

VANESSA CEZAR SIMONETTI

**REFLEXOS DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS SOBRE A QUALIDADE
DA ÁGUA E DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

**Sorocaba
2022**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

VANESSA CEZAR SIMONETTI

**REFLEXOS DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS SOBRE A QUALIDADE
DA ÁGUA E DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA**

Tese apresentada como requisito para a
obtenção do título de Doutora em Ciências
Ambientais da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” na Área de
Concentração Diagnóstico, Tratamento e
Recuperação Ambiental

Orientador: Prof. Dr. André Henrique Rosa
Coorientador: Prof. Dr. Darllan Collins da
Cunha e Silva

Sorocaba

2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

S598r Simonetti, Vanessa Cezar
Reflexos das atividades antrópicas sobre a qualidade da água e do solo em uma bacia hidrográfica / Vanessa Cezar Simonetti. -- Sorocaba, 2022
146 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba
Orientador: André Henrique Rosa
Coorientador: Darllan Collins da Cunha e Silva

1. Ciências ambientais. 2. Bacias hidrográficas. 3. Equação Universal de Perda de Solo. 4. Uso da terra. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: REFLEXOS DAS ATIVIDADES ANTRÓPICAS SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA E DO SOLO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

AUTORA: VANESSA CEZAR SIMONETTI

ORIENTADOR: ANDRÉ HENRIQUE ROSA

COORIENTADOR: DARLLAN COLLINS DA CUNHA E SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS AMBIENTAIS, área: Diagnóstico, Tratamento e Recuperação Ambiental pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ANDRÉ HENRIQUE ROSA (Participação Virtual) – Assina em nome dos demais membros da Banca
Departamento Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sorocaba Unesp

Dr^a. DANIELE FRASCARELI (Participação Virtual)
Faculdade Anhanguera

Profa. Dra. DEBORA ZUMKELLER SABONARO (Participação Virtual)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)

Prof. Dr. RENAN ANGRIZANI DE OLIVEIRA (Participação Virtual)
Engenharia Ambiental / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Prof. Dr. NOBEL PENTEADO DE FREITAS (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / Universidade de Sorocaba (UNISO)

Sorocaba, 06 de maio de 2022

Dedico esta tese a minha família, em especial ao meu avô Rubens Cezar Simonetti (*in memorian*), aos amigos e professores que contribuíram para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço às forças Divinas que me fortaleceram e guiaram durante o caminho.

Ao meu amor, esposo e companheiro, Lauro Mariano Furian pelo apoio nas coletas de campo, pela paciência e por acreditar/embarcar em meus sonhos.

Agradeço aos meus pais Maria Clotilde Mariano Simonetti e Valdir Cezar Simonetti pelo amor incondicional.

Às minhas irmãs Bruna Cezar Simonetti e Giovana Cezar Simonetti, pelo ombro amigo e por compreenderem as tantas ausências.

Aos meus avós Irene Cezar Simonetti e Rubens Cezar Simonetti (*in memoriam*) que sempre se orgulharam de minhas conquistas.

Aos meus queridos sogros Hélio Furian e Rosaly Furian, e aos amigos Mariana Furian Sandei e Cleber Sandei por todo apoio, carinho, incentivo e compreensão.

Ao Professor André Henrique Rosa, pelas oportunidades, orientação, compreensão e confiança depositada em mim no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor e amigo Darllan Collins da Cunha e Silva, pelas orientações, palavras amigas e sobretudo, por ser luz nos momentos de escuridão.

Aos professores que gentilmente dispuseram do seu tempo para participar da banca, contribuindo com o melhoramento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, da Universidade Estadual Paulista - Unesp/Sorocaba pela oportunidade de cursar a pós-graduação e aos docentes e coordenação do Programa pela oportunidade de desenvolver este projeto.

À Universidade de Sorocaba (Uniso) pela oportunidade de adquirir conhecimentos sólidos de docência e ao professor Nobel Penteado de Freitas.

Ao meu amigo e pesquisador Renan Antrizani de Oliveira pelo companheirismo e incentivos constantes.

À Daniele Frascareli pelas ótimas conversas, risadas e apoio em todas as etapas deste trabalho.

Ao querido João Carlos Alves Macedo pela amizade, por todo o apoio e incentivo (e pelos cafés).

À Débora Zumkeller Sabonaro, por ter me despertado para a vocação da pesquisa.

Ao grupo da Química pelo apoio e incentivo.

À técnica de laboratório Suzan Lessa pelas análises no momento delicado da pandemia.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - processo n°. 2016/15397-1, pelo auxílio financeiro.

A todos(as) que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu eterno agradecimento.

SIMONETTI, V. C. **Reflexos das atividades antrópicas sobre a qualidade da água e do solo em uma bacia hidrográfica**. 2022. 146 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba.

RESUMO

A deterioração da qualidade da água e do solo tem aumentado consideravelmente nas últimas décadas, causando uma série de problemas de ordem sanitária e ambiental. Por essa razão, os problemas relacionados a esses compartimentos vêm ganhando cada vez mais destaque no âmbito global, sendo fundamental o desenvolvimento de estudos, principalmente no domínio das bacias hidrográficas, que contemplem os aspectos relacionados à fragilidade intrínseca dessas áreas, os mecanismos que regem a perda de solos, bem como as implicações quanto ao aporte de sedimentos aos cursos de água e seus reflexos à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos e terrestres. Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa consiste na avaliação dos impactos antrópicos nos aspectos relacionados à perda de solos e suas implicações na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba (SP). Para tanto, primeiramente foi realizada a compartimentação da bacia que serviram de unidades espaciais individualizadas (sub-bacias) e assim permitiram a correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica. As análises quanto aos reflexos ambientais da perda de nutrientes do solo por erosão hídrica foram realizadas por meio da Equação Universal de Perda de Solos e permitiu a modelagem da perda de elementos químicos relacionados aos macros e micronutrientes, tais como o Cálcio (Ca); Fósforo (P); Potássio (K); Matéria Orgânica (MO); Cobre (Cu); Ferro (Fe); Manganês (Mn) e Zinco (Zn) nos compartimentos de cada sub-bacia hidrográfica. Posteriormente, foram realizadas correlações lineares entre esses nutrientes dos solos perdidos por erosão hídrica e os parâmetros considerados importantes na avaliação da qualidade da água, como Oxigênio Dissolvido (OD); Condutividade Elétrica (CE); Sólidos Totais Dissolvidos (STD) e os parâmetros que são indicativos de despejo de esgoto doméstico ou de fontes agrícolas, como Nitrogênio (N) e Fósforo (P), assim, foram verificadas as possíveis relações na qualidade da água das sub-bacias hidrográfica. Por fim, foi analisada a correlação entre a perda de nutrientes do solo e os sedimentos coletados nos exutórios das sub-bacias hidrográficas. Os resultados revelaram uma elevada perda de solos por erosão hídrica, com valores mais expressivos para o Ca, Fe e MO, cujas perdas foram estimadas em 28,52; 15,13 e 674,09 t/ano, respectivamente. Os resultados acerca da qualidade da água revelaram que todos os compartimentos possuem parâmetros em desacordo com a Resolução CONAMA 357/05 para o Fe, Cu e Mn, bem como para o STD e CE. O OD também apresentou valores abaixo do preconizado pela legislação, assim como o N e P apresentaram valores sugestivos de poluição devido ao aporte de nutrientes nos compartimentos da bacia. Os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com o pressuposto de que as atividades antrópicas estão afetando a qualidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, uma vez que foram estimadas elevadas perdas de nutrientes do solo que estão contribuindo com sedimentos na escala da bacia-vertente e seu carreamento para os cursos de água, sendo observadas nas análises de correlações realizadas neste estudo.

Palavras-chave: Perda de solos. Nutrientes. Recursos hídricos. EUPS. Geoprocessamento.

SIMONETTI, V. C. **Reflections of anthropic activities on water and soil quality in a watershed**. 2022. 146 f. Thesis (PhD in Environmental Sciences). São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, Sorocaba.

ABSTRACT

Deterioration of water and soil quality has increased considerably in recent decades causing a series of health and environmental problems. For this reason, problems related to these compartments are increasingly highlighted at the global level, it is essential to develop studies in the field of hydrographic basins that address the intrinsic fragility of these areas, the loss of soil, and the implications regarding the contribution of sediments to watercourses and their reflexes on human health and on aquatic and terrestrial ecosystems. In this sense, the objective of this research is to evaluate the anthropic impacts in the aspects related to soil loss and its implications for the water quality of the Pirajibu-Mirim river watershed, Sorocaba City (São Paulo State, Brazil). Firstly, the compartmentalization of the basin was carried out, which served as individualized spatial units and thus allowed the compartmentalized spatial correlation of drainage patterns with morphometric characteristics of the watershed. Analyzes regarding the environmental effects of soil nutrient loss by water erosion were performed using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and allowed the modeling of the loss of chemical elements related to nutrients, such as Calcium (Ca); Phosphorus (P); Potassium (K); Organic Matter (OM); Copper (Cu); Iron (Fe); Manganese (Mn) and Zinc (Zn) in the compartments. Afterwards, linear correlations were performed between these soil nutrients lost by water erosion and the parameters considered important in the evaluation of water quality, such as Dissolved Oxygen (DO); Electrical Conductivity (EC), and parameters that are indicative of discharge from domestic sewage or agricultural sources, such as Nitrogen (N) and Phosphorus (P), thus, possible relationships in the water quality of the hydrographic sub-basins were verified. Finally, the correlation between the loss of nutrients from the soil and the sediments collected at the outflows of the hydrographic sub-basins was analyzed. The results revealed a high loss of soils by water erosion, with more expressive values for Ca, Fe and MO, whose losses were estimated at 28.52; 15.13 and 674.09 t/year, respectively. The results about water quality revealed that all compartments have parameters in disagreement with CONAMA Resolution 357/05 for Fe, Cu and Mn, and for TDS and EC. The DO also presented values below the recommended by the legislation, as well as the N and P presented values suggestive of pollution due to the contribution of nutrients in the compartments of the basin. The results obtained in this research support the assumption that human activities are affecting the environmental quality of the Pirajibu-Mirim river basin, since high losses of soil nutrients were estimated, which are contributing with sediments at the watershed scale and their transport to water courses being observed in the correlation analyzes carried out in this study.

Palavras-chave: Soil loss. Nutrients. Water resources. USLE. Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim no município de Sorocaba (SP)	20
Figura 3.2 - A) Ordem e associação dos solos presentes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. B) Geologia da bacia hidrográfica	22
Figura 4.1 - Análise hierárquica fluvial das sub-bacias hidrográficas.....	29
Figura 4.2 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 1. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.	32
Figura 4.3 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 2. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.	33
Figura 4.4 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 3. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical	34
Figura 4.5 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 4. A) Altitude. B) Declividade. C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.	35
Figura 4.6 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 5. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.	36
Figura 4.7 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 6. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.	37
Figura 4.8 - Espacialização do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR).....	39
Figura 4.9 - Análise de componentes principais (ACP) por sub-bacias	42
Figura 4.10 - Dendrograma dos parâmetros do relevo pelo <i>Ward's Method</i> e quadrado da distância Euclidiana	44
Figura 5.1 - Distribuição dos pontos de solo amostrados na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim	49
Figura 5.2 - Fatores utilizados na Equação Universal de Perda de solos (EUPS).....	53
Figura 5.3 - Perda de solo por sub-bacias do Pirajibu-Mirim	56
Figura 5.4 - Distribuição espacial dos atributos do solo da bacia hidrográfica do Pirajibu-Mirim	58
Figura 6.1 - Localização dos exutórios das Sub-Bacias amostradas no estudo	68
Figura 6.2 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 1 (Sub1). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	78
Figura 6.3 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 2 (Sub2). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	79
Figura 6.4 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 3 (Sub3). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	80
Figura 6.5 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 4 (Sub4). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	81
Figura 6.6 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 5 (Sub5). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	82
Figura 6.7 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 6 (Sub6). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021	83
Figura 6.8 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as variáveis do solo e da água do exutório das sub-bacias	84
Figura 6.9 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso	86
Figura 6.10 – Correlação de Pearson do período seco entre as variáveis do solo e da água do exutório das sub-bacias	88
Figura 6.11 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período seco	90

Figura 7.1 - Distribuição dos pontos amostrais de sedimento para fins de caracterização textural e química.....	98
Figura 7.2 - Distribuição dos pontos amostrais de solo e sedimento para fins de caracterização textural.....	100
Figura 7.3 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as variáveis dos sedimentos do exutório das sub-bacias e as variáveis do solo	107
Figura 7.4 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso ..	108
Figura 7.5 - Correlação de Pearson do período seco entre as variáveis químicas dos sedimentos do exutório das sub-bacias e os elementos do solo	109
Figura 7.6 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período seco	110
Figura 7.7 - Distribuição espacial das frações texturais do solo das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim	112
Figura 7.8 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios com as frações texturais do solo das sub-bacias	116
Figura 7.9 - Correlação de Pearson do período seco entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios com as frações texturais do solo das sub-bacias	117
Figura A.1 – Parâmetros de qualidade da água obtidos nas sub-bacias do rio Pirajibu-mirim	142
Figura A.2 - Gráfico de dispersão das variáveis correlacionadas no período chuvoso	143
Figura A.3 - Gráfico de dispersão das variáveis correlacionadas no período chuvoso	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados quantitativos das sub-bacias hidrográficas.....	30
Tabela 4.2 - Índice de Concentração de Rugosidade Local por Sub-Bacias hidrográficas	40
Tabela 4.3 - Índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas.....	41
Tabela 5.1 - Valores médios obtidos para o Fator CP	52
Tabela 5.2 - Dados quantitativos da perda de solo por sub-bacias	56
Tabela 5.3 – Dados quantitativos da perda de nutrientes (em kg/ano) por sub-bacia	60
Tabela 6.1 - Coordenadas dos pontos amostrais.....	67
Tabela 6.2 - Dados quantitativos dos parâmetros de água obtidos nas Sub-Bacias do rio Pirajibu-Mirim.....	72
Tabela 6.3 - Correlação entre as variáveis de água e solo obtidas no período chuvoso	85
Tabela 6.4 - Correlação entre as variáveis de água e solo obtidas no período seco	89
Tabela 7.1 – Coordenadas dos pontos amostrados	97
Tabela 7.2 - Dados quantitativos dos elementos dos sedimentos dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim. As unidades são apresentadas em mg/kg.	103
Tabela 7.3 - Correlação entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período chuvoso	107
Tabela 7.4 - Correlação entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período seco.....	109
Tabela 7.5 - Valores quantitativos (em g/kg) das classes texturais dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim	113
Tabela A.1 - Perda anual de atributos do solo das sub-bacias do Pirajibu-Mirim	141
Tabela A.2 - Valores de precipitação mensais e anual do período de estudo	145

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	Análise de Componentes Principais
AHC	Análise Hierárquica de Conglomerados
CE	Condutividade Elétrica
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUPS	Equação Universal de Perda de Solos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAC	Instituto Agrônomo de Campinas
IC	Índice de Circularidade
ICR	Índice de Concentração de Rugosidade
IDW	Inverse Distance Weighted
Kc	Coeficiente de Compacidade
Kf	Fator de Forma
MDE	Modelo Digital de Elevação
MO	Matéria Orgânica
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
PTS	Parque Tecnológico de Sorocaba
RMS	Região Metropolitana de Sorocaba
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SIG	Sistema de Informação Geográfica
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
TIN	Triangulated Irregular Network
UTM	Universal Transversa de Mercator
WGS	World Geodetic System

SUMÁRIO

1	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	INTRODUÇÃO GERAL	17
2.1	Justificativas e relevância da pesquisa	17
2.2	OBJETIVOS	19
2.2.1	Objetivo Geral	19
2.2.2	Objetivos Específicos	19
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
4	CORRELAÇÃO ESPACIAL COMPARTIMENTADA DOS PADRÕES DE DRENAGEM COM CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM.....	23
4.1	INTRODUÇÃO.....	24
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.2.1	Procedimentos Metodológicos	25
4.2.2	Análise multivariada dos atributos morfométricos das sub-bacias hidrográficas	28
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.4	CONCLUSÕES.....	45
5	REFLEXOS AMBIENTAIS DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM (SP)	46
5.1	INTRODUÇÃO.....	47
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	49
5.2.1	Distribuição da malha amostral, coleta e distribuição espacial do solo	49
5.2.2	Equação Universal da Perda de Solos (EUPS)	50
5.2.3	Fator de Erosividade (R).....	50
5.2.4	Fator de erodibilidade do solo (K)	51
5.2.5	Fator topográfico (LS)	51
5.2.6	Uso, Manejo e Práticas Conservacionistas (Fator CP)	52
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5.3.1	Distribuição espacial dos atributos do solo por sub-bacias hidrográficas	57
5.3.2	Estimativa da perda de nutrientes das Sub-bacias do Pirajibu-Mirim.....	59
5.4	CONCLUSÕES.....	62
6	REFLEXOS ANTRÓPICOS DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA	64
6.1	INTRODUÇÃO.....	65
6.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	67
6.2.1	Justificativa e seleção dos pontos de coleta de água	67

6.2.2	Análises de água contempladas no estudo	68
6.2.3	Perda de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.....	69
6.2.4	Análises estatísticas empregadas no estudo.....	69
6.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
6.4	Perda de nutrientes do solo e os reflexos na qualidade da água.....	84
6.5	CONCLUSÕES.....	93
7	AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO SOBRE O APORTE DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA.....	94
7.1	INTRODUÇÃO.....	95
7.2	MATERIAL E MÉTODOS	97
7.2.1	Delimitação das sub-bacias hidrográficas e coleta de sedimentos nos respectivos exutórios	97
7.2.2	Análise textural das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim	99
7.2.3	Perda de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.....	100
7.2.4	Análises estatísticas empregadas no estudo	101
7.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
7.3.1	Correlação entre os sedimentos dos exutórios com a perda de nutrientes do solo.....	106
7.4	CONCLUSÕES.....	121
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
8.1	REFERÊNCIAS.....	127
	APÊNDICE A	141

APRESENTAÇÃO

Os impactos ambientais resultantes das ações antrópicas têm refletido negativamente em diversos aspectos, tais como no regime de chuvas, na disponibilidade hídrica e deterioração constante da qualidade da água devido o lançamento de efluentes domésticos e industriais, lixiviação de agroquímicos nos corpos hídricos, desmatamento, entre inúmeros outros aspectos.

No tocante ao solo, sua qualidade é deteriorada devido aos usos da terra incompatíveis com sua sustentabilidade, o que confere a esse importante compartimento uma perda gradativa de fertilidade provocada pela erosão, práticas inadequadas e ausência de manejo.

Nesse sentido, é fundamental desenvolver estudos que mensurem os impactos antrópicos na qualidade da água e do solo, e que avaliem os reflexos dessas ações nesses importantes compartimentos ambientais.

Assim, este estudo utilizou a Equação Universal da Perda de Solos (EUPS), amplamente utilizada no apoio à gestão de bacias hidrográficas, conforme já evidenciado em estudos nas mais diversas regiões do planeta. No entanto, esta tese avança cientificamente uma vez que utiliza a modelagem da EUPS para promover uma avaliação espacial da distribuição dos elementos químicos do solo (nutrientes) e os correlaciona com os elementos químicos da água e sedimentos dos leitos fluviais da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, o que possibilita uma análise minuciosa sobre os possíveis reflexos antrópicos na qualidade da água e do solo de uma bacia hidrográfica que apresenta constantes problemas relacionados à baixa vazão dos reservatórios compostos pelo sistema Castelinho/Ferraz, no município de Sorocaba (SP).

1 ESTRUTURA DO TRABALHO

A estrutura desta tese, para melhor elucidar a problemática abordada, foi desenvolvida em quatro capítulos que serão propostos para publicação e um item que trata das considerações finais. Os capítulos estão estruturados de acordo com a seguinte configuração:

O Capítulo I – publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia (janeiro de 2022: <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/2037>), contemplou os aspectos físicos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-mirim, como relevo, morfometria, e as inter-relações com a dinâmica hidrológica que possibilitam compreender os padrões de drenagem dos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica e suas correlações com os padrões de drenagem que podem atuar em diferentes magnitudes nos processos de transporte de sedimentos para as calhas fluviais.

No Capítulo II (aceito para publicação na Revista Caminhos de Geografia – previsão em 2022), são espacializados os nutrientes do solo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, e estimadas as perdas desses nutrientes por erosão hídrica por sub-bacia hidrográfica, identificando, assim, quais compartimentos podem contribuir com o aporte de sedimentos nos cursos de água e provocar efeitos deletérios na qualidade da água e sedimentos.

O Capítulo III abordou a correlação entre os nutrientes dos solos perdidos por erosão hídrica e seus reflexos na qualidade da água da bacia hidrográfica, evidenciando a relação direta entre os elementos do solo que estão sendo depositados nos leitos dos exutórios dos diferentes compartimentos.

No Capítulo IV é realizada a correlação entre a perda de nutrientes do solo e o aporte de sedimentos nos compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, sendo também realizada a distribuição espacial da textura do solo e analisada sua correlação com a textura dos sedimentos dos exutórios.

Nas considerações finais do estudo são sumarizadas as informações obtidas nos capítulos anteriores, as principais contribuições do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 INTRODUÇÃO GERAL

2.1 Justificativas e relevância da pesquisa

São escassos os estudos que contemplam a perda de nutrientes dos solos e os impactos do carreamento desses sedimentos aos corpos de água nas bacias hidrográficas do município de Sorocaba, principalmente no tocante ao comprometimento dos recursos hídricos e os reflexos na qualidade e quantidade de água.

Nesse sentido, o local selecionado para o estudo contempla a bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, que possui uma alta relevância ao que tange à conexão de remanescentes florestais, além de ser uma bacia hidrográfica que possui um importante papel na produção de água para o município.

A bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim se localiza a Sudeste do município, com uma área aproximada de 55,35 km², possui um reservatório de abastecimento público que supre cerca de 10% da população do município de Sorocaba. De acordo com Silva, T. A. (2021), as represas presentes na bacia constituem um sistema denominado *stop-log*, composto pelo sistema Castelinho/Ferraz, na qual a represa Castelinho, à montante, atua no controle do nível da água do reservatório Éden Ferraz, que é formado pela represa do Ferraz.

Embora a representatividade da bacia seja pequena em termos territoriais, sua contribuição é fundamental para o abastecimento público do município. Nesse prisma, a crise climática que estamos vivenciando traz à luz os impactos causados pela má gestão dos recursos hídricos em todo o território nacional, mas que possui destaque nas regiões de maior contingente populacional e polos industriais.

O município de Sorocaba é sede da Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), composta por 27 municípios. A RMS possui um importante papel na economia nacional, com um Produto Interno Bruto (PIB) igual a 67,24 bilhões de reais, o que equivale a 4% do Produto Interno Bruto (PIB) paulista (EMPLASA, 2019). A economia da RMS é diversificada, possuindo uma produção industrial altamente desenvolvida, com setores eletroeletrônico, metalmecânico, têxtil e agronegócio com predominância em cana-de-açúcar, além de ser a Região Metropolitana com a maior diversidade e produção agrícola do Estado de São Paulo (EMPLASA, 2019). Cabe destacar que os municípios que compõem a RMS, assim como a maioria das regiões metropolitanas, possuem sérios problemas relacionados a baixa disponibilidade de água e deterioração da qualidade dos recursos hídricos, sendo que a maioria dos rios se encontram poluídos.

A poluição dos rios por fontes antrópicas é um dos maiores problemas enfrentados mundialmente. No Brasil, embora o país detenha uma das maiores parcelas de água doce do planeta, a sua distribuição não é homogênea, uma vez que estados que possuem baixa densidade demográfica detêm grandes bacias hidrográficas, como a Bacia Amazônica, enquanto o Sudeste possui baixa disponibilidade hídrica e bacias hidrográficas altamente antropizadas e comprometidas em termos de poluição e contaminação (SÃO PAULO, 2020).

As alterações no clima decorrentes das mudanças climáticas têm proporcionado episódios climáticos extremos e antagônicos, compostos por eventos de chuvas excessivas, como as que ocorreram entre 2010 e 2012, ao passo que, entre 2013 e 2016, houve um severo episódio de seca (SÃO PAULO, 2017). Somado a isso, temos as implicações da má gestão dos recursos hídricos em todo o território nacional.

A baixa disponibilidade hídrica em algumas regiões brasileiras não é algo novo, uma vez que episódios anteriores já demonstraram as fragilidades da ausência de políticas públicas na gestão da água, levando regiões, como a do Sudeste do Brasil, a vivenciar uma acentuada redução de água de importantes reservatórios de abastecimento público e geração de energia elétrica. Nesse contexto, o município de Sorocaba recentemente promulgou o Decreto nº 26.839, de 11 de janeiro de 2022 (SOROCABA, 2022), instituindo o Plano de Contingenciamento e Racionamento no Abastecimento Público de Água no Município de Sorocaba, medida necessária, uma vez que os reservatórios que suprem o abastecimento do município encontravam-se com vazões criticamente baixas.

Entretanto, no cerne desta problemática e diante da magnitude das mudanças climáticas e das incertezas que temos diante do cenário futuro quanto à disponibilidade de água, são de importância ímpar os estudos que avaliem aspectos ambientais e antrópicos em bacias hidrográficas, principalmente no tocante àquelas que possuem papel estratégico na produção de água, como a bacia do rio Pirajibu-Mirim, objeto desta pesquisa.

Por essa razão, o presente estudo trará uma importante contribuição no sentido de evidenciar os impactos relacionados à perda de solos e as possíveis implicações na qualidade da água e do solo na bacia hidrográfica, servindo de subsídios para o planejamento e gestão da bacia hidrográfica.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa consiste na avaliação dos impactos antrópicos nos aspectos relacionados à perda de solos e suas implicações na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, município de Sorocaba (SP).

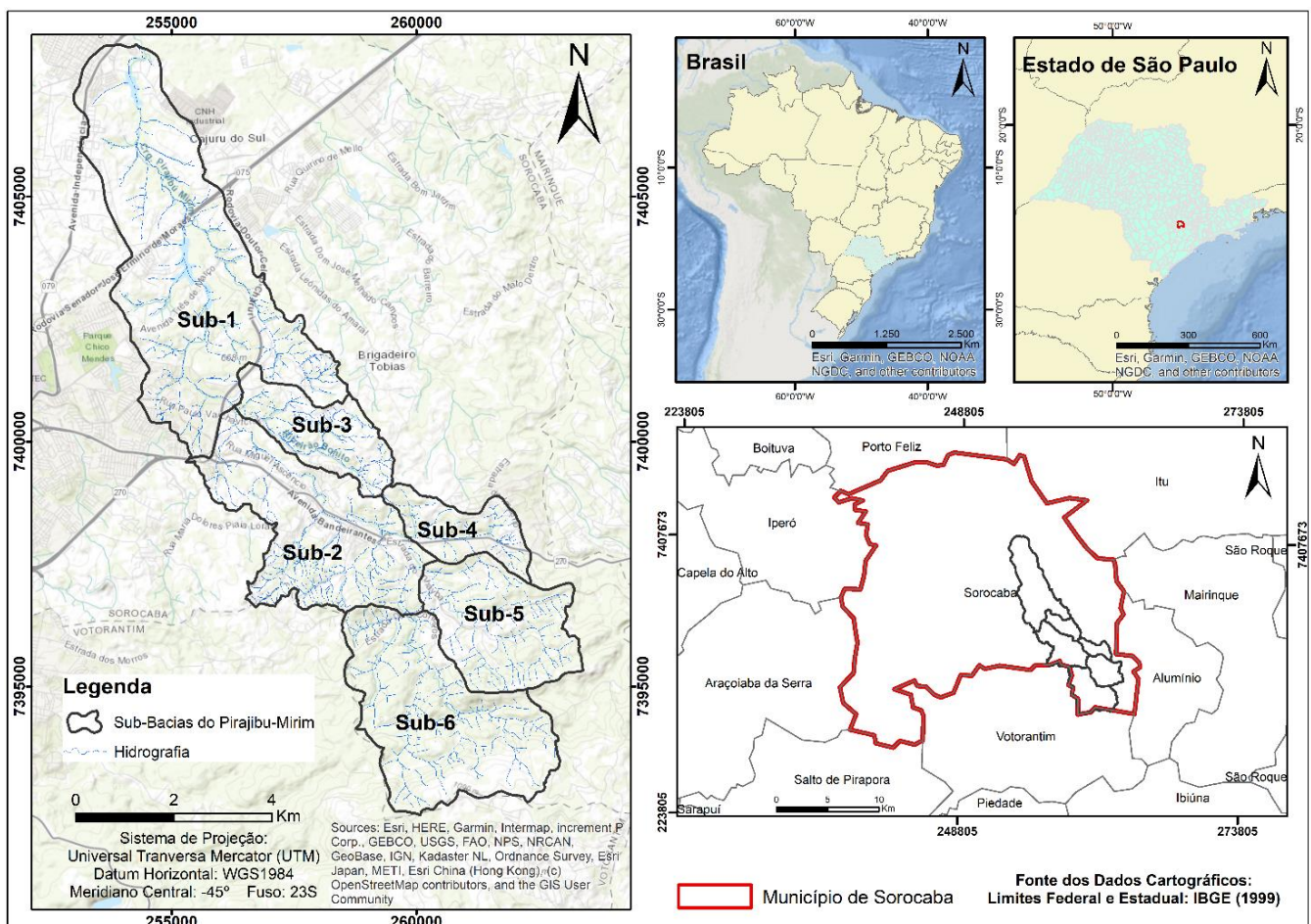
2.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a compartimentação da bacia hidrográfica que servirá de suporte para o estudo pormenorizado das diferentes condições morfométricas e suas correlações com os padrões de drenagem e que podem atuar em diferentes magnitudes nos processos de transporte de sedimentos para as calhas fluviais.
- Espacializar os nutrientes do solo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, bem como estimar a perda desses nutrientes por erosão hídrica por sub-bacia hidrográfica para identificar quais contribuem com maior aporte de partículas de solo nos cursos de água.
- Avaliar os reflexos antrópicos na qualidade da água da bacia hidrográfica a partir da perda de nutrientes do solo.
- Verificar a correlação entre a perda de nutrientes do solo com o aporte de sedimentos nos compartimentos da bacia hidrográfica.
- Gerar um banco de dados com informações referentes as condições atuais da bacia hidrográfica que possam servir de subsídios para um futuro indicador de sustentabilidade da bacia.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no município de Sorocaba, interior do Estado de São Paulo, o qual apresenta uma extensão territorial de aproximadamente de 450,382 km² e uma população estimada de 687.357 habitantes (IBGE, 2021). O município pertence à Região Metropolitana de Sorocaba, que se destaca em âmbito nacional devido a intensa e diversificada atividade econômica, caracterizada pela produção industrial altamente desenvolvida (EMPLASA, 2019). A bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim se localiza a Sudeste do município, com uma extensão aproximada de 55,35 km² (Figura 3.1), pertencendo à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 do Sorocaba e Médio Tietê.

Figura 3.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim no município de Sorocaba (SP)



Fonte: Autoria própria.

O município de Sorocaba, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, situa-se em uma zona de contato entre o clima Cfa, caracterizado por clima subtropical quente, com inverno não muito seco, cujas precipitações pluviométricas variam entre 30 mm e 60 mm para

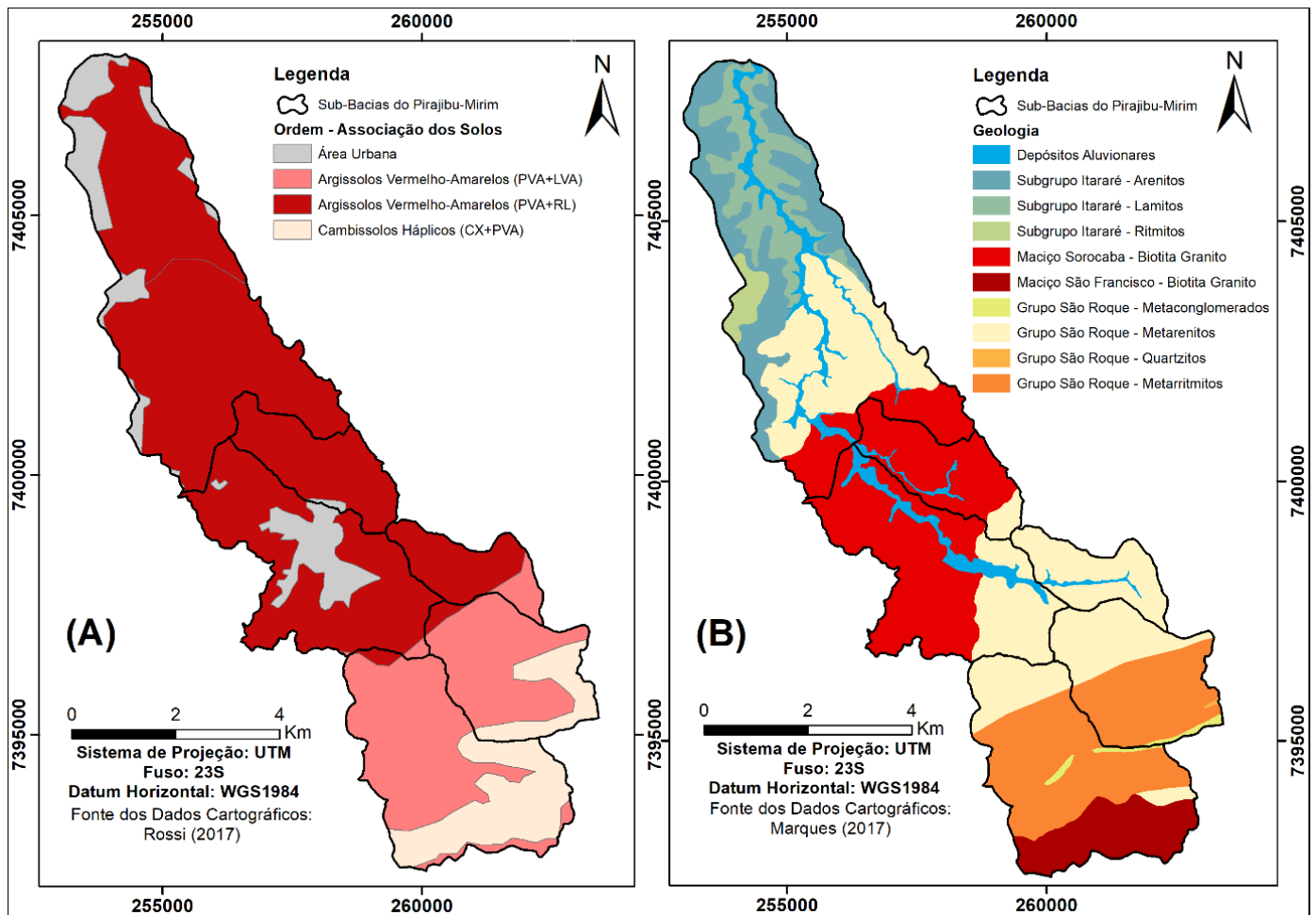
o mês mais seco, possuindo temperatura média de verão com máxima de 30,1°C e mínima de inverno de 12,2°C. Nas porções mais ao Norte do município encontra-se a zona Cwa, com características de clima temperado chuvoso e quente, com média pluviométrica inferior a 30 mm no mês mais seco, onde a temperatura média é superior a 22°C nos meses mais quentes e nos meses mais frios é inferior a 18°C (CORRÊA; TONELLO; FRANCO, 2016; SILVA; SILVA, 2016). A precipitação média anual é de 1.355,6 mm (INMET, 2009).

Quanto aos usos da terra, a bacia hidrográfica possui classes predominantes de pastagens distribuídas por toda a bacia, classes de cultivos agrícolas com pouca representatividade e infraestrutura urbana predominantes nas porções centrais e margem esquerda da bacia com sentido ao Norte. A formação florestal pertence a uma zona de tensão ecológica (ecótono), de domínio de Mata Atlântica, com Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado caracterizado por Savanas distribuídas em menores porções, com predominância ao Sul da bacia, onde há uma considerável fração de floresta plantada (SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2022a).

Os solos do trecho inferior e médio da bacia hidrográfica (Figura 3.2A) se caracterizam em Argissolos Vermelho-Amarelo com associação PVA+RL, sendo pouco profundo e raso e textura média; enquanto no trecho superior são encontrados Argissolos Vermelho-Amarelo (PVA+LVA), profundo e muito profundo, com textura argilosa, e Cambissos Háplicos (CX+PVA), pouco profundo e profundo, textura média/argilosa

Figura 3.2 - A) Ordem e associação dos solos presentes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

B) Geologia da bacia hidrográfica



Fonte: Autoria própria.

A geologia é caracterizada por uma significativa variação litológica, com rochas cristalinas Pré-Cambrianas tanto metamórficas quanto magmáticas e metassedimentares no médio e trecho superior da bacia, as quais se alteram para rochas sedimentares do Cenozoico na região inferior, com ocorrência de sedimentos Quaternários aluvionares nos fundos de vales que vão do trecho médio do curso do rio Pirajibu-Mirim até a sua foz (MARQUES, 2017).

Segundo o Macrozoneamento Ambiental do município de Sorocaba, a bacia do Pirajibu-Mirim pertence à macrozona com grandes restrições à ocupação e macrozona de conservação ambiental devido suas várzeas planícies aluviais, possuindo base geológica cristalina.

A bacia hidrográfica contempla a represa do Ferraz, que é um importante manancial de abastecimento de água, e que corresponde a cerca de 10% da captação superficial do município, com outorga para captação de até 900 m³/h durante 24 horas/dia (SAAE, 2016).

4 CORRELAÇÃO ESPACIAL COMPARTIMENTADA DOS PADRÕES DE DRENAGEM COM CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM

RESUMO

O conhecimento dos aspectos físicos da paisagem na escala da bacia hidrográfica, como relevo, morfometria, e as inter-relações com a dinâmica hidrológica possibilitam compreender os padrões de drenagem e inferir sobre as áreas mais vulneráveis ambientalmente. Diante disso, o estudo objetivou correlacionar espacialmente os padrões de drenagem com as características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e identificar quais os compartimentos são mais vulneráveis à intervenção antrópica. O processamento dos dados foi realizado a partir de técnicas de geoprocessamento, sendo utilizados o índice de concentração de rugosidade, curvatura horizontal e vertical das vertentes, altitude e declividade. Os parâmetros morfométricos contemplaram os índices de circularidade, coeficiente de compactidade, fator de forma, densidade de drenagem, coeficiente de manutenção e extensão do percurso superficial da água de enxurrada. As correlações foram realizadas a partir de análise multivariada de Componentes Principais e Análise de Conglomerados Hierárquicos. Os resultados evidenciaram que as sub-bacias se diferem em relação à área e perímetro, forma e drenagem, e morfografia (altitudes, declividades e curvaturas) e que esses aspectos estão relacionados aos padrões de drenagem. O estudo permitiu identificar os compartimentos que necessitam de atenção quanto às ações de gestão e manejo devido às suas características físicas intrínsecas.

Palavras-chave: Análise Multivariada; Morfografia; Sistema de Informação Geográfica.

