40 quilômetros, o rio Preto já se encontra em altitudes inferiores a 700m, correndo dentro de uma falha, apresentando um traçado retilíneo característico dessa geologia.

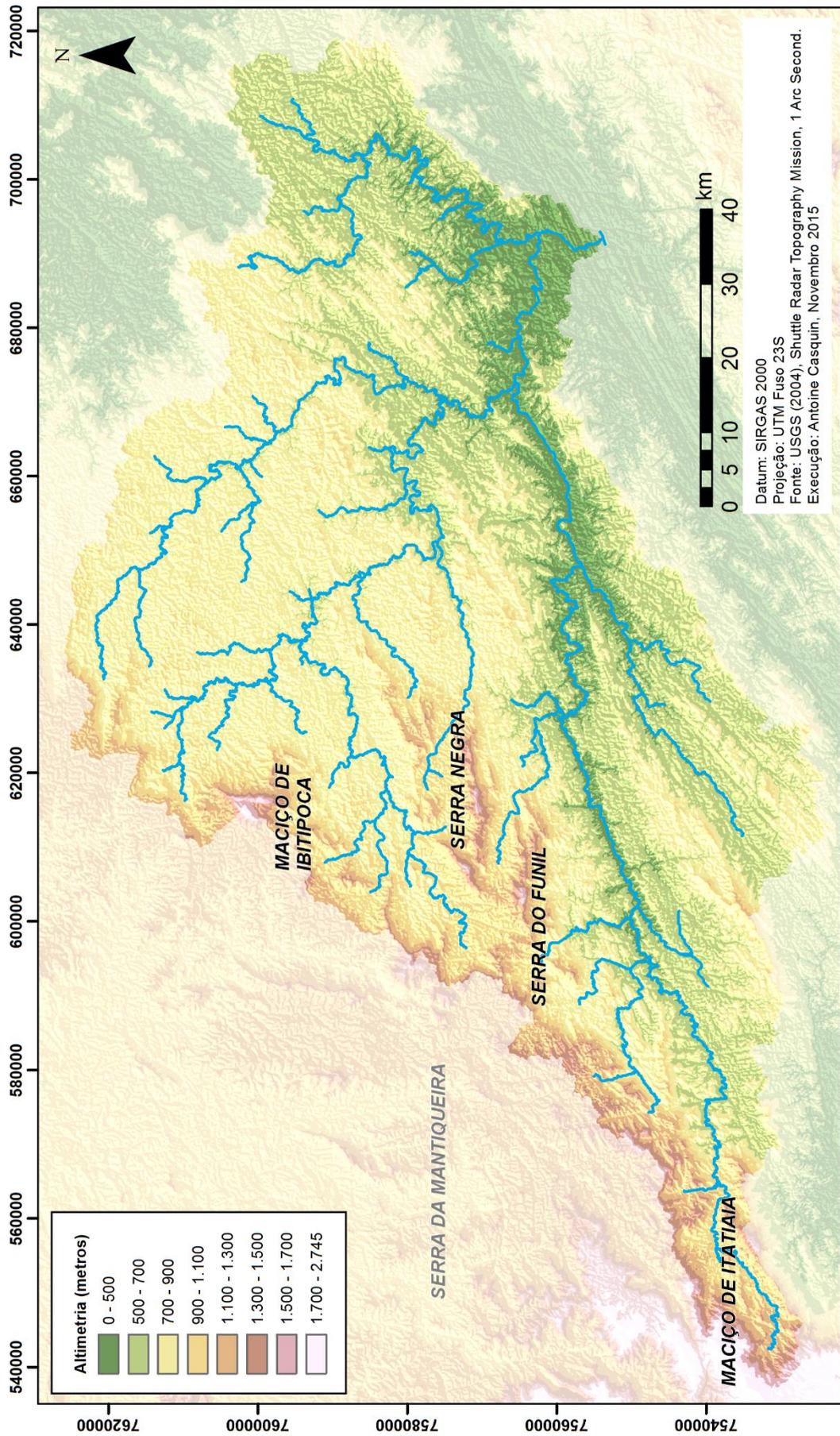
Ao Norte da bacia do rio Preto, uma pequena serra conhecida como “Serra do Funil” se destaca, com altitudes superiores à 1700 m. Ao norte dessa Serra, encontra-se a Serra Negra, divisor de águas entre a bacia do rio do Peixe e a bacia do rio Preto, local escolhido para implantar um novo parque denominado “Parque Estadual da Serra Negra da Mantiqueira”. O maciço de Ibitipoca, localizado ao nordeste da BHRP e da Bacia do rio do Peixe é um divisor de água com a bacia do rio Grande.

Essas serras e esse maciços e seus contrafortes são atrativos turísticos regionais sobressaindo as numerosas cachoeiras e as possibilidade de caminhadas. O primeiro Parque Nacional foi criado em 1937 (BRASIL, 1937) no maciço de Itatiaia. O maciço de Ibitipoca e sua biodiversidade são protegidos por um Parque Estadual desde 1973 (MINAS GERAIS, 1973).

Vale ressaltar que os parques têm uma influência a nível regional, sendo importantes refúgios a nível do bioma e permitindo manter corredores ecológicos vitais para o ecossistema, providenciando serviços ambientais como a exportação de água de boa qualidade e também são fonte de renda para as populações locais, sendo em geral situados em áreas remotas e desprovidas de muitas infraestruturas básicas.

O Parque de Ibitipoca é um bom exemplo de Parque que permitiu alavancar a economia local. Apesar de modestas dimensões, atrai turistas de outros estados e do exterior. Seu sucesso é tal que o número de visitantes agora ultrapassa a capacidade de carga das trilhas (PECCATIELLO, 2007; ROCHA et al., 2007; TRIBUNA DE MINAS, 2016) colocando em risco a integridade do local.

O sucesso do Parque de Ibitipoca levou a sociedade a considerar a delimitação de um novo Parque Estadual na Serra Negra da Mantiqueira, como já mencionado. As razões são muitas: proteção da flora (grande diversidade, alvo de várias pesquisas botânicas) e da fauna, diversificação da economia local, redução da carga de visitantes em Ibitipoca, frear o plantio de eucalipto na região, chegando até os contrafortes da Serra da Mantiqueira, entre outros.



Mapa 7: Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do rio Preto.

Essa proteção também permitirá garantir a qualidade da água na região, possibilitando a recreação de contato primário, baixo custo de tratamento e segurança para os habitantes no caso das águas destinadas ao abastecimento público.

A altimetria é um fator relevante a se considerar na BHRP quando se procura os fatores determinantes da qualidade da água, já que as maiores altitudes determinaram as áreas protegidas através da definição das APPs e dos limites dos parques estaduais e nacionais.

O relevo tem também implicações mais diretas sobre a água. A temperatura diminui de acordo com o aumento da altitude, assim aumentando a dissolução do oxigênio. A temperatura influencia a composição bacteriana da água, diminuindo as atividades das bactérias relativas à contaminação fecal. Outra implicação da altitude é o aumento da pluviometria do local através de chuvas orográficas causadas pelo relevo.

2.4.1.7. Declividade

A declividade é um fator físico que influi tanto diretamente sobre a qualidade da água, como indiretamente, sendo um fator fundamental na ordenação do território.

A declividade na bacia pode influir de maneira positiva sobre a qualidade da água, aumentando o teor de oxigênio dissolvido e a capacidade de autodepuração através da aeração mecânica da água, facilitada quando a velocidade de escoamento é elevada. Pode influir também de maneira negativa porque áreas com altas declividades tendem em exportar mais sedimentos, ainda mais quando o manejo do solo na bacia não é adequado. Na área de estudo é comum observar erosões (MACHADO, 2012) ocorrendo em pastos degradados. Cargas elevadas de sedimentos podem até levar ao desaparecimento de pequenos cursos d'água através do fenômeno de assoreamento.

A declividade foi obtida com base no MDE, usando a ferramenta *Slope* do ArcGIS e calculada em porcentagem. Classes de declividades (Mapa 8) foram determinadas da seguinte maneira:

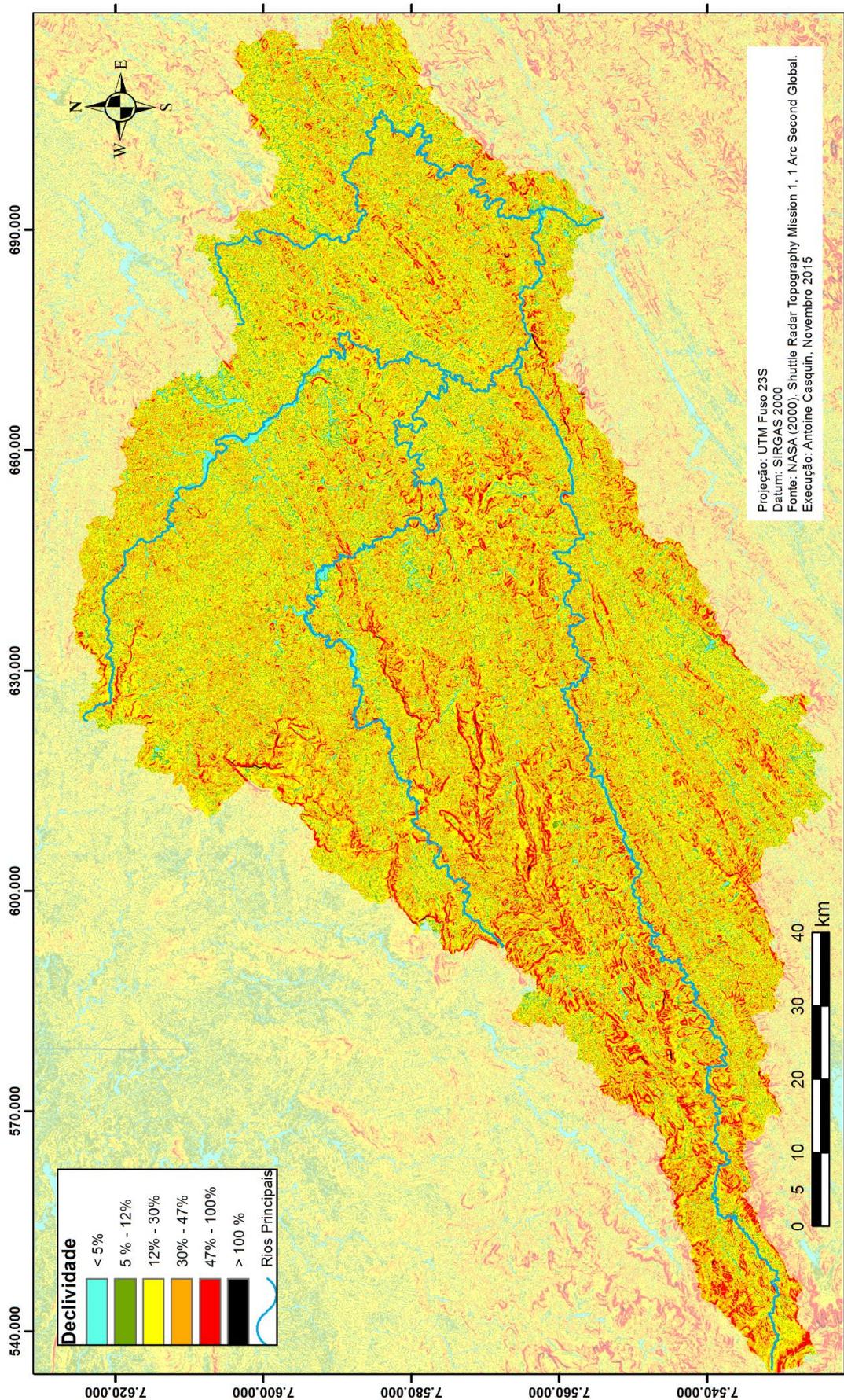
- **Plano permitindo urbanização e industrialização de grande porte** de 0% à 5%: limite urbano-industrial, utilizado internacionalmente para planejamento urbano ou industrial.
- **Relevo suave adequado à agricultura intensiva** de 5% para 12%: Segundo levantamento bibliográfico feito por Ribeiro (2012), 12 % é um limite aproximado para o uso de máquinas agrícolas. Esse limite é muito importante

para a aparência global da paisagem na área de estudo (Mapa 8), limitando muito a agricultura intensiva na BHRP.

- **Relevo ondulado adequado a urbanização** de 12% até 30%: acima de 30% a Lei Federal nº 6.766/1979 impõe estudos geotécnicos antes de qualquer parcelamento do solo.
- **Urbanização restrita** entre 30 e 47%.
- **Área de uso restrito (AUR)** entre 47% e 100% segundo a Lei nº 12651 de 2012 comumente denominada de Novo Código Florestal (BRASIL, 2012), é permitido nessas áreas: “o manejo florestal sustentável e o exercício de atividades agrossilvipastoris, bem como a manutenção da infraestrutura física associada ao desenvolvimento das atividades, observadas boas práticas agronômicas, sendo vedada a conversão de novas áreas, excetuadas as hipóteses de utilidade pública e interesse social.” Observamos que a lei evoca as “boas práticas agronômicas” como restrição ao uso da terra nessas áreas e veda a conversão de novas áreas, impossibilitando, por exemplo, o corte raso de vegetação arbórea nativa ou secundária.
- **Área de preservação permanente (APP):** Acima de 100 % de declividade o local é considerado como uma APP. Uma APP é definida (BRASIL, 2012) como uma: “área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”. Nas APPs, é formalmente proibido o corte de vegetação e há obrigação de recuperação do local com vegetação nativa.

As declividades foram então reclassificadas segundo essas classes e a ferramenta *Estatística Zonal* do ArcGIS permitiu definir as porcentagens para cada classe.

Antes de qualquer consideração baseada em resultados numéricos, o Mapa 8 mostra que de maneira geral a BHRP possui poucas áreas planas (em azul) ou adequadas à mecanização da agricultura (em verde) As serras e maciços anteriormente mencionados se destacam no mapa de declividades, apresentando altas declividades (em vermelho ou preto).



Mapa 8: Declividades de acordo com as classes de relevo na Bacia Hidrográfica do rio Preto

Na Tabela 8, foram compilados os dados referentes às altitudes e declividade médias nas sub-bacias estudadas da BHRP. Logicamente, as altitudes médias são superiores nas sub-bacias de cabeceira. A altitude média da BHRP é de 767 metros e a declividade média de 25,7%. Algumas sub-bacias se destacam:

A sub-bacia Pre1, apresentando a maior altitude média (1228 m) e declividade média (31,7 %).

As sub-bacias do rio Cágado (Cag1 e Cag2) por apresentarem altitudes médias inferiores as demais sub-bacias da BHRP (visível no Mapa 7)

As sub-bacias do rio Paraibuna (Par1 a Par5) e Cágado exibem declividades médias ligeiramente superiores à 20% e as demais sub-bacias apresentem declividades entre 25% e 32%.

Tabela 8: Altitude e declividade média das sub-bacias da BHRP

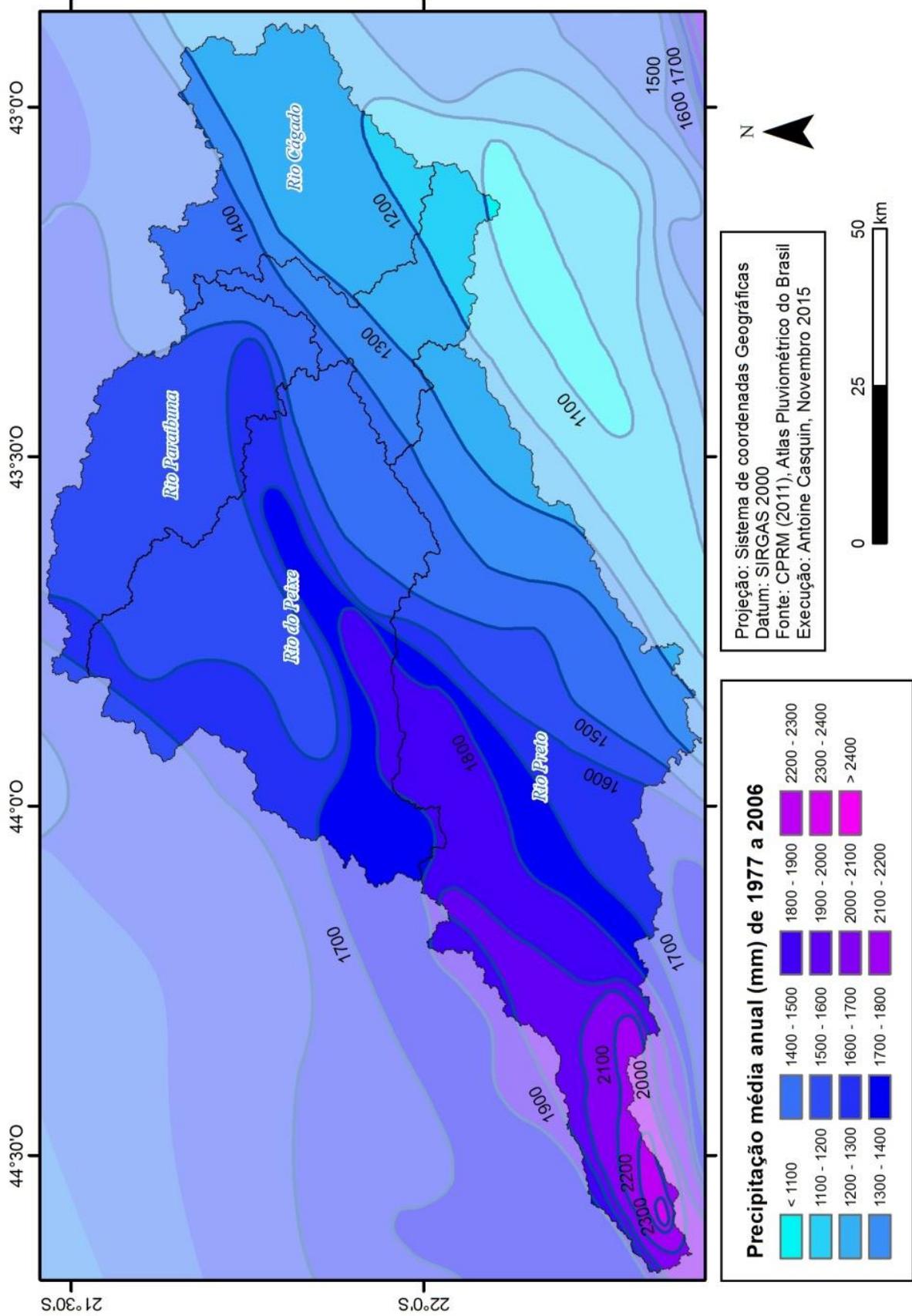
	Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	PP1	PP2
Altitude Média	858	816	811	811	804	836	988	934	910	880	1228	891	775	644	611	804	767
DeclivMédiaBac	24,1	22,9	22,3	21,8	22,1	24,4	27,8	26,2	25,8	25,8	31,7	29,4	27,8	22,8	23,6	26,0	25,7

2.4.2. Pluviometria

A pluviometria é um fator capital para o planejamento dos recursos hídricos. É a pluviometria de uma região, junto à densidade de população que define, em grandes proporções, a disponibilidade hídrica. A BHRP apresenta essencialmente um clima tropical de altitude com uma sazonalidade bem marcada para a pluviometria: o verão é quente e chuvoso e os invernos são mais frescos e secos (CASTRO & FERREIRA, 2010).

As isoietas de pluviometria média anual foram obtidas junto ao CPRM, no Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011). Essas isoietas decorrem de um amplo trabalho geoestatístico e é baseada em series históricas de 1977 a 2006. A resolução original dos dados é de 1 por 5.000.000. Para calcular a pluviometria média anual de cada de sub-bacia, foi necessário interpolar as isoietas na área de estudo e seu entorno. O interpolador Topo para Raster foi escolhido conforme Marcuzzo et al. (2006).

O Mapa 9 apresenta a variabilidade espacial da pluviometria anual na BHRP. A áreas mais secas da BHRP recebem menos de 1100 mm de precipitação por ano (próximo à foz) e as mais úmidas (próximo à nascente do rio Preto, no maciço de Itatiaia) recebem mais de 2400 mm por ano.



Mapa 9: Precipitação média anual (1977-2006) em milímetros na Bacia Hidrográfica do rio Preto.

É uma variabilidade muito considerável, considerando o tamanho relativamente pequeno da BHRP. A partir da camada de dados interpolados e dos limites das sub-bacias, a ferramenta estatística zonal permitiu definir a precipitação média para cada sub-bacia estudada (Tabela 9)

Observando o Mapa 9, notamos que há uma tendência geral da pluviometria diminuir a jusante das bacias da BHRP. A distribuição da pluviometria média anual indica uma grande influência das chuvas orográficas, com um impacto muito marcado do Maciço de Itatiaia. A comparação do Mapa 7 com o Mapa 9 mostra que serras e maciços menores também influenciam.

Tabela 9: Precipitação média anual em mm para as sub-bacias da BHRP

Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	PP1	PP2
1585	1576	1572	1569	1560	1578	1681	1637	1637	1612	2052	1848	1663	1307	1282	1616	1559

Na maioria das sub-bacias, a precipitação média é de aproximadamente 1600 mm por ano. Destacam-se as sub-bacias Pre1 (2052 mm/ano) e Pre2 (1848 mm/ano), com as maiores precipitações médias e as sub-bacias do rio Cágado com precipitações anuais médias em torno de 1300 mm. A média para a BHRP é de 1559 mm/ano, caracterizando um clima bastante úmido.

2.4.3. Tipos de solos

Os solos são resultado da transformação de um material de origem (rocha-matriz, vegetais, sedimentos) pelo intemperismo ao longo do tempo.

Uma das consequências de um clima tropical é a ocorrência de solos profundos e altamente intemperizados. A pedologia de um território é um fator importante para definir seus usos pretendidos. Os solos apresentam diferenças em relação a composição química, pH, retenção d'água, fertilidade, susceptibilidade à erosão, etc.

O objetivo de levantar os tipos de solos da BHRP foi de propor uma avaliação preliminar da influência do tipo de solo sobre o uso e cobertura na bacia e sobre a qualidade da água na BHRP (Capítulo 5).

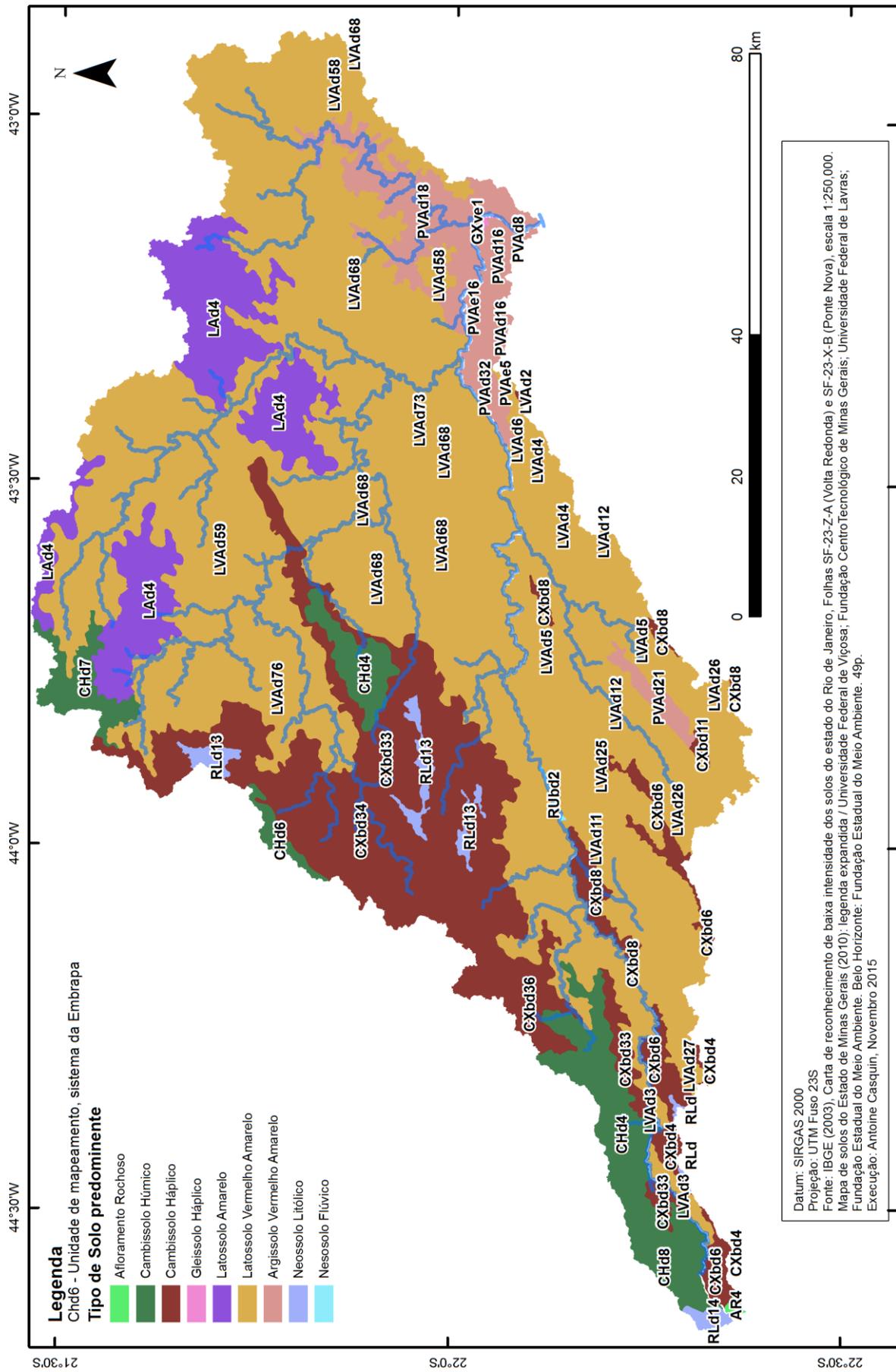
Os solos foram diferenciados até o segundo nível categórico do Sistema brasileiro de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2006). Para a elaboração do mapa, foi usado o Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, Folha 4, classificados segundo as “unidades de mapeamento”

(UFV/CETEC/UFLA/FEAM, 2010) para a parte mineira da BHRP, e as folhas SF-23-Z-A (Volta Redonda) e SF-23-X-B (Ponte Nova) do projeto RADAMBRASIL (1983).

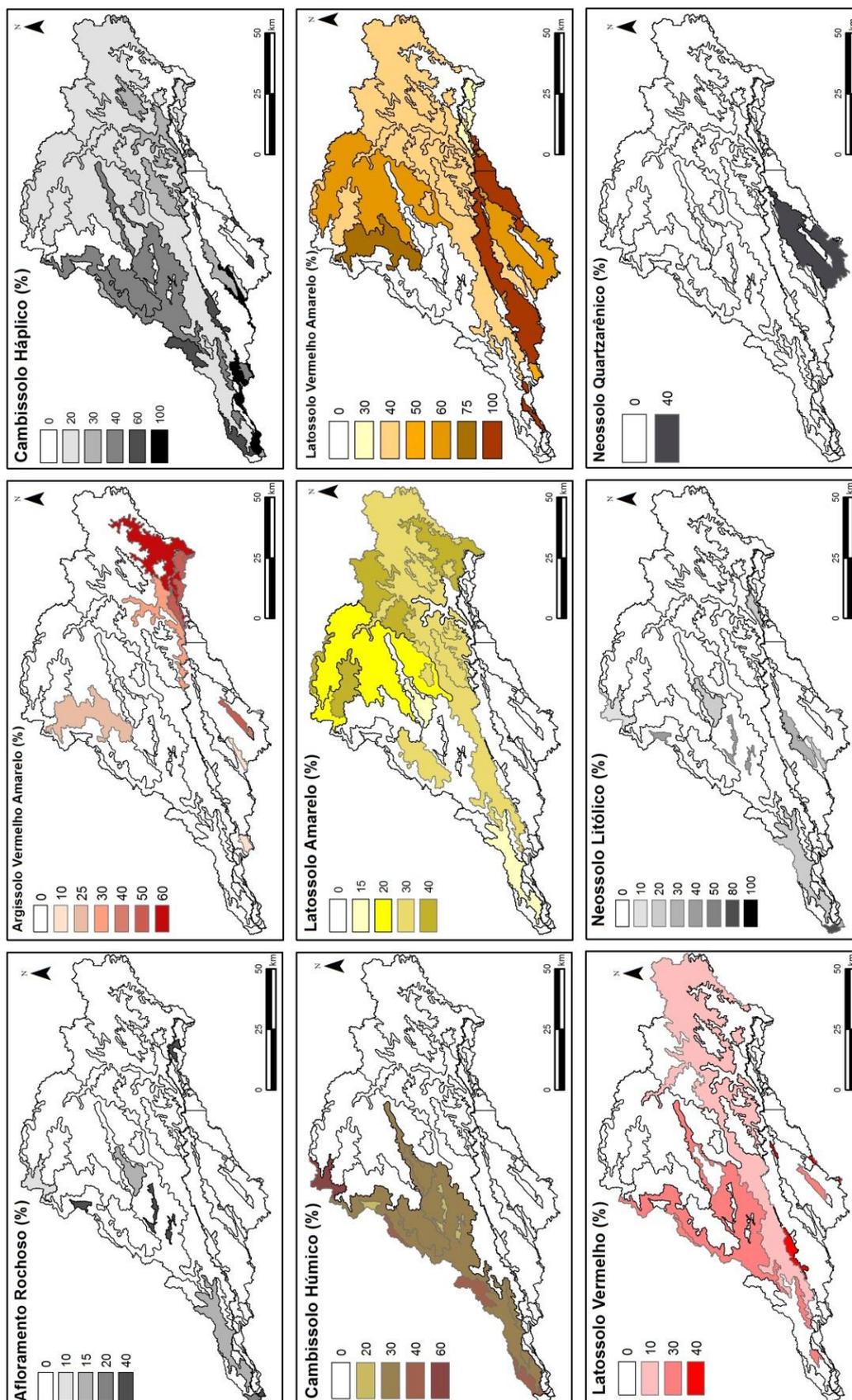
O Mapa 10 apresenta o resultado, a cor adotada dependendo do tipo de solo predominante na unidade de mapeamento. De maneira geral, evidenciou-se que o Latossolo Vermelho Amarelo era o solo mais presente na BHRP. Os Cambissolos são encontrados ao longo do limite Nordeste da bacia, nas cabeceiras das sub-bacias dos rios Paraibuna, Peixe e Preto. O Latossolo Amarelo acontece dos dois lados das margens da bacia do rio Paraibuna e o baixo curso do rio Preto e do rio Cágado são cobertos por o Argissolo Vermelho-Amarelo. As serras e maciços previamente mencionados são cobertos em maioria por Neossolo Litólico, a Serra do Funil, a Serra Negra e o Maciço de Ibitipoca pertencendo à mesma unidade de mapeamento. Os outros tipos de solos foram encontrados em proporções desprezíveis na BHRP.

As unidades de mapeamento do Sistema Brasileiro de Classificação dos solos são acompanhadas de uma legenda detalhando a porcentagem de cada tipo de solo dentro das unidades de mapeamento, permitindo quantificar melhor a proporção de cada tipo de solo em cada sub-bacia. Esses dados foram tabelados no Excel e uma ligação por atributo (No caso, o nome da unidade de mapeamento) permitiu importar e espacializar esses dados no programa ArcGIS (Mapa 11).

Para as unidades de mapeamento AR4, CXbd11, PVAe5, PVAd8, PVAe16, PVAd21, PVAd32 e RUbd2 foram encontrados os tipos de solo compondo a unidade, mas não foram encontradas as proporções. A área da BHRP coberta por essas unidades de mapeamento é de 330 km², o que representa 3,8% da BHRP. Para essas unidades foram estimados a partir do padrão observado nas outras unidades proporções de:60% do primeiro tipo de citado e 40% do segundo, caso haja dois tipos de solos na unidade; proporções de 40%, 40% e 20%, caso haja 3 tipos de solo na unidade; e proporções de 40%, 30% 20% e 10%, quando a unidade mapeamento menciona a presença 4 tipos de solos. Essa estimativa não foi baseada num conhecimento pedológico, mas foi necessária para a confecção dos mapas e a quantificação dos solos na BHRP.



Mapa 10: Tipo de solo por unidade de mapeamento segundo a EMBRAPA na Bacia Hidrográfica do rio Preto



Datum: SIRGAS 2000
 Projeção: UTM Fuso 23S
 Fonte: IBGE (2003). Carta de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do estado do Rio de Janeiro. Folhas SF-23-A (Volta Redonda) e SF-23-X-B (Ponte Nova), escala 1:250.000. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais (2010); legenda expandida / Universidade Federal de Viçosa; Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais; Universidade Federal de Lavras; Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente. 49p.
 Execução: Antonio Casquin, Novembro 2015

Mapa 11: Solos da Bacia Hidrográfica do rio Preto, por percentagem de cada tipo de solo segundo as definições das unidades de mapeamento da EMBRAPA

Para cada sub-bacia foi calculado a porcentagem para cada tipo de solo até o segundo nível categorico do SisBCS. O cálculo foi baseado na área ocupada por cada unidade de mapeamento na sub-bacia, considerada e a porcentagem do tipo de solo nessa unidade. Os resultados, arredondados para a unidade (já que há uma imprecisão para algumas unidades de mapeamento) são apresentados na Figura 15.

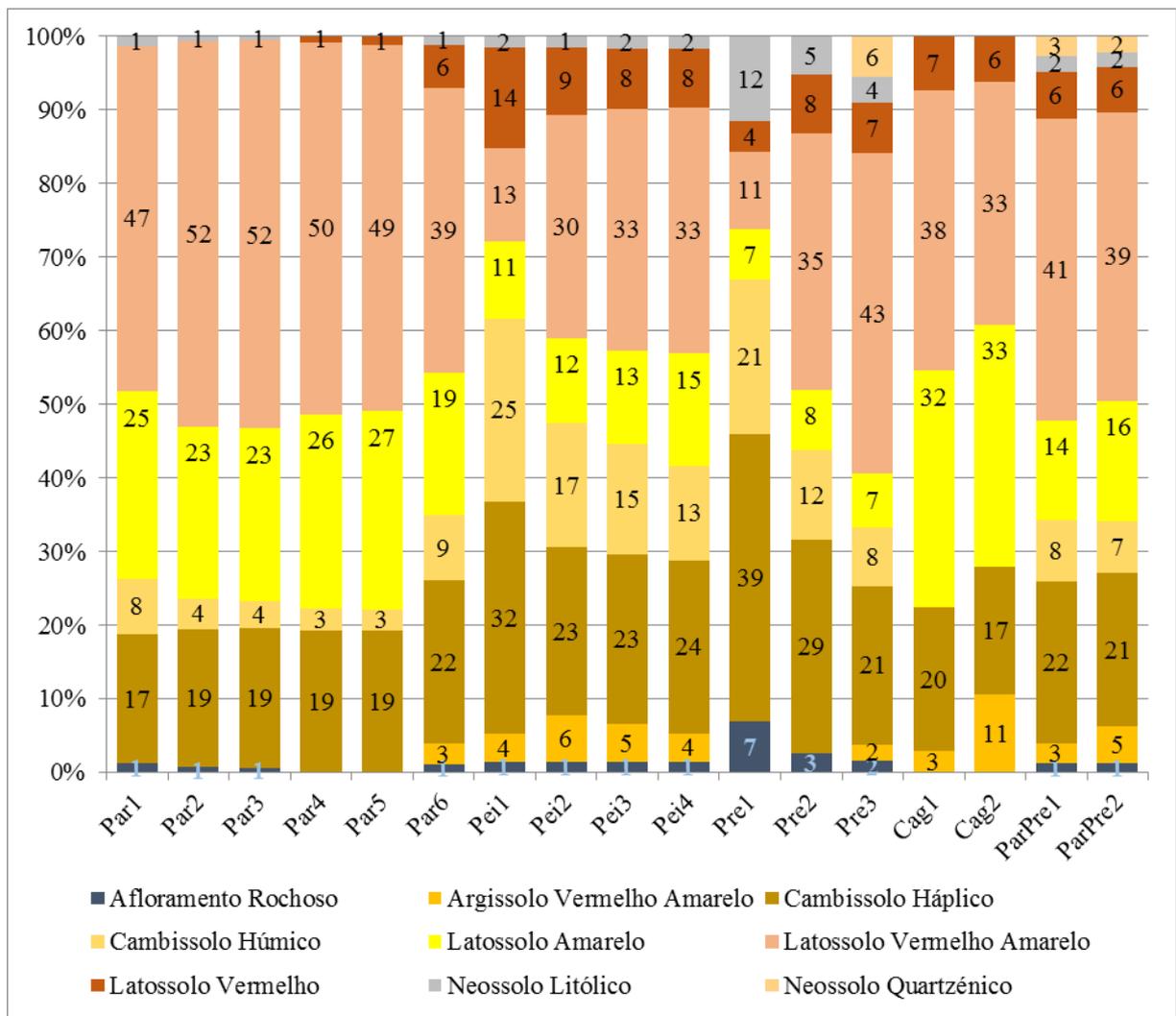


Figura 15: Porcentagem de cada tipo de solo para as sub-bacias dos pontos monitorados

Os relatórios para de Avaliação Ambiental Integrada da Bacia do rio Paraíba do Sul realizados no âmbito de aproveitamentos hidrelétricos realizados à pedido da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), pela empresa Sondotécnica demonstram a grande susceptibilidade à erosão dos solos presentes na Bacia Hidrográfica do rio Preto (EPE/SONDOTECNICA, 2007). No mapa de erodibilidade, a quase totalidade da BHRP está classificada com susceptibilidade forte a muito forte.

2.5. Características antropogênicas das sub-bacias

As características determinadas anteriormente são características naturais das bacias, sobre as quais o homem teve pouco ou nenhuma influência. Essa parte da Dissertação vai discutir dois fatores antrópicos: a densidade de população nas sub-bacias da BHRP e o uso e cobertura da terra. Para os fatores antrópicos, a caracterização foi realizada a escala da sub-bacia e também a escala da faixa ripária dos cursos d'água.

2.5.1. Hidrografia de referência

Para determinar os fatores antrópicos a nível de *Buffer*, é importante que a hidrografia esteja precisamente geolocalizada. A hidrografia na escala de 1:50.000 utilizada para a construção do DEM e a definição da ordem dos cursos d'água apresentou um erro de georeferenciamento (Figura 16) não sistemático, e então difícil de se corrigir. Esse erro pode ser devido ao método de levantamento das feições hidrográficas para a concepção dos mapas topográficos. Esses mapas serviram de base à construção da hidrografia otocodificada para o estado de Minas Gerais (IGAM, 2012). Eles foram geralmente realizados na década de 1970. Na época, o levantamento era feito de maneira “manual” com teodolito mecânico e sem apoio de GPS geodésico. Avaliando a precisão posicional de um mapa realizado para escala de 1:100.000, Barbosa & Marotta (2013) acharam erros de até 200 metros. O trabalho de Maillard & Santos (2008) apresenta semelhanças com o trabalho realizado nessa Dissertação e é realizado no Brasil, com apoio de mapas topográficos. Esse artigo menciona a necessidade de corrigir, quando possível, o posicionamento das feições de hidrografia antes de estudar o uso e cobertura da terra nas faixas ripárias dos cursos d'água.

A ANA disponibiliza a hidrografia da Bacia do rio Paraíba do Sul para uma escala de 1:250.000 em formato *ShapeFile*, tendo então erro gráfico (0,2 mm no mapa) de 50 metros. As imagens de satélite LANDSAT 5 TM, 7 ETM+ e 8 OLI utilizadas para a produção de mapas de uso e cobertura da terra apresentadas a seguir nesse trabalho tem um erro médio inferior a 15 metros (meio pixel) segundo USGS (2015).

A Figura 16 evidencia que o georeferenciamento da hidrografia escala 1:250.000 (ANA, 2013) é melhor quando avaliado visualmente, comparando com os cursos d'água visíveis nas imagens satélite com resolução espacial de 30 metros.

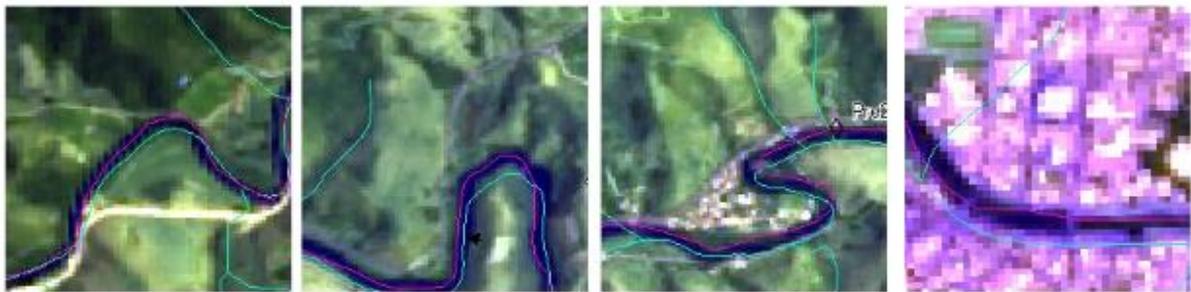


Figura 16: O georeferenciamento da hidrografia 1:250.000 (roxo) foi melhor do que o georeferenciamento da hidrografia 1:50.000 (azul)

Essa hidrografia foi escolhida para servir de referência para a avaliação do uso e cobertura da terra e densidade de população nas faixas ripárias. Na escala 1:250.000 os cursos d'água com comprimento inferior a 1500 metros não são representados. Conseqüentemente, essa hidrografia é representativa dos cursos d'água da BHRP, mas não é completa.

Devido à precisão espacial dos dados utilizados, não foi possível avaliar o uso e cobertura da terra numa faixa de 30 metros dos dois lados das margens ou do eixo do curso d'água. Esse dado é relevante por ser a largura mínima de APP segundo o Novo Código Florestal (BRASIL, 2012). A avaliação da densidade de população e do uso e cobertura nas margens dos rios foi feito para *Buffers* de 100m e 200m, distâncias compatíveis com a qualidade dos dados espaciais utilizados para a caracterização da área de estudo. Um trabalho realizado no Brasil por Maillard & Santos (2008) considera *Buffers* de tamanho crescente a partir de 90m.

2.5.2. Densidade de população e número de habitantes

A densidade de população de uma bacia hidrográfica é um parâmetro interessante de se analisar em relação à qualidade da água. A densidade de população influi principalmente através do lançamento de esgoto doméstico, muitas vezes *in natura* ou com tratamento deficiente na área de estudo. Outro mecanismo que altera a qualidade da água é o escoamento superficial da água meteórica sobre as superfícies impermeabilizadas dos núcleos urbanos.

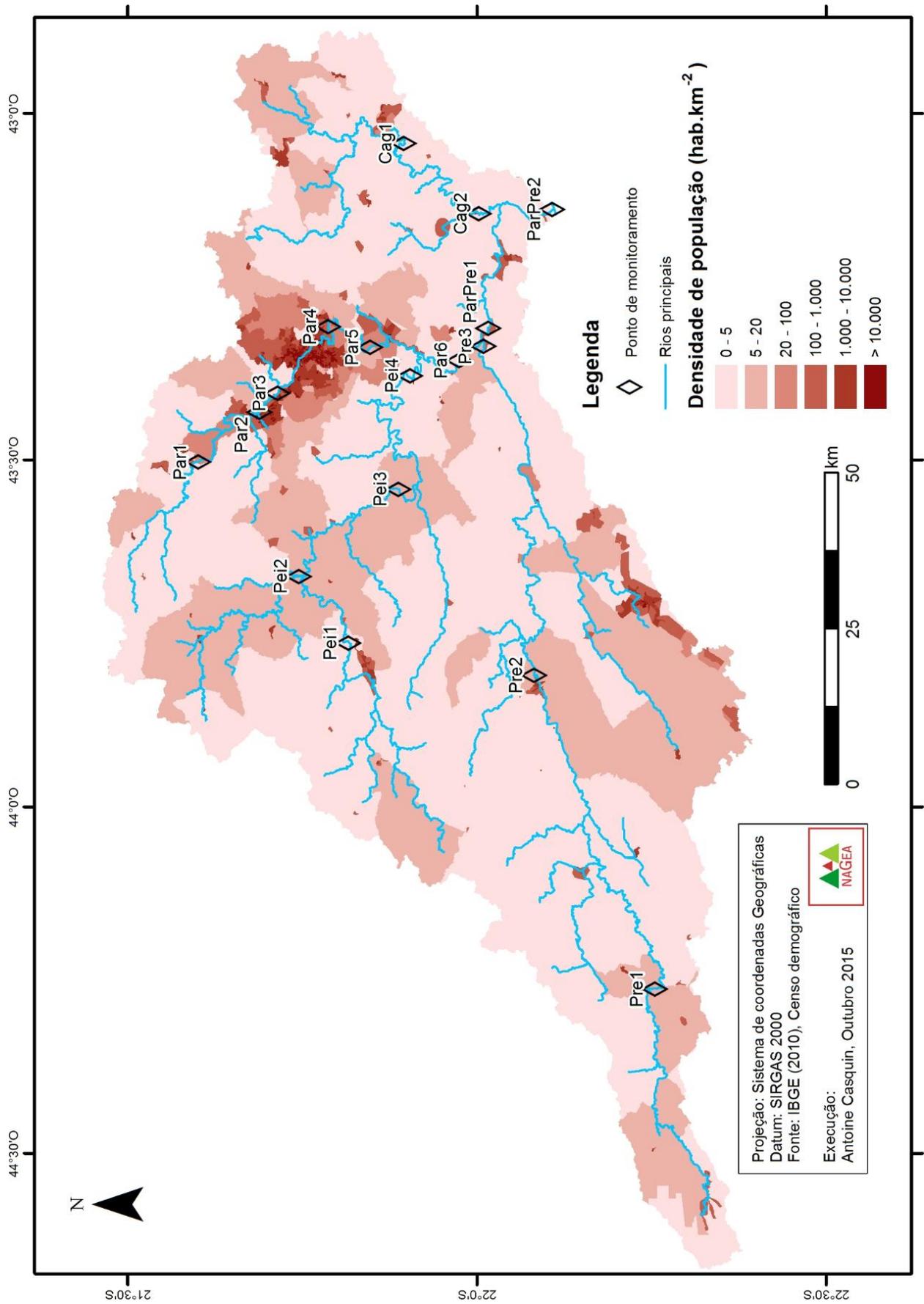
Para a realização do mapeamento da densidade de população foram obtidos os limites dos setores censitários dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro em formato *ShapeFile*, e os resultados do último censo demográfico (2010) no formato de tabelas. O geocódigo presente nos dois formatos de dados permitiu realizar uma ligação por atributo no ambiente de SIG e assim espacializar os dados de população.

O Mapa 12 evidencia que o tamanho do setor censitário é adaptado à densidade de população, sendo setores maiores nas áreas rurais e setores menores para os aglomerados rurais e urbanos. A grande vantagem de se trabalhar com a densidade de população por setor censitário e não por município é o maior detalhamento, permitindo separar a área rural da área urbana dos municípios e de evidenciar até pequenos aglomerados rurais.

Para a estimativa do número de habitantes e da densidade de população para cada sub-bacia, a densidade de população foi considerada uniforme nos setores censitários. Quando um setor foi cortado por um limite de sub-bacia, a população do setor dentro da sub-bacia foi calculada como proporcional à área do setor pertencendo à bacia. Por exemplo, se um setor com 200 habitantes se encontra a 80% dentro de uma sub-bacia, a população calculada é de 160 habitantes. A população estimada de uma sub-bacia é calculada somando a população de todos os setores pertencentes inteiramente ou parcialmente à sub-bacia.

O cálculo da densidade de população é efetuado dividindo o número de habitantes estimado pela superfície da sub-bacia em quilômetros quadrados. Foi escolhido expressar o resultado em habitantes por hectare, sendo que o estudo é realizado numa escala regional (BHRP). Estudos de densidade de população a nível urbano utilizam o número de habitantes por hectare.

As faixas da legenda foram definidas manualmente para melhor representar a diversidade de densidades populacionais na BHRP. A título de comparação, a menor densidade de população para um país é da Mongólia e é de menos de 2 habitantes por quilômetro quadrado. A densidade de população do Brasil é de aproximadamente 22 hab.km⁻² e na região Sudeste é de 92 hab.km⁻². A faixa de 0 a 5 hab.km⁻² serve para identificar verdadeiros “desertos populacionais” e as faixas delimitadas por 20 hab.km⁻² e 100 hab.km⁻² permitem a comparação com a escala nacional e regional. As últimas classes são úteis para observar a diminuição progressiva da densidade de população dos centros dos principais centros urbanos para suas periferias.



Mapa 12: Densidade de população por setor censitário segundo dados do censo demográfico de 2010 na Bacia Hidrográfica do rio Preto (IBGE, 2010).

O Mapa 12 evidencia que a densidade de população na BHRP é muito baixa (inferior a 5 hab.km⁻²) e baixa (inferior a 20 hab.km⁻²) na maior parte da área de estudo. Por serem os municípios mais populosos, destacam-se as áreas urbanas de Juiz de Fora (entre os pontos Par2 e Par5) e de Valença (Sul da BHRP). Os municípios menores, distritos, vilas e aglomerados rurais também aparecem nesse mapa. Os dados de número de habitantes e de densidade de população para cada sub-bacia foram compilados na Tabela 10.

Segundo os dados do censo demográfico de 2010, há aproximadamente 699.000 habitantes na BHRP. A Tabela 10 indica que a população não parece se concentrar ao longo dos cursos d'água: a densidade no *Buffer* é em geral inferior ou igual a àquela observada a nível da sub-bacia. Esse dado conflita com a ideia que o homem ocupa a terra em prioridade a proximidade dos cursos d'água. É importante lembrar que o *Buffer* foi determinado a partir da hidrografia 1:250.000, diferente da hidrografia principal (ordem superior ou igual a 5) representada no Mapa 12 com objetivo de servir de ponto de referência visual. O mapa mostra que as maiores cidades e numerosos povoados estão situadas acima ou a proximidade imediata de um curso d'água de ordem 5 ou superior. Finalmente, podemos ver que o homem na BHRP urbanizou sim, em geral, perto dos cursos d'água, mas que deveria ser de um tamanho mínimo para sustentar o desenvolvimento de uma cidade. A maior parte da extensão da hidrografia, sendo composta em córregos de baixa ordem, encontra-se em áreas rurais com baixa densidade populacional.

Para as sub-bacias do rio do Peixe e as sub-bacias Pre1 e Pre2, nota-se que as densidades de população são abaixo de 20 hab.km⁻² a nível de bacia. As bacias Par4 e Par5 englobando a maior parte da área urbana de Juiz de Fora apresentam elevada densidade populacional, com valores próximos a 500 hab.km⁻². As sub-bacias do rio Cágado têm densidades populacionais intermediárias, próximas à 50 hab.km⁻². Essas densidades intermediárias são devidas a um maior número de sedes de “pequenos” municípios do que de uma maior ocupação geral da Bacia conforme o Mapa 1 e o Mapa 12.

Tabela 10: Número de habitantes (Pop) e densidade de população (Dens) nas sub-bacias da BHRP e faixas ripárias de 100 metros e 200 metros.

	Pop100	Pop200	PopBac	DensPop100	DensPop200	DensPopBac
	(hab)	(hab)	(hab)	(hab.km ⁻¹)	(hab.km ⁻¹)	(hab.km ⁻¹)
Par1	1.010	2.381	6.973	22	26	18
Par2	3.446	8.594	31.893	36	46	44
Par3	5.502	14.763	70.802	51	70	87
Par4	26.809	73.788	496.216	203	282	493
Par5	27.924	77.254	507.436	193	270	463
Par6	32.621	90.230	551.996	69	96	148
Pei1	1.139	3.134	14.954	17	23	23
Pei2	688	1.728	8.043	11	15	11
Pei3	1.950	5.245	25.533	9	13	15
Pei4	2.470	6.509	29.804	9	12	13
Pre 1	548	1.505	5.681	9	13	14
Pre 2	2.474	6.417	21.364	9	12	12
Pre 3	8.275	21.096	94.564	17	22	28
Cag1	3.725	10.154	38.396	32	44	49
Cag2	3.899	10.660	41.144	23	32	37
PP1	41.073	111.872	648.537	42	58	90
PP2	46.512	125.959	699.098	39	54	82

É interessante notar que as bacias menos densamente povoadas apresentam densidades próximas, e até inferiores à densidade média do território brasileiro (22 hab.km⁻²) e que a BHRP, com uma densidade populacional de 82 hab.km⁻² é muita próxima à média para a região Sudeste. Os resultados encontrados ao longo dessa Dissertação poderão servir de comparação com outros estudos feitos e a serem realizados na Região e no Brasil.

Entre os pontos Par3 e Par5, para uma área de contribuição de 281 km² (Área_{Par5} - Área_{Par3}) encontram-se 436.635 habitantes representando então 62,5 % dos habitantes num espaço cobrindo somente 3,3% da BHRP. Entre esses dois pontos, a densidade de população é de 1554 habitantes por quilômetro quadrado.

2.5.3. Uso e cobertura da terra

Mostramos que a maior parte da população da BHRP se situava na área urbana de Juiz de Fora e que as densidades de população estavam abaixo de 5 hab.km⁻² em grande parte dessa Bacia. O mapa de uso e cobertura da terra permitirá a avaliação da poluição difusa que acontece – ou não – na globalidade da BHRP. Como visto na Revisão de Literatura, a relação entre o uso e cobertura da terra e a qualidade da água é forte, e é bastante estudada ao redor do mundo e no

Brasil. Os mapas de uso e cobertura da terra tem muitas utilidades e hoje existem várias bases de dados inclusive em escalas globais. Duas bases de uso e cobertura da terra foram comparadas aqui: uma extraída de um mosaico cobrindo quase a totalidade das terras emergidas (CHEN et al., 2015) e uma base disponibilizada pelo CEIVAP (AGEVAP/COHIDRO, 2013), cobrindo a Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul.

As duas bases foram realizadas a partir de imagens LANDSAT 5 e LANDSAT 7 ETM+ e visam a ser compatível com a escala 1:250.000.

2.5.3.1. Vegetação original

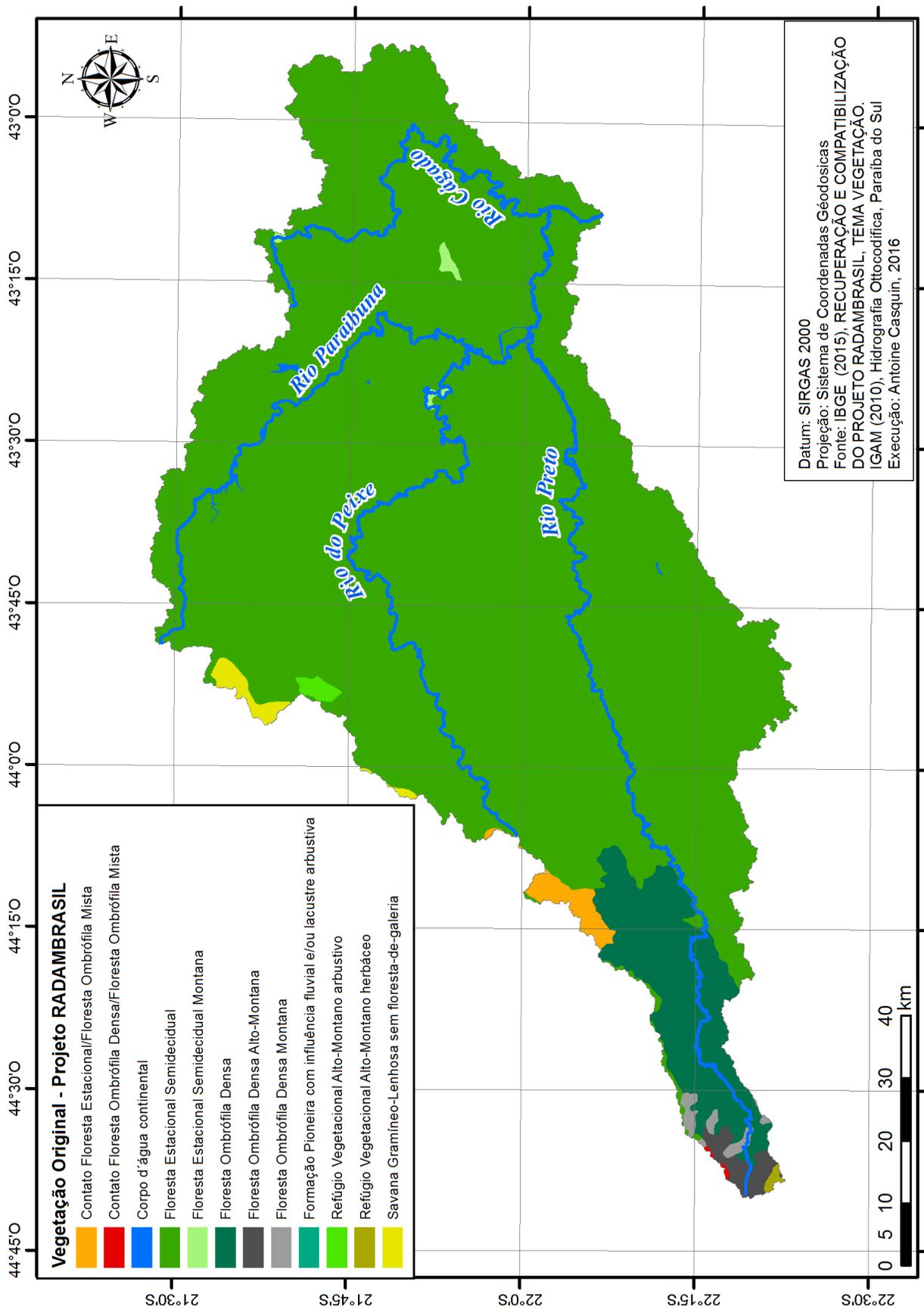
A BHRP é inclusa no domínio da Mata Atlântica no Brasil. O Ministério do Meio Ambiente a define assim: “é formada por um conjunto de formações florestais (Florestas: Ombrófila Densa, Ombrófila Mista, Estacional Semidecidual, Estacional Decidual e Ombrófila Aberta) e ecossistemas associados como as restingas, manguezais e campos de altitude, que se estendiam originalmente por aproximadamente 1.300.000 km² em 17 estados do território brasileiro.” (MMA, 2016).

O Mapa 13 apresenta a vegetação original da BHRP segundo o projeto RadamBrasil. Os metadados dos dados vetoriais disponíveis no servidor do IBGE detalham que: “O dado original é oriundo do mapeamento de vegetação realizado durante o Projeto RadamBrasil (décadas de 70/80). Os traçados originais, compatíveis com a escala 1:1000000, foram recuperados, compatibilizados e ajustados para poderem ser representados de forma contínua para o território brasileiro.”

A grande maioria da BHRP era coberta por uma floresta estacional semidecidual. É uma vegetação caracterizada pela ausência de coníferas e a perda parcial das folhas na estação mais seca do ano. Outras formas de vegetação são localizadas nas áreas mais altas da BHRP, sendo o limite Noroeste da Bacia (contrafortes da Serra da Mantiqueira) e o alto-curso do rio Preto (Maciço de Itatiaia e seus contrafortes).

A classe de vegetação “Formação pioneira com influência fluvial e/ou lacustre arbustiva” não aparece no mapa apresentado nessa escala, mas é presente no baixo curso do rio Preto, a proximidade da confluência com o rio Paraíba do Sul.

O intuito de juntar esse mapa ao trabalho de caracterização da BHRP é de conscientizar sobre a mudança radical que houve entre a paisagem original e a paisagem de hoje em dia. Essa mudança implica que atualmente, a ecologia aquática e o escoamento da água da BHRP são muito impactados, muito diferentes das condições naturais.



Mapa 13: Vegetação original da Bacia Hidrográfica do rio Preto segundo projeto RADAMBRASIL(1983).

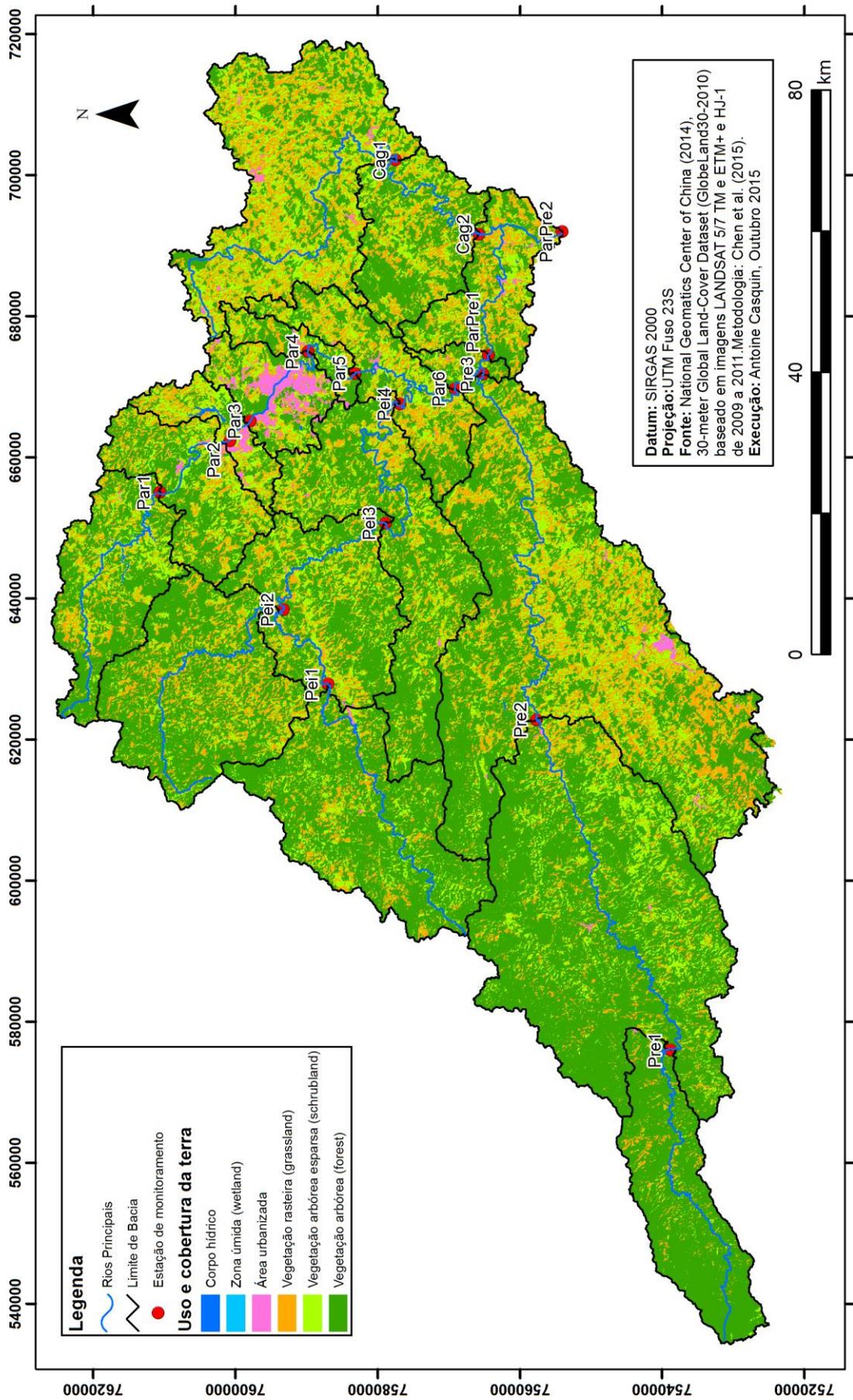
2.5.3.2. Base de dados GlobeLandCover30-2010

O Centro Nacional de Geomática Chinês (*National Geomatics Center of China*) realizou o primeiro trabalho de mapeamento na escala global para uma resolução espacial de 30 metros. Antes desse projeto, já existiam base de dados para escalas de 300 metros e de 1000 metros, baseadas principalmente nas imagens do satélite MODIS. Essa base de dados é disponível gratuitamente mediante cadastro e descrição sucinta do uso pretendido da base de dados. A base de dados existe para os anos de 2000 e de 2010.

Como base para desenvolver o mapa de uso e cobertura, foram utilizadas imagens dos satélites LANDSAT 5 TM, LANDSAT 7 ETM+ e HJ-1 capturadas entre 2009 e 2011. A estratégia para obter o mapa e as escolhas metodológicas são detalhadas em Chen et al. (2015). A classificação é baseada principalmente em 1) O valor numérico do pixel da imagem; 2) Regras lógicas, por exemplo: uma área urbanizada em 2000 é quase sempre urbanizada em 2010; as áreas úmidas e os corpos d'água acontecem em áreas planas (uso do MDE como suporte à classificação); as áreas com cultivos apresentam grandes variações na refletância intra-anual, etc.

O Mapa 14 apresenta a BHRP após extração dessa base de dados. As classes “área cultivada” (*Cultivated land*), “solo exposto” (*Bareland*) não apareceram no mapa, apesar de serem esperadas em pequenas proporções. Pequenas áreas de “zona úmida” (*Wetland*) foram encontrados próximos à represa Chapéu d’Uvas. Essa classe, ocupando menos de 0,1% de qualquer sub-bacia da área de estudo, foi reclassificada segundo o uso e cobertura preponderante nas imediações.

A classe *Schrubland* é comum de se encontrar em publicações internacionais tratando do uso e cobertura da terra. Ele não possui, no conhecimento do autor, uma tradução exata e oficial para a nomenclatura brasileira. Trata-se de uma vegetação arbórea muito esparsa, com densidade de pequenos arbustos maiores do que os encontrados no Cerrado (*Savana*) brasileiro. Pode representar áreas em fase inicial de recuperação e pastos abandonados ou “sujos”.



Mapa 14: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto – Base: GlobeLandCover30-2010

As porcentagens de uso e cobertura da terra para as sub-bacias estudadas foram obtidas segundo o esquema apresentado na Figura 10. Os resultados são apresentados nas Figuras 17, 18 e 19. As sub-bacias foram ordenadas da menos florestada até a mais florestada.

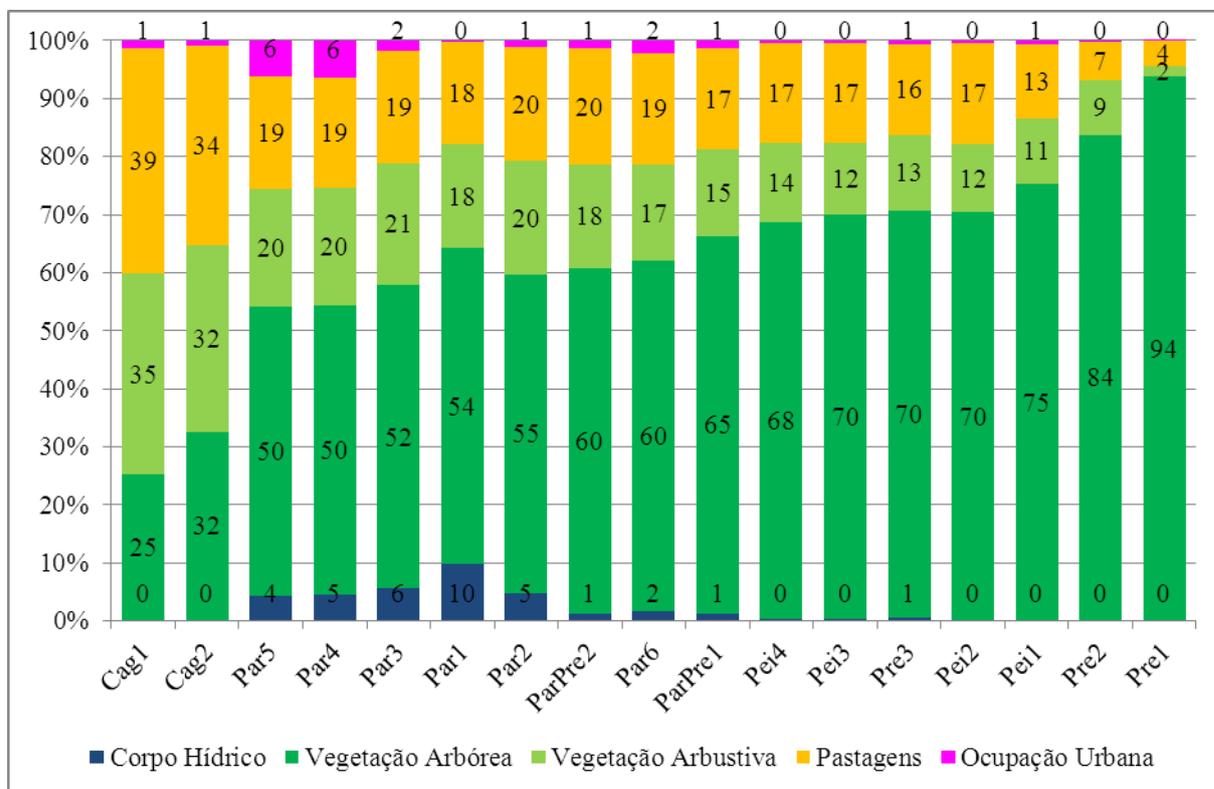


Figura 17: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.

Segundo as Figuras 18 e 19, o florestamento das áreas ripárias varia de 25 % para 94% numa faixa de 100m e de 23% para 92% numa faixa de 200m. Considerando a classe *Schrubland*, esse valor é maior ainda. Para a BHRP, correspondendo ao ponto ParPre2, o florestamento das margens por vegetação arbórea é de 60% numa faixa de 100m, e de mais 20% considerando a vegetação arbustiva.

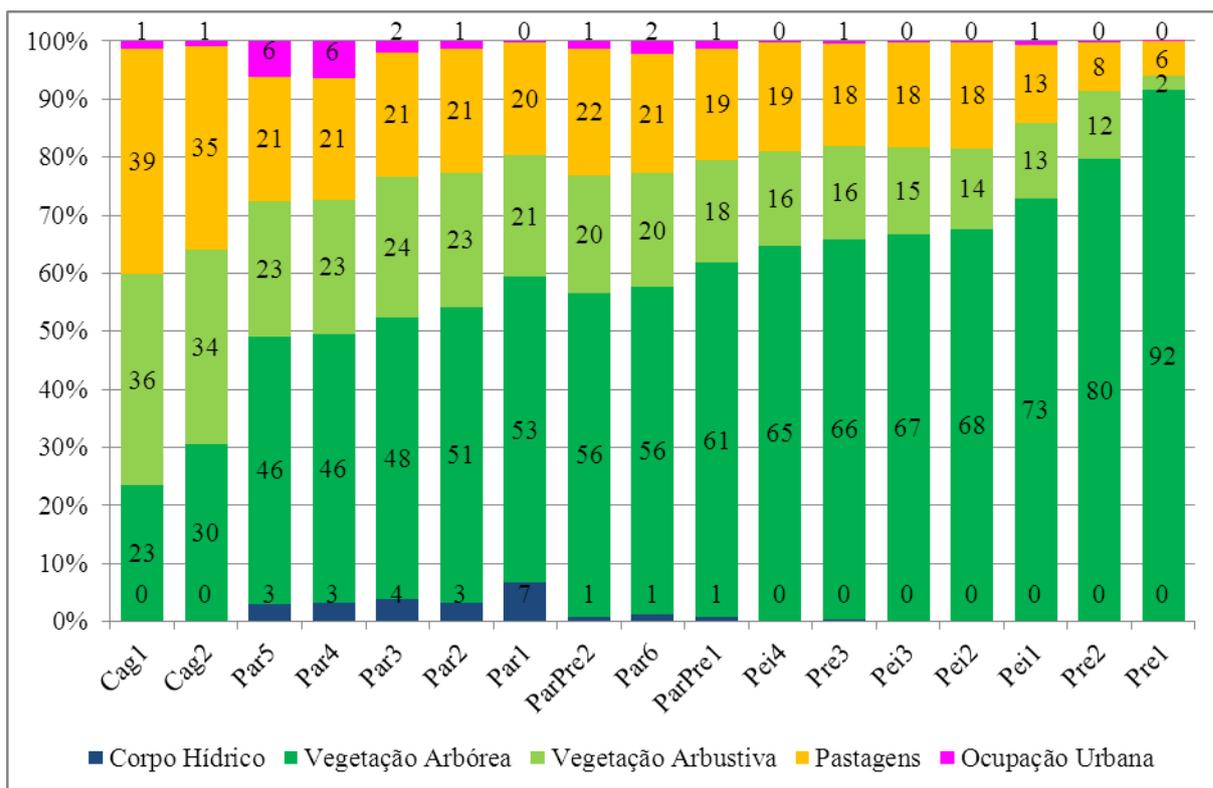


Figura 18: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.

Segundo o conhecimento histórico e visitas *in situ* em vários pontos da BHRP, esses valores parecem muito altos, indicando que a pastagem representaria somente 20-22% do uso e cobertura nas margens dos cursos d’água, o que não parece relatar a realidade da BHRP.

As classes “Corpo Hídrico” e “Ocupação Urbana” (*Artificialized cover*) parecem melhor quantificadas nessa base de dados. A máxima ocorrência de ocupação urbana é encontrada nos pontos Par5 e Par4 correspondendo as sub-bacias dos pontos imediatamente depois da área urbana de Juiz de Fora. Para a classe “Corpo Hídrico” observamos um máximo em Par1 correspondendo à Represa Chapéu d’Uvas. Para as sub-bacias a jusante há influência dessa Represa e também da Represa Dr. João Penido, os dois maiores espelhos d’água da área de estudo, situados na Bacia Hidrográfica do rio Paraibuna.

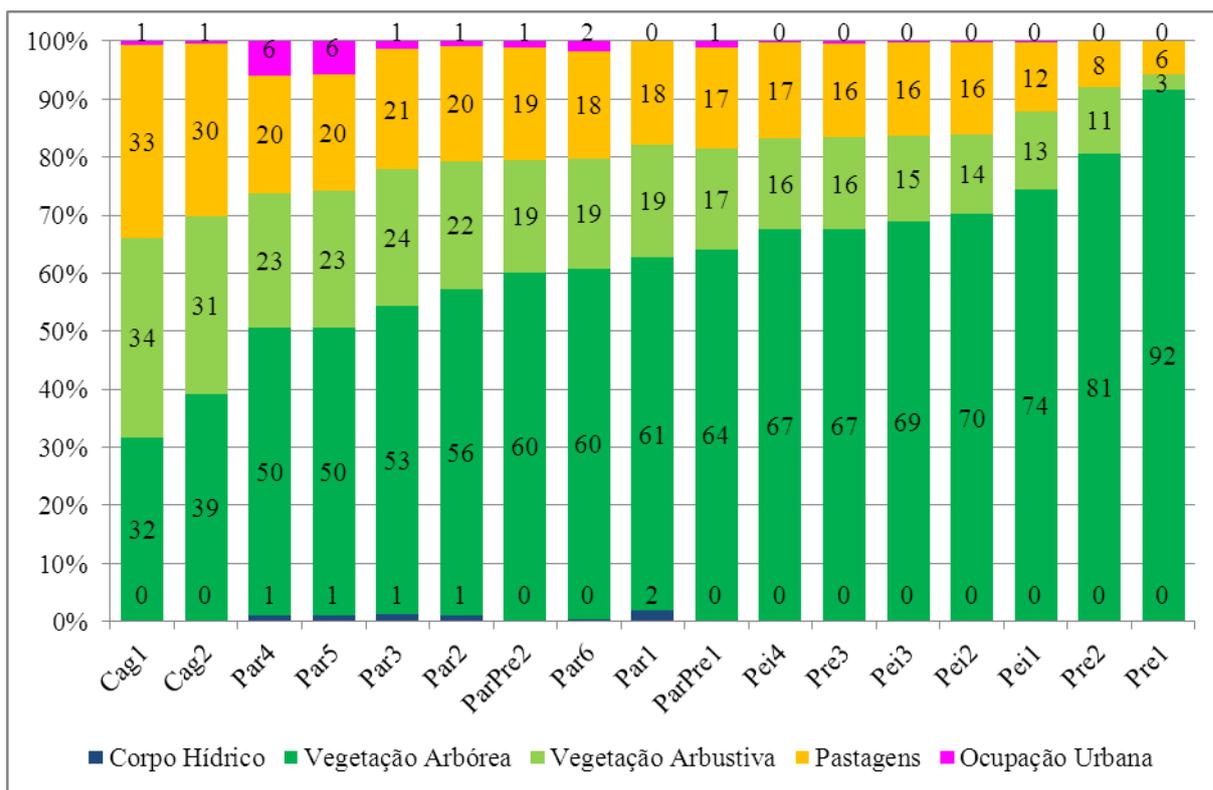


Figura 19: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo base de dados GlobalLandCover30-2010.

A Figura 19, ilustrando os resultados a nível de bacia evidencia porcentagens de uso e cobertura por vegetação arbórea bem superiores ao que era esperado para a BHRP. Notamos que há pouca variação entre o uso e cobertura da terra nas faixas ripárias (100m e 200m) e a nível de bacia.

A Tabela 11 detalha as porcentagens para a vegetação arbórea e a área urbanizada nas três escalas escolhidas. Notamos que a porcentagem de área urbanizada é muito baixa para as bacias do rio do Peixe (0,17% em Pei4), do rio Preto (0,08 % em Pre1, sobe para 0,35% em Pre3 com a área urbana de Valença) e até do rio Cágado (0,55% em Cag2).

Tabela 11: Porcentagem de Vegetação arbórea e Área urbanizada nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo a base de dados GlobalLandCover30-2010.

		Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	P-P1	P-P2
Vegetação Arbórea	100m	54,4	54,7	52,3	49,8	49,7	60,3	75,4	70,4	69,7	68,2	93,7	83,6	70,0	25,1	32,4	65,1	59,7
	200m	52,5	50,8	48,4	46,2	46,0	56,5	72,8	67,6	66,6	64,5	91,5	79,6	65,5	23,3	30,4	61,0	55,9
	Bacia	60,9	56,2	53,1	49,6	49,7	60,5	74,4	70,2	68,8	67,4	91,5	80,7	67,5	31,6	39,1	63,7	59,8
Área Urbanizada	100m	0,16	1,19	1,86	6,32	6,13	2,25	0,75	0,42	0,36	0,37	0,06	0,30	0,60	1,34	0,93	1,41	1,33
	200m	0,14	1,23	1,96	6,49	6,24	2,24	0,61	0,33	0,29	0,33	0,04	0,26	0,52	1,24	0,87	1,36	1,29
	Bacia	0,10	0,88	1,44	5,95	5,69	1,83	0,28	0,16	0,14	0,17	0,08	0,12	0,35	0,79	0,55	1,12	1,04

A Tabela 11 também indica que, no que se refere a vegetação arbórea e área urbanizada, o uso e cobertura da terra é muito similar entre as diferentes escalas de análises.

2.5.3.3. Base de dados da Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba do Sul (AGEVAP)

O Comitê de Integração da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (CEIVAP) disponibiliza uma grande variedade de dados georreferenciadas de interesse para a Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (BHRPS), na qual a área de estudo está inserida.

O CEIVAP permite baixar esses dados sem cadastro prévio nem justificativa do uso no portal Sistema de Informações Geográficas e Geoambientais da BHRPS: <http://sigaceivap.org.br/siga-ceivap/map>. Um mapa de uso e cobertura da terra é disponível para a BHRPS.

O mapa disponível foi realizado pela consultoria COHIDRO no âmbito do plano integrado de recursos hídricos da BHRPS e planos de recursos hídricos das bacias afluentes (AGEVAP/COHIDRO, 2013). O mapa foi baseado nas imagens LANDSAT 5TM do 13/08/2011 e do 13/09/2011 para a parte correspondendo à área de estudo.

Como ferramentas principais para o processamento das imagens, foram utilizados os aplicativos ENVI 4.7 (georreferenciamento das bandas, mosaico e equalização) e SPRING – versão 5.2.3, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. O algoritmo de máxima verossimilhança por pixel foi aplicado após seleção de amostras de treinamento.

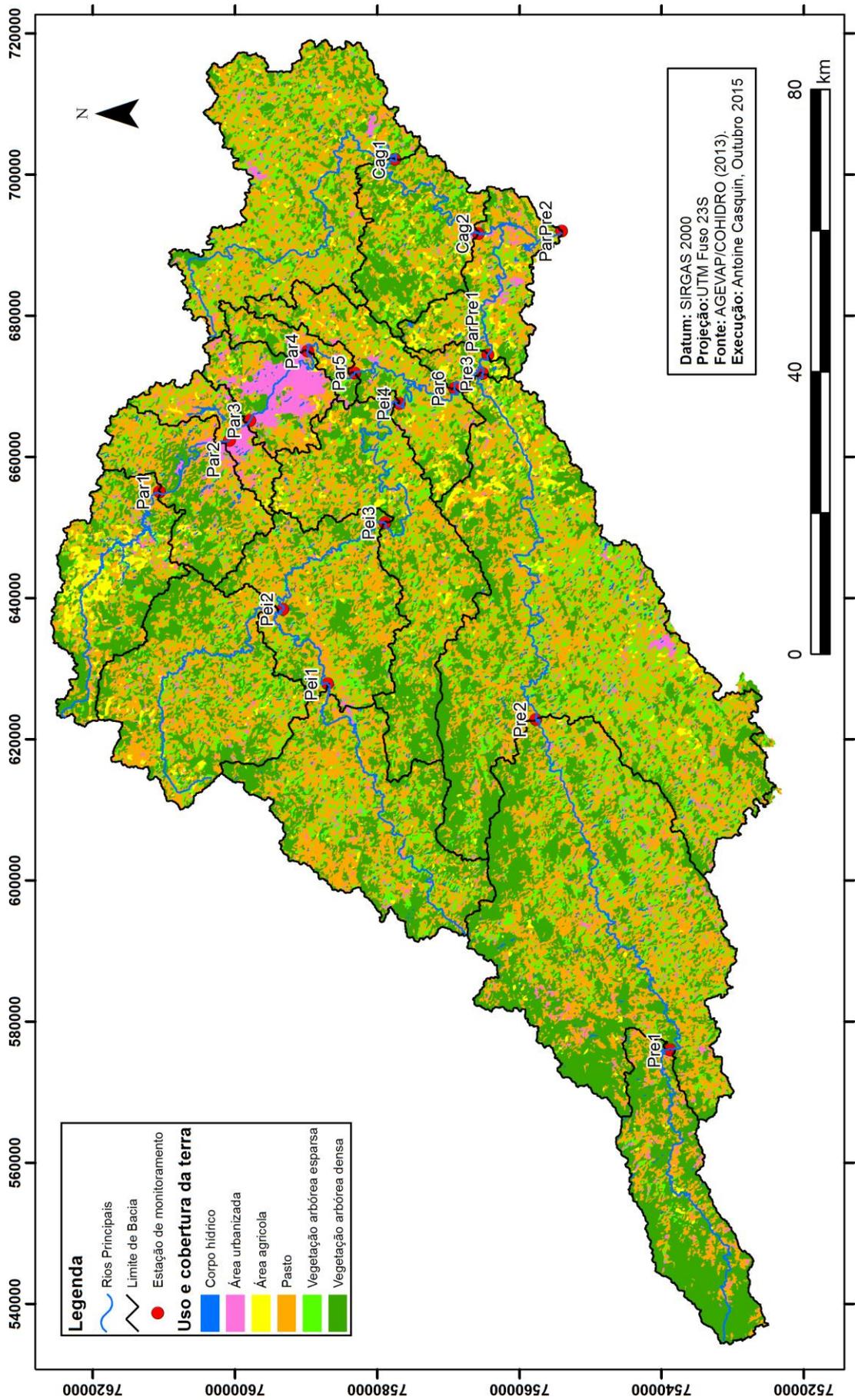
Como apoio à realização do mapa, foram utilizadas amostras do Mapa Uso do Solo e Cobertura Vegetal executado para a AAI - Avaliação Ambiental Integrada dos Aproveitamentos Hidrelétricos da Bacia do rio Paraíba do Sul, em maio/2007, pela empresa

Sondotécnica S.A. para a EPE – Empresa de Pesquisa Energética (EPE/SONDOTECNICA, 2007).

Na complementação e atualização do uso do solo e da cobertura vegetal, também foi utilizado o Levantamento da Cobertura Vegetal Nativa do Bioma Mata Atlântica do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO de 31/01/2007 (<http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm>).

A escala pretendida do mapa é de 1:250.000, conforme permitem as imagens LANDSAT 5 TM, com pixel de 30 metros.

O recorte para a área de estudo é apresentado no Mapa 15 e a Tabela 12 descreve as classes de uso e cobertura adotadas para a realização desse mapa.



Mapa 15: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto – Base: AGEVAP/COHIDRO (2013)

Para a realização do Mapa 15 e o cálculo das porcentagens de uso e cobertura, não foi levado em consideração o tipo de floresta para as classes referentes à vegetação arbórea densa e esparsa. A seleção por atributo e a calculadora de campo foram utilizadas para fundir essas classes dentro do ambiente ArcGIS 10.2.1.

Tabela 12: Classes de uso e cobertura definidas no mapa de uso e cobertura (AGEVAP/COHIDRO,2013)

Classes	Definições
Área Agrícola	Compreende áreas utilizadas para cultivo temporário e permanente, passíveis de identificação nas imagens de satélite.
Área não classificada	Região não classificada devido a sombras, nuvens ou descarte estatístico.
Área Urbanizada	Inclui além de centros urbanos, edificações industriais, comerciais e mistas e áreas de expansão urbana denotada por arruamentos em loteamentos.
Campos / Pastagens	Áreas de vegetação natural primitiva substituída por pastagens onde predomina a pecuária leiteira. É constituída de cobertura gramínea rala, com ocorrência de processos erosivos e frequentes queimadas.
Corpo Hídrico	Compreende todos os corpos d'água registrados nas bases cartográficas ou detectáveis nas imagens de satélite, inclusive lagos artificiais ou naturais e planície de inundação natural do leito dos rios.
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Densa -	Vegetação de porte arbóreo sujeita a dupla estacionalidade climática, tropical chuvosa no verão seguida por estiagens acentuadas. Nesta classe foram selecionados indivíduos que compõem uma distribuição mais densa.
Floresta Estacional / Vegetação Arbórea Esparsa	Vegetação de porte arbóreo sujeita à dupla estacionalidade climática, tropical chuvosa no verão seguida por estiagens acentuadas. Nesta classe foram selecionados indivíduos que compõem uma distribuição mais esparsa.
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Densa	Vegetação de porte arbóreo, com indivíduos apresentando entre 15 e 30 metros de altura. Desenvolve-se em ambiente tropical de elevada temperatura e alta precipitação ao longo do ano. Nesta classe foram selecionados indivíduos que compõem uma distribuição densa.
Floresta Ombrófila / Vegetação Arbórea Esparsa	Vegetação de porte arbóreo, com indivíduos apresentando entre 15 e 30 metros de altura. Desenvolve-se em ambiente tropical de elevada temperatura e alta precipitação ao longo do ano. Nesta classe foram selecionados indivíduos que compõem uma distribuição esparsa.
Florestamento / Reflorestamento	São as áreas destinadas a plantios arbóreos homogêneos.
Restinga/Mangue	Vegetação arbórea, árvores de pequeno porte, trepadeira e epífitas que ocorrem nas planícies arenosas litorâneas e manguezais, apenas em ambiente halófilo da desembocadura do rio Paraíba do Sul.
Vegetação Arbórea Densa	Classe de vegetação arbórea composta por indivíduos que compõem uma distribuição densa e não enquadrada em zona fito ecológica.
Vegetação Arbórea Esparsa	Classe de vegetação arbórea composta por indivíduos que compõem uma distribuição esparsa e não enquadrada em zona fito ecológica.

Fonte: AGEVAP/COHIDRO (2013)

Como evidenciado no Mapa 15, não foram encontradas as classes “Restinga/Mangue” nem “Florestamento/Reflorestamento” dentro da BHRP segundo o mapa realizado pela AGEVAP/COHIDRO (2013).

As Figuras 20, 21 e 22 apresentam os resultados para cada sub-bacia nas três escalas definidas previamente. Numa primeira vista, o mapa da AGEVAP/COHIDRO é mais representativo da realidade da BHRP a respeito da proporção de pastagens e de vegetação arbórea.

Segundo a Figura 20, as pastagens ocupam no mínimo 50% das faixas ripárias dos cursos d’água da bacia (ponto ParPre2), e, segundo a Figura 22, 43% da BHRP. A proporção de pastagens pode ser maior, considerando que a classe “Vegetação arbórea esparsa” deve ser composta, pelo menos em parte, de pastos abandonados. Essa informação é interessante porque mostra que as faixas ripárias (100m, 200m) da BHRP são até menos florestadas que o restante dessa Bacia.

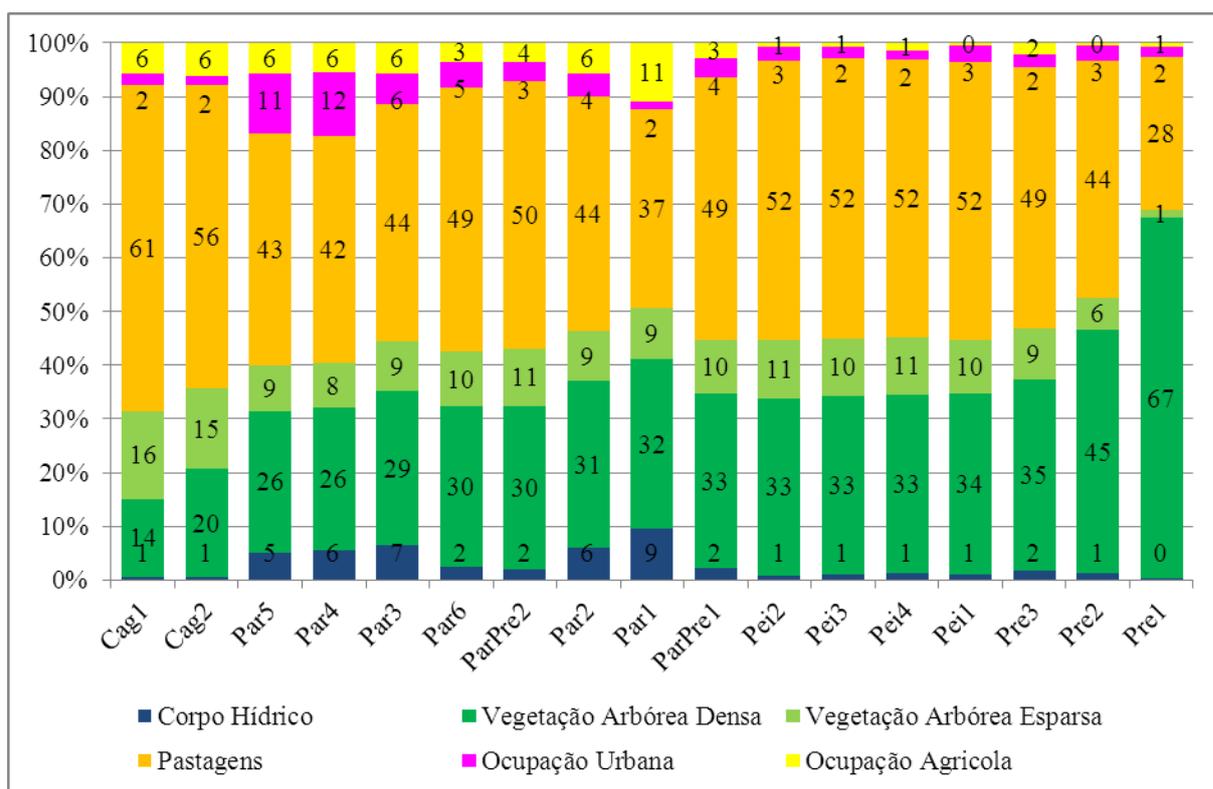


Figura 20: Uso e cobertura da terra numa zona ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.

Podemos observar que, mesmo se as porcentagens de vegetação arbórea fossem muito diferentes entre as duas bases de dados, a ordenação das sub-bacias da menos florestada para a

mais florestada leva, de maneira geral, ao mesmo resultado: a bacia do rio Cágado é a menos florestada, a bacia do rio Paraibuna se encontra numa situação intermediária, a bacia do rio do Peixe apresenta uma situação um pouco melhor e a cabeceira do rio Preto (Pre1 sobretudo, Pre2 conseqüentemente) possui a maior cobertura florestal, em proporção, das sub-bacias estudadas na BHRP.

A classe “Florestamento/Reflorestamento” não apareceu apesar de haver várias plantações de eucalipto e pinus na região. Uma surpresa foi constatar a presença de “Área agrícola”, principalmente na cabeceira do rio Paraibuna, para uma sub-bacia correspondendo aproximativamente à Bacia de Contribuição da Represa Chapéu d’Uvas (BCRCU). Dois trabalhos recentes apresentaram mapas de uso e cobertura com nível de detalhamento superior à escala 1:250.000 (MACHADO, 2012; RIBEIRO, 2012) para essa área. Em nenhum dos dois trabalhos consta uma área cultivada cobrindo uma parcela significativa da BCRCU. Essa presença pode ser considerada como um erro no mapa da AGEVAP/COHIDRO (2013).

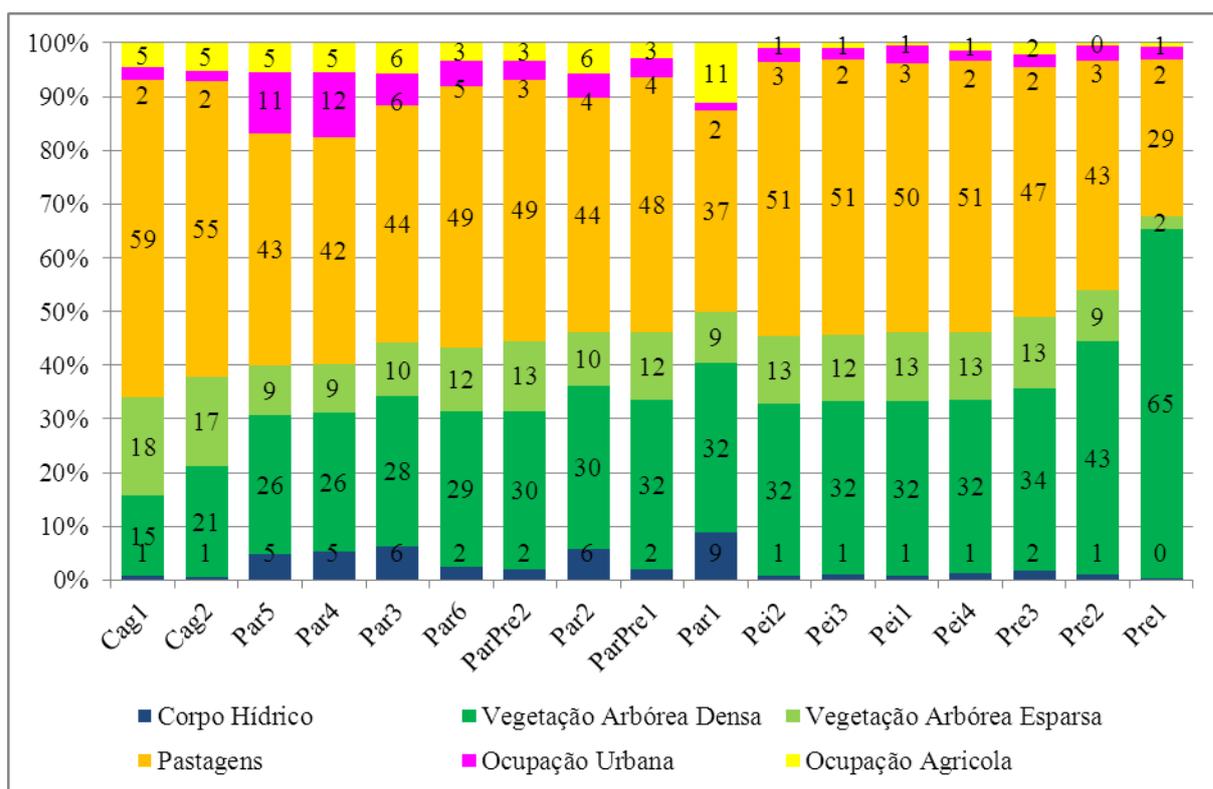


Figura 21: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.

Nas Figuras 20, 21 e 22 ou com a Tabela 13 observamos que a classe “Vegetação arbórea densa” é relativamente constante para as três escalas de análise, confirmando o resultado encontrado na base precedente. Para o rio Cágado, observou-se uma diferença

significativa com 14,4% de “Vegetação arbórea densa” numa faixa ripário de 100m e 21,1% a nível de sub-bacia no ponto Cag1; no ponto Cag2 os valores são de 20,1% e 27,0% respectivamente.

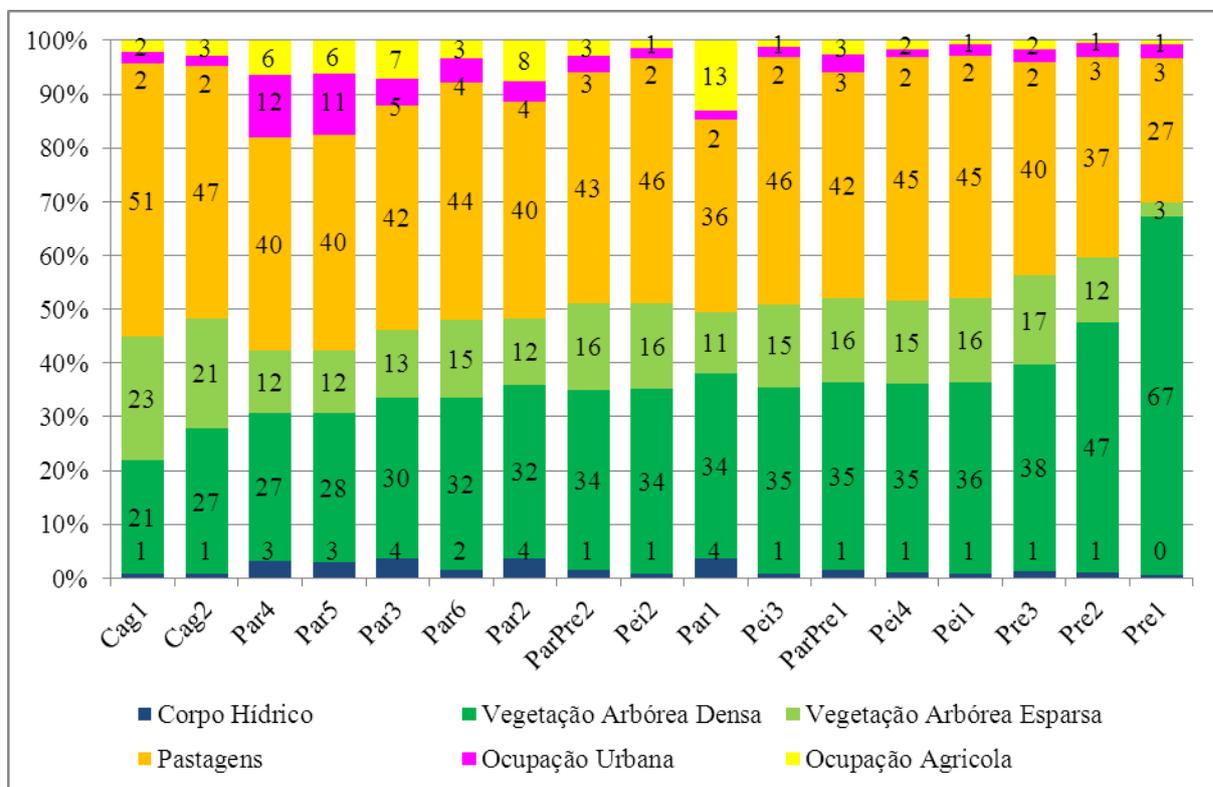


Figura 22: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo base de dados AGEVAP/COHIDRO.

Entre os mapas extraídos da base de dados da AGEVAP/COHIDRO e da GLC30-2010 existem também grandes discrepâncias para as três escalas de análise para as classes referentes à área urbanizada e aos corpos hídricos.

Para os corpos hídricos a nível de sub-bacia, observamos por exemplo no ponto Par2 que a classe representa 4% na base da AGEVAP/COHIDRO e menos de 1% na base GLC30-2010. No caso da área urbanizada para o ponto Par 4 (jusante da área urbana de Juiz de Fora), observamos um valor de 6% segundo a base GLC30-2010 e de 12% segundo a base do AGEVAP/COHIDRO. A análise das Tabelas de 11 e 13 demonstra discrepância ainda maiores.

Tabela 13: Porcentagem de Vegetação arbórea densa e Área urbanizada nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo a base de dados AGEVAP/COHIDRO (2013)

		Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	P-P1	P-P2
Vegetação Arbórea	100m	31,7	31,0	28,6	26,5	26,2	29,8	33,7	33,2	33,3	33,4	67,2	45,5	35,5	14,4	20,1	32,6	30,4
	200m	31,6	30,4	28,0	25,9	25,7	29,1	32,3	32,0	32,3	32,4	64,9	43,3	34,0	15,0	20,5	31,5	29,5
	Bacia	34,5	32,5	29,9	27,5	27,7	32,0	35,6	34,4	34,6	35,1	66,7	46,6	38,3	21,1	27,0	35,0	33,6
Área Urbanizada	100m	1,5	4,3	5,6	11,9	11,2	4,8	3,1	2,6	2,2	1,8	2,0	2,9	2,5	2,1	1,7	3,6	3,4
	200m	1,6	4,4	5,9	12,1	11,4	4,8	3,2	2,6	2,2	1,8	2,2	2,8	2,5	2,4	1,9	3,6	3,4
	Bacia	1,6	3,7	5,0	11,8	11,3	4,4	2,2	2,0	1,7	1,5	2,7	2,6	2,2	2,2	1,8	3,4	3,2

Mesmo com valores médios de área urbanizada bem superiores aos valores encontrados para o mapa extraído da base GLC30-2010, observamos que a maior parte da BHRP é rural: no ponto ParPre2 a área urbanizada representa 3,2% da BHRP.

2.5.3.4. Conclusão:

Essa comparação entre duas bases de dados preexistentes e recentes com imagens de 2010 para GLC30-2010 e imagens de 2011 para o mapa da AGEVAP/COHIDRO trouxe alguns resultados interessantes: a classe “*Schrubland*” não foi comparada à classe “Vegetação arbórea esparsa” por não ter definições iguais.

As duas bases de dados apontam que as bacias mais impactadas pelo uso urbano são as sub-bacias referentes aos pontos Par4 e Par5. Outra semelhança foi que a sub-bacia do ponto Pre1 é a mais coberta por vegetação arbórea, e que as sub-bacias do rio Cágado são as menos florestadas. Notamos também que a proporção de pastagens (ou vegetação rasteira), com exceção do ponto Pre1, é pouco variável na BHRP. Nenhuma das duas bases permitiu separar a vegetação arbórea natural do reflorestamento comercial.

O mapa extraído da base de dados do CEIVAP/COHIDRO apresentou coberturas por área urbanizada ou por corpos hídricos muito superiores à base GLC30-2010. A base GLC30-2010 exibiu porcentagens de vegetação arbórea que não coincidem com a realidade da BHRP; e o mapa do CEIVAP/COHIDRO apresentou um erro notável para a bacia do ponto Par1

Esses resultados muito diferentes para as duas bases e os erros apontados numa avaliação preliminar levaram à realização um mapa de uso e cobertura da terra da BHRP.

Capítulo 3: Realização de um mapa de uso e cobertura da terra da BHRP (2015)

3.1. Satélite LANDSAT 8, sensor OLI/TIRS

O satélite LANDSAT 8 segue uma órbita hélio-síncrona, significando que é síncrona com o sol: o satélite sempre imageia o mesmo lugar no mesmo horário solar (10 horas e trinta minutos aproximadamente). Ele passa a cada 16 dias em todos os pontos da superfície terrestre, o que define sua resolução temporal. Há satélite com resolução temporal maior ou menor do que 16 dias. Satélites de observação meteorológica por exemplo são geoestacionários (sempre ficam acima do mesmo ponto no referencial terrestre) e têm resoluções temporais da ordem das horas ou minutos. As imagens do satélite LANDSAT 8 estão disponíveis 24 horas depois de capturadas.