ABSTRACT

The knowledge of the physical aspects of the landscape at the hydrographic basin scale, such as relief, morphometry, and the interrelationships with the hydrological dynamics, make it possible to understand the drainage patterns and infer about the most environmentally vulnerable areas. Therefore, the study aimed to spatial correlation drainage patterns with the morphometric characteristics of the Pirajibu-Mirim river watershed and to identify which compartments are most vulnerable to anthropic intervention. Data processing was performed using geoprocessing using the roughness concentration index, horizontal and vertical curvature of the slopes. The morphometric parameters included the circularity ratio, compactness coefficient, form factor, drainage density, maintenance coefficient, and extension of the runoff surface. The morphophysiographic relationships between the sub-basins were performed based on a multivariate analysis of Principal Components and Analysis of Hierarchical Conglomerates. Results demonstrated that the sub-basins differ concerning the area and perimeter, form and drainage, and morphography (slopes and curvatures), and these aspects are related to drainage patterns. From the study, it was possible to obtain knowledge of the compartments of the Pirajibu-Mirim river watershed that need attention as to management actions and management because of their intrinsic physical characteristics.

Keywords: Multivariate Analysis; Morphography; Geographic Information System.

4.1 INTRODUÇÃO

A busca por bens naturais e a apropriação expressiva do homem ao espaço que o rodeia interfere significativamente na qualidade ambiental, principalmente no tocante aos recursos hídricos, que vêm sofrendo uma constante deterioração em razão dos diferentes usos que o impactam negativamente, reduzindo a quantidade e qualidade de água (MELO et al., 2019; SIMONETTI et al., 2019a). Nesse sentido, qualquer ação ou intervenção antrópica culminará em possíveis desequilíbrios no meio físico e biótico e, por essa razão, torna-se imprescindível a realização de estudos que abranjam diferentes escalas, principalmente a escala da bacia hidrográfica (BORAH; DEKA, 2020).

A bacia hidrográfica consiste em um grupo de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, servindo como unidade de planejamento ambiental devido aos seus sistemas ecológicos e recursos naturais operarem de forma interligada e dependente (SILVA et al., 2020; SOARES et al., 2018).

Os processos que regem o equilíbrio em bacias hidrográficas são complexos e inter-relacionados e, por essa razão, conhecer as características físicas da bacia provém informações importantes sobre as características que permeiam sua dinâmica e que podem acarretar o declínio de sua qualidade ambiental. Assim, indicadores morfométricos são eficazes, sendo amplamente empregados na caracterização física dessas áreas, uma vez que fornecem uma estreita relação com o comportamento hidrológico (BOURAMTANE et al., 2020; GAJBHIYE; MISHRA; PANDEY, 2014).

O conhecimento das unidades homogêneas do relevo e suas inter-relações com a dinâmica hidrológica possibilitam o entendimento de padrões de drenagem. Somado a isso, a análise morfométrica pode fornecer informações preciosas no tocante às ações necessárias para o manejo e conservação dos recursos hídricos (SILVA et al., 2016a).

A partir da correlação de parâmetros morfométricos, diversos estudos estimaram, de forma indireta, propriedades físicas e biológicas de bacias hidrográficas, como as unidades homogêneas do relevo (SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014), identificação de formas de vertentes (SOPCHAKI; SAMPAIO, 2013), análises macrogeomorfológicas (CARVALHO; LATRUBESSE, 2004), além de fatores associados a outras características, tais como as influências de atributos fisiográficos e morfométricos como suporte às avaliações da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa (CERRI et al., 2018).

De acordo com Valeriano e Carvalho Júnior (2003), as diferentes variáveis sujeitas à extração automática em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG) podem fornecer

suporte à classificação multivariada do relevo. Na escala da bacia hidrográfica, o geoprocessamento com apoio de sensoriamento remoto (SR) fornece informações a partir da geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), permitindo realizar inferências em diferentes âmbitos (COLIADO; SIMONETTI; SILVA, 2020; GAJBHIYE; MISHRA; PANDEY, 2014).

Estudos realizados por Borah e Deka (2020) utilizaram indicadores morfométricos para avaliar o grau de priorização quanto à conservação e gestão de recursos hídricos e terrestres baseados em aspectos lineares, morfométricos e de relevo de sub-bacias hidrográficas do rio Jamuna, na Índia, utilizando SIG como apoio na avaliação; enquanto os estudos de Gajbhiye, Mishra e Pandey (2014) analisaram as sub-bacias do rio Manot, no Distrito de Madhya Pradesh, mais propensas à erosão do solo e que podem contribuir no aporte de sedimentos utilizando índices morfométricos. Já os estudos de Coliado, Simonetti e Silva (2020) analisaram a morfometria da bacia hidrográfica do rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira de Iguape (SP), com vistas ao fornecimento de informações relacionadas aos padrões de drenagem e as classes de aptidão quanto ao potencial uso do solo da bacia.

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo analisar as correlações espaciais compartimentada dos padrões de drenagem com as características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e identificar quais os compartimentos são mais vulneráveis à intervenção antrópica.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Procedimentos Metodológicos

As bases de dados utilizadas na composição deste estudo foram apoiadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo processadas nos softwares ArcGIS 10.5.1 (ESRI, 2016) e Google Earth Pro. Para tanto, foram utilizados arquivos digitais do Plano Diretor Ambiental da Prefeitura de Sorocaba em formato *shapefile* na escala 1:1.800 referentes à hidrografia e cotas altimétricas.

A análise da hierarquia fluvial foi definida de acordo com Strahler (1952), enquanto a definição das sub-bacias seguiu os critérios utilizados por Silva et al. (2016a), que consistem na identificação da ordem do curso de água principal da bacia hidrográfica e, a partir desse critério, as sub-bacias são estabelecidas de acordo com o curso de água de ordem inferior ao curso de água principal. No caso das sub-bacias que apresentavam a mesma ordem do curso de água principal ou que possuíam uma confluência entre o curso de água principal e o curso de

água com uma ordem imediatamente inferior, levou-se em consideração os seus divisores topográficos internos, desprezando os critérios hierárquicos fluviais.

O estudo englobou a análise geométrica da bacia hidrográfica, contemplando parâmetros dimensionais, como a área (A - km²) e perímetro (P - Km). Também foi analisado o comprimento do rio principal (Cp) e o comprimento total da rede de drenagem (Cd). Tais parâmetros ampararam a elaboração dos indicadores morfométricos.

O índice de circularidade (IC) avalia a forma da bacia hidrográfica, cujo valor se aproxima de 1 à medida que a bacia assume a forma circular e diminui à medida que a forma se alonga (Equação 1).

$$IC = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

Sendo: A é a área em km²; P é o perímetro em Km.

O coeficiente de compacidade (Kc) relativiza o perímetro (P) de uma bacia hidrográfica à circunferência de um círculo cuja área (A) é igual ao da bacia. Assim, quanto mais próximo o valor do Kc se aproximar de 1, maior será a aproximação de um círculo, indicando maior suscetibilidade a enchentes (Equação 2).

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

O fator de forma (Kf) é um índice que relaciona a largura média da bacia e o comprimento do seu eixo axial (L). Valores compreendidos entre 0,75 e 1 correspondem a alta propensão de grandes enchentes, enquanto valores abaixo de 0,50 indicam uma baixa propensão a enchente e maior indicativo de conservação (SILVA et al., 2016a) (Equação 3).

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (3)$$

Sendo: A é a área de drenagem da sub-bacia em km²; L é o comprimento axial da sub-bacia hidrográfica correspondendo à distância do exutório ao ponto mais longínquo do divisor topográfico em km.

A densidade de drenagem (Dd) infere sobre a relação entre o comprimento total de rios (Lt) e a área, em km², da bacia hidrográfica (A) (Equação 4). De acordo com Sthraler (1952), as bacias podem ser classificadas como de baixa drenagem (até 5,0 km/km²); média (5,0 a 13,5 km/km²); alta (13,5 a 155,5 km/km²) e muito alta (acima de 155 km/km²).

$$Dd = \frac{Lt}{A_{sub}} \quad (4)$$

Sendo: Lt é o comprimento total dos cursos de água fluviais da sub-bacia hidrográfica em km; A_{sub} é a área de drenagem das sub-bacias em km².

O coeficiente de manutenção dos canais (Cm) proposto por Schumm (1956), refere-se ao inverso da densidade de drenagem (Dd), sendo uma constante cuja dimensão aumenta em termos de magnitude conforme a área de contribuição aumenta. Assim, esse coeficiente demonstra a área de drenagem (em km²) necessária para sustentar um quilômetro linear de canal (Equação 5).

$$Cm = \frac{1}{Dd} \quad (5)$$

A extensão do percurso superficial da água de enxurrada (Eps) infere sobre a distância média que é percorrida pelas enxurradas antes de encontrar um canal permanente (CHRISTOFOLETTI, 1969) (Equação 6).

$$Eps = 0,5 \times Dd \quad (6)$$

Sendo: Eps é a extensão do percurso superficial da água de enxurrada (km); Dd é a densidade de drenagem (em km/km²).

Quanto às características relacionadas ao relevo, foram determinadas a altitude; declividade; forma das vertentes (curvatura horizontal e vertical) e índice de concentração de rugosidade (ICR). O MDE da bacia hidrográfica foi gerado a partir da interpolação de 1.995 pontos cotados (pontos de elevação conhecidos e de maior acurácia) e das curvas de nível na escala 1:1.800. Após, foi elaborado o plano de informação (PI) contendo a altimetria da bacia hidrográfica, com resolução espacial do *raster* de saída de 10 m x 10 m. Com o PI respectivo à altitude da bacia foi obtida a declividade.

A geometria das vertentes foi avaliada a partir do MDE. A inclinação da vertente afeta a taxa geral de movimento descendente, já a curvatura vertical afeta a aceleração e desaceleração do fluxo, influenciando nos processos de erosão e deposição, enquanto a forma da curvatura do plano horizontal influencia na convergência e divergência de fluxo (VALERIANO, 2003; VALERIANO; CARVALHO JÚNIOR, 2003). Assim, valores positivos (+) de curvatura horizontal indicam que a superfície é divergente, já valores negativos (-) indicam uma superfície convergente, enquanto valores nulos (0) indicam uma superfície plana.

No entanto, estudos realizados por Valeriano (2003) e Valeriano e Carvalho Júnior (2003) relatam que valores nulos são raros na natureza, por essa razão, foram utilizados os limiares sugeridos pelos autores, sendo adotados os valores de -0,038 a 0,050 para classificar a vertente como retilínea. As curvaturas em perfil vertical apresentam sinal positivo (+) para vertentes côncavas, negativos (-) para convexas e limiares entre -0,04 e 0,04 para retilíneas.

Como análise complementar das unidades de relevo foi realizada análise do índice de concentração de rugosidade (ICR), que utiliza o MDE e técnicas de geoprocessamento que possibilitam a inferência de unidades homogêneas do relevo a partir de padrões morfométricos de dissecação do relevo, se diferenciando do método pixel a pixel, pois possibilita analisar a recorrência espacial dos valores de declividade (SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014).

A obtenção do ICR Local por sub-bacia se deu por meio da conversão dos valores de PI de declividade (%) do formato *raster* para um arquivo de pontos (vetorial), sendo então aplicado o estimador de Kernel com raio de 1 km². Os valores obtidos foram discretizados em cinco classes utilizando-se os quantis, e os intervalos foram nomeados quanto ao índice de concentração de rugosidade (ICR), sendo: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto.

4.2.2 Análise multivariada dos atributos morfométricos das sub-bacias hidrográficas

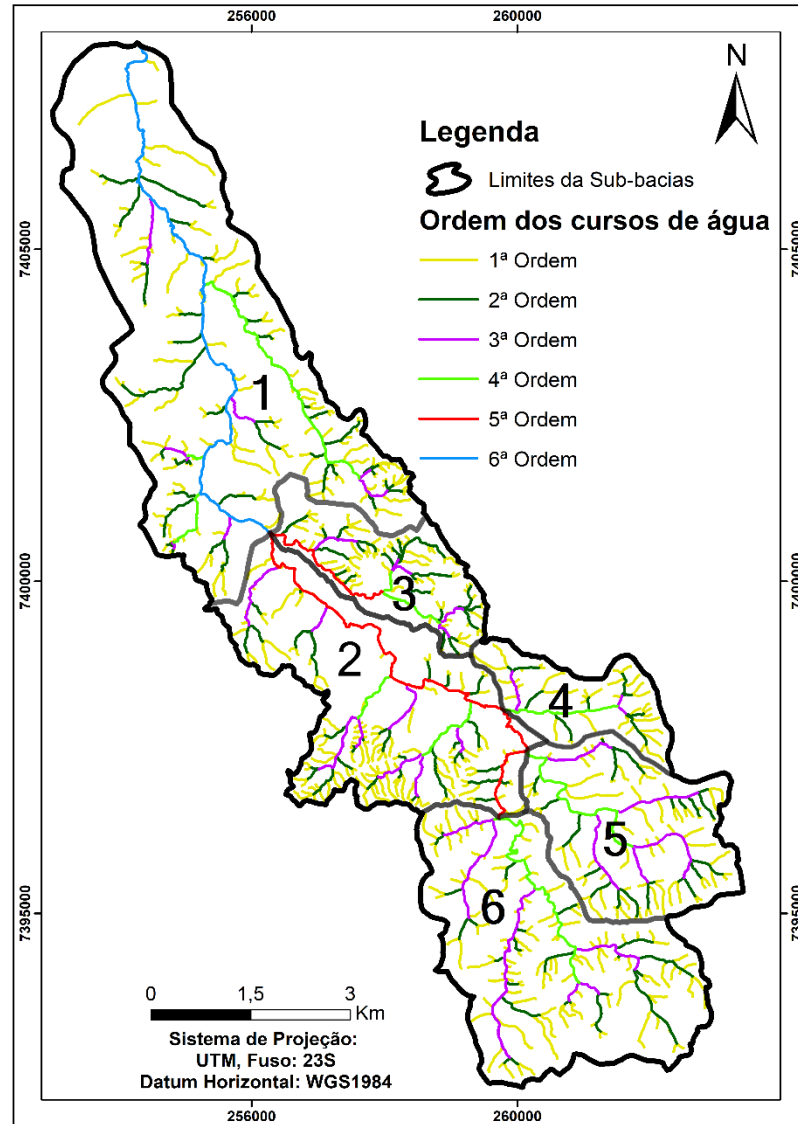
A análise multivariada foi realizada por meio da análise de componentes principais buscando identificar diferentes padrões de drenagem entre as sub-bacias e que possam estar associados às suas características fisiográficas. Assim, a padronização dos dados foi realizada de acordo com a média e o desvio padrão (DP), eliminando o viés decorrente de diferentes escalas uma vez que são atribuídos os mesmos pesos para cada variável (SIMONETTI et al., 2019). Para tanto, foram utilizadas as variáveis: IC, Kc e Kf, Dd, Eps e Cm, além das variáveis Perímetro; Área; Altitude; Declividade (Decliv); Curvatura Horizontal (Curv_Horizontal) e Curvatura Vertical (Curv_Vertical).

Como análise complementar foi realizada a Análise de Conglomerados Hierárquicos (ACH), sendo o tipo mais comum de *clustering* hierárquico utilizado na aglutinação de dados com base em sua similaridade (BOURAMTANE et al., 2020). Neste estudo foi utilizado o método Ward, que proporciona agregados com o mesmo número de observações, agrupando as variáveis que apresentam a menor soma dos quadrados da distância euclidiana entre dois agrupamentos, sendo o resultado expresso por meio de um dendrograma.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a metodologia utilizada, a área de estudo foi subdividida em seis sub-bacias, preservando os limites internos dos divisores topográficos e a análise hierárquica fluvial (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Análise hierárquica fluvial das sub-bacias hidrográficas



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados quantitativos por sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim.

Tabela 4.1 - Dados quantitativos das sub-bacias hidrográficas

Sub-Bacias	Extensão (em km) por Ordem dos cursos de água						Área (km ²)	Perímetro (km)
	1	2	3	4	5	6		
1	33,07	15,22	3,45	5,87	0,00	10,16	19,94	26,24
2	25,96	9,36	6,16	2,20	8,20	0,00	10,39	18,48
3	12,15	7,88	2,12	1,49	2,55	0,00	4,08	10,51
4	9,20	3,05	1,02	1,83	0,00	0,00	2,97	9,03
5	17,76	7,15	5,83	3,22	0,00	0,00	6,60	11,19
6	28,87	8,05	7,62	4,15	0,00	0,00	11,38	16,29

Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 1 apresentou a maior área e perímetro dentre as sub-bacias analisadas e, quanto à extensão dos cursos de água, o rio de 1ª ordem obteve o maior valor, com 33,07 km de extensão, seguido pelo rio de 2ª ordem, com 15,22 km e o rio de 6ª ordem, apresentou uma extensão de 10,16 km dentro da sub-bacia. A segunda maior extensão de rios de 1ª ordem foi a Sub-Bacia 6, com 28,87 km, enquanto a menor extensão foi encontrada para os rios de 4ª ordem (4,15 km). Dentre as sub-bacias analisadas, destaca-se a Sub-Bacia 4 como a de menor extensão em todas as ordens, sendo 9,20 km para rios de 1ª ordem, 3,05 km para rios de 2ª ordem e 1,02 e 1,83 km para os rios de 3ª e 4ª ordem, respectivamente. É importante salientar que grande parte dos tributários de 1ª e 2ª ordem são efêmeros ou mesmo intermitentes, fato que também foi observado por Marques (2017). Tal característica é sugestiva de serem locais de nascentes e, por não possuírem tributários anteriores e apresentarem as menores extensões, estão mais sujeitos à sazonalidade e, conseqüentemente, não apresentam grandes volumes de água, principalmente nos períodos de estiagem.

Quanto aos tipos de drenagem, destaca-se a Sub-Bacia 1 por apresentar predominância do padrão subparalelo, com um grau médio de integração entre os canais e sinuosidade mista. A angularidade dos canais é média, tornando-se baixa próximo ao exutório da sub-bacia, com ângulos de junção preponderantemente obtusos. Também apresenta padrões de treliça, principalmente na porção Norte da bacia, com um curso de água marcante representado pelo rio Pirajibu-Mirim, e tributários em lados opostos dispostos em ângulos obtusos.

As Sub-Bacias 2 e 3, localizadas no curso médio e inseridas predominantemente no Maciço Sorocaba, apresentam um padrão subdendrítico com densidade média a alta, principalmente nas porções Sul e Oeste da Sub-Bacia 2, e em toda extensão da Sub-Bacia 3.

A Sub-Bacia 4 encontra-se inserida predominantemente nos Metarenitos, enquanto as Sub-Bacias do curso superior (5 e 6) apresentam-se em transição entre os grupos Metarenitos, Metarritmitos do Grupo São Roque e Biotita Granito do Maciço São Francisco.

De modo geral, as Sub-Bacias da cabeceira apresentam padrão de drenagem treliça, com destaque para a Sub-Bacia 5 que possui uma modificação, com aspectos de treliça recurvada que se difere do padrão básico pela presença de drenagem curva, enquanto a Sub-Bacia 6 apresenta modificação para o padrão subtreliça, que se difere do padrão básico apenas em relação ao grau de continuidade, nesse sentido, é possível identificar segmentos de curso de água com essas características na Sub-Bacia.

O padrão treliça é representativo de uma drenagem de direção dominante e outra tributária perpendicular a ela. Esse padrão ocorre principalmente quando o substrato rochoso se alterna entre rochas, o que pode ser verificado nos diferentes substratos presentes na sub-bacia, que apresenta uma transição do Grupo São Roque formado pelos Metarenitos (ao Sul da sub-bacia), enquanto na porção central apresenta-se o Subgrupo Itararé, com Arenitos, Lamitos e Ritmitos, e na calha do rio Pirajibu-Mirim predominam-se os Depósitos Aluvionares. De acordo com Baptista e Von Sperling (2007), a morfologia dos leitos e canais possui uma íntima relação com o substrato, sendo os rios aluviais aqueles localizados em planícies ou vales aluviais, formados por materiais sedimentares.

Resultados semelhantes foram encontrados por Marques (2017), destacando que o padrão treliça identificado na bacia possui na área dos metassedimentos do Grupo São Roque. De modo geral, a rede de drenagem não se apresenta uniforme, sendo que as sub-bacias possuem ordens hierárquicas distintas, onde os canais de primeira ordem possuem as mais significativas diferenças quanto à simetria, grau de integração, densidade, sinuosidade, angularidades, bem como ângulos de junção. De acordo com Silva et al. (2016a), o estudo das diferentes ordens fluviais torna-se importante para a compreensão do efeito da variação da escala na aglutinação das informações.

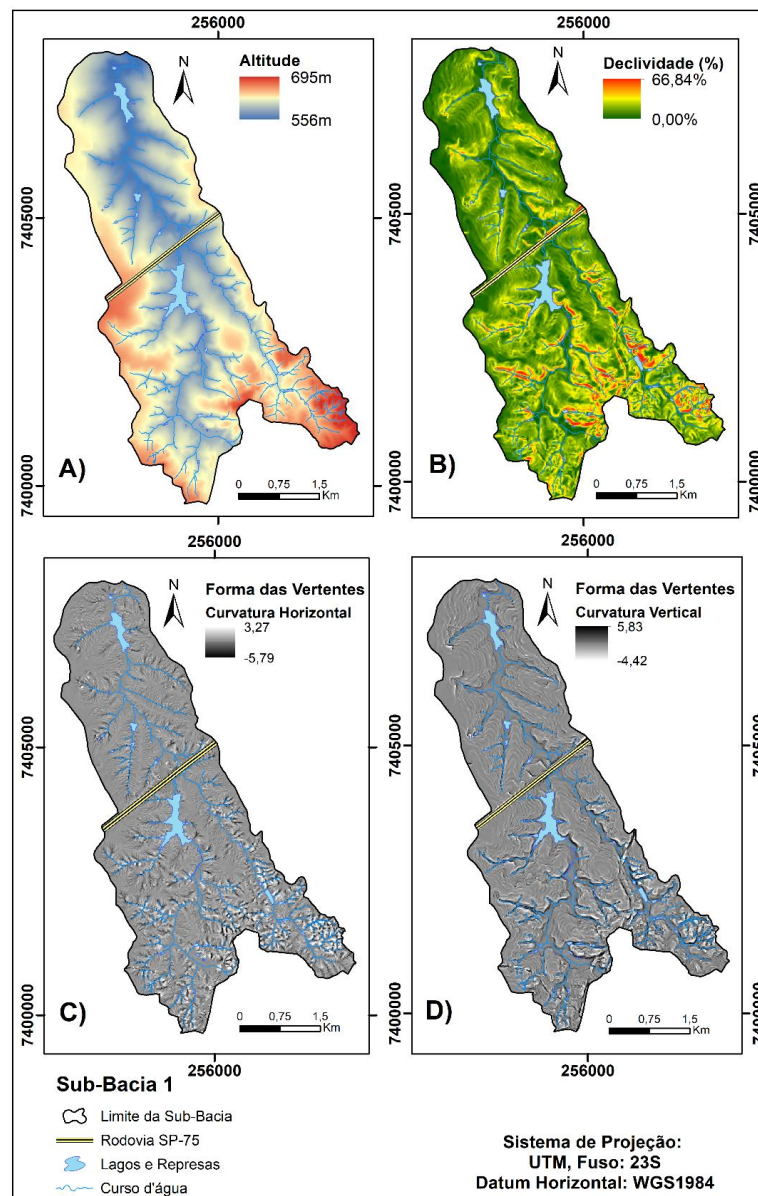
Os resultados acerca dos atributos do relevo são apresentados de forma compartimentada, revelando os principais aspectos das sub-bacias. Os menores valores de declividade localizam-se ao Norte da bacia, no sentido da foz do rio Pirajibu-Mirim, onde são predominantes os sedimentos do Subgrupo Itararé, sendo possível verificar uma suave transição e aumento da declividade e altitude na intersecção com os Metarenitos do Grupo São Roque e no Maciço Sorocaba, nas porções centrais da bacia, ficando ainda mais expressiva à medida que se aproxima do Sul, à montante da bacia, nas áreas que tangenciam os Metarritmitos, Metaconglomerados, bem como o substrato granítico do Maciço São Francisco, sendo as

maiores declividades (acima de 100%) predominantes nas bordas do Planalto, atingindo os valores máximos nos conjuntos de morros da Serra de São Francisco e Inhaíba.

No entanto, exceções são constatadas nas proximidades dos sedimentos Aluvionares, nas bordas dos cursos de água e nos fundos de vales, que obtiveram os menores valores de declividade e altitude, por compreenderem as regiões mais baixas da bacia.

Na Figura 4.2 (A) a altitude apresentou valores entre 556 m e 695 m, com amplitude de 139 m, e um valor médio de 605 m. A declividade (B) variou entre 0,00% e 66,84%, com valor médio de 11,24%.

Figura 4.2 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 1. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.

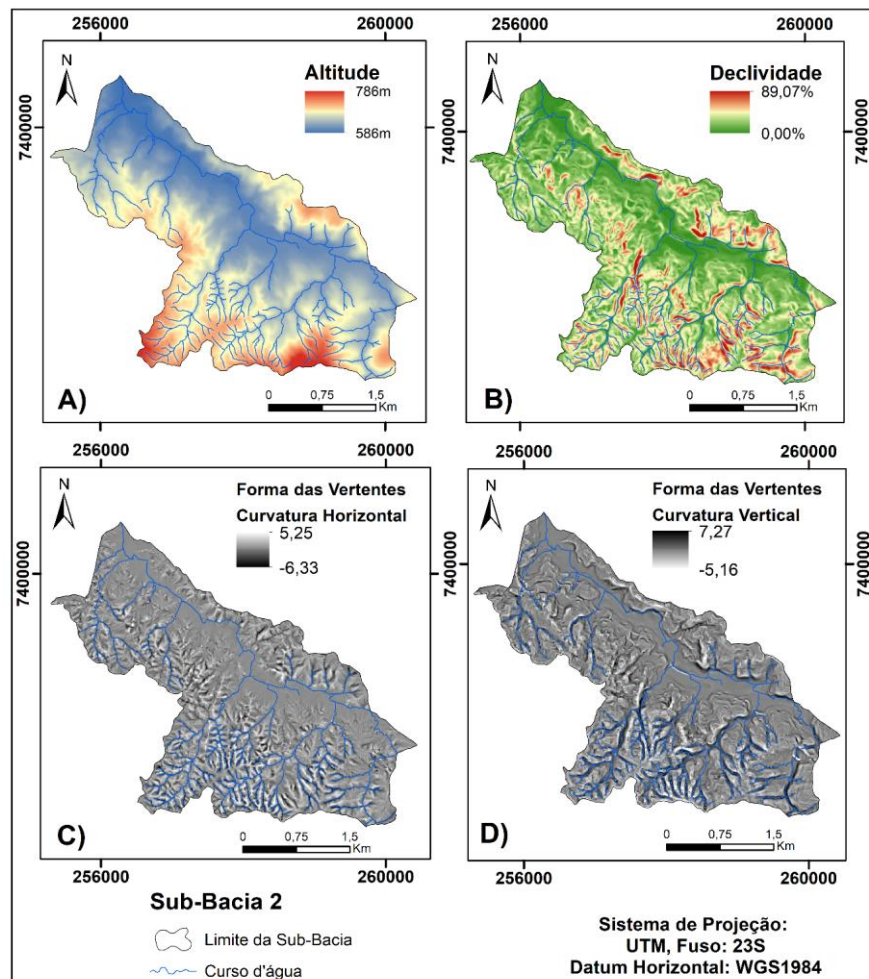


Fonte: Autoria própria.

Os valores da curvatura horizontal 4.2 (C) obtidos variaram entre -5,79 e 3,27, com desvio padrão (DP) de 0,35. As formas horizontais predominantes na sub-bacia foram divergentes, com uma área de 9,23 km², convergentes, com 6,93 km² e retilíneas abrangendo 3,75 km². As vertentes com curvaturas verticais (D) obtiveram valores entre -4,42 e 5,83, e DP de 0,42. A vertentes convexas apresentaram a maior área, com 8,14 km², enquanto as côncavas computaram 7,51 km², e as retilíneas 4,26 km².

Na Figura 4.3 são apresentados os resultados da Sub-Bacia 2.

Figura 4.3 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 2. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.



Fonte: Autoria própria.

A altitude da Sub-Bacia 2 (A) apresentou valores entre 586 m e 786 m, com valor médio de 647 m, e valores mais elevados nas porções Sul no sentido Noroeste da sub-bacia. A declividade compreendeu valores entre 0,00% e 89,07% (B), com valores elevados dispersos

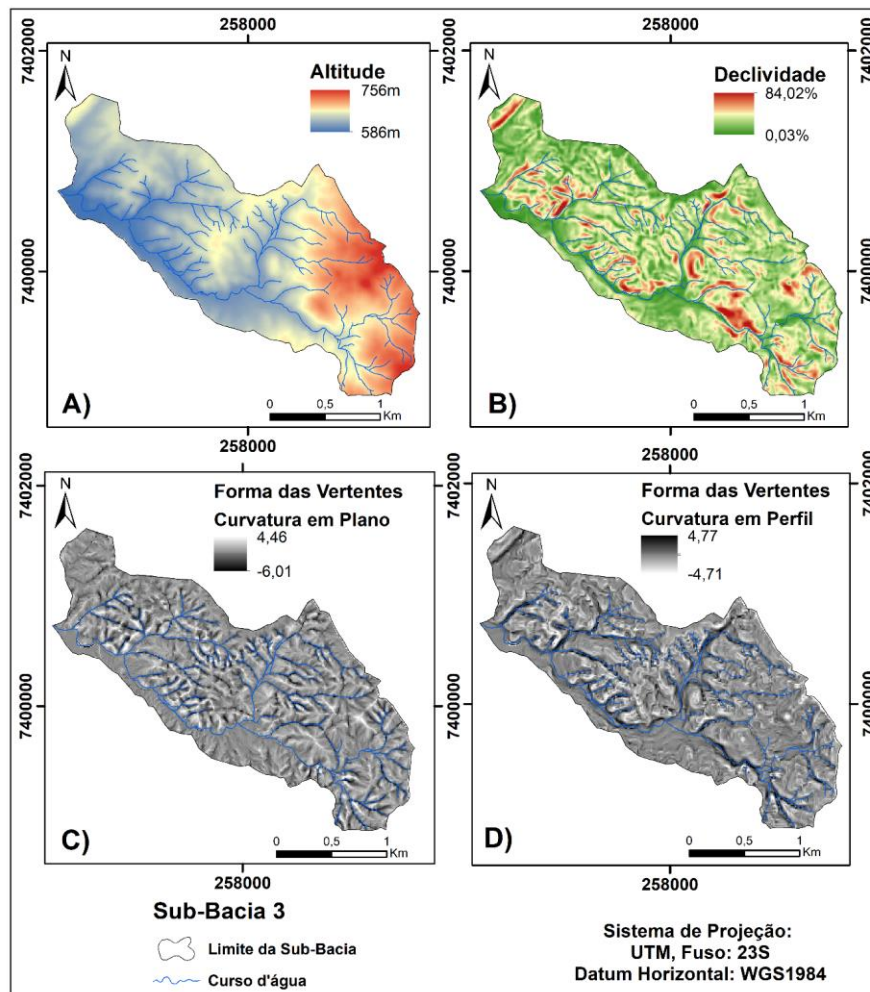
ao longo da sub-bacia, enquanto nas porções que compreendem o curso de água principal foram encontrados os menores valores de altitude e declividade.

A geometria das vertentes no plano horizontal apresentou um valor mínimo de -6,33 e máximo de 5,25, com um DP de 0,67, revelando que a sub-bacia possui vertentes horizontais (em plano) com predomínio de formas divergentes, com área equivalente a 5,10 km², seguido por formas convergentes, com 4,27 km²; enquanto as formas retilíneas apresentaram uma área de 1,00 km².

A curvatura vertical apresentou valores entre -5,16 e 7,27, com uma ligeira prevalência de vertentes côncavas, com área de 4,89 km², em comparação às convexas, com 4,40 km², enquanto as formas retilíneas corresponderam a 1,09 km².

A Figura 4.4 ilustra os aspectos do relevo da Sub-Bacia 3.

Figura 4.4 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 3. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical



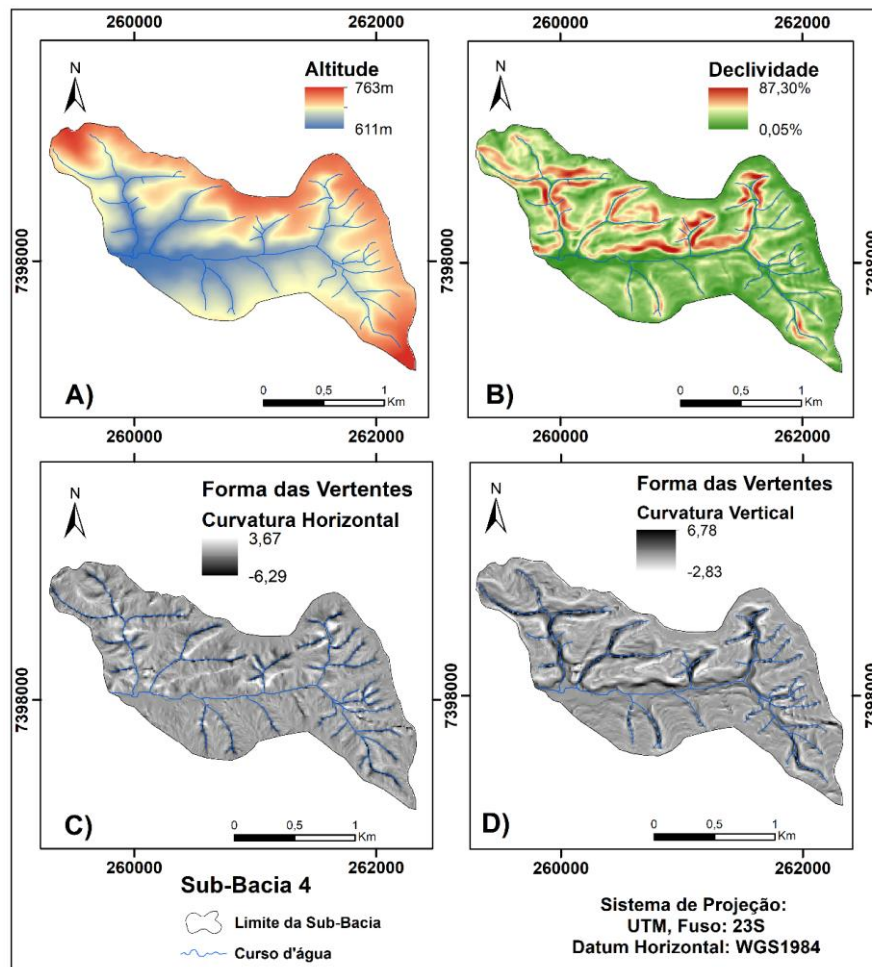
Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 3 apresentou valores de altitude (A) e declividade média (B) de 652 m e 20,38%, respectivamente. Os menores valores de ambas as variáveis foram encontrados na faixa que permeia o curso de água principal.

Os valores de curvatura horizontal (C) encontrados variaram entre -6,01 e 4,46, com um DP de 0,68. As formas predominantes foram divergentes, com 2,14 km², enquanto as formas convergentes representaram 1,71 km². A fração retilínea demonstrou os menores valores, com apenas 0,22 km². A curvatura vertical (D) apresentou valores mínimos de -4,71 e máximo de 4,77, com DP de 0,69. As formas côncavas predominaram, com 1,96 km², enquanto as convexas apresentaram 1,83 km², e as retilíneas apresentaram a menor porção, com 0,28 km².

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados da Sub-Bacia 4.

Figura 4.5 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 4. A) Altitude. B) Declividade). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.



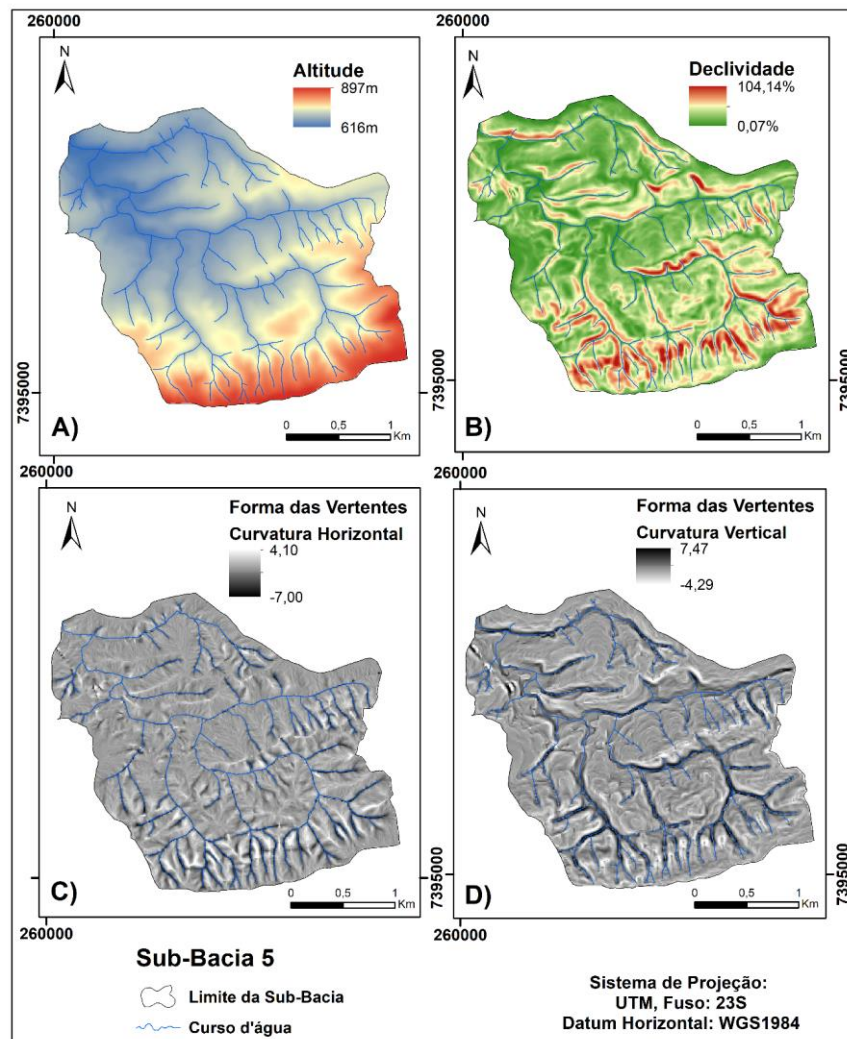
Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 4 obteve uma altitude média de 676 m (A), e declividade média de 22,78% (B), com valor mínimo de 0,05% e máximo de 87,27%.

A curvatura horizontal (C) obteve um valor mínimo de -6,29 e máximo de 3,67, e um DP de 0,57. As formas predominantes foram divergentes, com uma área de 1,59 km², seguido das formas convergentes (1,12 km²). Já as porções retilíneas apresentaram uma área de 0,25 km². A curvatura em perfil (D) apresentou valor mínimo de -2,83 e máximo de 6,78, com DP igual a 0,70, com predomínio de vertentes convexas (1,63 km²), enquanto as côncavas computaram uma área de 1,09 km², e as retilíneas 0,24 km².

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados da Sub-Bacia 5.

Figura 4.6 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 5. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.



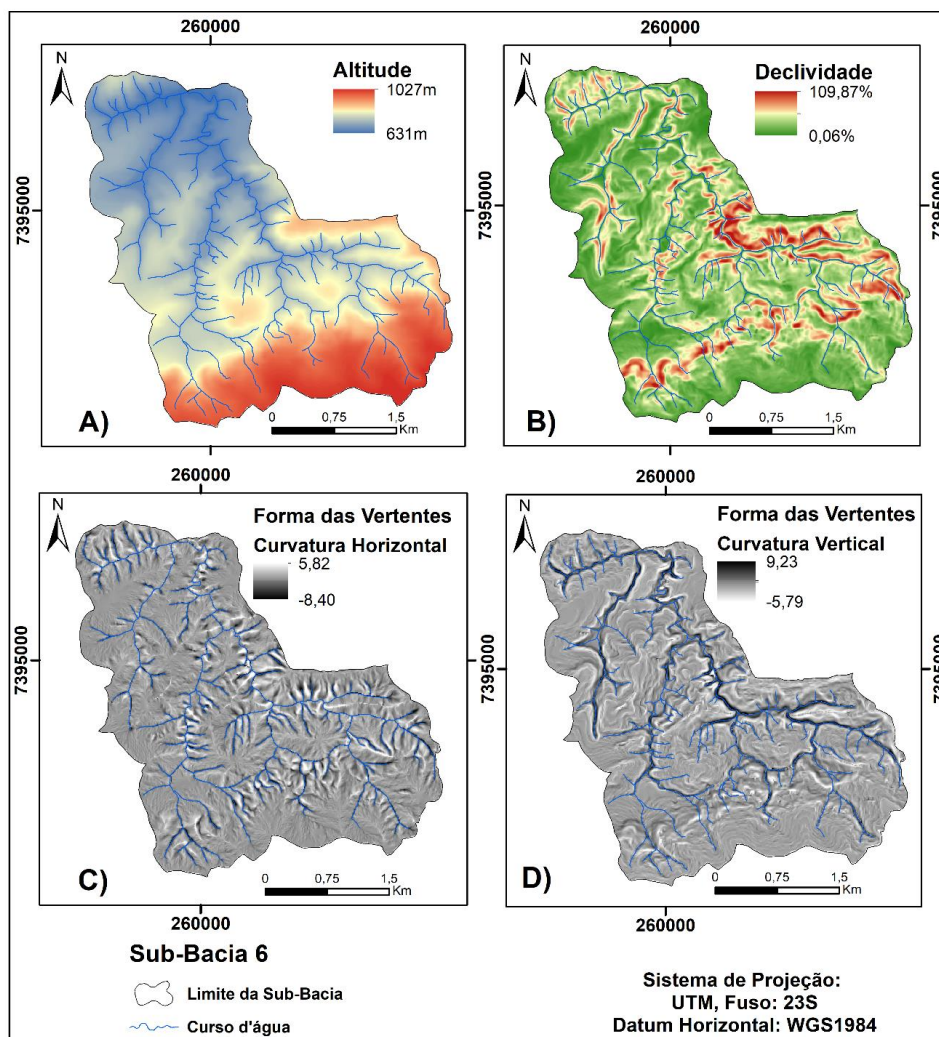
Fonte: Autoria própria.

A altitude média da Sub-Bacia 5 foi de 681 m, com valores menos expressivos na porção Oeste, no sentido do exutório da sub-bacia. Os valores de declividade variaram entre 0,30% e 78,31%, com um valor médio de 23,24%.

A curvatura horizontal variou entre -7,00 e 4,10, com um DP de 0,71, e predomínio de vertentes divergentes (3,62 km²), seguida pelas formas convergentes, com 2,57 km², enquanto a forma retilínea apresentou uma área de 0,39 km². Já a curvatura em perfil demonstrou valor mínimo de -4,29 e máximo de 7,47, e um DP de 0,78, com vertentes convexas constituindo uma área de 3,50 km², e côncavas com 2,67 km².

Na Figura 4.7 são apresentados os resultados da Sub-Bacia 6.

Figura 4.7 - Dados espaciais do relevo da Sub-Bacia 6. A) Altitude (em metros). B) Declividade (em %). C) Curvatura Horizontal. D) Curvatura Vertical.



Fonte: Autoria própria.

A porção Norte da Sub-Bacia 6 obteve os valores mais elevados de altitude (A), próximos a 1027 m na porção Sul, e declividade (B), com uma significativa faixa elevada ao Norte, variando entre 0,06 e 109,87%. A curvatura horizontal (C) variou entre -8,40 para as vertentes convergentes e 5,82 para as divergentes, com DP de 0,66. As formas divergentes apresentaram uma área de 6,03 km² e 4,48 km² para as convergentes, enquanto a área retilínea obteve uma extensão de 0,85 km². A curvatura vertical (D) apresentou um valor mínimo de -5,79 para as formas convexas e máximo de 9,23 para as vertentes côncavas, com um DP de 0,75. A maior área correspondeu às vertentes convexas, com área equivalente a 5,85 km², enquanto a área das vertentes côncavas totalizou 4,53 km², e as retilíneas 0,98 km².

Quanto aos parâmetros de declividade, são importantes para auxiliar na gestão e planejamento de bacias hidrográficas, pois estão diretamente associados ao tempo de duração do escoamento superficial e de concentração da precipitação nos leitos dos cursos de água (SABINO et al., 2020). Segundo Silva et al. (2016a), a relação entre a declividade com a morfologia da bacia é um dos fatores que condicionam os usos do solo, a capacidade de infiltração da água, bem como o escoamento superficial, sendo importantes para a definição de áreas protegidas por lei.

Silva et al. (2020) relatam que relevos acentuados são impróprios para a ocupação urbana e agricultura, enquanto Coliado, Simonetti e Silva (2020), salientam que a declividade influi na relação entre a precipitação em uma bacia hidrográfica e o deflúvio, pois o aumento da velocidade do escoamento superficial reduz a infiltração da água no solo. Nesse sentido, a presente bacia hidrográfica não possui uma extensão significativa de áreas agrícolas, no entanto, possui classe predominante de pastagens, carecendo de atenção especial quanto aos possíveis impactos negativos provenientes da degradação do solo e erosão.

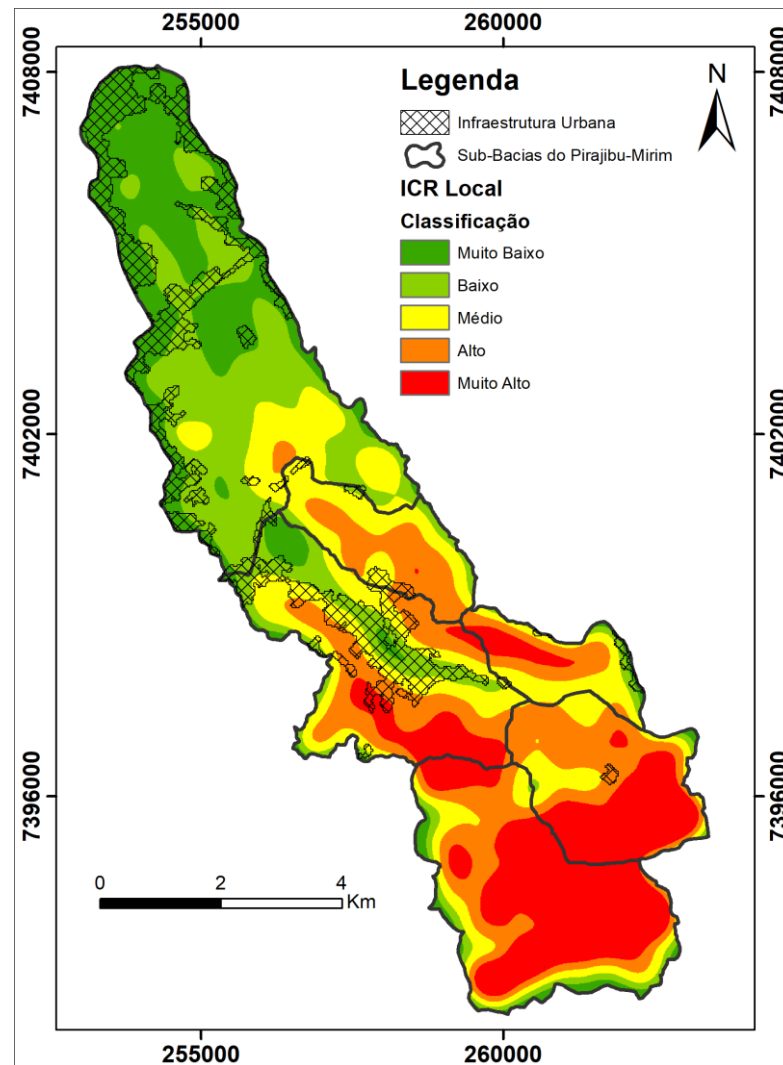
Dentre as sub-bacias analisadas, os maiores percentuais de declividade foram encontrados para as Sub-Bacias 5 e 6, o que confere uma atenção especial quanto ao potencial erosivo que apresentam.

A compartimentação pormenorizada do relevo evidenciou que a concavidade das vertentes está associada à rede de drenagem. Já a curvatura horizontal evidenciou um relevo bastante movimentado, com as menores porções representadas pelas classes retilíneas; portanto, essas características se compatibilizam com os resultados do relevo relacionados à declividade e altitude observados no estudo, sendo mais acentuados nas Sub-Bacias 5 e 6, enquanto a Sub-Bacia 1 apresenta um relevo mais plano e maiores porções retilíneas, e às demais sub-bacias (Sub-Bacias 2, 3 e 4) sofrem influências de transição à montante e jusante. De acordo com Valeriano e Carvalho Júnior (2003), a convexidade do relevo consiste em atributo importante

no que concerne a distinção de sítios geomorfológicos, estando associado aos processos de pedogênese e balanço hídrico.

A análise do ICR Local permitiu a identificação de feições morfológicas locais do relevo por compartimento da bacia hidrográfica (Figura 4.8).

Figura 4.8 - Espacialização do Índice de Concentração de Rugosidade (ICR)



Fonte: Autoria própria.

O ICR revelou que a bacia hidrográfica apresenta classes relativamente homogêneas distribuídas espacialmente, sendo o ICR classificado como Muito Baixo o de menor valor obtido para a bacia, com uma área de 10,40 km², representando um percentual de 18,79%, enquanto a classe classificada com ICR Baixo obteve uma área de 11,26 km², com um percentual de 21,14%.

As classificações Média, Alto e Muito Alto somaram 11,01 km² (19,90%); 11,26 km² (20,34%) e 10,97 (19,82%), respectivamente. A compartimentação do ICR por sub-bacia é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Índice de Concentração de Rugosidade Local por Sub-Bacias hidrográficas

Sub-Bacias	Classificação	Área (km ²)	%	Sub-Bacias	Classificação	Área (km ²)	%
1	Muito Baixo	9,01	45,23	4	Muito Baixo	0,10	3,37
	Baixo	8,26	41,47		Baixo	0,23	7,75
	Médio	2,50	12,54		Médio	1,17	39,39
	Alto	0,15	0,76		Alto	0,98	33,04
	Muito Alto	0,00	0,00		Muito Alto	0,49	16,46
2	Muito Baixo	0,72	6,91	5	Muito Baixo	0,04	0,56
	Baixo	2,10	20,26		Baixo	0,08	1,26
	Médio	3,04	29,24		Médio	1,08	16,31
	Alto	3,07	29,61		Alto	2,56	38,76
	Muito Alto	1,45	13,98		Muito Alto	2,84	43,10
3	Muito Baixo	0,03	0,77	6	Muito Baixo	0,48	4,20
	Baixo	0,31	7,70		Baixo	0,70	6,18
	Médio	1,84	45,06		Médio	1,39	12,25
	Alto	1,89	46,36		Alto	2,61	22,95
	Muito Alto	0,00	0,11		Muito Alto	6,19	54,41

Fonte: Autoria própria.

Observa-se uma predominância do ICR Muito Baixo e Baixo na Sub-Bacia 1, totalizando 86,7%. Esses valores são justificáveis por se tratar de uma sub-bacia situada no curso inferior da bacia do Pirajibu-Mirim, onde também foram encontrados os menores valores de altitude e declividade.

Na Sub-Bacia 2, os valores mais expressivos foram relacionados ao ICR Baixo, Médio e Alto, que totalizaram 79,11%, enquanto os menores valores de ICR foi para a categoria Muito Baixo, com 6,91%.

A Sub-Bacia 3 deteve 91,42% das classes de ICR nas categorias Médio e Alto, enquanto as categorias Muito Baixo e Baixo computaram 8,47%, e Muito Alto obteve apenas 0,11%. A Sub-Bacia 4 acumulou 72,43% do ICR nas classes Médio e Alto, e percentual de 11,12% para as categorias Muito Baixo e Baixo, enquanto Muito Alto obteve 16,46%.

Os resultados da Sub-Bacia 5 totalizaram 81,86% para as categorias Alto e Muito Alto, enquanto o Médio obteve 16,31% e Muito Baixo e Baixo totalizaram apenas 1,82%. Já a Sub-

Bacia 6 totalizou 77,36% das classes Alto e Muito Alto, 12,25% da classe Médio e 10,38% dos valores Muito Baixo e Baixo.

De modo geral, o ICR evidenciou as unidades homogêneas do relevo nas sub-bacias do Pirajibu-Mirim, mostrando ser uma ferramenta eficaz, podendo auxiliar na gestão de bacias hidrográficas, uma vez que possibilita a identificação de feições morfológicas locais que, somadas as variáveis físicas da bacia, permitem identificar as áreas mais suscetíveis quanto ao potencial erosivo. Paralelo a isso, o índice de concentração do relevo, aliado às características morfométricas, permitem a previsão de áreas propensas à inundação, enchentes e alagamentos, englobando também o monitoramento de áreas suscetíveis às corridas e deslizamento de massa.

Os índices morfométricos avaliados neste estudo foram dispostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Índices morfométricos das sub-bacias hidrográficas

Sub-Bacias Hidrográficas	Índices de Forma			Índices Lineares		
	IC	Kc	Kf	Dd (km/km ²)	Eps (km)	Cm (km/km ²)
1	0,36	1,64	0,34	3,40	1,70	0,29
2	0,38	1,61	0,40	5,00	2,50	0,20
3	0,46	1,46	0,33	6,42	3,21	0,16
4	0,45	1,47	0,45	5,08	2,54	0,20
5	0,66	1,22	0,44	5,15	2,57	0,19
6	0,54	1,35	0,56	4,28	2,14	0,23

Fonte: Autoria própria.

O IC das sub-bacias variou entre 0,36 e 0,66, com uma amplitude de 0,30, sendo a Sub-Bacia 1 a que apresentou o menor valor, seguida pela Sub-Bacia 2, com IC igual a 0,38, possuindo o formato mais alongado dentre as sub-bacias analisadas. O maior valor obtido foi para as Sub-Bacias 5 e 6. O IC é um importante atributo morfométrico, pois permite inferir sobre a propensão de enchentes (SILVA et al., 2016a). Nesse sentido, as sub-bacias com maiores propensões a enchentes, se consideradas somente as suas características físicas são as Sub-Bacias 5 e 6. As enchentes podem ocorrer nos exutórios dessas sub-bacias, sendo as áreas com maiores concentrações do fluxo ocasionado pelo escoamento superficial.

A Dd apresentou valor mínimo de 3,40 km/km², sendo a sub-bacia com a menor densidade de drenagem, enquanto o valor máximo encontrado foi de 6,42 km/km² para a Sub-Bacia 3. Portanto, as sub-bacias analisadas possuem drenagens classificadas como baixa e média. De acordo com Silva et al. (2016a), quanto maior o valor de Dd maior a necessidade da conservação das matas ripárias para a manutenção dos cursos de água.

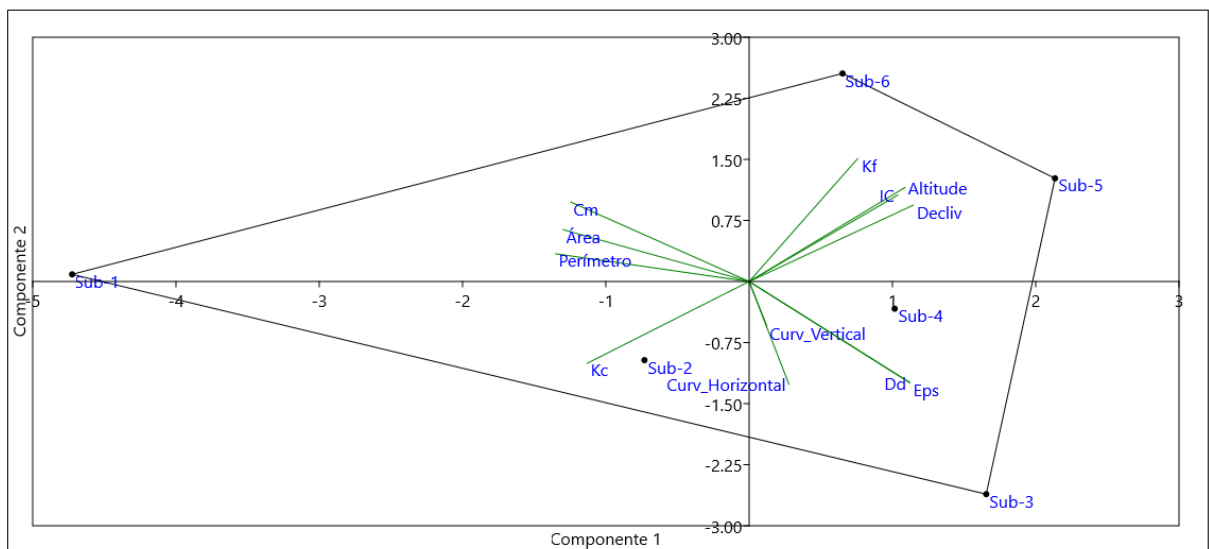
O K_c das sub-bacias variou entre 1,22 e 1,64, sendo os menores valores encontrados para as Sub-Bacias 5 e 6, com 1,22 e 1,35 respectivamente. Já as Sub-Bacias 4, 2 e 1 apresentaram os valores mais elevados, com 1,47, 1,61 e 1,64, respectivamente.

As sub-bacias apresentaram valores de K_f entre 0,33 e 0,56. As Sub-Bacias 6 e 4 apresentaram os valores mais elevados, com 0,56 e 0,45; enquanto as Sub-Bacias 3, 1 e 2 apresentaram os menores valores, sendo 0,33, 0,34 e 0,40, respectivamente. Já a Sub-Bacia 5 apresentou K_f igual a 0,44. Portanto, de acordo com classificação de Silva et al. (2016a) quanto à propensão de enchentes, as sub-bacias possuem baixa propensão, uma vez que todas apresentaram valores abaixo de 0,75.

O C_m apresentou o valor mínimo de 0,16 km/km² para Sub-Bacia 3 e o valor máximo de 0,29 km/km² para a Sub-Bacia 1. As sub-bacias que necessitam de menor área para manutenção dos canais, além da Sub-Bacia 3, são a 4 e 5, com valores de 0,194 e 0,196 km/km². Já as Sub-Bacias que necessitam de maiores áreas são 6 e 2, com C_m de 0,23 e 0,20 km/km².

De modo a estabelecer possíveis relações entre os padrões de drenagem observados nas sub-bacias e os atributos do relevo foi realizada a ACP. A componente 1 explicou 52,67% do arranjo das variáveis ou da variabilidade das amostras, enquanto a componente 2 explicou 26,68% da variação. Na Figura 4.9 são ilustradas as correlações obtidas.

Figura 4.9 - Análise de componentes principais (ACP) por sub-bacias



Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 1 apresentou uma expressiva diferenciação das demais sub-bacias, com correlação negativa quanto às características relacionadas a área, com coeficiente de -0,90, perímetro (-0,94) e C_m de -0,86. O resultado é justificado em razão da sub-bacia apresentar as

maiores dimensões em comparação com as demais. Nesse sentido, observa-se que as respectivas variáveis exercem maiores influências nas sub-bacias com menores dimensões. Esse fato também foi observado nos estudos de Bouramtane et al. (2020), que analisaram 230 bacias hidrográficas e parâmetros que refletissem a topografia, morfologia e geologia locais. A Sub-Bacia 1 possui um padrão de drenagem e relevo que se diferencia das demais, pois possui as menores altitudes, declividades, além de possui o ICR predominantemente muito baixo e baixo. Essas características do relevo influenciam na velocidade do escoamento, que tende a ser mais baixo nessas regiões.

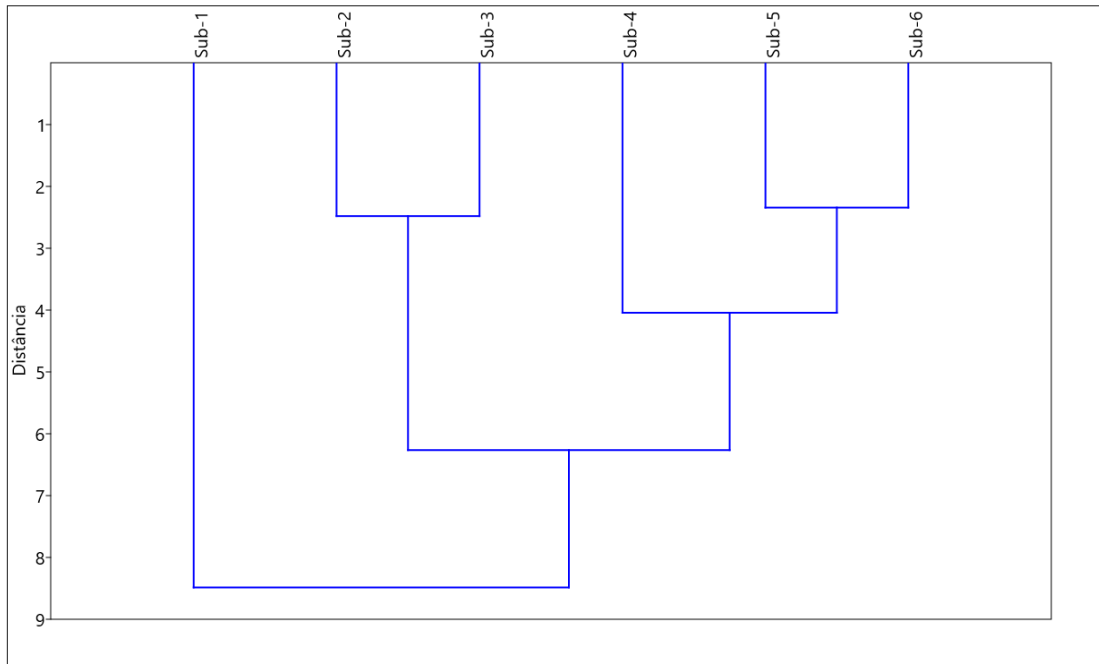
A Sub-Bacia 2 apresentou forte correlação negativa com o Kc, com coeficiente de correlação de -0,78, que pode ser explicado devido a sua forma bastante irregular. Essa sub-bacia possui características de transição, com um relevo mais acentuado com elevadas altitudes e declividades nas porções Leste e Sul. A Sub-Bacia 2 está completamente inserida no Maciço Sorocaba.

As Sub-Bacias 3 e 4 apresentam correlações inversas mais expressivas na componente 2 em relação a variável curvatura horizontal (Curv_Horizontal), com o coeficiente de -0,62, e curvatura vertical (Curv_Vertical), com -0,27. Portanto, essas sub-bacias se diferem das demais quanto às formas das vertentes. A Dd e Eps obtiveram uma forte correlação para a componente 1, com 0,78. Os escores das sub-bacias foram 1,65 e 1,01, respectivamente. As Sub-Bacias 3 e 4 se localizam a Leste, e possuem as menores áreas, porém possuem uma elevada altitude nas porções que correspondem aos limites da bacia. De acordo com Bouramtane et al. (2020), a inclinação da superfície e a resistência das rochas determinam os padrões de drenagem.

As Sub-Bacias 5 e 6 estão inseridas nas áreas mais elevadas do Pirajibu-Mirim, sendo fortemente influenciadas pela altitude e declividade. Ambas estão inseridas no Maciço São Francisco (Biotita granito), com intersecção de Metarenitos, Metarritmitos e Metaconglomerados do Grupo São Roque. Ainda, estas sub-bacias apresentaram uma forte influência das variáveis de forma, como o Kf e IC, pelo fato de apresentarem formas similares que se assemelham a um círculo. Esses fatores, associados ao relevo, inferem sobre a suscetibilidade destas quanto a ocorrência de processos erosivos, pois quanto maior a declividade da área, maior será a energia e velocidade do deflúvio superficial (SILVA et al., 2016a). Também é importante considerar os aspectos relacionados aos usos da terra, assim como as transformações decorrentes da urbanização, tais como o desmatamento de áreas vulneráveis e a impermeabilização dos topos e vertentes das colinas, além da canalização de cursos de água, fatores que podem agravar a vulnerabilidade ambiental dessas áreas.

Para apoiar o pressuposto de que as sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim se diferenciam em relação aos padrões de drenagem foi realizada a análise *cluster* (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Dendrograma dos parâmetros do relevo pelo *Ward's Method* e quadrado da distância Euclidiana



Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 1 apresenta a maior distinção dentre as demais sub-bacias, representada na análise pela maior distância. A análise também mostrou que as Sub-Bacias 2 e 3 possuem semelhanças, enquanto a Sub-Bacia 4 se difere ligeiramente, tendendo a um agrupamento mais próximo das Sub-Bacias 5 e 6.

A ACP, assim como análise de *cluster*, forneceram evidências de que as sub-bacias apresentam diferentes padrões quanto à drenagem, sendo estes influenciados, principalmente, pelos aspectos físicos relacionados à morfometria e relevo. Todavia, a metodologia adotada no estudo apoiada em SIG mostrou-se adequada para o tratamento do conjunto de informações físicas das sub-bacias, contribuindo com os estudos acerca de bacias hidrográficas.

Soares et al. (2018) utilizaram variáveis fisiográficas que foram confrontadas com os dados de vazão com o objetivo de conhecer as variáveis principais e determinantes no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Ivaí (PR). Enquanto Bouramtane et al. (2020) utilizaram uma abordagem estatística para avaliar os fatores que controlam padrões de redes de drenagem em áreas áridas de Marrocos, que também incluíram a ACP e Análise de

Cluster. De acordo com os autores, a ACP mostrou que os parâmetros topográficos, de inclinação e geológicos, ou seja, o parâmetro associado ao controle estrutural explica melhor a variação no padrão de drenagem, sendo estes os parâmetros utilizados para embasamento do presente estudo.

4.4 CONCLUSÕES

O índice de concentração de rugosidade auxiliou na identificação de feições morfológicas locais do relevo de acordo com a compartimentação das sub-bacias, mostrando ser um índice adequado quando utilizado em conjunto com outras variáveis na inferência de padrões entre sub-bacias de mesma abrangência.

Os índices morfométricos obtidos permitiram identificar alguns padrões de drenagem de acordo com a compartimentação da bacia, que foram corroborados pela ACP, que explicou 79,35% das correlações entre as características do relevo e padrões de drenagem. O estudo da morfometria de bacias hidrográficas, apoiado no conhecimento de padrões de drenagem e nas características físicas da área pode fornecer informações importantes que subsidiem a gestão de áreas prioritárias a serem conservadas em bacias hidrográficas, uma vez que a interferência antrópica pode impactar significativamente no comportamento hidrológico.

Sendo assim, a partir do estudo foi possível obter conhecimento sobre os compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim que necessitam de atenção quanto às ações de gestão e manejo devido às suas características físicas intrínsecas, como às Sub-Bacias 5 e 6, que apresentaram altitudes e declividades mais elevadas, vertentes com predominância côncavas/convexas e índice de concentração de rugosidade do relevo predominantemente classificado como muito alto, demonstrando um relevo bastante movimentado. Somado a isso, estes compartimentos apresentaram os resultados mais favoráveis a enchentes e alagamentos demonstrados pelos índices morfométricos.

Todavia, esses compartimentos não devem ser apropriados de forma desordenada, pois a ocupação pode alterar o modelado da paisagem, ocasionando reflexos na qualidade ambiental que podem ser refletidos no arraste de sedimentos e assoreamento de corpos hídricos, alagamentos e inundação de áreas suscetíveis como as evidenciadas neste estudo.

5 REFLEXOS AMBIENTAIS DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PIRAJIBU-MIRIM (SP)

RESUMO

Os solos são fundamentais para o desenvolvimento humano e de uma infinidade de espécies animais e vegetais, no entanto, pesquisas demonstram que sua capacidade produtiva está ameaçada devido ao seu empobrecimento. Por essa razão, o estudo objetivou espacializar os nutrientes do solo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, bem como estimar a perda desses nutrientes por erosão hídrica por sub-bacia hidrográfica para identificar quais contribuem com maior aporte de partículas de solo nos cursos de água. A coleta de solo foi realizada em 30 pontos distribuídos uniformemente na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim na profundidade de 0-20 cm e geoespacializados em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) para estimar a perda de solo e, após, foram computadas as perdas de nutrientes por sub-bacia hidrográfica. Os resultados evidenciaram perdas mais expressivas nas classes Leve e Moderada, com uma perda de solo média de 5,92 t/ha.ano. Os nutrientes do solo perdidos apresentaram valores elevados, principalmente para o cálcio (28.525,29 kg/ano), ferro (15.130,62 kg/ano) e matéria orgânica (674.088,91 kg/ano). As partículas de solo podem aportar os cursos de água e reservatório, comprometendo a qualidade e quantidade de água por meio da eutrofização da represa e assoreamento, culminando em problemas de ordem sanitária e ambiental.

Palavras-chave: EUPS. Análise Espacial. Geoprocessamento. Monitoramento Ambiental.

ABSTRACT

Soils are fundamental for human development and an infinite number of animal and plant species; however, research has shown that their production capacity is threatened because of their impoverishment. For this reason, the study aimed to spatialize the soil nutrients in the Pirajibu-Mirim river watershed, as well as to estimate the loss of these nutrients by water erosion by sub-basin to identify which have a greater contribution of soil particles to the watercourses. The soil was collected in 30 sampling points evenly distributed in the Pirajibu-Mirim watershed at a depth of 0-20 cm and geospatialized in a Geographic Information System (GIS). The Universal Soil Loss Equation (EUPS) was used to estimate soil loss and, afterward, nutrient losses by hydrographic sub-basins were computed. Results showed more significant losses in the Light and Moderate classes, with an average soil loss of 5.92 t/ha.year. The lost soil nutrients showed high values, for calcium (28,525.29 kg/year), iron (15,130.62 kg/year) and organic matter (674,088.91 kg/year). Soil particles can contribute to watercourses and reservoirs compromising the quality and quantity of water through the dam eutrophication and silting, culminating in health and environmental problems.

Keywords: USLE. Spatial Analysis. Geoprocessing. Environmental Monitoring.

5.1 INTRODUÇÃO

O solo é um compartimento terrestre fundamental para o desenvolvimento humano e de uma infinidade de espécies vegetais, animais e de microrganismos, atuando como um grande reservatório de carbono e outros elementos essenciais à vida (FAO, 2017). No entanto, a ausência de práticas adequadas de manejo e conservação pode afetá-lo significativamente, reduzindo sua capacidade produtiva e aumentando os custos produtivos, uma vez que são necessários maiores dispêndios financeiros para recuperar a fertilidade do mesmo por meio da aplicação de fertilizantes (SILVA et al., 2020). Em contrapartida, o incremento de fertilizantes químicos nos solos pode desencadear a sua acidificação, bem como a decomposição acelerada da matéria orgânica, além de contribuir negativamente com as mudanças climáticas (FAO, 2017; TIAN et al., 2012).

A perda de solos por erosão hídrica tem causado grande preocupação em todo o mundo. De acordo com Wolka et al. (2021), anualmente estima-se que sejam perdidos, por erosão hídrica, entre 36 e 75 bilhões de toneladas de solo. Segundo Borrelli et al. (2017), os maiores aumentos nas taxas de perda de solos estão previstos para as regiões da América do Sul, África Subsaariana e Sudeste Asiático, com destaque para as economias menos desenvolvidas.

Os solos perdidos por erosão hídrica contêm nutrientes e outros elementos que, ao aportarem nos recursos hídricos, podem causar problemas de ordem ambiental e sanitária (SILVA, D. C. et al., 2018). Os sedimentos são transportados aos corpos hídricos por fontes pontuais e não pontuais, como lançamento de efluentes domésticos e industriais, pelos impactos advindos do uso e ocupação da terra (CUNHA; SABOGAL-PAZ; DODDS, 2016; MELO et al., 2019) e podem acarretar a eutrofização de fontes de água para abastecimento público. De acordo com Simonetti, Silva e Rosa (2019b), a redução da vegetação de Áreas de Preservação Permanente (APP) marginais aos cursos de água contribui significativamente com o aporte de material particulado para os cursos de água. As partículas de solo aportam os recursos hídricos por escoamento superficial, em grande parte provenientes de áreas agrícolas sem o devido manejo do solo e práticas protecionistas (PEREIRA; VEIGA; DZIEDZIC, 2013; SILVA, D. C. et al., 2018).

Para estimar a perda de solos, a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) proposta por Wischmeier e Smith (1965, 1978), tem sido mundialmente utilizada. De acordo com Alewell et al. (2019), as abordagens mais utilizadas nos último oitenta anos de história de modelagem de erosão se baseiam em algoritmos contemplados na EUPS, e, de acordo com os autores, foram encontradas aplicações em 109 países. Vatandaşlar e Yavuz (2017) utilizaram

imagens de satélite de alta resolução espacial para estimar o Fator C da EUPS de uma sub-bacia hidrográfica localizada em um relevo montanhoso no Nordeste da Turquia. Das et al. (2018) utilizaram a EUPS e constataram que os fatores topográficos, manejo do solo e de uso do solo estão entre os fatores mais importantes que influenciam a erosão do solo, enquanto Wolka et al. (2021) avaliaram a perda de solos nas encostas íngremes de uma região a Sudoeste da Etiópia, constatando que a erosão pode causar significativos declínios nas taxas de carbono orgânico do solo e nutrientes.

No Brasil, são inúmeros os estudos que utilizaram a EUPS, ou fatores isolados, para identificar a perda de solos por erosão hídrica, tais como os estudos de Silva et al. (2017) para identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável na bacia hidrográfica do rio Una utilizando o Fator C, enquanto Simonetti et al. (2018) utilizaram o Fator K para estimar a erodibilidade do solo em uma Unidade de Conservação no município de Sorocaba (SP). Já Nachtigall et al. (2020) avaliaram a perda de solos utilizando a EUPS para estimar sazonalmente a perda de solos na bacia hidrográfica do Arroio Fragata, no Rio Grande do Sul.

Na escala da bacia hidrográfica, a utilização de modelos preditivos é de grande valia, haja vista que qualquer ação ou intervenção antrópica culminará em possíveis desequilíbrios no meio físico e biótico, sendo fundamental o desenvolvimento de estudos que contemplem a escala da bacia hidrográfica (BORAH e DEKA, 2020; NACHTIGALL et al., 2020; SILVA, D. C. et al., 2018). Nesse sentido, o apoio do geoprocessamento tem possibilitado o desenvolvimento de uma infinidade de pesquisas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo amplamente utilizado no diagnóstico e monitoramento ambiental (ANDRIYANTO; SUDARTOS; SUPRAYOGO, 2015; SALES; SILVA; LOURENÇO, 2019; SILVA, D. M. et al., 2018; SILVA et al., 2020; SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2019b; SONNENBERG et al., 2020). No entanto, trabalhos que contemplem a perda de nutrientes do solo e avaliem os impactos ambientais e sanitários em bacias hidrográficas ainda são incipientes.

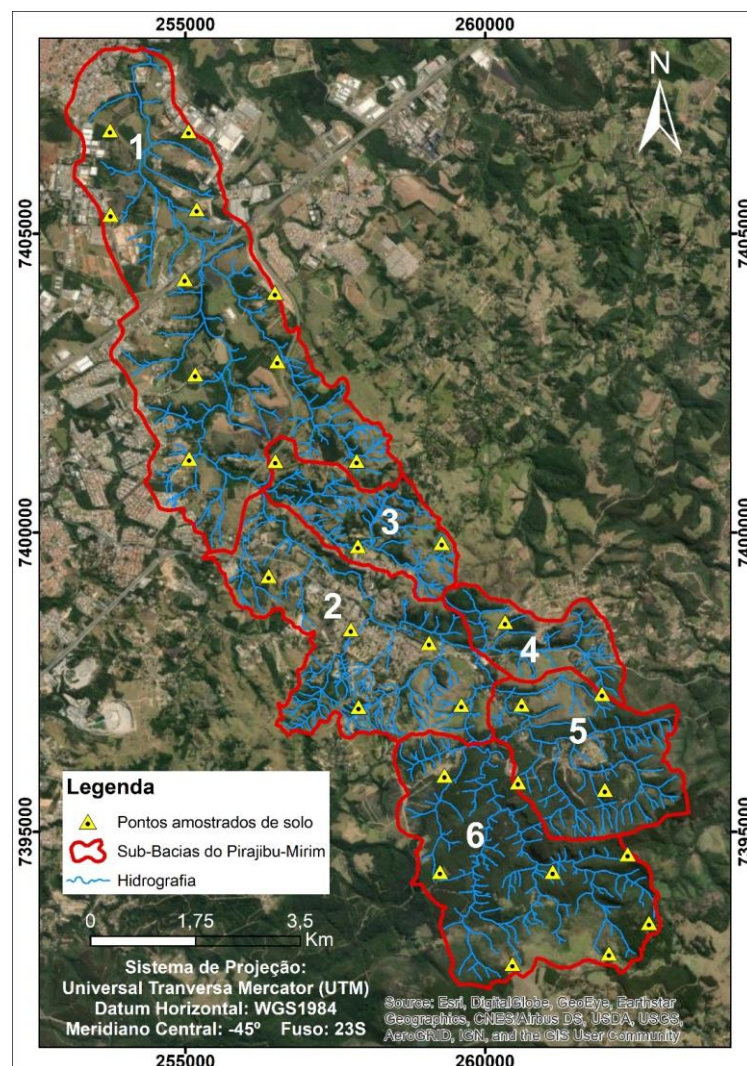
Diante do exposto, o presente estudo objetivou espacializar os nutrientes do solo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, bem como estimar a perda desses nutrientes por erosão hídrica por sub-bacia hidrográfica para identificar quais contribuem com maior aporte de partículas de solo nos cursos de água e, conseqüentemente, sedimentação nos leitos fluviais.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Distribuição da malha amostral, coleta e distribuição espacial do solo

A coleta de solo foi realizada em 30 pontos amostrais pré-definidos e distribuídos uniformemente ao longo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim em uma malha amostral regular na profundidade de 0-20 cm (Figura 5.1), sendo retirados 500g de solo com um trado holandês confeccionado em aço inox e enviado ao laboratório de Física do Solo e de Fertilidade do Solo, do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp – Campus de Botucatu. As análises granulométricas foram estimadas segundo o método da pipeta, de acordo com a EMBRAPA (2011), e as análises químicas conforme Raij (2001).