No portal *EarthExplorer* as imagens podem ser baixadas gratuitamente mediante cadastro. As imagens estão disponíveis em formato GeoTiff georreferenciadas, na Projeção UTM, Datum WGS 84 e ortoretificadas (o relevo não influencia sobre a posição do pixel). A resolução horizontal da imagem é de 30 m e a precisão do georreferenciamento após ortoretificação é inferior a meio pixel, permitindo a sobreposição das imagens para criação de séries temporais ou a criação de mapa com escala de 1:250.000 ou até 1:100.000. Cada cena Landsat8 distribuída pela *United States Geological Survey* (USGS) no portal *Earth Explorer*, cobre um retângulo de 183 km (Este-Oeste) por 170 km (Norte-Sul)

O satélite LANDSAT 8 carrega dois instrumentos: os sensores OLI e TIRS. O *Operational Land Imager* (OLI) é parecido com os sensores mais antigos dos satélites LANDSAT 5 (*Thematic Mapper*, ou TM) e 7 (*Enhanced Thematic Mapper*, ou ETM+) e possui três novas bandas. As características técnicas parecidas permitem construir séries históricas coerentes, o que é de grande interesse para o monitoramento da evolução do uso e cobertura da terra. O sensor *The Thermal Infrared Sensor* (TIRS), como seu nome indica, providencia duas bandas qualificadas de “termais”, permitindo estimar a temperatura da superfície da terra e de corpos hídricos.

Esses dois sensores têm uma resolução radiométrica de 12 bits, o que significa que são capazes de distinguir 4096 níveis de cinza para cada banda. Os sensores TM e ETM+ tinham resolução radiométrica de somente 8 bits (256 níveis de cinza), mostrando o grande avanço dos instrumentos do satélite LANDSAT 8 nesse aspecto.

Vale ressaltar que existem satélites de observação da terra comerciais com melhores resoluções espaciais como o RapidEye (resolução espacial de 5 metros), Ikonos II (1,0 m),

Quickbird II (0,65 m), o Worldview (0,5 m), entre outros. O gratuito de melhor resolução atualmente é o Sentinel 2A/2B (resolução de 10 metros). O LANDSAT 8 foi escolhido por ter imagens sem nuvens, recentes e gratuitas dessa área de estudo a época de montagem dessa base de dados. Desde o início de 2016, as imagens do satélite Sentinel 2A começaram a ser distribuídas gratuitamente num portal dedicado e no *Earth Explorer*, sendo que essas imagens virão a complementar a coleção de imagens LANDSAT. Na Tabela 14 estão consignadas as características de cada banda disponível nas imagens LANDSAT 8 OLI/TIRS.

Tabela 14: Bandas e comprimentos de onda associados a imagens LANDSAT 8 OLI/TIRS

Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Vermelho	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Infravermelho Próximo (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - Infravermelho Médio 1 (SWIR 1)	1.57 - 1.65	30
Band 7 - Infravermelho Médio 2 (SWIR 2)	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Pancromática	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Infravermelho Termal 1 (TIRS 1)	10.60 - 11.19	100 * (30)
Band 11 - Infravermelho Termal 2 (TIRS2)	11.50 - 12.51	100 * (30)

Fonte: USGS, (2016a)

As bandas 2, 3 e 4 correspondem à luz visível e as outras bandas trazem informações que não seriam visíveis por um observador humano.

Para a realização de um mapa de uso e cobertura da BHRP, as bandas 2 a 7 foram selecionadas. As bandas 1 e 9 servem para a correção atmosférica (“retirada” do halo característico das imagens de satélites brutas, devido à atmosfera terrestre), que não foi realizada diretamente pelo autor. A banda pancromática tem uma resolução espacial melhor que as demais bandas, mas seu comprimento de onda não cobre as bandas infravermelhas, não sendo utilizada para a elaboração do mapa de uso e cobertura da terra dessa Dissertação. As bandas 10 e 11 são as bandas termais. Elas têm resolução nativa de 100 m, mas são distribuídas após interpolação para uma resolução de 30m, como consta na Tabela 14.

Uma banda fundamental em processamento digital de imagens é a banda do infravermelho próximo (Banda 5, NIR). A reflexão da vegetação arbórea é muito baixa no vermelho, mas aumenta abruptamente no infravermelho próximo, permitindo distinguir os

diferentes tipos de vegetação: rasteira, arbustiva e arbórea através do cálculo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

3.2. Procedimentos adotados para a realização do mapa de uso e cobertura da terra

As etapas da realização do mapa de uso e cobertura (*Workflow*) estão resumidas na Figura 23. As múltiplas etapas se explicam pela ambição de realizar um mapa de uso e cobertura que permitisse diferenciar as áreas cobertas de vegetação arbórea natural (nativa ou secundária) das áreas cobertas por reflorestamento comercial (principalmente eucalipto na área de estudo, encontrando também a presença de pinus).

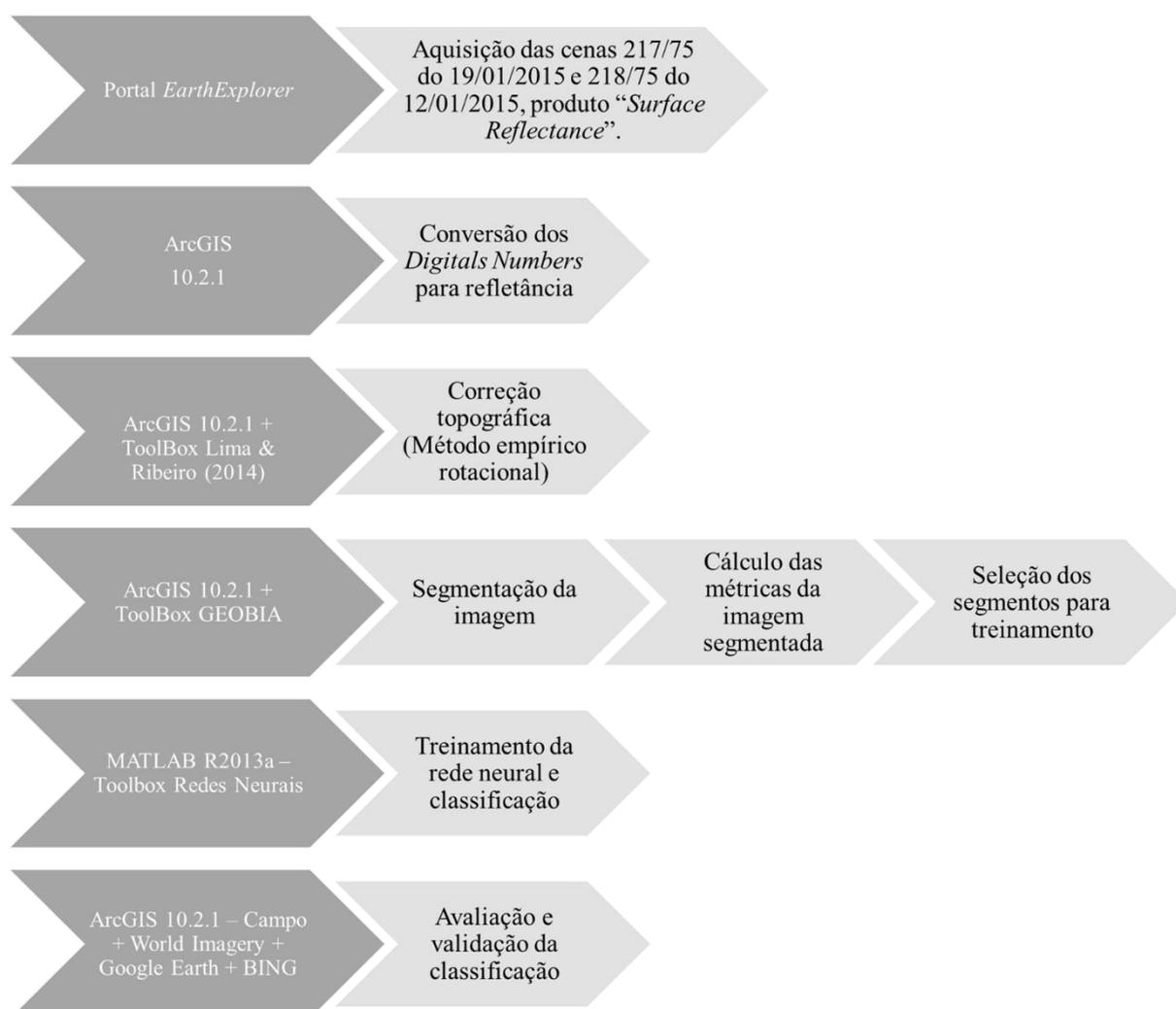


Figura 23: Etapas da realização do mapa de uso e cobertura da terra

O primeiro passo foi de “baixar” as imagens cobrindo a área da BHRP. Desde 2015 a USGS disponibiliza imagens com correção atmosférica já realizada. O algoritmo utilizado tenta

se aproximar do estado da arte para a correção atmosférica e está em ainda em fase de teste e refinamento (USGS, 2016b).

3.3. Correção topográfica

Essa etapa nem sempre é realizada na produção de mapas de uso e cobertura da terra. A área de estudo apresenta declives acentuados, sendo que esta correção permite melhorar a qualidade da classificação, descorrelacionando a resposta espectral de um pixel de sua exposição e inclinação. Na prática, evita que sombras sejam confundidas com outras classes como água, por exemplo.

Foi utilizada a Toolbox desenvolvida por Lima & Ribeiro (2014) com dados de SRTM preenchidos e ajustados para as duas cenas LANDSAT 8 cobrindo a BHRP. A primeira etapa foi de converter os “Números Digitais” para valores de refletância de superfície. Segundo Lima & Ribeiro (2014), com uma área de estudo situada dentro da BHRP, os métodos empírico rotacional e estatístico rotacional deram os melhores resultados. Tan et al. (2013) destacaram os bons resultados do modelo empírico rotacional, justificando a escolha desse modelo.

3.4. Segmentação e identificação das classes com GEOBIA para ArcGIS

O plug-in GEOBIA para ArcGIS (URBANSKI, 2014) permite utilizar a classificação do uso e cobertura da terra por objeto. Segundo Blaschke et al. (2014) é um novo paradigma na fotointerpretação e a realização de mapas de uso e cobertura da terra, permitindo a integração de mais conhecimento e regras lógicas na quantificação do uso e cobertura da terra.

3.4.1. Segmentação

Devido às limitações computacionais, as cenas LANDSAT 8 foram cortadas segundo quadrados de 20 km de lado e segmentadas em lote em seguida. Para obter uma segmentação satisfatória (Figura 24), foi necessário ajustar um parâmetro de rugosidade.

A segmentação foi julgada satisfatória quando os grupos de pixels cobriam uma área relativamente homogênea sem delimitar detalhes de alguns pixels. Segundo a documentação da Toolbox, a segmentação se baseia no algoritmo detalhado por Devereux et al. (2004). Programas como ENVI® ou ECognition® possuem funções similares.

Após a segmentação, as características seguintes de cada objeto foram extraídas: refletância mínima, média, máxima, desvio-padrão da refletância e NDVI das bandas 2, 3, 4, 5,

6 e 7 das imagens LANDSAT. A elevação média e a inclinação média do objeto foram extraídas do MDE para apoiar na classificação.

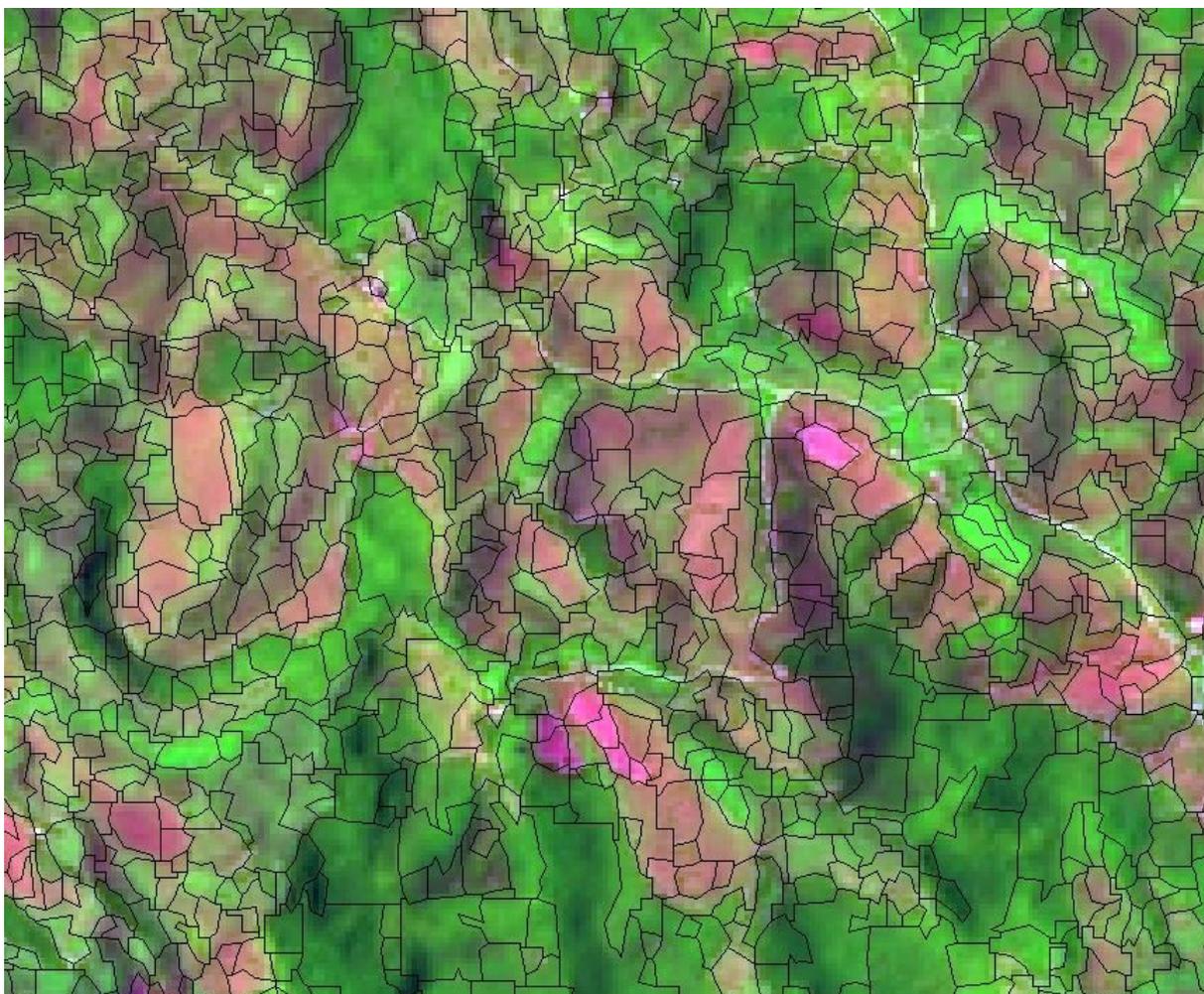


Figura 24: Segmentação de uma imagem LANDSAT-8 (composição de bandas 6-5-4) com o plug-in GEOBIA.

3.4.2. Definição das classes e classificação

Na Figura 20 constam diferentes feições da paisagem reconhecidas na BHRP. O manual de uso e cobertura da terra do IBGE (IBGE, 2013) foi de grande utilidade no reconhecimento das feições da paisagem, e o conhecimento *in situ* de locais da BHRP foi fundamental para realizar uma boa classificação. A Tabela 15 serve de legenda para a Figura 25.

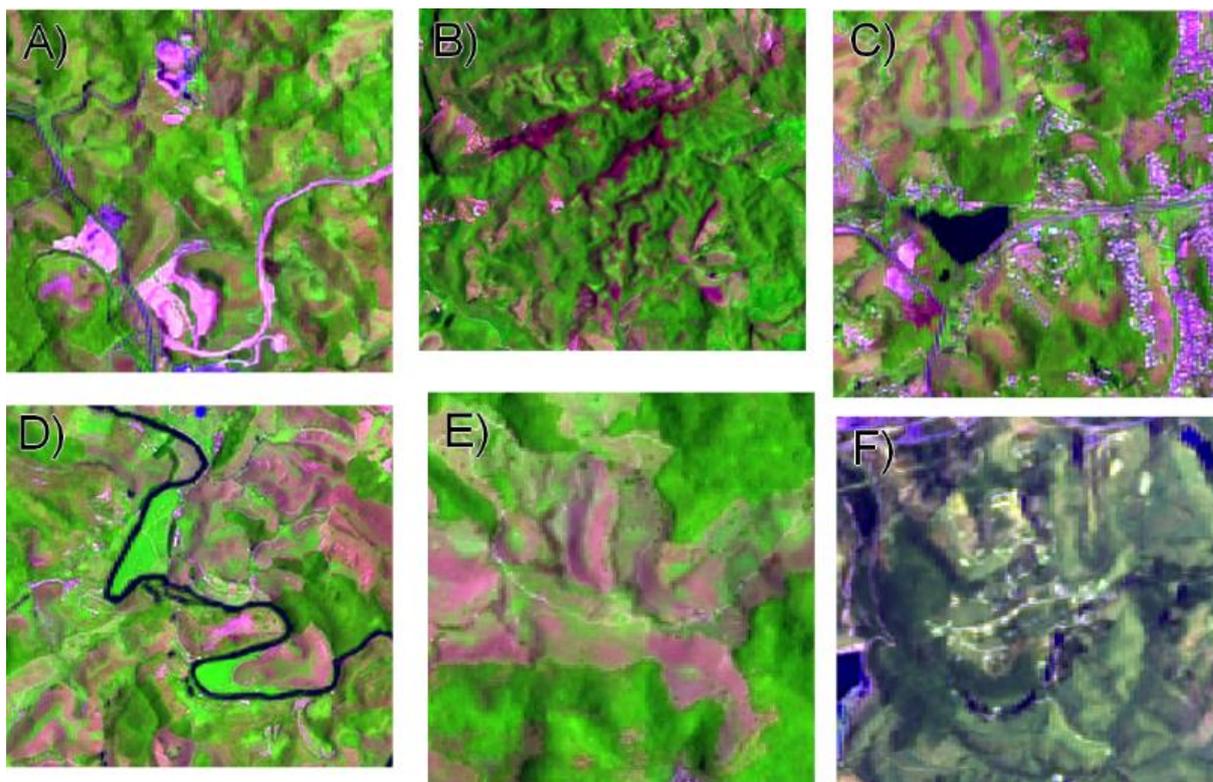


Figura 25: Identificação das classes de uso e cobertura da terra: extratos da paisagem da BHRP

Tabela 15: Identificação das classes de uso e cobertura da terra: legenda

Imagem	Composição	Legenda
A)	6/5/4	O solo exposto se destaca e aparece em cor de rosa muito claro.
B)	6/5/4	Os afloramentos rochosos aparecem em roxo escuro.
C)	6/5/4	O corpo hídrico (Represa São Pedro) aparece em azul escuro. A área urbana densa como um pontilhado de branco e roxo/cor de rosa.
D)	6/5/4	Uma área cultivada (verde claro, textura regular) aparece num meandro do Rio Preto
E)	6/5/4	A vegetação arbórea natural aparece em verde profundo, com textura irregular. A vegetação arbustiva tem uma cor verde claro, encontrando-se mais nos topos de morro nessa imagem. A vegetação rasteira aparece como cor de rosa/marrom
F)	6/5/2	Essa imagem destaca uma área rural, com poucos edifícios (pontos brancos) numa área dominada por pastagens (verde/cinza) nessa composição. A vegetação arbórea, em verde escuro, se destaca menos nessa composição

Após uma avaliação global da paisagem observada na BHRP, levando em consideração as classes definidas em outras bases e as especificidades da imagem segmentada, foram definidas as classes de uso e cobertura da terra conforme Tabela 16:

Tabela 16: Descrição das classes de uso e cobertura da terra adotadas para a realização do mapa da BHRP.

Classe de uso e cobertura	Descrição
Ocupação urbana densa / Área urbana densa	Edificações adjacentes. Contempla os usos residenciais, comerciais, industriais e as vias de comunicação asfaltadas visíveis na escala da imagem.
Ocupação esparsa / Área Rural	Edificações esparsas separadas em geral por vegetação rasteira. Também contempla as áreas de cultivo e as estradas de terra visíveis na escala da imagem.
Solo exposto	Solo exposto devido em geral a grandes obras (terraplanagem), preparo da terra para plantio ou erosões.
Pastagem / Vegetação rasteira	Vegetação de pequeno porte com predominância de capins, em geral usado para a criação extensiva de gado leiteiro na BHRP.
Vegetação arbustiva	Vegetação de porte médio sem dossel fechado.
Vegetação arbórea natural	Floresta semidecidual ou ombrófila, nativa ou secundária em estágio avançando de recuperação, com dossel fechado.
Corpo hídrico	Represas, lagos ou rios de grande porte.
Silvicultura	Reflorestamento comercial: plantação de eucalipto ou pinus.
Campo de altitude	Vegetação natural das áreas com as maiores altitude na BHRP.
Afloramento rochoso	Afloramentos rochosos de grande porte

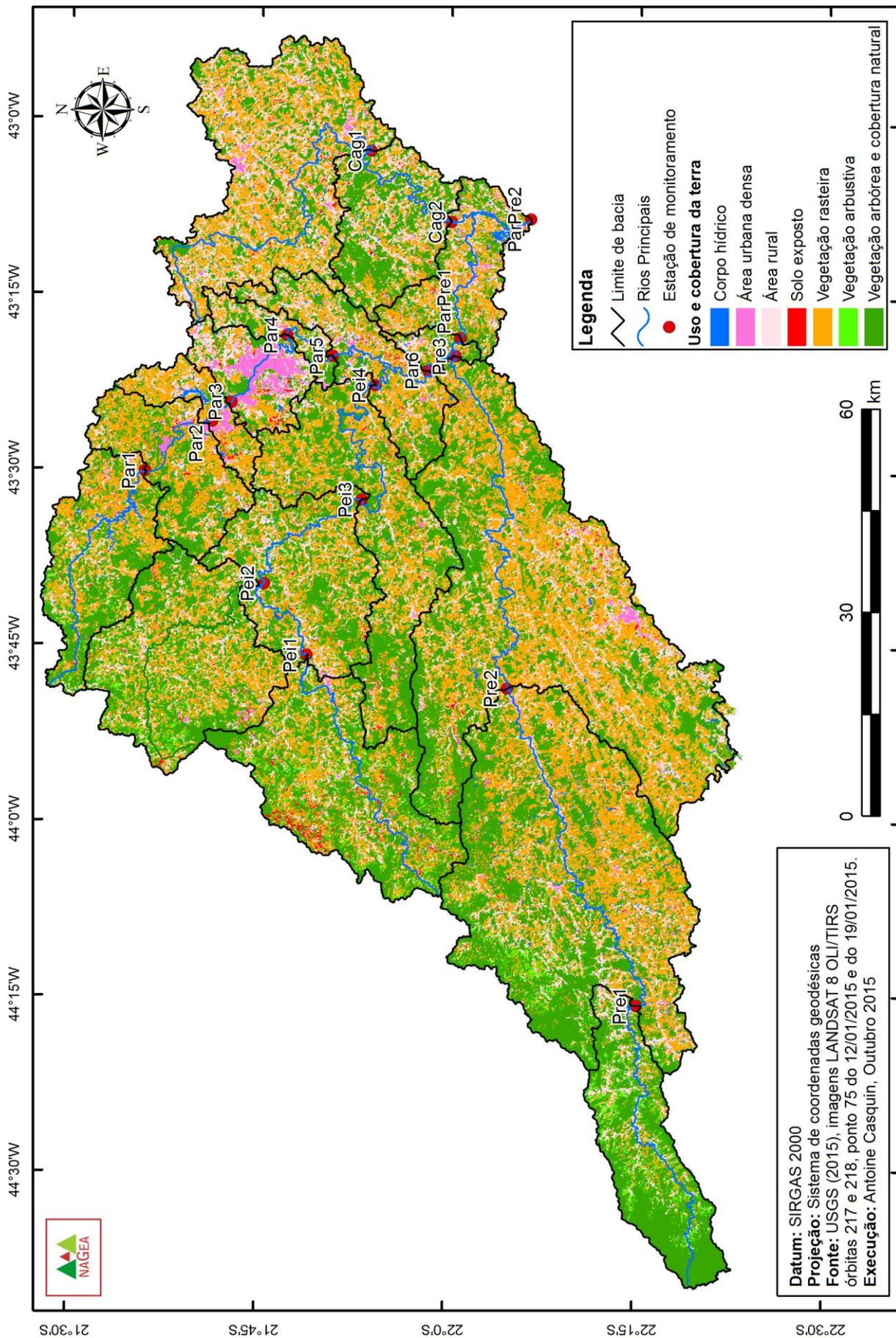
Com base nas descrições das classes adotadas, foram selecionadas e identificadas 100 amostras aleatoriamente escolhidas e amostras representativas das classes para as duas cenas do LANDSAT cobrindo a área de estudo.

Essas amostras e suas métricas calculadas previamente foram importadas no programa MATLAB R2013a com o objetivo de treinar uma rede neural. Redes neurais vêm sendo empregadas em vários setores onde a predição e o reconhecimento de padrões são importantes: meteorologia, reconhecimento de caracteres, economia financeira. etc. Redes neurais são comumente utilizadas há mais de dez anos como ferramenta de classificação do uso e cobertura da terra, muitas vezes com um melhor desempenho do que com métodos “clássicos” (ROGAN & CHEN, 2004) como o da Máxima Verossimilhança.

Para o treinamento da rede neural, 70% das amostras foram destinadas ao treinamento da rede e 30% foram utilizadas para avaliação da precisão dessa. Para as duas cenas cobrindo a área de estudo, uma acurácia do classificador (a rede neural) de pouco mais de 90% foi obtida.

3.4.3. Resultado da classificação

O Mapa 16 apresenta o resultado da classificação.



Mapa 16: Uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do rio Preto em 2015, obtido pelo autor.

Apesar da “estratégia” de classificação elaborada, não foi possível diferenciar a silvicultura do florestamento natural. Isso é devido a vários fatores:

- O eucalipto e o pinus são de crescimento rápido e se encontram em todos os estágios de crescimento na área de estudo: solo quase exposto após preparo da terra, fase arbustiva, fase arbórea e como queimada após o recorte.
- Mesmo muito comum na paisagem, há poucas áreas grandes de silvicultura BHRP, dificultando o cálculo de índices de textura que poderiam apoiar a classificação.
- Muitas plantações que foram avistadas em imagens satélite de alta definição espacial (Google Earth, BING, World Imagery) estão situadas no meio de fragmentos de vegetação natural, dificultando a separação durante a segmentação da imagem.

Como havia muito erros para essa classe (vegetação arbórea sendo classificada como silvicultura e vice-versa), as classes vegetação arbórea natural e silvicultura foram fusionadas. Vale ressaltar que é um problema bastante comum em sensoriamento remoto. Luz et al. (2015), fizeram uma classificação com uma boa acurácia geral, mas acertaram apenas 18% dos pixels correspondentes a classe de uso e cobertura da terra “Eucalipto”.

As classes “Campo de altitude” e “Afloramento rochoso”, com pouca significância a nível geral da BHRP, também foram fusionadas com a classe “vegetação arbórea”.

3.4.4. Comparação visual entre as bases e imagens LANDSAT 8 OLI

A avaliação do mapa de uso e cobertura da terra foi primeiramente visual. A Figura 26 ilustra as três bases de uso e cobertura da terra estudadas nessa Dissertação. A base GLC30-2010 superestima claramente e em grandes proporções a vegetação arbórea e a vegetação arbustiva, mas se mostrou bastante precisa na delimitação da Represa Chapéu d’Uvas e das áreas urbanas.

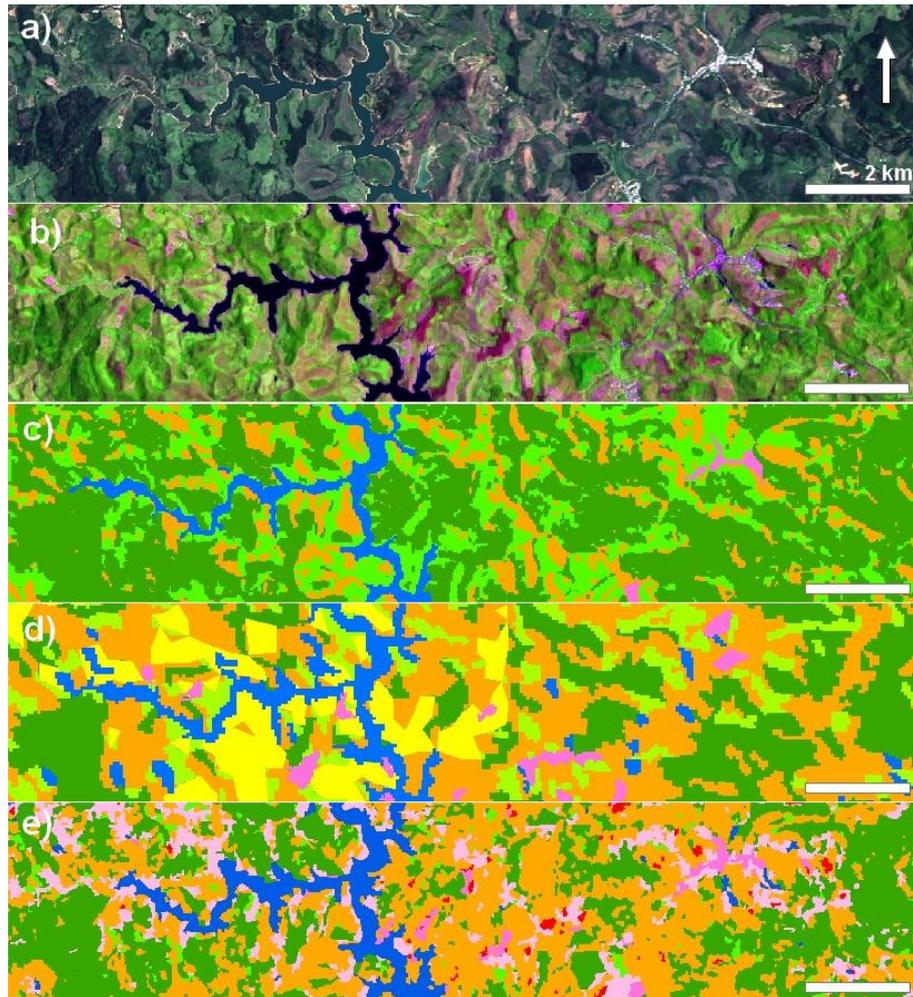


Figura 26: Comparação visual entre as três bases de uso e cobertura da terra

Legenda: Recorte de imagem LANDSAT 8, cena 217/75 de 19 de Janeiro de 2015. Aparecem a sede do município de Ewbank da Câmara e uma parte da represa Chapéu d’Uvas: a) Composição 4-3-2 (Cor verdadeira); b) Composição 6-5-4 (bandas infravermelhas, destaque para a vegetação); c) uso e cobertura da terra da base GLC30-2010; d) uso e cobertura da terra da base do AGEVAP/COHIDRO; e) uso e cobertura da terra elaborado e adotado nessa Dissertação.

A base da AGEVAP/COHIDRO foi mais realista a respeito da razão pastagens/vegetação arbórea, porém ainda com muitos erros. Primeiramente a área de cultivo (em amarelo) não corresponde à realidade do lugar. Para essa classe, os polígonos parecem delineados manualmente. Uma explicação possível desse erro seria que na época de realização do mapa, essas áreas eram de solo exposto e foram consideradas como áreas de cultivo. Os pequenos corpos hídricos espalhados correspondem às áreas de sombra, ressaltando a necessidade de correção topográfica na área de estudo, com relevo complexo mesmo com pequenas amplitudes. Manchas de urbanização significantes são encontradas em lugares indevidos.

O mapa de uso e cobertura da terra realizado para essa Dissertação aparece visualmente

como o mais detalhado e preciso dos três. Primeiramente, há de se lembrar que ele é comparado com a imagem matriz no qual ele foi baseado, o que não é o caso dos outros mapas, levando nesse aspecto uma vantagem “artificial”. A razão entre a vegetação rasteira e a vegetação arbórea parece realista, apesar de uma leve tendência à superestimar a classe arbórea. Pequenos afloramentos rochosos foram classificados como área urbana, mas o defeito é menor do que no mapa do CEIVAP. A classe “Solo exposto”, que não aparece nos outros mapas, parece coerente com as imagens LANDSAT 8. A represa de Chapéu d’Uvas parece um pouco maior no mapa do que na imagem de satélite. A classe “Rural” parece levemente sobre-representada, mas a escala da Figura 26 não permite avaliar essa classe.

3.4.5. Validação da classificação

Para a validação do mapa realizado, foram selecionados 135 pontos de controle aleatoriamente. Para cada classe foram selecionados 5 pontos aleatoriamente e mais 100 pontos foram distribuídos na BHRP, sem restrição de classe. Vale ressaltar que quando o operador escolhe os pontos de controle manualmente, o coeficiente de validação do mapa é artificialmente aumentado.

A validação do mapa foi realizada com dados auxiliares: imagens de satélite de alta definição do Google Earth, do BING (Microsoft) e do World Imagery (ESRI). Mapas de uso e cobertura da terra realizados em escalas menores para parte da área de estudo (MACHADO, 2012; RIBEIRO, 2012; FREITAS, 2015; e SILVA, 2015) e o conhecimento *in situ* de alguns lugares, permitiram efetuar uma validação eficaz do mapa de uso e cobertura da terra (Mapa 17).

Para cada ponto gerado anteriormente, foi observada a classificação à qual pertencia (imagem segmentada) e foi validado segundo dados auxiliares. Os resultados foram compilados na matriz de validação (Tabela 17). A classe de validação “Outro” se refere a classes de uso e cobertura não determinadas na classificação devido à fração insignificante na BHRP: vegetação de alagado, afloramento rochoso, mineração, área agrícola ou queimada, por exemplo

		Validação								
		Corpo Hídrico	Área urbana densa	Área rural	Solo exposto	Vegetação rasteira	Vegetação arbustiva	Vegetação arbórea	Outros	
Classificação	Corpo Hídrico	7	0	0	0	0	0	0	0	7
	Área urbana densa	0	6	0	0	0	0	0	1	7
	Área rural	0	0	15	0	4	0	0	0	19
	Solo exposto	0	0	0	6	0	0	0	0	6
	Vegetação rasteira	0	0	2	0	30	1	0	3	36
	Vegetação arbustiva	0	0	0	0	1	6	0	1	8
	Vegetação arbórea	0	0	0	0	2	5	45	0	52
	Outros	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			7	6	17	6	37	12	45	5

Tabela 17: Matriz de validação do mapa de uso e cobertura da terra realizado para essa dissertação

Conforme Tabela 17, houve realmente uma pequena superestimação da quantidade de vegetação arbórea (52 segmentos classificados como tal para somente 45 validados), e das áreas rurais (19 classificados para 15 validados e dois “falsos positivos”).

A matriz de validação permitiu calcular o coeficiente κ de Cohen (1960). Esse indicador varia de 0 (nenhuma concordância ou concordância devido à sorte) para 1 (concordância perfeita entre o mapa realizado e os pontos de controle). A concordância seria perfeita se a classificação fosse exatamente igual à validação. O coeficiente κ se calcula da seguinte maneira:

$$\kappa = \frac{\text{Pr}(a) - \text{Pr}(e)}{1 - \text{Pr}(e)} \quad (\text{Eq. 1})$$

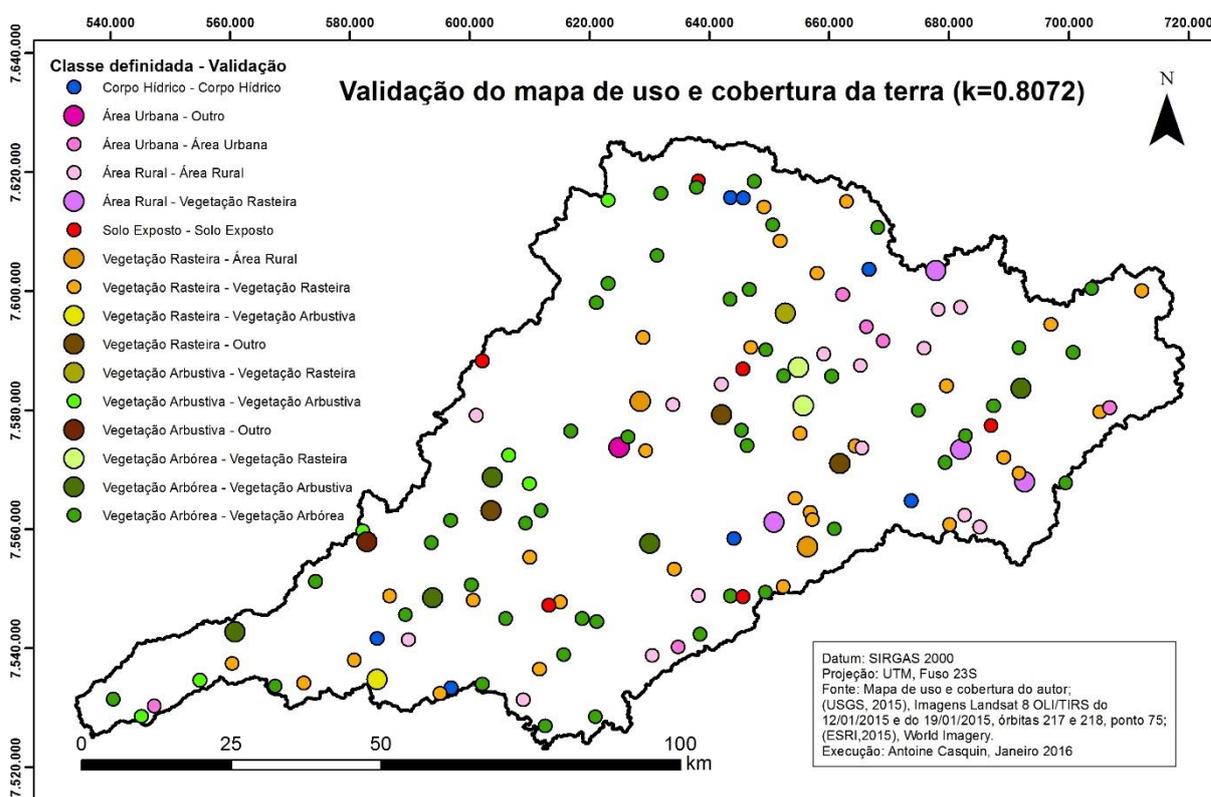
Onde: $\text{Pr}(a)$ – concordância observada e $\text{Pr}(e)$ – probabilidade de concordância aleatória.

Landis & Koch (1977) propuseram valores (Tabela 18) para a interpretação do coeficiente kappa (κ) de Cohen (1960). Lima (2013) realizou um mapa de uso e cobertura para a bacia de contribuição do reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Funil e propôs a seguinte tradução:

Tabela 18: Classificação do k de Cohen

k	<i>Agreement</i>	Concordância
	Landis & Koch (1977)	Lima (2013)
< 0	<i>No agreement</i>	Péssima
0 – 0,20	<i>Slight agreement</i>	Ruim
0,21 – 0,40	<i>Fair</i>	Razoável
0,41 – 0,60	<i>Moderate</i>	Boa
0,61 – 0,80	<i>Substantial</i>	Muito boa
0,81 – 1	<i>Almost perfect</i>	Excelente

O valor calculado médio para o mapa realizado foi de 0,8072 (coeficiente de concordância de 0,8519). O intervalo de confiança a 95% é de $k_{95\%} = [0,7293 ; 0,8852]$, confirmando uma classificação de muito boa para excelente.



Mapa 17: Validação da classificação de uso e cobertura da terra realizada pelo autor

Com base nos pontos de controle mapeados para a validação do mapa de uso e cobertura da terra da BHRP, também foram avaliados os mapas da AGEVAP/COHIDRO: $k_{95\%} = [0,2172 ; 0,4534]$; e a base GLC30-2010 (Chen et al., 2015): $k_{95\%} = [0,2060 ; 0,4436]$. Esses resultados, apesar de baixos, indicam classificações razoáveis. O fato de encontrar coeficientes similares

para as duas bases não era esperado, visto que a base da AGEVAP/COHIDRO foi realizada numa escala mais local e pareceu melhor retratar a realidade da BHRP. Como esses dois mapas foram feitos com base em imagens de 2009 para 2011, com apoio numa base de 2007 para AGEVAP/COHIDRO, e a validação foi efetuada com uma imagem de início de 2015, as mudanças ocorridas na bacia entre 2007 e 2015, principalmente a nível de vegetação (rasteira, arbustiva, arbórea), abaixaram o κ de Cohen aqui calculado, provavelmente maior na época de realização dos mapas. No caso do GLC30-2010, mesmo assim, está longe do objetivo, que é de 0,75 para qualquer bioma / região terrestre.

3.4.6. Uso e cobertura nas sub-bacias e nas faixas ripárias segundo mapa realizado

Como evidenciado nas outras bases de dados, o uso e cobertura da terra não é muito diferente entre as faixas ripárias de 100m e 200m, e a escala das sub-bacias (Figura 27, 28 e 29).

A classe de uso e cobertura que mais se diferencia nessas escalas e a classe “ocupação rural”, definida como uma área com vegetação rasteira e presença pouco densa de ocupação humana. Essa classe chega a representar 51% nas faixas ripárias nas sub-bacias do rio Cágado, para um valor de 30% a nível de bacia.

A classe vegetação arbórea, em consequência, é minoritária com apenas 14% par Cag1-100m e de 20% para Cag2-100m. A nível de bacia, a vegetação arbórea somente cobre 25% de Cag1-bac e muitas plantações de eucalipto foram localizadas nas sub-bacias Cag1 e Cag2. A classe área urbana densa é um pouco superior a nível das faixas ripárias do que a nível de bacia segundo a Tabela 19.

Analisando apenas a classe vegetação arbórea para o conjunto de sub-bacias da BHRP, observamos a mesma ordem previamente vista com as sub-bacias do rio Preto (Pre1 e Pre2) e as sub-bacias do rio do Peixe, as mais florestadas; as sub-bacias do rio Paraibuna (Par1 a Par5), com situações intermediárias. As sub-bacias Par4 e Par5 são as mais críticas em termo de florestamento, após as sub-bacias do rio Cágado. São também as sub-bacias com maior proporção de área urbana densa, devido à área urbana de Juiz de Fora. A sub-bacia Pre1 se destaca por sua grande proporção de vegetação arbórea.

De maneira geral, a proporção de vegetação arbórea e a proporção de vegetação arbustiva parecem correlacionadas, já que a classe arbustiva é mais representada nas sub-bacias mais florestadas.

No nível da BHRP, os resultados são os seguintes: 1,6% de cobertura por água; 1,5 % como área urbana densa; e 17,5% como área rural. O solo exposto representa 1% da BHRP e a vegetação arbórea e arbustiva somam 43%, sobrando 35% para as pastagens/vegetação rasteira.

Essa proporção de vegetação rasteira, mesmo somado à classe área rural (total de 53%), parece pouco em vista das paisagens típicas da região. As áreas de silvicultura não foram possíveis de classificar, mas representam, provavelmente, uma parte significativa da vegetação arbórea. É importante lembrar que essa classe também contou com os afloramentos rochosos. A Tabela 17 evidencia também a superestimação dessa classe, sendo que para 45 fragmentos validados, foram encontrados 52 fragmentos classificados.

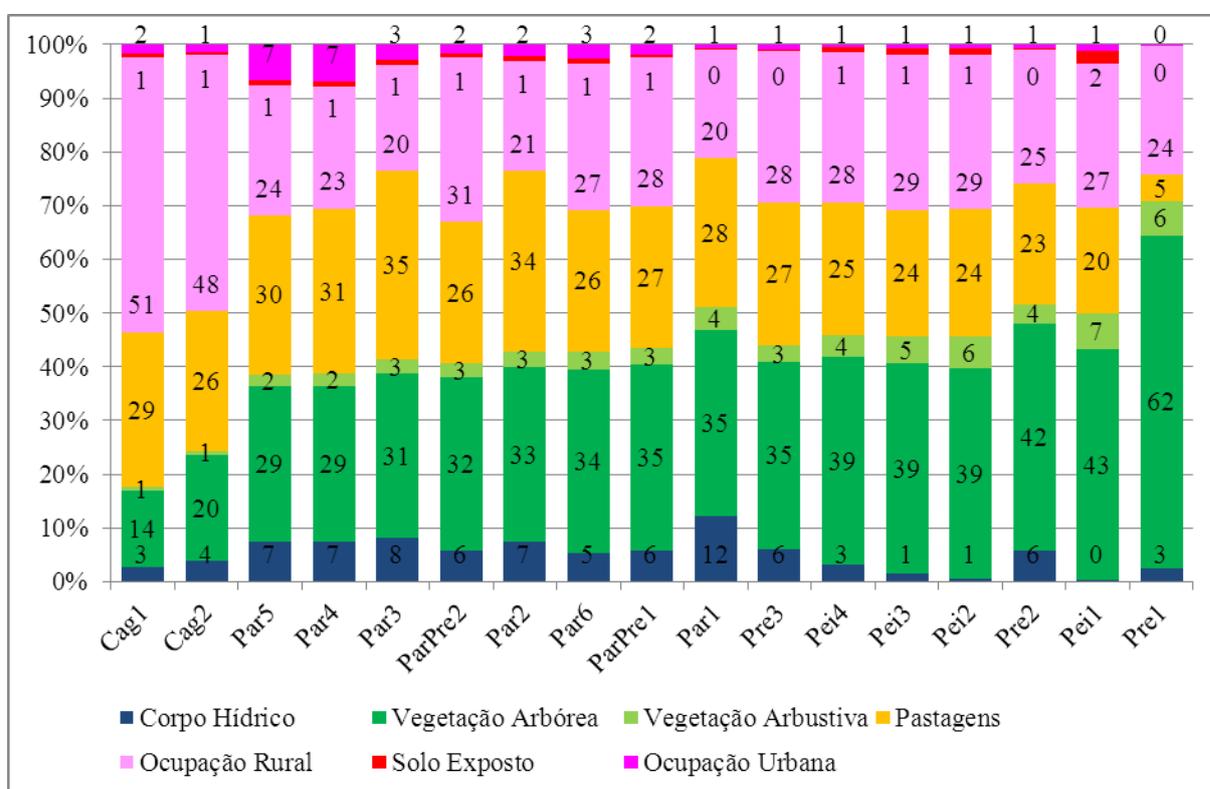


Figura 27: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 100 metros das sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.

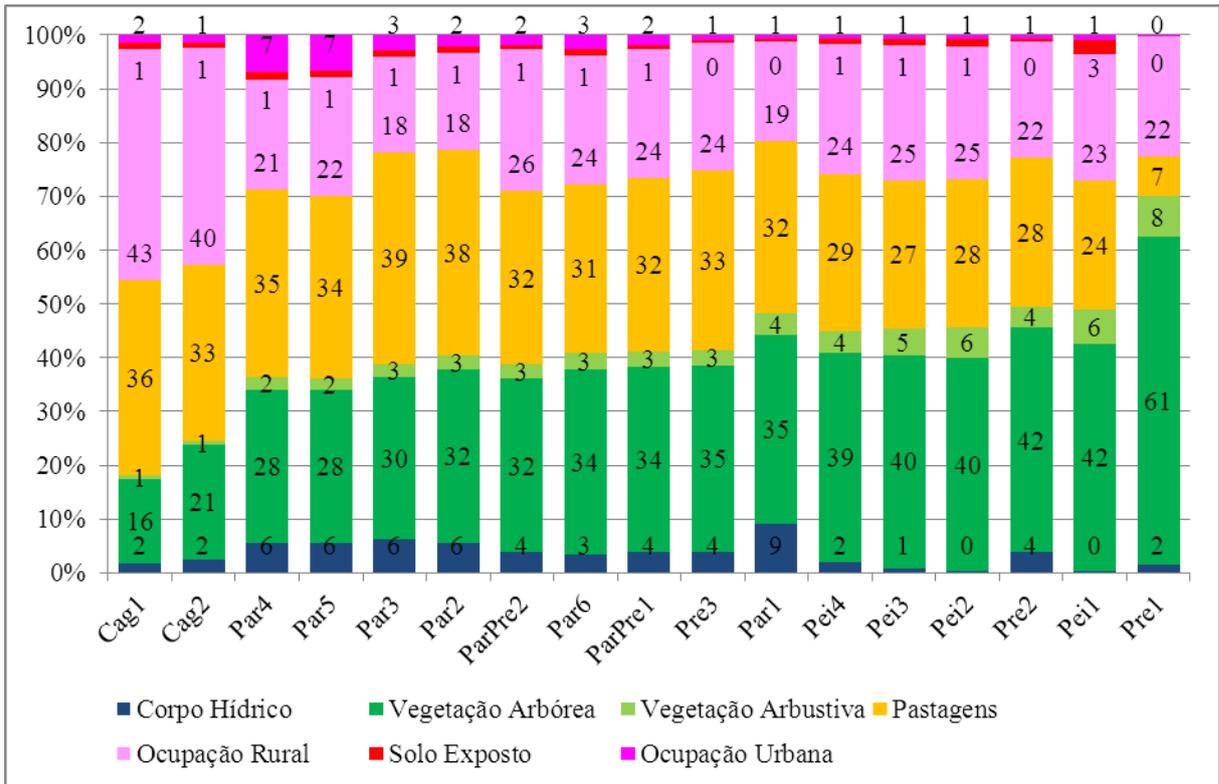


Figura 28: Uso e cobertura da terra numa faixa ripária de 200 metros das sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.

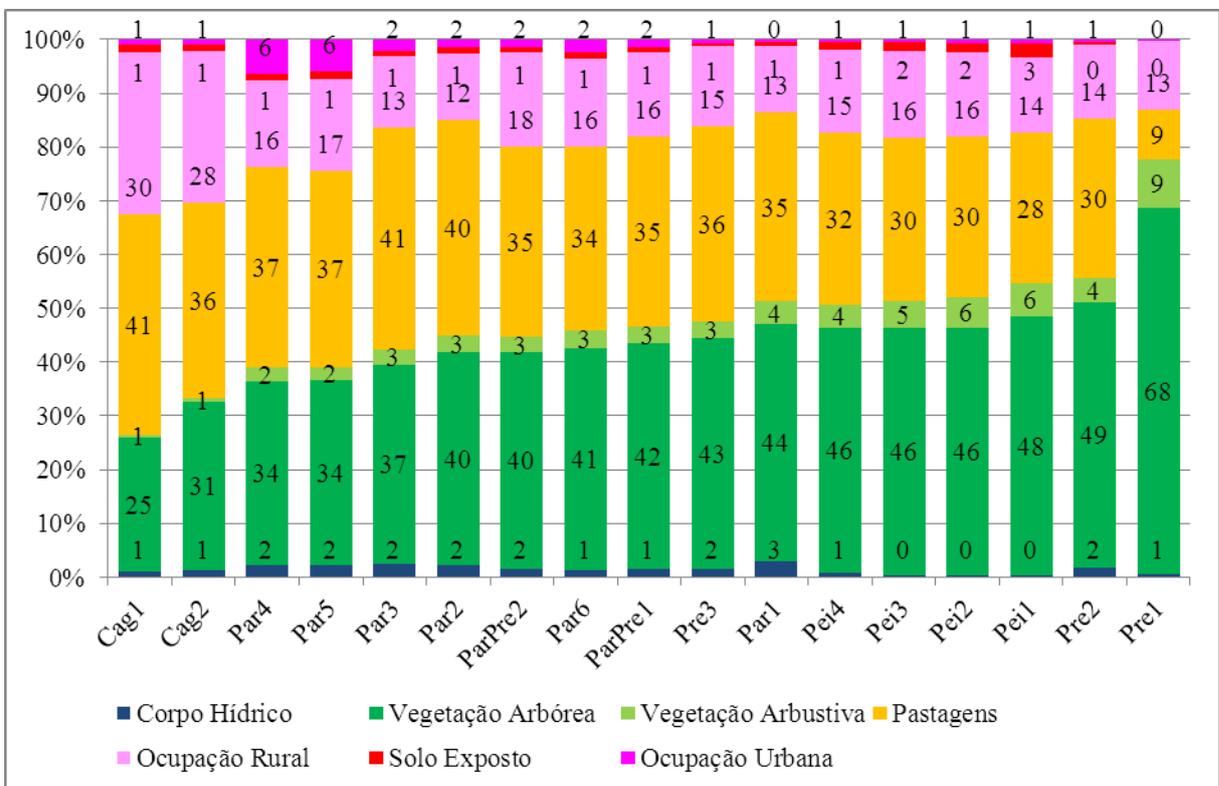


Figura 29: Uso e cobertura da terra nas sub-bacias da área de estudo segundo mapa elaborado pelo autor.

Na Tabela 19, observamos que as sub-bacias com menores proporções de solo exposto são as sub-bacias do rio Preto (Pre1, Pre2, Pre3) com proporções menores ou iguais à 0,5%. As sub-bacias do rio do Peixe são as que apresentam mais solo exposto a nível de bacia, destacando-se a sub-bacia Pei1 com 2,6% de solo exposto. A bacia do rio do Peixe a nível do ponto Pei4 apresenta 1,3% de solo exposto.