Figura 5.1 - Distribuição dos pontos de solo amostrados na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim



Fonte: Autoria própria.

Em razão da heterogeneidade do solo decorrente de processos complexos e inter-relacionados, como formação natural, assim como o uso e manejo antrópico (SILVA, D. C. et al., 2018), foi empregada a geoestatística espacial, sendo utilizado o interpolador Inverso do Quadrado da distância (IQD) por possuir bons resultados na distribuição espacial de dados de solos (SILVA et al., 2020). Assim, foram espacializados os atributos do solo: Cálcio (Ca), Fósforo (P), Potássio (K), Matéria Orgânica (MO), Alumínio (Al^{3+}), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn). Para tanto, as unidades apresentadas nas análises de solo, como mg/dm^3 e g/dm^3 , foram convertidas para quilograma por tonelada de solo (kg/tonelada de solo), e, posteriormente, os resultados da perda de nutrientes obtidos foram apresentados em kg/ano, baseados no estudo de Silva, D. C. et al. (2018), para compatibilizar as unidades com o mapa de perda de solos.

5.2.2 Equação Universal da Perda de Solos (EUPS)

A EUPS consiste em uma equação para estimar a perda média anual de solos por erosão hídrica, sendo proposta por Wischmeier e Smith (1978) (Equação 1).

$$A = R \times K \times LS \times CP \quad (1)$$

Sendo: A é a perda de solo por unidade de área no tempo (t/ha); R é o fator erosividade da chuva (MJ.mm/h.ha); K é o fator de erodibilidade do solo (t.ha.h/ ha.MJ.mm); LS é o fator topográfico englobando a declividade e comprimento de rampa (adimensional); C é o fator de uso e manejo do solo (adimensional); P é o fator de prática conservacionista do solo (adimensional).

De acordo com Silva et al. (2017), tanto o fator C quanto o P se diferenciam dos demais fatores por serem antrópicos, estando relacionados à ocupação e uso das terras.

Após a obtenção dos dados quantitativos da perda de solos em t/ha.ano, estes foram reclassificados em classes de perda de solos adaptados da *Food and Agriculture Organization* (FAO-PNUMA, 1980), que estabelecem os valores entre 0-10 t/ha.ano como: Leve; 10-50 t/ha.ano: Moderado; 50-200 t/ha.ano: Alta; e acima de 200 t/ha.ano: Muito Alta.

5.2.3 Fator de Erosividade (R)

A estimativa do Fator de erosividade da chuva (R) foi realizado a partir de dados disponibilizados pelo programa NetErosividadeSP, desenvolvido por Moreira et al. (2006) e que utiliza rede neural artificial (RNA), fornecendo, assim, o valor de R para qualquer

localidade do Estado de São Paulo. Para o estudo foram coletados os dados de erosividade de 30 pontos aleatórios contemplados dentro da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. Após essa etapa, os dados foram plotados em planilha Excel e espacializados no ArcGIS 10.5.1, de modo a obter um plano de informação (PI) em *raster*.

5.2.4 Fator de erodibilidade do solo (K)

De posse dos resultados das análises de solo dos pontos amostrados foi estimado Fator de erodibilidade do solo (K) de forma indireta, por meio da expressão de Bouyoucos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; MANNIGEL et al., 2002), que considera apenas os percentuais das frações de areia, silte e argila (Equação 2).

$$K = \frac{(\% \text{ Areia} + \% \text{ Silte})}{(\% \text{ Argila})} / \frac{1}{100} \quad (2)$$

Sendo: K é o fator de erodibilidade do solo (t.ha.h/ha.MJ.mm); (% areia, % silte e % argila) correspondem ao percentual das respectivas frações granulométricas de uma amostra de solo.

A análise da distribuição da erodibilidade do solo (Fator K) foi realizada por meio do software ArcGIS 10.5.1 (ESRI, 2016). De posse dos resultados dos atributos físicos do solo concernente à granulometria foi realizada a interpolação dos dados de modo que fossem estimados os valores não contemplados na malha regular amostrada, utilizando, para tanto, o interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IQD), que é um interpolador univariado de médias ponderadas. Estudos realizados por Simonetti et al. (2018) e Souza et al. (2010) concluíram que este interpolador apresenta resultados satisfatórios para estimar a distribuição de atributos físicos dos solos, razão pela qual foi utilizado neste estudo.

5.2.5 Fator topográfico (LS)

O Fator LS foi obtido por meio do software de código aberto chave, o Sistema de Apoio à Análise de Recursos Geográficos (GRASS GIS), versão 7.8.3 (GRASS DEVELOPMENT TEAM, 2021), utilizando a função *r.watershed*, que gera, a partir de algoritmos, os fatores LS da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPSR). Para tanto, foi utilizada a imagem do satélite Alos-Palsar, com resolução espacial de 12,5 m como Modelo Digital de Elevação (MDE). O Fator LS expressa a relação entre a declividade (em %) e o comprimento de rampa (em metros). De acordo com Panagos, Borrelli e Meusburger (2015), o fator S mensura o efeito

da inclinação do declive, enquanto o fator L define o impacto do comprimento do declive. Assim, o Fator LS, quando combinado, representa o efeito da topografia na erosão do solo (PANAGOS; BORRELLI; MEUSBURGER, 2015). Esse fator é adimensional, com valor igual ou superior a 0. As equações utilizadas para compor o algoritmo LS em ambiente SIG foram baseadas nos estudos de Weltz, Renard e Simanton (1987) e McCool et al. (1987).

5.2.6 Uso, Manejo e Práticas Conservacionistas (Fator CP)

Os fatores C e P representam fatores antrópicos, ou seja, estão relacionados às formas de ocupação e uso das terras, diferentemente dos demais fatores que são dependentes das condições naturais, tais como os fatores R, K, L e S (MIQUELONI; BUENO; FERRAUDO, 2012; SILVA, D. C. et al., 2018).

Para aquisição dos valores C e P foram compilados os resultados de diversos autores, como Silva (2004); Tomazoni e Guimarães (2005); Weill e Sparovek (2008); Kumar e Kushwah (2013); Silva et al. (2017); Vatandaşlar e Yavuz (2017) e Das et al. (2018), sendo obtido um valor médio para o fator CP a partir destes estudos (Tabela 5.1), de modo a minimizar as possíveis subjetividades decorrentes dos valores atribuídos aos diferentes usos do solo.

Tabela 5.1 - Valores médios obtidos para o Fator CP

Classes de uso	Média Fator C	Média Fator P	Fator CP
Floresta Plantada	0,0145	0,9333	0,0135
Formação Florestal	0,0044	1,0000	0,0044
Infraestrutura Urbana	0,0920	0,5500	0,0506
Lavouras Temporárias (Agricultura)	0,1893	0,6667	0,1262
Agricultura e Pastagem (Pastagem)	0,1498	0,7500	0,1124
Pastagem	0,0566	0,7500	0,0425
Cursos de água	0,0000	--	0,0000

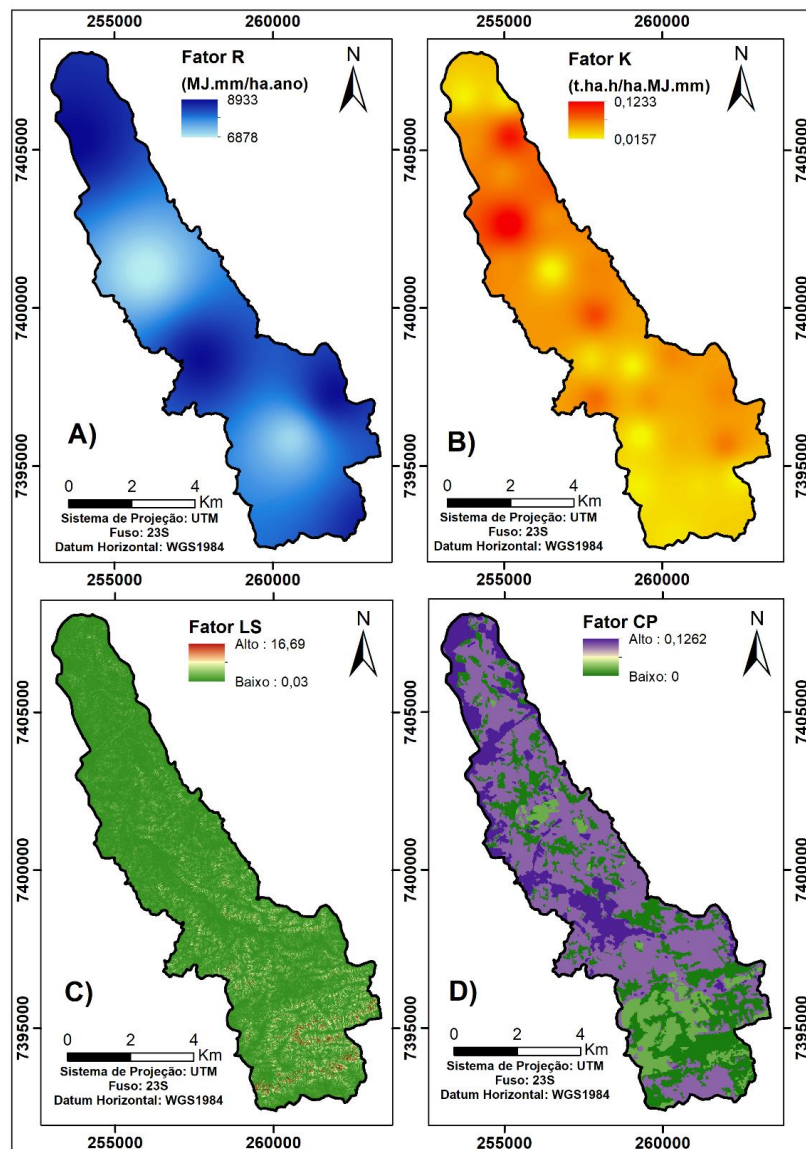
Fonte: Adaptado de Silva (2004); Tomazoni e Guimarães (2005); Weill e Sparovek (2008); Kumar e Kushwah (2013); Silva et al. (2017); Vatandaşlar e Yavuz (2017) e Das et al. (2018).

Para tanto, as classes de uso e ocupação da terra foram obtidas a partir do produto do mapeamento do MapBiomas para o ano de 2019, com resolução espacial de 30 m (MAPBIOMAS - versão 4.1; http://mapbiomas.org/pages/database/mapbiomas_collection). O Mapbiomas envolve diversas organizações que monitoram anualmente as mudanças no uso do solo nos biomas brasileiros, sendo utilizado em pesquisas e para elaboração de políticas públicas, manejo sustentável, planejamento do uso do solo e monitoramento (NEVES et al., 2020; SOUZA; AZEVEDO, 2017).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos fatores de perda de solos revelam que o Fator R da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim (Figura 5.2A) apresentou valores compreendidos entre 6.878 MJ.mm/h.ha e 8.933 MJ.mm/h.ha, com valor médio de 8.058 MJ.mm/h.ha e uma amplitude de 2.055 MJ.mm/h.ha.

Figura 5.2 - Fatores utilizados na Equação Universal de Perda de solos (EUPS)



Fonte: Autoria própria.

Os maiores valores de R ocorreram nas porções Norte, bem como na porção Central seguindo para o Sudeste da bacia hidrográfica. Em comparação a localidades próximas, como na bacia hidrográfica do rio Una, situada no município de Ibiúna, Silva et al. (2017)

encontraram um valor médio anual de erosividade da chuva de 6.660 MJ.mm/h.ha, enquanto nos estudos realizados por Batista et al. (2021), na região do Vale do Ribeira Paulista, foram obtidos valores compreendidos entre 5.360,60 e 9.278,75 MJ.mm/h.ha, com valores médios de 3.918,15 MJ.mm/h.ha.

Os resultados de erosividade da chuva da bacia do rio Pirajibu-Mirim, quando comparados às classes de erosividade (R) propostas por Carvalho (2008), que estabeleceu cinco classes, sendo: fraca ($R \leq 2.452,0$); moderada ($2.452,0 < R \leq 4.905,0$); moderada a forte ($4.905,0 < R \leq 7.357,0$); forte ($7.357,0 < R \leq 9.810,0$) e muito forte ($R > 9.810,0$), demonstram que a bacia está inserida nas classes que vão de moderada a forte (com 6.878 MJ.mm/h.ha), até a classe estabelecida como forte, atingindo o valor máximo é de 8.933 MJ.mm/h.ha. De modo geral, os valores de erosividade pela chuva apresentaram uma distribuição heterogênea na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. O conhecimento do Fator R é fundamental no sentido de identificar as áreas mais suscetíveis a erosão hídrica em bacias hidrográficas.

Os valores de erodibilidade do solo representados pelo Fator K (Figura 5.2B) variaram entre 0,1233 t.ha.h/ha.MJ.mm e 0,0157 t.ha.h/ha.MJ.mm, com valor médio de 0,0496 t.ha.h/ha.MJ.mm, sendo os menores valores encontrados na porção Norte, e predominantemente nas porções ao Sul da bacia hidrográfica, enquanto os maiores valores de erodibilidade estão distribuídos de forma heterogênea ao longo da bacia. Os resultados obtidos estão próximos com os obtidos por Silva e Alvares (2005), que estimaram o fator de erodibilidade para o estado de São Paulo e obtiveram o valor médio igual a 0,0162 t.ha.h/ha.MJ.mm, enquanto Simonetti et al. (2018), que avaliaram latossolos da Unidade de Conservação de Proteção Integral Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade (PNMCBio) no município de Sorocaba, encontraram valores de K entre 0,021 e 0,022 t.ha.h/ha.MJ.mm.

O Fator LS apresentou valores entre 0,03 e 16,69, sendo os maiores valores encontrados predominantemente na porção Sul da bacia hidrográfica. Panagos, Borrelli e Meusburger (2015) relatam que o fator LS permite uma estimativa rápida acerca da influência nas taxas de perdas de solo de um país, utilizando-o junto de um modelo digital de elevação (MDE) de alta resolução para realizar um delineamento aprimorado de áreas em risco de erosão do solo para toda a União Europeia.

Os valores do Fator CP (Figura 5.2D) variaram entre 0 e 0,1262, onde os menores valores obtidos estão associados aos corpos de água (com valores nulos), representando 0,47% das classes do Fator CP, seguido da Agricultura, que totalizou 1,01% e uma área de 55,89 ha. As classes relacionadas à presença de vegetação, incluindo Formação Florestal e Floresta

Plantada apresentaram respectivamente 35,17% das classes de CP, com uma área de 1.947,31 ha.

Os usos relacionados à Pastagem apresentaram 49,08%, uma expressiva representatividade na bacia hidrográfica, com uma área equivalente a 2.718,14 ha. Estudos realizados Marques (2017) e Nery et al. (2019) também encontraram a classe de uso relativa à pastagem como a predominante na bacia hidrográfica. Nesse sentido, torna-se necessária uma atenção especial quanto aos possíveis impactos negativos das áreas designadas à pecuária devido o potencial de degradação dos solos. Segundo Albuquerque, Sangoi e Ender (2001), a compactação do solo causada pelo pisoteio animal tem sido apontada como uma das principais causas da degradação de áreas cultivadas em sistema de integração lavoura-pecuária. A Infraestrutura urbana obteve 14,27%, com uma área de 790,09 ha; portanto, os valores mais elevados de CP e que configuram um maior impacto quanto aos usos antrópicos foram predominantes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

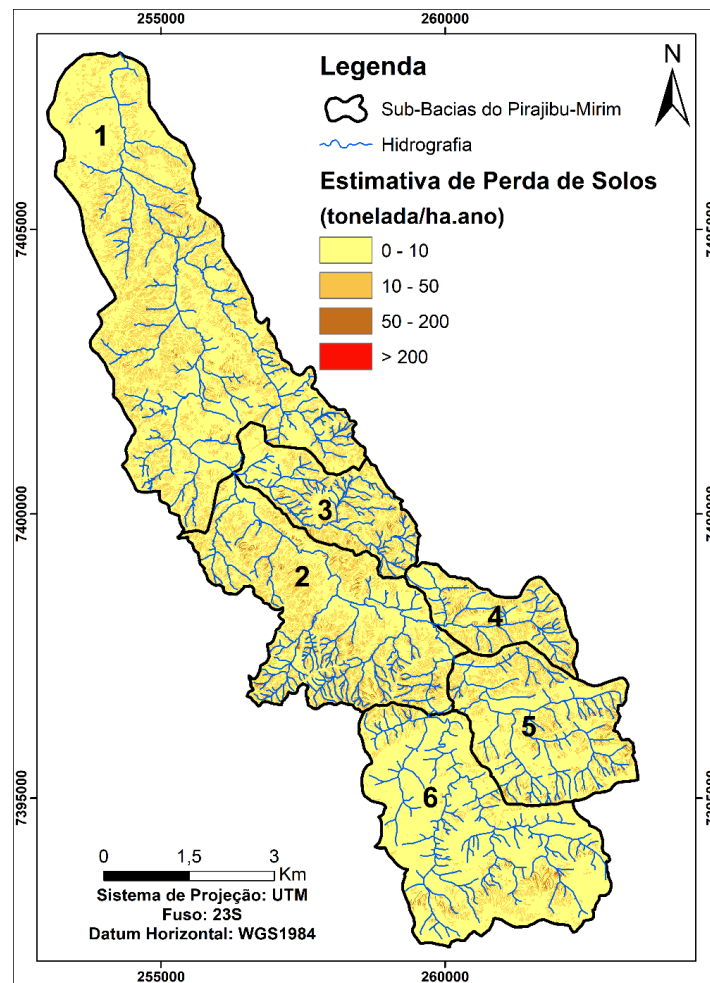
A perda de solos por sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim é apresentada na Figura 5.3, sendo possível evidenciar uma perda de solos com diferentes classes em todas as sub-bacias, enquanto os dados quantitativos são apresentados por sub-bacias na Tabela 5.2.

É possível constatar que a Sub-Bacia 1 apresenta 99,64% das classes de perda de solos entre Leve e Moderada, sendo a maior área presente na classe Leve, com 1.616,83 ha, enquanto apenas 0,36% de sua área está presente na classe Alta, com 7,12 ha.

A Sub-Bacia 2 apresentou o maior percentual categorizado como Leve (75,22%), abrangendo uma área de 778,14 ha, enquanto a categoria Moderada apresentou 22,62%, com uma área equivalente a 234,06 ha. Já a categoria Alta apresentou os menores percentuais, com 2,16%, assim como a menor área (22,34 ha). A Sub-Bacia 3 apresentou uma área de 306,91 ha na categoria Leve, representando 75,42% das classes, seguida da classe Moderada, com área de 93,15 ha e 22,89%, já a classe Alta contemplou uma área de 6,89 ha, representando o menor percentual dentre as classes, com 1,69%. Quanto à Sub-Bacia 4, as classes Leve e Moderada contemplaram 97,64%, representando uma área de 288,19 ha. No entanto, assim como as Sub-Bacias 1, 2 e 3, não houve a presença da classe Muito Alta.

A Sub-Bacia 5 deteve 98,30% das classes Leve e Moderada, totalizando uma área de 646,56 ha, enquanto as classes Alta e Muito Alta somaram 11,23 ha (1,70%). Por fim, a Sub-Bacia 6 apresentou uma área de 1.052 ha inserida na categoria Leve e um percentual de 92,88%, enquanto apenas 6,26% estão inseridas na categoria Moderada, e 0,86% na categoria Alta, totalizando uma área de 0,86 ha, não havendo nenhuma classificação Muito Alta para a referida sub-bacia.

Figura 5.3 - Perda de solo por sub-bacias do Pirajibu-Mirim



Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.2 - Dados quantitativos da perda de solo por sub-bacias

Sub-Bacias	Classes de Perda de Solo	Área (ha)	%	Sub-Bacias	Classes de Perda de Solo	Área (ha)	%
1	Leve	1.616,83	81,48	4	Leve	227,47	77,07
	Moderada	360,35	18,16		Moderada	60,72	20,57
	Alta	7,12	0,36		Alta	6,97	2,36
	Muito Alta	*	*		Muito Alta	*	*
2	Leve	778,14	75,22	5	Leve	548,58	83,4
	Moderada	234,06	22,62		Moderada	97,98	14,9
	Alta	22,34	2,16		Alta	11,2	1,7
	Muito Alta	*	*		Muito Alta	0,03	0
3	Leve	306,91	75,42	6	Leve	1.052	92,88
	Moderada	93,15	22,89		Moderada	70,95	6,26
	Alta	6,89	1,69		Alta	9,7	0,86
	Muito Alta	*	*		Muito Alta	*	*

Legenda: (*) Não apresentou resultados na categoria. Fonte: Autoria própria.

5.3.1 Distribuição espacial dos atributos do solo por sub-bacias hidrográficas

A distribuição espacial dos atributos do solo relacionados aos macronutrientes e micronutrientes do solo da bacia, assim como a matéria orgânica (MO) é apresentada na Figura 5.4 (A) a (J).

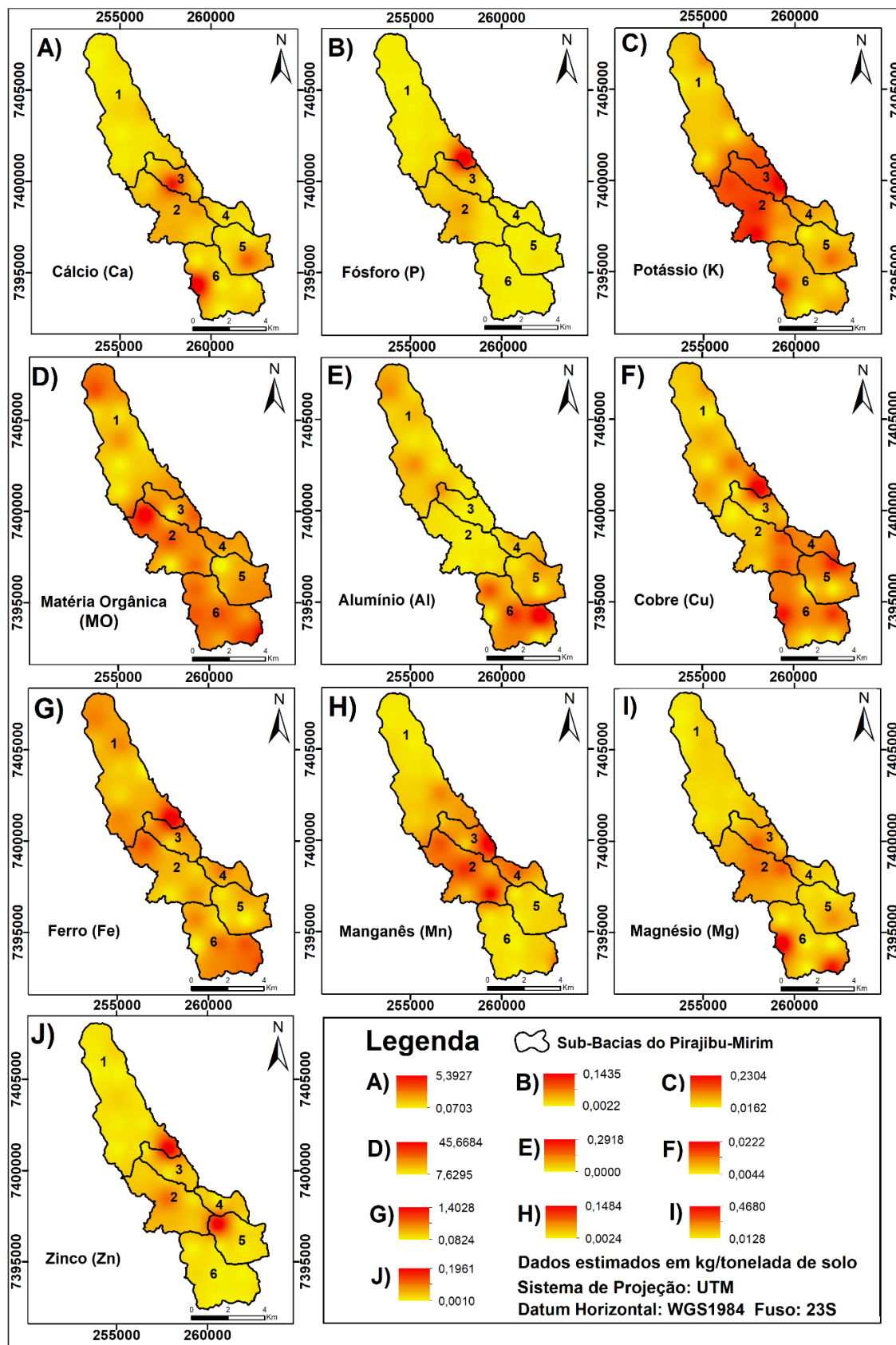
De acordo com a Figura 5.4(A), o Ca apresentou os maiores valores em quilograma por tonelada de solo (kg/t), com maiores concentrações nas porções Oeste da Sub-Bacia 3, ao Sul da Sub-Bacia 5 e a Oeste da Sub-Bacia 6, enquanto os valores apresentaram-se mais homogêneos na Sub-Bacia 2; já a Sub-Bacia 1 apresentou valores menos expressivos do elemento.

O P (Figura 5.4B) obteve valores entre 0,0022 kg/t de solo e 0,1435 kg/t de solo. Por se tratar de um elemento essencial (RAIJ, 2011) foram encontrados baixos valores ao longo da bacia hidrográfica, com valores mais expressivos ao Sudeste da Sub-Bacia 1 e distribuídos de forma homogênea nas Sub-Bacias 2 e 3, enquanto às Sub-Bacias 4, 5 e 6 apresentaram menores valores desse atributo. De acordo com Rossel e Bui (2016) e Song et al. (2020), as concentrações de fósforo total no solo estão intimamente ligadas à qualidade da água.

A distribuição do K (Figura 5.4C) apresentou os maiores valores na região central, sendo os valores máximos encontrados predominantemente na Sub-Bacia 3 (0,2304 kg/t de solo) e em grande parte da Sub-Bacia 2, enquanto a Sub-Bacia 1 apresentou os menores valores (0,0162 kg/t de solo).

Na Figura 5.4(D) é apresentada a distribuição espacial da MO, onde é possível verificar uma variação entre 7,6 kg/t de solo e 45,7 kg/t de solo, sendo que as maiores concentrações se localizam no extremo Norte da bacia hidrográfica, estando distribuídas por todas as sub-bacias de forma acentuada, com exceção da Sub-Bacia 1, que apresentou ao longo de sua extensão valores menores de MO, exceto na porção Norte. A MO do solo é proveniente de restos vegetais e animais (RITSON et al., 2014) e possui grande importância na adsorção e imobilização de elementos metálicos do solo, influenciando na sua porosidade, permeabilidade e mesmo em suas características físicas.

Figura 5.4 - Distribuição espacial dos atributos do solo da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim



Fonte: Autoria própria.

O Al (Figura 5.4E) apresentou valores entre 0,0000 e 0,2918 quilogramas por tonelada de solo, sendo os menores valores encontrados nas Sub-Bacias 2 e 3, enquanto os valores mais elevados foram encontrados na Sub-Bacia 6. O Al, quando em baixas concentrações, é considerado benéfico para as plantas, no entanto, altas concentrações confere toxidez às plantas, podendo desencadear, segundo Sabonaro et al. (2015), a inibição da elongação das raízes e, conseqüentemente, a inibição da absorção de água e nutrientes.

Dentre os micronutrientes do solo, o Cu (Figura 5.4F) apresentou valores entre 0,0044 de solo e 0,0222 kg/t de solo, sendo mais acentuado na porção a Sudeste da Sub-Bacia 1, assim como nas Sub-Bacias 4, 5 e 6, enquanto o ferro (Figura 5.4G) apresentou o valor mínimo de 0,0824 kg/t de solo e máximo de 1,4028 kg/t de solo, distribuídos de forma bastante heterogênea nas sub-bacias analisadas, com valores menos expressivos na Sub-Bacia 5.

O Mn (Figura 5.4H) obteve valores entre 0,0024 e 0,1484 kg/t de solo, sendo mais acentuados na região central da bacia, contemplando as Sub-Bacias 2, 3 e 4. A distribuição do Mg (Figura 5.4I) foi mais homogênea na Sub-Bacia 1, próximos de 0,0128 kg/t de solo, correspondendo aos menores valores, enquanto as Sub-Bacias 2 e 3 apresentaram valores mais elevados, seguido da Sub-Bacia 6, com os maiores valores distribuídos nas porções Oeste e Sudeste, com 0,4680 kg/t de solo.

Os menores valores de Zn (Figura 5.4J) foram encontrados na Sub-Bacia 6 (0,0010 kg/t de solo), enquanto os valores mais acentuados (0,1961 kg/t de solo) foram encontrados nas porções Sudeste da Sub-Bacia 1 e a Noroeste da Sub-Bacia 5.

De modo geral, a distribuição dos atributos do solo apresentou uma elevada heterogeneidade espacial, variando significativamente entre as bacias hidrográficas analisadas. De acordo com Artur et al. (2014), a variabilidade dos atributos químicos do solo sofre influência de complexas interações entre os fatores e os processos de formação do solo. Tais constatações foram corroboradas pelos estudos de Carrera et al. (2009).

5.3.2 Estimativa da perda de nutrientes das Sub-bacias do Pirajibu-Mirim

Os dados quantitativos de perda de nutrientes em kg/ano são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados quantitativos da perda de nutrientes (em kg/ano) por sub-bacia

Atributos do solo	Perda em kg/ano por Sub-Bacia					
	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6
Ca	4.703,5	9.794,4	5.721,0	1.221,6	3.911,4	3.173,4
P	150,8	184,7	92,6	14,7	25,8	22,8
MO	186.293,8	194.904,2	67.337,2	47.202,3	82.020,6	96.330,8
K	700,3	1.144,0	522,3	168,7	272,4	249,6
Al	478,9	115,9	40,2	117,0	244,7	400,2
Cu	95,0	76,3	28,7	28,8	45,6	40,2
Fe	5.210,9	3.559,0	1.581,6	1.119,5	1.451,8	2.208,0
Mg	705,6	1.225,3	492,7	187,6	353,4	473,1
Mn	260,3	560,9	222,5	119,9	80,2	79,4
Zn	234,7	366,6	128,3	74,9	163,5	43,9

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 5.3 é possível verificar que o atributo do solo com maior perda anual em todas as Sub-Bacias é a MO, com destaque para a Sub-Bacia 2, que apresentou uma perda de MO na ordem de 194.904,2 kg/ano, enquanto os menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 4, com 47.202,3 kg/ano.

O Ca foi o segundo elemento com maiores perdas anuais, com valores mais expressivos encontrados na Sub-Bacia 2, correspondendo a uma perda anual de 9.794,4 kg ao ano, enquanto a Sub-Bacia 4 apresentou as menores perdas desse atributo. De modo análogo, a Sub-Bacia 2 apresentou maiores perdas de P em comparação às demais Sub-Bacias, com 184,7 kg ao ano, e a Sub-Bacia 4 os menores valores (14,7 kg/ano). O mesmo ocorreu para o K, com 1.144,0 kg/ano (Sub-Bacia 2) e 168,7 kg/ano (Sub-Bacia 4), bem como o Mg, que apresentou uma perda de 1.225,3 kg/ano (Sub-Bacia 2) e 187,6 kg para a Sub-Bacia 4.

O excesso de Ca quando lixiviado para os recursos hídricos pode desencadear problemas de ordem sanitária, uma vez que o carbonato de cálcio pode ser precipitado em meio aquoso e provocar o aumento da dureza na água (VON SPERLING, 2005).

Estudos realizados por Gomes et al. (2017) encontraram íons de cálcio em amostras de água coletadas nos trechos dos rios Mangueirão e Salso, e em poços de água no município de Caçapava do Sul, no Rio Grande do Sul. Os autores analisaram diversos parâmetros de qualidade da água para fins de potabilidade, e constataram que a água possui uma dureza total temporária, associando os elementos Ca e Mg à carbonatos e bicarbonatos advindos de interações litológicas. De acordo com os autores, houve relato de moradores acerca da percepção quanto ao sabor da água nos locais com maiores valores de dureza, estando mais

salobra devido os eventuais sais que foram lixiviados para os corpos de água, fato que corrobora com a importância do presente estudo, uma vez que o excesso desses elementos na água pode acarretar implicações para o consumo humano, além de incrustações em tubulações.

O Al apresentou uma perda mais proeminente na Sub-Bacia 1, com 478,9 kg ao ano, enquanto a menor perda do atributo ocorreu na Sub-Bacia 3 (40,2 kg/ano), assim como o Cu também apresentou maiores valores na Sub-Bacia 1, com 95,0 kg ao ano, e o menor valor na Sub-Bacia 3. Já o Fe apresentou altos valores de perdas na Sub-Bacia 1, com 5.210,9 kg/ano, enquanto os menores valores obtidos foram encontrados na Sub-Bacia 4 (1.119,5 kg/ano). O Mn e o Zn apresentaram perdas mais significativas na Sub-Bacia 2, com 560,9 kg/ano e 366,6 kg/ano, respectivamente, enquanto os menores valores de perda desses nutrientes foram encontrados na Sub-Bacia 6, com 79,4 kg/ano para o Mn e 43,9 kg/ano para o Zn.

De modo geral, constatou-se que as sub-bacias com usos da terra que contemplam as maiores áreas de florestas (naturais e plantadas), tais como as Sub-Bacias 5 e 6, possuem relevo movimentado, elevada declividade e altitude, o que corresponde a um grande potencial de erosão intrínseco a estas características, no entanto, estas sub-bacias possuem as menores áreas de perda de solo classificada como Moderada em comparação às sub-bacias com menores altitudes e declividades, como as Sub-Bacias 1 e 2, bem como as menores taxas de perda de solos e nutrientes dentre as sub-bacias analisadas, maior acúmulo de matéria orgânica e elementos essenciais, fato que corrobora com a importância da vegetação na diminuição da perda de solos por erosão hídrica e traz luz à importância da conservação e preservação dessas áreas.

Na ausência ou mesmo carência de práticas adequadas de conservação, os usos do solo podem ser afetados e, de acordo com Artur et al. (2014), pode reduzir a sua capacidade produtiva, limitando o desenvolvimento de práticas agrícolas, ou ainda, pode aumentar os custos produtivos por parte dos produtores, uma vez que são necessários maiores dispêndios financeiros para recuperar a fertilidade do solo. Estudos realizados por Silva, D. C. et al. (2018) avaliaram a distribuição de nutrientes do solo na bacia hidrográfica do rio Una e constataram um déficit de fósforo que está diretamente associado às áreas agrícolas da bacia. Dentre os macronutrientes do solo avaliados neste estudo, resultados semelhantes foram encontrados para o P, havendo um déficit deste elemento no âmbito geral da bacia hidrográfica, sendo as perdas correspondentes a 0,49 toneladas.

Os nutrientes do solo que são perdidos anualmente podem acarretar prejuízos de grande ordem para a sociedade, principalmente ao que tange os produtores rurais, pois necessitam de

investimento para manter e recuperar a fertilidade do solo que é perdida através da erosão hídrica.

O estudo realizado por Silva et al. (2020) avaliou o custo de reposição de nutrientes do solo em uma bacia hidrográfica de grande expressão agrícola, constatando a necessidade de reposição de Ca, Mg, P e K em 89% da bacia hidrográfica do rio Una, no interior de São Paulo, com um valor estimado em R\$352.846,43. De modo análogo, os mesmos elementos avaliados neste estudo demonstraram uma perda elevada, com destaque para o Ca, que apresentou uma perda superior a 28 toneladas ao ano na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

A esfera pública e privada também é afetada com a perda de nutrientes do solo, pois a lixiviação desses elementos, na maioria das vezes, aporta os recursos hídricos, provocando sua poluição e eventual contaminação, gerando custos elevados para o tratamento de água. Nesse sentido, são diversos os estudos que relatam a deterioração da qualidade da água em reservatórios de água para abastecimento público devido ao aporte de nutrientes, dentre os quais se destaca o nitrogênio, fósforo (BUENO et al., 2020; MELO et al., 2019; PEREIRA; VEIGA; DZIEDZIC, 2013; SIMONETTI et al., 2019; ZORZAL-ALMEIDA et al., 2018), assim como sais minerais que são encontrados em forma de carbonatos na água e podem prejudicar o funcionamento da indústria, causando incrustações de caldeiras e sistemas de tubulações (GOMES et al., 2017).

Portanto, com o aporte de sedimentos nos cursos de água a sociedade em geral é prejudicada, perdendo qualidade na água que consome, sofrendo com o assoreamento e diminuição da quantidade de água potável disponível. Os custos para tratar a água aumentam substancialmente à medida que ocorre a eutrofização dos mananciais de abastecimento público, e esse valor é repassado para a sociedade, que perde investimentos em outras áreas essenciais, como saúde, educação e pesquisa, entre inúmeras outras, uma vez que o tratamento da água se torna mais oneroso.

5.4 CONCLUSÕES

A distribuição dos atributos do solo apresentou uma elevada heterogeneidade espacial, variando significativamente entre as sub-bacias hidrográficas analisadas. Dentre os atributos analisados, a matéria orgânica apresentou os maiores valores em quilograma por tonelada de solo. No entanto, sua distribuição se mostrou menos expressiva na Sub-Bacia 1, embora esta seja a sub-bacia de maior área dentre as demais analisadas, é também a sub-bacia mais

urbanizada, com menor quantidade de vegetação nativa e detentora do reservatório de água para abastecimento público. Quanto à perda de solo nas sub-bacias, houve maior representatividade nas classes estabelecidas como Leve e Moderada, já os valores médios de perda de solos estimados para a bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim foi de 5,92 t/ha.ano.

Os nutrientes do solo perdidos por erosão hídrica apresentaram valores elevados, principalmente em relação ao cálcio, ferro e matéria orgânica, cujas perdas foram estimadas em 28.525,29, 15.130,62 e 674.088,91 kg/ano, respectivamente.

O estudo traz uma importante contribuição no sentido de estimar a perda de elementos químicos que podem aportar os cursos de água e comprometer a qualidade da água do importante reservatório de água presente na bacia hidrográfica por meio da eutrofização da represa, assim como pelo excesso de sais que podem elevar a dureza da água, alterar o pH, precipitar metais pesados que podem estar complexados na matéria orgânica, culminando em problemas de ordem sanitária que podem comprometer a saúde da população, além de reduzir a quantidade de água disponível para consumo devido o assoreamento.

Do ponto de vista ambiental, a perda de nutrientes pode desencadear o empobrecimento do solo, afetando diretamente a sua capacidade produtiva e, concomitantemente, pode comprometer a biota aquática devido os desequilíbrios que os elementos alóctones causam nos corpos de água. Portanto, conhecer espacialmente o comportamento dos atributos, bem como suas perdas por erosão hídrica é de fundamental valia, e fornece informações preciosas para que seja realizado o correto e adequado manejo do solo.

Assim, este estudo corrobora com a importância da vegetação na contenção da erosão do solo, uma vez que as sub-bacias com maiores taxas de vegetação nativa apresentaram maiores gradientes de nutrientes e, conseqüentemente, menor perda de solo e nutrientes essenciais para o adequado crescimento das plantas e manutenção da qualidade do solo.

A análise da distribuição espacial dos atributos do solo, bem como a perda desses atributos em bacias hidrográficas são fundamentais para o monitoramento e desenvolvimento de ações envolvendo práticas conservacionistas. Nesse sentido, o uso de ferramentas de geoprocessamento é imprescindível, elevando substancialmente a capacidade de análise e monitoramento em bacias hidrográficas, sendo um instrumento de suporte às ações de gestão e fornecendo subsídios à gestão e saúde pública.

6 REFLEXOS ANTRÓPICOS DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

RESUMO

São diversos os problemas ambientais que refletem na qualidade da água em uma bacia hidrográfica, dos quais se destaca a perda de solos e dos elementos presentes nessas partículas. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar a correlação entre a perda de nutrientes do solo e o aporte destes na coluna d'água nos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, município de Sorocaba (SP). Foram realizadas análises de água do período seco e chuvoso, de acordo com a réplica de cada período, referentes aos parâmetros físico-químicos, como Oxigênio Dissolvido (OD); Condutividade Elétrica (CE), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), Nitrogênio (N); Fósforo Total (PT), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Cobre (Cu); Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn). A perda de nutrientes do solo foi estimada a partir da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) e os resultados de água e da perda de nutrientes do solo foram submetidos à análise estatística descritiva e ao teste de correlação linear de Pearson, sendo consideradas as variáveis de água e nutrientes do solo que tivessem correlação maior ou igual a 0,80 com significância ($p \leq 0,05$) para cada período avaliado. A análise hierárquica de conglomerados (AHC) foi empregada para melhor elucidação dos resultados. Os resultados revelaram a presença de elementos na água altamente acima do estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 para o Fe, Cu e Mn, bem como para variáveis consideradas como indicadoras da qualidade da água, como STD e CE e OD, N e PT, sugestivos de poluição devido a entrada de nutrientes em compartimentos da bacia hidrográfica, com destaque para a Sub-Bacia 2 e Sub-Bacia 4. A presente pesquisa contribui no âmbito do manejo de bacias hidrográficas, demonstrando os reflexos diante das ações antrópicas e trazendo à luz que o manejo adequado pautado em ações protecionistas é vital para a conservação dos recursos hídricos, cabendo ao poder público fiscalizar e investir em estrutura sanitária adequada.

Palavras-chave: Recursos Hídricos. Manejo. Erosão. Multivariada.

ABSTRACT

There are several environmental problems that reflect on the quality of water in a hydrographic basin, of which the loss of soil and the elements present in these particles stands out. Thus, the present study aims to evaluate the correlation between the loss of nutrients from the soil and their contribution to the water column in the different compartments of the Pirajibu-Mirim river basin, in the municipality of Sorocaba (SP). Analyzes of water from the dry and rainy seasons were carried out, according to the replica of each period, referring to physical-chemical parameters, such as Dissolved Oxygen (DO); Electrical Conductivity (EC), Total Dissolved Solids (TDS), Nitrogen (N); Phosphorus (P), Potassium (K), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Copper (Cu); Iron (Fe), Manganese (Mn) and Zinc (Zn). Soil nutrient loss was estimated from the Universal Soil Loss Equation (USLE) and the results of water and soil nutrient loss were subjected to descriptive statistical analysis and Pearson's linear correlation test, considering the variables of soil water and nutrients that had a correlation greater than or equal to 0.80 with significance ($p \leq 0.05$) for each period evaluated. Hierarchical cluster analysis (HCA) was used to better elucidate the results. The results revealed the presence of elements in the water highly above that established by CONAMA Resolution 357/05 for Fe, Cu and Mn, as well as for variables considered as indicators of water quality, such as TDS, EC and DO, N and P,

suggestive of pollution due to the entry of nutrients into compartments of the hydrographic basin, with emphasis on Sub-Basin 2 and Sub-Basin 4. The present research contributes to the scope of the management of hydrographic basins, demonstrating the reflexes in front of the anthropic actions and bringing to the light that proper management based on protectionist actions is vital for the conservation of water resources, and it is up to the public government to supervise and invest in an adequate sanitary structure.

Keywords: Water Resources. Management. Erosion. Multivariate.

6.1 INTRODUÇÃO

As últimas décadas foram pautadas pelo crescimento urbano, acelerada industrialização e apropriação dos espaços naturais em detrimento da agricultura e pecuária extensivas que provocaram profundas modificações na cobertura da paisagem e geraram impactos ambientais negativos, tais como a perda de biodiversidade e serviços ecossistêmicos, degradação do solo e redução da sua fertilidade, mudanças climáticas e alterações no regime de chuvas (BAUDE; MEYER; SCHINDEWOLF, 2019; FRASCARELI et al., 2022; KALNAY; CAI, 2003; KIRBY, K. J. et al., 2022; MANFREDINI; GUANDIQUE; MORAIS, 2019; SOUZA; GASTALDINI, 2014).

No tocante à qualidade da água, as ações antrópicas têm refletido negativamente devido o lançamento de efluentes domésticos e industriais, lixiviação de agroquímicos nos corpos hídricos e desmatamento de áreas marginais aos cursos de água (MELO et al., 2019; O'DRISCOLL et al., 2022; SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2019a). Nesse sentido, uma das principais causas da baixa disponibilidade hídrica se relaciona às ações antrópicas sem planejamento do uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas, resultando na poluição da água e na diminuição deste recurso fundamental para todas as formas de vida, razão pela qual cada vez mais tem sido priorizado o planejamento, manejo e gestão na escala da bacia hidrográfica (DJIMI et al., 2021; DAY et al., 2020; NSANGOUE et al., 2021; SILVA et al., 2020; USTAOĞLU; TEPE; TAŞ, 2020). No âmbito desta questão encontram-se as águas interiores.

Os poluentes aportados aos recursos hídricos podem desequilibrar os ecossistemas aquáticos, além de causar problemas de saúde pública, aumentando, assim, a pressão por iniciativas de gestão eficiente desses recursos (CARDOSO-SILVA et al., 2021; KÜKRER; MUTLU, 2019; SIMONETTI et al., 2019a).

O aporte de substâncias potencialmente poluidoras aos recursos hídricos ocorre por meio de diferentes rotas, como fontes difusas ou pontuais e pode possuir origem antrópica ou

natural (OUYANG et al., 2019; ROCHA; ROSA; CARDOSO, 2015; SANTOS et al., 2012). Dentre os elementos presentes nos ambientes aquáticos, destacam-se os elementos-traço, também encontrados na literatura como elementos essenciais, metais-traço, micronutrientes, sendo que alguns desempenham papéis importantes para os seres vivos, tais como o Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Cobre (Cu), dentre outros (ESTEVES; GUARIENTO, 2011). No entanto, ainda que essenciais, esses elementos podem ser potencialmente tóxicos em elevadas quantidades (CARDOSO-SILVA et al., 2021).

São diversos os reflexos antrópicos em bacias hidrográficas que podem alterar a qualidade da água, promovendo o aporte de substâncias com potencial poluidor. Souza e Gastaldini (2014) avaliaram a qualidade da água sob condições de uso do solo distintos nas bacias hidrográficas do rio Vacacaí-Mirim, no Rio Grande do Sul, identificando uma elevada degradação ambiental relacionada ao lançamento de efluente doméstico como fonte potencial de contaminação do sistema fluvial, o que contribuiu com uma elevada carga de matéria orgânica, agentes patógenos e nutrientes, levando os autores a considerarem que os diferentes usos do solo provocaram alterações nas relações entre os parâmetros de qualidade da água analisados.

Chen et al. (2016) analisaram diferentes compartimentos do rio Xiangtan, na bacia hidrográfica de Zhenggouwan (China), e investigaram a influência da estrutura lavoura-pecuária nas características de mudança sazonal e variação espacial da água superficial na bacia, identificando graves poluições em diferentes compartimentos analisados, principalmente pelo incremento de nitrogênio e fósforo; enquanto os estudos de Ustaogöl, Tepe e Taş revelaram que as mudanças significativas na qualidade da água do rio Terme, na Turquia, ocorreram de fontes pontuais e difusas, incluindo a erosão do solo na bacia, os tipos de rochas, descargas de águas residuais domésticas, bem como o fluxo agrícola de fertilizantes inorgânicos.

Já os estudos realizados por Silva et al. (2020) avaliaram a perda de nutrientes em diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Una e constataram que a perda é mais expressiva nos usos da terra que contemplam as áreas agrícolas da bacia hidrográfica, sendo locais que não dispõem de práticas conservacionistas adequadas. Nesse sentido, as partículas de solo aportam os recursos hídricos tanto pelo escoamento superficial, como pelo intemperismo das rochas, deposição atmosférica e atividades antrópicas (IDRIS et al., 2017), sendo as atividades antrópicas as causadoras dos efeitos deletérios em maior escala.

Diante do exposto o presente estudo tem como objetivo avaliar a correlação entre a perda de nutrientes do solo e o aporte destes na coluna d'água nos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, município de Sorocaba (SP).

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Justificativa e seleção dos pontos de coleta de água

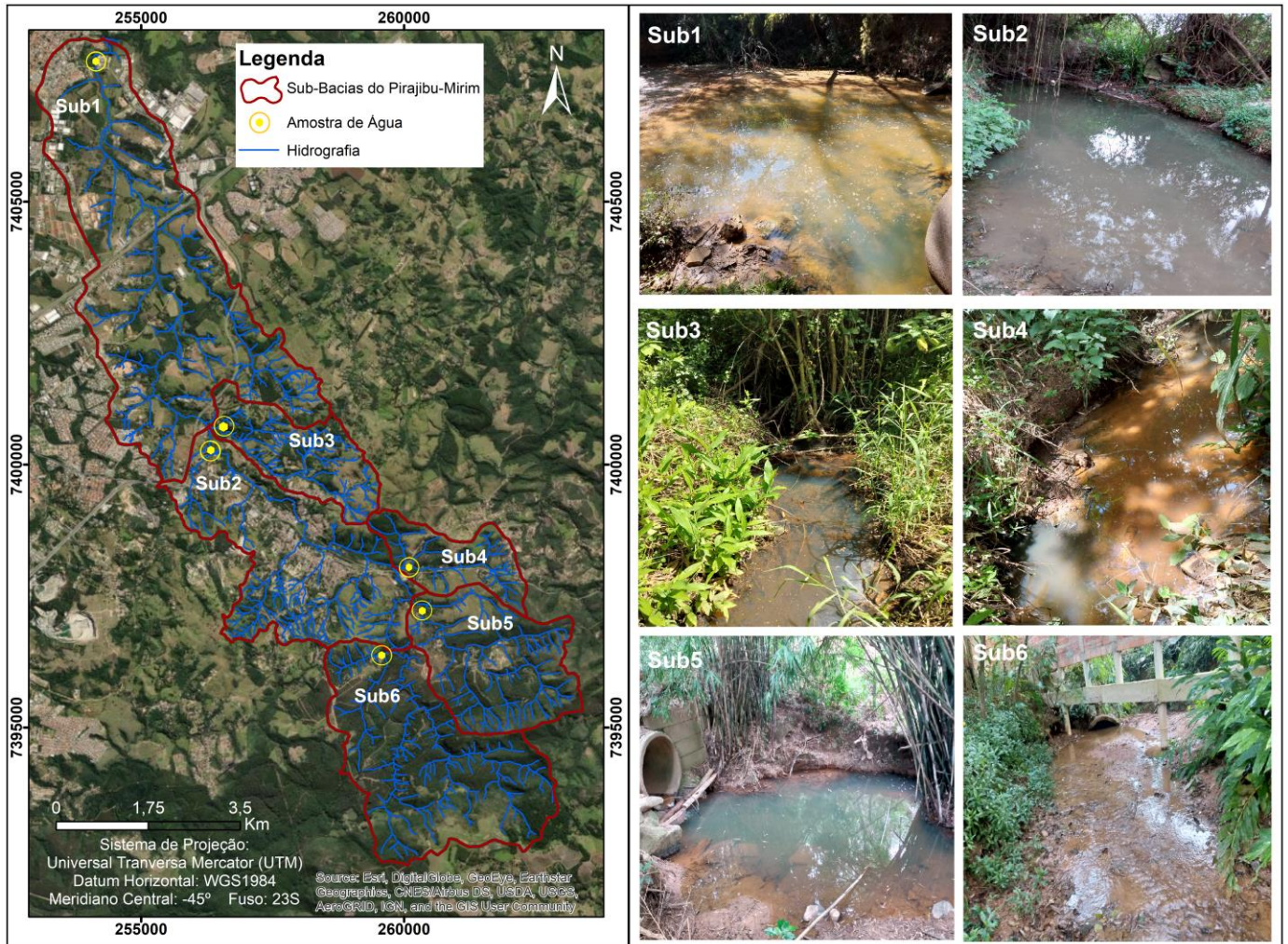
As bases de dados utilizadas na composição deste estudo foram apoiadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo utilizados os critérios estabelecidos nos estudos de Simonetti, Silva e Rosa (2022a) para compartimentação da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. Assim, o estudo contemplou seis pontos amostrais denominados como Sub-Bacia 1 a 6 (Sub1 a Sub6), cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 6.1 que corresponde ao exutório de cada Sub-Bacia (Figura 6.1).

Tabela 6.1 - Coordenadas dos pontos amostrais

Sub-Bacias	Coordenadas planas UTM Datum Horizontal: WGS1984	Área de drenagem (km ²)
Sub1	254292 E - 7408090 N	19,94
Sub2	256307 E - 7400405 N	10,39
Sub3	256472 E - 7400699 N	4,08
Sub4	260050 E - 7398044 N	2,97
Sub5	260165 E - 7397458 N	6,60
Sub6	259728 E - 7396438 N	11,38

Fonte: Autoria própria.

Figura 6.1 - Localização dos exutórios das Sub-Bacias amostradas no estudo



Fonte: Autoria própria.

A coleta de água nos exutórios das sub-bacias foi realizada na profundidade de 0-30 cm da lâmina d'água por meio de um balde plástico, ambientado com água do próprio local antes da coleta, de acordo com Brandão et al. (2011), sendo armazenadas em frascos de polietileno de alta resistência. As amostras de água foram coletadas em quatro campanhas contemplando a réplica de cada período. No período chuvoso, a primeira campanha foi realizada no dia 07 de fevereiro de 2021, e a réplica do período no dia 14 de março de 2021. No período seco, as campanhas foram realizadas nos dias 20 de junho de 2021 e 16 de julho de 2021.

6.2.2 Análises de água contempladas no estudo

As análises *in loco* da água foram obtidas com uma sonda multiparâmetros da marca Hanna (modelo HI98194), calibrada com soluções-padrão de alta pureza, sendo analisados os

parâmetros físico-químicos, tais como: Oxigênio Dissolvido (OD - mg/L) e Condutividade Elétrica (CE - $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Para obtenção dos parâmetros referentes ao Nitrogênio Amoniacal Total (N - mg/L); Fósforo Total (PT - mg/L), Potássio (K - mg/L), Cálcio (Ca - mg/L), Magnésio (Mg - mg/L), Cobre (Cu - mg/L); Ferro (Fe - mg/L), Manganês (Mn - mg/L) e Zinco (Zn - mg/L), as amostras foram coletadas e imediatamente armazenadas em frascos de polietileno novos, sob refrigeração, e encaminhadas ao Departamento de água e Solos da Unesp de Botucatu, sendo processadas no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, devidamente certificado. O P foi obtido por meio do método de Colorimetria de Metavanadato (APHA, 1999), enquanto o K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn foram obtidos por Espectrofotometria de absorção atômica (APHA, 1999), e o N foi pelo método Semi-micro Kjeldahl (APHA, 1999). Já os sólidos totais dissolvidos (STD - mg/L) foram obtidos de acordo com a Norma Técnica para análise de sólidos da SABESP (1999) no laboratório de Água e Solos da Unesp - ICTS.

Os resultados foram confrontados com a Resolução CONAMA 357/05 para corpos hídricos classe II, no qual os exutórios dos tributários analisados se enquadram.

6.2.3 Perda de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim

A perda de nutrientes do solo foi estimada de acordo com Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo), e os dados obtidos foram utilizados na análise entre os possíveis reflexos da perda de solos na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim (ver Tabela A.1 com a perda de nutrientes no Apêndice A).

6.2.4 Análises estatísticas empregas no estudo

Os resultados de água, bem como a perda de nutrientes do solo obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo analisados os valores de mínimo, máximo, médio ($\bar{x}$), desvio padrão (DP), amplitude e coeficiente de variação (CV%).

Após submeter os dados à estatística básica, as unidades das variáveis utilizadas na composição da análise bivariada e multivariada foram padronizadas de acordo com a média e o desvio padrão, eliminando o viés decorrente de diferentes escalas, uma vez que são atribuídos os mesmos pesos para cada variável (SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2022a) (Equação 1).

$$z = (xi - X)/\sigma \quad (1)$$

Sendo: Z é a variável padronizada; xi é a variável a ser padronizada; X é o valor médio, e σ é o desvio padrão.

Posteriormente à normalização dos dados, estes foram submetidos ao teste de correlação linear de Pearson (r), que permite avaliar o grau de inter-relação e associação entre duas variáveis. O coeficiente de correlação Pearson (r) varia de -1 a 1 (indicando uma correlação perfeita – negativa ou positiva), enquanto o valor zero (0) indica que não houve correlação entre as variáveis (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

Para tanto, o teste foi realizado no software PAST 4.09 (HAMMER; HARPER; RYAN 2001), onde somente foram consideradas as variáveis de água e nutrientes do solo que tivessem o intervalo de confiança maior ou igual a 95% ($p \leq 0,05$) para cada período avaliado, considerando para efeitos deste estudo o valor médio de cada período obtido pela réplica das campanhas do período chuvoso (fevereiro e março de 2021) e seco (junho e julho de 2021). A significância da correlação foi realizada pelo Teste T Bicaudal (Equação 2). Os gráficos de dispersão estão disponíveis no Apêndice A.

$$t = r \sqrt{(n - 2)/(1 - r^2)} \quad (2)$$

Sendo: $n - 2$ é o grau de liberdade; r é coeficiente de correlação Pearson; e r^2 é coeficiente de determinação.

Somente foram consideradas as correlações entre as variáveis de água com os nutrientes do solo com correlação ($r \geq 0,8$), por ser considerada uma forte correlação (BHUTIANI et al., 2016) e, para efeitos deste estudo, poderiam melhor representar os reflexos da perda de nutrientes do solo na água dos exutórios das sub-bacias analisadas. De acordo com Bhutiani et al. (2016), a associação de elementos metálicos com forte correlação é sugestiva de fontes de poluição semelhantes.

A Tabela de correlação para cada um dos períodos (chuvoso e seco) foi elaborada a partir da função elipses, evidenciando os coeficientes de correlação como elipses variando de tamanho conforme o grau de correlação, segundo Schilling (1984), disponível no software Past 4.09 (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

A análise multivariada foi realizada por meio da análise hierárquica de conglomerados (AHC) utilizando medidas de distâncias que pudessem expressar as similaridades/dissimilaridades entre as sub-bacias quanto à perda de nutrientes do solo e as variáveis de água. Para tanto, somente foram contempladas na análise as variáveis que seguiram os critérios estabelecidos na etapa anterior quanto à correlação ($r \geq 0,8$) e significância ($p \leq$

0,05). As medidas de distâncias utilizadas na AHC foram obtidas a partir da distância euclidiana, na qual a distância entre duas observações i e j refere-se à raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os pares de observações i e j para todas as variáveis (p) (FÁVERO et al., 2009) (Equação 3 e 4).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(X_{i1} - X_{j1})^2 + (X_{i2} - X_{j2})^2 + \dots + (X_{ip} - X_{jp})^2} \quad (4)$$

Sendo: X_{ik} é o valor da variável k em relação à observação i ; e X_{jk} é a representação da variável k para a observação j .

Portanto, esta abordagem parte do pressuposto de que quanto menor a distância mais similares serão as sub-bacias.

Os dados foram organizados de acordo com o agrupamento estratigraficamente restrito, que permite que apenas linhas ou grupos de linhas adjacentes sejam unidos durante o procedimento de agrupamento aglomerativo, resultando em um dendrograma. O algoritmo utilizado foi a média não ponderada de pares de grupos – *Unweighted Pair-Group Methods with Arithmetic Average* (UPGMA do inglês), cujos dendrogramas (*cluster*) são unidos com base na distância média entre todos os membros dos dois grupos (i e j) e (k), na qual a distância entre eles é representado pela Equação 5.

$$d_{(ij)k} = \text{média}\{d_{ik}, d_{jk}\} \quad (5)$$

Para melhor elucidação dos resultados foi utilizado o agrupamento bidirecional, também utilizado por Idris et al. (2017) e Kokia et al. (2020). Tal agrupamento foi selecionado para que houvesse melhor visualização das similaridades entre as sub-bacias hidrográficas analisadas e as variáveis de água e solo representadas por uma matriz de dados com cores que satisfazem os valores de cada variável padronizada pelo Z escore. Assim, as cores vermelho, amarelo e laranja indicam os valores mais elevados obtidos de acordo com a média de cada campanha (chuvoso e seco), enquanto matizes de ciano e as respectivas transições para o azul indicam os menores valores obtidos nas campanhas.

6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6.2 apresenta a síntese dos parâmetros de qualidade da água analisados nas Sub-Bacias do rio Pirajibu-Mirim. Os gráficos dos respectivos parâmetros podem ser visualizados no Apêndice A (Figura A.2).

Tabela 6.2 - Dados quantitativos dos parâmetros de água obtidos nas Sub-Bacias do rio Pirajibu-Mirim

Parâmetros	Amplitude Chuvoso	$\bar{x}$	DP	CV	Amplitude Seco	$\bar{x}$	DP	CV	Conama 357/05
	(Máx – Mín)			(%)	(Máx – Mín)			(%)	Classe II
OD (mg/L)	12,90 – 2,48	6,17	3,19	51,76	6,33 – 2,48	4,24	1,31	30,96	$\geq 5,00$ (mg/L)
CE (uS)	1116,00 - 108,00	343,93	337,74	98,20	759,00 - 114,50	277,64	233,41	84,07	$\leq$ 100,00* (uS)
STD (mg/L)	1295,00 - 78,00	251,86	313,96	124,66	492,00 – 94,00	185,50	128,74	69,40	500,00 (mg/L)
Ca (mg/L)	10,00 – 0,00	4,71	4,01	85,02	25,00 – 0,00	6,29	7,24	115,13	-
K (mg/L)	8,00 – 2,00	5,50	2,28	41,43	13,00 – 0,00	5,50	4,13	75,05	-
Mg (mg/L)	7,00 – 5,00	6,14	0,86	14,07	7,00 – 3,00	5,86	1,29	22,07	-
Cu (mg/L)	0,00 – 0,00	0,00	0,00	0,00	0,05 – 0,00	0,02	0,02	122,65	0,009 (mg/L)
Fe (mg/L)	2,90 – 0,02	1,14	0,94	82,70	2,86 – 0,09	0,77	0,92	119,27	0,30 (mg/L)
Mn (mg/L)	0,66 – 0,00	0,20	0,25	123,54	0,30 – 0,00	0,07	0,10	157,79	0,10 (mg/L)
Zn (mg/L)	0,09 – 0,00	0,01	0,03	232,41	0,00 – 0,00	0,00	0,00	0,00	0,18 (mg/L)
PT (mg/L)	3,52 – 0,13	1,61	1,09	67,85	1,66 – 0,19	1,02	0,62	60,20	0,03 ⁽¹⁾ 0,05 ⁽²⁾ (mg/L)
N (mg/L)	148,40 – 14,00	52,10	48,61	93,31	177,80 – 0,19	58,30	53,81	92,29	**

Fonte: Autoria própria.

Legenda: $\bar{x}$ = Média. DP = Desvio Padrão. CV = Coeficiente de Variação. ⁽¹⁾ Limites estabelecidos para ambientes lênticos. ⁽²⁾ Limites estabelecidos para ambientes intermediários e tributários provenientes de ambientes lênticos. (**) Parâmetro variável em função do pH.

O OD (Tabela 6.2) apresentou os valores no período seco chuvoso, onde o maior valor foi obtido na sub-bacia de cabeceira (Sub-Bacia 6) para o mês de fevereiro de 2021, enquanto o menor valor foi encontrado na campanha de março de 2021, com OD igual a 2,64 mg/L para a Sub-Bacia 2, enquanto no período seco a amplitude variou entre 6,33 mg/L e 2,48 mg/L, sendo a Sub-Bacia 6, análogo ao período chuvoso, a que apresentou o valor mais elevado de

OD, e a Sub-Bacia 2 o menor valor. Todas as sub-bacias amostradas atenderam aos padrões preconizados para Classe 2 pela Resolução Conama 357/2005 para o OD na primeira campanha do período chuvoso (fevereiro de 2021), no entanto, na réplica do período chuvoso realizada em março de 2021, somente às Sub-Bacias 5 e 6 atenderam à legislação, com um OD igual a 5,0 mg/L e 5,19, respectivamente.

Na primeira campanha do período seco, às Sub-Bacias 1 e 6 apresentaram valores de OD satisfatórios, com 6,09 mg/L e 6,33 mg/L, enquanto as demais sub-bacias apresentaram valores aquém do estabelecido pela CONAMA 357/05. Contudo, na réplica do período seco, nenhuma sub-bacia apresentou OD acima de 5,0 mg/L, com destaque para a Sub-Bacia 2, que obteve os piores resultados em todas as campanhas. É importante salientar que o OD é um parâmetro imprescindível para a manutenção da vida aquática, sendo que, valores abaixo de 5,0 mg/L podem comprometer a respiração dos peixes (SONNENBERG et al., 2020), sendo utilizado na estabilização da matéria orgânica pelos microrganismos decompositores (VON SPERLING, 2005). Portanto, baixas concentrações de OD são indicativos de elevadas cargas orgânicas nos corpos hídricos.

Os resultados de condutividade elétrica (CE) (Tabela 6.2) revelaram valores mais elevados para a Sub-Bacia 2 em todos os períodos amostrados, com destaque para a primeira campanha do período chuvoso, com 1116,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os menores valores de CE foram encontrados na Sub-Bacia 6 na primeira campanha do período chuvoso (fevereiro de 2021), com 108 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Na réplica do período chuvoso houve uma considerável redução de CE para a Sub2, com 324,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sugestivo de que houve um aporte de substâncias no mês de fevereiro que não foi advindo do deflúvio superficial, visto que a chuva acumulada no mês de fevereiro de 2021 foi de 74,5 mm, enquanto no mês de março a chuva acumulada foi de 112,8 mm (os valores de chuva podem ser visualizados na Tabela A.2 do Apêndice A).

Nos meses respectivos ao período seco, junho e julho de 2021, novamente os maiores valores foram encontrados na Sub-Bacia 2, com 671,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ no mês de junho e 759,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em julho, enquanto os menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 6, com 114,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 119,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Diante dos resultados, é evidente que a Sub-Bacia 2 está recebendo aporte de íons dissolvidos na água. Cabe ressaltar que todos os pontos amostrados apresentaram valores superiores ao estabelecido pela Cetesb (2009), que determina que a CE não ultrapasse 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A CE é um parâmetro que expressa, de maneira indireta, a quantidade de íons dissolvidos na água, geralmente compostos por sais inorgânicos, que possuem a capacidade de transmitir corrente elétrica e, por essa razão, é um parâmetro de qualidade da água que pode

inferir sobre a poluição dos corpos d'água (SIMONETTI et al., 2019; VON SPERLING, 2005). Ainda, de acordo com Ahmadianfar et al. (2022), a CE desempenha um papel essencial na medição do risco de salinidade para irrigação e água potável.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) apresentaram os valores mais elevados na Sub-Bacia 1, na campanha do período chuvoso (março de 2021), com 1295,00 mg/L, seguido da Sub-Bacia 2, com 558,00 mg/L, enquanto o menor valor de STD foi encontrado na Sub-Bacia 6, com 78,00 mg/L. Segundo Djimi et al. (2021), na estação chuvosa o escoamento superficial pode transportar grandes quantidades de detritos (sólidos em suspensão e nutrientes), sendo potenciais fontes difusas e pontuais de poluição.

Já no período seco, os maiores valores de STD foram encontrados na Sub-Bacia 2, com 375,00 mg/L em junho e 492,00 mg/L em julho (2021), seguido da Sub-Bacia 4, com 128 mg/L e 149 mg/L nos referidos períodos, enquanto a Sub-Bacia 1 obteve 126 mg/L e 124 mg/L, respectivamente. Os menores valores obtidos no período seco foram encontrados na Sub-Bacia 6, com 94,00 mg/L.

De acordo com Von Sperling (2005), todos os contaminantes presentes na água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem com a carga de sólidos. Nesse sentido, é possível constatar que as sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim sofrem um significativo aporte de substâncias que podem ser potencialmente poluidoras, conforme constatado principalmente no período chuvoso para a Sub-Bacia 1, que compreende a foz do rio Pirajibu-Mirim, bem como na Sub-Bacia 2, que se localiza no terço médio da bacia hidrográfica. No entanto, o estudo realizado por Silva, T. A. (2021) nas represas Castelinho e Ferraz, compreendidas na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, verificou um incremento de sólidos totais em suspensão no período seco para ambas as represas, sugerindo que o aumento da vazão no período chuvoso favorece a diluição da carga de sólidos em ambientes lênticos.

O Zn foi detectado no período chuvoso nas Sub-Bacias 4, com 0,02 mg/L, Sub-Bacia 5 (0,09 mg/L) e Sub-Bacia 6, com 0,05 mg/L. Nas demais sub-bacias não foi encontrada a presença do elemento, tampouco no período seco. Portanto, o Zn esteve dentro dos padrões estabelecidos pela CONAMA 357/05.

O Mn foi encontrado em todas as sub-bacias na primeira campanha do período chuvoso (fevereiro de 2021), cujos maiores valores foram na Sub-Bacia 4, com 0,66 mg/L, seguido da Sub-Bacia 1, com 0,46 mg/L. Na réplica do período chuvoso (março de 2021), o Mn foi encontrado somente nas Sub-Bacias 5 (0,16 mg/L) e Sub-Bacia 6, com 0,05 mg/L. Na primeira campanha do período seco (junho de 2021), o elemento foi encontrado nas Sub-Bacias 3, Sub-Bacia 4 e Sub-Bacia 5, com valores de 0,06 mg/L, 0,30 mg/L e 0,07 mg/L, respectivamente,

enquanto na réplica do período seco (julho de 2021) todas as Sub-Bacias apresentaram Mn na coluna d'água, sendo a Sub-Bacia 1 com o maior valor (0,07 mg/L), a Sub-Bacia 6 com 0,03 mg/L, e as demais com 0,02 mg/L. O Mn encontrado no período chuvoso nas Sub-Bacias 1, 4 e 5 esteve muito acima do preconizado pela Resolução CONAMA 357/05, que estabelece até 0,10 mg/L de Mn, enquanto no período seco apenas a Sub-Bacia 4 esteve acima da legislação.

A presença de Fe foi constatada em todas as campanhas e bacias hidrográficas. No período chuvoso a Sub-Bacia 4 foi a que apresentou os maiores valores do elemento, com 2,90 mg/L na campanha de fevereiro e 1,94 mg/L em março de 2021, enquanto os menores valores do período foram encontrados na Sub-Bacia 1, com 0,05 e 0,02 mg/L. No período seco, os resultados obtidos foram análogos ao período chuvoso, tendo a Sub-Bacia 4 os valores mais elevados, com 2,86 mg/L em junho de 2021 e 0,97 mg/L em julho. Do mesmo modo, a Sub-Bacia 1 obteve os menores valores do período, com 0,09 e 0,13 mg/L, respectivamente.

Tanto o Fe quanto o Mn são elementos presentes em uma vasta gama de solos, apresentando-se nas formas insolúveis (Fe^{3+} e Mn^{4+}). No entanto, de acordo com as condições do meio aquático esses elementos podem formar precipitados, causando alterações na cor e sabor da água, podendo comprometer a qualidade da água para abastecimento público (VON SPERLING, 2005).

O Mg apresentou os maiores valores para as Sub-Bacias 2, 5 e 6, com 7,00 mg/L na campanha de fevereiro de 2021, e os menores valores para as sub-bacias 1 e 3. Na réplica do período chuvoso (março de 2021), os maiores valores foram novamente para as Sub-Bacias 2 e 5 (7,00 mg/L), enquanto o menor valor foi para a Sub-Bacia 1 (5,00 mg/L). No período seco, os maiores valores da primeira campanha (junho de 2021) foram encontrados nas Sub-Bacias 2 e 6, ambas com 7,00 mg/L, enquanto o menor valor foi obtido na Sub-Bacia 3 (5,00 mg/L). Na réplica do período (julho de 2021), os maiores valores foram encontrados nas Sub-Bacias 2, 5 e 6, com 7,00 mg/L, e o menor valor na Sub1, com 3,00 mg/L, representando o menor valor dentre as campanhas.

Os maiores valores obtidos para o Ca foram na réplica do período chuvoso (março de 2021), com 10,00 mg/L para as Sub-Bacias 1 e 5, enquanto os menores valores foram na Sub-Bacia 2 e Sub-Bacia 3, com 8,00 mg/L. No período seco, os maiores valores foram obtidos em julho (2021), com 25,00 mg/L para a Sub-Bacia 2, enquanto o menor valor foi de 7,00 mg/L para a Sub-Bacia 1. Os cátions bivalentes (Mg^{2+} e Ca^{2+}), embora não possuam grandes implicações para a saúde humana, em altas concentrações podem influenciar na dureza da água, reduzindo a formação de espuma quando utilizado em residências, o que leva ao aumento do uso de sabão comerciais contendo P e N e, por conseguinte, geração de outros problemas

associados ao incremento de surfactantes na água. Outro problema relacionado ao excesso destes cátions na água concerne à precipitação destes compostos quando em elevadas temperaturas, podendo haver incrustações em sistemas como caldeiras industriais, aquecedores, tubulações de águas quentes, entre outras (VON SPERLING, 2005).

Quanto ao Cu encontrado no estudo, os valores foram mais expressivos nas Sub-Bacias 4 e 6, com 0,05 mg/L, enquanto a Sub-Bacia 1 apresentou o menor valor, com 0,03 mg/L. Nesse sentido, é possível inferir que a presença de Cu não possui relação direta com o deflúvio superficial, uma vez que a detecção do elemento ocorreu apenas no período de estiagem. No entanto, as sub-bacias que apresentaram o Cu dissolvido estiveram acima do permitido pela Resolução CONAMA 357/05 (0,009 mg/L).

O estudo realizado por Kellner e Oliveira (2022) avaliou a agressividade da água, bem como as possíveis alterações da qualidade para o consumo humano, destacando que, dentre os metais que podem estar contidos na água potável, o cobre possui um elevado potencial corrosivo para as instalações e sistemas de distribuição de água e a corrosão da tubulação metálica, aumentando a concentração de cobre no meio líquido. Ainda, de acordo com Tam e Elefsiniotis (2009), as corrosões podem afetar a integridade estrutural dos sistemas de distribuição, podendo alterar a qualidade da água para consumo, além de resultar em vazamentos na rede de distribuição.

Para o K, as sub-bacias que apresentaram os valores mais expressivos foram as Sub-Bacias 3 e 4 na réplica do período chuvoso (março de 2021), ambas com 8,00 mg/L, enquanto as Sub-Bacias 1 e 6 obtiveram os menores valores (6,00 mg/L). Os valores mais expressivos do período seco foram encontrados em março (2021) nas Sub-Bacias 2 e 5, com 13,00 e 10,00 mg/L, respectivamente, enquanto os menores valores foram obtidos pelas Sub-Bacias 6 e 1, com 6,00 e 7,00 mg/L. O potássio é um elemento amplamente utilizado na agricultura para promover a fertilidade do solo, no entanto, seu uso indiscriminado pode acarretar a lixiviação do elemento para os cursos de água. Embora não haja implicações diretas na saúde humana, no ambiente aquático o K pode aumentar a condutividade elétrica por se tratar de um soluto iônico.

O PT apresentou os maiores valores nas Sub-Bacias 4 (3,52 mg/L) e 6 (2,25 mg/L) na primeira campanha (fevereiro de 2021), enquanto os menores valores foram para as Sub-Bacias 2, com 1,79 mg/L e 5 (1,92 mg/L). Na réplica do período chuvoso (março de 2021), novamente os maiores valores foram obtidos pelas Sub-Bacias 4 e 6, com PT igual a 0,77 mg/L e 0,96 mg/L, respectivamente, enquanto os menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 1 (0,13 mg/L) e Sub-Bacia 3 (0,38 mg/L). No período seco, os valores mais expressivos foram encontrados na primeira campanha (junho de 2021), com destaque para a Sub-Bacia 4, que

obteve 1,66 mg/L, seguido pelas Sub-Bacias 2 e 3, com 1,60 mg/L para ambas. É importante ressaltar que todas as sub-bacias, em ambos os períodos, estiveram muito acima do preconizado pela Resolução CONAMA 357/05.

Os valores de PT acima da resolução CONAMA 357/05 em todos os exutórios amostrados, bem como os elevados valores de N são indicativos do despejo clandestino de esgoto evidenciados nas campanhas de coleta de água e, também, constatada nas conversas com os moradores do entorno dos exutórios das Sub-Bacias 2, 3 e 4.

O N analisado no período chuvoso apresentou valores mais expressivos na primeira campanha para as Sub-Bacias 2 e 5, com 148,40 mg/L e 109,20 mg/L, respectivamente, enquanto as Sub-Bacias 1 e 3 detiveram os menores valores da campanha, com 14,00 mg/L e 19,60 mg/L. No período seco, a primeira campanha apresentou os valores mais elevados, novamente para a Sub-Bacia 5 (177,80 mg/L), seguido da Sub-Bacia 3, com 78,40 mg/L, enquanto os menores valores foram para a Sub-Bacia 4 (39,20 mg/L).

Embora o nitrogênio constitua um importante elemento no metabolismo de ecossistemas aquáticos, podendo, inclusive, atuar como um fator limitante na produção primária desses ambientes, algumas condições podem fazê-lo se tornar tóxico para os organismos aquáticos (PEREIRA; MERCANTE, 2018), principalmente quando se encontra na forma de amônia livre ionizada (NH_4^+) e amônia (NH_3).

De acordo com Moreira et al. (2012), o lançamento de esgoto doméstico é uma via importante de aporte de poluentes aos cursos de água, sendo a problemática do saneamento básico um desafio global, pois grande parte dos países em desenvolvimento não possuem condições mínimas de higiene e saúde para a população. Estudos realizados por Duarte-Jaramillo et al. (2022) avaliaram a qualidade da água a partir de diversos parâmetros físico-químicos nos municípios de Sincerín e Gambote, Bolívar, na Colômbia, no período de 2017 a 2018 e constataram que água era imprópria para consumo, apresentando um alto risco para a saúde humana. De acordo com os autores, as populações localizadas em áreas rurais apresentam maior nível de risco, o que acontece em muitas partes do país onde estão presentes diferentes condições geográficas e climáticas.