Tabela 19: Porcentagem de uso e cobertura para todas as classes definidas nas sub-bacias e suas faixas ripárias na BHRP segundo Mapa 16, realizado pelo autor.

		Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Pei1	Pei2	Pei3	Pei4	Pre1	Pre2	Pre3	Cag1	Cag2	P-P1	P-P2
Corpo hídrico	100m	12,1	7,3	8,1	7,5	7,4	5,2	0,3	0,5	1,5	3,1	2,5	5,8	6,0	2,6	3,8	5,7	5,8
	200m	9,1	5,6	6,2	5,6	5,5	3,5	0,2	0,3	0,9	1,9	1,6	3,8	3,9	1,8	2,4	3,8	3,8
	Bacia	3,0	2,2	2,5	2,3	2,2	1,3	0,2	0,2	0,4	0,7	0,6	1,7	1,6	1,0	1,2	1,5	1,6
Área urbana densa	100m	0,7	2,2	2,8	6,9	6,7	2,7	1,1	0,7	0,7	0,6	0,2	0,8	0,9	1,6	1,3	1,8	1,8
	200m	0,6	2,2	2,8	7,0	6,8	2,7	1,1	0,7	0,7	0,7	0,2	0,8	0,9	1,6	1,3	1,8	1,8
	Bacia	0,5	1,5	2,0	6,3	6,0	2,3	0,8	0,6	0,6	0,6	0,2	0,6	0,7	1,1	1,0	1,5	1,5
Área rural	100m	20,2	20,5	19,9	22,7	24,2	27,3	26,9	28,6	28,9	27,9	23,9	24,8	28,1	51,1	47,7	27,7	30,7
	200m	18,7	18,0	17,8	20,6	22,0	24,0	23,5	24,8	25,1	24,0	22,3	21,6	23,8	42,9	40,5	24,0	26,5
	Bacia	12,5	12,5	13,3	16,1	17,1	16,4	14,1	15,6	16,2	15,4	12,7	13,8	14,9	30,2	28,3	15,7	17,5
Solo exposto	100m	0,3	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8	2,4	1,3	1,2	0,9	0,1	0,3	0,3	0,9	0,7	0,6	0,6
	200m	0,5	1,1	1,1	1,2	1,2	1,0	2,6	1,5	1,3	1,1	0,2	0,5	0,5	1,2	1,0	0,7	0,8
	Bacia	0,7	1,1	1,0	1,3	1,3	1,3	2,6	1,7	1,5	1,3	0,1	0,5	0,5	1,3	1,1	0,9	0,9
Vegetação rasteira / Pastagens	100m	27,8	33,5	35,0	30,7	29,6	26,4	19,6	23,9	23,5	24,7	5,0	22,5	26,8	28,9	26,0	26,5	26,4
	200m	32,1	38,3	39,4	34,9	34,0	31,3	24,0	27,5	27,4	29,3	7,3	27,7	33,3	36,3	32,7	32,2	32,3
	Bacia	35,1	40,1	41,3	37,3	36,7	34,1	28,0	30,1	30,5	32,1	9,3	29,7	36,4	40,9	36,3	35,2	35,4
Vegetação arbustiva / arbórea esparsa	100m	4,2	2,9	2,7	2,3	2,2	3,3	6,6	5,8	5,1	4,2	6,3	3,6	2,9	0,7	0,7	3,1	2,6
	200m	3,9	2,7	2,5	2,2	2,1	3,1	6,3	5,5	4,9	4,1	7,6	3,9	2,9	0,7	0,6	3,0	2,6
	Bacia	4,3	3,0	2,8	2,4	2,3	3,4	6,1	5,5	4,9	4,2	9,1	4,5	3,1	0,6	0,6	3,2	2,8
Vegetação arbórea	100m	34,8	32,7	30,6	28,9	28,9	34,3	43,1	39,2	39,1	38,7	61,9	42,2	35,0	14,2	19,8	34,6	32,2
	200m	35,2	32,2	30,0	28,5	28,5	34,4	42,3	39,6	39,6	39,0	60,9	41,7	34,6	15,6	21,5	34,4	32,3
	Bacia	44,0	39,6	37,1	34,2	34,5	41,3	48,3	46,2	45,9	45,7	68,0	49,3	42,7	24,9	31,5	41,9	40,2

3.5. Empreendimentos de alto potencial de impacto na BHRP

Alguns empreendimentos de alto potencial poluidor foram mapeados (Mapa 18) nas imediações de Juiz de Fora, sem pretensão de exaustividade. As bacias delimitadas do ponto de monitoramento do IGAM, assim como os córregos e rios de ordem superior a 3 estão presentes no mapa para ajudar na localização.

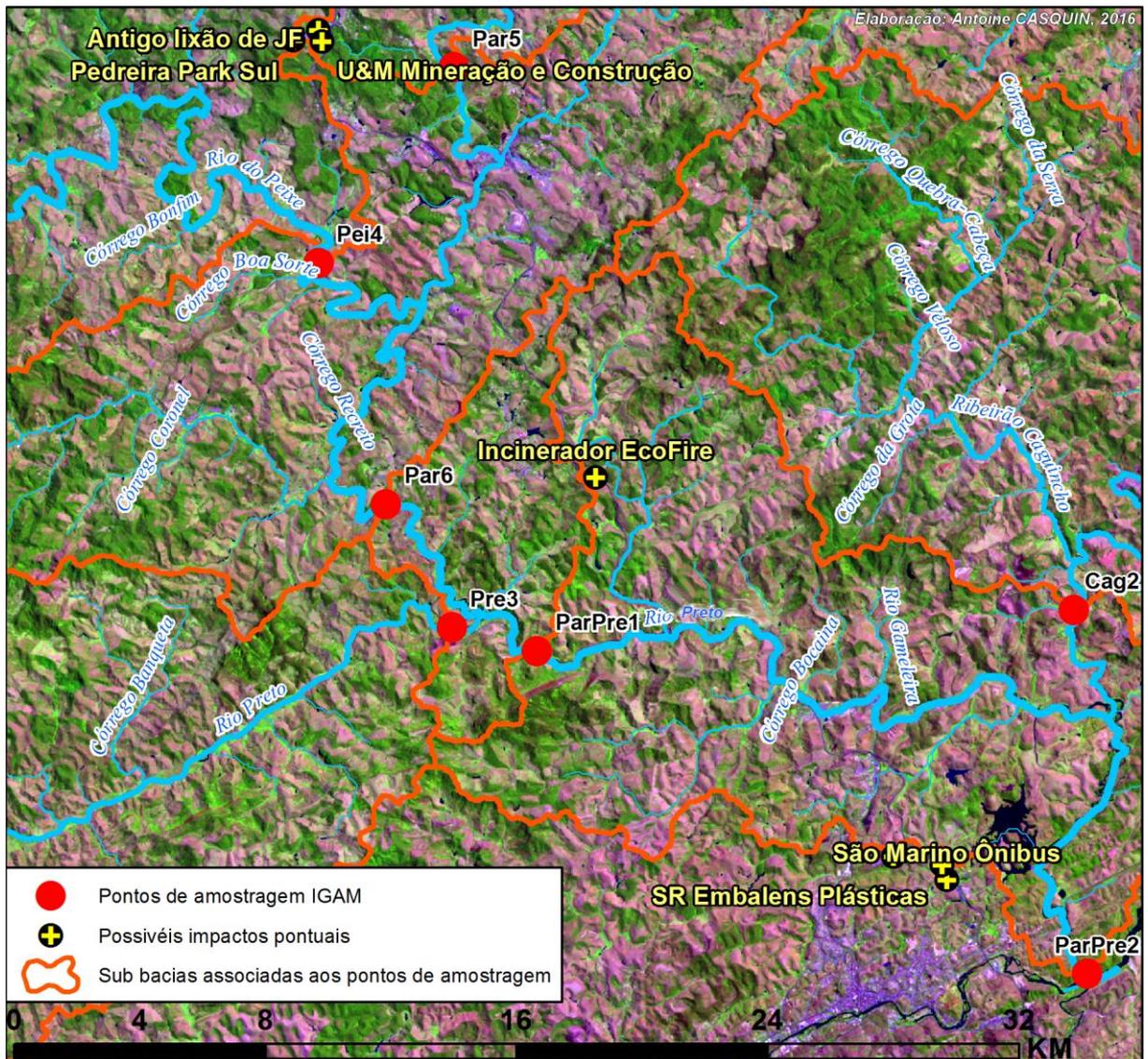
A maior parte das indústrias se localizam a montante do ponto Par2 e Par3, destacando as indústrias metalúrgicas Arcelor Mittal e Votorantim Metais Zinco (antiga Paraibuna de

Metais), com dois incidentes graves registrados nos anos 80 e lagoas de resíduos visíveis na imagem satélite. Entre o ponto Par2 e o ponto Par3 se destacam também um fábrica de armamento chamada IMBEL e um curtume desativado. As indústrias de curtume produzem um lodo (QUADRO et al., 2013) carregado em metais pesados e os minerais contendo o zinco contêm também cádmio como subproduto. Do ponto Par3 para o ponto Par4, encontra-se a maior parte da área urbana de Juiz de Fora e duas pedreiras também foram localizadas.

Alguns empreendimentos com alto potencial poluidor foram localizados entre os pontos Par4 e Par5, sendo uma fábrica de tecidos, uma fábrica de laticínios e uma empresa de fabricação de placas e letreiros (tinta contêm metais pesados) ao norte do ponto Par 5; um antigo lixão e uma oficina mecânica para máquinas de mineração à leste do ponto Par5, contribuindo para o mesmo.

O Park Sul (provavelmente a Mineração Pedra Sul) e o Aterro Salvaterra (no qual foram comprovados vazamentos frequentes de chorume) impactam com metais pesados os córregos Bocaina e Salvaterra, respectivamente (ROCHA & AZEVEDO, 2016). O último deságua no córrego São Mateus, tributário do rio do Peixe, impactando o ponto Pei4.

No sul da BHRP (Mapa 19), contribuindo somente para o ponto ParPre2, há um incinerador. Essas indústrias podem contaminar os arredores pelo ar (plumas de poluição), extrapolando a escala de bacia hidrográfica, principalmente metais pesados (LAWSON & MASON, 2001). Outras indústrias perto da foz no rio Paraíba do Sul não fazem parte da BHRP.



Mapa 19: Um incinerador se localiza no baixo curso da BHRP

Capítulo 4: Qualidade da água na BHRP: evolução espacial da represa de Chapéu d’Uvas até a confluência com o rio Paraíba do Sul

4.1. Metodologia

Os dados de monitoramento de qualidade da água para as bacias hidrográficas mineiras estão disponíveis no site do IGAM, no portal InfoHidro. Nos anos de 2013 e 2014, a água foi amostrada e analisada em 17 pontos que tiveram suas respectivas bacias delimitadas conforme visto anteriormente.

Cada ano teve duas campanhas de coleta no período chuvoso: 8/03/2013 a 15/03/2013; 22/11/2013 a 28/11/2013; 14/03/2014 a 20/03/2014; 21/11/2014 a 27/11/2014. E duas campanhas de coleta na época da seca: 24/05/2013 a 30/05/2013; 26/08/2013 a 29/08/2013; 23/05/2014 a 29/05/2014; e 25/08/2014 a 28/09/2014.

Trinta e nove parâmetros de qualidade da água foram analisados, ora quatro vezes por ano (Cloreto total, Clorofila-a, Coliformes totais, Condutividade elétrica in loco, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Escherichia coli, Feoftina-a, Fósforo total, Nitrato, Nitrogênio amoniacal total, Oxigênio dissolvido, pH in loco, Sólidos dissolvidos totais, Sólidos em suspensão totais, Sólidos totais, Temperatura da água e Turbidez), ora no mínimo duas vezes por ano. Os parâmetros que não foram analisados no mínimo duas vezes na seca e duas vezes na chuva durante o período de estudo não foram levados em consideração para essa Dissertação.

Os dados de qualidade da água foram importados no programa MATLAB R2013a para cálculo das estatísticas descritivas, interpolação dos dados e realização de gráficos. Para cada parâmetro calculou-se o valor mínimo, médio e máximo durante o período de estudo para os pontos Par1, Par2, Par3, Par4, Par5 que correspondem às cinco estações do Paraibuna, o ponto Par6, no rio do Peixe a jusante do encontro entre os rios Paraibuna e Peixe (mantido com essa abreviatura para evitar retrabalhos), o ponto ParPre1 depois da confluência com o rio Preto e o ponto ParPre2 próximo da foz no rio Paraíba do Sul, após receber as águas do rio Cágado. Na representação gráfica, também consta os valores dos parâmetros de qualidade da água dos principais afluentes para a estação próxima à confluência com o Eixo Paraibuna-Peixe-Preto – Eixo PPP.

No Eixo x, os pontos são colocados em função da distância à nascente do rio Paraibuna seguindo o rio conforme realizado no Capítulo anterior. Na escala da área de estudo e considerando os volumes de água, a evolução da qualidade da água ao longo do Paraibuna, Peixe e finalmente o Preto (rio principal da Bacia) pode ser considerada como contínua. Com

o objetivo de representar essa continuidade, os valores obtidos nos pontos de monitoramento foram interpolados ao longo do Eixo PPP estudado.

As linhas cinza pontilhadas marcam os extremos observados e a linha central contínua representa o valor médio observado. O método de interpolação escolhido foi o método *Monotone Piecewise Cubic Interpolation*, podendo ser traduzido por Interpolação Monótona Cúbica por Parte. Por ser uma interpolação monótona, ela não cria oscilações espúrias que existem em outros métodos de interpolação cúbica (FRITSCH & CARLSON, 1980), como o método dos *Splines*. Esse método preserva a “forma” dos dados respeitando a monotonia deles. Isso significa que aonde os dados evoluem de forma monótona, a curva interpolada acompanha também, e que os pontos extremos (das campanhas) são também os pontos extremos das curvas.

Linhas verticais pontilhadas marcam os principais afluentes do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto e são colocadas em função da distância entre a confluência e a nascente do rio Paraibuna. Nessas linhas são marcados os valores mínimo (“x” vermelho), média (“□” vermelho) e máximo (“x” vermelho) dos parâmetros de qualidade da água nas estações mais próximas às confluências (Pei4, Pre3 e Cag2).

Uma linha vermelha horizontal contínua representa o valor enquadrado do parâmetro (quando ele existe) para corpos d’água lóticos de classe 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005. A Figura 30 é um exemplo dos gráficos realizados para esse capítulo.

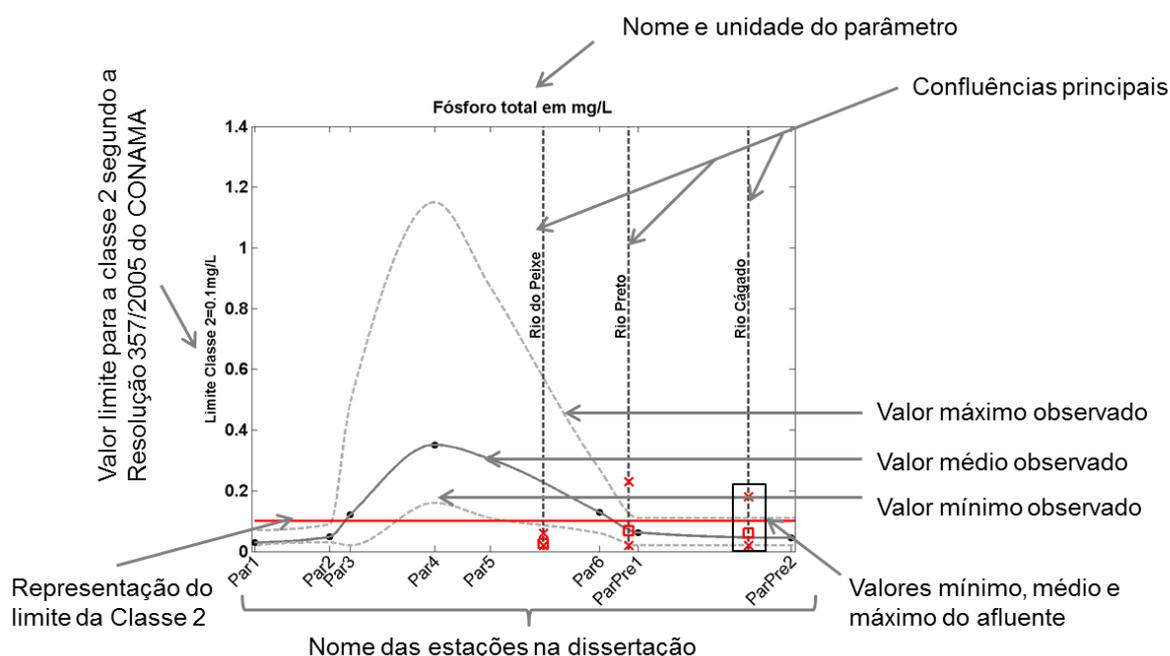


Figura 30: Gráficos realizados para a avaliação da evolução espacial dos parâmetros de qualidade da água ao longo do Eixo Paraibuna-Peixe-Preto (PPP).

4.2. Uso e cobertura da terra ao longo do Eixo PPP

Um gráfico análogo (Figura 31) foi confeccionado para representar a evolução do uso e cobertura da terra do ponto Par1 (jusante chapéu d'Uvas) para o ponto ParPre2 (foz no rio Paraíba do Sul). Os “x” marcam o uso e cobertura para as bacias do rio Preto, do rio do Peixe e do rio Cágado antes da confluência com o Eixo PPP. A escala indicada no Eixo-x superior é a distância para a nascente do rio Paraíba seguindo o Eixo Paraíba-Peixe-Preto (Eixo PPP).

Observamos que a vegetação arbórea e a vegetação rasteira evoluem em sentido contrário, com as áreas de pastagens superando a vegetação arbórea. Até o ponto Par3 a porcentagem de área urbana é baixa a nível de bacia. Porém, foi visto anteriormente que havia indústrias entre o ponto Par1 e o ponto Par3. Os dois pontos com as maiores densidades urbanas são Par4 e Par5.

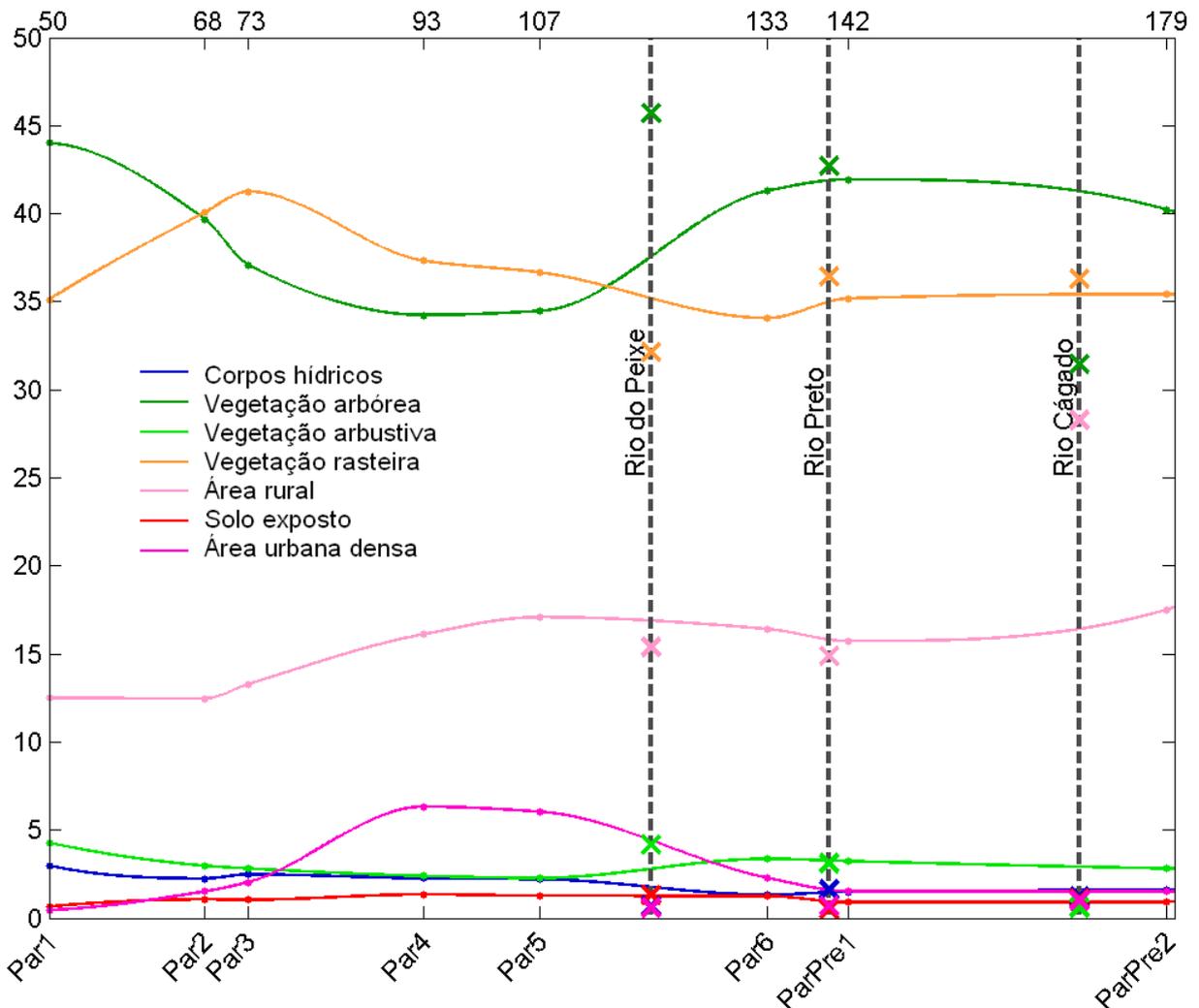


Figura 31: Evolução do uso e cobertura da terra ao longo do Eixo PPP a nível de bacia segundo mapa realizado para esse estudo.

As bacias do rio do Peixe e do rio Preto possuem maior porcentagem de cobertura vegetal arbórea antes das suas confluências com o Eixo PPP, o rio Cágado menos. Observa-se uma tendência da porcentagem da área rural aumentar de montante para jusante da BHRP. As classes “Corpos Hídricos”, “Vegetação arbustiva” e “Solo Exposto” são poucas expressivas.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Variáveis Físicas

As figuras 32 e 33 apresentam a evolução das variáveis físicas ao longo do Eixo PPP. O parâmetro Sólidos em Suspensão Totais (SST) ultrapassou pontualmente o limite de 100 mg.L⁻¹ encontrado na Deliberação Normativa COPAM/CERH 01/2008 (MINAS GERAIS, 2008) em quase todos os pontos do Eixo PPP e em dois dos três afluentes principais (rio Preto e rio Cágado). A concentração média de SST, porém, nunca ultrapassou esse limite, aproximando-se dela no ponto Par5. As concentrações máximas se elevam rapidamente do ponto Par2 ao ponto Par3, ficam estável até o ponto Par4, antes de se elevar bruscamente até um máximo absoluto no Eixo PPP de aproximadamente 550 mg.L⁻¹ para o ponto Par5. Esse perfil destaca uma influência maior das indústrias do que dos efluentes domésticos nesse parâmetro. Os SST diminuem muito entre o ponto Par5 e o ponto Par6 e dois fenômenos o explicam: a sedimentação natural reforçada pelos barramentos ao longo do Eixo e a diluição pelas águas do rio do Peixe, apresentando concentrações muito baixas de SST. A concentração de SST média e máxima aumenta de novo após a confluência com o rio Preto, apresentando um máximo pontual além de 400 mg.L⁻¹ e uma média mais elevada, sugerindo processos de erosão das margens (ALLAN, 2004), fenômeno observável também na foz do rio Cágado. Esses altos valores encontrados podem ser devidos à mineração de areia no leito desses rios também. O parâmetro SST não exibe nenhum valor superior a 100 mg.L⁻¹ na foz no rio Paraíba do Sul. É interessante notar que o valor mínimo de SST para todos os pontos do Eixo PPP e afluentes é inferior a 20 mg.L⁻¹, indicando que há períodos nos quais o rio Preto e seus afluentes não carregam quase nenhum sedimento.

A concentração de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) nunca ultrapassou o limite da classe 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 com um máximo de 135 mg.L⁻¹ no ponto Par3. No Eixo PPP, tanto os valores máximos como os médios de SDT aumentam rapidamente do ponto Par2 para o ponto Par3 e se estabilizam até o ponto Par5, para em seguida diminuir

até a foz no rio Paraíba do Sul, graças à diluição dos seus afluentes, com baixas concentrações média de SDT.

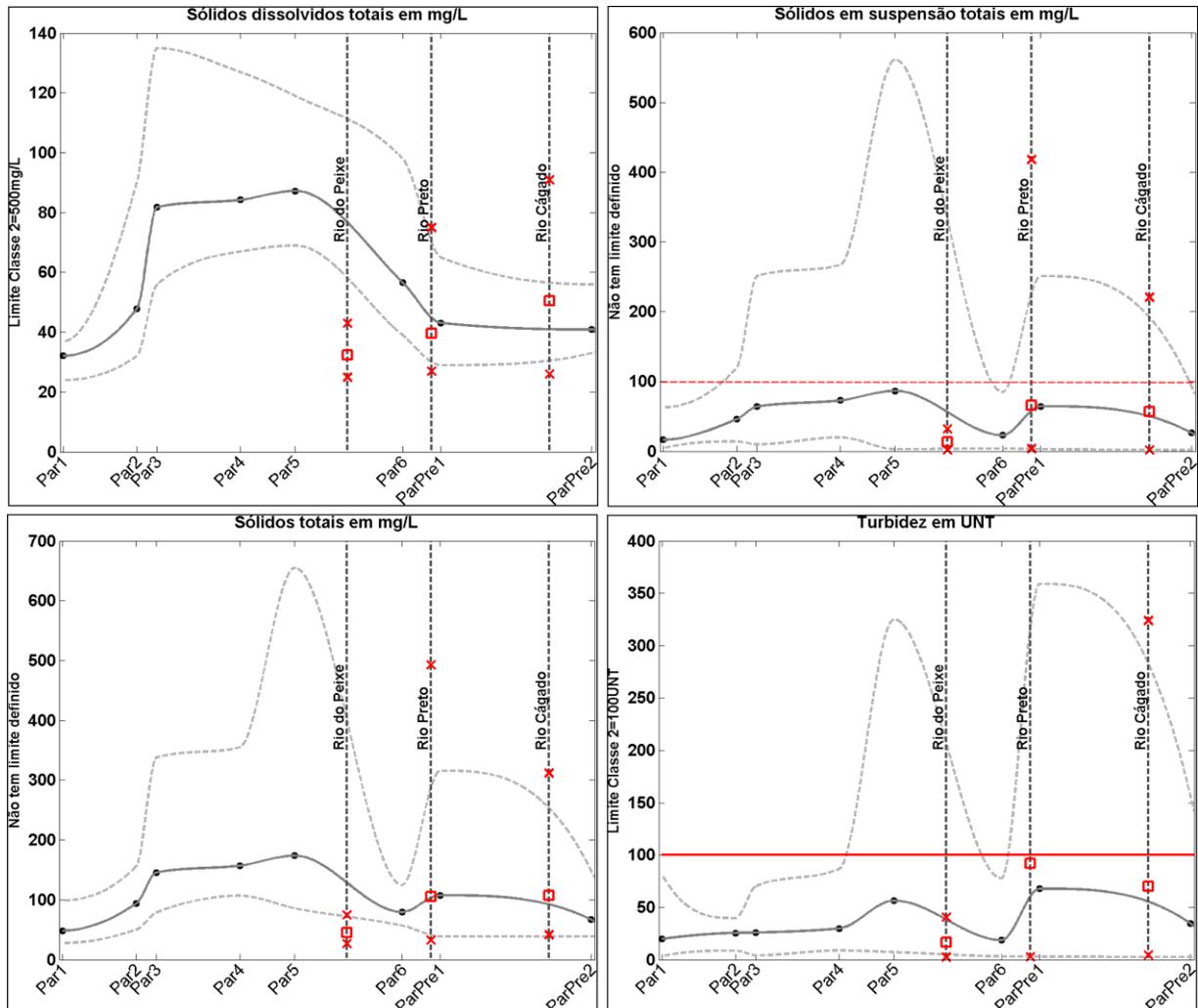


Figura 32: Evolução espacial das variáveis físicas referentes aos sólidos e turbidez ao longo do Eixo PPP.

A análise dos sólidos trouxe informações interessantes, pois os perfis de sólidos dissolvidos totais (SDT) e de sólidos em suspensão totais (SST) não coincidem, apontando para causas diferentes levando às alterações dos parâmetros ao longo do Eixo PPP. São os SST que mais definem a evolução espacial e temporal do parâmetro ST por serem em média mais altos do que os SDT. O parâmetro SST definiu em grande parte também a evolução da turbidez ao longo do Eixo PPP. O limite de turbidez para águas de Classe 2 é de 100 UNT (40 UNT para a Classe 1), observando-se na Figura 32, que esse valor não é ultrapassado em média, porém, os valores máximos observados Par5 e ParPre1 são superiores à 300 UNT. A turbidez baixa do rio do Peixe na sua confluência com o rio Paraíba do Sul permite uma diminuição da turbidez no ponto Par6, mas o rio Preto no ponto Pre3 apresenta altas turbidez média e máxima (550 UNT)

elevando a turbidez no ponto ParPre1. O rio Cágado na sua foz também apresentou turbidez alta, com valores máximos acima do limite da Classe 2. A variação espacial do parâmetro turbidez é semelhante a soma do parâmetro SST (Figura 32) e do parâmetro Cor (Figura 33).

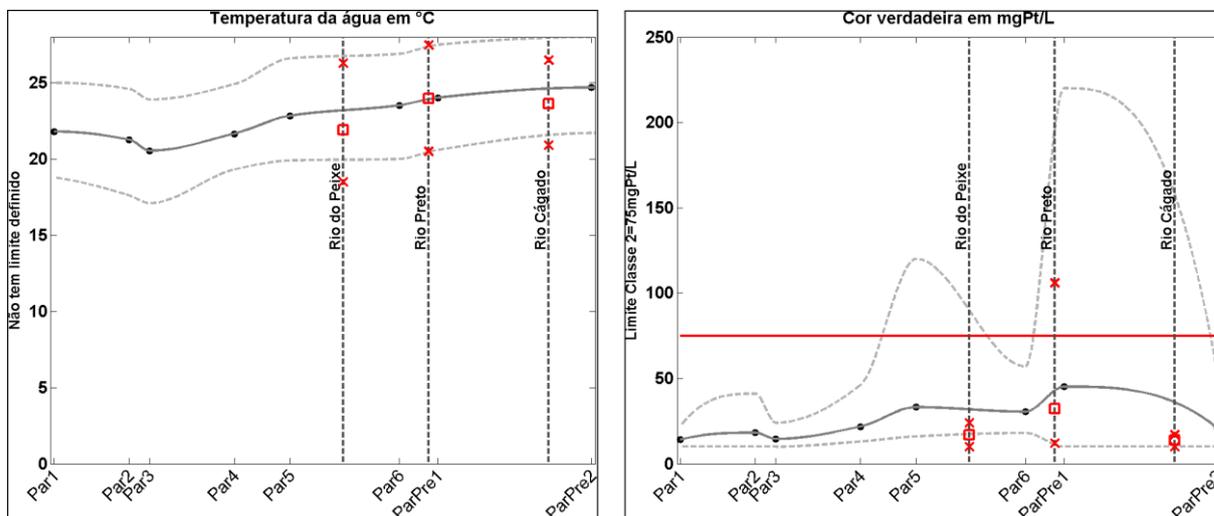


Figura 33: Evolução espacial das variáveis físicas temperatura e cor verdadeiras ao longo do Eixo PPP.

O parâmetro Cor também ultrapassou pontualmente o limite da classe 2 nos pontos Par5, Pre3 e ParPre1 com dois máximos absolutos em Par5 e ParPre1. É possível ver que a alteração do parâmetro Cor no ponto ParPre1 não se origina somente dos sólidos em suspensão. O “salto” dado pelo parâmetro no ponto ParPre1 foi também encontrado para os parâmetros referentes aos metais CuDiss, PbTot (Figura 36), MnTot (Figura 37) e também as variáveis biológicas ColiTot (Figura 42) e CIA (Figura 43). Os parâmetros CIA e MnTot influem diretamente sobre a Cor da água. Esse conjunto de resultados demonstra que a qualidade da água vindo de uma bacia essencialmente rural e pouco povoada, com exceção da cidade de Valença, é seriamente comprometida por um fator (ou vários fatores) não identificado (s) até agora nesse trabalho. Janelas de pesquisa se abrem!

A temperatura da água aumenta ao longo do Eixo PPP do ponto Par3 até a foz no rio Paraíba do Sul, possivelmente devido à diminuição da altitude média e da ausência de mata ciliar na maior parte dos cursos d’água da bacia. Nota-se que o rio do Peixe têm menor temperatura média do que o rio Paraibuna antes da confluência, apesar da sua bacia hidrográfica se encontrar numa altitude média similar à do rio Paraibana (880m e 804m para os pontos Par5 e Pei4). Uma explicação pode ser o maior florestamento (ALLAN, 2004) da sub-bacia do ponto Pei4: 45,7% de vegetação arbórea ou natural contra 34,5% na bacia do rio Paraibuna na altura do ponto Par5, segundo o mapa realizado para esse estudo.

4.3.2. Variáveis Químicas

As variações espaciais das três variáveis ligadas ao teor de oxigênio na água foram agrupadas na Figura 34. A DBO e a DQO apresentam um perfil similar, com máximos absolutos e máximos médios no ponto Par4, imediatamente a jusante da maior parte da área urbana densamente ocupada de Juiz de Fora. No caso da DBO, o valor máximo atingindo é de 76 mg.L^{-1} , o que é mais de quinze vezes superior ao valor indicado para águas de Classe 2. O valor da DQO nesse mesmo ponto atinge 160 mg.L^{-1} . O perfil da DBO evidencia como responsável o esgoto doméstico, lançado *in natura* no rio Paraibuna pela maioria dos domicílios de Juiz de Fora. É interessante notar que a autodepuração do curso d'água é muito boa entre o ponto Par4 e Par5, fenômeno também observado no Par6 quando as águas do rio do Peixe permitem abaixar a DBO do curso d'água abaixo do limite da classe 2. No que se refere a DBO, o rio Paraibuna não respeita a legislação entre os pontos Par2 e Par5. Os rios do Peixe, Preto e Cágado próximo à foz tem valores de DBO sempre a baixo do limite de detecção, que é de 2 mg.L^{-1} . O perfil da DQO já é um pouco diferente, sendo a média máxima no ponto Par4 (como a DBO), mas a média apresenta menos variações ao longo do Eixo PPP, elevando-se para valores próximos ao máximo já no Ponto Par2, a jusante da usina da Arcelor Mittal e da sede do município de Ewbank da Câmara. O rio Preto e o rio Cágado apresentam valores de DQO nas foz parecidas as encontradas ao longo do Eixo PPP, não influenciando nem por diluição nem por adição de DQO. O rio do Peixe apresenta concentrações mais baixas, e pode explicar a baixa observada no Eixo PPP entre o ponto Par5 e o ponto Par6. A comparação dos perfis de DBO e de DQO é coerente com a teoria, já que a matéria levada em consideração para a análise da DQO é mais difícil de decompor, explicando uma maior persistência ao longo do Eixo PPP.

Considerando águas de classe 2 a concentração mínima de oxigênio dissolvido a ser mantida no curso d'água é de 5 mg.L^{-1} . Nos pontos Par3 e Par4, dentro do perímetro urbano de Juiz de Fora, foram observados baixos teores de oxigênio. Fica claro que o ponto Par4 é o pior ponto do Eixo PPP no que se refere a oxigenação da água. O teor médio é próximo a 2 mg.L^{-1} e o mínimo é de menos de 1 mg.L^{-1} , caracterizando um ambiente aquático muito degradado, apresentando condições anaeróbias, quase anóxicas. O ponto Par3 apresenta também regularmente teores baixos de oxigênio. Essas condições implicam mudanças radicais nas comunidades bacterianas e nas reações químicas desenvolvida por elas. A respiração celular em condições anaeróbias libera compostos de enxofre, tendo um mau cheiro característico. Há também consequências para a ictiofauna, com dificuldade para sobreviver, mesmo para espécies resistentes, com esse teor muito baixo de oxigênio. As proximidades dos pontos Par3

e Par4 podem agir então como uma sorte de barragem para os peixes, limitando as trocas entre o alto e o baixo Paraibuna.

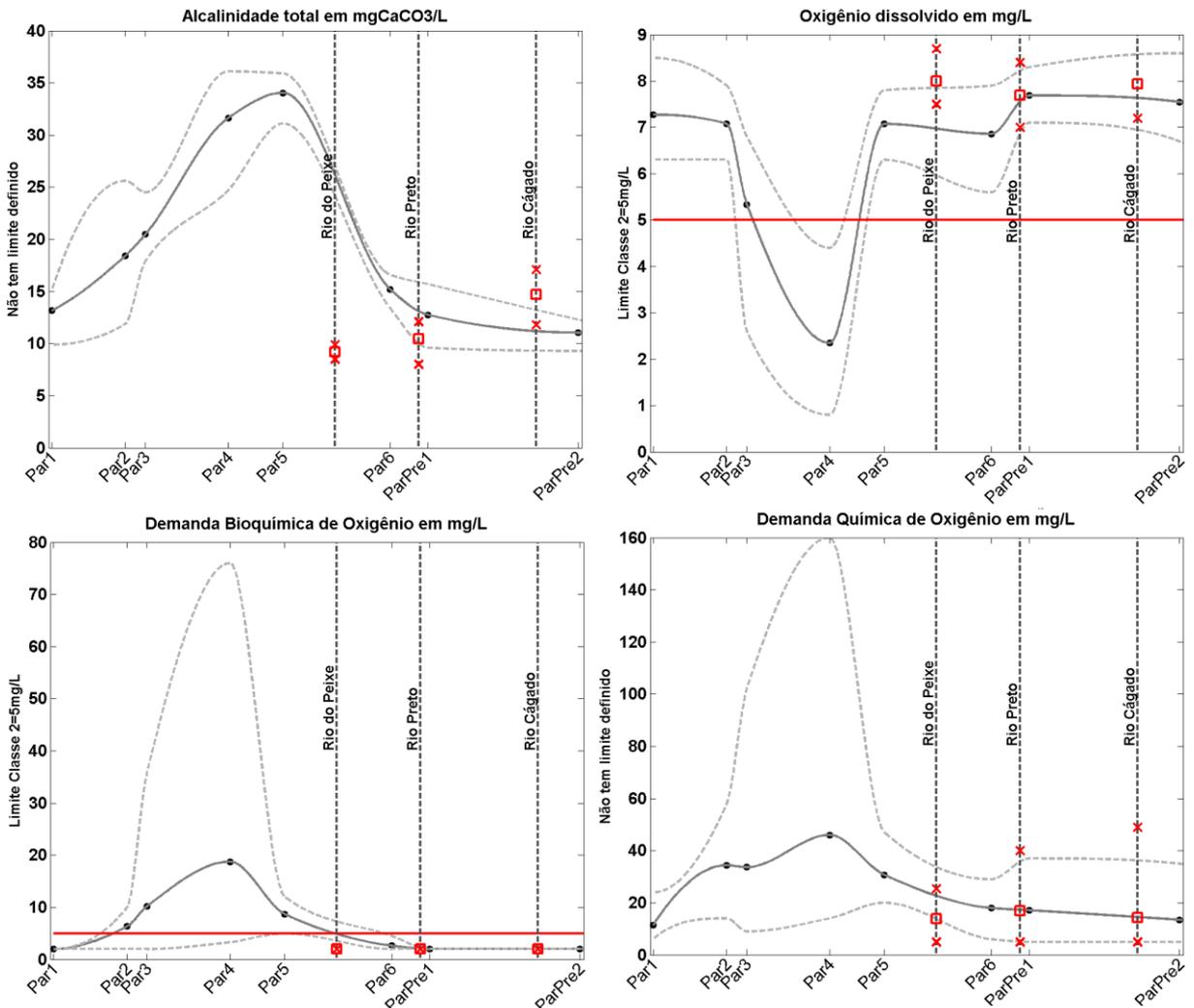


Figura 34: Evolução espacial de variáveis químicas de qualidade da água ao longo do Eixo PPP.

Na Figura 34, vemos que ao longo do Eixo PPP a alcalinidade total (AlcaTot) nunca ultrapassa $40 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. Lembrando que a alcalinidade natural da água pode chegar até $500 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, podemos concluir que as águas do Eixo PPP se caracterizam por suas baixas alcalinidades, sendo sensíveis a acidificação. O gráfico desse parâmetro traz duas informações interessantes: a alcalinidade tem uma variação temporal baixa, sendo o mínimo, a média e o máximo próximos; e os valores máximos são atingidos nos pontos correspondentes as maiores densidades de população, evidenciando que a alcalinidade da água depende em primeiro lugar de ocupação antrópica e que as condições naturais das sub-bacias têm pouca influência nesse parâmetro. No ponto Par2 observa-se uma variabilidade temporal maior do que nos demais

pontos tendo como possível fonte os efluentes da usina da Arcelor Mittal ou o escoamento superficial nessa área industrial.

A dureza total da água depende principalmente dos compostos do cálcio e do magnésio. O parâmetro Dureza Total (DurTot) é baixo nas fozes dos rios Preto, Peixe e Cágado, considerando o Eixo PPP. Esse parâmetro atinge os valores máximos entre os pontos Par3 e Par5, já aumentando de maneira abrupta entre os pontos Par1 e Par2. Essa evolução espacial sugere duas fontes para explicar a dureza da água: os efluentes industriais e os efluentes domésticos. É importante notar que não houve problema devido à dureza da água no Eixo PPP, sendo os valores medidos bem abaixo de 500 mg.L^{-1} , valor possivelmente natural ainda. A dureza da água ao longo do Eixo PPP classifica a água como sendo muito mole.

Esses valores elevados no trecho do Eixo PPP indo do ponto Par2 para o ponto Par5 são também observados no caso da condutividade elétrica. Não há limite definido na legislação brasileira, porém, a CETESB considera que águas com uma condutividade acima de $100 \mu\text{S.cm}^{-1}$ são suspeitas de serem poluídas. Esse limite foi representado com uma linha vermelha pontilhada no gráfico e foi ultrapassado considerando a média do ponto Par3 até o ponto Par5. A condutividade máxima atinge um máximo absoluto de $225 \mu\text{S.cm}^{-1}$ no ponto Par3 e os máximos ficam em torno de $200 \mu\text{S.cm}^{-1}$ até o ponto Par6. Ao contrário da recuperação rápida para os parâmetros relativos ao oxigênio, observa-se que no caso da condutividade é preciso a diluição progressiva pelos pequenos e grandes afluentes para a água atingir um patamar de condutividade mais próximo ao natural. O rio do Peixe tem a menor condutividade média e essa ficou muito estável durante todas as coletas. O rio Cágado e o rio Preto também têm condutividade baixa, porém observou-se uma maior variabilidade ao longo do período de coleta.

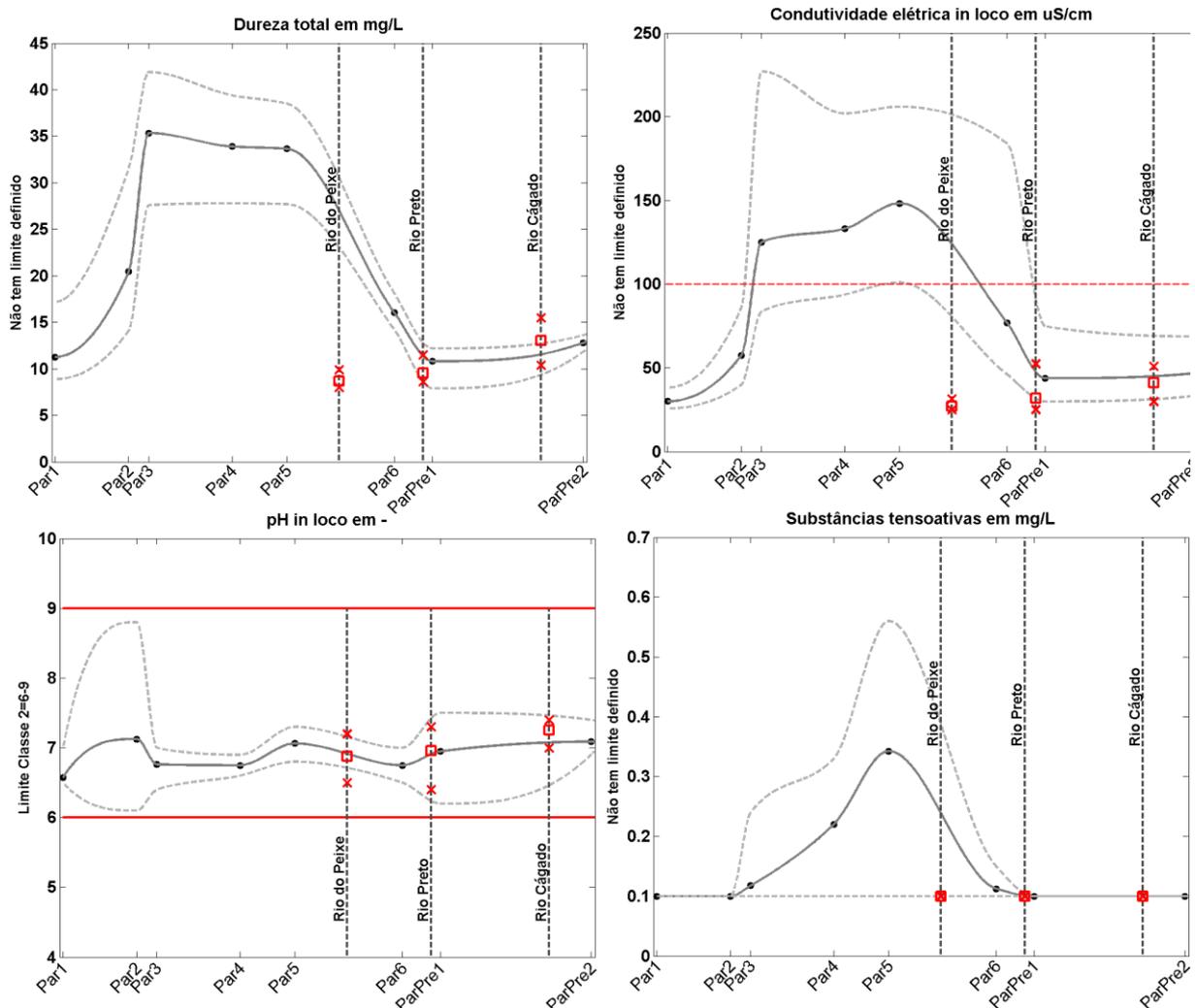


Figura 35: Evolução espacial de variáveis químicas de qualidade da água ao longo do Eixo PPP.

No que se refere aos surfactantes ou substâncias tensoativas (SubTens) observou-se que não foram detectados ($< 0.1 \text{ mg.L}^{-1}$) nos rios Peixe, Preto e Cágado ao encontrar com o Eixo PPP, tendo vazão suficiente para diluição de tais produtos. A maior concentração máxima e a maior concentração média acontecem no ponto Par5, a jusante de Juiz de Fora. Pode-se notar a diferença com o perfil de DBO onde a maior concentração acontece no ponto Par4. A causa da presença dessas substâncias é o esgoto doméstico. Pode-se observar a dificuldade de dissolução e eliminação de tais produtos, detectados até o ponto Par6 (após o encontro do rio do Peixe com Paraíba), tendo o rio do Peixe uma bacia duas vezes maior que o rio Paraíba.

O pH é um parâmetro fundamental de qualidade da água. Ele influi sobre a concentração de muitos elementos, sendo por isso um parâmetro relevante para o ecossistema em geral. O valor do pH é a maior parte do tempo muito próximo a 7, a neutralidade. Nota-se que ele tende mais à acidez no ponto Par1, devido ao solo da região, o latossolo vermelho amarelo predominante a montante desse ponto, sendo em geral, um solo ácido. Observa-se uma

estabilidade temporal e espacial, o pH variando pouco de um ponto para outro e de uma coleta para outra. O único ponto onde se observou uma grande variabilidade foi o ponto Par2, onde o pH varia de 6,2 até 8,7. A razão dessa variação pode ser efluentes de indústrias localizadas entre o ponto Par2 e o ponto Par3. Apesar dessa variação de quase 3 unidades de pH, o que representa um fator 1000 na variação da contração do íon H^+ , o pH continua nos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005.

4.3.2.1. Metais Pesados e arsênio

Os metais pesados analisados foram o cádmio (CdTot), o chumbo (PbTot) e o cobre (CuDiss). Por ser tóxico mesmo em concentrações muito baixas, e as vezes considerado como um metal, o arsênio (AsTot) foi analisado junto aos metais pesados. Os seus limites respectivos segundo a legislação brasileira para águas de classe 2 variam entre $1 \mu g.L^{-1}$ e $10 \mu g.L^{-1}$. Esses limites baixos se justificam pela grande toxicidade desses metais para o ecossistema e para o ser humano, e por serem, em geral, elementos bioacumulativos. No caso do chumbo (Figura 36), é possível ver que o limite de detecção do método utilizado é de $5 \mu g.L^{-1}$ o que representa a metade da concentração limite para águas de classe 2. Dos quatro parâmetros analisados nessa seção, é notável que três ultrapassaram o valor enquadrado pela legislação ao longo do Eixo PPP.

A concentração média de cádmio ultrapassou o limite de $1 \mu g.L^{-1}$ em dois pontos, sendo a jusante do Distrito Industrial de Juiz de Fora (Par3) e a jusante de Juiz de Fora e do seu antigo aterro sanitário (Par5). O maior pico ultrapassa mais de 15 vezes o valor limite segundo a legislação. Podemos observar que o cádmio ao longo do Eixo PPP não foi um problema nem nas sub-bacias urbanas nem nas sub-bacias rurais. Em 1980 e 1982 ocorreram dois acidentes na Paraibuna de Metais (COELHO, 2012 p.147-150), hoje conhecida como Votorantim Metais Zinco. Detritos de mineração foram rejeitados num tributário do rio Paraibuna entre os pontos Par2 e Par3. É possível que essas concentrações estejam ligadas ao revolvimento de sedimentos, ou pode-se pensar em falhas na impermeabilização das lagoas de rejeitos. Outra indústria suspeita de poder lançar efluentes contendo cádmio é o curtume. Entre o ponto Par4 e Par5 localiza-se o antigo aterro sanitário de Juiz de Fora e também várias indústrias de tingimento e curtumes susceptíveis de produzir um efluente com altas concentrações de cádmio.