Nas Figuras 6.2 (A, B, C e D) a 6.7 (A, B, C e D) são ilustrados os exutórios amostrados nas quatro campanhas realizadas (período chuvoso e seco).

Figura 6.3 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 1 (Sub1). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

Durante as campanhas realizadas no período chuvoso ficou evidente que a Sub-Bacia 1 estava recebendo aportes significativos de material particulado, o que foi comprovado pelos elevados valores de turbidez.

A Sub-Bacia 2, apresentada na Figura 6.3 (A), (B), (C) e (D), se encontra numa área com elevada ocupação urbana e, durante as incursões, os moradores relataram que há despejo de esgoto clandestino por grande parte das residências próximas ao tributário. Todavia, os elevados valores de CE, STD, PT, N, bem como os baixos valores de OD são fortes indicativos de poluição provenientes, sobretudo, do descarte indevido de esgoto clandestino. Durante as coletas foi possível visualizar um aspecto turvo nas águas e mal odor.

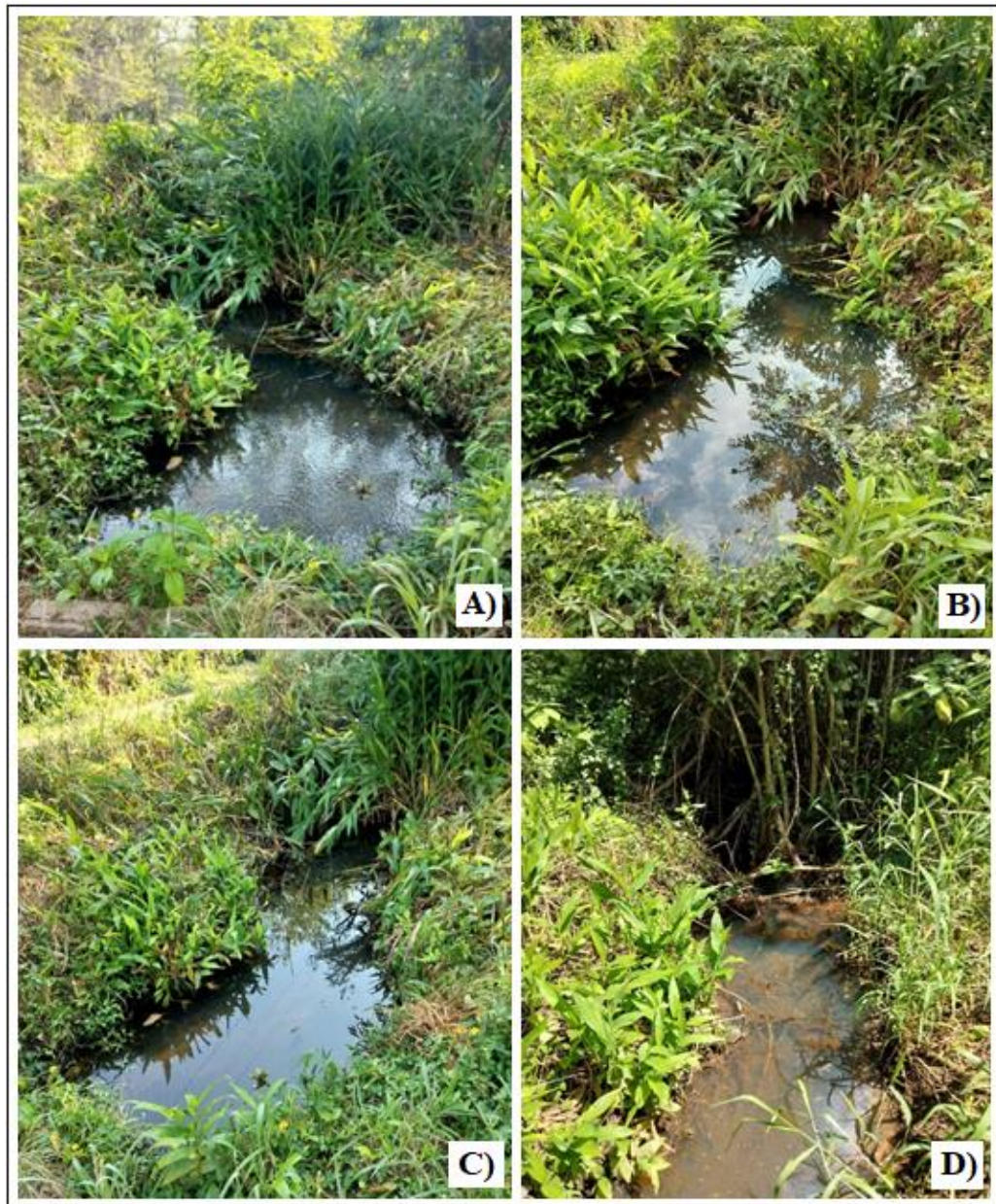
Figura 6.4 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 2 (Sub2). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.4 (A), (B), (C) e (D) é apresentada a Sub-Bacia 3, não sendo possível observar um caráter visualmente poluído no exutório, sendo que, na maioria das campanhas, a água estava límpida e não apresentava nenhum odor.

Figura 6.5 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 3 (Sub3). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 4 (Figura 6.5 – A, B, C e D) foi o exutório com maior indício de poluição, sendo constatado um cano com despejo direto de esgoto no tributário, conferindo ao exutório um forte odor de esgoto, águas turvas e muitas partículas suspensas na coluna d'água, além de lixo descartado indevidamente.

Figura 6.6 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 4 (Sub4). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 6.6 (A), (B), (C) e (D) é ilustrada a Sub-Bacia 5, que apresentou águas ligeiramente turvas em todas as campanhas. Nesta sub-bacia foi encontrada uma bomba que levava água até uma plantação a alguns metros acima do exutório, no entanto, não há como afirmar se o bombeio de água estava regulamentado pelo órgão pertinente. Também, a montante do exutório, há um lago artificial que pode estar contribuindo com o aporte de N no tributário, uma vez que foram encontrados nesse exutório os maiores valores de N em praticamente todas as campanhas realizadas. De acordo com Sonnenberg et al. (2020), atividades provenientes da piscicultura podem provocar o incremento de nutrientes nos ambientes aquáticos.

Figura 6.7 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 5 (Sub5). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

A Sub-Bacia 6 (Figura 6.7 – A, B, C e D) foi o exutório que apresentou um melhor aspecto de suas águas (cristalinas e sem nenhum odor), não sendo encontrado nenhum descarte irregular de resíduos em suas margens. No entanto, também foi a sub-bacia com a menor lâmina d'água em todos os períodos analisados, com destaque para o período seco. A Sub-Bacia 6 é uma sub-bacia de cabeceira, e apresenta, tanto à montante quanto em seu entorno, diversas propriedades rurais pelo qual o curso de água se permeia, fato que pode favorecer o incremento de fósforo proveniente das criações de aves e outros animais a partir do escoamento superficial dessas áreas. Ainda, o exutório da Sub-Bacia 6 encontra-se na divisa de duas propriedades.

Figura 6.8 - Amostragem no exutório da Sub-Bacia 6 (Sub6). A) Fevereiro de 2021. B) Março de 2021. C) Junho de 2021. D) Julho de 2021



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos sobre os parâmetros de qualidade de água, a presente pesquisa confirma o pressuposto de que as atividades antrópicas, como despejo de esgoto doméstico, bem como a agropecuária, mesmo em pequena escala, quando realizada em compartimentos ambientais sem os devidos cuidados podem afetar significativamente a qualidade de uma bacia hidrográfica, culminando na deterioração da qualidade da água e na degradação dos solos.

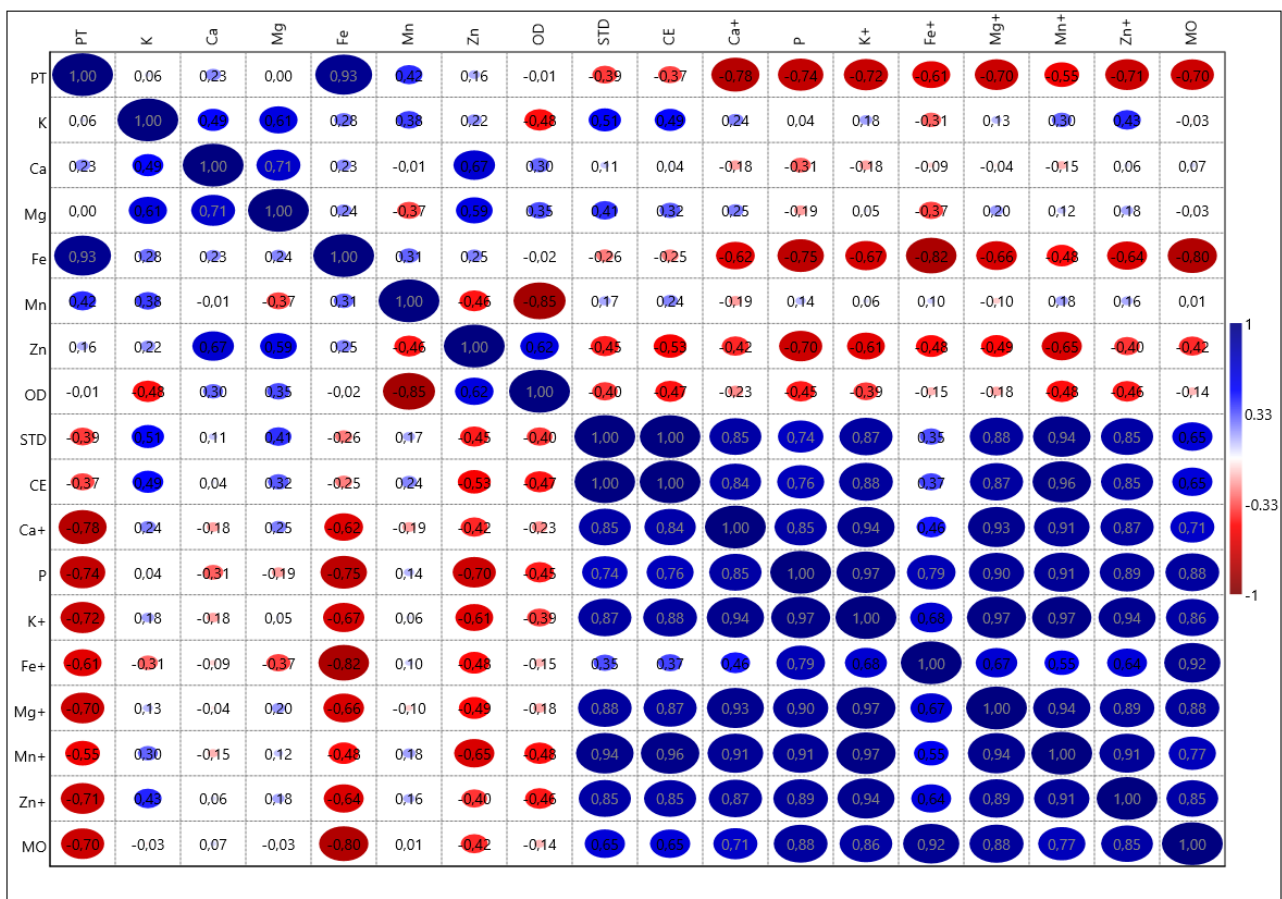
Cabe salientar que o rio Pirajibu-Mirim é de extrema importância para o município de Sorocaba, suprimindo, aproximadamente, 10% do abastecimento público do município. Todavia, é importante destacar que a gestão quanto aos processos de monitoramento da qualidade da água deve acontecer na escala da bacia hidrográfica, uma vez que foi constatado que os compartimentos ambientais compreendidos pelas sub-bacias determinadas nesta pesquisa, evidenciaram que todos os compartimentos sofrem algum tipo de impacto negativo.

6.4 Perda de nutrientes do solo e os reflexos na qualidade da água

De modo a fornecer suporte para as possíveis interações entre a perda de nutrientes por erosão e os reflexos na qualidade da água, foram utilizados testes estatísticos que pudessem evidenciar essas interações a partir das correlações entre as variáveis analisadas na água e a perda de nutrientes por erosão hídrica nos compartimentos ambientais da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim no período seco e chuvoso.

Sendo assim, as variáveis que apresentaram correlação igual ou superior a 0,80 no período chuvoso são apresentadas na Figura 6.8. No Apêndice A estão disponíveis todas as correlações obtidas entre as variáveis.

Figura 6.9 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as variáveis do solo e da água do exutório das sub-bacias



Fonte: Autoria própria.

No período chuvoso as variáveis que apresentaram correlação, de acordo com os critérios estabelecidos, são representadas na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 - Correlação entre as variáveis de água e solo obtidas no período chuvoso

Variável Água	Variável Solo	Correlação (r)	Significância ($p \leq 0,05$)
Fe	Fe+	-0,82	0,04
	MO	-0,80	0,05
STD	Ca+	0,85	0,03
	K+	0,87	0,02
	Mg+	0,88	0,02
	Mn+	0,94	0,00
	Zn+	0,85	0,03
CE	Ca+	0,84	0,04
	K+	0,88	0,02
	Mg+	0,87	0,02
	Mn+	0,96	0,00
	Zn+	0,85	0,03

Fonte: Autoria própria.

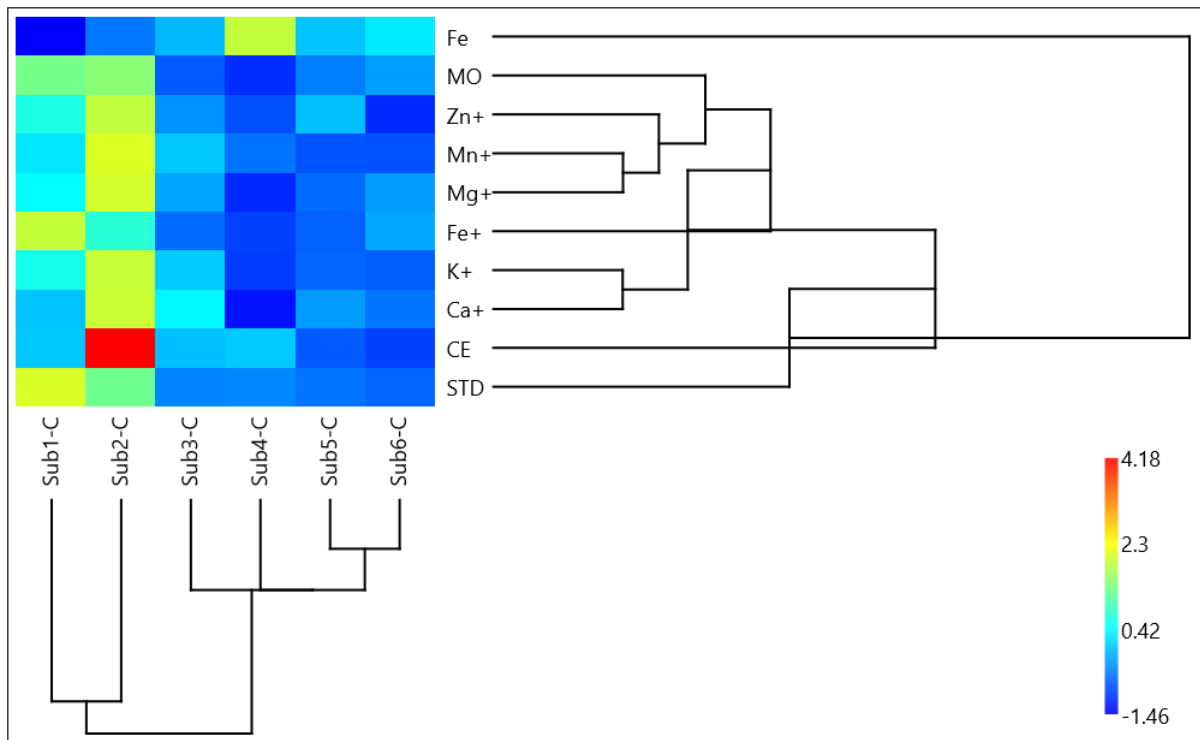
No período chuvoso foi possível identificar três variáveis da água que se correlacionaram com as variáveis do solo (Tabela 6.3). A variável Fe dissolvido na água apresentou uma forte correlação negativa com os íons de Fe do solo e com a matéria orgânica do solo.

O STD da água apresentou fortes correlações positivas com os íons de Ca, K, Mg, Mn e Zn do solo, sendo a maior correlação com o Mn ($r = 0,94$; $p = 0,00$), enquanto as menores correlações foram com os íons de Ca e Zn, ambos com r igual a 0,85 e p igual a 0,003.

A CE da água obteve um comportamento semelhante aos dos STD, obtendo a maior correlação do período com os íons de Mn ($r = 0,96$; $p = 0,00$), enquanto o Ca obteve a menor correlação ($r = 0,84$) e p igual a 0,04.

Com o intuito de demonstrar como as sub-bacias se comportam em termos de similaridade no tocante às variáveis analisadas, é apresentada a análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso (Figura 6.9).

Figura 6.10 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso



Fonte: Autoria própria.

Legenda: As colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de água e nutrientes do solo que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z escore. Os sinais de (+) indicam os cátions do solo.

De acordo com a análise hierárquica de conglomerados do período chuvoso (Figura 6.9), é possível visualizar que a Sub1 e a Sub2 se diferem das demais sub-bacias, assim como a Sub3 e Sub4 também possuem maior similaridade e, por conseguinte, um maior distanciamento das Sub-Bacias 5 e 6.

Na matriz bidirecional representada pelas cores é notória a distinção da Sub1 e Sub2 em razão das cores que representam os maiores valores encontrados nas campanhas do período chuvoso, com exceção do Fe dissolvido na água que se distanciou das demais variáveis e apresentou valores mais elevados na Sub4, sendo de suma importância reiterar que a correlação entre o Fe dissolvido na água apresentou uma forte correlação negativa com o íon Fe do solo, sugerindo que o Fe dissolvido na coluna de água pode ter sido precipitado em razão de alguma alteração do meio. Os estudos realizados por Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo) encontraram uma perda de Fe por erosão hídrica estimada em 5210,9 kg/ano para a Sub1, sendo o maior valor dentre as sub-bacias analisadas pelos autores para o elemento e, contrapondo esses resultados, a Sub1 obteve o menor valor do elemento na água dentre as sub-bacias, conforme pode ser observado na matriz de cores (Figura 6.9).

Portanto, o Fe encontrado na sub-bacia pode ser oriundo de fontes geoquímicas e ter sido precipitado por alterações do meio aquático que não foram avaliadas neste estudo, ou advindo de atividades antrópicas. O Fe possui uma alta capacidade de se complexar à matéria orgânica. De acordo com Silva, Dick e Inda Junior (2008), os íons metálicos Ca^{+2} e Fe^{+3} podem contribuir para a estabilização química da matéria orgânica, além do Al^{+3} e outros metais pesados.

Observa-se na matriz (Figura 6.9) que a Sub2 possui os maiores valores de CE e STD e que essas variáveis estão associadas aos íons do solo, sugerindo que a perda de solos na bacia está acontecendo de forma mais intensa. Os resultados obtidos revelaram que a Sub2 é bastante influenciada pelos íons metálicos dissolvidos na água que são sugestivos do arraste de sedimentos provenientes da perda de solos na sub-bacia. Os estudos realizados por Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo) evidenciaram que a Sub2 apresentou a maior quantidade de íons metálicos do solo perdidos por erosão para o Ca, Mg, Mn e Zn (em toneladas/ano) (Tabela disponível no Apêndice A), resultados que são compatíveis com os íons dissolvidos na água encontrados na sub-bacia, conforme pode ser observada na matriz de cores da Figura 6.9.

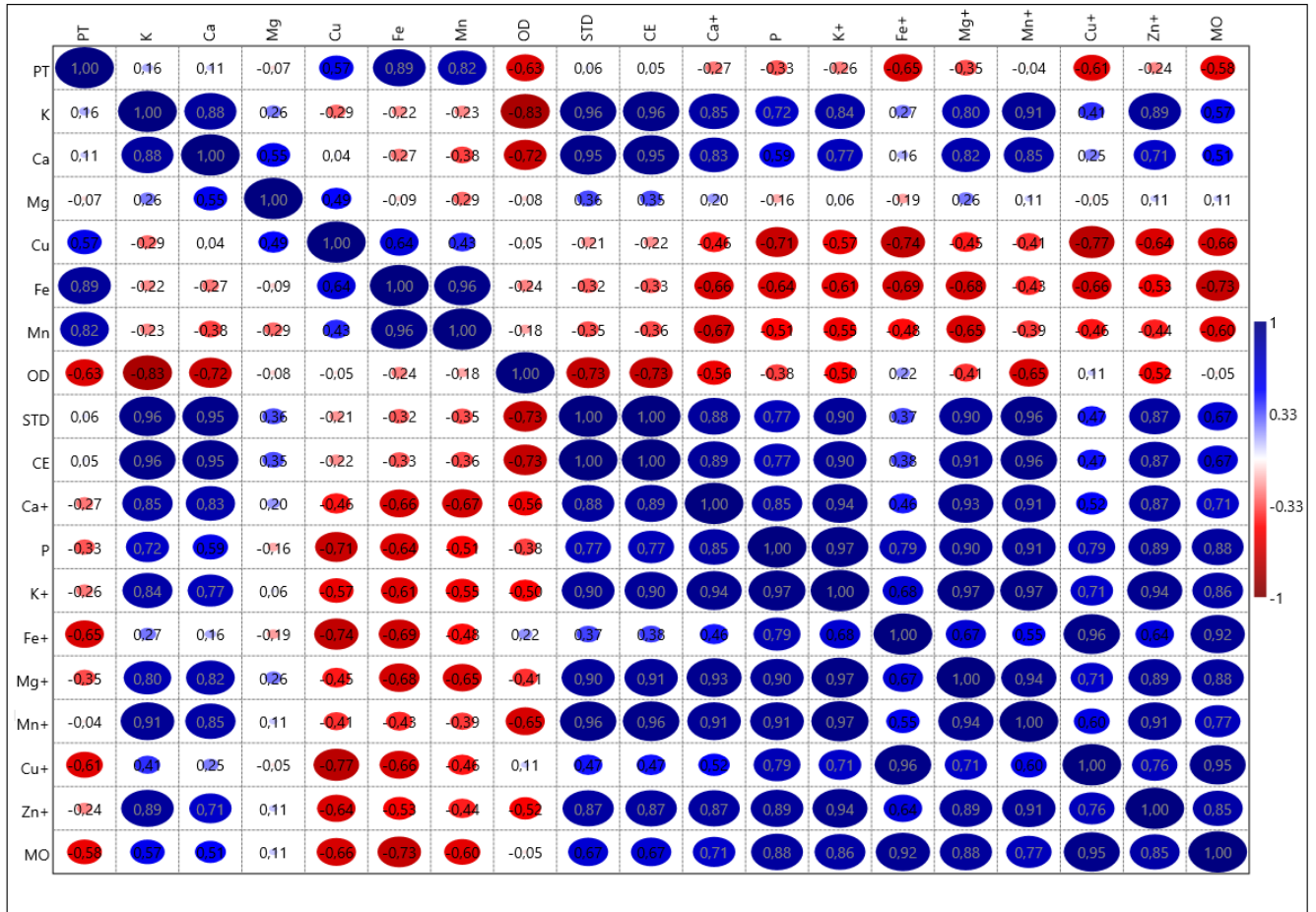
O fato da Sub-Bacia 1, que corresponde à foz do rio Pirajibu-Mirim, apresentar melhores valores de CE, alerta para o fato da represa do Ferraz, responsável pelo abastecimento de uma considerável parcela do município, receber aporte de material particulado advindo à montante, bem como o aporte de carga orgânica, que podem comprometer a qualidade da água para abastecimento público, além de reduzir a lâmina de água devido o assoreamento do reservatório.

Estudos realizados por Silva, T.A (2021) revelaram uma significativa concentração de sólidos nas represas Castelinho e Ferraz no período de estiagem. A autora observou que o reservatório Castelinho está retendo parte substancial dos sedimentos carregados pelo rio Pirajibu-Mirim, haja vista que nas análises de sólidos totais e sólidos totais em suspensão (realizadas em 2019 e 2020) os valores de sólidos foram superiores na represa Castelinho.

Outro fato que corrobora esse pressuposto advém dos elevados valores de perda dos íons de Fe do solo para a Sub-Bacia 1 não terem sido constatados no exutório da sub-bacia, uma vez que a Sub-Bacia 1 apresentou os menores valores de Fe dissolvido na água dentre todas as sub-bacias.

As variáveis que apresentaram correlação igual ou superior a 0,8 no período seco são apresentadas na Figura 6.10.

Figura 6.11 – Correlação de Pearson do período seco entre as variáveis do solo e da água do exutório das sub-bacias



Fonte: Autoria própria.

Legenda: As colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de água e nutrientes do solo que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z score. Os sinais de (+) indicam os cátions do solo.

As variáveis cuja correlação atenderam aos critérios estabelecidos foram transcritas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Correlação entre as variáveis de água e solo obtidas no período seco

Variável Água	Variável Solo	Correlação (r)	Significância ($p \leq 0,05$)
K	Ca+	0,85	0,03
	K+	0,84	0,03
	Mn+	0,91	0,01
	Zn+	0,89	0,02
Ca	Ca+	0,83	0,04
	Mg+	0,82	0,04
	Mn+	0,85	0,03
STD	Ca+	0,88	0,02
	K+	0,90	0,02
	Mg+	0,90	0,01
	Mn+	0,96	0,00
	Zn+	0,87	0,03
CE	Ca+	0,89	0,02
	K+	0,90	0,01
	Mg+	0,91	0,01
	Mn+	0,96	0,00
	Zn+	0,87	0,02

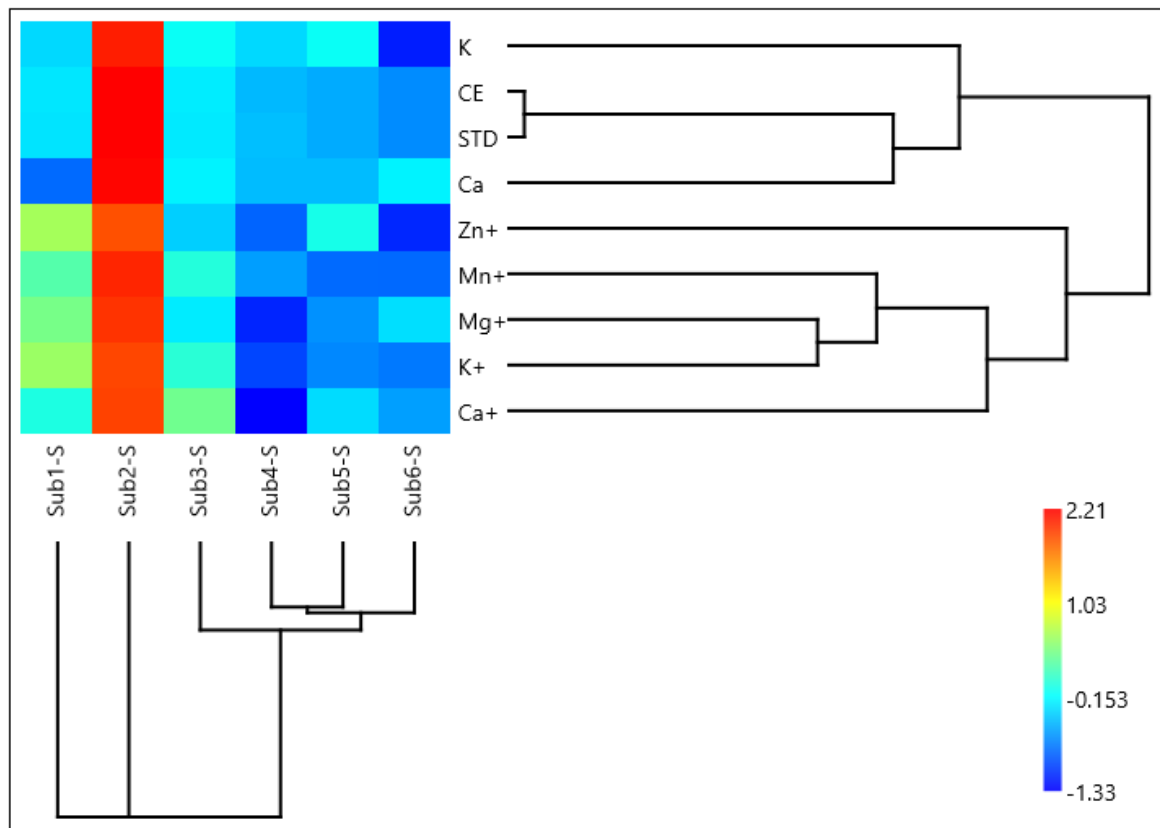
Fonte: Autoria própria.

No período seco houve somente correlação positiva entre as variáveis da água e solo (Tabela 6.4). O K da água se correlacionou fortemente com os cátions de Ca, Mn, Zn e o próprio K do solo, dentre as quais a correlação mais forte do K da água foi com o íon Mn, com r igual a 0,91, e p igual a 0,01.

Os parâmetros de qualidade da água STD e CE obtiveram fortes correlações com os íons de Ca, K, Mg, Mn e Zn, das quais o Mn do solo apresentou relação quase linear, com r igual a 0,96 para ambas as variáveis da água. Portanto, no período seco é possível verificar a prevalência de íons dissolvidos na água e que os parâmetros referentes à CE e STD foram altamente efetivos para inferir sobre a presença dos íons de Ca, K, Mg, Mn e Zn.

A AHC bivariada do período seco é apresentada na Figura 6.11.

Figura 6.12 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período seco



Fonte: Autoria própria.

Legenda: As colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de água e nutrientes do solo que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z score. Os sinais de (+) indicam os cátions do solo.

A AHC bivariada do período seco evidenciou que a Sub1 e a Sub2 são altamente semelhantes e que se distanciam significativamente do conjunto formado pelas demais sub-bacias. A semelhança entre as sub-bacias também foi evidenciada no período chuvoso, porém, são mais pronunciadas no período caracterizado pela estiagem.

De acordo com os estudos realizados por Simonetti, Silva e Rosa (2022a), a Sub2 é altamente urbanizada, além de conter elevadas áreas de pastagem e possuir poucas áreas florestais, situação propícia para a erosão do solo e lixiviação de nutrientes, fato que foi corroborado pelos resultados obtidos pela Sub2 no tocante às variáveis CE da água, sendo a sub-bacia que apresentou os valores mais elevados, sugestivos de elevada carga de sais e material particulado, que foi comprovado neste estudo, no qual a Sub-Bacia 2 ficou à frente dos maiores valores de CE em todas as campanhas realizadas.

Análogo aos resultados obtidos neste estudo, Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo) encontraram as maiores perdas de nutrientes do solo para os elementos Ca, P, MO, K, Mg, Mn e Zn, dos quais todos os elementos, excetuando o P e a MO, corresponderam aos maiores

valores encontrados na sub-bacia, corroborando o pressuposto de que a sub-bacia apresenta reflexos antrópicos advindos da perda de solos, além de elevados valores de N e PT que sugerem o aporte de esgoto doméstico no meio aquático.

A Sub-Bacia 3 apresentou valores intermediários, se diferenciando da Sub-Bacia 4 e Sub-Bacia 5, que por sua vez, são mais similares em comparação à Sub-Bacia 6. Tanto no período seco quanto no período chuvoso a Sub-Bacia 6 apresentou a maior dissimilaridade com as Sub-Bacia 1 e Sub-Bacia 2, sugestivos de que a vegetação presente na sub-bacia influencia muito positivamente na proteção quanto à perda de nutrientes do solo na bacia.

Estudos realizados por Simonetti, Silva e Rosa (2022a) revelaram que as Sub-Bacias 5 e 6 possuem os maiores percentuais de declividade, o que confere uma atenção especial quanto ao potencial erosivo que apresentam, fato que não foi corroborado neste estudo, pois, embora a Sub6 possua um grande potencial erosivo é a sub-bacia detentora da maior área florestal, fato que confere um elevado grau de proteção quanto à perda de solos, conforme constatado por Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo).

De acordo com Gallart e Llorens (2003), que avaliaram a disponibilidade hídrica de rios espanhóis a partir de um registro histórico de 50 anos, inferiram que ao menos um terço da redução da vazão e consequente diminuição da disponibilidade hídrica pode ser atribuída à redução da cobertura florestal em áreas de cabeceiras, aumentando a evaporação da água. Portanto, é de suma importância a cobertura vegetal na proteção dos solos contra a erosão.

Quanto às variáveis analisadas no período seco foi possível observar que as sub-bacias se distinguem em relação a dois grandes grupos, sendo composto pelo K dissolvido na água, que se aglutinou com o conjunto formado pela similaridade entre a CE e os STD, que juntos se assemelharam ao Ca da água, enquanto o outro grupo se aglutina em subconjuntos formados pelos cátions do solo, como Zn, Mn, Mg, K e Ca.

Portanto, verifica-se que a sazonalidade altera as concentrações dos íons presentes na água, e que o ferro e a matéria orgânica se correlacionam negativamente somente no período chuvoso, inferindo sobre a lixiviação desses elementos para os cursos de água cuja fonte é sugestiva de origem antrópica, enquanto no período seco as concentrações dos íons do solo, como Zn, Mn, Mg, K e Ca são mais expressivas.

De acordo com Koki et al. (2020), níveis baixos de água podem elevar as concentrações de metais na coluna d'água. Outro fator importante a ser considerado sobre os elementos-traço refere-se à sua biodisponibilidade, uma vez que esses elementos podem estar na forma iônica, complexada e particulada (GONZÁLEZ-GUADARRAMA; ARMIENTA-HERNÁNDE; ROSA, 2018).

A partir do limiar estabelecido para as correlações entre os nutrientes do solo e as variáveis analisadas na água foi possível constatar que os íons dissolvidos podem estar aportando os cursos de água devido ao carreamento de partículas orgânicas e inorgânicas oriundas da erosão do solo e contribuindo significativamente na produção de sedimentos na bacia hidrográfica. Nesse sentido, a qualidade da água pode ser afetada devido o aporte destes sedimentos e provocar uma série de implicações, tais como o aumento da alcalinidade e dureza da água, além de contribuir com o assoreamento e potencial de eutrofização desses ambientes.

A concentração de cátions na água pode aumentar a dureza da água, principalmente os cátions bivalentes, como Ca^{2+} e Mg^{+2} que, em condições de supersaturação, podem reagir com os ânions da água e formar precipitados (VON SPERLING, 2005).

Estudos realizados por Ahmadianfar et al. (2022) utilizaram um sistema de inferência neurofuzzy adaptativo aprimorado para previsão de condutividade elétrica, uma vez que ela desempenha um importante papel no alerta precoce da poluição da água e na tomada de melhores decisões para a gestão dos recursos hídricos. De acordo com os autores, a CE está associada aos sólidos totais dissolvidos (STD), que são compostos por solutos iônicos dissolvidos, tais como o Ca^{2+} e Mg^{2+} , além do sódio (Na^+), cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}). Tais suposições são corroboradas pelo presente estudo, uma vez que houve significativas correlações lineares entre a condutividade elétrica e todos os íons analisados, assim como correlações entre os STD e os íons perdidos por erosão dissolvidos na água.

Contudo, cabe investigar de forma mais aprofundada a relação entre os sedimentos do leito dos exutórios das sub-bacias e os elementos do solo perdidos por erosão, de modo a estabelecer respostas mais precisas, pois, de acordo com Melo et al. (2019), apenas uma ínfima porção dos metais está dissolvida na coluna de água, sendo a grande maioria adsorvida nos sedimentos.

Todavia, o presente estudo demonstrou quais são os principais impactos e as implicações na qualidade ambiental dos diferentes compartimentos ambientais, fornecendo informações pormenorizadas de forma quantitativa. Espera-se, com as informações apresentadas, que haja empenho do poder público em fiscalizar as áreas que apresentam despejos de esgoto clandestinos, assim como os despejos inadequados que podem ser advindos de indústrias do Éden (zona Leste do município de Sorocaba), principalmente nos finais de semana, onde é esperado que haja menor fiscalização.

Somado a isso, é necessário investimento adequado em infraestrutura e esgotamento sanitário, principalmente nas áreas rurais e de cabeceira da bacia hidrográfica, pois foi constatado durante as incursões de campo, nos relatos dos moradores das proximidades dos

tributários analisados, que o despejo de esgoto clandestino acontece por não haver condições financeiras de conexão das residências à rede de esgoto, tampouco condições de construir fossas sépticas, visto que para a população em situação de vulnerabilidade social é um investimento muito alto. Estudos realizados por Silva et al. (2021) comprovaram que o investimento em infraestrutura sanitária reflete positivamente na qualidade de vida da população, enquanto os estudos de Simonetti et al. (2021), no município de Salto de Pirapora, demonstraram que as áreas mais vulneráveis socioeconomicamente do município eram mais propícias ao descarte irregular de resíduos sólidos urbanos.

6.5 CONCLUSÕES

O estudo traz uma importante contribuição acerca da correlação entre a perda de nutrientes do solo e o carreamento dessas partículas nos cursos de água dessa importante bacia hidrográfica para a produção de água do município, sendo constatada a presença de íons dissolvidos na água, como Ca, K, Fe, Mn que são sugestivos do carreamento de partículas devido à perda de solos, bem como do aporte de sólidos dissolvidos advindos do despejo de esgoto clandestino, práticas agrícolas, lixiviação de áreas rurais e urbanas e possíveis descartes indevidos de substâncias sugestivos de fontes industriais.

Foi constatada a presença de elementos químicos na água altamente acima do permitido pela Resolução CONAMA 357/05 para o Fe, Cu e Mn, bem como para variáveis consideradas como indicadoras da qualidade da água, como STD e CE. O OD também apresentou valores abaixo do preconizado pela legislação, assim como o N e P apresentaram valores muito expressivos, sugestivos de poluição devido a entrada de nutrientes em compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, com destaque para a Sub-Bacia 2 e Sub-Bacia 4.

Tais análises corroboram com o entendimento de que os diferentes compartimentos de uma bacia hidrográfica podem sofrer diversas influências antrópicas, geoquímicas e naturais, e que esses fatores podem refletir na qualidade da água de forma compartimentada, bem como provocar impactos negativos, comprometendo a qualidade e a disponibilidade de água em bacias hidrográficas.

Sendo assim, a presente pesquisa contribui no âmbito do manejo de bacias hidrográficas, demonstrando que existem reflexos oriundos das ações antrópicas e de que o manejo adequado pautado em ações protecionistas é vital para a conservação dos recursos hídricos, cabendo ao poder público fiscalizar e investir em estrutura sanitária adequada.

7 AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA PERDA DE NUTRIENTES DO SOLO SOBRE O APORTE DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

RESUMO

A perda de solos por erosão hídrica pode causar uma série de implicações ambientais, resultando na deterioração da qualidade e quantidade de água disponível para uso humano e dos organismos vivos. Assim, este estudo objetivou analisar a correlação linear entre a perda de elementos químicos do solo por erosão hídrica com o eventual acúmulo deposicional de sedimentos dos leitos dos exutórios dos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba (SP). A amostragem dos sedimentos superficiais foi realizada no leito do exutório de cada sub-bacia de forma superficial, sendo coletados próximos à margem, e encaminhada para análises químicas ao laboratório da Faculdade de Ciências Agronômicas do Departamento de Solos e Recursos Ambientais de Botucatu (Unesp), sendo analisados o Cálcio (Ca), Fósforo (P), Potássio (K), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Matéria Orgânica (MO), de acordo com a fração trocável. Também foi analisada a textura dos sedimentos e do solo da bacia hidrográfica a partir de 30 pontos amostrais pré-definidos e representativos dos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica. A perda de nutrientes do solo foi estimada a partir da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) e os resultados dos elementos químicos e texturais foram submetidos à análise estatística descritiva e ao teste de correlação linear de Pearson, sendo consideradas as variáveis químicas dos sedimentos e solo que tivessem correlação $\geq 0,80$ com significância ($p \leq 0,05$). O estudo demonstrou que as diferentes frações texturais do solo das sub-bacias não possuem correlações estatísticas que evidenciem uma relação linear de deposição nos exutórios dos leitos analisados, no entanto, grande parte do solo da bacia hidrográfica pode ser pouco favorável à sorção de elementos químicos com potencial contaminante devido a predominância da fração de areia no solo e no sedimento. Embora os valores quantitativos dos elementos químicos analisados estejam em conformidade com as resoluções normativas pertinentes, ressalta-se às significativas correlações entre os elementos do solo e sedimentos obtidos neste estudo, sugerindo fortemente que os macros elementos, como o Ca, Mg, bem como os micronutrientes, como Zn e Mn, além da MO, estão sendo carregados para os tributários do rio Pirajibu-Mirim.

Palavras-Chave: Erosão Hídrica. Eutrofização. Multivariada. Monitoramento.

ABSTRACT

The soil loss by water erosion causes an environmental implications series, resulting in the deterioration of the quality and quantity of water available for human and living organisms use. Thus, this study aimed to analyze the linear correlation between the loss of chemical elements from the soil by water erosion with the eventual depositional accumulation of sediments in the riverbeds of the outlets of the different compartments of the Pirajibu-Mirim river basin, Sorocaba (SP). The sampling of surface sediments was carried out in the bed of the outlet of each sub-basin in a superficial way, being collected close to the margin, and sent for chemical analysis to the laboratory of the Faculty of Agronomic Sciences of the Department of Soils and Environmental Resources of Botucatu (Unesp), being analyzed Calcium (Ca), Phosphorus (P), Potassium (K), Copper (Cu), Iron (Fe), Magnesium (Mg), Manganese (Mn), Zinc (Zn) and Organic Matter (OM), according to the exchangeable fraction. The texture of sediments and soil in the watershed was also analyzed from 30 pre-defined and representative sampling points of the different compartments of the watershed. Soil nutrient loss was estimated from the

Universal Soil Loss Equation (USLE) and the results of chemical and textural elements were subjected to descriptive statistical analysis and Pearson's linear correlation test, considering the chemical variables of the sediments and soil that had a correlation ≥ 0.80 with significance ($p \leq 0.05$). The study demonstrated that the different textural fractions of the soil of the sub-basins do not have statistical correlations that show a linear relationship of deposition in the outlets of the analyzed beds, however, a large part of the soil of the hydrographic basin may be unfavorable to the sorption of chemical elements, with potential contaminating due to the predominance of the sand fraction in the soil and sediment. Although the quantitative values of the chemical elements analyzed are in accordance with the relevant normative resolutions, the significant correlations between the soil and sediment elements obtained in this study are highlighted, strongly suggesting that those considered macro elements, such as Ca, Mg, as well as micronutrients, such as Zn and Mn, in addition to OM, are being carried to the tributaries of the Pirajibu-Mirim river.

Keywords: Water Erosion. Eutrophication. Multivariate. Monitoring.

7.1 INTRODUÇÃO

A perda de solos por erosão hídrica e suas consequências relacionadas a diminuição da fertilidade do solo e da capacidade produtiva, aumento dos custos produtivos com fertilizantes, assoreamento de recursos hídricos e consequente eutrofização de reservatórios de abastecimento de água, assim como a redução da qualidade e quantidade de água disponível, tem sido objeto de estudo no âmbito global (BOWEN; JOHNSON, 2017; HOLZ; AUGUSTIN, 2021; MELO et al., 2019; SONNENBERG et al., 2020; WOLKA et al., 2021).

Segundo Wolka et al. (2021), estima-se que sejam perdidos anualmente, por erosão hídrica, entre 36 a 75 bilhões de toneladas de solo. Nesse sentido, a perda de solos constitui uma fonte importante de entrada de sedimentos nos corpos hídricos, sendo que o seu acúmulo em ambientes aquáticos pode reduzir as funções do ecossistema.

O aporte de substâncias potencialmente poluidoras aos recursos hídricos ocorre por meio de diferentes rotas, e possui origem antrópica ou natural (FRASCARELI et al., 2018). Dentre os elementos presentes nos ambientes aquáticos, destacam-se os elementos-traço, também encontrados na literatura como elementos essenciais, metais-traço, micronutrientes, sendo que alguns desempenham papéis importantes para os seres vivos, tais como o Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Cobre (Cu), dentre outros, sendo também conhecidos como macro e microelementos essenciais (ESTEVES; GUARIENTO, 2011). No entanto, ainda que essenciais, esses elementos podem ser potencialmente tóxicos em elevadas quantidades nos solos e sedimentos (CARDOSO-SILVA et al., 2021; FRASCARELI et al., 2022).

Os metais presentes no sedimento podem estar sob diferentes formas químicas, denominadas fases geoquímicas, devido às condições ambientais do próprio sedimento e da coluna d'água (LOUREIRO et al., 2012).

No ambiente aquático, o aporte de sedimentos, além de elementos-traço provenientes do intemperismo das rochas e de origem antrópica, também provém nutrientes, como nitrogênio e fósforo, que podem ocasionar a proliferação de organismos capazes de desencadear a eutrofização do meio (CARDOSO-SILVA et al., 2021; FASCARELI et al., 2018).

Entretanto, para compreender a complexidade e dinamismo envolvido no aporte de sedimentos e seu potencial acúmulo, é necessário estudar a interação entre processos naturais, físicos e antrópicos em múltiplas escalas espaciais e temporais. Em bacias hidrográficas, os rios apresentam-se como sistemas naturais dinâmicos e complexos que transferem água e sedimentos das fontes para os sumidouros (SCHUMM, 1977; TUSET; VERICAT; BATALLA, 2016). Todavia, estudos envolvendo a compartimentação de bacias hidrográficas são fundamentais (SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2022a), podendo fornecer informações capazes de auxiliar no entendimento das fontes de sedimentos e suas possíveis implicações de forma pormenorizada.

Dentre os impactos antrópicos que podem alterar o fluxo de sedimentos em uma bacia e causar efeitos deletérios no meio, destaca-se o uso e cobertura da terra e a redução da cobertura vegetal de áreas de preservação permanente (SIMONETTI; SILVA; ROSA, 2019a), a expansão de atividades agrícolas com o uso indiscriminado de agroquímicos (SILVA et al., 2020), o despejo clandestino de efluentes domésticos e industriais (SOUZA; GASTALDINI, 2014), entre outros.

A capacidade do sedimento em atuar como uma fonte ou dreno de potenciais contaminantes também depende de suas propriedades mineralógicas, grau de intemperismo, teor de matéria orgânica e condições físico-químicas do meio (FRASCARELI et al., 2018). De acordo com Novais e Smyth (1999), a fração argila possui um importante papel na caracterização de um solo como fonte ou dreno de acordo com seu teor e constituição mineralógica.

Diante do exposto, e haja vista que o acúmulo de sedimentos antropogenicamente acelerado é amplamente conhecido como o principal impacto na redução das funções do ecossistema, este estudo buscou analisar a correlação linear entre a perda de elementos químicos do solo por erosão hídrica com o eventual acúmulo deposicional nos sedimentos dos leitos dos exutórios dos diferentes compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

7.2 MATERIAL E MÉTODOS

7.2.1 Delimitação das sub-bacias hidrográficas e coleta de sedimentos nos respectivos exutórios

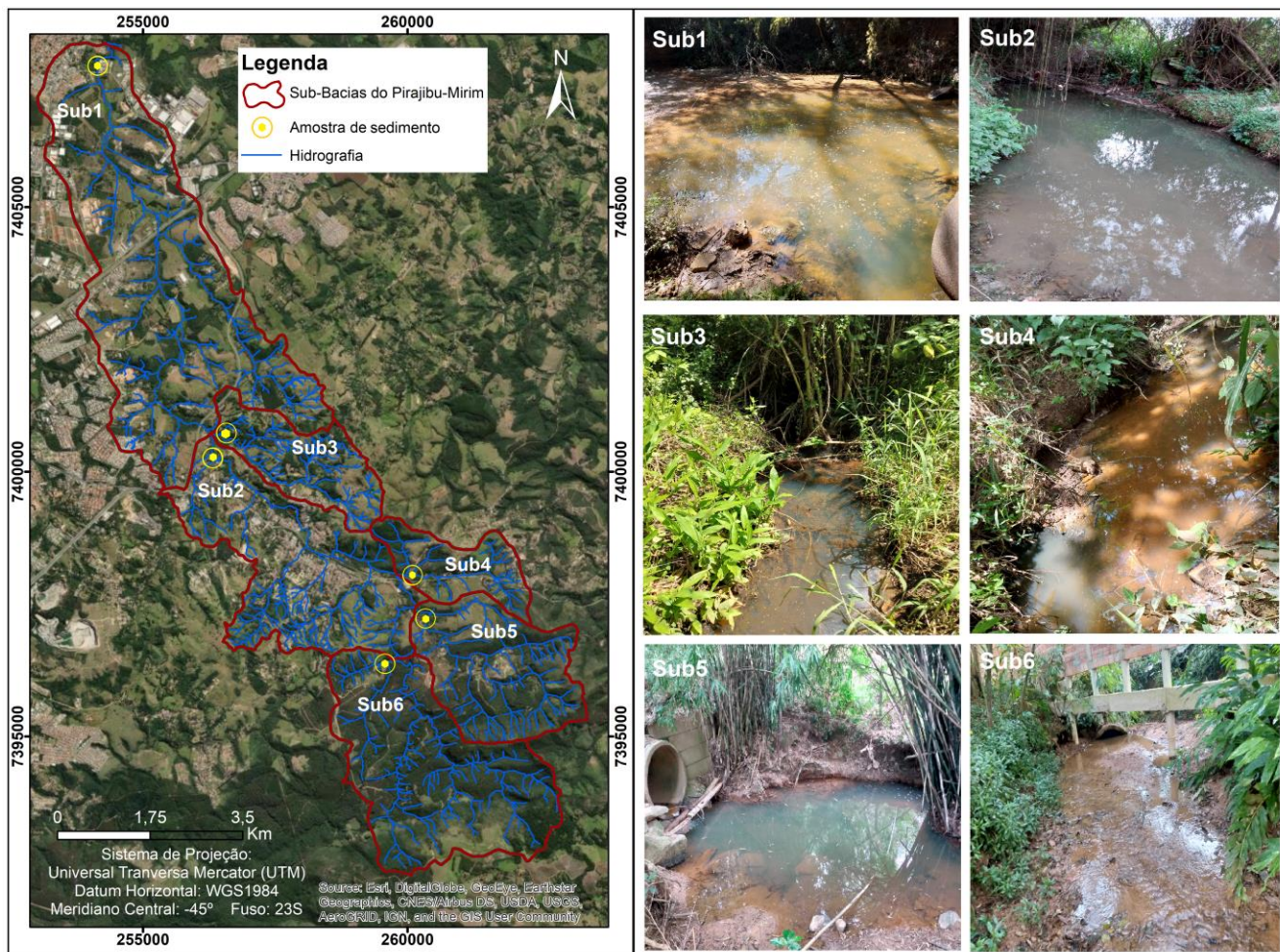
As bases de dados utilizadas na composição deste estudo foram apoiadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo utilizados os critérios estabelecidos nos estudos de Simonetti, Silva e Rosa (2022a) para compartimentação da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. Assim, o estudo contemplou seis pontos amostrais representados pelas Sub-Bacias 1 a 6 (Sub1 a Sub6) cujas coordenadas são apresentadas na Tabela 7.1, no respectivo exutório de cada sub-bacia (Figura 7.1).

Tabela 7.1 – Coordenadas dos pontos amostrados

Sub-Bacias	Coordenadas planas UTM Datum Horizontal: WGS1984	Área de drenagem (km ²)
Sub1	254292 E - 7408090 N	19,94
Sub2	256307 E - 7400405 N	10,39
Sub3	256472 E - 7400699 N	4,08
Sub4	260050 E - 7398044 N	2,97
Sub5	260165 E - 7397458 N	6,60
Sub6	259728 E - 7396438 N	11,38

Fonte: Autoria própria.

Figura 7.1 - Distribuição dos pontos amostrais de sedimento para fins de caracterização textural e química



Fonte: Autoria própria.

A amostragem dos sedimentos superficiais foi realizada no leito do exutório de cada sub-bacia de forma superficial, não ultrapassando a profundidade 0-10 cm. Os procedimentos de coleta seguiram as recomendações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (FILIZOLA et al., 2006), sendo utilizada uma pá de inox. Os pontos amostrados nos exutórios foram coletados próximos à margem, uma vez que a distribuição dos sedimentos pode ocorrer em bandas estreitas ao longo do canal e sob a forma de acumulações nos locais de baixa energia (FILIZOLA et al., 2006).

Os sedimentos foram devidamente acondicionados sob refrigeração e imediatamente encaminhados para análises químicas ao laboratório da Faculdade de Ciências Agrônomicas do Departamento de Solos e Recursos Ambientais de Botucatu (devidamente certificado), sendo analisados de acordo com Raij et al. (2001), contemplando os seguintes parâmetros: Cálcio (Ca), Fósforo (P), Potássio (K), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Magnésio (Mg), Manganês (Mn), Zinco

(Zn) e Matéria Orgânica (MO). Para tanto, os elementos foram analisados de acordo com a fração trocável, ou seja, os elementos metálicos adsorvidos fracamente que são retidos na superfície sólida por interações eletrostáticas consideradas relativamente fracas e, portanto, podem ser liberados por meio de troca iônica (ALVES-NETO et al., 2014), sendo a fração de maior interesse ambiental devido a caracterização das formas mais móveis dos metais no meio, e que apresentam um maior potencial de lixiviação (JALALI; HEMATI, 2013).

Embora no Brasil não exista legislação para avaliação da qualidade dos sedimentos, os resultados foram comparados à Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA, nº. 454/2012, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, sendo também utilizada em outros estudos como comparativo (ALVES-NETO et al., 2014; FRASCARELI et al., 2018; CARDOSO-SILVA et al., 2021).

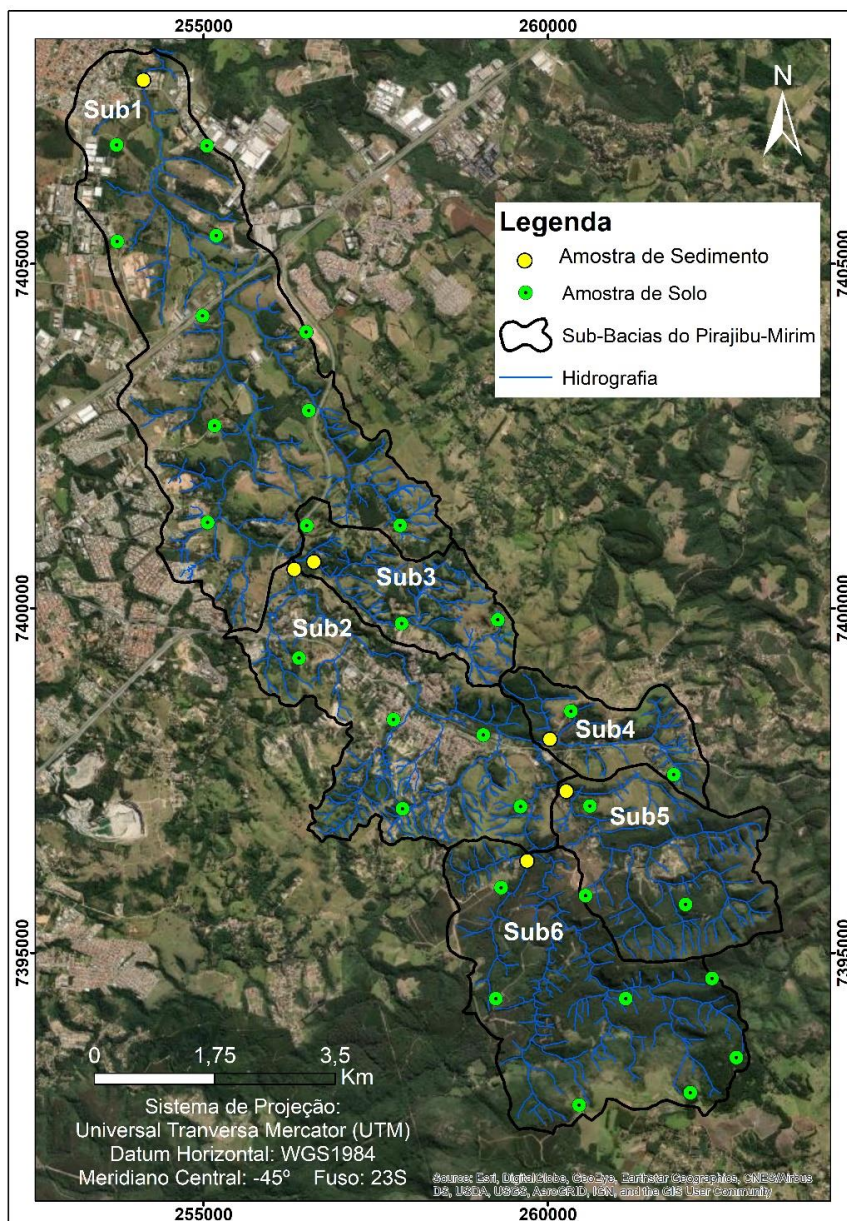
7.2.2 Análise textural das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim

As análises texturais dos sedimentos relacionadas à granulometria foram estimadas segundo a EMBRAPA (2011), em duas campanhas representativas de cada período (seco e chuvoso - coletadas em fevereiro e julho de 2021), de acordo com o método da pipeta com fracionamento das porções de areia grossa, com diâmetro de partícula compreendido entre 1,00 e 0,50 mm; areia fina, com diâmetro entre 0,21 e 0,10 mm; silte com 0,05 e 0,002 mm e argila com diâmetro inferior a 0,002 mm.

As análises texturais foram realizadas no Departamento de Água e Solos da Unesp de Botucatu. Já a amostragem na bacia hidrográfica foi conduzida por meio de 30 pontos amostrais pré-definidos que fossem representativos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim e que contemplassem todas as sub-bacias definidas de acordo com Simonetti, Silva e Rosa (2022a) em uma malha amostral, na profundidade de 0-20 cm (Figura 7.2), sendo retirados 500g de solo com um trado holandês confeccionado em aço inox e enviado ao laboratório de Física do Solo e de Fertilidade do Solo, do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp – Campus de Botucatu.

O grupamento textural foi realizado de acordo com a EMBRAPA (2006), que estabelece Textura Arenosa para classes que compreendem areia e areia franca; Textura Média para classes contendo menos de 35% de argila e mais de 15% de areia; Textura Argilosa para classes que contenham entre 35% e 60% de argila; Textura Muito Argilosa para classes com mais de 60% de argila e Textura Siltosa para classes inferiores a 35% de argila e 15% de areia.

Figura 7.2 - Distribuição dos pontos amostrais de solo e sedimento para fins de caracterização textural



Fonte: Autoria própria.

7.2.3 Perda de nutrientes na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim

A perda de nutrientes do solo foi estimada de acordo com Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo), e os dados obtidos compuseram a análise de correlação linear entre os elementos do solo perdidos por erosão e os elementos dos sedimentos dos leitos dos exutórios (ver Tabela A.1 com a perda de nutrientes no Apêndice A).

7.2.4 Análises estatísticas empregadas no estudo

Os resultados obtidos nos sedimentos, bem como a perda de nutrientes do solo foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo analisados os valores mínimos, máximos, médios ($\bar{x}$), desvio padrão (DP), amplitude e coeficiente de variação (CV%).

Após submeter os dados à estatística básica, as unidades das variáveis utilizadas na composição da análise bivariada e multivariada foram padronizadas de acordo com a média e o desvio padrão, eliminando o viés decorrente de diferentes escalas, uma vez que são atribuídos os mesmos pesos para cada variável (SIMONETTI et al., 2019) (Equação 1).

$$z = (xi - X)/\sigma \quad (1)$$

Sendo: z é a variável padronizada; xi é a variável a ser padronizada; X é o valor médio, e σ é o desvio padrão.

Após à normalização dos dados, estes foram submetidos ao teste de correlação linear de Pearson (r), que permite avaliar o grau de inter-relação e associação entre duas variáveis. O coeficiente de correlação Pearson (r) varia de -1 a 1 (indicando uma correlação perfeita – negativa ou positiva), enquanto o valor zero (0) indica que não há correlação entre as variáveis (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009).

Para tanto, o teste foi realizado no software PAST 4.09 (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001), onde somente foram consideradas as variáveis de água e nutrientes do solo que tivessem o intervalo de confiança maior ou igual a 95% ($p \leq 0,05$) para cada período avaliado, considerando para efeitos deste estudo o valor médio de cada período obtido pela réplica das campanhas do período chuvoso (fevereiro e março de 2021) e seco (junho e julho de 2021). A significância da correlação foi realizada pelo Teste T Bicaudal (Equação 2).

$$t = r \sqrt{((n - 2)/(1 - r^2))} \quad (2)$$

Sendo: $n - 2$ é o grau de liberdade; r é coeficiente de correlação Pearson; e r^2 é coeficiente de determinação.

Somente foram consideradas as correlações entre as variáveis dos sedimentos com os nutrientes do solo que obtiveram correlação ($r \geq 0,8$), por ser considerada uma forte correlação (BHUTIANI et al., 2020) e, para efeitos deste estudo, poderiam melhor representar os reflexos da perda de nutrientes do solo nos sedimentos dos exutórios das sub-bacias analisadas. De acordo com Bhutiani et al. (2020), a associação de elementos metálicos com forte correlação é sugestiva de fontes de poluição semelhantes. Do mesmo modo, os dados das diferentes frações

texturais obtidos tanto nos sedimentos dos exutórios quanto no solo das sub-bacias também foram submetidos ao mesmo processo metodológico.

A Tabela de correlação para cada um dos períodos (chuvoso e seco) foi elaborada a partir da função elipses, evidenciando os coeficientes de correlação como elipses variando de tamanho de acordo com o grau de correlação, segundo Schilling (1984), disponível no software Past 4.09 (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

A análise multivariada foi realizada por meio da análise hierárquica de conglomerados (AHC) utilizando medidas de distâncias que pudessem expressar as similaridades/dissimilaridades entre as sub-bacias quanto à perda de nutrientes do solo e as variáveis encontradas nos sedimentos dos exutórios. Para tanto, somente foram contempladas na análise as variáveis que seguiram os critérios estabelecidos na etapa anterior quanto à correlação ($r \geq 0,8$) e significância ($p \leq 0,05$). As medidas de distâncias utilizadas na AHC foram obtidas a partir da distância euclidiana, na qual a distância entre duas observações i e j refere-se à raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças entre os pares de observações i e j para todas as variáveis (p) (FÁVERO et al., 2009) (Equação 3 e 4).

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (3)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(X_{i1} - X_{j1})^2 + (X_{i2} - X_{j2})^2 + \dots + (X_{ip} - X_{jp})^2} \quad (4)$$

Sendo: X_{ik} é o valor da variável k em relação à observação i; e X_{jk} é a representação da variável k para a observação j.

Portanto, esta abordagem parte do pressuposto de que quanto menor a distância mais similares serão as sub-bacias, sendo que o agrupamento aglomerativo resultará em um dendrograma. O algoritmo utilizado foi a média não ponderada de pares de grupos – *Unweighted Pair-Group Methods with Arithmetic Average* (UPGMA do inglês), cujos dendrogramas (*cluster*) são unidos com base na distância média entre todos os membros dos dois grupos (i e j) e (k), na qual a distância entre eles é representado pela Equação 5.

$$d_{(ij)k} = \text{média}\{d_{ik}, d_{jk}\} \quad (5)$$

Para melhor elucidação dos resultados foi utilizado o agrupamento bidirecional, também utilizado por Idris et al. (2017) e Koki et al. (2020). Tal agrupamento foi selecionado para que houvesse melhor visualização das similaridades entre as sub-bacias hidrográficas analisadas e as variáveis do sedimento representadas por uma matriz de dados com cores que satisfazem os valores de cada variável padronizada pelo Z score. Assim, as cores vermelho, amarelo e laranja

indicam os valores mais elevados obtidos de acordo com a média de cada campanha (chuvoso e seco), enquanto os matizes de ciano e as respectivas transições para o azul indicam os menores valores obtidos nas campanhas.

7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os elementos químicos e a matéria orgânica analisados nos sedimentos dos exutórios das sub-bacias são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Dados quantitativos dos elementos dos sedimentos dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim. As unidades são apresentadas em mg/kg.

Variáveis	Amplitude Chuvoso	$\bar{x}$	DP	CV (%)	Amplitude Seco	$\bar{x}$	DP	CV (%)	CONAMA 454/2012
MO	25180 – 5110	16186	5077	31,36	58510 - 6690	2447	12197	49,89	-
P	86,24 – 6,70	34,70	26,56	76,53	181,65 - 6,46	51,08	51,84	101,50	2000
K	2,81 – 1,19	1,94	0,35	18,21	3,10 - 0,80	1,57	0,45	28,83	-
Ca	142,80 – 18,05	51,77	26,98	52,12	71,50 - 12,78	44,27	17,59	39,73	-
Mg	16,50 – 4,68	7,75	3,60	46,45	9,24 - 4,62	6,57	1,02	15,51	-
Cu	1,98 – 0,56	1,39	0,43	30,84	2,77 - 0,84	1,86	0,37	19,70	197
Fe	285,00 – 45,00	144,08	58,04	40,28	362,10 - 76,68	176,36	44,73	25,37	-
Mn	64,32 – 2,35	40,83	16,91	41,42	77,90 - 7,56	46,56	19,14	41,10	-
Zn	4,16 – 0,60	1,52	0,63	41,36	4,70 - 0,61	2,09	0,97	46,36	315

Fonte: Autoria própria.

Legenda: $\bar{x}$ = Média. DP = Desvio Padrão. CV = Coeficiente de Variação. MO = Matéria Orgânica. P = Fósforo. K = Potássio. Ca = Cálcio. Mg = Magnésio. Cu = Cobre. Fe = Ferro. Mn = Manganês. Zn = Zinco.

Os maiores valores de MO no período chuvoso foram encontrados na Sub-Bacia 4 na campanha realizada em março de 2021, correspondente ao período chuvoso, com valores de 25180,00 mg/kg, enquanto o menor valor foi encontrado na Sub-Bacia 6, com 5110,00 mg/kg. Os maiores valores médios obtidos pelas sub-bacias corresponderam a 21411,00 mg/kg para a Sub-Bacia 4 e 20842,00 mg/kg para a Sub-Bacia 3, já os valores médios intermediários foram obtidos pela Sub-Bacia 5, com 17811,00 mg/kg e Sub-Bacia 2, com 17303,00 mg/kg, e os

menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 6 (6551,00 mg/kg) e Sub-Bacia 1 (13198,00 mg/kg).

No período seco, os valores encontrados foram superiores ao período chuvoso, sendo os maiores valores encontrados na campanha de junho de 2021, na qual a Sub-Bacia 1 obteve 58510,00 mg/kg, seguida pela Sub-Bacia 2, com 25420,00 mg/kg, enquanto os menores valores foram obtidos na Sub-Bacia 6 e Sub-Bacia 3, com 18570,00 mg/kg e 20320,00 mg/kg, respectivamente. Os valores médios obtidos no período seco foram superiores na Sub-Bacia 1, com 50815,80 mg/kg, e Sub-Bacia 5, com 22352,70 mg/kg. Os resultados evidenciaram que a sazonalidade influencia na concentração de MO dos sedimentos, no entanto, o padrão de concentração de MO nos exutórios não foi semelhante em ambos os períodos, o que sugere que os diferentes usos da terra interferem na sedimentação, além do regime hídrico.

O P apresentou os valores mais expressivos na Sub-Bacia 3 na primeira campanha do período chuvoso, com 86,24 mg/kg, seguido da Sub-Bacia 2, com 82,18 mg/kg, enquanto os menores valores foram obtidos pela Sub-Bacia 6, com 6,70 mg/kg. No período seco, os maiores valores foram novamente obtidos pela Sub-Bacia 3, com 181,65 mg/kg e Sub-Bacia 2 (75,20 mg/kg), ambos obtidos no mês de junho de 2021, enquanto o menor valor do período foi para a Sub-Bacia 6, com 6,46 mg/kg. O P apresentou um aumento nas concentrações dos exutórios das sub-bacias analisadas no período seco, sendo sugestivo de que as entradas de P podem estar aportando os tributários a partir de fontes pontuais ou então a baixa vazão concentrou esses elementos. Outro aspecto que se deve ressaltar é que as sub-bacias mantiveram o padrão quanto aos valores obtidos em ambos os períodos e nenhuma sub-bacia esteve em desacordo com a Resolução CONAMA 454/2012.

O K apresentou os valores mais elevados na Sub-Bacia 6, com 2,81 mg/kg, seguidos pelas Sub-Bacia 2 e Sub-Bacia 3, ambas com 2,13 mg/kg no mês de março de 2021. Os menores valores foram obtidos pela Sub-Bacia 1 na campanha de fevereiro de 2021, com 1,19 mg/kg. No período seco, o valor mais expressivo foi obtido pela Sub-Bacia 1 na campanha de julho, com 3,10 mg/kg e pela Sub-Bacia 4 (2,10 mg/kg), enquanto os menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 5 (0,80 mg/kg). Foi possível verificar que a Sub-Bacia 1 obteve uma dinâmica diferente de acordo com a sazonalidade, partindo do menor valor entre as sub-bacias analisadas no período chuvoso para o valor mais expressivo no período seco, resultado que sugere a baixa vazão do exutório concentrou o elemento advindo à montante. A Sub-Bacia 6 também obteve um resultado similar, apresentando os valores mais elevados dentre as sub-bacias no período chuvoso e resultados inversos no período seco.

O Ca foi encontrado em maior quantidade na Sub-Bacia 1 no período chuvoso (fevereiro de 2021), com 142,80 mg/kg, seguido da Sub-Bacia 2, com 73,44 mg/kg, enquanto o menor valor foi obtido pela Sub-Bacia 5, com 18,05 mg/kg na campanha de março de 2021, enquanto o menor valor foi apresentado pela Sub-Bacia 5, com 19,73 mg/kg. No período seco o valor mais expressivo foi de 71,50 mg/kg, obtido pela Sub-Bacia 2 na campanha de julho, enquanto o menor valor foi encontrado na Sub-Bacia 6 (12,78 mg/kg), na campanha de junho.

Diante dos resultados de Ca obtidos foi possível verificar que as sub-bacias possuem comportamentos distintos em relação à sazonalidade. Diferente dos elementos, como MO, P e K, o cálcio apresentou maiores valores no período chuvoso, sugestivo de que o carreamento deste elemento seja mais expressivo, fato corroborado pelos estudos de Simonetti, Silva e Rosa (2022b, no prelo), que apontaram o Ca com as maiores perdas anuais na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim.

Os valores obtidos para o Mg foram mais elevados na Sub-Bacia 1 na campanha de março de 2021, na qual a sub-bacia apresentou 16,50 mg/kg, já o menor foi obtido pela Sub-Bacia 5 na campanha de fevereiro de 2021. No período seco, o maior valor foi para a Sub-Bacia 6, com 9,24 mg/kg na campanha de julho de 2021, e o menor valor foi encontrado na Sub-Bacia 4 (4,62 mg/kg). Os resultados acerca do Mg não apresentaram um padrão sazonal, variando significativamente entre os períodos e sub-bacias. No entanto, assim como o Ca, o elemento apresentou valores mais elevados no período chuvoso, sugestivo do carreamento por deflúvio superficial.

O Cu apresentou o maior valor na campanha de fevereiro de 2021 para a Sub-Bacia 3, com 1,98 mg/kg, enquanto o menor valor foi obtido na Sub-Bacia 1 na campanha de março, com 0,56 mg/kg. No período seco a Sub-Bacia 5 obteve o valor mais elevado na campanha de julho de 2021, com 2,77 mg/kg, enquanto o menor valor foi encontrado na Sub-Bacia 1 (0,84 mg/kg) na campanha de junho. Portanto, a maior concentração de Cu nos sedimentos dos exutórios aconteceram no período de estiagem.

O Fe foi encontrado em maior quantidade, no período chuvoso, na Sub-Bacia 4, com 285,00 mg/kg na campanha de março, e o menor valor foi na Sub-Bacia 6, com 45,00 mg/kg. No período seco, o Fe foi encontrado em maior quantidade na Sub-Bacia 5, na campanha de julho de 2021, com 362,10 mg/kg, e o menor foi obtido na Sub-Bacia 6 (76,68 mg/kg) na campanha de junho. Diante dos resultados obtidos sazonalmente, somente as Sub-Bacias 1 e 6 apresentaram o mesmo comportamento em ambos os períodos, ou seja, os menores valores em todas as campanhas.

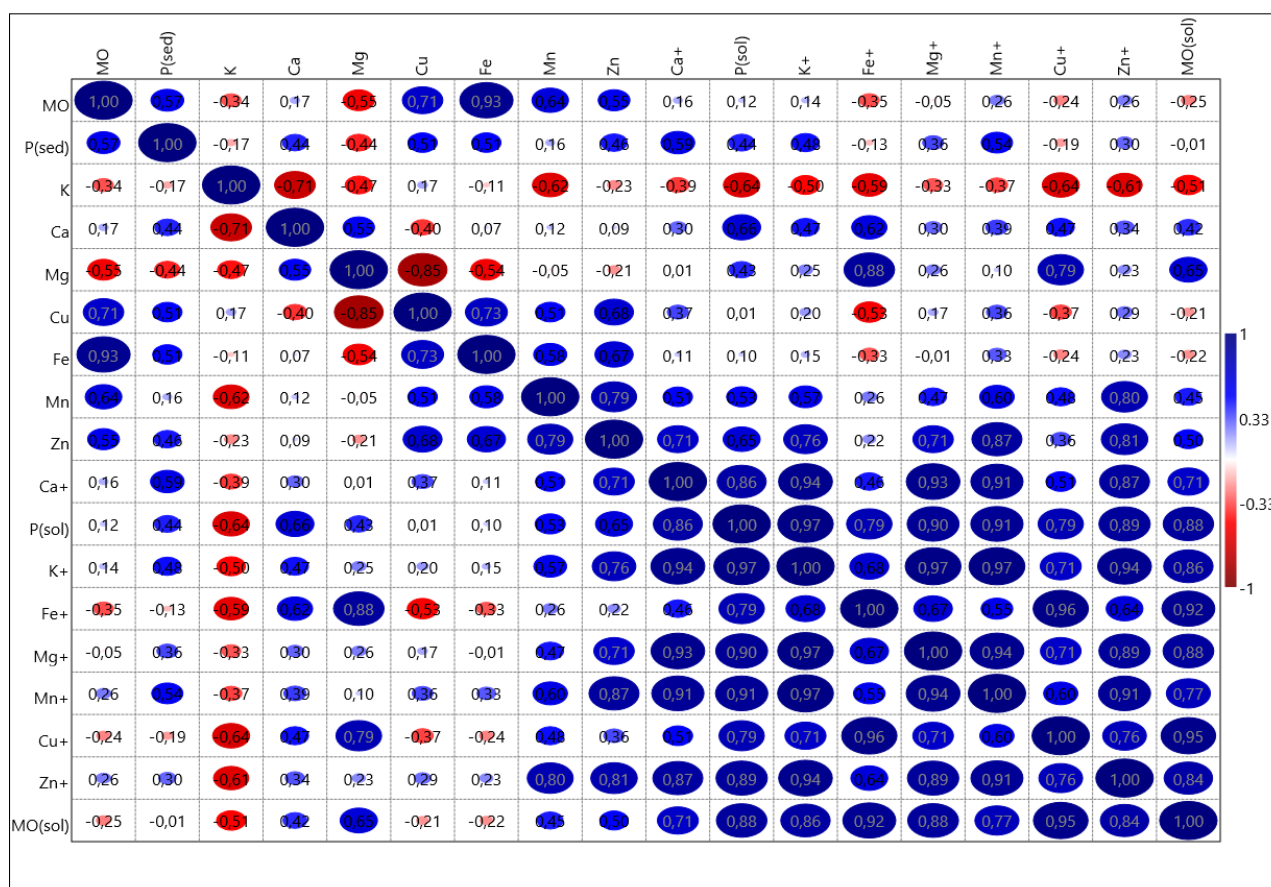
O Mn apresentou os valores mais elevados na Sub-Bacia 2 (64,32 mg/kg), na campanha de março de 2021, enquanto a Sub-Bacia 3 obteve os menores valores (2,35 mg/kg). No período seco, a Sub-Bacia 1 deteve o valor mais expressivo, com 77,90 mg/kg, e o menor valor foi obtido na Sub-Bacia 6, ambos na campanha de julho de 2021. Observa-se que apenas a Sub-Bacia 6 apresentou o mesmo comportamento frente à sazonalidade, em ambas as campanhas, com os menores valores obtidos.

Os valores de Zn, no período chuvoso, foram mais pronunciados na Sub-Bacia 3, com 4,16 mg/kg na campanha de fevereiro de 2021, e o menor foi encontrado na Sub-Bacia 6, na campanha de março, com 0,60 mg/kg. No período seco, os valores médios foram mais elevados na Sub-Bacia 2 (3,98 mg/kg) e Sub-Bacia 1 (2,68 mg/kg), e o menor valor foi encontrado na Sub-Bacia 6 (1,10 mg/kg). Portanto, novamente a Sub-Bacia 6 apresentou os menores valores em todos os períodos analisados.

7.3.1 Correlação entre os sedimentos dos exutórios com a perda de nutrientes do solo

De modo a estabelecer correlações entre o aporte de sedimentos advindos da perda de nutrientes do solo e sua possível deposição nos leitos dos exutórios das sub-bacias foi realizada a correlação de Pearson, de acordo com a Figura 7.3.

Figura 7.3 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as variáveis dos sedimentos do exutório das sub-bacias e as variáveis do solo



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7.3 são apresentadas as correlações significativas do período chuvoso ($p \leq 0,05$).