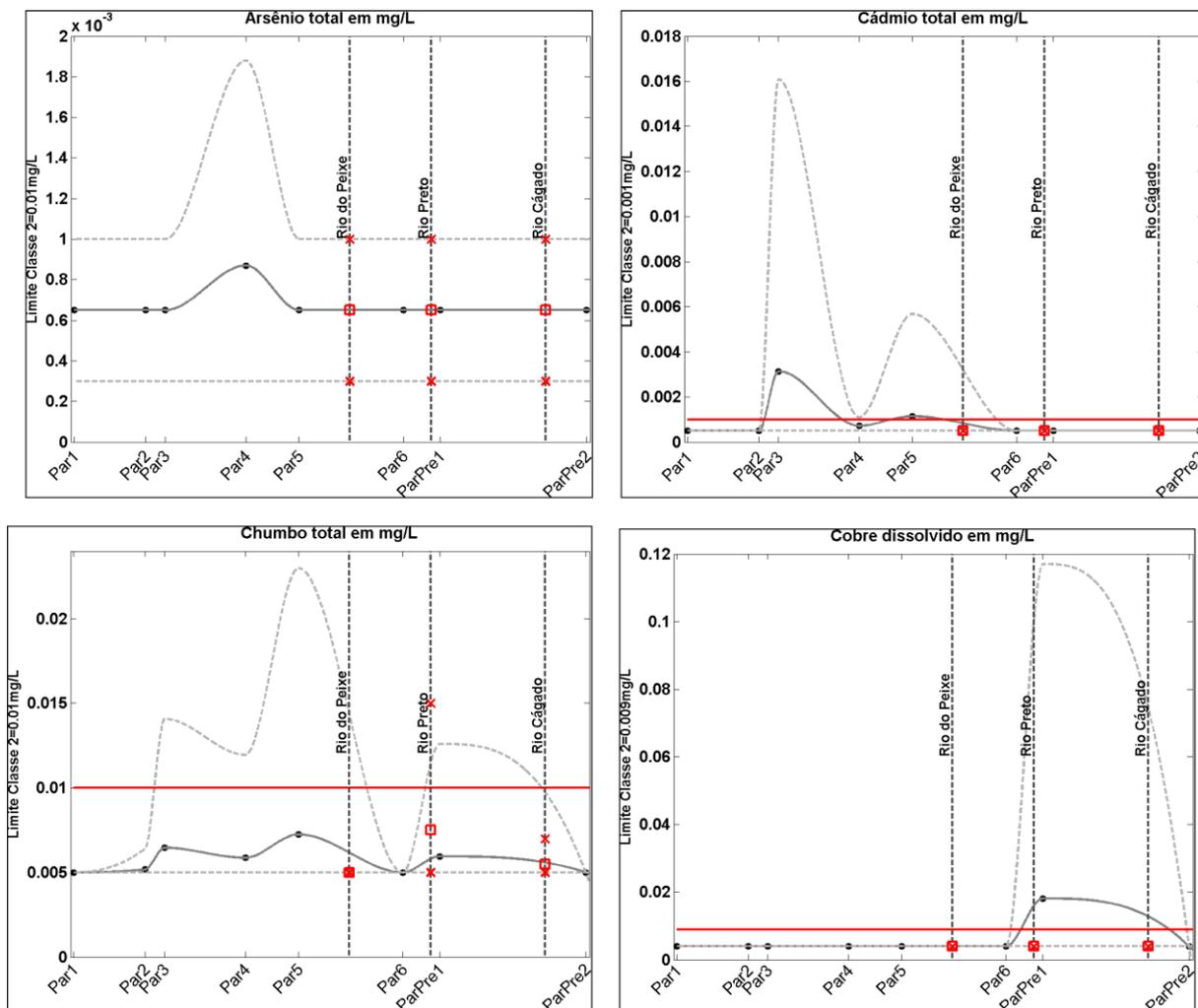


Figura 36: Evolução espacial dos metais pesados e do parâmetro arsênio total ao longo do Eixo PPP.

A problemática do chumbo é diferente, sendo encontrado em quase todos os pontos da BHRP. Ao longo do Paraibuna, os picos de concentração correspondem, em parte, aos picos de concentração do cdmiu. A concentração média durante o período de estudo não ultrapassou o limite da Classe 2, porém observou-se ultrapassagens nos pontos Pa3, Par4, Par5 e nos pontos Pre3 (rio Preto antes da confluência com o rio Peixe-Paraibuna) e ParPre1 (rio Preto depois da confluência com o Rio Peixe-Paraibuna). A maior concentração observada foi no ponto Par5, sendo duas vezes superior ao valor na legislação. O chumbo também foi detectado no rio Cágado, porém em concentrações inferiores ao tolerado pela legislação e sempre ficou abaixo do limite de detecção no rio do Peixe. Essa evolução espacial ao longo do Eixo PPP demonstrou que existem várias fontes a serem consideradas para esse metal. As concentrações no rio Preto e no rio Cágado evidenciam que podem existir fontes difusas para esse elemento. No próximo capítulo, a comparação das concentrações observadas entre vazão de estiagem e vazão de cheia poderá trazer mais informações a respeito.

No gráfico referente ao arsênio total, observa-se que as concentrações mínima e máxima observada foram as mesmas em quase todos os pontos. Isso não retrata uma realidade da química da água da BHRP, mas uma mudança na metodologia utilizada para determinar a concentração de arsênio total na água. O limite de detecção passou de $1 \mu\text{g.L}^{-1}$ em 2013 para $0,3 \mu\text{g.L}^{-1}$ em 2014. O arsênio foi detectado só uma vez no ponto Par4. O valor, aproximadamente $2 \mu\text{g.L}^{-1}$, é inferior ao limite de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$ conforme Resolução CONAMA 357/2005 para águas de classe 2. Pode-se afirmar que não há problema de contaminação do arsênio na BHRP, segundo o monitoramento efetuado pelo IGAM.

O cobre dissolvido somente foi detectado no ponto ParPre1 passando de mais de 10 vezes o limite da legislação. Sugere uma fonte pontual não identificada. Podemos supor que a fonte seja a mesma do chumbo. Esse pico parece devido a um evento particular, já que o cobre foi detectado somente uma vez nas quatro vezes que ele foi analisado. A contaminação pelo cobre é um problema muito pontual na bacia.

4.3.2.2. Outros Metais

Os elementos Bário (BaTot), Ferro (FeDiss), Manganês (MnTot) e Zinco (ZnTot) foram agrupados nessa análise por serem metais considerados como não pesados: não estão situados entre o cobre e o chumbo na tabela periódica. A figura 37 evidencia que esses metais apresentam uma evolução espacial própria para cada um: apesar de serem elementos parecidos do ponto de vista químico, os fatores determinando as suas concentrações são diferentes.

O parâmetro BaTot se mantém bem abaixo do limite legal para as águas de classe 2. O maior pico observado é da ordem de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ e o limite é de $0,7 \text{ mg.L}^{-1}$. Pode-se afirmar então que não há problema de contaminação ao bário ao longo do Eixo PPP. É interessante notar que os picos aparecem no ponto Par5, Pre3 e ParPre1 sendo parecidos com os do chumbo, com exceção do ponto Par3.

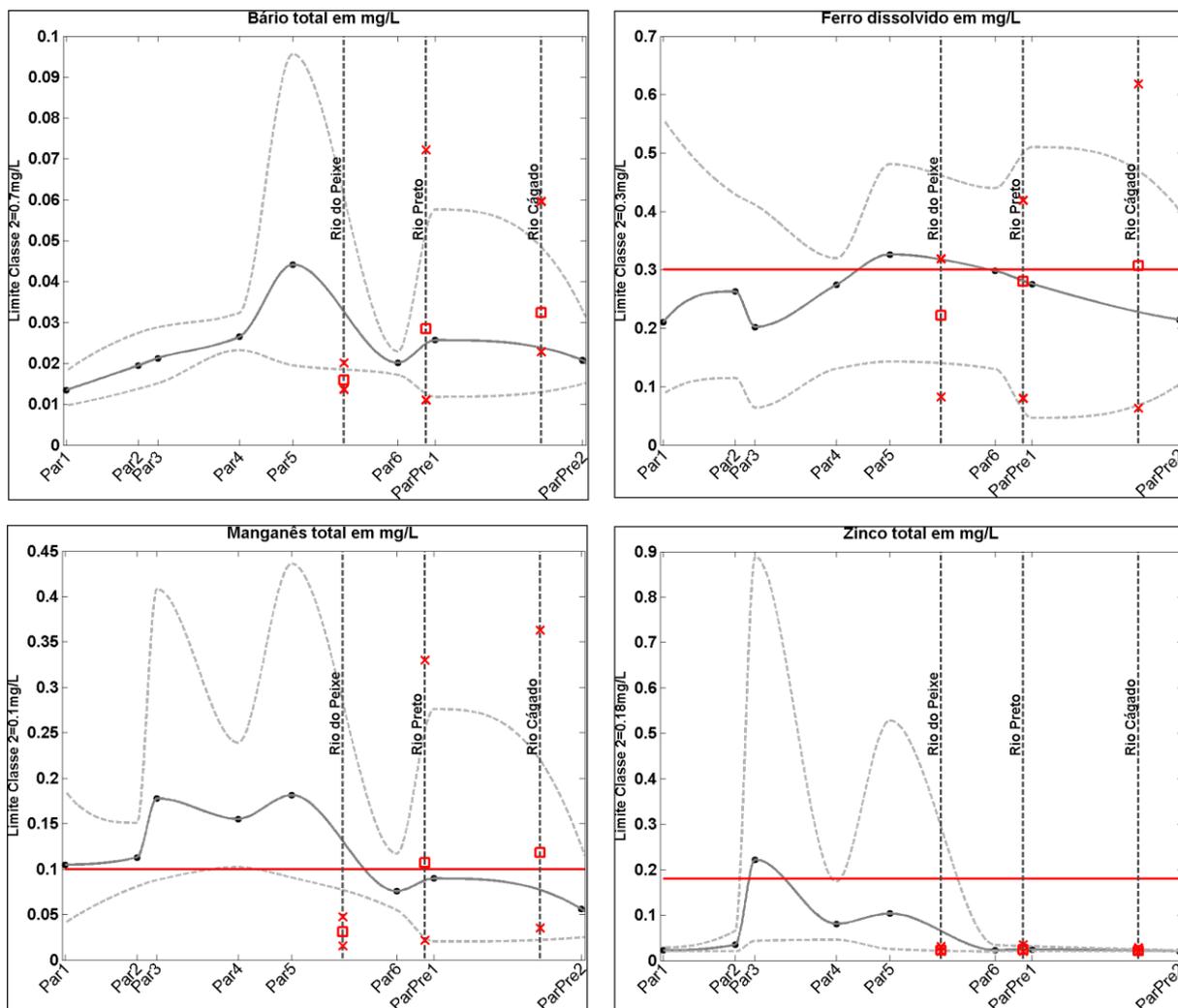


Figura 37: Evolução espacial dos elementos Bário, Ferro, Manganês e Zinco presentes na água ao longo do Eixo PPP.

A concentração média de ferro dissolvido ao longo do Eixo PPP é sempre próxima ao limite para águas de classe 2. Esse limite de $0,30 \text{ mg.L}^{-1}$ é ultrapassado em média somente nos pontos Par5 e Cag2 (foz do rio Cágado), mas é ultrapassado pelo menos uma vez em todos os pontos do Eixo PPP. A concentração média ao longo do Eixo oscila entre $0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,35 \text{ mg.L}^{-1}$, com mínimos de $0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ e máximos de $0,60 \text{ mg.L}^{-1}$ aproximadamente. Essa oscilação, que não segue um padrão identificável a uma classe de uso e cobertura da terra ou outra característica das sub-bacias dos pontos de coleta, aponta para uma fonte difusa presente na maior parte da BHRP. A pedologia e a geologia são fatores a se investigar para explicar as altas concentrações de ferro ao longo do Eixo PPP.

O manganês (MnTot) é um parâmetro que apresentou violações quase sistemáticas dos limites legais como evidenciado na Figura 37. O valor médio observado ficou acima do limite do ponto Par1 ao ponto Par5. Na foz do rio do Peixe (Pei4) as concentrações de manganês são

baixas permitindo abaixar por diluição as concentrações de manganês no Eixo PPP, fenômeno bem visível no ponto Par6 no qual a concentração média de manganês respeita a legislação em vigor. Em todos os pontos do Eixo PPP, os máximos ultrapassaram os limites da Classe 2. Três picos de concentrações se destacam: no ponto Par3, Par5 e ParPre1. Nesses máximos locais, as concentrações são mais de três vezes superiores ao limite para águas superficiais de Classe 2. Os picos nos pontos Par3 e Par5 podem ser explicados por fatores já discutidos como a presença de indústrias e aterros a montante desses pontos. O máximo local atingido no ponto ParPre1 é devido à adição das águas do rio Preto, apresentando altas concentrações próximo à foz. Altas concentrações também se encontram próximo à foz do rio Cágado, mas a vazão dele é pequena comparada à vazão do rio Preto nesse ponto, e não se observa influência sobre o ponto ParPre2, a jusante da foz do rio Cágado. O perfil espacial do parâmetro MnTot evidenciou que as concentrações são devidas a fontes pontuais através dos picos em Par3 e Par5 e a fontes difusas por ser encontrado em altas concentrações ao longo do Eixo PPP e nas principais fozes, com exceção do rio do Peixe.

A evolução espacial do parâmetro ZnTot é muito parecida com a evolução do parâmetro CdTot conforme as figuras 36 e 37. Ao longo do Eixo PPP a concentração média somente ultrapassa o limite da Classe 2, de $0,18 \text{ mg.L}^{-1}$, no ponto Par3. Concentrações significativas são encontradas somente do ponto Par2 ao ponto Par5. No ponto Par5 a concentração média não ultrapassa o limite da classe 2, mas uma concentração máxima de mais de $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ é encontrada. As fontes de zinco são provavelmente pontuais e o perfil quase idêntico ao do cádmio sugere fontes comuns.

Nessa avaliação dos metais ao longo do Eixo PPP foi mostrado que o ferro e o bário provêm principalmente de fontes difusas, já a concentração de manganês se explica pela soma de fontes pontuais e difusas. As concentrações de zinco observadas são coerentes com lançamentos pontuais de efluentes contendo zinco, sendo os maiores “suspeitos” a Votorantim Metais de Juiz de Fora para o ponto Par3 e indústrias, curtumes e o antigo lixão de Juiz de Fora para o ponto Par5.

4.3.2.3. Elementos simples não metálicos

Os parâmetros CaTot, ClTot, KDiss, NaDiss, MgTot, CNLiv e SulTot foram classificados como variáveis químicas, numa subclasse de elementos não metálicos. Para a apresentação dos resultados, foram separados em duas figuras (Figura 38 e Figura 39).

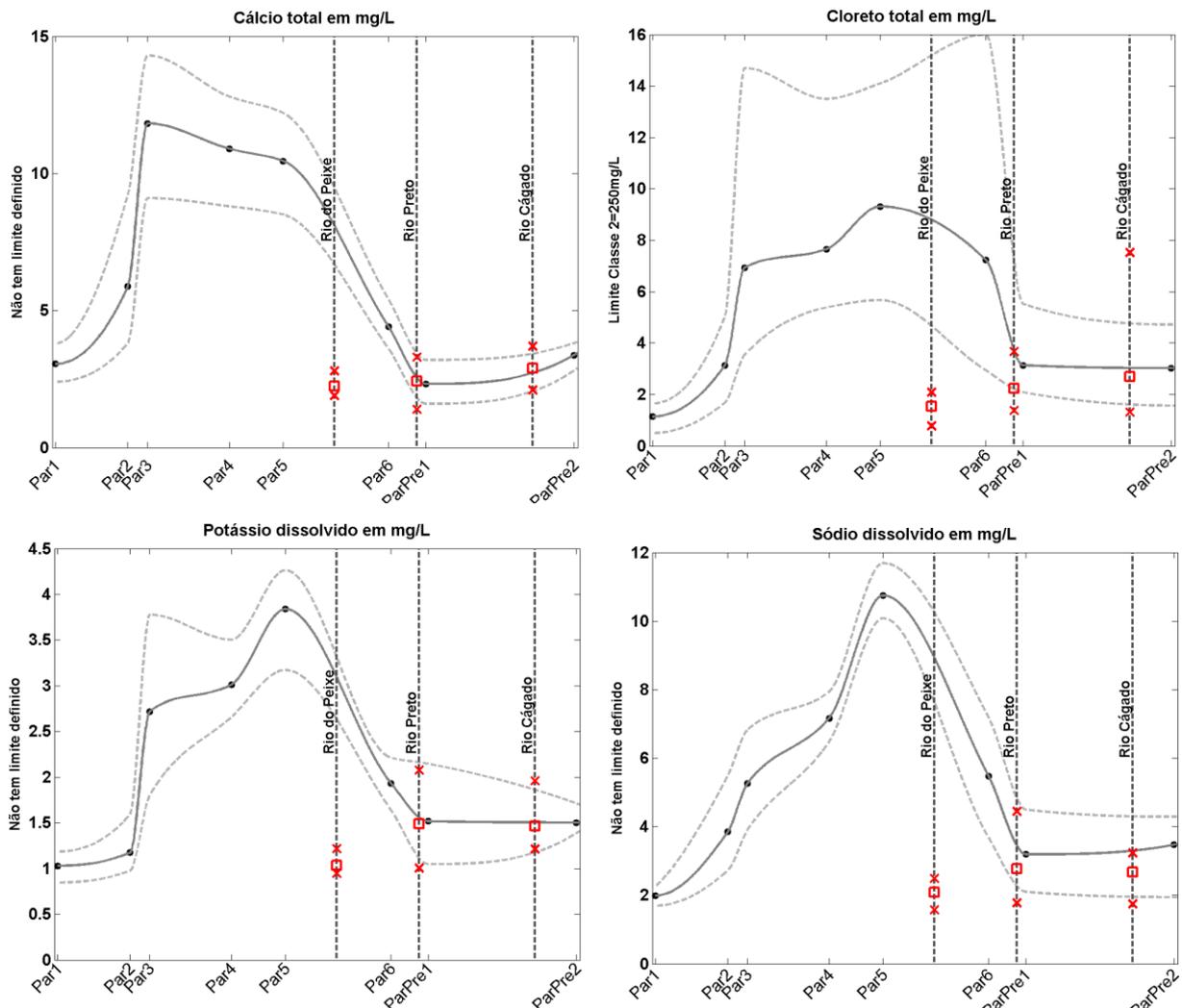


Figura 38: Evolução espacial dos elementos Cálcio total, Cloreto total, Potássio dissolvido e Sódio dissolvido na água ao longo do Eixo PPP.

O cálcio (Figura 38) e o magnésio (Figura 39) são os principais íons responsáveis pela dureza da água. A concentração de cálcio atinge um máximo no ponto Par3 e se mantém em média a 10 mg.L^{-1} até o ponto Par5, sendo diluído a jusante desse ponto pelos rios do Peixe e Preto, apresentando concentrações da ordem de 2 mg.L^{-1} . O parâmetro MgTot (Figura 39) apresenta uma evolução espacial completamente diferente dos demais elementos dissolvidos não metálicos com um máximo médio e absoluto pouco marcado na altura do ponto Par5. A concentração média de magnésio apresenta pouca variabilidade tanto ao longo do Eixo PPP quanto nos afluentes dele, sendo sempre entre $0,7 \text{ mg.L}^{-1}$ e $1,7 \text{ mg.L}^{-1}$. O máximo marcado no ponto Par5 e as oscilações sem padrão identificável mostram que a concentração de magnésio na água é pouco influenciada por fatores antrópicos e mais por fatores naturais ainda não identificados. A variação da dureza da água (Figura 34) ao longo do Eixo PPP acompanha a variação do parâmetro CaTot (Figura 38).

O parâmetro cloreto total (ClTot) apresentou uma evolução espacial singular, diferente dos demais parâmetros, tendo um máximo absoluto localizado na altura do ponto Par6, após o encontro com as águas do rio do Peixe, este último contendo baixas concentrações de cloreto próximo a foz. É possível afirmar que há uma fonte de cloreto entre os pontos Par5 e Par6. O máximo médio registrado foi de aproximadamente 9 mg.L^{-1} , o que é muito inferior ao limite da Classe 2 de 250 mg.L^{-1} . A média de concentração fica entre 7 mg.L^{-1} e 9 mg.L^{-1} entre os pontos Par3 e Par6 e as concentrações médias ficam entre 1 e 3 mg.L^{-1} nos demais pontos. A variabilidade temporal é bastante marcada na maioria dos pontos, podendo ter um fator multiplicador de 5 entre o mínimo e o máximo registrados durante o período de coleta.

O potássio e o sódio dissolvido exibem uma variação parecida ao longo do Eixo PPP com um máximo marcado no ponto Par5 e concentrações baixas nas fozes dos rios principais da BHRP. Para os dois íons dissolvidos também observa-se uma baixa variabilidade temporal, com exceção do KDiss no ponto Par3 variando de 1 mg.L^{-1} para 4 mg.L^{-1} , indicando um possível lançamento de efluente. O valor médio de potássio é estável entre os pontos Par3 e Par4, mas observa-se um aumento da concentração média de sódio entre esses mesmos pontos.

O limite de detecção de sulfatos na água foi de 5 mg.L^{-1} pela metodologia usada pelos técnicos do IGAM. Segundo o gráfico (Figura 39) os sulfatos foram detectados em 5 pontos, sendo concentrações significativas encontradas do ponto Par3 ao ponto Par6 (4 pontos) e traços observados no ponto ParPre1. Como não houve detecção de sulfatos nos pontos Pei4 e Pre1, isso sugere que os sulfatos rejeitados em Juiz de Fora (Distrito Industrial e área urbana) se encontrem até próximo a foz do rio Preto no Paraíba do Sul. Esse impacto ambiental detectável numa grande distância e apesar das diluições sucessivas pelos rios do Peixe e Preto e afluentes de menor importância deve ser relativizado, sendo que o limite para águas superficiais de Classe 2 é de 250 mg.L^{-1} e que os valores detectados no ponto ParPre1 são próximos ao limite de detecção. Observa-se que a concentração média de sulfatos é quase constante do ponto Par3 ao ponto Par5, em torno de 20 mg.L^{-1} . A variabilidade temporal é maior no ponto Par3, onde a concentração varia de 10 mg.L^{-1} até 25 mg.L^{-1} , do que nos outros pontos, certamente pela influência da área urbana e industrial de Juiz de Fora. O valor máximo absoluto atingindo no ponto Par3 e a relativa estabilidade da concentração até o ponto Par5 aponta os efluentes industriais e domésticos como responsáveis pela presença de sulfatos na água.

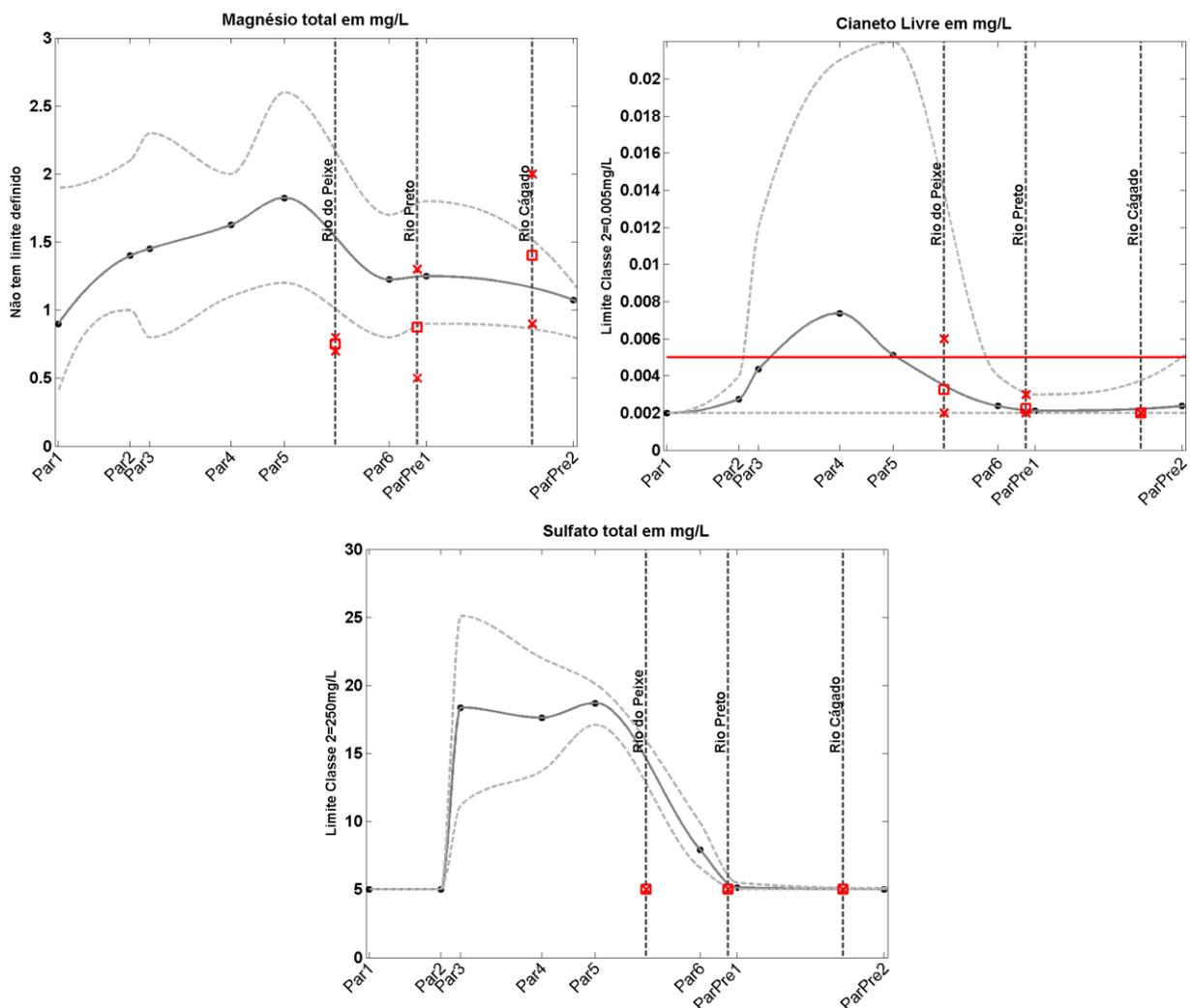


Figura 39: Evolução espacial dos elementos Magnésio Total, Cianeto livre e Sulfato total na água ao longo do Eixo PPP.

Os cianetos livres são muito tóxicos mesmo em concentrações muito baixas e isso se reflete na concentração tolerada para águas superficiais enquadradas na Classe 2: $5 \mu\text{g.L}^{-1}$. O limite de detecção desse parâmetro é próximo ao limite da classe, sendo de $2 \mu\text{g.L}^{-1}$. Cianetos livres foram detectados pelo menos uma vez em todos os pontos do Eixo PPP e dos seus afluentes, com exceção da foz do rio Cágado. A concentração média de CNLiv ultrapassa o limite da Classe 2 nos pontos Par4 e Par5, e o limite é excedido pelo menos uma vez nos pontos Par3, Par4, Pa5, Pei4 e, de pouco, no ponto ParPre2: foz do rio Preto no rio Paraíba do Sul. À diferença dos outros elementos não metálicos, esse parâmetro revela que há problemas de qualidade da água na BHRP, lembrando o potencial tóxico desse elemento, seja para o consumo humano ou para dessedentação animal. Os valores máximos encontrados nos pontos Par3, Par4 e Par5, de 10 até $22 \mu\text{g.L}^{-1}$, são muito além do limite da classe 2. As fontes de cianetos livres podem ser os efluentes industriais e domésticos. A foz do rio do Peixe tem o valor máximo

acima do limite que deve ser investigado, haja visto que esse rio esteve quase sempre melhor que os demais na totalidade dos parâmetros de qualidade da água analisados nesse trabalho.

Para os parâmetros CaTot, ClTot, KDiss, NaDiss e MgTot, a menor concentração média nas fozes é sempre encontrada no ponto Pei4, valores próximos ao mínimo também se encontram no ponto Par1, a jusante da represa Chapéu D'Uvas. O parâmetro CNLiv requer uma atenção particular e o fato de ele ultrapassar pontualmente o limite enquadrado na altura do ponto Pei4 e do ponto ParPre2 sugere que existem fontes diferentes dos demais elementos acima comentados.

4.3.2.4. Nutrientes

A evolução espacial dos parâmetros relativos à série de nitrogênio se encontra na Figura 40. O único composto de nitrogênio exibindo uma violação do padrão da classe 2 é o nitrogênio amoniacal no ponto Par4. As concentrações máximas encontradas nos pontos Par3 e Par5 se aproximam do limite. As concentrações máximas médias se localizam nos pontos Par4 e Par5, sendo coerente com a literatura, ligando esse parâmetro à proximidade de lançamentos de esgotos domésticos. A grande variabilidade temporal é devida à variação da diluição segundo a vazão do rio.

O parâmetro nitrito se manteve sempre bem abaixo do limite da Classe 2. O seu perfil ao longo do Eixo PPP é condizente com a literatura, tendo em vista o perfil de nitrogênio amoniacal. Esse último, conforme revisão, é transformado em nitrito por bactérias nitrificantes (*Nitrosomonas*). A concentração em nitritos é baixa até o ponto Par4 e aumenta rapidamente para atingir seu máximo absoluto e médio no ponto Par5. Essa propriedade do nitrito faz dele um bom indicador para contaminação acontecendo a uma certa distância do ponto de coleta. O nitrito é progressivamente diluído pelos afluentes e transformado em nitrato pelas bactérias do tipo *Nitrobacter*.

No caso do nitrogênio orgânico não há limite de concentração na legislação brasileira. Nas variações ao longo do Eixo PPP observamos o impacto da área urbana de Juiz de Fora (Par4 e Par 5), concentrações relativamente baixas nas fozes dos afluentes e uma variação temporal moderada. As concentrações de NOT no baixo curso do Eixo PPP são maiores do que na parte alta do curso do rio Paraibuna (antes de Par3), apesar dos seus afluentes principais apresentarem concentrações baixas. Pode-se supor que o NOT é carregado por tributários menores ao longo do Eixo PPP.

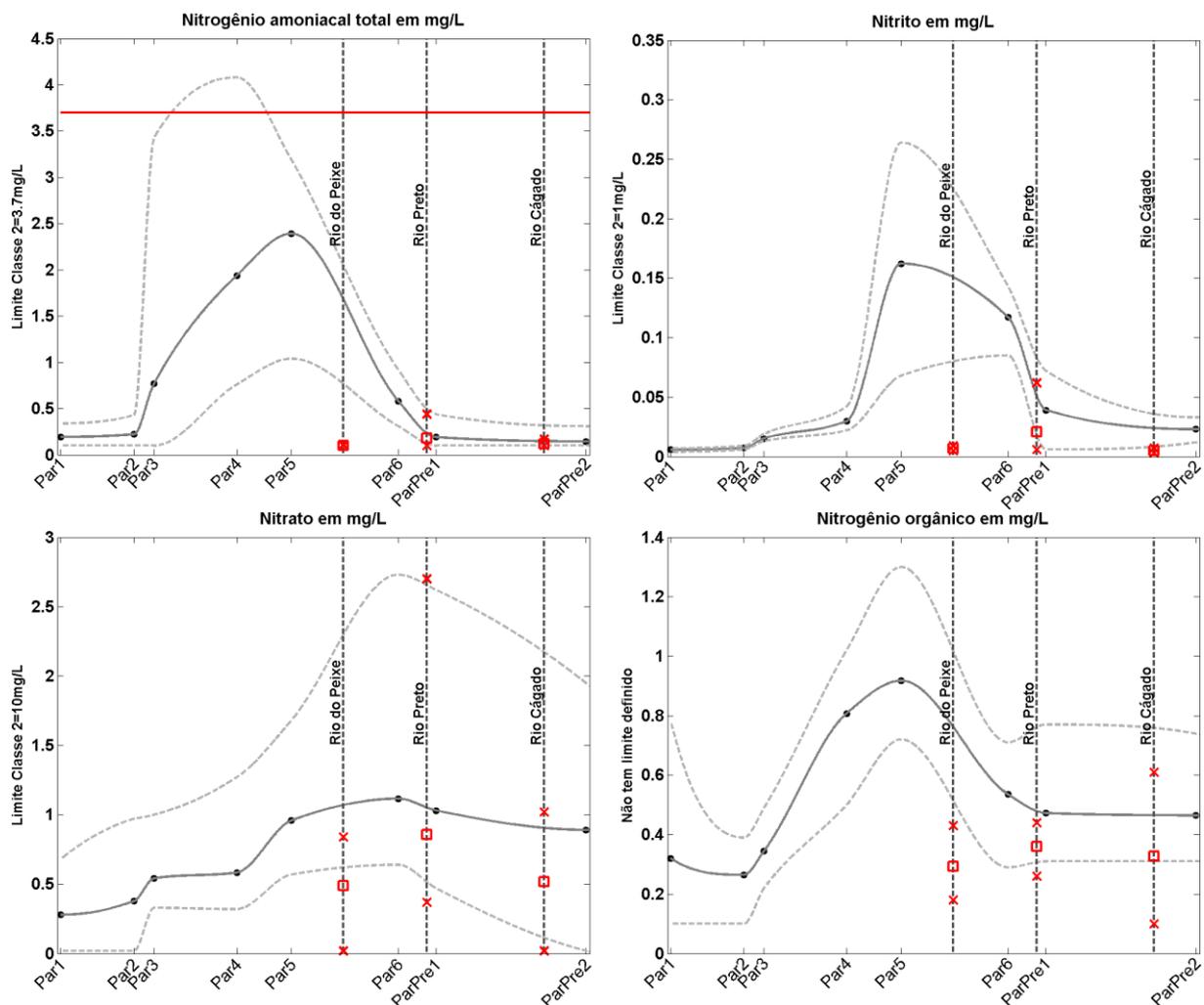


Figura 40: Evolução espacial dos elementos da série de nitrogênio na água ao longo do Eixo PPP.

É importante lembrar que há vários barramentos nos cursos do rio Paraibuna, Peixe e Preto, principalmente para alimentar PCHs e UHEs. A redução da velocidade de escoamento para a formação de reservatórios facilita o crescimento de algas. A Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) diferencia, por essa razão, os valores aceitos de FT segundo os ambientes (lóticos, intermediários e lântico). Nos metadados disponíveis com os dados de qualidade da água, constam que os pontos monitorados na BHRP encontram-se em ambientes lóticos. A frequência de barramentos na BHRP questiona essa classificação dos ambientes aquáticos nos pontos monitorados, e dever-se-ia perguntar se alguns pontos da BHRP não seriam tributários diretos de ambiente lântico. Nesse caso, o limite aceitável passaria a ser $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ para cursos d'água de Classe 2 e de $25 \mu\text{g.L}^{-1}$ para os cursos d'água de Classe 1 na BHRP. Para ambiente lântico (tempo de detenção superior a 40 dias), o limite é de $30 \mu\text{g.L}^{-1}$.

A Figura 41 ilustra a evolução do FT ao longo do Eixo PPP. Na esquerda a concentração é representada segundo a escala normal. Para evidenciar os diferentes limites, no gráfico de

direita, foi aplicado o logaritmo decimal à concentração de FT em $\mu\text{g.L}^{-1}$. Nessa escala foi possível representar os limites correspondendo aos três ambientes aquáticos ($30 \mu\text{g.L}^{-1}$, $50 \mu\text{g.L}^{-1}$ e $100 \mu\text{g.L}^{-1}$).

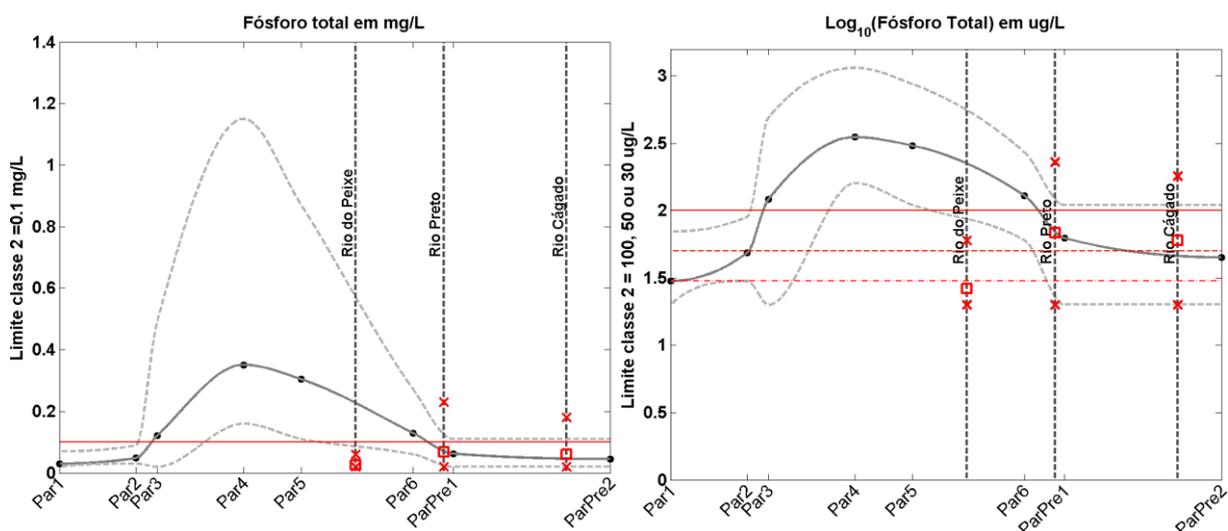


Figura 41: Evolução do parâmetro Fósforo Total ao longo do Eixo PPP escala euclidiana (normal) e escala logarítmica

A concentração de FT atinge um máximo absoluto de $1,15 \text{ mg.L}^{-1}$ (11 vezes o limite em ambiente lótico) e um máximo médio de aproximadamente $0,35 \text{ mg.L}^{-1}$ (mais de 3 vezes o limite em ambiente lótico). A concentração média de FT se mantém acima do limite da classe 2 (lótico) do ponto Par3 ao ponto Par6, passando abaixo do limite somente graças às águas pobres em FT do rio do Peixe. O FT máximo ultrapassa o limite Classe 2 (lótico) do ponto Par3 ao ponto ParPre2 e nas fozes dos rios Preto e Cágado.

Se considerarmos o limite para a classe 2/intermediário observamos que o FT médio ao longo do Eixo PPP é superior ao limite do ponto Par3 ao ponto ParPre1 e para as fozes dos rios Preto e Cágado, e só um pouco inferior na foz do rio Preto no Paraíba do Sul.

Ao analisar o gráfico em escala logarítmica, ficou evidenciado que também existe uma poluição difusa nas bacias mais rurais (pastagens), o que não aparecia na escala normal.

4.3.3. Variáveis microbiológicas

Todas as concentrações de bactérias na água foram convertidas para a escala logarítmica (Figura 42) com o objetivo de oferecer uma melhor visibilidade dos gráficos, e de possibilitar

a comparação com os limites das Resoluções CONAMA 274/2000 referente à balneabilidade e a CONAMA 357/2005 sobre enquadramento.

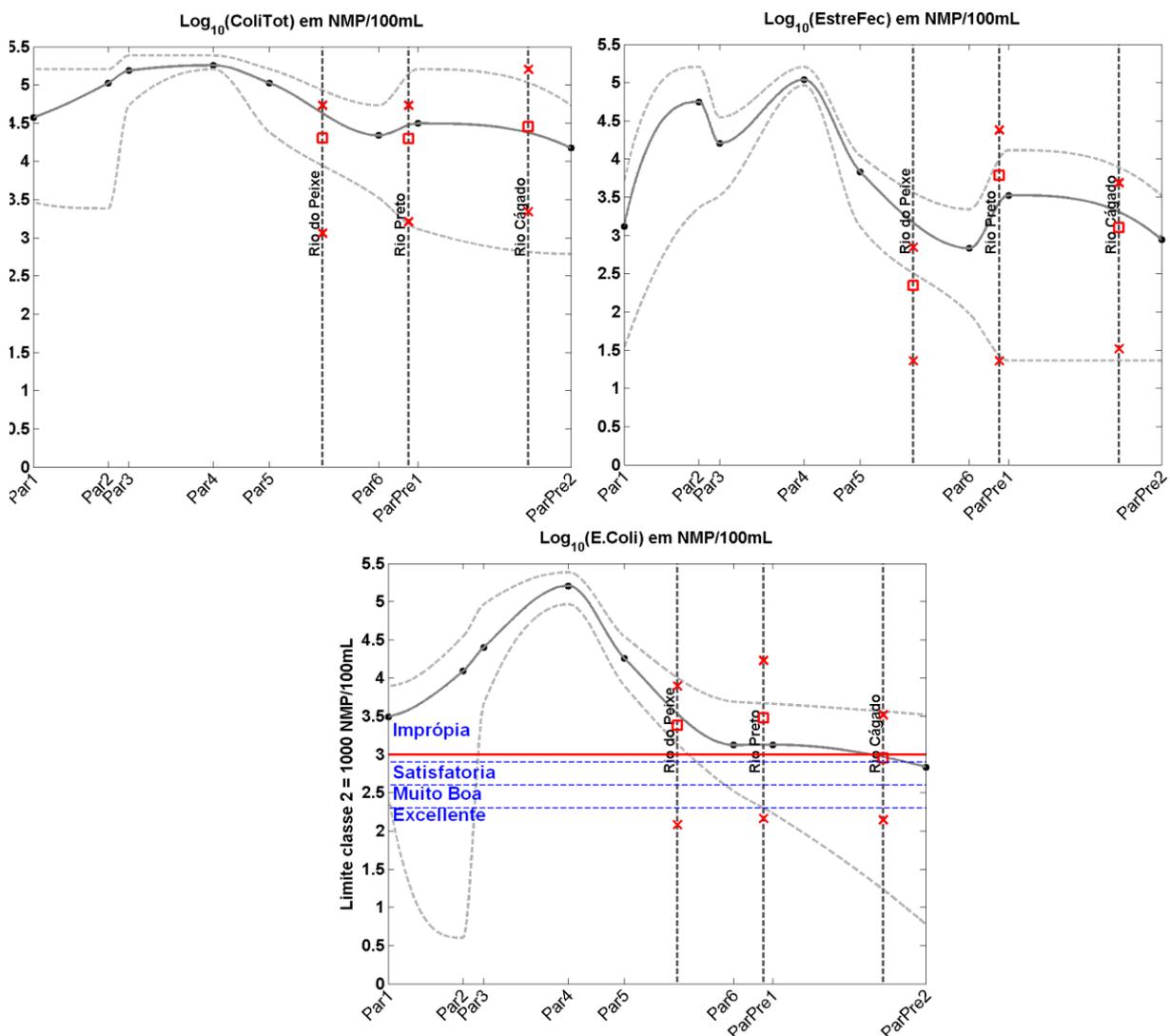


Figura 42: Evolução espacial das variáveis microbiológicas ao longo do Eixo PPP.

Os Coliformes Totais e os Enterococos Fecais apresentaram alta variabilidade temporal e espacial. O impacto da área urbana de Juiz de Fora (Par4) é mais nítido para o parâmetro EstreFec, para o parâmetro ColiTot a máxima acontece também no ponto Par4 porém é menos evidente. Para o parâmetro ColiTot, as médias encontradas no rio do Peixe e no rio Preto são inferiores aos valores ao longo do Eixo PPP e ligeiramente superior para o rio Cágado. No caso de EstrFec, o rio Preto no encontro com o Eixo PPP apresenta uma concentração média e máxima superior. As concentrações de Ecoli ao longo do Eixo PPP são preocupantes em relação ao limite da Classe 2, com médias superiores do ponto Par1 ao ponto ParPre1 e máximas sempre fora do padrão.

Foram comparadas as concentrações com os padrões de balneabilidade (BRASIL, 2000), aparecendo em azul pontilhado no gráfico. Esses limites são inferiores ao limite da Classe 2. Fica claro que as águas da BHRP, pelo menos ao longo do Eixo PPP e nas fozes dos rios principais são impróprias para a recreação de contato primário. Somente os valores mínimos nos afluentes e nos pontos Par1, Par6, ParPre1 e ParPre2 são satisfatórios.

A bactéria EColi sobrevive, em geral, pouco tempo fora do corpo dos hospedeiros, indicando uma contaminação próxima. Como o problema se encontra ao longo de todo o Eixo PPP e seus afluentes, sugere-se que há poluição difusa em toda a BHRP. A temporada de banho, em geral o verão, coincide com a época de chuva e o fenômeno de contaminação difusa é potencializado.

Os resultados aqui apresentados mostram que a recreação de contato primário na BHRP é uma atividade pouco aconselhável em vista do risco de contrair doenças de veiculação hídrica.

4.3.4. Variáveis hidrobiológicas

Não há limite definido para o parâmetro feofitina, e a clorofila-a, mesmo no seu máximo absoluto está bem abaixo do limite de 30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ para águas de Classe 2. A feofitina apresenta um máximo no ponto Par4, correspondendo ao ponto de maior influência da zona urbana de Juiz de Fora. Sendo um produto da decomposição da clorofila-a, e a clorofila-a não apresentando concentração altas a montante desse ponto, não foi encontrado uma explicação para esse máximo. Nota-se que a curva da feofitina é parecida com a curva de DBO, por exemplo, com valores baixos nos outros pontos do Eixo PPP.

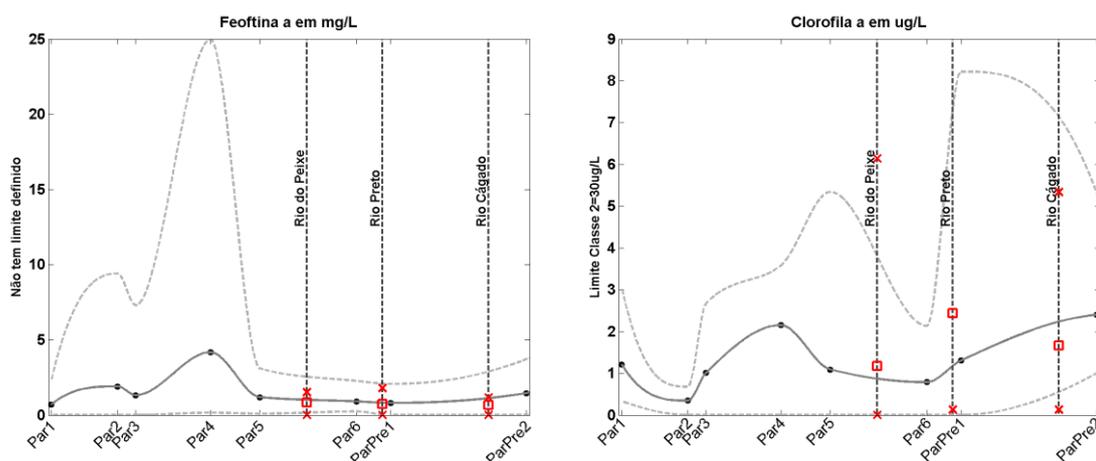


Figura 43: Evolução espacial das variáveis hidrobiológicas ao longo do Eixo PPP.

A concentração de CIA não seguiu a evolução espacial esperada ao longo do Eixo PPP, sendo muito diferente do perfil dos nutrientes. Um máximo médio local é marcado no ponto

Par4 e uma máximo absoluto local no ponto Par5. A grande diferença em relação à maior parte das variáveis previamente estudadas é que os afluentes (Peixe e Preto) têm concentrações médias e máximas superiores ao encontrado ao longo do Eixo PPP, elevando progressivamente sua concentração média até o ponto ParPre2.

A concentração de clorofila depende da disponibilidade dos nutrientes e de fatores hidrológicos, sendo fundamental a redução da velocidade de escoamento (JONES & LEE, 1982; MUNN et al., 2008). A presença e a construção de PCHs e UHEs na BHRP provavelmente elevará as concentrações de CIA.

4.4. Conclusão

Ao longo do Eixo PPP os parâmetros SST, Tur, Cor, PbTot e CuDiss ultrapassaram pontualmente os limites da Classe 2 sem que a média do parâmetro estivesse superior ao limite da classe. Os parâmetros FeDiss, MnTot, CNLiv (particularmente nítido ao atravessar a área urbana de Juiz de Fora e na foz do rio Preto), FT e EColi excederam o limite da Classe 2, com médias superiores ao limite em vários pontos, sendo a jusante de Juiz de Fora ou em outros locais, indicando fontes difusas de contaminação da água na BHRP. Para esses 10 parâmetros, o estudo das correlações com os fatores determinantes da qualidade da água acarretará melhor entendimento do mecanismo de contaminação difusa na BHRP.

Outros 5 parâmetros ultrapassaram os limites da Classe 2: O OD cuja média e valor máximo está abaixo de 5 mg.L^{-1} no ponto Par4, revelando condições anaeróbias para anóxicas a jusante da área urbana de Juiz de Fora. A DBO apresenta um gradiente seguindo a urbanização e o seu valor médio é superior ao limite da Classe 2 do ponto Par2 ao ponto Par5, indicando que o esgoto doméstico explica sua variação. O parâmetro NNH3 ultrapassa uma única vez o limite da Classe 2 em um ponto só.

Os parâmetros ZnTot e CdTot ultrapassam o limite da classe 2 nos pontos Par3 e Par5 sem ultrapassá-lo no ponto Par4. Há duas hipóteses: a fonte está no ponto Par 3 e sedimenta a proximidade do ponto Par5 (COELHO, 2012 p. 150) ou há duas ou mais fontes localizadas a montante dos pontos Par3 e Par5.

Capítulo 5: Fatores determinantes da qualidade da água na Bacia Hidrográfica do rio Preto

Segundo a evolução das variáveis ao longo do Eixo PPP, foi mostrado que as variáveis FeDiss, MnTot, CNLiv, FT e EColi ultrapassaram os limites da Classe 2 regularmente nas fozes dos rios principais e ao longo do Eixo PPP, sugerindo que há fontes difusas de contaminação crônica na BHRP. Os parâmetros SST, Tur, Cor, PbTot e CuDiss ultrapassaram os limites da classe 2 ao longo do Eixo PPP, mas não cronicamente, sugerindo fontes difusas, mas possivelmente ligadas a eventos hidrológicos como uma estiagem ou uma enchente particularmente marcada. De maneira geral, a observação das variações de qualidade da água ao longo do Eixo PPP foi usada para criar hipóteses sobre os fatores explicando essas variações.

Esse capítulo permitirá a avaliação dessas hipóteses e uma melhor identificação das fontes pontuais e das fontes difusas. As correlações entre os valores de cada parâmetro de qualidade da água e as características das sub-bacias foram realizadas para a estação seca e chuvosa.

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para verificar a normalidade dos dados e foi demonstrado que a maioria deles não seguiam uma distribuição normal (resultados não detalhados nesse trabalho). Foi então escolhido a estatística não-paramétrica para avaliar a correlação entre os fatores determinados nos Capítulos 2 e 3 e as variáveis de qualidade da água. O coeficiente de correlação escolhido foi o ρ de Spearman e caso tivesse uma correlação significativa a nível de 95% (valor- $p < 0,05$), o estimador de declive de Theil-Sen foi também calculado. O estimador de declive de Sen calculado na seca e na chuva permite avaliar o peso de cada fator na chuva e na seca.

Quando um fator tem maior peso ou só tem influência no período de seca, pode-se concluir que a fonte é provavelmente pontual ou devida ao escoamento subterrâneo. Fontes pontuais tem menor influência no período chuvoso devido ao fenômeno de diluição que acontece.

Quando a correlação só é significativa na estação chuvosa ou o estimador de Sen é maior na estação chuvosa, o escoamento superficial e sub-superficial são provavelmente responsáveis pela variação do parâmetro de qualidade da água, sugerindo contaminação difusa. A chuva tende a varrer a superfície e levar os contaminantes para os cursos d'água.

Primeiramente foram estudadas as interações entre os próprios fatores: destacar as correlações entre eles permite evitar erros de análise ao avaliar as correlações entre os fatores e as variáveis de qualidade da água.

Numa segunda parte, as correlações entre as variáveis de qualidade da água serão abordadas, já que a associação ou a dissociação de certos parâmetros pode trazer informações relevantes sobre suas fontes.

A terceira parte trata da escolha dos fatores baseado nas correlações entre eles: o objetivo foi obter os fatores mais independentes possíveis. As correlações entre os fatores e as variáveis de qualidade da água foram detalhadas a seguir. Quando nenhum fator se destaca e o resultado parece contrariar as hipóteses ou a teoria, gráficos Boxplot contemplando os 17 pontos de monitoramento da BHRP para o parâmetro foram elaborados.

5.1. Interdependência dos fatores

O ρ de Spearman e os valores-p foram computados entre os fatores determinados nos capítulos 2 e 3. As correlações significativas a nível de 95% foram simbolizadas por “+” (correlação positiva) ou “-” (correlação negativa) e as correlações significativas a nível de 99% por “++” ou “--”, seguindo o mesmo critério. Essa codificação foi utilizada em todas as tabelas apresentadas nesse capítulo. Essa representação é comum em estudos relacionando a qualidade da água com o uso e cobertura da terra, ou outros fatores. Por exemplo, foi utilizada em Zhou et al. (2012) e Pratt & Chang (2012).

5.1.1. Tipo de solo

Os tipos de solo somam, logicamente, cem por cento em todas as bacias. Era de se esperar uma interdependência entre eles, o que foi comprovado conforme a Tabela 20.

Tabela 20: Correlações entre tipos de solos na BHRP

	AfloRoch	ArgiVA	CambiHap	CambiHum	LatoAmar	LatoVA	LatoVerm	NeoLit	NeoQuar
AfloRoch			++	++	--	-		++	
ArgiVA						--	++		
CambiHap	++			++	--	--	++	++	
CambiHum	++		++		--	--	+	++	
LatoAmar	--		--	--				--	
LatoVA	-	--	--	--			--		
LatoVerm		++	++	+		--			
NeoLit	++		++	++	--				+
NeoQuar								+	

Os afloramentos rochosos (AfloRoch) são mais presentes nas bacias cujo solo se classifica como cambissolo (CambiHap e CambiHum) ou neossolo lítico (NeoLit). Observa-se que as bacias com cambissolo háptico são associadas às bacias com cambissolo húmico. A presença de latossolos vermelho-amarelos (LatoVA) e amarelos (LatoAmar) quase exclui a presença de outros solos nas bacias estudadas: as bacias do rio Paraibuna e parte da bacia do rio Cágado são quase exclusivamente cobertas por latossolos (LatoAmar, LatoVA e LatoVerm). O argissolo vermelho-amarelo (ArgiVA) é associado somente ao latossolo vermelho (LatoVA), os dois se encontrando no baixo-curso do rio Cágado e no Eixo PPP perto da foz com o rio Paraíba do Sul (Mapa 10 e Mapa 11). Os dois tipos de neossolos (NeoLot e NeoQuar) ocorrem, principalmente, na parte sul da bacia do rio Preto.

5.1.2. Fatores geográficos

Na Tabela 21, observa-se que a pluviometria média anual (PluvMean) é correlacionada com a altitude média (AltMean) das bacias. O Maciço do Itatiaia, na Serra da Mantiqueira corresponde ao alto curso do rio Preto, apresentando as maiores altitudes e pluviometria da BHRP. A bacia do rio Cágado é a mais próxima do nível do mar, apresentando também as menores precipitações. A altitude também está ligada à declividade média (DeclivMediaBac) encontrada na bacia, montanhas altas apresentando muitas vezes um relevo mais acidentado do que os morros, caracterizando a maior parte da BHRP. A área das bacias (AreaBac) é um fator independente dos outros fatores geográficos.

Tabela 21: Correlações entre fatores geográficos na BHRP

	AltMean	DeclivMediaBac	PluvMean	AreaBac
AltMean		+	++	
DeclivMediaBac	+		++	
PluvMean	++	++		
AreaBac				

5.1.3. Características Morfométricas

As características morfométricas das sub-bacias da BHRP (Tabela 22) apresentam poucas correlações entre si. É interessante notar que a declividade média do trecho (DeclivMediaTrecho) não está ligada à declividade média do rio (DeclivMediaRio). Os índices de circularidade (IndCir) e os coeficientes de compacidade (CoefComp) são de maneira lógica negativamente correlacionados. Outras características são antagônicas nas bacias estudadas: o

coeficiente de compacidade (CoefComp) e a densidade de drenagem (DensDren), com relação ao fator de forma (FaForm) e a declividade média do rio. A única correlação positiva entre as características morfométricas calculadas é entre a densidade de drenagem e o fator de forma.

Tabela 22: Correlações entre as características morfométricas das sub-bacias da BHRP

	DeclivMediaTrecho	DeclivMediaRio	FaForm	DensDren	IndCir	CoefComp
DeclivMediaTrecho						
DeclivMediaRio			--			
FaForm		--		+		
DensDren			+			-
IndCir						--
CoefComp				-	--	

5.1.4. População e densidade

A correlação entre população e densidade é significativa a nível de 1% na escala da bacia (PopBac e DensBac) e significativa a nível de 5% a nível de uma faixa ripária de 200m (Pop200 e Dens200). As sub-bacias com mais habitantes são também aquelas que apresentam as maiores densidades. Esse resultado não era óbvio devido ao intervalo de áreas das sub-bacias: variando de 382 km² (Par1) até 8.564 km² (PP2).

Tabela 23: Correlações entre população e densidade nas sub-bacias da BHRP

	Pop200	PopBac	Dens200	DensBac
Pop200		++	+	++
PopBac	++		++	++
Dens200	+	++		++
DensBac	++	++	++	

A Figura 44 mostra que apesar da correlação ser significativa a nível de 1% entre o número de habitantes e a densidade de população na escala da bacia, essa é somente viável para as sub-bacias pouco povoadas. Os dois *outliers* acima da reta de regressão correspondem aos pontos Par4 e Par5 situados imediatamente a jusante de Juiz de Fora; os três *outliers* abaixo da curva remetem aos pontos de coleta Par6 (a jusante do encontro com o rio do Peixe), ParPre1 e ParPre2. Essa correlação é puramente estatística, e não traz informação sobre a repartição espacial da população da BHRP.

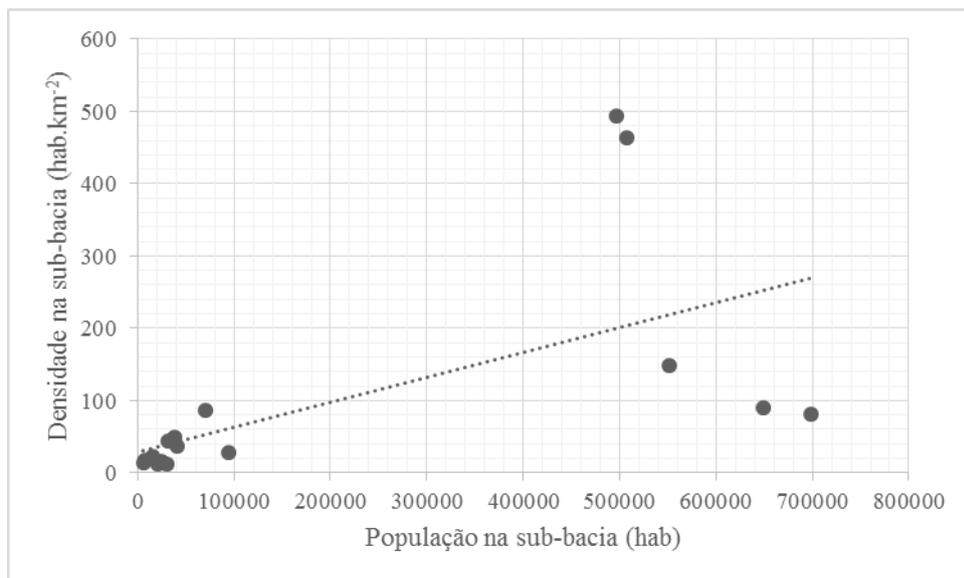


Figura 44: Densidade de habitantes em função do número de habitantes nas sub-bacias da BHRP.

5.1.5. Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra soma logicamente 100% nas sub-bacias delimitadas e o fato de não ter independência entre os usos era esperado. A Tabela 24 resume as interações entre usos e cobertura para as sub-bacias dessa Dissertação, considerando a escala de sub-bacia e a escala de um *buffer* de 200m ao longo do curso d'água. Como visto anteriormente na caracterização da área de estudo, o uso e cobertura numa faixa de 200 metros dos cursos d'água e nas sub-bacias é muito similar, o que tem como consequência que as correlações evidenciadas, em geral, são as mesmas.

A única classe de uso e cobertura independente das outras é a classe “Solo exposto” a escala de *buffer* de 200m; na escala de sub-bacia, ela está negativamente relacionada com a classe “Corpos d'Água”. As demais classes possuem correlações entre elas nas duas escalas de estudo. Na escala de *buffer*, a classe “Ocupação rural” é relativamente independente das outras classes, se relacionando somente com a classe “Corpos d'Água”. A relação é negativa, mostrando que o represamento nessas áreas é inferior ao que se observa perto dos grandes centros urbanos. Na escala da sub-bacia, a classe “ocupação rural” implica numa diminuição das classes “Vegetação arbustiva” e “Vegetação arbórea”.

A classe “Área urbana densa” é positivamente correlacionada com a classe “Corpos d'Água”, o que se explica pela presença de represas para abastecer as cidades, e mais surpreendente, com a classe “Pastagens”. Um aumento dessa classe de uso e cobertura implica na diminuição nas classes de “Vegetação arbustiva” e “Vegetação arbórea”. A mesma

correlação se encontra entre a classe “Pastagens” e as classes “Vegetação arbustiva” e “Vegetação arbórea”, com um aumento da primeira significando diminuição das duas últimas.

As áreas com maior proporção de vegetação arbórea são também as áreas onde se encontra a maior proporção de vegetação arbustiva conforme Tabela 24. Essa tabela mostrou que a maioria dos usos e coberturas da terra (urbano, rural e pastagens) implicam uma diminuição da cobertura por vegetação arbórea.

Tabela 24: Correlações entre os usos e coberturas em faixas ripárias e nas sub-bacias da BHR

	Água200	Arbórea200	Arbustiva200	Pastagens200	Rural200	SoloExp200	Urba200	ÁguaBac	ArbóreaBac	ArbustivaBac	PastagensBac	RuralBac	SoloExpBac	UrbaBac
Água200		-	++	--			+	++			++			-
Arbórea200			++	--			--		++	++	--	-		--
Arbustiva200		-	++	--			--	-	++	++	--	-		--
Pastagens200		++	--				++	++	--	--	++			++
Rural200		--						--				++		
SoloExp200													++	
Urba200		+	--	--	++			+	--	--	++			++
ÁguaBac		++		-	++	--	+			-	++		-	
ArbóreaBac			++	++	--		--			++	--	-		--
ArbustivaBac			++	++	--		--	-	++		--	-		--
PastagensBac		++	--	--	++		++	++	--	--				++
RuralBac			-	-		++			-	-				
SoloExpBac		-					++	-						
UrbaBac			--	--	++		++		--	--	++			

5.1.6. Uso e cobertura da terra e tipo de solo

Os diferentes tipos de solos possuem propriedades diferentes, podendo influir sobre seus usos e ocupações. As suas profundidades, características mecânicas e químicas e consequentes predisposições para erosão, orientam as boas práticas para seus manejos. A repartição dos solos com o uso e cobertura não é uniforme na BHRP e várias correlações foram evidenciadas conforme Tabela 25.

Tabela 25: Correlações entre o uso e cobertura e o tipo de solo nas sub-bacias da BHRP

	ÁguaBac	ArbóreaBac	ArbustivaBac	PastagensBac	RuralBac	SoloExpBac	UrbaBac
AfloRoch		++	++	--	-		--
ArgiVA	--				+		
CambiHap	--	++	++	--			
CambiHum	--	++	++	--			-
LatoAmar		--	--	++	+		+
LatoVA	++	-	--	++			++
LatoVerm	--			-			
NeoLit		++	++	-			-
NeoQuar							

As manchas de urbanização de Juiz de Fora e de Valença se situam no Vale do Paraibuna e na parte sul da Bacia do rio Preto onde latossolos vermelho-amarelo e amarelo predominam. Esse fato explica a ligação entre esses tipos de solos e a classe de uso e cobertura “Área urbana densa”. Os principais reservatórios da BHRP também foram construídos em áreas de latossolos vermelho-amarelo, esclarecendo a correlação entre a presença de corpos d’água e esse tipo de solo. Esses solos também estão ligados à classe “Vegetação Rasteira”.

Os afloramentos rochosos ocorrem em áreas de maior declividade e altitude, sendo associados a uma maior cobertura florestal ou arbustiva; os cambissolos apresentaram correlações semelhantes. Os argissolos vermelhos-amarelos ocorrem na parte baixa da BHRP e concorrem com uma ocupação humana esparsa, classificada como “Área rural”. Observa-se que os cambissolos húmicos e háplicos, apesar de características diferentes, apresentam usos e coberturas similares. É importante notar que não foi evidenciado correlação entre a classe “Solo exposto” e qualquer tipo de solo. Esse resultado sugere que o manejo adequado do solo tem mais importância do que o tipo de solo na prevenção das erosões na BHRP.

5.1.7. Uso e cobertura da terra e fatores geográficos

A análise das correlações entre uso e cobertura da terra e fatores geográficos (Tabela 26) mostra que a ocupação urbana e o uso da terra como pastagem é contrária à declividade média. A ocupação humana acompanha historicamente os vales e áreas planas no Brasil. Esse resultado é visível quando se compara o mapa de declividade (Mapa 7) com o mapa de uso e cobertura da terra (Mapa 17). A cidade de Juiz de Fora se desenvolveu na planície do Paraibuna, área plana de maior extensão da BHRP. As sub-bacias com maiores declividades, sendo também com as maiores altitudes e pluviometrias médias, tendem a apresentar maior cobertura vegetal arbórea e arbustiva. Para minimizar processos erosivos e riscos de deslizamento, o

Código Florestal (BRASIL, 2012) impõe a cobertura por vegetação arbórea nas áreas apresentando declividade superior a 100% (45°). Além disso, grandes declividades dificultam a construção de edifícios e o uso como pastagem, o que explica que essa disposição do código florestal é mais respeitada do que as áreas de preservação permanente (APPs) hídricas na BHRP.

Tabela 26: Correlações entre o uso e cobertura da terra e fatores geográficos nas sub-bacias da BHRP.

	ÁguaBac	ArbóreaBac	ArbustivaBac	PastagensBac	RuralBac	SoloExpBac	UrbaBac
AltMean		++	++	--	-		
DeclivMediaBac	-	++	++	--			--
PluvMean		++	++	--	--		-
AreaBac							

5.1.8. Uso e cobertura da terra e demografia

A densidade de população se relacionou com as classes “Vegetação Rasteira” e “Área Urbana Densa” segundo a Tabela 27. Esse resultado não era esperado, mas pode ser explicado pela Tabela 24, onde foi mostrado que as bacias mais urbanizadas apresentavam estatisticamente mais pastagens, apesar da relação não ser válida para todos os pontos.

Tabela 27: Correlações entre o uso e cobertura da terra e demografia nas sub-bacias da BHRP

-	Pop200	PopBac	Dens200	DensBac
ÁguaBac				
ArbóreaBac	-	-	--	--
ArbustivaBac	--	--	-	-
PastagensBac	+	+	+	++
RuralBac	+	+		
SoloExpBac				
UrbaBac	++	++	++	++

Para evidenciar que a densidade de população se relaciona muito mais com a urbanização do que com a presença de pastagens (apesar da relação ser estaticamente válida), foi calculado o estimador de declive de Sen entre a densidade de população nas sub-bacias e, a porcentagem de ocupação por pastagens ou por área urbana densa. Com nível de confiança de 95%, o estimador de declive de Sen está no intervalo [0,73 ; 11,21] para a classe “Vegetação Rasteira”, com valor mediano de 3,40; e se situa em um intervalo de 51,00 para 82,65 com valor mediano de 74,96 para a classe “Área Urbana Densa”. A Figura 45 representa esses resultados.

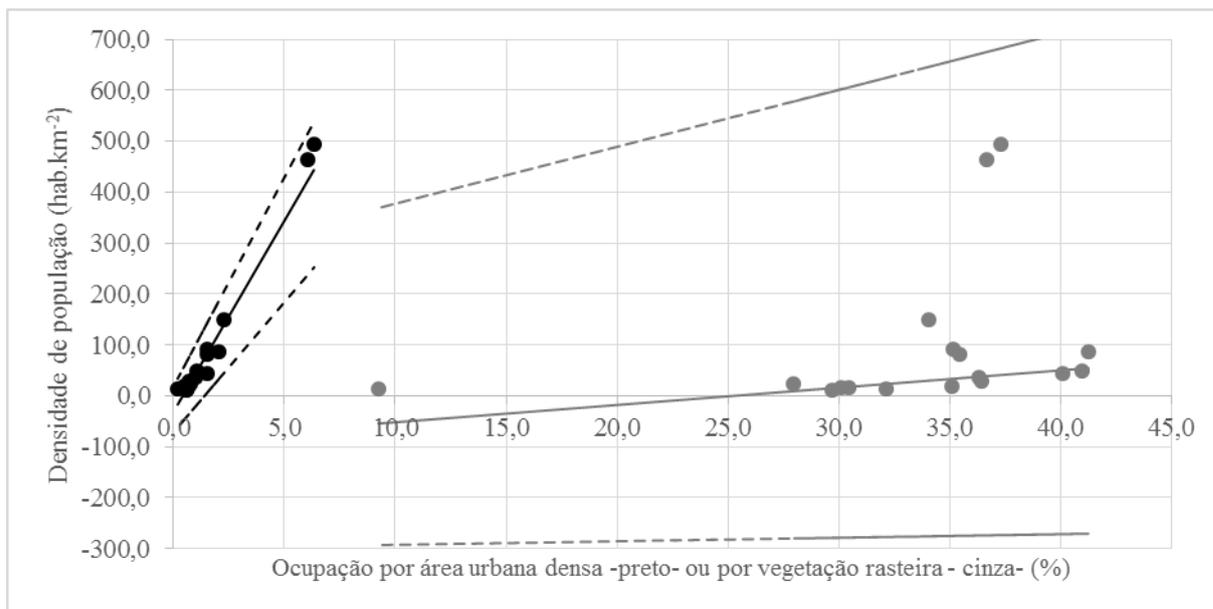


Figura 45: Densidade de população em função da ocupação urbana densa e da cobertura por vegetação rasteira com representação dos declives de Sen associados com nível de confiança de 95%.

A linhas contínuas representam o declive de Sen médio e as pontilhadas os declives extremos com nível de confiança de 95%. A representação gráfica desses resultados permite evidenciar melhor que uma correlação estatística (mesmo significativa a nível de 99%, como na Tabela 27) pode traduzir duas realidades totalmente diferentes. O indicador de Sen interpreta-se da seguinte maneira: quando a porcentagem de urbanização da bacia sobe de 1 por cento, a densidade de população sobe de 74,96 habitantes por quilômetro quadrado em mediana, ou entre 51 e 83 com nível de confiança de 95%. Da mesma maneira pode-se afirmar que quando a porcentagem da bacia ocupada por vegetação rasteira aumenta de 1 por cento, a densidade populacional sobe entre 0,73 e 11,21 habitantes por quilômetro quadrado, bem menor, porém não conclusivo. Essa interligação estática entre os fatores, que não se traduz por uma interligação expressiva quando se analisa os resultados numéricos, dificulta a busca dos fatores determinantes da qualidade da água.

A densidade de população na bacia apresenta correlação negativa com a cobertura por vegetação arbórea. O declive de Sen está no intervalo [-12,55; -0,12] com mediana de -3,34. Uma representação gráfica (Figura 46) análoga à Figura 45 foi feita para avaliar com mais detalhe essa relação.

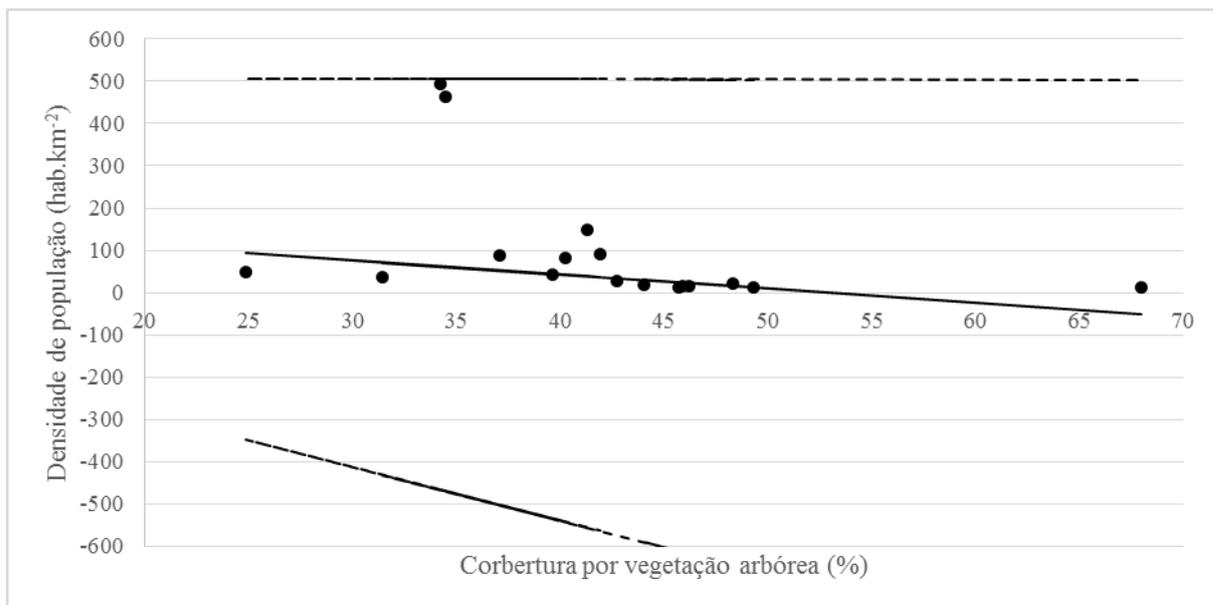


Figura 46: Densidade de população em função da cobertura por vegetação arbórea com representação dos declives de Sen associados com nível de confiança de 95%.

A Figura 40 mostra que existe uma tendência negativa entre urbanização e vegetação arbórea, porém as sub-bacias menos florestadas não são as mais densamente povoadas. Evidencia que o problema do desmatamento tem de ser considerado tanto em áreas rurais como em áreas urbanas. Fazendo abstração dos pontos correspondendo as sub-bacias menos florestadas (Cag1 e Cag2), observa-se uma relação não linear entre a ocupação urbana e a cobertura vegetal arbórea. Esse resultado mostra que além das relações entre fatores e variáveis de qualidade da água, as relações entre os próprios fatores não são lineares, o que reforça a escolha feita nessa Dissertação de utilizar a estatística não paramétrica.

5.1.9. Outras correlações

Todas as correlações entre fatores calculadas nessa pesquisa encontram-se na Tabela 28. As características morfométricas das bacias são os fatores que apresentaram menores correlações com os demais fatores. A densidade dessa matriz de correlação mostra que os fatores são em geral ligados uns aos outros, impondo cautela na hora de atribuir a um fator um efeito sobre uma variável de qualidade da água. Essa matriz abrange as tabelas acima comentadas e informa sobre outras correlações existentes entre os fatores. Foram comentadas as interações do uso e cobertura da terra com todos os tipos de fatores, menos as características morfométricas. Esse foco nas interações entre o uso da terra e os outros fatores se justifica pelo fato de que o uso e cobertura da terra é, de longe, o fator mais estudado em relação a qualidade da água, conforme colocado no Capítulo 1 com destaque para o Mapa 1.

Tabela 28: Resumo das correlações entre os fatores investigados nessa Dissertação.

Tau	AfloRoch	ArgiVA	CambiHap	CambiHum	LatoAmar	LatoVA	LatoVerm	NeoLit	NeoQuar	AltMean	DeclivMediaBac	PluvMean	AreaBac	DeclivMediaTrecho	DeclivMediaRio	FacForm	DensDren	IndCir	CoefComp	Pop200	PopBac	Dens200	DensBac	Água200	Arborea200	Arbustiva200	Pastagens200	Rural200	SoloExp200	Urba200	ÁguaBac	ArboreaBac	ArbustivaBac	PastagensBac	RuralBac	SoloExpBac	UrbaBac			
AfloRoch		+++	+	-	-	-	-	++		+++	+++	+++		++										+++	+++	+					+++	+++	+	-	-					
ArgiVA			++	+	-	-	++			+++	+++	+++		-	+									-	+++	+++	+					-	+++	+++	+	-				
CambiHap				++	+	-	++	++		+++	+++	+++												-	+++	+++	+					-	+++	+++	+	-				
CambiHum					++	+	-	++	++	+++	+++	+++												-	+++	+++	+					-	+++	+++	+	-				
LatoAmar						++	+	-	++	+++	+++	+++												+	+	-	+++	+++	+			-	+++	+++	+	-				
LatoVA							++	+	-	+++	+++	+++												+	+	+++	+++	+				++	++	-	-	+++	+++	+	++	
LatoVerm								++	+	+++	+++	+++												-	+	-	+				-	-	++	++	-	-	+++	+++	+	++
NeoLit									++	+++	+++	+++												-	+	-	+				-	-	++	++	-	-	+++	+++	+	-
NeoQuar										+	+	+	+											+	+	-	+												+	
AltMean										++	+++	+++												+++	+++	+					++	++	-	-	+++	+++	+	-		
DeclivMediaBac										+	+	+												-	+++	+++	+				-	-	+++	+++	+	-				
PluvMean										+++	+++	+++												-	+++	+++	+				-	-	+++	+++	+	-				
AreaBac										+	+	+												+++	+++	+														
DeclivMediaTrecho																																								
DeclivMediaRio										++	++	++												+	+	-					++	++	+	-	-					
FacForm										+	+	+																										++		
DensDren																																								
IndCir										++	++	++													+	+														
CoefComp										+	+	+																												
Pop200																								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
PopBac																								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Dens200																								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
DensBac																								+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Água200																																								
Arborea200																																								
Arbustiva200																																								
Pastagens200																																								
Rural200																																								
SoloExp200																																								
Urba200																																								
ÁguaBac																																								
ArboreaBac																																								
ArbustivaBac																																								
PastagensBac																																								
RuralBac																																								
SoloExpBac																																								
UrbaBac																																								

5.2. Correlações entre variáveis de qualidade da água

O ρ de Spearman foi computado entre as variáveis de qualidade da água para os 17 pontos de monitoramento da BHRP e os resultados foram organizados segundo a classificação adotada no Capítulo 1.

Tabela 29: Correlações entre variáveis de qualidade da água.

Variáveis		Cor	SDT	SSST	ST	Temp	Turbidez	AlcaTot	Cond	DurTot	DBO	DQO	OD	pH	SubTens	CaTot	CNLiv	ClTot	MgTot	KDiss	NaDiss	SulTot	CdTot	BaTot	FeDiss	MnTot	Zn	NO3	NO2	NNH3	NOT	FT	ColiTot	Ecoli	EstrFec	CIA	Feoft				
Físicas	Cor																																								
	SDT			+	++		+	+++	+++	+++	+++	+	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++				
	SSST		+		++		++	+++	+++	+++	+++	+	-			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			
	ST		++	++			++	+++	+++	+++	+++	+	-			++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+		
	Temp																											+													
	Turbidez		+	++	++				+	+	+	+	++						++	++	++	++	++	++	++	++	++							++	++	++	++	++			
Químicas	AlcaTot		++	++	++		+		+++	+++	+++	+	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+		
	Cond		++	+	++		+	++		+++	+++		-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++		
	DurTot		++	++	++		+	+++	+++		+++	++	+	-		++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	+	
	DBO		++	++	++		+	+++	+++	+++		++	+	-		++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	DQO		+	+	++		++	+		+++	++		-			++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	OD		-	-	-			-	-	-	-	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	pH																																								
	SubTens		+					+	+	+	+						+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+														
Íons dissolvidos	CaTot		++	+	++			+++	+++	+++	+++		-			++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++		
	CNLiv									+					+																										
	ClTot		++	++	++		++	+++	+++	+++	+++	+	-		+	++												++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	MgTot		++	+	++		++	+++	+++	+++	+++	+	+		+		++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	KDiss		++	++	++		++	+++	+++	+++	+++		-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	NaDiss		+	+	++		++	+++	+++	+++	+++	+	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	SulTot		++		++			+++	+++	+++	+++	+++	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Metais	CdTot			+	+					+	+		-		+	+																									
	BaTot		++	+	++		++	+++	+++	+++	+++	+	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	FeDiss		++	++	+		+	+++	+++	+++	+++	+			+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	MnTot		++	+	++		+	+++	+++	+++	+++	+++	-			++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	Zn		+	+	++		++	+++	+++	+++	+++	+++	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Nutrientes	NO3		++	+		+		+								++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++		
	NO2		++	++	++		++	+++	+++	+++	+++	+	-		++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	NNH3		++	+	++		++	+++	+++	+++	+++	+	-		++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	NOT		+	+	+		+	+++	+++	+++	+++	+	-		+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	FT		+	++	++	++		+++	+++	+++	+++	+++	+	-	+	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Biológicas	ColiTot		++	++	++		++	+++	+++	+++	+++	-			+	+												++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++		
	Ecoli		+		-	+	+	+++	+++	+++	+++	-		+	++	+													+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
	EstrFec		++	+		++	+	+++	+++	+++	+++	-			+	+												++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
	CIA																																								
	Feoft																																								

A Tabela 29 evidencia que existem numerosas correlações entre as variáveis de qualidade da água. De maneira geral, as variáveis apresentam correlações positivas, com exceção do oxigênio dissolvido, apresentando somente correlações negativas. Os parâmetros biológicos clorofila-a e feofitina não apresentaram nenhuma correlação com as demais variáveis. Essa informação é interessante porque mostra que a eutrofização não é somente devida à concentração de nutrientes, mas também a outros fatores. Nessa Dissertação, podemos inferir que a velocidade de escoamento foi um fator. Outro parâmetro que não se relaciona com os demais foi o pH, cuja evolução espacial ao longo do Eixo PPP foi comentada no Capítulo 4.

A análise das correlações da tabela 29 será apresentada na ordem explicitada na Tabela 30.

Tabela 30: Ordem adotada para a análise das correlações entre variáveis de qualidade da água

	Físicas	Químicas	Íons dissolvidos	Metais	Nutrientes	Biológicas
Físicas	1					
Químicas	2	7				
Íons dissolvidos	3	8	12			
Metais	4	9	13	16		
Nutrientes	5	10	14	17	19	
Biológicas	6	11	15	18	20	21

5.2.1. Variáveis Físicas

As séries de sólidos são correlacionadas entre elas, e os SST apresentam logicamente uma correlação significativa a nível de 99% com a turbidez. Nota-se que não há correlação com a temperatura, nem com o parâmetro “cor” da água, ressaltando que a cor da água e a turbidez são conceitos diferentes.

Os sólidos dissolvidos e os sólidos em suspensão, e a conseqüente turbidez, apresentam correlações com a maioria das variáveis químicas (AlcaTot, Cond, DurTot, DBO, DQO, OD), destacando-se uma influência negativa sobre o teor de oxigênio dissolvido na água. Os SDT estão correlacionados com a concentração de substâncias tensoativas.

Os íons dissolvidos não metálicos estão logicamente mais associados ao parâmetro “SDT” do que ao parâmetro “SST”. Nota-se as correlações do parâmetro “Cor” com as concentrações dos íons potássio (Kdiss), sódio (NaDiss) e magnésio (MgDiss). A concentração de magnésio é a única que apresenta uma correlação com a Turbidez. A concentração de cianetos livres não está correlacionada a nenhum parâmetro físico de qualidade da água.

O Cádmio, metal pesado, apresenta correlação somente com os sólidos em suspensão; outros metais estudados (BaDiss, MnDiss, ZnTot) com os SDT e os SST. O ferro dissolvido foi o único metal medido a ter influência sobre a cor do curso d’água, e a sua concentração não se relaciona com os sólidos em suspensão.

Os nutrientes (nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico e fósforo total) nos pontos de monitoramento são correlacionados com os parâmetros físicos, principalmente a cor e os sólidos dissolvidos. Os sólidos em suspensão somente com o nitrogênio amoniacal e o fósforo total. O parâmetro “Turbidez” não foi correlacionado com nenhum dos nutrientes, o que significa que a turbidez nos pontos monitorados da BHRP é principalmente devida à fração

mineral dos sólidos em suspensão. Existe uma correlação surpreendente entre a concentração de nitrato e a temperatura, apesar de não existir, ao conhecimento do autor, uma ligação entre esses dois parâmetros. O que pode ser suposto é que os dois parâmetros tendem a aumentar de forma independente, por razões diferentes, de montante para jusante. A temperatura aumenta em função da diminuição da altitude; o nitrato vai aumentando a jusante, por ser o nutriente em excesso: o fósforo parece ser o nutriente limitante segundo Figura 40 no Capítulo 4.

Os sólidos em suspensão e a turbidez têm correlações com as concentrações de bactérias do grupo coliformes (totais e *E. Coli*) e com a concentração de estreptococos fecais. Isso sugere a influência do escoamento superficial sobre a contaminação bacteriana na bacia. A concentração de *E. Coli* diminui com o aumento da temperatura, sugerindo uma diminuição a jusante da bacia.

De maneira geral, ficou clara a importância do monitoramento das variáveis físicas, permitindo explicar muitas das variações da qualidade da água na BHRP.

5.2.2. Variáveis Químicas

As variáveis “Alcalinidade Total”, “Condutividade”, “Dureza Total”, “DBO” e “DQO” apresentaram entre si correlações positivas, com exceção da DQO que não apresentou correlação com a condutividade elétrica. O oxigênio dissolvido está negativamente correlacionado com essas mesmas variáveis. O parâmetro “substâncias tensoativas” se relaciona com os parâmetros “AlcaTot”, “Cond” e “DBO”.

Logicamente, pode-se notar numerosas correlações entre os parâmetros químicos e as concentrações de íons dissolvidos. A condutividade elétrica, por exemplo, depende por definição das concentrações de íons dissolvidos. A dureza total é função das concentrações de magnésio e de cálcio, e a alcalinidade também é muito dependente da concentração de cálcio. A concentração de cianetos livres é correlacionada com a presença de substâncias tensoativas e a DBO. O OD tem correlação negativa com a maioria dos íons dissolvidos. O pH não influi sobre as concentrações de íons dissolvidos, devido a sua relativa constância na BHRP (ver Capítulo 4).

O Cádmiio é correlacionado com a dureza total e a DBO, sugerindo que ele é associado a fontes de efluentes orgânicos (DBO) e inorgânicos (MgDiss e CaDiss). As concentrações de metais (BaDiss, FeDiss, MnDiss, ZnTot) exibem correlações positivas com as variáveis “Alcalinidade Total”, “Condutividade”, “Dureza Total”, “DBO” e “DQO”. Uma exceção é o par “DQO” e “FeDiss”. As concentrações de metais são negativamente correlacionadas com o

OD, o parâmetro “FeDiss” voltando a ser exceção. A variação espacial do ferro e as relações com as outras variáveis químicas são diferentes dos outros metais analisados, implicando que os fatores determinando sua concentração são diferentes dos demais metais.

As variáveis “Alcalinidade Total”, “Condutividade”, “Dureza Total”, “DBO” e “DQO” são correlacionadas com os nutrientes “Nitrito”, “Nitrogênio Amoniacoal” e “Fósforo Total” indicando possíveis fontes em comum. O nitrato somente apresentou correlação com a condutividade, o que mostra que o nitrato como produto da ciclagem do nitrogênio, não costuma ser um elemento adicionado *in natura* ao meio, mas é o resultado da decomposição do nitrogênio orgânico e da desnitrificação. O nitrogênio orgânico total, parâmetro contemplando a fração orgânica dissolvida (peptídeos, purinas, aminas, aminoácidos, etc.) e particulada (bactérias, fitoplâncton, zooplâncton e detritos) possui correlações positivas com a condutividade, as substâncias tensoativas e a DBO. A correlação com a DBO é coerente, pois a presença de matéria orgânica determina a necessidade de oxigênio dissolvido para ser degradada.

A DBO e a DQO exibem correlações significativas a nível de 99% com os três grupos de bactérias analisadas pelo IGAM, mostrando-se bons indicadores de contaminação caso não pudesse ser realizado contagem de bactérias numa amostra. A alcalinidade também é relacionada à contaminação bacteriológica da água. Como não existe razão para pensar que essas variáveis estejam ligadas, supõe-se a existência de fontes comuns, por exemplo, o esgoto doméstico, para explicar que um aumento de alcalinidade é acompanhado de um aumento dos coliformes e estreptococos. Observa-se também que o teor de OD exhibe correlações negativas com as concentrações de bactérias.

5.2.3. Íons dissolvidos

Os parâmetros “cálcio total”, “cloreto total”, “magnésio total”, “potássio dissolvido”, “sódio dissolvido” e “sulfatos total” são positivamente correlacionados, sugerindo processos e fontes em comum para explicar as concentrações desses íons. O parâmetro “cianetos livres”, também conhecido como “cianetos iônicos”, é o único dessa categoria que não se relaciona com nenhum deles. O cianeto não é oriundo das cianobactérias apesar das palavras apresentarem uma raiz semelhante. Os cianetos são utilizados como venenos para a conservação, em silos, de grãos e pelas indústrias relativas a mineração e siderúrgicas (WHO, 2007).

Os íons dissolvidos não metálicos apresentam muitas correlações com os íons metálicos. “BaDiss” e “FeDiss” são positivamente correlacionados com todos os íons dissolvidos menos

os cianetos livres e o parâmetro “CaTot” no caso do ferro. O cádmio tem correlações com os parâmetros “CaTot”, “CNLiv” e “SulTot”. É interessante notar que a concentração de cianetos livres, que não está correlacionada com nenhum íon não metálico, tem uma correlação significativa a nível de 99% com a concentração de zinco e cádmio. A presença de cianetos livres na água pode, supostamente, estar ligada à indústria siderúrgica, não havendo mineração de metais expressiva na BHRP.

Os parâmetros “CITot”, “KDiss” e “NaDiss” são correlacionados com as concentrações de todos os nutrientes analisados, e o íon “CNLiv” com nenhum deles, demonstrando mais uma vez que ele é oriundo de fontes diferentes dos demais íons. A concentração do íon magnésio se relacionou somente com o fósforo total.

As concentrações de cianetos livres e de magnésio são os únicos a se correlacionar com as concentrações de bactérias. Das correlações com os nutrientes e os parâmetros biológicos, foi evidenciado o comportamento diferenciado desses dois íons.

5.2.4. Metais

O parâmetro “Cádmio”, único metal pesado dessa tabela, foi correlacionado com a presença de manganês e de zinco. O ferro dissolvido é o íon metálico que menos apresenta correlações com os demais, sendo apenas ligado ao bário.

O ferro dissolvido está correlacionado com a série de nutrientes e as mesmas correlações, menos com o nitrogênio orgânico total, são observadas com o bário. Os outros metais são pouco correlacionados com os nutrientes, sendo que não há correlação entre o cádmio e os nutrientes; o zinco se correlaciona somente com o nitrogênio amoniacal; e o manganês com o nitrogênio amoniacal e o nitrito. O nitrito e o nitrogênio amoniacal são os nutrientes que possuem mais correlações com os metais (três e quatro respectivamente); e o NOT o que menos possui, com uma correlação só.

Dos metais, o manganês e o zinco apresentam correlações significativas a nível de 99% com os três grupos de bactérias analisados. Podemos inferir que o MnTot e ZnTot são oriundos, em parte, da poluição difusa urbana. O cádmio se correlacionou com nível de 95% de confiança somente ao grupo de coliformes totais; e o bário e o ferro não exibem nenhuma correlação.

Essa análise das correlações dos metais pode ser sintetizada em dois grupos: de um lado o cádmio, o manganês e o zinco; de outro, o bário e o ferro dissolvido. Para cada grupo pode-se supor fonte(s) em comum. É importante lembrar que o zinco e o cádmio também possuem ligação com a concentração de cianetos livres, apontado uma possível fonte industrial para suas presenças na água.

5.2.5. Nutrientes

Observa-se correlações entre todos os nutrientes menos entre o nitrogênio amoniacal e o nitrato. O nitrato é a forma do nitrogênio mais amplamente incorporada pelos vegetais. O nitrogênio amoniacal, por ser originado dos efluentes domésticos e industriais, é transformado em nitrito (nitrificação) e logo em nitrato (desnitrificação). Como visto no Capítulo 4, a concentração de nitrato é influenciada pela concentração de nitrogênio amoniacal a montante como evidenciado na Figura 40. O nitrogênio amoniacal é um indicador de contaminação por efluentes. O fósforo e o nitrato provêm do esgoto doméstico e também do escoamento superficial. A correlação entre o nitrogênio amoniacal e o nitrogênio orgânico total apresenta um nível de significância inferior (95%) às outras correlações (99%).

A concentração de nitrogênio amoniacal é a única a exibir correlações significativas com as variáveis biológicas.

5.2.6. Variáveis biológicas

As correlações das variáveis biológicas com os outros tipos de variáveis já foram discutidas previamente. A repartição espacial desses três grupos de bactérias é sensivelmente diferente ao longo do Eixo PPP, porém foram evidenciadas correlações significativas a nível de 99% entre esses grupos, sugerindo que esses três grupos de bactérias têm fontes em comum. As concentrações de clorofila-a e de feofitina não foram ligadas a nenhuma outra variável química.

5.2.7. Considerações gerais

A Tabela 31 evidencia que, no geral, as variáveis de qualidade da água apresentam numerosas correlações entre si. As variáveis referentes aos nutrientes são as que mais se relacionam entre si; as variáveis biológicas e físicas apresentam menos correlações entre elas.

Tabela 31: Porcentagem de correlações com nível de confiança superior a 95% entre as categorias de variáveis de qualidade da água

	Físicas	Químicas	Íons dissolvidos	Metais	Nutrientes Biológicas	
Físicas	40%					
Químicas	52%	61%				
Íons dissolvidos	48%	71%	67%			
Metais	57%	70%	74%	60%		
Nutrientes	53%	63%	71%	56%	90%	
Biológicas	30%	40%	20%	28%	12%	30%

Para cada variável, foi contado o número de correlações significativas a nível de 95%. Os resultados estão apresentados na Tabela 32. Os parâmetros DBO, Sólidos Totais, Alcalinidade total, Sólidos Dissolvidos Totais, Condutividade Elétrica, Dureza Total, Cloreto Total, Sódio Dissolvido, Manganês Total, Zinco Total, Nitrogênio Amoniacal e Fósforo Total apresentaram 25 ou mais correlações com as demais variáveis de qualidade da água.

Os parâmetros biológicos exibiram poucas correlações: 18 para os coliformes totais, 15 para *E. Coli* e os estreptococos fecais. Destacaram-se os parâmetros “Clorofila-a” e “Feofitina” que não apresentaram nenhuma correlação com as demais variáveis de qualidade da água. A medição de clorofila-a é primordial para determinar o grau de eutrofização de um ambiente aquático. Na BHRP já existem e vem sendo construídas usinas hidrelétricas e pequenas centrais hidrelétricas, e o grau de eutrofização da água do reservatório é um parâmetro fundamental para a eficácia e o tempo de funcionamento dessas instalações, além do prejuízo a ictiofauna e outras comunidades aquáticas.

O pH da água influi sobre as concentrações de vários íons dissolvidos, em particular os íons metálicos como relatado na descrição das variáveis de qualidade da água. Porém, a variação do pH é quase nula na bacia, o que explica que o pH não teve correlação com nenhuma variável de qualidade da água.

Tabela 32: Variáveis de qualidade da água ordenadas por número de correlações com nível de confiança superior a 95%

DBO	ST	AlcaTot	SDT	Cond	DurTot	ClTot	NaDiss	MnTot	Zn	NNH3	FT	OD	SulTot	BaTot	SST	DQO	MgTot	KDiss	NO2	CaTot	FeDiss	ColTot	SubTens	NOT	Turbidez	Ecoli	EstrFec	NO3	CdTot	Cor	CNLiv	Temp	pH	ClA	Feoft
29	26	26	25	25	25	25	25	25	25	25	25	24	24	24	22	22	22	22	21	19	19	18	17	16	15	15	15	12	11	8	7	3	0	0	0

Com a análise das correlações das variáveis de qualidade da água, foi possível identificar possíveis fontes e mecanismos de contaminação da água. A análise das correlações com os fatores para a época da seca e chuva (sazonalidade) permitirá explicitar os fatores e mecanismos influenciando na qualidade da água na Bacia.

5.3. Correlações entre variáveis de qualidade da água e características das sub-bacias

5.3.1. Escolha dos fatores (variáveis independentes)

Como visto anteriormente, os tipos de solos nas sub-bacias têm correlações com os usos e coberturas dessas sub-bacias. Os três tipos de solos apresentando poucas correlações com os

usos e coberturas da terra são: os argissolos vermelhos-amarelos, os latossolos vermelhos e os neossolos quartzarênicos. Esses três tipos de solos são minoritários na área de estudo, com menos de 10% de cobertura de qualquer sub-bacia, como consta na Tabela 15 do Capítulo 2.

Ao estudar a variação espacial da qualidade da água no Eixo PPP, observou-se para muitos parâmetros de qualidade da água um gradiente correspondendo à porcentagem de urbanização da bacia. Alguns parâmetros, em particular, vários íons dissolvidos metálicos e não metálicos não seguem essa tendência, o que foi umas das razões para considerar o tipo de solo como fator determinante para a qualidade da água na área de pesquisa dessa Dissertação. Devido às fortes correlações entre tipos de solos e usos e coberturas (Tabela 25), decidiu-se não avaliar o impacto do tipo de solo sobre as variáveis de qualidade da água.

Para os fatores geográficos, a altitude, por apresentar correlações fortes com a declividade média nas sub-bacia foi descartada. A área da sub-bacia é um fator interessante por permitir identificar fenômenos acontecendo mais a jusante ou a montante da Bacia do rio Preto.

Os fatores morfométricos das sub-bacias apresentaram poucas correlações com os demais fatores. A declividade média do rio principal da sub-bacia foi descartada por apresentar uma correlação com a declividade média da sub-bacia. A declividade média do trecho não apresentou correlação com os demais fatores morfométricos nem com os fatores geográficos. Foi o único parâmetro calculado levando-se em consideração apenas o trecho precedendo o ponto de coleta e não toda a sub-bacia. A densidade de drenagem foi excluída de posteriores análises em razão de ser questionável, podendo depender mais do detalhamento do mapa de hidrografia do que de uma realidade geográfica. O coeficiente de compacidade e o índice de circularidade são calculados com uma formula semelhante, utilizando os mesmos dados (razão perímetro e área da bacia hidrográfica). Desse dois, foi guardado o coeficiente de compacidade para posteriores estudos. O fator de forma também foi considerado no resto desse trabalho.

A população da sub-bacia está ligada estatisticamente com o tamanho da sub-bacia e com a densidade de população, sendo um parâmetro pouco útil de se investigar em relação a qualidade da água. A densidade de população nas faixas ripárias e nas sub-bacias possuem uma correlação forte, sendo guardado somente a densidade de população a nível de sub-bacia.

As correlações entre os usos e coberturas a nível de bacia e os usos e coberturas numa faixa ripária de 200m são muito fortes como evidenciado na Figura 47 e na tabela associada. Essas correlações eram esperadas; de fato, foi mostrado anteriormente que os usos e coberturas nas sub-bacias eram muito similares aos usos e coberturas nas faixas ripárias ao longo da hidrografia da área de estudo.

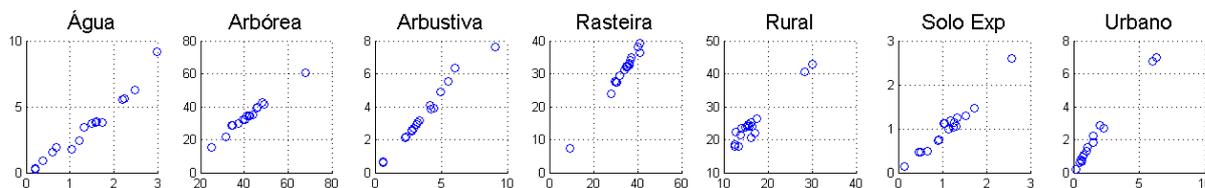


Figura 47: Gráficos de dispersão evidenciando as correlações muito fortes entre usos e coberturas a nível de bacia (Eixo x) e a nível de *buffer* de 200m (Eixo y).

Tabela 33: Coeficientes de correlação associados à Figura 47

	Água	Arbórea	Arbustiva	Rasteira	Rural	Solo exposto	Urbano
ρ	0,995	0,998	0,993	0,988	0,770	0,931	0,978
valor-p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

A consequência dessas correlações quase perfeitas (valor do ρ de Spearman próximo a 1 conforme Tabela 33) é que fica indiferente o impacto do uso e cobertura nas margens e a nível das sub-bacias como feito por Sliva e Williams (2001), por exemplo. Segundo a revisão bibliográfica efetuada e a ordem dos rios segundo Strahler (1957), nos pontos de coleta, foi de se esperar uma maior importância do uso e cobertura a nível de sub-bacia. Foi nessa escala que foi desenvolvido o resto desse trabalho.

Um dos objetivos desse estudo foi determinar a importância da contaminação difusa. Foi mostrado que a porcentagem de ocupação por vegetação rasteira tinha uma correlação significativa com a porcentagem de ocupação urbana densa. Essa dependência entre esses dois fatores fundamentais nesse estudo poderia prejudicar a análise. Foi encontrado uma solução: somando a ocupação esparsa (rural) com a cobertura por vegetação rasteira, obtém-se uma variável menos dependente (porém, ainda apresentando uma correlação não paramétrica com $p < 0,05$) da porcentagem de ocupação urbana densa (Figura 48). Essa nova variável recebe como abreviação nas tabelas de PaRuBac (PAstagens e ocupação RUral a nível de BACia). O cálculo do declive de Sen e a separação dos dados de qualidade da água entre meses secos e chuvosos permitiu uma boa identificação da fração difusa de contaminação dos cursos d'água.

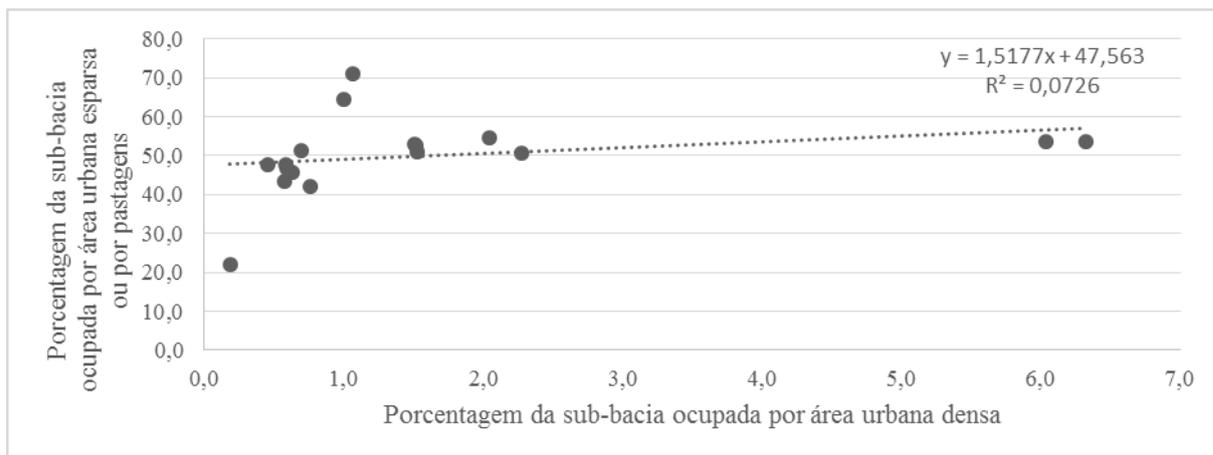


Figura 48: Ocupação esparsa ou por pastagens (PaRuBac) em função da ocupação por área urbana densa (UrbaBac).

O estudo da correlação entre os dados de uso e cobertura da terra mostrou também uma forte ligação entre vegetação arbórea e vegetação arbustiva. Como evidenciado no Capítulo 3 e mostrado na Figura 49, a vegetação arbórea e a vegetação arbustiva seguem uma repartição espacial similar nas sub-bacias da BHRP.

Uma nova classe “ArbBac” foi criada, correspondendo à soma das classes ArboBac e ArbuBac.

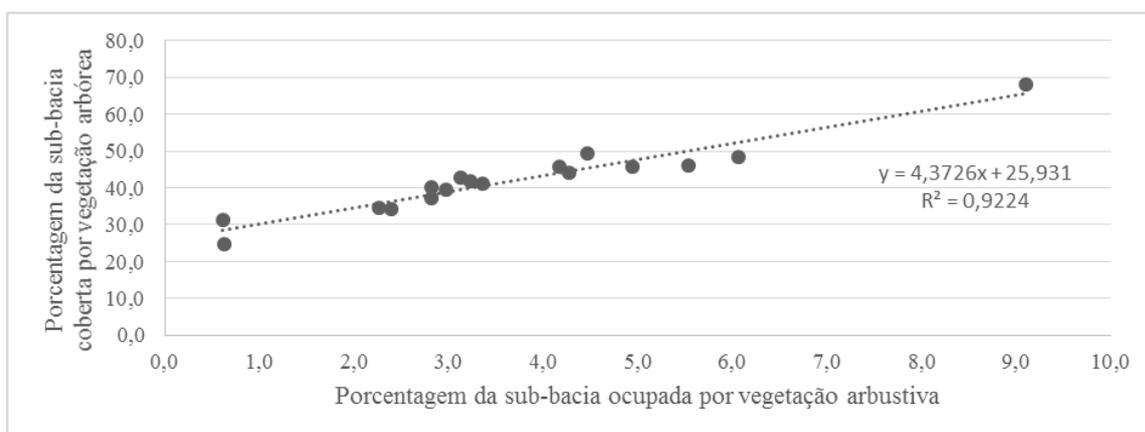


Figura 49: Cobertura por vegetação arbórea (ArboBac) em função da cobertura por vegetação arbustiva (ArbuBac).

5.3.2. Variáveis físicas

Observou-se que tanto no período de estiagem como no período de chuva, a temperatura da água aumenta em função da área da sub-bacia (Tabela 34). O declive de Sen é de $3,1 \cdot 10^{-4}$ na seca, correspondendo ao inverno na área de estudo, e é de $3,7 \cdot 10^{-4}$ no período da chuva, correspondendo ao verão. O declive de Sen se entende da seguinte maneira: na seca a

temperatura do curso d'água aumenta em média de 0,00031 graus Celsius a cada quilômetro quadrado que aumenta a bacia hidrográfica do mesmo.

A declividade média e a pluviometria média anual são negativamente correlacionadas ou não apresentam correlações com as variáveis físicas de qualidade da água. Os solos na área de estudo, são típicos de solos encontrados nos trópicos úmidos: altamente intemperizados e profundos. Era de se esperar que a declividade média e a pluviometria influenciassem positivamente sobre os sólidos e a turbidez. Essa ausência de correlações positivas, e a presença de correlações negativas indica a predominância de fatores antrópicos na determinação da quantidade de sólidos na água na BHRP. O único fator morfométrico que teve influência sobre as variáveis físicas foi o coeficiente de compacidade das bacias, indicando a tendência a enchentes, que se mostrou positivamente correlacionado com o parâmetro SDT durante a estação chuvosa.

A densidade de população e a porcentagem de ocupação por área urbana densa apresentaram correlações positivas com todas as variáveis físicas na seca, com exceção da turbidez para “DensBac”. A classe “PaRuBac” (pastagem e rural) apresentou também correlações positivas com os sólidos. O indicador de declive de Sen permite comparar as influências relativas das duas classes de uso e cobertura. Encontraram-se declives de 0,922 e de 0,334 para os parâmetros SDT e SST para a classe “PaRuBac” e declives de 10,806 e 5,193 para a classe “UrbaBac”. Nota-se que os declives são mais de 10 vezes maiores para a classe “UrbaBac”, destacando que o uso urbano tem um peso desproporcional sobre a qualidade da água (Allan, 2004). O parâmetro “Cor” foi influenciado somente pela classe de uso e cobertura “UrbaBac”, e o fator “Área da Bacia”.

O efeito “filtro” (TUNDISI & TUNDISI, 2010; ROCHA & COSTA, 2015) da cobertura por vegetação arbórea ou arbustiva (ArbBac) foi verificado através das correlações negativas significativas a nível de 99% com os parâmetros SDT, SST e ST. O indicador de declive de Sen é de -1,722 para os sólidos totais, indicando que a vegetação arbórea e arbustiva tem o potencial de reduzir a carga de sólidos nas águas superficiais da BHRP. O solo exposto na área de estudo teve correlação positiva com a turbidez na seca, corroborado por LI et al. (2009). Wantzen & Mol (2013) estudaram o impacto da construção de estradas em regiões tropicais sobre a qualidade da água. Eles afirmaram que os sedimentos depositados nas margens dos cursos d'água durante as cheias voltam para dentro d'água durante a estiagem, devido à instabilidade das margens na ausência de mata ripária.

Tabela 34: Correlações e declives de Sen entre variáveis físicas e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac	
SECA	Cor			+				++						++	
	SDT	--	-					++	++	--	++	+	++	++	
	SST	--			-			++	++	--	+			++	
	ST	--	--					++	++	--	++			++	
	Temp			+	+								-		
	Turbidez	-											+	++	
	Cor			8,1E-04				0,015							1,200
	SDT	-4,114	-0,048					0,146	7,367	-0,983	0,922	0,814	7,283		10,806
	SST	-1,367			-0,436			0,055	5,707	-0,321	0,334				5,193
	ST	-6,526	-0,078					0,215	14,978	-1,722	1,580				17,050
	Temp			3,1E-04	0,113									-1,435	
	Turbidez	-0,640												2,912	1,655
CHUVA	Cor														
	SDT	--	-				+	++	++	--	++	+		++	
	SST														
	ST	-						++	++	-	+			++	
	Temp			+			+					+			
	Turbidez														
	Cor														
	SDT	-3,333	-0,039				21,232	0,125	8,827	-0,818	1,022	0,631			9,734
	SST														
	ST	-3,529						0,150	17,428	-0,964	1,088				11,885
	Temp			3,7E-04			5,574						0,198		
	Turbidez														

Durante a estação chuvosa não se observou correlação com os sólidos em suspensão (SST) nem com a Cor da água. As correlações continuam as mesmas entre os SDT e as classes de uso e cobertura. Os declives de Sen tem valores aproximadamente iguais, porém, como as vazões são maiores, significa que as cargas de sólidos acompanham. Os resultados apresentados aqui são coerentes com a literatura. Durante a estiagem, (PRATT; CHANG, 2012) acharam uma correlação positiva com a densidade de estradas e ruas; e negativa com a altitude e declividade média (TU; XIA, 2008), (PARK et al., 2014) e (SLIVA; WILLIAMS, 2001). Isso confirma o impacto da urbanização sobre as concentrações de sólidos em suspensão e dissolvidos. O aporte de sólidos por áreas cobertas de vegetação rasteira (LI et al., 2012) e moradias rurais VANZELA et al. (2010), foi comprovado na BHRP. Os estudos de Park et al.

(2014) e SLIVA & WILLIAMS (2001) também confirmam o papel da vegetação arbórea na retenção dos sólidos.

Não foi encontrada nenhuma correlação com os SST durante a estação chuvosa. Para entender o porquê, foi realizado um gráfico boxplot (Figura 50) representando os dados de SST na estação seca e na estação chuvosa nos pontos amostrais da área de estudo.

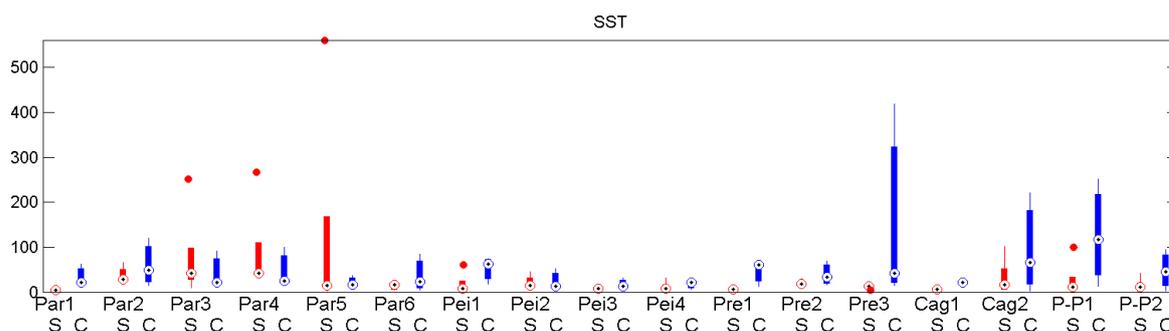


Figura 50: Boxplot do parâmetro SST na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.

Na seca, é possível ver que as maiores concentrações ocorrem ao percorrer a área urbana de Juiz de Fora (Par3,4 e 5). Já no ponto Par6, após o encontro dos rios Paraibuna e Peixe, as concentrações são baixas.

Na maioria dos pontos, a mediana de SST durante a estação chuvosa é superior à mediana durante a estação seca. Isso mostra a influência do escoamento superficial (fenômeno difuso) e do revolvimento dos sedimentos. Destacam-se os pontos Pre3, Cag2, P-P1 e P-P2 que possuem concentrações de SST bem acima dos demais pontos. Dentro dos fatores escolhidos, nenhum explica essa diferença. A resposta pode ser que um evento chuvoso aconteceu somente nessa parte da bacia nos dias precedendo a coleta (não ocorreu nenhum evento chuvoso durante as coletas segundo os dados disponibilizados pelo IGAM), ou que as barragens do baixo curso do rio Preto liberaram uma parte do sedimento acumulado durante a seca. O rio Cágado, porém, não possui barragem no baixo curso. O caso do parâmetro SST durante a estação chuvosa ilustra o conceito de correlação espacial não estacionária, onde a correlação com o uso e cobertura da terra varia de acordo com a posição na bacia. Ela pode ser ligada ao uso urbano na parte mais urbanizada da bacia e às pastagens onde atuam processos erosivos nas outras partes da área de estudo. Essas correlações são melhor entendidas utilizando a *Geographically Weighed Regression* (BRUNSDON et al., 1996) - regressão geograficamente ponderada -, introduzida por (TU & XIA, 2008) no caso dos estudos relacionando a qualidade da água com o uso e cobertura da terra. Essa metodologia foi utilizada com sucesso para identificar relações não

estacionárias por vários autores (HUANG et al., 2015; PRATT & CHANG, 2012; TU, 2011; WAN et al., 2014), porém necessita de mais pontos amostrais, no mínimo 30, para apresentar resultados significativos.

5.3.3. Variáveis químicas

A tabela 35 resume os resultados encontrados para os parâmetros AlcaTot, Cond, DurTot, DBO, DQO, OD, pH e SubTens. Os fatores físicos (geográficos e morfométricos) exibem correlações negativas com as variáveis químicas, com exceção do OD. Resultados opostos eram esperados. De fato, o aumento da pluviometria implica um aumento do intemperismo das rochas, fonte natural para explicar a alcalinidade, a dureza e a condutividade da água. Os fatores antropogênicos então explicam melhor a variação da qualidade da água para esses parâmetros.

Nas duas estações foram evidenciadas correlações semelhantes. A densidade de população e a classe UrbaBac tiveram correlações positivas com todas as variáveis, menos com o pH - não teve correlação -; e com o OD - a correlação foi negativa -; indicando uma piora da qualidade da água devido a urbanização. Um indicador simples de se medir e amplamente usado é a Condutividade Elétrica (Cond). A Condutividade Elétrica se correlaciona com numerosas variáveis de qualidade da água. (WANG; YIN, 1997) encontraram 160 variáveis tendo correlação significativa com ela. Os declives de Sen entre esse parâmetro e a classe UrbaBac foram semelhantes nas duas estações com valores de 22,84 e de 19,45. A mesma correlação é relatada por vários estudos para todas as estações (TU; XIA, 2008; ZHOU; WU; PENG, 2012). Desses valores semelhantes, podemos inferir que existe uma fração de Condutividade devida a fontes pontuais e uma fração devido ao escoamento superficial em ambiente urbano. Pode-se fazer a mesma análise para a classe PaRuBac.

Tabela 35: Correlações e declives de Sen entre variáveis químicas e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac	
SECA	AlcaTot	--	--					++	+	--	++	+		++	
	Cond	--	--				+	++		--	++	+	+	++	
	DurTot	--	--					++	++		++			++	
	DBO	--	--					++	++	--				++	
	DQO	--	-					++	++	--	++			++	
	OD	++	++					--	--	++	--			--	
	pH														+
	SubTens	--						++	++	--				++	++
	AlcaTot	-1,425	-1,6E-02					5,3E-02	2,186	-0,306	0,293	0,325			4,076
	Cond	-7,308	-7,5E-02				26,34	3,3E-01	17,733	-1,682	1,602	1,115	4,209		22,842
	DurTot	-1,783	-2,1E-02					5,7E-02	4,160	-0,471	0,452				4,178
	DBO														
	DQO	-1,587	-1,3E-02					4,0E-02	3,740	-0,285	0,275				3,462
	OD	0,170	1,7E-03					-8,6E-03	-0,500	0,033	-0,029				-0,607
pH						0,49									
SubTens															
CHUVA	AlcaTot	--	--					++	++	--	++			++	
	Cond	--	--					++		--	++	+		++	
	DurTot	--	--					++	++		++			++	
	DBO	--	--					++	++	--				++	
	DQO							+						+	
	OD	++	+					--	--	++	-			--	
	pH		-									+			
	SubTens	--						++		-				++	
	AlcaTot	-2,155	-2,4E-02					5,5E-02	3,293	-0,428	0,366				4,183
	Cond	-6,565	-7,2E-02					2,8E-01	13,057	-1,585	1,524	1,171			19,452
	DurTot	-1,950	-2,0E-02					5,8E-02	3,617	-0,369	0,355				4,596
	DBO														
	DQO							3,0E-02							3,017
	OD	0,160	1,3E-03					-5,8E-03	-0,440	0,026	-0,025				-0,396
pH		-5,5E-04										0,027			
SubTens															

A CETESB (CETESB, 2009) considera que no Brasil, águas com condutividade acima de $100 \mu\text{s.cm}^{-1}$ podem ser consideradas como poluídas. Isso também mostra que de “apenas” 5% de urbanização, quando não há tratamento adequado dos efluentes, é suficiente para a água ser considerada poluída: o limiar de $100 \mu\text{s.cm}^{-1}$ é atingido multiplicando 5 vezes o declive de

Sen (justificando o 5% de urbanização acima mencionado) de aproximadamente 20 nas duas estações, entre a classe UrbaBac e a condutividade (Tabela 35).

A classe PaRuBac exibiu as mesmas correlações, menos com os parâmetros DBO e SubTens para os quais não teve correlação. No que se refere a DBO e DQO, (LEE et al., 2009) também encontrou um resultado semelhante, com correlações positivas entre o uso urbano e os parâmetros DBO e DQO, e somente com a DQO no caso do uso agrícola. A classe RurBac teve influência positiva somente sobre os parâmetros AlcaTot e Cond na seca; e sobre os parâmetros Cond e pH na chuva. Essa influência positiva sobre o pH pode estar associada à técnicas de correção do pH do solo em pequenas lavouras familiares e agricultura de subsistência, visando a elevar o pH, em geral ácido do solo na área de estudo, para um melhor rendimento dos cultivos.

O oxigênio dissolvido é um parâmetro fundamental para a manutenção da vida aquática e a biodiversidade nesse meio. Baixos teores de OD na água levam a processos anaeróbios, resultando em maus cheiros característicos de córregos e rios urbanos. As classes AguaBac, DensPop, UrbaBac, e PaRuBac influenciaram negativamente o teor de OD. A classe AguaBac, como visto anteriormente tem correlação com a classe UrbaBac, e não é possível distinguir o efeito das represas, assumindo que a influência sobre os parâmetros de qualidade da água é oriunda do uso urbano. O OD se relacionou com a declividade média das bacias nas duas estações, porém, não teve correlação com a declividade média do rio principal (DecMedTr). É possível que a maioria dos trechos encachoeirados nos rios principais tenham sido aproveitados para construção de PCHs e UHEs, e que as cachoeiras se encontraram mais nos afluentes dos rios principais. A classe UrbaBac e o fator DensPop exibem correlações negativas (PRATT & CHANG, 2012; URIARTE et al., 2011; VANZELA et al., 2010; ZHOU et al., 2012) e fortes declives de Sen em relação ao parâmetro OD. O declive é de -0,61 na seca e de -0,40 na chuva com relação à classe UrbaBac, indicando que a diluição atenua o potencial poluidor do esgoto doméstico, que aparece como o principal responsável pelo baixo OD. Observa-se também um declive de Sen atenuado para a classe UrbaBac na estação chuvosa com o parâmetro DQO: 3,46 na seca versus 3,02 na chuva. A classe PaRuBac exhibe também correlações negativas com o OD. É interessante notar que o declive de Sen é similar na seca e na chuva (-0,029 e -0,024), indicando um equilíbrio entre o aporte de matéria orgânica do escoamento superficial na estação chuvosa e lançamentos pontuais das moradias rurais.

A correlação entre a alcalinidade e a urbanização também foi encontrada por Sliva & Williams (2001). Zhou et al. (2012) não acharam uma correlação direta entre a urbanização e a dureza, porém o PIB das sub-bacias foi um bom indicador.

A classe ArbBac melhorou quase todos os parâmetros de qualidade da água. Correlações positivas com o OD foram encontradas entre outros autores, por Pratt & Chang (2012) e Vanzela et. al (2010) para diferentes escalas de análises. Diminuições de DQO foram documentadas por Park et al. (2014) , Lee et al. (2009) e Hwang et al. (2007).

A DBO e o parâmetro SubTens apresentaram correlações, mas devido ao grande número de medições abaixo do limite de detecção, não foi possível determinar o declive de Sen. Os Boxplot dos dois parâmetros (Figura 51 e Figura 52) permitem estudar o comportamento deles na área de estudo.

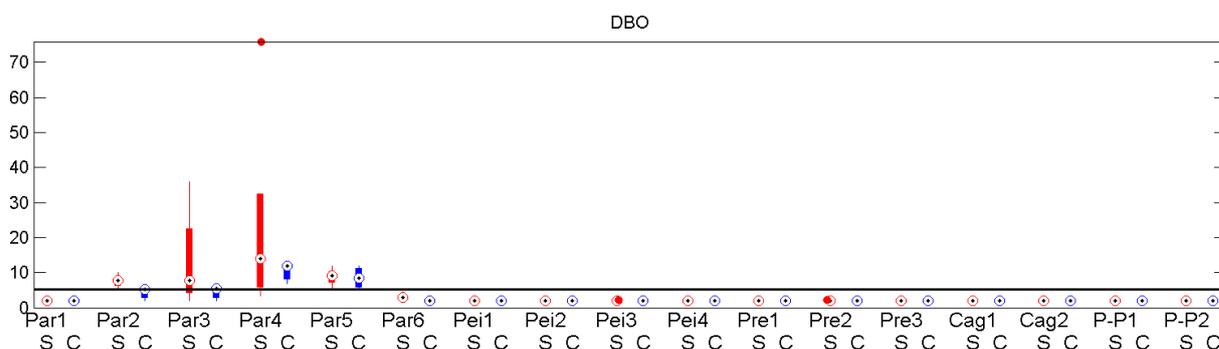


Figura 51: Boxplot do parâmetro DBO (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.

A $DBO_{5,20}$ foi detectada do ponto Par2 ao ponto Par6. Duas medições acima do limite de detecção também foram feitas na estação seca para os pontos Pei3 e Par2. Para os pontos Par3 e Par4, a influência da área urbana de Juiz de Fora é nítida, tendo os valores máximos do parâmetro durante a seca. O ponto Par2 pode sofrer influência da área urbana de Ewbank da Câmara. Segundo Von Sperling (2005), cada habitante produz em média 160g de DBO por dia, e o esgoto doméstico contém tipicamente entre 150 e 350 $mg_{DBO}.L^{-1}$. A concentração de aproximadamente 75 $mg_{DBO}.L^{-1}$ observada no ponto Par4 demonstra que durante estiagens severas, uma fração significativa da água do rio Paraibuna nesse trecho é oriunda do esgoto doméstico. O trabalho de Soares & Dutra (2010) demonstrou o impacto do lançamento de esgoto no trecho urbano do rio Paraibuna sobre os níveis de OD. Há uma estimativa de 1,126 $m^3.s^{-1}$ de esgoto não tratado lançado no rio Paraibuna. Esse trabalho foi realizado numa época de estiagem, porém as vazões eram próximas a 30 $m^3.s^{-1}$. Segundo os dados de vazão

disponibilizados para a estação fluviométrica da ANA n° 58.480.500, as vazões de estiagens durante as coletas de 2013 e 2014 da ANA estavam bem abaixo, entre $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

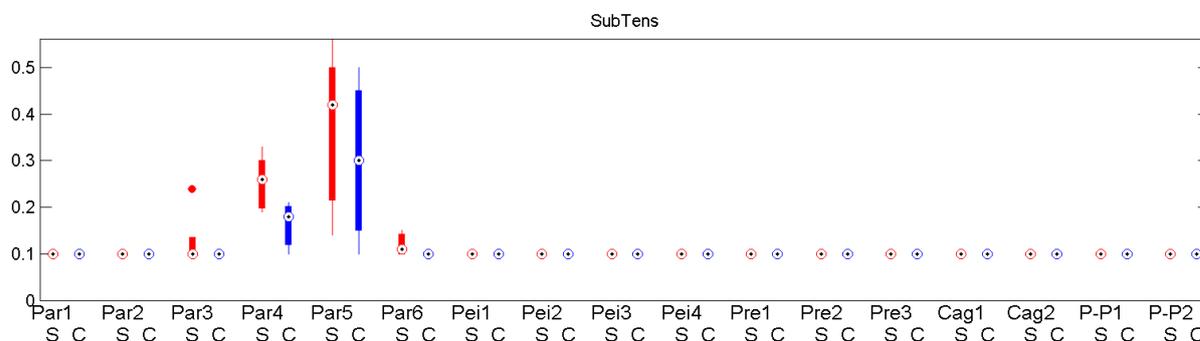


Figura 52 Boxplot do parâmetro Substâncias Tensioativas (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.

As substâncias tensoativas, chamadas também de surfactantes estão presentes no sabão em pó. Observam-se concentrações significativas somente entre o ponto Par2 e o ponto Par6. As concentrações são mais elevadas na seca. Pelo fato dessas substâncias ficarem na superfície da água, o impacto da cidade de Juiz de Fora é visível até depois do encontro com o rio do Peixe, no ponto Par6 durante a seca, conforme Figura 52.

5.3.4. Íons dissolvidos

Os resultados das correlações entre os fatores escolhidos e as concentrações de íons dissolvidos não metálicos foram compilados na Tabela 36.

Na estação seca, todos os parâmetros (CaTot, CNLiv, CITot, MgTot, KDiss, NaDiss e SulTot) se correlacionaram com o as classes UrbaBac, DensBac e PaRubac. Nota-se que as correlações apresentem um nível de confiança de 99% para todos os parâmetros com a classe UrbaBac; e os parâmetros CaTot, CITot, KDiss e NaDiss com a classe ParuBac. As correlações são significativas a nível de 95% para os parâmetros CNLiv, MgTot, e SulTot e a classe ParuBac. A correlação forte de CITot com a ocupação urbana na seca foi relatada por (BU et al., 2014); (TU; XIA, 2008) encontraram também correlações positivas para essa classe e a densidade de população com os parâmetros CaTot, CITot, MgTot, NaDiss, KDiss. No trabalho desenvolvido por LI et al. (2009), não foram detectadas correlações entre o uso urbano numa faixa ripária de 100 metros e esses íons dissolvidos.

Tabela 36: Correlações e declives de Sen entre os íons dissolvidos não metálicos e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac	
SECA	CaTot	--	--					++	++	--	++			++	
	CNLiv	--		-				+	+	-	+		+	++	
	ClTot	--	--	+			+	++	++	--	++	++		++	
	MgTot	-	-					++		-	+	+		++	
	KDiss	--	--					++	++	--	++			++	
	NaDiss	--	--					++	+	--	++			++	
	SulTot	--	-					++	++	--	+			++	
	CaTot	-0,601	-6,5E-03					1,6E-02	1,542	-0,165	0,180				1,222
	CNLiv														
	ClTot	-0,462	-6,1E-03	2,0E-04			2,799	2,4E-02	1,075	-0,150	0,147	0,174			1,605
	MgTot	-0,061	-9,8E-04					2,9E-03		-0,017	0,015	0,033			0,244
	KDiss	-0,113	-1,3E-03					5,9E-03	0,359	-0,028	0,028				0,398
	NaDiss	-0,343	-4,0E-03					2,3E-02	0,799	-0,092	0,082				1,506
	SulTot														
CHUVA	CaTot	--	--					++	++	--	++			++	
	CNLiv														
	ClTot	--	--					++	++	--	++			++	
	MgTot	-													
	KDiss	--	--					++	++	--	++			++	
	NaDiss	--	--					++	+	--	++			++	
	SulTot	--	-					++	++	--	++			++	
	CaTot	-0,714	-1,0E-02					2,2E-02	1,535	-0,182	0,155				1,752
	CNLiv														
	ClTot	-0,423	-4,3E-03					1,9E-02	1,097	-0,119	0,109				1,396
	MgTot	-0,067													
	KDiss	-0,194	-2,2E-03					6,9E-03	0,560	-0,052	0,063				0,508
	NaDiss	-0,325	-2,7E-03					1,8E-02	0,557	-0,065	0,057				1,271
	SulTot														

Para uma classe de uso e cobertura chamada de *Open Undeveloped Land*, podendo corresponder à classe PaRuBac dessa dissertação (TU; XIA, 2008) não encontraram correlações, ao contrário do resultado dessa Dissertação. A classe RurBac teve uma influência positiva somente durante a estação seca sobre os parâmetros MgTot e KDiss. Essa classe adotada nessa Dissertação pode estar associada à classe Moradias Rurais do estudo de (VANZELA; HERNANDEZ; FRANCO, 2010), que também achou uma correlação positiva com o magnésio. É interessante notar que o solo exposto teve uma correlação com o parâmetro cianetos livres durante a seca, mas na ausência de mineração de metais na BHRP é difícil

explicar essa correlação. Foram localizadas duas pedreiras na área de contribuição do ponto Par4 e uma na área de contribuição do ponto Pei4. Durante a estiagem, o parâmetro CITot aumenta a jusante das bacias sem se tornar motivo de preocupação, já que a sua concentração em qualquer ponto da bacia se mantém muito abaixo do limite da Resolução CONAMA n° 357/2005. O parâmetro CNLiv apresenta uma tendência inversa, tendendo a apresentar concentrações maiores nas menores sub-bacias estudadas nessa Dissertação.

As correlações evidenciadas para os fatores UrbaBac e PaRuBac durante a estação chuvosa foram as mesmas, com exceção dos parâmetros CNLiv e MgTot que não apresentaram nenhuma correlação. Declives de Sen superiores foram encontrados na chuva para os parâmetros CaTot e KDiss no que se refere ao uso urbano, indicando que há poluição difusa através do escoamento superficial das áreas impermeabilizadas para esses parâmetros. No caso da classe PaRuBac, os declives de Sen foram menores na estação chuvosa para os parâmetros CITot e NaDiss, indicando que há fontes pontuais de contaminação responsáveis pelo aumento desses parâmetros nas áreas rurais da BHRP. O parâmetro que mais se destacou em relação a evolução do declive de Sen foi o potássio dissolvido (KDiss) para a classe PaRuBac, dobrando entre a estação seca e a estação chuvosa, passando de 0,028 para 0,063, indicando que sua concentração em bacias rurais se explica parcialmente pelo escoamento superficial e sub-superficial.

A classe ArbBac teve uma correlação negativa com as concentrações da maioria dos íons dissolvidos nas duas estações. Como foi mostrado para os parâmetros físicos e químicos, a vegetação arbórea e arbustiva tem um papel de filtro para esses elementos.

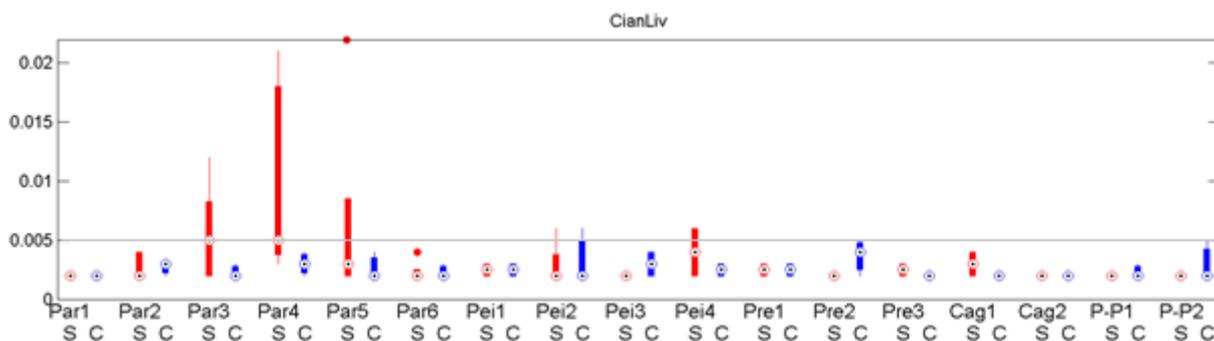


Figura 53: Boxplot do parâmetro Cianetos Livres (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha cinza marca a concentração limite aceita para águas de Classe 2 segundo o CONAMA.

Como evidenciado na Figura 53, a variação temporal e espacial do parâmetro CNLiv não seguiu um padrão facilmente identificável. Os efluentes industriais e o esgoto doméstico parecem ser os maiores responsáveis pelas concentrações observadas dos pontos Par2 até Par5,

já que as maiores indústrias metalúrgicas se localizam a montante do ponto Par3 e a área urbana de Juiz de Fora entre Par3 e Par5. As concentrações observadas nos pontos Pei2 e Pei4 não foram explicadas pelas características das sub-bacias levantadas nessa Dissertação.

Nos pontos Pei3, Pre2 e P-P2 houve um aumento da concentração de cianetos livres durante as cheias, indicando que existem fontes difusas de cianetos livres na BHRP. Os maiores valores encontrados nesses pontos estão iguais ou superiores ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 e evidenciam a necessidade de mais investigação a respeito desse parâmetro de qualidade da água.

Não houve nenhuma correlação evidenciada com o parâmetro MgTot para a estação chuvosa. Além disso, foi mostrado no Capítulo 4 que esse parâmetro não apresentava uma evolução espacial acompanhando o gradiente de urbanização. A Figura 54 mostra que para a maioria dos pontos amostrais, a concentração de magnésio na água é superior durante a estação chuvosa, indicando uma fonte difusa não identificada dentro dos fatores escolhidos.

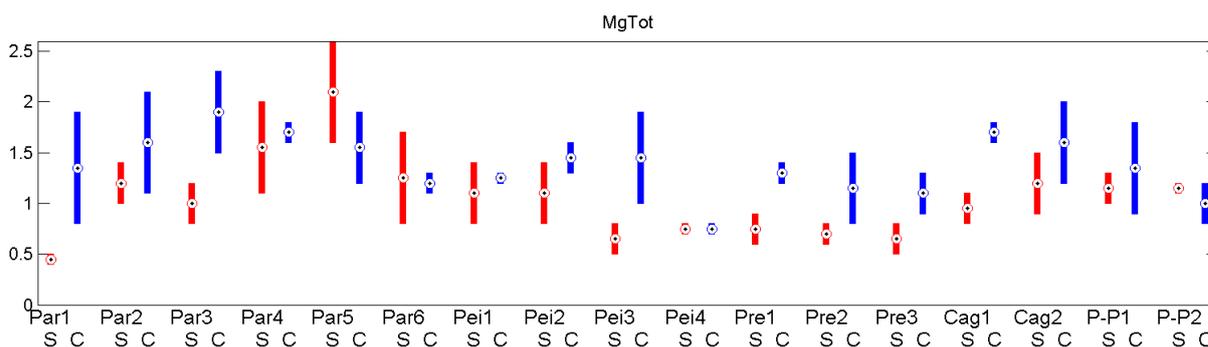


Figura 54: Boxplot do parâmetro Magnésio Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP

Por apresentar na maioria dos pontos valores inferiores ao limite de detenção (5 mg/L), inerente à metodologia utilizada pelos laboratórios do IGAM, não foi computado o cálculo do declive de Sen para o parâmetro Sulfatos Totais. A Figura 55 mostra que existe uma influência das indústrias de Juiz de Fora, em maioria localizadas a montante do ponto Par3 e Par5. As concentrações similares na estação chuvosa e na estação seca apontam por fontes pontuais e difusas.

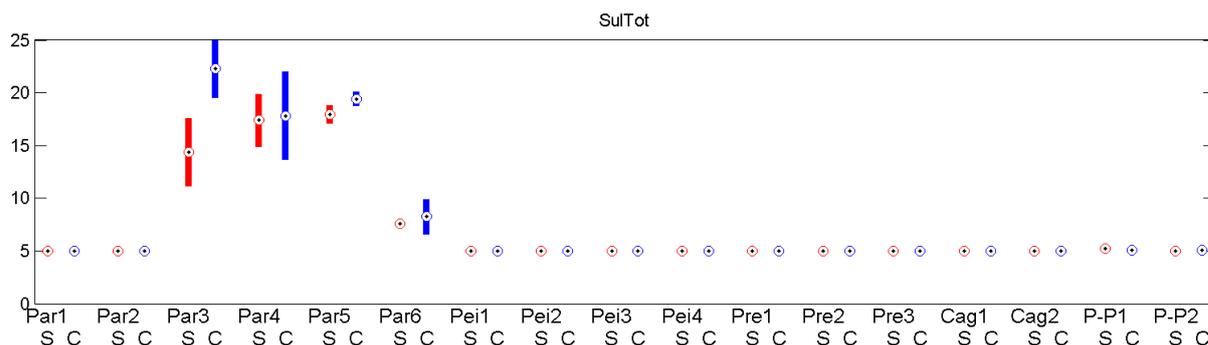


Figura 55: Boxplot do parâmetro Sulfatos Totais (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP.

5.3.5. Metais

Dentro dos metais analisados, somente o Cádmio (CdTot) e o Chumbo (PbTot) são considerados como metais pesados. Sendo detectados em poucos pontos, não foi possível calcular os declives de Sen para esses parâmetros. Os parâmetros BaTot e MnTot apresentaram correlações positivas com as classes PaRuBac e UrbaBac nas duas estações; ZnTot exibe as mesmas correlações, menos com a classe ParuBac na chuva. O parâmetro FeDiss teve uma correlação na chuva com a classe PaRuBac e não há correlação com o uso urbano nessa estação. A concentração de ferro na água, ultrapassa o limite da Classe 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005a) em vários pontos da bacia (ver Capítulo 4, Figura 37). Podemos concluir que as concentrações observadas são devidas em primeiro lugar à poluição difusa, e em segundo plano, à ocupação urbana ou industrial. Os parâmetros ZnTot e MnTot também apresentaram violações da Resolução CONAMA 357/2005 para águas de Classe 2. Na Tabela 37, observamos que há uma componente devido ao uso urbano e suas fontes pontuais e outra devido à contaminação difusa para o parâmetro MnTot; já para ZnTot, não há correlação com a classe PaRuBac na chuva, indicando que a contaminação é essencialmente ligada à classe UrbaBac.

A classe “ArbBac” se correlacionou negativamente com todos os metais estudados nas duas estações, com exceção do parâmetro PbTot na chuva. Observam-se declives de Sen semelhantes entre as duas estações, com restrição para o parâmetro MnTot, onde o declive de Sen é menor em valor absoluto, mostrando o limite do efeito de filtro da Classe Mata.

Tabela 37: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de metais e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac	
SECA	CdTot	--						++	++	--	++			++	
	PbTot	-							+	-	+			+	
	BaTot	--	--			+		++		--	++	++	++	++	
	FeDiss		-	++			++	++		--	++	++		++	
	MnTot	--	--	-				++	++	--	++			++	
	ZnTot	--		--				+	++	--	+			++	
	CdTot														
	PbTot														
	BaTot	-1,1E-03	-2,1E-05			1,9E-02		3,1E-05		-3,3E-04	3,4E-04	7,9E-04	4,4E-03	2,6E-03	
	FeDiss		-2,3E-04	2,2E-05			3,0E-01	3,8E-04		-4,2E-03	4,4E-03	1,4E-02		2,9E-02	
	MnTot	-1,7E-02	-1,7E-04	-5,9E-06				2,5E-04	3,9E-02	-3,6E-03	3,1E-03			2,1E-02	
	ZnTot	-3,3E-03		-1,6E-06				1,2E-05	7,3E-03	-2,5E-04	1,9E-04			1,6E-03	
CHUVA	CdTot	--						+	++	-	+			+	
	PbTot	-													
	BaTot	--	--				+	++		--	++			++	
	FeDiss	-	-							-	+				
	MnTot	--						++	++	-	+			++	
	ZnTot	--						++	++					++	
	CdTot														
	PbTot														
	BaTot	-1,7E-03	-3,1E-05				2,2E-02	3,5E-05		-4,2E-04	4,8E-04			2,7E-03	
	FeDiss	-1,3E-02	-2,8E-04							-3,7E-03	4,5E-03				
	MnTot	-9,6E-03						1,9E-04	3,9E-02	-1,9E-03	2,2E-03			1,5E-02	
	ZnTot	-6,7E-04						2,7E-05	1,6E-03					2,4E-03	

As concentrações de cádmio e de zinco apresentaram um máximo no ponto Par3 no Eixo PPP como visto no Capítulo 4. Foi suposto que essa contaminação, bem além dos limites da Resolução CONAMA 357/2005, era devido à efluentes industriais do Distrito Industrial, em particular da Votorantim Metais, situada entre os pontos Par2 e Par3. As indústrias entre o ponto Par4 e o ponto Par5 devem ter uma influência, já que os valores no ponto Par5 são em geral maiores que as concentrações a jusante da área urbana de Juiz de Fora. As figuras 56 e 57 apoiam essa teoria, já que o cádmio só foi detectado nos pontos Par3 e Par5, e que o zinco nos outros pontos da área de estudo apresentou concentrações muito baixas. Outra informação interessante é que os máximos são alcançados durante a seca, o que reforça ainda a tese da influência de efluentes industriais oriundos da Votorantim Metais (antiga Paraibuna de Metais), sendo o cádmio um subproduto da produção de zinco.

Existem outros empreendimentos industriais podendo produzir um efluente carregado em metais e metais pesados dentro da sub-bacia do ponto Par3 sem contribuir para o ponto Par2: a IMBEL (Indústria de Material Bélico do Brasil) e uma indústria de curtume desativada também foram localizadas entre esses dois pontos.

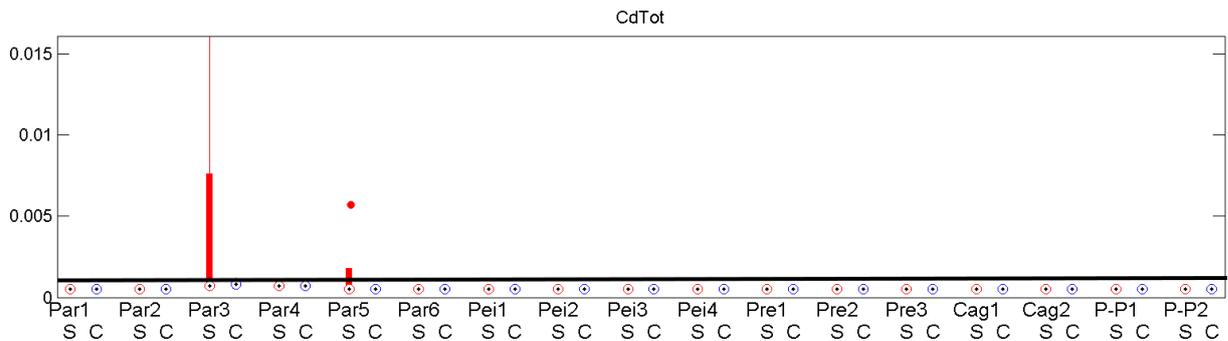


Figura 56: Boxplot do parâmetro Cádmi Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.

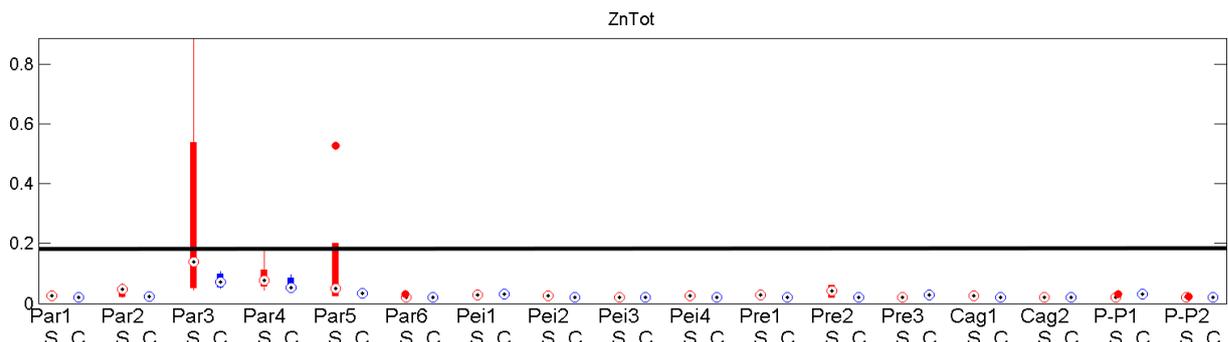


Figura 57: Boxplot do parâmetro Zinco Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.

A figura 58 evidencia que a concentração de chumbo ultrapassou o limite da Classe 2 em cinco pontos da BHRP. As concentrações de PbTot são altas durante a seca para os pontos Par3, Par4 e Par5, evidenciando o impacto de lançamentos pontuais. Nos pontos Pre3, Cag2 e P-P1 os máximos são alcançados durante a estação chuvosa, indicando fontes difusas.

Ao estudar as concentrações de metais numa bacia apresentando parte rural e parte urbana, (YU et al., 2014) encontraram ao analisar águas pluviais, concentrações significativas de zinco e de cobre. Pode-se supor que o chumbo encontrado na parte baixa da BHRP é oriunda de precipitações, carregado pelo vento (plumas) e chuva de outras bacias adjacentes. Deve-se, portanto, procurar possíveis fontes pontuais como lixões ou indústrias no entorno dessa área de

estudo. O incinerador da empresa EcoFire (Mapa 19) pode ser uma fonte de metais pesados cujo impacto ultrapassa os limites das bacias.

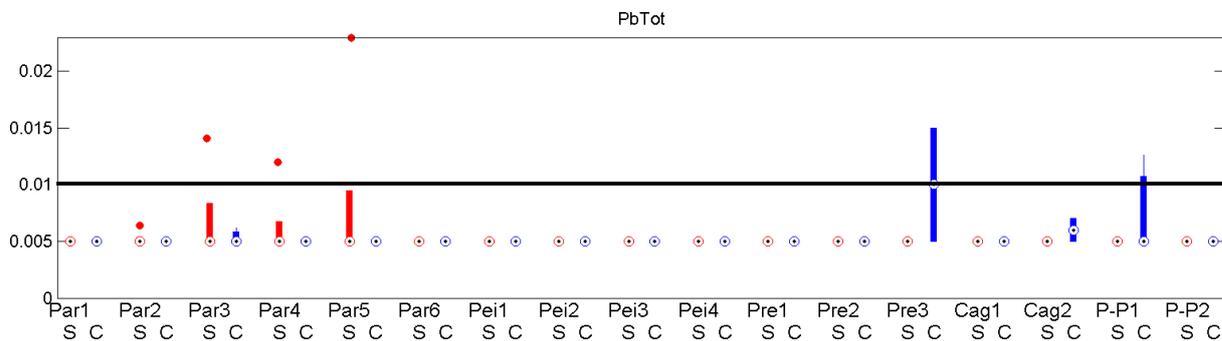


Figura 58: Boxplot do parâmetro Chumbo Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.

As Figuras 60 e 61 ilustram a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros FeDiss e MnTot, respectivamente. Os dois elementos são metálicos, porém apresentaram uma variabilidade espacial e temporal diferente, quase opostas.

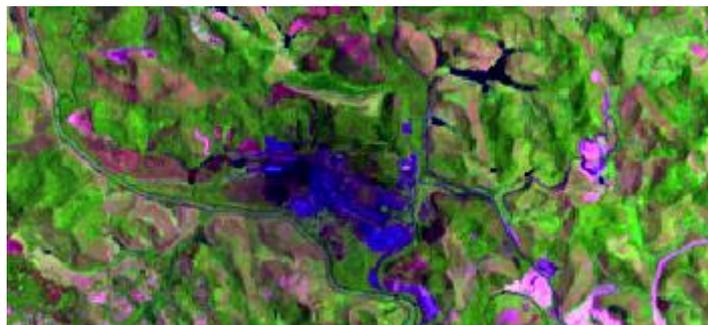


Figura 59: Nas imagens multiespectrais é possível ver uma mancha de sombra em volta da usina Arcelor.

Para o ferro, observa-se uma maior variabilidade durante a estação chuvosa para a maioria dos pontos. A mediana é em geral maior durante a estação seca, onde se observam valores acima do limite da Classe 2 para os pontos Par2, Par4, Pei4, Pre3, Cag1, Cag2, P-P1 e P-P2. Esses valores mais altos na seca para as bacias rurais podem ser explicados pelo escoamento subterrâneo que predomina durante as estiagens (os latossolos são ricos em óxido de ferro). As indústrias siderúrgicas são fontes pontuais para os pontos Par3, Par4 e Par5. As concentrações mais altas durante a estação chuvosa nos pontos Par2, Par3 sugere que escoamento superficial pode levar as poeiras depositadas em volta dessas indústrias (Figura 59) de volta no curso d'água. É possível que o vento e a chuva levem partículas de ferro para dentro da Represa de Chapéu d'Uvas, situada a montante dessas siderúrgicas (Par1). A evolução

espacial e temporal desse parâmetro foi diferente dos outros parâmetros, como evidenciado na Figura 60. Os pontos Par1 e Par2 são, para quase todos os parâmetros estudados, os que apresentam menor contaminação e melhor qualidade da água do rio Paraibuna. Esse fato do ferro ser superior a jusante da Represa Chapéu d’Uvas do que em outros pontos levou a suposição um mecanismo de contaminação diferente, talvez, a descarga de fundo liberada para manutenção da vazão do rio Paraibuna, imaginando que as erosões de margem dessa Represa praticamente sem APPs Hídricas, estejam presentes nesse sedimento de fundo, predominantemente Latossolo vermelho-amarelo.

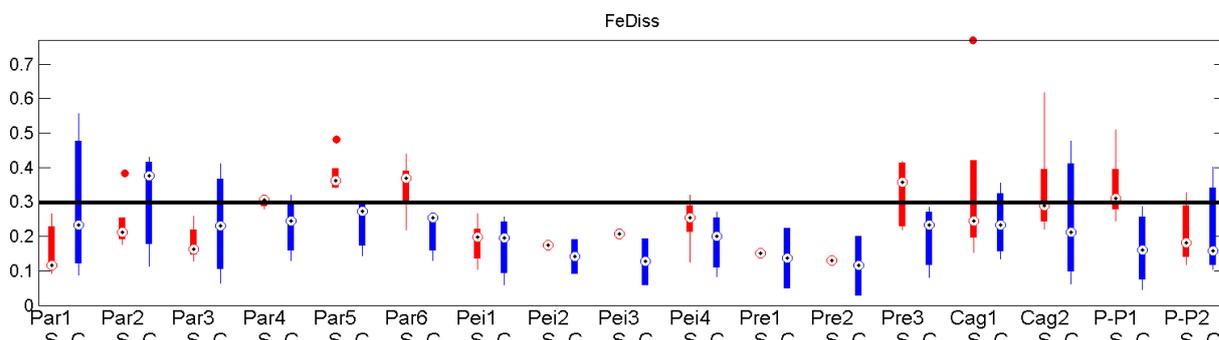


Figura 60: Boxplot do parâmetro Ferro Dissolvido (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.

A Figura 61 evidencia que o parâmetro MnTot ultrapassa frequentemente o limite estabelecido pela legislação para águas de classe 2 em vários pontos da BHRP. Observamos que três das bacias principais são atingidas pelo problema. As concentrações de manganês são mais elevadas durante a seca para os pontos Par3 a Par5, onde o rio Paraibuna percorre uma área industrial e residencial de alta densidade. Nessa parte da Bacia a influência do uso urbano e industrial é clara. As concentrações de manganês atingem valores de mais de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ durante a chuva, sendo 3 vezes superior ao limite da Classe 2 no baixo curso dos rios Preto e Cágado, refletindo-se nos pontos P-P1 e P-P2. Pode-se tirar duas conclusões:

- Por acontecer durante a chuva, a contaminação por manganês é difusa, ocorrendo através do escoamento superficial ou sub-superficial de águas pluviais.
- O rio do Peixe na sua integralidade não sofre alteração desse parâmetro. O(s) fator(es) determinante(s) é(são) presente(s) nos baixos cursos dos rios Preto e Cágado e ausentes da bacia do rio do Peixe.

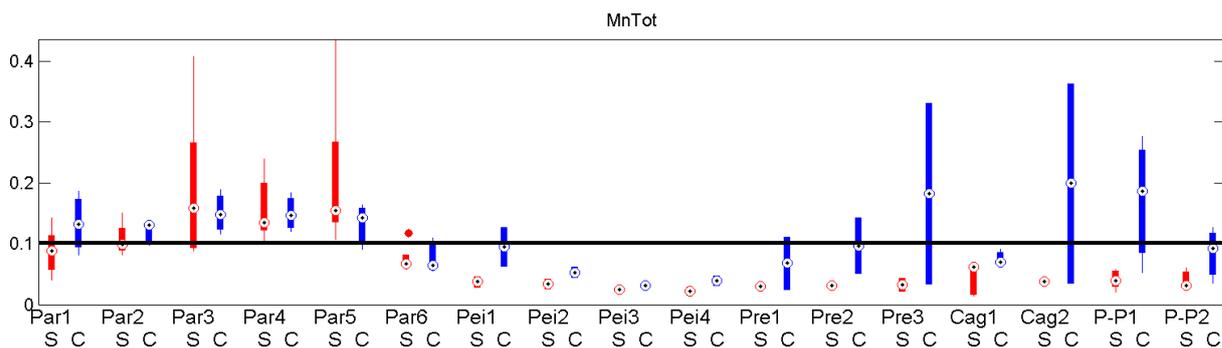


Figura 61: Boxplot do parâmetro Manganês Total (mg/L) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2.

Ao avaliar as concentrações de metais na água, foi possível identificar fontes para o cádmio e o zinco. A presença desses dois elementos parece pontual. A evolução espacial e temporal das concentrações dos outros metais, porém, não foi totalmente esclarecida.

5.3.6. Nutrientes

A eutrofização dos meios aquáticos é um problema a nível mundial. No Brasil, o crescimento descontrolado de algas nos reservatórios é um problema comum. Pior, as altas concentrações de fósforo tendem a favorecer o crescimento de cianobactérias, já que essas últimas tem a capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, tendo assim uma vantagem competitiva sobre as outras formas de algas (fitoplâncton) quando o nitrogênio é o nutriente limitante. A contaminação difusa exerce um papel fundamental nas concentrações de nutrientes (BU et al., 2014; ROBERTS et al., 2012; ZHU, 2011) nos cursos d'água. O entendimento dos mecanismos da contaminação difusa e a sua quantificação são essenciais para tentar mitigar a eutrofização dos meios aquáticos.

Como visto no Capítulo precedente, o fósforo atinge altas concentrações, ultrapassando os limites da Classe 2 ao longo do Eixo PPP. A contaminação devida ao lançamento do esgoto doméstico foi abordada previamente, sendo que na Tabela 38 avaliou-se a contaminação difusa analisando as correlações entre os fatores escolhidos e as concentrações de Fósforo Total na chuva e na seca.

A classe PaRuBac teve influência sobre o FT nas duas estações, evidenciando a contaminação difusa acontecendo na BHRP. O declive de Sen ($0,57 \cdot 10^{-3}$ –Seca-, $1,1 \cdot 10^{-3}$ –Chuva-) é duas vezes maior na chuva do que na seca, evidenciando que o escoamento superficial é um mecanismo fundamental para explicar as concentrações de FT nos cursos

d'água, elevando o parâmetro FT nas bacias rurais acima dos limites definidos na Resolução CONAMA 357/2005.

Tabela 38: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de nutrientes e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac
SECA	NO3		--	++			+	++		-	+	++		++
	NO2	--	--	+				++		--	+	+		++
	NNH3	--	--					++	++	--	++			++
	NOT							++						++
	FT	--	--					++	++	--	++		+	++
	NO3		-5,2E-04	9,3E-05			6,2E-01	1,5E-03		-6,8E-03	8,1E-03	4,2E-02		9,7E-02
	NO2	-1,0E-03	-1,4E-05	2,3E-06				1,3E-04		-2,3E-04	2,1E-04	5,6E-04		5,4E-03
	NNH3	-2,9E-02	-1,4E-04					3,1E-03	5,2E-02	-5,2E-03	3,8E-03			1,9E-01
	NOT							1,3E-03						9,5E-02
	FT	-5,1E-03	-3,3E-05					3,9E-04	7,5E-03	-1,1E-03	5,7E-04			2,8E-02
CHUVA	NO3	-	-					++		--	++	+		++
	NO2	--	-					++		--	++			++
	NNH3	--						++	++					++
	NOT							++	++	-				++
	FT	-						++	++	-	+			++
	NO3	-4,1E-02	-7,3E-04					2,1E-03		-1,4E-02	1,5E-02	3,1E-02		1,5E-01
	NO2	-1,4E-03	-1,4E-05					1,6E-04		-3,4E-04	2,9E-04			7,6E-03
	NNH3	-1,3E-02						1,3E-03	4,5E-02					7,8E-02
	NOT							1,3E-03	1,2E-01	-7,4E-03				1,0E-01
	FT	-3,4E-03						3,2E-04	2,0E-02	-1,2E-03	1,1E-03			2,4E-02

A remoção da mata ciliar e a substituição da vegetação arbórea por pastagens eleva o nível de fósforo e de nitrogênio total na água, sendo consequência do desmatamento e alvo de muitas pesquisas. Esse fato foi comprovado por vários autores, seja na escala do *Buffer* (BUCK et al., 2004; SHEN et al., 2015) ou da sub-bacia (HWANG et al., 2007; LI et al., 2012; PARK et al., 2014; WAN et al., 2014), considerando pequenas ou grandes bacias hidrográficas.

A classe PaRuBac também influenciou as concentrações de nitrato (LI et al, 2012; WRUBLACK et al., 2013) e nitrito, destacando-se também declives de Sen maiores no período chuvoso, dobrando da seca para a chuva no caso do nitrato. Correlações positivas entre a classe “Agro-Pastoral” e nitrato e nitrito na mesma região que a área de estudo foram achados na bacia do rio das Velhas, afluente do rio São Francisco por Maillard & Santos (2008) para vários tamanhos de *buffer* (de 90m para 510m). Uma correlação positiva é encontrada entre essa classe e o nitrogênio amoniacal somente na seca, sendo as excreções bovinas ou esgoto doméstico de propriedades rurais espalhadas na BHRP, as principais evidências.

Para atenuar os efeitos da contaminação difusa devida ao escoamento superficial e subsuperficial, o florestamento das margens dos cursos d'água é um método de organização da paisagem amplamente indicado e usado. Uma faixa ripária florestada, mesmo a partir de 5 metros de largura, pode reter uma fração significativa dos nutrientes e a vegetação arbórea ou arbustiva nativa reduz de maneira significativa a concentração de nutrientes até mesmo distante cerca de 2500 metros do curso d'água (KLAPPRATH & JOHNSTON, 2000; ALLAN, 2004; BEZERRA, 2009; ROBERTS et al., 2010; RICHARSON & BÉRAUD, 2014). Com o objetivo de otimizar o poder de retenção dos nutrientes e outros contaminantes, há pesquisas propondo a forma ideal das faixas ripárias (SAHU & GU, 2009) ou efeito da própria estrutura da comunidade arbórea (FERNANDES et al., 2014).

O papel de “filtro” da banda ripária relatado por Rocha & Costa (2015), retendo nutrientes como nitrogênio e fosforo, contribui para embasamento científico do Código Florestal (BRASIL, 2012), estipulando o florestamento de no mínimo 30 metros de largura de cada lado do curso d'água. A largura da APP requerida pelo Código Florestal aumenta conforme a largura do curso d'água. Num estudo localizado no sudeste brasileiro, numa pequena bacia ocupada em maioria por plantações de cana (70%) e pastos (8%), Sparovek et al. (2002) encontraram um valor de 52m de largura mínima para reter 80% dos sedimentos decorrendo do manejo do solo na região. Esse valor evidencia que para uma melhor qualidade da água no Brasil, recomenda-se aumentar o tamanho da faixa ripária exigida na legislação. Para a BHRP, o uso e cobertura da terra nas margens dos rios e nas sub-bacias são quase idênticos (Capítulos 2 e 3), impossibilitando medir a influência das florestas ripárias, sabidamente desproporcional no que diz a respeito a melhoria da qualidade da água. O nutriente mais problemático na BHRP foi o fósforo total conforme Capítulo 4 e um maior florestamento das margens dos cursos d'água permitiria reduzir muito as concentrações encontradas, garantindo águas mais limpas, trazendo muitos benefícios para o ecossistema. No caso do homem, tem-se as seguintes vantagens: facilitação, segurança e economias no tratamento da água para o consumo humano, alongamento do tempo de vida útil das centrais hidrelétricas, etc.

Apesar da proporção de vegetação arbórea ou natural não aumentar nas faixas ripárias dos cursos d'água na BHRP, observou-se grande influência da classe ArbBac a nível de bacia. No período chuvoso, a classe ArbBac apresentou uma correlação negativa com as concentrações de Nitrogênio Orgânico Total. Na seca, um aumento da classe ArbBac se traduz por uma diminuição do parâmetro NNH3. A influência negativa sobre esses dois parâmetros

demonstra a capacidade da vegetação de reter a matéria orgânica particulada. A classe ArbBac permitiu uma diminuição de todos os outros nutrientes nas duas estações. O declive de Sen é quase constante nas duas estações para o FT, indicando que o grande aumento de FT devido aos pastos na chuva não é mais absorvido pela vegetação arbórea, apesar de mais disponível. O aumento de FT na chuva pode também ser devido ao revolvimento dos sedimentos. O declive de Sen é maior em valor absoluto na chuva para o nitrito e o nitrato, sugerindo que a Classe ArbBac permite regular o nitrogênio, impedindo que ele atinja valores altos na BHRP apesar da poluição difusa.

Como visto no capítulo anterior, as concentrações de nutrientes se elevam muito ao atravessar a área urbana de Juiz de Fora. Estima-se que o ser humano excreta em média 1,4 gFT.dia⁻¹, somado com o uso de detergente em pó, a produção de FT por indivíduo chega a 3,0 gFT.dia⁻¹ (COELHO, 2012 p.108-109), quantidade exportada no esgoto doméstico. A densidade de população (TU & XIA, 2008), e a classe UrbaBac (PRATT & CHANG, 2012; BU, 2014) exibem logicamente altas correlações positivas com a concentração de FT nas duas estações. O declive de Sen é sensivelmente o mesmo nas duas estações, indicando que a diluição do esgoto doméstico é contrabalançada por um outro fenômeno. É uma indicação de que quantidades significantes de FT chegam aos rios, escoando do solo impermeabilizado, característico das áreas urbanas densas. Os parâmetros NO₃ (AHEARN et al., 2005), NO₂ e NOT apresentam o mesmo comportamento, sugerindo mecanismos similares. Uma influência menor da densidade de população sobre o NO₃ quando as precipitações são acima do normal é evocada por Ahearn et al. (2005), mas esse resultado não foi comprovado pelos dados disponíveis na BHRP. O declive de Sen do parâmetro NNH₃ é duas vezes inferior no período chuvoso, apontando mais uma vez que ele é um indicador muito bom para avaliação de contaminação por esgoto doméstico nas proximidades. O solo exposto apresentou somente uma correlação, sendo ela positiva com o FT no período seco. A influência da classe de uso e cobertura referente à corpos d'águas não pode ser analisada, sendo estatisticamente ligada à classe UrbaBac e a densidade de população.

Para as outras variáveis de qualidade da água estudadas, os fatores físicos trouxeram poucas informações relevantes, sendo muito menos influentes na qualidade da água do que os fatores antrópicos. Na seca, a área da bacia parece influir positivamente sobre os parâmetros NO₃ e NO₂, indicando uma concentração baixa desses nutrientes nas bacias de cabeceira. O coeficiente de compacidade teve uma correlação positiva com o parâmetro NO₃.

5.3.7. Variáveis biológicas

A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros biológicos, sendo de acordo com a classificação da CETESB (CETESB, 2009), os parâmetros microbiológicos (ColiTot, EColi e EstreFec) medindo a contaminação bacteriana da água; e os parâmetros hidrobiológicos (Feoft e CIA) medindo a produção primária, sendo a clorofila-a considerada o melhor indicador de eutrofização de um meio aquático.

Durante a seca e a chuva, a concentração para as bactérias ColiTot e EColi tende a diminuir conforme aumenta a área da bacia e a sua declividade média, indicando uma capacidade de autodepuração dos rios em relação à contaminação fecal.

Para o parâmetro ColiTot, observa-se uma correlação positiva significativa a nível de 99% com a classe UrbaBac na seca, e a nível de 95% na chuva. O declive de Sen é de 14.10^3 na seca e de $9,6.10^3$ na chuva. Essa diminuição se explica pela diluição do esgoto doméstico. Observou-se o efeito filtro da mata nas duas estações, porém não foi evidenciado uma correlação com a classe ParuBac no caso do parâmetro ColiTot.

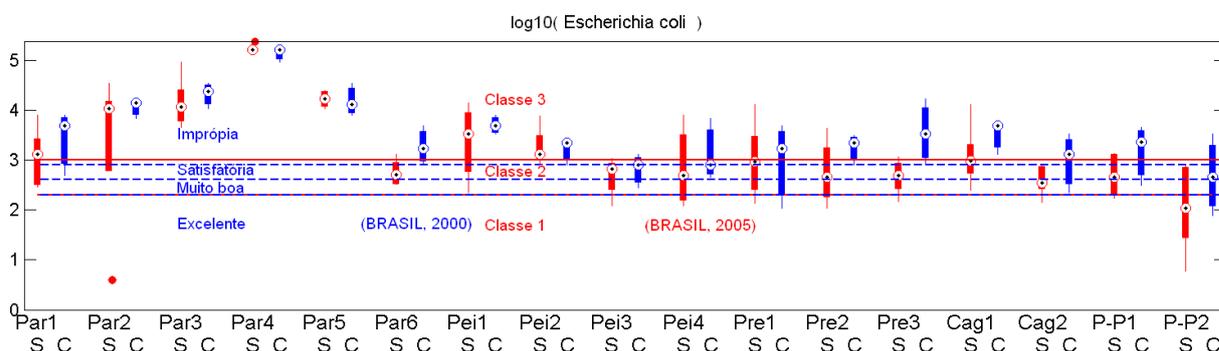


Figura 62: Boxplot do parâmetro EColi (NMP/100mL) na estação seca (vermelho) e na estação chuvosa (azul) na BHRP. A linha preta marca o limite aceito para águas superficiais de Classe 2; as linhas azuis definem as classes de balneabilidade (BRASIL, 2000).

A Figura 62 evidencia que o parâmetro EColi classifica a maior parte das águas da BHRP como “satisfatória” ou “imprópria” para a balneabilidade (BRASIL, 2000). As medianas mais elevadas na estação chuvosa evidenciam que uma grande parte das bactérias EColi encontradas nos cursos d’água são devidas à contaminação difusa.

A bactéria *E.Coli* é considerada melhor indicador de contaminação fecal, por ser exclusiva do intestino dos animais de sangue quente e sobreviver um tempo limitado quando fora do hospedeiro. Ela foi logicamente correlacionada com os fatores UrbaBac e DensPop. O declive de Sen, nesse caso é maior na chuva ($2,7.10^3$) do que na seca ($1,2.10^3$), apesar da maior

diluição do esgoto doméstico proporcionada pelo maior volume de água. Esse fenômeno se explica pelo fato a época de chuva na BHRP corresponde ao verão, com temperatura mais quentes, a bactéria sobrevivendo então um tempo maior, encontra-se em concentrações maiores a jusante das áreas urbana. A classe ParuBac teve correlação com E.Coli na chuva, ilustrando o fenômeno de “vassoura hidráulica” (ROCHA et al., 2014). A classe SoloBac, referente à porcentagem de solo exposto na bacia foi correlacionada também com o parâmetro E.Coli, somente na seca. Com exceção de grandes obras de infraestrutura e preparação da terra para cultivos (quase ausente da BHRP), a classe solo exposto encontra-se em pastos muito degradados, sendo o solo exposto devido à fenômenos erosivos. A correlação de E.Coli com o solo exposto pode ser explicada pelo pisoteamento das margens dos córregos pelo gado e a instabilidade dessas mesmas margens, tendendo a cair dentro do curso d’água durante a época da seca.

Tabela 39: Correlações e declives de Sen entre as concentrações de nutrientes e características das sub-bacias.

		DecMedBc	PluvMean	AreaBac	DecMedTr	FacForm	CoefComp	DensBac	AguaBac	ArbBac	PaRuBac	RurBac	SoloBac	UrbaBac
SECA	ColiTot	--		-				++	++	-				++
	Ecoli	--		--				++	+	-			+	++
	EstrFec	-						+	+					++
	CIA					-								
	Feoft													
SECA	ColiTot	-5,1E+03		-2,09				1,6E+02	1,2E+04	-4,6E+02				1,4E+04
	Ecoli	-3,6E+02		-0,24				15,2	5,4E+02	-2,9E+01			6,5E+02	1,2E+03
	EstrFec	-6,7E+01						2,3	1,2E+02					406,079
	CIA					-1,581								
	Feoft													
CHUVA	ColiTot	--		-				+	+	-				+
	Ecoli	--		-				++	++	-	+			++
	EstrFec	--	-					++	++	--	+			++
	CIA													
	Feoft													
CHUVA	ColiTot	-5,3E+03		-4,81				1,1E+02	1,6E+04	-7,6E+02				9,6E+03
	Ecoli	-1,1E+03		-0,59				35,9	2,9E+03	-1,4E+02	1,2E+02			2,7E+03
	EstrFec	-6,4E+02	-3,223					24,2	2,2E+03	-1,2E+02	1,2E+02			1,6E+03
	CIA													
	Feoft													

O parâmetro EstreFec, é enquadrado como parâmetro de qualidade pela Resolução CONAMA 274/2000 (BRASIL, 2000) referente a balneabilidade dos cursos d'água, mas sua aplicação é válida somente em meio marinho. As correlações e as evoluções dos declives de Sen são os mesmos que para EColi, com uma exceção: não há correlações entre esse parâmetro e a classe ArbBac na seca.

Com exceção do caso do parâmetro EstrFec na seca, a classe ArbBac permitiu diminuir a concentração de todas as variáveis microbiológicas nas duas estações. Como foi visto no Capítulo 4, as concentrações de EColi ultrapassaram os limites da Classe 2 em quase todos os pontos do Eixo PPP e seus afluentes, ressaltando a necessidade do reflorestamento das margens dos cursos d'água da BHRP.

Considerações finais

É importante ressaltar que essa Dissertação foi baseada totalmente em dados públicos disponibilizados gratuitamente. Os dados relativos a qualidade da água foram obtidos junto ao IGAM e os dados cartográficos oriundos do IBGE ou de outras fontes públicas como o USGS. Graças às políticas públicas de “dados abertos” (*OpenData*), dados podem ser tratados, contribuindo para o avanço da ciência e melhorias das políticas públicas e de fiscalização.

O florestamento das margens dos cursos d’água é fundamental para garantir uma boa qualidade da água. As imagens de satélites disponíveis no momento da realização dessa pesquisa e problemas no georeferenciamento da hidrografia não permitiram distinguir o uso e cobertura da terra numa faixa de 30 metros, correspondendo à largura mínima das APPs hídricas dos cursos d’água no Brasil. Desde o final de 2015, é possível obter imagens de satélites com resolução de 10 metros (Satélite SENTINEL 2A), podendo auxiliar nessa avaliação e na própria fiscalização dos proprietários rurais.

Com os dados disponíveis, foi mostrado que o florestamento das margens (100 e 200 metros) era menor ou igual ao florestamento das sub-bacias. Esse dado, obtido através do geoprocessamento, confirma a impressão obtida através de visitas em vários lugares da BHRP: o respeito as APPs hídricas parece mais a exceção do que a regra. Os esforços financeiros ao nível dos comités parecem ser mais ligados à área urbana de JF, e deveria ampliar-se a fiscalização e o suporte para o reflorestamento das margens dos cursos d’água em toda BHRP. É importante lembrar que a eutrofização da água e o assoreamento dos cursos d’água diminuem o tempo de vida útil dos empreendimentos hidrelétricos, agora numerosos na Bacia. Além de considerações financeiras, uma água de boa qualidade é um bem de valor inestimável, e suporte para muitas atividades humanas

Uma classe de “ocupação esparsa” ou “ocupação rural” foi introduzida nesse trabalho. Ela permitiu diferenciar as áreas com uma ocupação humana esparsa das pastagens ou campos, porém não foi uma classe relevante em relação à qualidade da água.

As sub-bacias dos pontos Par2 e Par3 são as mais industrializadas dessa Bacia. Os resultados obtidos dos pontos Par2 a Par5 apontaram a necessidade de se criar uma classe “uso industrial”, pois os efluentes industriais têm as suas particularidades com relação ao esgoto doméstico. Porém, no ponto Par2 quase nenhuma inconformidade foi encontrada, evidenciando a importância da gestão ambiental das empresas e os consequentes impactos sobre a qualidade da água.

Ao fazer uma análise sintética dos impactos do uso e cobertura da terra nos pontos monitorados, chegou-se à conclusão de que o ponto Par1 está preservado quanto aos impactos de efluentes industriais e do esgoto doméstico, só apresentando alteração no parâmetro FeDiss devido ao tipo de solo predominante nesta sub-bacia, o latossolo vermelho-amarelo.

O ponto Par2 apresentou alteração na DBO chegando aos limites da Resolução CONAMA 357/2005 para a Classe 2, suspeitando-se dos efluentes da área urbana do município de Ewbank da Câmara. O parâmetro FeDiss na estação chuvosa também ficou alterado, sugerindo influência da Siderúrgica Arcelor Mittal.

Cabe destacar como a área urbana de Juiz de Fora impactou sobremaneira os pontos Par3, Par4 e Par5. A estação Par3 tem vários parâmetros além dos limites da legislação, destacando SST, STD, Cor, OD, PbTot, CNLiv, ZnTot, CdTot e MnTot, sendo os três últimos, supostamente devido a Indústria Votorantim Metais.

A parte mais densa da área urbana influencia o Par4 principalmente com o esgoto doméstico, alterando para além dos limites a DBO, DQO, OD (2 mg.L^{-1} – anóxico), PbTot, CNLiv, NNH3 e ColiTot. Com relação aos baixos valores de OD, as proximidades dos pontos Par3 e Par4 podem agir como uma barragem para os peixes, limitando as trocas entre os trechos a montante e jusante desses pontos.

Apesar da autodepuração entre Par4 e Par5, o Par5 ainda apresenta alteração para acima da legislação nos parâmetros SST, Tur, Cor, SubTens, CdTot, PbTot (2 vezes maior que o limite), FeDiss, CNLiv, ZnTot e MnTot, os dois últimos especificamente devido a curtumes, indústrias têxteis/ tingimento e do antigo Lixão de Juiz de Fora.

Devido a diluição após encontro dos rios Paraibuna e Peixe, a DBO no Par6 volta para os limites da Classe 2, entretanto, a condutividade fica acima de $100 \mu\text{s.cm}^{-1}$ do Par2 a Par6, com destaque negativo para o Par3 (Votorantim) e Par5 (curtumes, têxteis e antigo Lixão).

A concentração média de FT se mantém acima do limite da classe 2/lótico do ponto Par3 ao ponto Par6, passando abaixo do limite somente graças as águas pobres em FT do rio do Peixe. O FT máximo ultrapassa o limite Classe 2/lótico do ponto Par3 ao ponto ParPre2 e nas fozes dos rios Preto e Cágado. Se considerar o limite para a classe 2/intermediário, observa-se que o FT médio ao longo do Eixo PPP é superior ao limite do ponto Par3 ao ponto ParPre1 e para as fozes do rio Preto e do rio Cágado, e só um pouco inferior na foz do rio Preto no Paraíba do Sul. Há uma poluição difusa em relação ao parâmetro FT nas áreas rurais.

No encontro dos rios Peixe-Paraibuna e Preto - ParPre1, encontraram-se alterações nos parâmetros Tur, Cor, CuDiss, PbTot, MnTot, ColiTot e CIA. Esse conjunto de resultados

demonstra que a qualidade da água vindo de uma bacia essencialmente rural e pouco povoada, com a exceção da cidade de Valença, é seriamente comprometida por um fator (ou vários fatores) não identificado (s) nesse trabalho. No caso do EstrFec, o rio Preto no encontro com o Eixo PPP apresentou uma concentração média e máxima superior.

Na foz do rio Cágado – ponto Cag2, também foi encontrada alteração para além dos limites da legislação para Tur, MnTot e FeDiss. Existe extração de areia nessa região, caracterizada pela baixa velocidade da água devido à declividade baixa e aos meandros.

O parâmetro MnTot é um fator de preocupação geral, com altas concentrações do Par1 ao Par 5 e no ParPre1 - foz dos rios Preto e Cágado, com exceção para o rio do Peixe.

O PbTot também chama a atenção em toda a Bacia, com alterações pontuais em Juiz de Fora no Par3, Par4 e Par5, além de ser encontrado no Pre3, foz do Cágado – Cag2 e foz do Preto – ParPre1, levando a supor uma poluição difusa pela chuva ou vento (plumas). Vale ressaltar a presença de um incinerador nessa área, influenciando sob o ponto de vista de bacia de drenagem apenas o ParPre1, mas podendo ser a causa para os outros pontos fora dessa sub-bacia.

Cianetos livres foram detectados pelo menos uma vez em todos os pontos do Eixo PPP e dos seus afluentes, com exceção da foz do rio Cágado. O parâmetro CNLiv requer um atenção particular das autoridades, lembrando o potencial tóxico desse elemento para o consumo humano ou para dessedentação animal. Os valores máximos encontrados nos pontos Par3, Par4 e Par5, de 10 até 22 $\mu\text{g.L}^{-1}$, são muito além do limite da classe 2. A foz do rio do Peixe – Pei4 tem o valor máximo acima do limite que deve ser investigado, haja visto esse rio estar quase sempre melhor que os demais na totalidade dos parâmetros de qualidade da água analisados nesse trabalho.

As concentrações de E-coli ao longo do Eixo PPP são preocupantes em relação ao limite da Classe 2 com médias superiores do ponto Par1 ao ponto ParPre1 e máximas sempre fora do padrão. Somente os valores mínimos nos afluentes e nos pontos Par1, Par6, ParPre1 e ParPre2 são satisfatórios. Os resultados aqui apresentados mostram que a recreação de contato primário na BHRP é uma atividade pouco aconselhável em vista do risco de se contrair doenças de veiculação hídrica. A temporada de banho, em geral o verão, coincide com a época de chuva e o fenômeno de contaminação difusa é então mais agudo.

Quanto à influência das classes de uso e cobertura da terra e considerando a sazonalidade, de maneira geral, a classe UrbBac e DensBac tiveram correlação positiva com todas as variáveis, exceto o OD (negativa), mostrando piora na qualidade da água. As classes

PaRuBac e RuBac pioraram vários parâmetros, tanto nas áreas urbanas como rurais, destacando a contaminação fecal e as cargas elevadas de fósforo encontradas em quase toda a BHRP.

Destaque para a classe ArbBac que teve correlação negativa com a maioria dos parâmetros, mostrando como a vegetação arbórea e arbustiva tem um papel de filtro importantíssimo para a qualidade da água, algo presente no Código Florestal através das Áreas de Preservação Permanente (APPs) previstas nas margens dos cursos d'água e pouco respeitadas nessa Bacia.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO PRÓ-GESTÃO DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAÍBA DO SUL / COHIDRO (AGEVAP/COHIDRO), **Plano integrado de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e planos de Recursos Hídricos das bacias afluentes: Caracterização do uso atual do solo e cobertura vegetal (Atividade 401)**, rev. 2, out. 2013. Disponível em: < <http://www.ceivap.org.br/arqforum/Cohidro/Ativ401-UsoAtualSolorev2out13.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

AHEARN, D. S.; SHEIBLEY, R. W.; DAHLGREN, R. A.; ANDERSON, M.; JOHNSON, J.; TATE, K. W. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 3-4, p. 234–247, 2005.

ALLAN, J. D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. **Annual review of ecology, evolution, and systematics**, v. 35, n. 2004, p. 257–284, 2004.

ANDRADE, E. M. de; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M. de F.; GOMES, R. B.; LOBATO, F. A. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1791–1797, 2007.

ANSCOMBE, F. J. Graphs in Statistical Analysis. **The American Statistician**, v. 27, n. 1, p. 17–21, 1973.

ARAÚJO, J. P. de C. **Utilização de métodos e critérios para determinação do rio principal em bacias hidrográficas - o caso do rio Paraibuna**. Monografia (Graduação em Geografia). Universidade Federal de Juiz de Fora - Instituto de Ciências Humanas. Juiz de Fora: 2009.

ARSLAN, O. Spatially weighted principal component analysis (PCA) method for water quality analysis. **Water Resources**, v. 40, n. 3, p. 315–324, 15 maio 2013.

BAKER, M. Statisticians issue warning on P-values. **Nature**, v. 531, p. 151, 2016.

BAPTISTA, D. F.; BUSS, D. F.; DORVILLÉ, L. F. M.; NESSIMIAN, J. L. O conceito de Continuidade de Rios é válido para rios de mata atlântica no sudeste do Brasil? In Nessimian, J.L. & A.L. Carvalho. E.(eds). **Ecologia de Insetos Aquáticos**. Series Oecologia Brasiliensis, v.5, p. 209–222, 1990.

BARBOSA, S. M. DA S.; MAROTTA, G. S. A. **Avaliação da precisão posicional relativa de uma carta topográfica na escala 1:100.000 na área do Parque Nacional da Chapada dos Guimarães - MT**. Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, n. 1986, p. 6917–6922, 2013.

BEZERRA, M. O. **Dinâmica do nitrogênio no solo e sua implicação na qualidade da água em uma bacia hidrográfica com diferentes tipos de uso de solo com ênfase no papel da floresta ripária**. Dissertação de Mestrado em Ecologia - Universidade de São Paulo, 2009.

BLASCHKE, T. et al. Geographic Object-Based Image Analysis - Towards a new paradigm. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 87, p. 180–191, 2014.

BRASIL. **Decreto n.º 1.713 de 14 de junho de 1937**, que cria o Parque Nacional de Itatiaia. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/itatiaia.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Lei Federal n.º 9.433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal, e altera o artigo 1.º da Lei Federal n.º 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei Federal n.º 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 274, de 29 de novembro de 2000**. Dispõe sobre os critérios de balneabilidade das águas brasileiras. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=272>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

_____. Agência Nacional das Águas (ANA). **Resolução n.º 399, de 22 de julho de 2004**. Altera a Portaria n.º 707, de 17 de outubro de 1994, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, e dá outras providências. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/resolucoes/2004/399-2004.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

_____. Ministério da Saúde. **Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Disponível em: <http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/portaria_518_2004.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005a**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 359, de 29 de abril de 2005b**. Dispõe sobre a regulamentação do teor de fósforo em detergentes em pó para uso em todo o território nacional e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=463>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

_____. **Lei Federal n.º 12.727, de 17 de outubro de 2012. Altera a Lei Federal n.º 12.651, de 25 de maio de 2012**, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis Federais n.os 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis Federais n.os 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória n.o 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do Artigo 167 da Lei Federal n.o 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2.o do Artigo 4.o da Lei Federal n.o 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12727.htm>. Acesso em: 17 dez. 2015.

_____. Agência Nacional das Águas / Instituto Nacional dos Dados Espaciais (ANA/INDE) - CATÁLOGO DE METADADOS GEOGRÁFICOS. **Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul 1:250.000**, 2013.

_____. Ministério das Minas e Energia. **Matriz energética de 2016 terá maior participação das energias renováveis**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/matriz-energetica-de-2016-tera-maior-participacao-das-energias-renovaveis>. Acesso em: 20 jun. 2016.

BRUNDSO, C.; FOTHERINGHAM, S.; CHARLTON, M. Geographically weighted regression - modelling spatial non-stationarity. **The Statistician**, 1998.

BU, H.; MENG, W.; ZHANG, Y.; WAN, J. Relationships between land use patterns and water quality in the Taizi River basin, China. **Ecological Indicators**, v. 41, p. 187–197, 2014.

BUCK, O.; NIYOGLI, D. K.; TOWNSEND, C. R. Scale-dependence of land use effects on water quality of streams in agricultural catchments. **Environmental pollution**, v. 130, n. 2, p. 287–99, jul. 2004.

CASTRO, C. DE; FERREIRA, M. **Análise da variação espacial e temporal da precipitação na Bacia Hidrográfica Do rio Paraibuna MG / RJ**. X Simposio Brasileiro de Climatologia Geográfica, n. 1987, 2010.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. **Ecological Economics**, v. 64, n. 1, p. 109–118, 2007.

CHEN, J.; LU, J. Effects of Land Use, Topography and Socio-Economic Factors on River Water Quality in a Mountainous Watershed with Intensive Agricultural Production in East China. **PLoS ONE**, v. 9, n. 8, p. e102714, 2014.

CHEN, J. et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 103, n. 1, p. 7–27, 2015.

COELHO, V. M. B. **Paraíba do Sul, um rio estratégico** / Victor Coelho. - 1.ed. - Rio de Janeiro: Casa da palavra, 2012. 336p. : il.

COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

COMPANHIA DE SANEAMENTO MUNICIPAL - JUIZ DE FORA (CESAMA). **Barragem de Chapéu d'Uvas**. 2015. Disponível em: < <http://www.cesama.com.br/?pagina=chapeu-duvas>>. Acesso em: 10 de ago. 2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo, p. 1–43, 2009.

_____. **Ficha de informação Toxicológica - Cádmio**. 2012a.

_____. **Ficha de informação Toxicológica - Cobre 2012b.**

_____. **Ficha de informação Toxicológica - Cobre 2012c.**

_____. **Ficha de informação Toxicológica - Zinco. 2012d.**

CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT (CCME). **CCME National Water Quality Index Workshop**, Halifax, Nova Scotia, nov. 2003.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil), **Atlas Pluviométrico do Brasil (1: 5.000.000)**, 2011. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>. Acesso em 2 fev. 2016

FERNANDES, J. de F.; DE SOUZA, A. L. T.; TANAKA, M. O. Can the structure of a riparian forest remnant influence stream water quality? A tropical case study. **Hydrobiologia**, v. 724, n. 1, p. 175–185, 2014.

DELREGNO, K. J.; ATKINSON, S. F. Nonpoint Pollution and Watershed Management: A Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Approach. **Lake and Reservoir Management**, v. 4, n. 2, p. 17–25, 1988.

DEVEREUX, B. J.; AMABLE, G. S.; POSADA, C. C. An efficient image segmentation algorithm for landscape analysis. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 6, n. 1, p. 47–61, 2004.

DOWDING, S.; KUUSKIVI, T.; LI, X. Void fill of SRTM elevation data - principles, processes and performance. **ASPRS Images to Decision: Remote Sensing Foundation for GIS Applications**, p. 15, 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (EMBRAPA) **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2.^a ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006.

_____. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. 1^a ed. Colombo (PR), versão digital: Embrapa Florestas, 2011. Disponível em <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/921050/1/Doc232ultimaversao.pdf>>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA)/SONDOTÉCNICA. **Avaliação ambiental integrada dos aproveitamentos hidroelétricos da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. 2007. Disponível em: <<http://www.sondotecnica.com.br/cases.show.logic?cases.id=478>>. Acesso em: 20 de out. 2016.

ESRI - **Environmental Systems Research Institute**.ARC/INFO v.7.1.1. Help on Line. Redlands, Califórnia: ESRI, 1997.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. **Fonctionnement de l'outil Topo vers raster. Help on Line. Redlands, Califórnia: ESRI, 2015**. Disponível em: <<http://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-topo-to-raster-works.htm>>

FARR, Tom G. et al. The shuttle radar topography mission. *Reviews of geophysics*, v. 45, n. 2, 2007.

FEAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). **Bacia do rio Paraíba – enquadramento das águas**. Belo Horizonte: FEAM, 1995.

FERREIRA, C. W. S.; LIMA, C. S.; CALVALCANTI, L. C. S.; SANTOS, A. H. O. **Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Açude Cachoeira II, no município de Serra Talhada-PE, Brasil**. In: VI Seminário Latino Americano de Geografia Física II Seminário Ibero Americano de Geografia Física Universidade de Coimbra, Maio de 2010

FREIRE, A. P.; CASTRO, E. C. DE. Análise da Correlação do Uso e Ocupação do Solo e da Qualidade da Água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 41–49, 2014.

FREITAS, F. A. **Qualidade da água e uso da terra na Bacia de Contribuição da Represa de São Pedro, Juiz de Fora – MG**. Dissertação de mestrado em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2015.

FRITSCH, F. N.; CARLSON, R. E. Monotone Piecewise Cubic Interpolation. **SIAM Journal on Numerical Analysis**, v. 17, n. 2, p. 238–246, 1980.

GLEICK, P. H. **Water in crisis a guide to the world's fresh water resources**. 1.^a ed 1993.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D.; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T. DE; SOARES, J. H. P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG Application of multivariate statistical analysis in the study of water quality in the Pomba River (MG). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 558–563, 2012.

GYAWALI, S.; TECHATO, K.; YUANGYAI, C.; MUSIKAVONG, C. Assessment of Relationship between Land uses of Riparian Zone and Water Quality of River for Sustainable Development of River Basin, A Case Study of U-Tapao River Basin, Thailand. **Procedia Environmental Sciences**, v. 17, p. 291–297, 2013.

HAKAMATA, T.; HIRATA, T.; MURAOKA, K. Evaluation of Land Use and River Water Quality of the Tsukuba Mountains Ecosystem, Japan. **Catena**, v. 19, p. 427–439, 1992.

HELSEL, D. R. Advantages of nonparametric procedures for analysis of water quality data. **Hydrological Science**, v. 32, n. December, p. 179–190, 1987.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual**. [s.l.] Earthscan, 2011.

HUANG, J.; HUANG, Y.; PONTIUS, R. G.; ZHANG, Z. Geographically weighted regression to measure spatial variations in correlations between water pollution versus land use in a coastal watershed. **Ocean & Coastal Management**, v. 103, p. 14–24, 2015.

HUTCHINSON, M. F.; STEIN, J. A.; STEIN, J. L.; XU, T. **Locally adaptive gridding of noisy high resolution topographic data**. 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Proceedings, n. July, p. 2493–2499, 2009.

HUTCHINSON, M.; XU, T.; STEIN, J. **Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure** Geomorphometry 2011. **Anais...**2011

HWANG, S.-J.; LEE, S.-W.; SON, J.-Y.; PARK, G.-A.; KIM, S.-J. Moderating effects of the geometry of reservoirs on the relation between urban land use and water quality. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, n. 4, p. 175–183, out. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2.^a ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012.

_____. **Manual técnico de uso da terra**. 3.^a ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.

_____. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2016**. Disponível em ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_2016_TCU.xls. Acesso em 03/11/2016.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Portal InfoHidro**. Disponível em <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/mapas-e-bases-cartograficas/bases-cartograficas/4809-ottocodificada>. Acesso em 26/07/2016.

JONES, R. A.; LEE G. F. Chlorophyll - a raw water quality parameter. **Research and Technology**, 1982.

KLAPPRATH, J.; JOHNSTON, J. **Understanding the science behind riparian forest buffers: effects on water quality** Virginia Cooperative Extension, Publication No. 420-151. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.citeulike.org/group/342/article/293164>>.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.

LAWSON, N. M.; MASON, R. P. Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic, and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Maryland. **Water Research**, v. 35, n. 17, p. 4039–4052, 2001.

LEE, S.-W.; HWANG, S.-J.; LEE, S.-B.; HWANG, H.-S.; SUNG, H.-C. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics. **Landscape and Urban Planning**, v. 92, n. 2, p. 80–89, set. 2009.

LI, S.; GU, S.; TAN, X.; ZHANG, Q. Water quality in the upper Han River basin, China: the impacts of land use/land cover in riparian buffer zone. **Journal of hazardous materials**, v. 165, n. 1-3, p. 317–24, 15 jun. 2009.

LI, Y. L.; LIU, K.; LI, L.; XU, Z. X. Relationship of land use/cover on water quality in the Liao River basin, China. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, n. 2011, p. 1484–1493, 2012.

LIMA, R. N. **Utilização de geotecnologias para avaliação de características ambientais em ecossistemas aquáticos**. Dissertação de mestrado em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2013.

LIMA, R. N. DE S.; RIBEIRO, C. B. DE M. Comparison of Topographic Correction Methods on LANDSAT Imagery under Different Lighting Conditions. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 5, p. 1097–1116, 2014.

LORZ, C. et al. Challenges of an integrated water resource management for the Distrito Federal, Western Central Brazil: Climate, land-use and water resources. **Environmental Earth Sciences**, v. 65, n. 5, p. 1575–1586, 2012.

MAILLARD, P.; PINHEIRO SANTOS, N. A. A spatial-statistical approach for modeling the effect of non-point source pollution on different water quality parameters in the Velhas river watershed - Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 86, n. 1, p. 158–170, 2008.

MACHADO, P. J. O. **Diagnóstico ambiental e ordenamento territorial – Instrumentos para a gestão da Bacia de Contribuição da Represa de Chapéu D’Uvas/MG**. Tese de doutorado em Geografia da Universidade Federal Fluminense. Niterói: 2012.

MANOEL, L. de O., Avaliação do índice de qualidade da água (IQA) na microbacia do córrego caçula no município de Ilha Solteira/SP – dados preliminares. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 8, n. 2, p. 442–448, 2012.

MARCUZZO, F. F. N.; ROCHA, H. M.; MELO, D. C. R. **Mapeamento da precipitação pluviométrica no bioma Amazônia do Mato Grosso** X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. **Anais...**2006

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. **Ecosystems**, v. 15, n. 3, p. 401–415, 2012a.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of electricity from hydropower. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 1, p. 179–187, 2012b.

MINAS GERAIS. **Lei Estadual n.º 6126, de 04 de junho de 1973**, que Cria os Parques Florestais de Ibitipoca e da Jaíba, nos municípios de Lima Duarte e Manga. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/Ibitipoca/lei6126.pdf>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

_____. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa n.º 16, de 24 de setembro de 1996**. Dispõe sobre o enquadramento das águas estaduais da Bacia do rio Paraibuna. Disponível em: < <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=113>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

_____. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), **Quadro de indicadores e metas IGAM - Anexo II**. Disponível em: < <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/arquivos/QuadrodeIndicadoreseMetas.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

_____. Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Deliberação Normativa Conjunta n.º 01, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Mata Atlântica**. Brasília: MMA, 2016. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/biomas/mata-atlantica>>. Acesso em: 20 out. 2016.

MORLEY, S. A; KARR, J. R. Assessing and restoring the health of urban streams in the Puget Sound Basin. **Conservation Biology**, v. 16, n. 6, p. 1498–1509, 2002.

MORSE, G.; EATHERALL, A.; JENKINS, A. Managing agricultural pollution using a linked geographical information system and non-point pollution model. **Water and Environment Journal**, v. 8, n. 3, p. 277–286, 1994.

MUNN, M.; FREY, J.; TESORIERO, A. The influence of nutrients and physical habitat in regulating algal biomass in agricultural streams. **Environmental Management**, v. 45, p. 603–615, 2010.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **A study of remote sensing as applied to regional and small watersheds**, 1974.

NUZZO, R. Statistical errors: P values, the “gold standard” of statistical validity, are not as reliable as many scientists assume. **Nature**, v. 506, n. 7487, p. 150–152, 2014.

OMERNIK, J. M. **The influence on land use on stream nutrient levels**. EPA-600/3-76-104. U.S. Environ. Prot. Agency, Corvallis, OR. [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, D. E.; ASSIS D. C.; PIMENTELS, P. O.; FERREIRA, C. C. M. **Considerações sobre a precipitação na bacia hidrográfica do rio Paraibuna, MG/RJ, um resgate da série meteorológica compreendida entre 1980 e 2010**. In: VII Congresso de Geógrafos 2014, Vitória/ES.

ORLANDO, P. H. K. A bacia hidrográfica do rio Paraibuna “ Mineiro ”: Produção do espaço , dinâmica hidrológica e gestão das águas em curso. **Revista Geografia e Pesquisa, Ourinhos**, v. 5, n. 1, p. 77–101, 2011.

PARK, Y. S.; KWON, Y. S.; HWANG, S. J.; PARK, S. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map. **Environmental Modelling and Software**, v. 55, p. 214–221, 2014.

PECCATIELLO, A. F. O. **Carga Antrópica Na Trilha Principal Do Circuito Pico Do Pião - Parque Estadual do Ibitipoca, MG**. Trabalho de Conclusão de Curso para Especialização em Análise Ambiental. UFJF, 2007.

PFAFSTETTER, O. 1989. **Classificação de bacias hidrográficas: metodologia da codificação**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1989

PINHEIRO, A.; SCHOEN, C.; SCHULTZ, J.; HEINZ, K. G. H.; PINHEIRO, I. G.; DESCHAMPS, F. C. Relação entre o uso do solo e a qualidade da água em bacia hidrográfica rural no bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 127–139, 2014.

PRATT, B.; CHANG, H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales. **Journal of hazardous materials**, v. 209-210, p. 48–58, 30 mar. 2012.

QUADRO, M. S.; TEDESCO, M. J.; GIANELO, C.; BARCELOS, A. A.; ANDREAZZA, R. Degradabilidade de resíduos de curtume no solo. **SCIENTIA PLENA**, v. 9, n. 7, p. 1–10, 2013.

RADAMBRASIL. **Projeto RadamBrasil – Volume 32: levantamento de recursos naturais (Folhas SF 23/24 – Rio de Janeiro/Vitória)**. Rio de Janeiro: MME/Projeto RADAMBRASIL, 1983.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk , Kolmogorov-Smirnov , Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

REUTER, H. I.; NELSON, A.; JARVIS, A. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983–1008, 2007.

RIBEIRO, C. R. **Planejamento ambiental e gestão de recursos hídricos na Bacia Hidrográfica de Chapéu D’Uvas – Zona da Mata e Campo das Vertentes/MG**. Dissertação de Mestrado em Geografia da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente: 2012.

RICHARDSON, J. S.; BÉRAUD, S. Effects of riparian forest harvest on streams: a meta-analysis. **Journal of Applied Ecology**, 2014.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. Tradução: Pedro Paulo de Lima-e-Silva. Revisora técnica e coordenadora da tradução: Cecília Beno. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

ROBERTS, W. M.; STUTTER, M. I.; HAYGARTH, P. M. Phosphorus Retention and Remobilization in Vegetated Buffer Strips: A Review. **Journal of Environment Quality**, v. 41, n. 2, p. 389, 2012.

ROCHA, C. H. B., **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar** / César Henrique Barra Rocha - Juiz de Fora, MG: 3^{ra} Ed. do autor, ver. e atual., 2007. 220p.

ROCHA, C.H.B. FONTOURA, L. M.; SIMIQUELI, R. F.; PECCATIELLO, A. F. O. **Análise ambiental da capacidade de carga antrópica nas trilhas dos Circuitos das Águas e Pico do Pião-Parque Estadual do Ibitipoca, MG**. In: Anais do II Encontro Interdisciplinar de Ecoturismo em Unidades de Conservação e Iº Congresso Nacional de Ecoturismo (CONECOTUR). Itatiaia. 2007.

ROCHA, C. H. B.; CASQUIN, A. P.; SILVA, T. M.; FREITAS, F. A.; PEREIRA, A. M.; PAULA, I. F. M.; ALMEIDA NETO, J. O. **Dinâmica de parâmetros limnológicos e uso e cobertura da terra nas bacias hidrográficas das represas Dr. João Penido e São Pedro, Juiz de Fora/MG**. In: XX seminário de iniciação científica da UFJF, 2014.

ROCHA, C. H. B.; FREITAS, F. A.; SILVA, T. M. Alterações em variáveis limnológicas de manancial de Juiz de Fora devido ao uso da terra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 431–436, 2014.

ROCHA, C. H. B.; COSTA, H. F. Variação temporal de parâmetros limnológicos em manancial de abastecimento em Juiz de Fora, MG. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 543–550, 2015.

ROCHA, C.H.B.; DE AZEVEDO, L.P. Avaliação da presença de metais pesados nas águas superficiais da Bacia do Córrego São Mateus, Juiz de Fora (MG), Brasil/Assessing the presence of heavy metals in surface waters of the São Mateus Brook Basin, Juiz de Fora (MG), Brazil. **Revista Espinhaço (UFVJM)**, v. 4, n. 2, p. 33-44, 2016.

ROCHA, C. H. B.; PEREIRA B. H. C.; SILVA A.F.R.; OLIVEIRA M.; FIGUEIREIDO M. R.; CASQUIN A. P. Impactos do uso do solo nos recursos hídricos da bacia de contribuição do

Lago dos Manacás, Minas Gerais, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v.11, n.4, p. 929-942, out/dez 2016.

ROCHA, E. M.; MONTEIRO, M. L. R. Publish (negative results too) or perish. **Arquivos Brasileiros de Oftalmologia**, v. 78, n. 2, p. V–VI, 2015.

RODRIGUEZ, E.; MORRIS, C.S.; BELZ, J. E. A global assessment of the SRTM performance. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 249-260, 2006.

ROGAN, J.; CHEN, D. Remote sensing technology for mapping and monitoring land-cover and land-use change. **Progress in Planning**, v. 61, n. 4, p. 301–325, maio 2004.

SAHU, M.; GU, R. R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality. **Ecological Engineering**, v. 35, n. 8, p. 1167–1177, ago. 2009.

SANTOS, G. O.; HERNANDEZ, F. B. T. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 60–68, 2013.

SCHREIBER, C.; RECHENBURG, A.; RIND, E.; KISTEMANN, T. The impact of land use on microbial surface water pollution. **International journal of hygiene and environmental health**, v. 218, n. 2, p. 181–187, 2015.

SEEBOONRUANG, U. A statistical assessment of the impact of land uses on surface water quality indexes. **Journal of Environmental Management**, v. 101, p. 134–142, 2012.

SHEN, Z.; HOU, X.; LI, W.; AINI, G.; CHEN, L.; GONG, Y. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanised watershed in China. **Ecological Indicators**, v. 48, p. 417–427, jan. 2015.

SHORESH, N.; WONG, B. Points of view: Data exploration. **Nature Methods**, v. 9, n. 1, p. 5–5, 2012.

SILVA, D. M. L. DA; OMETTO, J. P. H. B.; LOBO, G. D. A.; LIMA, W. D. P.; SCARANELLO, M. A.; MAZZI, E.; ROCHA, H. R. DA. Can land use changes alter carbon, nitrogen and major ion transport in subtropical Brazilian streams? **Scientia Agrícola**, v. 64, n. 4, p. 317–324, 2007.

SILVA, T. M. **Qualidade da água e uso da terra na Bacia de Contribuição da Represa Dr. João Penido, Juiz de Fora – MG**. Dissertação de mestrado em Ecologia Aplicada ao Manejo e Conservação de Recursos Naturais da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora: 2015.

SLIVA, L.; WILLIAMS, D. D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality. **Water research**, v. 35, n. 14, p. 3462–3472, out. 2001.

SMITH, A. P.; WESTERN, A. W.; HANNAH, M. C. Linking water quality trends with land use intensification in dairy farming catchments. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 1–12, 2013.

SOARES, M.C.S; HUSZAR, V.L.M; ROLAND, F. Phytoplankton dynamics in two tropical rivers with different degrees of human impact (Southeast Brazil). **River Research and Applications**, v. 23, p. 698-714, 2007.

SOARES, J.H.P.; DUTRA, V.C.P. **Monitoramento e modelagem da qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do rio Paraibuna na área urbana do município de Juiz de Fora, utilizando medições de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio.** Anais... I Simpósio de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente da Zona da Mata Mineira, Juiz de Fora, 2010.

SPAROVEK, G.; RANIERI, S. B. L.; GASSNER, A.; DE MARIA, I. C.; SCHNUG, E.; DOS SANTOS, R. F.; JOUBERT, A. A conceptual framework for the definition of the optimal width of riparian forests. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 90, p. 169–175, 2002.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

TAN, B.; MASEK, J. G.; WOLFE, R.; GAO, F.; HUANG, C.; VERMOTE, E. F.; SEXTON, J. O.; EDERER, G. Improved forest change detection with terrain illumination corrected LANDSAT images. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 469–483, 2013.

TANAKA, M. O.; DE SOUZA, A. L. T.; MOSCHINI, L. E.; DE OLIVEIRA, A. K. Influence of watershed land use and riparian characteristics on biological indicators of stream water quality in southeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 333–339, 2016.

TANAKA, T.; SATO, T.; WATANABE, K.; WANG, Y.; YANG, D.; INOUE, H.; LI, K.; INAMURA, T. Irrigation system and land use effect on surface water quality in river, at lake Dianchi, Yunnan, China. **Journal of Environmental Sciences**, v. 25, n. 6, p. 1107–1116, 2013.

TRAN, C. P.; BODE, R. W.; SMITH, A. J.; KLEPPEL, G. S. Land-use proximity as a basis for assessing stream water quality in New York State (USA). **Ecological Indicators**, v. 10, n. 3, p. 727–733, maio 2010.

TRIBUNA. Excesso de visitantes reacende debate sobre lotação em Ibitipoca, Tribuna de Minas, 06 jan. 2016. Disponível em: <<http://www.tribunademinas.com.br/excesso-de-visitantes-reacende-debate-sobre-lotacao-em-ibitipoca/>>. Acesso em 08 fev. 2016.

TU, J. Spatially varying relationships between land use and water quality across an urbanization gradient explored by geographically weighted regression. **Applied Geography**, v. 31, n. 1, p. 376–392, jan. 2011.

TU, J.; XIA, Z.-G. Examining spatially varying relationships between land use and water quality using geographically weighted regression I: model design and evaluation. **The Science of the total environment**, v. 407, n. 1, p. 358–378, 2008.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. Impactos potenciais das alterações do Código Florestal nos recursos hídricos Introdução Resultados e Discussão. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p. 67–75, 2010.

UFV (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA); CETEC (FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS); UFLA (UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS); FEAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE). **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais – legenda expandida.** Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), **LANDSAT 8 (L8) data users handbook, Version 2.0**, mar. 2016a. Disponível em: <<https://LANDSAT.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

_____. **Provisional LANDSAT 8 surface reflectance code (LASRC) product, Version 3.1**, jul. 2016b. Disponível em: <http://LANDSAT.usgs.gov/documents/provisional_lasrc_product_guide.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2016.

URIARTE, M.; YACKULIC, C. B.; LIM, Y.; ARCE-NAZARIO, J. A. Influence of land use on water quality in a tropical landscape: A multi-scale analysis. **Landscape Ecology**, v. 26, n. 8, p. 1151–1164, 2011.

URBANSKI, J. **Integration of GEOBIA with GIS for semi-automatic land cover mapping from LANDSAT 8 imagery**. In: Proceedings of 5th GEOBIA conference, Thessaloniki (Greece), mai. 2014.

VANNOTE, R. L.; MINSHALL, W. G.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R.; CUSHING, C. E. PERSPECTIVES The River Continuum Concept. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences**, v. 37, n. 1, p. 130–137, 1980.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 55–64, 2010.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**, v. I, 2005.

WAN, R.; CAI, S.; LI, H.; YANG, G.; LI, Z.; NIE, X. Inferring land use and land cover impact on stream water quality using a Bayesian hierarchical modeling approach in the Xitiaoqi River Watershed, China. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 1–11, 2014.

WANG, X.; YIN, Z.-Y. Using GIS to assess the relationship between land use and water quality at a watershed level. **Environment International**, v. 23, n. 1, p. 103–114, jan. 1997.

WHITE, D. A.; SMITH, R. A.; PRICE, C. V.; ALEXANDER, R. B.; ROBINSON, K. W. A spatial model to aggregate point-source and nonpoint-source water-quality data for large areas. **Computers and Geosciences**, v. 18, n. 8, p. 1055–1073, 1992.

WORLD HEALTH ORGANISATION (WHO). **Iron in Drinking-water**: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2003a. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/iron.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Zinc in Drinking-water**: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2003b. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/zinc.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Barium in Drinking-water**: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2004. Disponível em: <

http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/barium.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Cyanide in Drinking-water:** Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2007. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/second_addendum_cyanide_short_term%20_4_.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Calcium and Magnesium in Drinking-water: Public health significance,** 2009. Disponível em: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43836/1/9789241563550_eng.pdf?ua=1>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Arsenic in Drinking-water:** Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2011a. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/arsenic.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Cadmium in Drinking-water:** Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2011b. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/cadmium.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Lead in Drinking-water:** Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2011c. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/lead.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

_____. **Manganese in Drinking-water:** Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality, 2011d. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/manganese.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2016.

WRUBLACK, S. C.; MERCANTE, E.; BOAS, M. A. V. **Influência do uso e ocupação do solo na qualidade da água utilizando técnicas de Geoprocessamento e Estatística Multivariada** (INPE, Ed.) XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**Foz de Iguaçu, PR: 2013

YAKIREVICH, A.; PACHEPSKY, Y. A.; GUBER, A. K.; GISH, T. J.; SHELTON, D. R.; CHO, K. H. Modeling transport of Escherichia coli in a creek during and after artificial high-flow events: Three-year study and analysis. **Water Research**, v. 47, n. 8, p. 2676–2688, 2013.

YU, S.; WU, Q.; LI, Q.; GAO, J.; LIN, Q.; MA, J.; XU, Q.; WU, S. Anthropogenic land uses elevate metal levels in stream water in an urbanizing watershed. **Science of the Total Environment**, v. 488-489, n. 1, p. 61–69, 2014.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman’s rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, p. 254–271, 2002.

ZHOU, T.; WU, J.; PENG, S. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China. **Ecological Indicators**, v. 23, p. 166–175, 2012.