Tabela 7.3 - Correlação entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período chuvoso

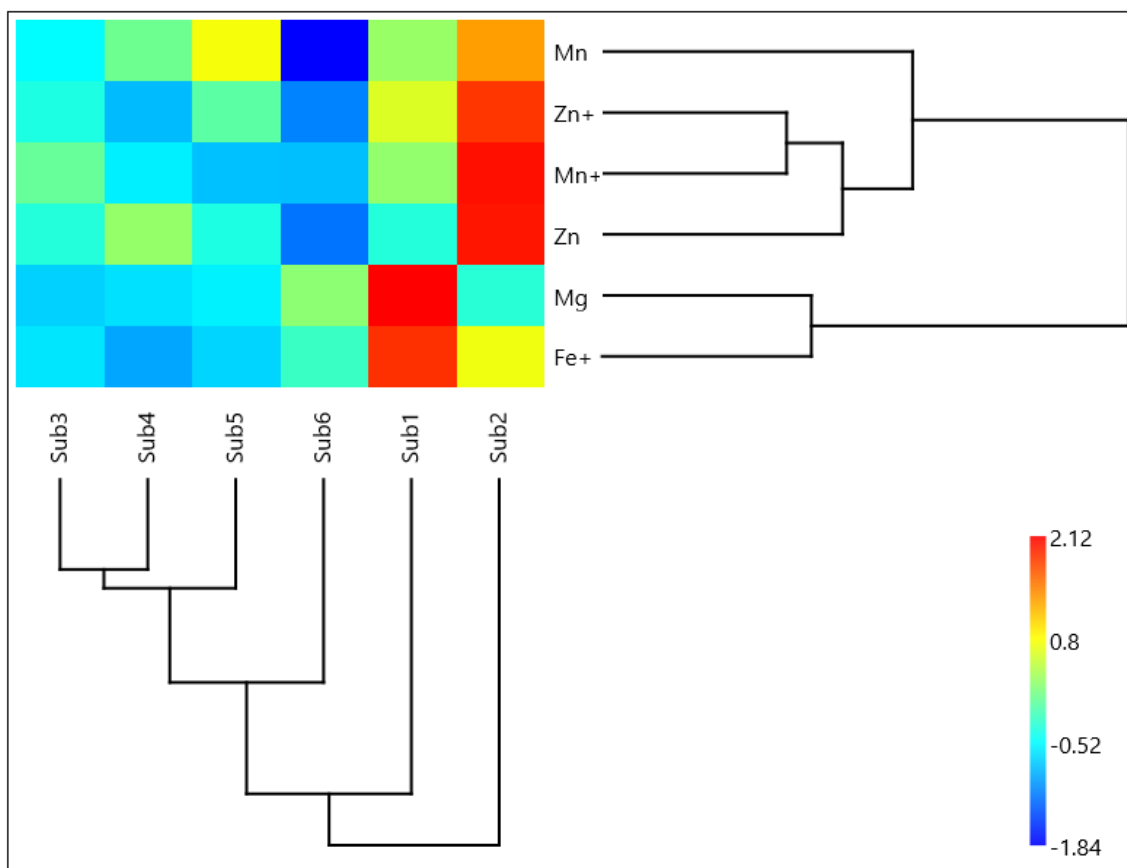
Variável Sedimento	Variável Solo	Correlação (r)	Significância ($p \leq 0,05$)
Mg	Fe	0,88	0,02
Mn	Zn	0,80	0,02
Zn	Zn	0,81	0,05
	Mn	0,87	0,05

Fonte: Autoria própria.

No período chuvoso, todas as correlações obtidas de acordo com os critérios estabelecidos foram positivas, sendo que o Zn do sedimento o elemento que se correlacionou positivamente com duas variáveis do solo, dentre elas, o próprio Zn ($r = 0,81$; $p = 0,05$), sugerindo que o elemento tem sido aportado diante da perda de solos no período chuvoso.

Para melhor representar o agrupamento das variáveis correlacionadas com as respectivas sub-bacias é apresentada a Figura 7.4, que trata da análise hierárquica de conglomerados (AHC) do período chuvoso.

Figura 7.4 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período chuvoso



Fonte: Autoria própria.

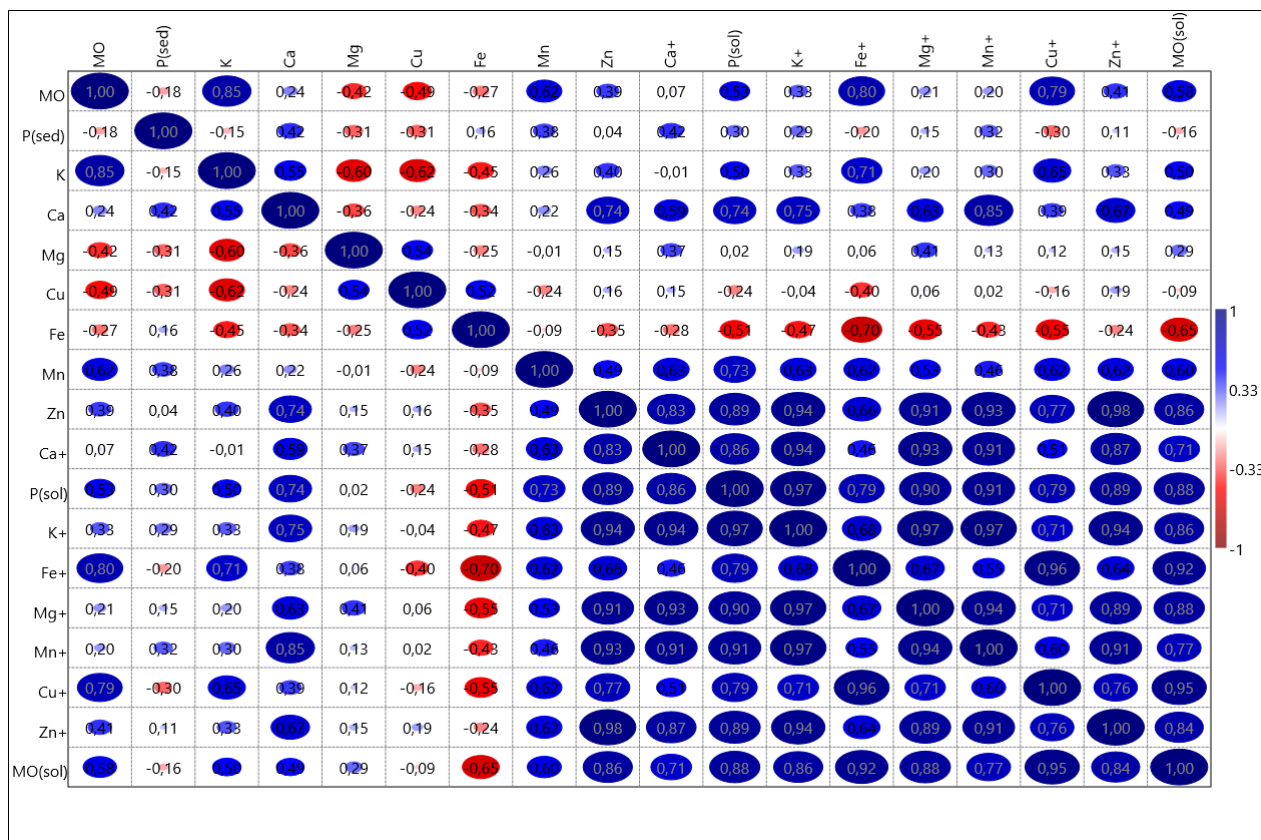
Legenda: As colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de nutrientes do solo e sedimentos que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z escore. Os sinais de (+) indicam os cátions do solo.

Na Figura 7.4 é possível verificar que a Sub-Bacia 2 se diferencia das demais sub-bacias por apresentar os maiores valores dos íons analisados, com exceção do Fe e Mg, que prevaleceram na Sub-Bacia 1 como fortemente correlacionados, formando um grupo isolado das demais variáveis (à direita da Figura 7.4). As dissimilaridades mais significativas foram encontradas nas Sub-Bacias 3 e 4, que por sua vez, se assemelharam à Sub5, formando um subgrupo que ficou mais próximo da sub-bacia de cabeceira (Sub6).

Os resultados encontrados no período chuvoso são sugestivos do carreamento de sedimentos à montante da Sub-Bacia 2, que pode ter ocorrido por meio de fontes difusas ou

mesmo pontuais, e então carregadas para o trecho inferior da bacia, se concentrando nas Sub-Bacias 1 e 2. A correlação de Pearson do período seco é apresentada na Figura 7.5.

Figura 7.5 - Correlação de Pearson do período seco entre as variáveis químicas dos sedimentos do exutório das sub-bacias e os elementos do solo



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7.4 são apresentadas as correlações significativas do período seco ($p \leq 0,05$).

Tabela 7.4 - Correlação entre as variáveis de sedimento e solo obtidas no período seco

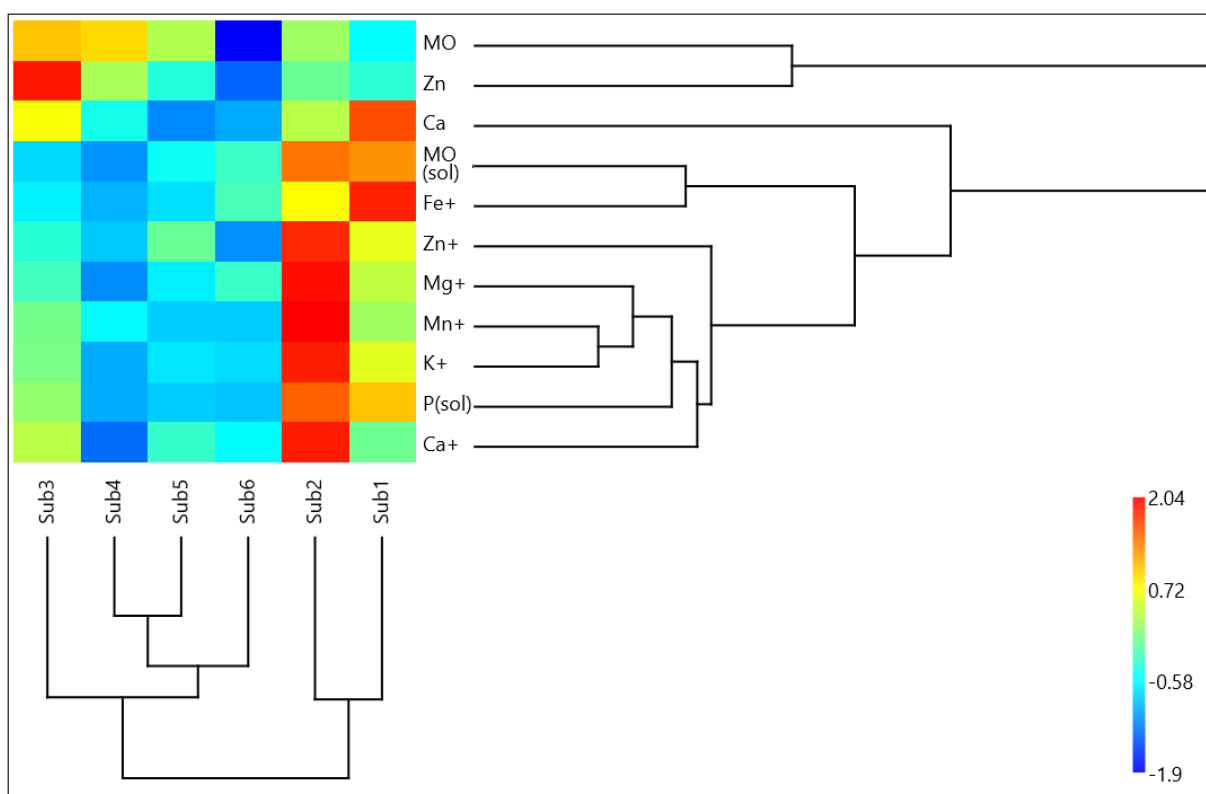
Variável Sedimento	Variável Solo	Correlação r	Significância ($p \leq 0,05$)
MO	Fe	0,80	0,05
Ca	Mn	0,85	0,03
Zn	Ca	0,83	0,04
	P	0,89	0,02
	K	0,94	0,01
	Mg	0,91	0,01
	Mn	0,93	0,01
	Zn	0,98	0,00
	MO	0,86	0,03

Fonte: Autoria própria.

No período seco as correlações foram superiores ao do período chuvoso, sugerindo um aumento nas concentrações de MO no sedimento, que se correlacionou com o Fe do solo, enquanto o Ca apresentou correlação com o Mn do solo, e o Zn do sedimento obteve o maior número de correlações, inclusive as mais significativas, conforme ilustrado na Tabela 7.4. Dentre as correlações do Zn, destaca-se a correlação entre o Zn do sedimento e Zn do solo ($r = 0,98$; $p = 0,00$), sendo um forte indicativo de deposição do sedimento no período seco que pode ser atribuído à menor vazão dos tributários no período de estiagem.

O agrupamento das variáveis correlacionadas com as respectivas sub-bacias no período seco é apresentado na Figura 7.6.

Figura 7.6 - Análise hierárquica de conglomerados (AHC) bivariada do período seco



Fonte: Autoria própria.

Legenda: As colunas são representadas pelas sub-bacias e as linhas pelas variáveis de nutrientes do solo e sedimentos que compõe a AHC. As cores representam os valores padronizados pelo Z escore. Os sinais de (+) indicam os cátions do solo.

No período seco, verifica-se (à direita da Figura 7.6) que a Sub-Bacia 1 possui baixos valores de MO e Zn nos sedimentos (representados na palheta de cores pelo matiz de ciano), e que essas variáveis separam os dois principais grupos de sub-bacias, uma vez que os maiores valores de MO e Zn foram obtidos pela Sub-Bacia 3. Para o grupo formado pelas Sub-Bacias 1 e 2 é possível verificar elevados valores de Ca (sedimento), MO e Fe do solo para a Sub-Bacia

1, e valores intermediários dos demais elementos representados à direita da Figura 7.6, enquanto a Sub-Bacia 2 apresenta elevados valores de MO e para todos os demais íons do solo (Zn, Mg, Mn, K, P e Ca), substanciando a aglutinação das Sub-Bacias 1 e 2 e distanciando-as das demais. Assim como no período chuvoso, a Sub-Bacia 3 apresentou maior dissimilaridade dentre as sub-bacias, enquanto a Sub-Bacia 4 e Sub-Bacia 5 se assemelharam e foram aglutinadas à Sub-Bacia 6.

De acordo com os resultados é possível constatar que as Sub-Bacias 1 e 2 apresentam as maiores correlações, corroborando com os resultados apresentados no Capítulo III da presente tese, na qual foram encontradas correlações altamente significativas para essas sub-bacias entre os mesmos íons do solo no período seco.

Diante da importância da textura do solo no tocante à capacidade de retenção dos íons, uma vez que essas estruturas influenciam nos processos sorção dos elementos, foram analisadas as diferentes frações texturais da fase mineral do solo dos compartimentos representados pelas sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim, como areia grossa, areia fina, areia total, silte e argila, apresentadas na Figura 7.7 (A), (B), (C), (D) e (E).

De acordo com os resultados (Figura 7.7A), é possível verificar que a Areia Grossa está predominantemente concentrada na porção central da bacia, assim como nas porções ao Sul das Sub-Bacias 5 e 6, sendo obtido um valor médio de 250,14 g/kg e DP igual a 90,22.

A Areia Fina (Figura 7.7B) apresentou predominância dos maiores valores na Sub-Bacia 1, e em um ponto localizado ao Sul da Sub-Bacia 2, e valores mínimos distribuídos nas Sub-Bacias 2, 3, 4 e 5, predominando os menores valores na Sub-Bacia 6. O valor médio obtido foi de 266,96 g/kg e DP igual a 97,37.

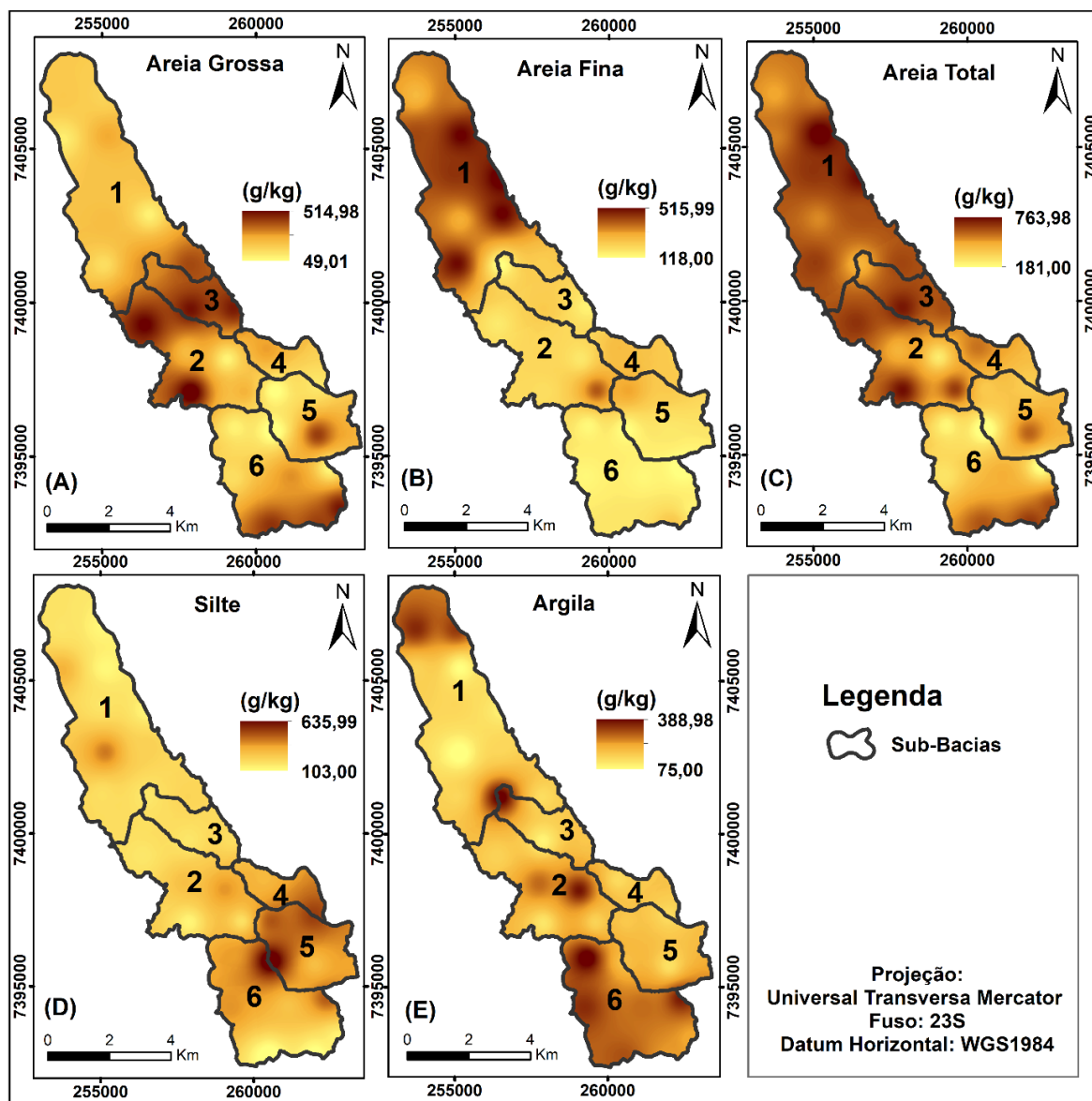
A Areia Total (Figura 7.7C) foi a mais expressiva dentre as frações, com os valores mais elevados predominantes nas Sub-Bacias 1 e 2 (com exceção da região central), Sub-Bacia 3 e 4, e com valores decrescentes no sentido das Sub-Bacias 5 e 6, voltando a aumentar na porção ao Sul da Sub-Bacia 6 e em um ponto também no sentido Sul da Sub-Bacia 5. O valor médio obtido foi de 517,29 g/kg, enquanto o DP foi igual a 107,56.

Os teores de Silte (Figura 7.7D) foram mais expressivos nas Sub-Bacias 4, 5 e 6, com valor máximo de 635,99 g/kg obtido entre as Sub-Bacias 5 e 6, enquanto os menores valores foram encontrados na porção Sul da Sub-Bacia 6, Sub-Bacia 2 e distribuídos nas Sub-Bacias 1 e 3. O valor médio encontrado foi de 276,45 g/kg e DP igual a 85,29.

A Argila (Figura 7.7E) correspondeu à menor parcela dentre as frações texturais, com distribuídos na porção Norte da Sub1 e na divisa da bacia com a Sub-Bacia 3. Elevados valores também foram encontrados a Oeste da Sub-Bacia 2 e predominantemente na Sub-Bacia 6,

enquanto os menores valores foram encontrados na Sub-Bacia 1, nas suas faixas mais centrais. O valor médio foi de 206,26 g/kg e DP igual a 59,05.

Figura 7.7 - Distribuição espacial das frações texturais do solo das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim



Fonte: Autoria própria.

Os valores quantitativos obtidos nas diferentes frações texturais dos sedimentos coletados nos exutórios de cada sub-bacia (Figura 7.7) são apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Valores quantitativos (em g/kg) das classes texturais dos exutórios das sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim

Campanha - Fevereiro de 2021 (Período Chuvoso)						
Sub-Bacias	Areia			Argila	Silte	Textura do Solo
	Grossa	Fina	Total			
	(g/kg)					
Sub1	693,00	180,00	873,00	89,00	38,00	Arenosa
Sub2	706,00	127,00	833,00	90,00	77,00	Arenosa
Sub3	107,00	143,00	250,00	279,00	471,00	Média
Sub4	515,00	194,00	709,00	114,00	177,00	Arenosa
Sub5	349,00	382,00	731,00	83,00	186,00	Arenosa
Sub6	588,00	196,00	785,00	47,00	168,00	Arenosa
Mín	107,00	127,00	250,00	47,00	38,00	--
Máx	706 ,00	382 ,00	873 ,00	279 ,00	471,00	--
Média	493,00	204,00	697,00	117,00	186,00	--
DP	230,05	91,73	227,30	82,24	151,93	--
Campanha - Julho de 2021 (Período Seco)						
Sub-Bacias	Areia			Argila	Silte	Textura do Solo
	Grossa	Fina	Total			
	(g/kg)					
Sub1	313,00	329,00	642,00	93,00	265,00	Arenosa
Sub2	39,00	302,00	341,00	215,00	444,00	Média
Sub3	549,00	148,00	697,00	154,00	149,00	Média
Sub4	260,00	343,00	603,00	98,00	299,00	Arenosa
Sub5	154,00	250,00	404,00	177,00	419,00	Média
Sub6	325,00	105,00	430,00	109,00	461,00	Arenosa
Mín	39,00	105,00	341,00	93,00	149,00	--
Máx	549,00	343,00	697,00	215,00	461,00	--
Média	273,00	246,00	520,00	141,00	340,00	--
DP	172,95	98,93	146,08	49,23	122,87	--

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7.5 é possível verificar que os períodos amostrados possuem comportamentos distintos quanto à classe textural, evidenciando que a sazonalidade influencia no acúmulo de sedimentos dos exutórios. Em todas as campanhas houve um elevado coeficiente de variação. Portanto, no período chuvoso os maiores valores de coeficiente de variação foram para os teores de Argila e Silte, enquanto no período seco a maior variabilidade foi encontrada para a fração de Areia Grossa.

Na Sub-Bacia 1, período chuvoso, a fração de areia representou 87,30% das classes texturais, com predominância de Areia Grossa, com 69,30%, e Areia Fina com 18,00%, enquanto a Argila representou apenas 8,90%, e o Silte 3,80%. Já no período seco, os teores de Areia Grossa representaram 31,30%, a fração de Areia Fina obteve 32,90%, sendo que a classe

de Areia Total representou 64,20%, uma redução de 36,00% em relação ao período chuvoso. A classe respectiva à Argila obteve 9,30% no período seco, representando um pequeno acréscimo de 4,50% em relação ao período chuvoso. O Silte representou 26,50% das classes texturais do período seco, um aumento de 597,40%, sendo a classe textural com aumento mais expressivo na sub-bacia. Quanto à classificação textural, a Sub-Bacia 1 manteve-se Arenosa em ambos os períodos no leito do seu exutório.

A Sub-Bacia 2, no período chuvoso, apresentou 83,30% de teores de Areia Total, na qual a fração de Areia Grossa correspondeu a 70,60%, e a Areia Fina 12,70%. A Argila correspondeu a 9,00% dos teores, e o Silte a 7,70%. No período seco, os teores de Areia Total corresponderam a 34,10%, uma redução de 144,30% em relação ao período chuvoso, onde a Areia Grossa e a Areia Fina apresentaram 70,60% e 12,70%, respectivamente. A Argila apresentou 21,50%, um incremento de 138,90%, enquanto o Silte obteve 476,60%, correspondendo ao aumento mais significativo dentre as frações texturais. Diante da redução da Areia Total no período chuvoso e aumento das frações de Argila e Silte, a classificação textural do sedimento da Sub-Bacia 2 passou de Arenosa para Média.

Os resultados obtidos na Sub3, período chuvoso, corresponderam a 25,00% de Areia Total, com Areia Grossa totalizando 10,70% e Areia Fina 14,30%, enquanto a Argila e o Silte totalizaram 27,90% e 47,10%, respectivamente. No período seco, a Areia Total correspondeu a 69,70% das classes, apresentando um aumento de 178,80% entre os períodos amostrados, onde a Areia Grossa correspondeu a 54,90% e a Areia Fina a 14,80%. A Argila representou 15,40%, com uma redução de 81,20% em relação à classe no período seco, enquanto o Silte obteve 14,90%, com uma redução de 216,10% comparado ao período chuvoso. Embora tenha havido um aumento da fração de Areia Total na campanha do período chuvoso, a sub-bacia manteve sua classificação textural como Média.

A Sub-Bacia 4 apresentou 70,90% de Areia Total no período chuvoso, com predominância de Areia Grossa (515,00 g/kg), enquanto a Areia Fina obteve 19,40%, com 194,00 g/kg. A argila representou 11,40% da classe textural, enquanto o Silte obteve 17,70%. No período seco, a Areia Total representou 60,30% das classes texturais, uma redução de 17,85% em comparação ao período chuvoso, na qual a fração de Areia Grossa sofreu a maior redução, passando para 260,00 g/kg. A Argila também obteve uma redução, passando para 98,00 g/kg, representando 9,80% da classe textural, totalizando uma redução de 16,30% entre os períodos analisados. O Silte foi a classe que sofreu a maior alteração, obtendo 29,90% da fração textural no período seco, passando de 177,00 g/kg no período chuvoso para 299,00 g/kg no período seco, correspondendo a um acréscimo de 68,00% entre os períodos analisados. No

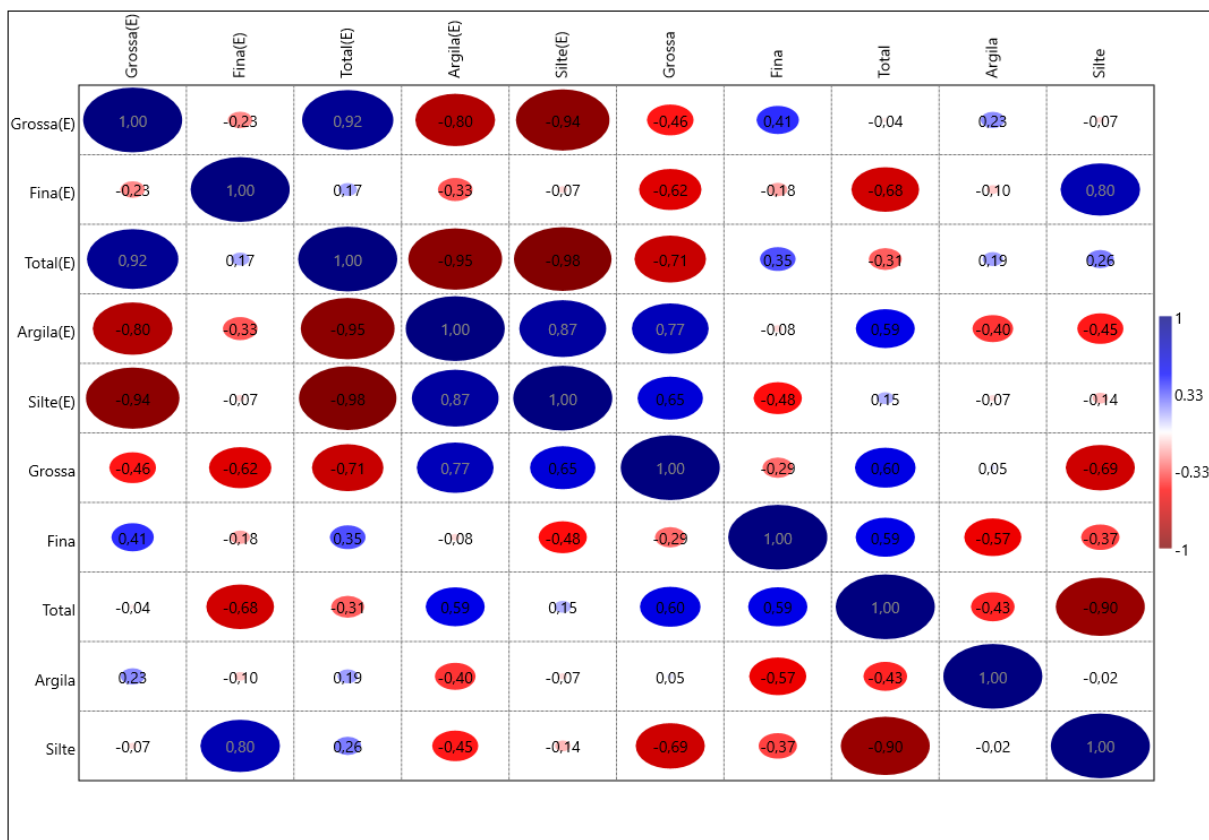
entanto, as alterações nas frações minerais não foram suficientes para alterar a classificação textural, mantendo a Sub-Bacia 4 classificada com textura Arenosa em ambos os períodos.

No período chuvoso, a Sub-Bacia 5 apresentou 731,00 g/kg de Areia Total, correspondendo a 73,10% das frações texturais, com predominância de Areia Fina compondo 38,20% da classe de Areia Total, enquanto a Areia Grossa obteve 34,90%. A Argila apresentou apenas 83,00 g/kg, compondo 8,30% da classe textural, e o Silte representou 18,60% das classes. No período seco, a Areia Total passou para 404,00 g/kg, um percentual de 40,40%, onde a Areia Grossa correspondeu a 15,40%, e a Areia Fina a 25,00%. Portanto, entre os períodos analisados houve uma redução de 80,90% na fração de Areia Total em relação ao período chuvoso. A fração Argila obteve 177,00 g/kg no período seco, um aumento de 113,30% em comparação ao período chuvoso, enquanto o Silte também obteve um aumento se comparado ao período chuvoso, apresentando 419,00 g/kg. Diante das alterações das frações texturais, a Sub-Bacia 5 passou de textura Arenosa no período chuvoso para textura Média no período seco.

As reduções mais expressivas da Sub-Bacia 6 foram na fração de Areia Total, passando de 785,00 g/kg no período chuvoso para 430,00 g/kg no período seco. Já o aumento mais expressivo foi para a fração de Argila, que passou de 168,00 g/kg no período chuvoso para 461,00 g/kg no período seco; no entanto, a classificação textural permaneceu a mesma em ambos os períodos (Arenosa).

De modo a verificar possíveis correlações significativas entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios nos diferentes períodos (chuvoso e seco) com as frações do solo analisadas nas sub-bacias é apresentada a Figura 7.8.

Figura 7.8 - Correlação de Pearson do período chuvoso entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios com as frações texturais do solo das sub-bacias

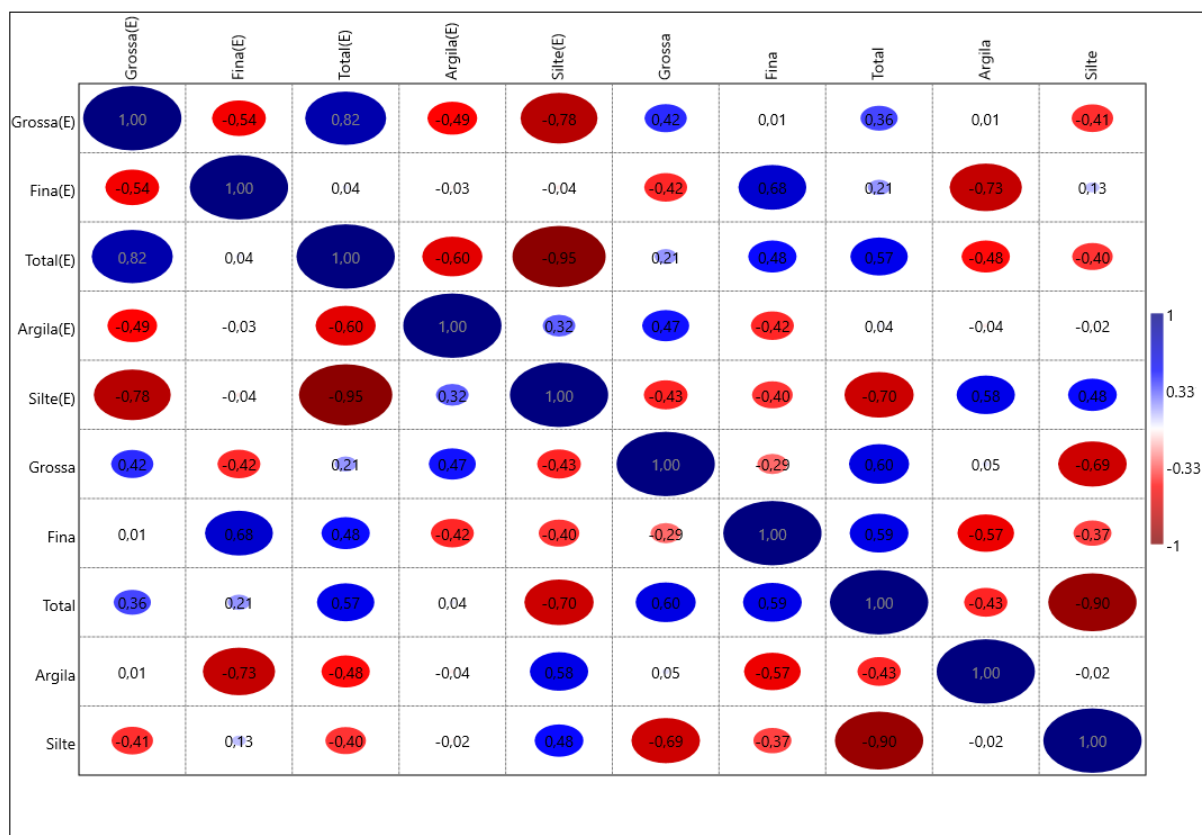


Fonte: Autoria própria.

Legenda: Grossa(E) = Areia Grossa do exutório. Fina(E) = Areia Fina do exutório. Total(E) = Areia Total do exutório. Argila(E) = Argila do exutório. Silte(E) = Silte do exutório. Grossa = Areia Grossa do solo. Fina = Areia Fina do solo. Total = Areia Total do solo. Argila = Argila do solo. Silte = Silte do solo.

As correlações apresentadas na Figura 7.8, embora apresentem um valor de r considerados como de forte correlação, como a Fina(E) e Silte, com r igual a 0,80, não apresentaram significância ($p \leq 0,05$). Na Figura 7.9 são apresentados os resultados obtidos no período seco.

Figura 7.9 - Correlação de Pearson do período seco entre as frações texturais dos sedimentos dos exutórios com as frações texturais do solo das sub-bacias



Fonte: Autoria própria.

Legenda: Grossa(E) = Areia Grossa do exutório. Fina(E) = Areia Fina do exutório. Total(E) = Areia Total do exutório. Argila(E) = Argila do exutório. Silte(E) = Silte do exutório. Grossa = Areia Grossa do solo. Fina = Areia Fina do solo. Total = Areia Total do solo. Argila = Argila do solo. Silte = Silte do solo.

Analogamente ao período chuvoso, também não foram encontradas correlações significativas no período seco, conforme pode ser visualizado na Figura 7.9.

Os resultados obtidos neste estudo revelaram que as partículas de solo podem estar aportando os cursos de água analisados, embora a estatística utilizada não tenha comprovado essa relação linear, uma vez que os dados representados pelas frações mineralógicas do solo possuem intrínsecas relações de dependência espacial, como abordado nos estudos de Cambardella et al. (1994) e Zhao, Jia e Zhang (2016). Portanto, o solo é considerado um sistema complexo resultante de diversos fatores e interações (CUNHA et al., 2016; FREITAS et al., 2014).

Sendo assim, são recomendados estudos pormenorizados que avaliem a dependência espacial das diferentes frações texturais do solo e sua possível deposição na represa que abastece parte da população do município, uma vez que esses ambientes lânticos favorecem o

acúmulo deposicional de partículas que podem comprometer a qualidade e a quantidade de água desse importante reservatório de água para abastecimento público.

São diversos os estudos que avaliaram os sedimentos em reservatórios de abastecimento público (CARDOSO-SILVA et al., 2021; FRASCARELI et al., 2018; MELO et al., 2019; SILVA et al., 2016).

De acordo com Frascareli et al. (2018, 2022), os sedimentos superficiais podem reter os elementos potencialmente contaminantes e fornecer um registro das atividades antrópicas que afetam o ambiente aquático, dependendo das condições ambientais. Cardoso-Silva et al. (2021) avaliaram sete reservatórios no estado de São Paulo, e constataram um enriquecimento moderado de Mn no reservatório de Rio Grande associado a águas residuais municipais e processos erosivos. Os autores também constataram um elevado enriquecimento por Cu nos sedimentos cujas fontes podem ser oriundas da composição de algicidas (sulfato de cobre), atividades industriais, ou migração vertical envolvendo o transporte coloidal com alumínio-filossilicatos.

O Cu possui forte complexação e quelação com as substâncias orgânicas, portanto, elevados valores de MO podem reduzir a quantidade de Cu disponível, fato que foi corroborado pelo presente estudo, haja vista que o Cu não foi detectado com correlações significativas em nenhuma campanha.

A MO do sedimento se correlacionou linearmente apenas no período chuvoso com o Fe do solo. Estudos realizados por Oliveira e Nascimento (2006) avaliaram 13 classes de solos do estado de Pernambuco sob diferentes coberturas (contempladas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos), incluindo os solos presentes na bacia hidrográfica objeto deste estudo, e constataram que os maiores teores de Fe, potencialmente disponíveis, estão ligados à MO devido às significativas correlações apresentadas com o carbono orgânico do solo, com coeficiente de correlação igual a 0,64 e subsuperficial igual a 0,99 (ao nível de significância testados a 5% e 1%). Do mesmo modo, o Mn também apresentou uma elevada afinidade com a MO, uma vez que os autores encontraram os maiores teores de Mn ligado à MO no horizonte superficial nas zonas de mata.

No período chuvoso, o Fe do solo apresentou forte correlação com o Mn do sedimento ($r = 0,88$; $p = 0,02$). Estudos realizados por Coringa et al. (2016), que também encontraram correlação de Pearson significativa para esses elementos, sugerem que a adsorção do Fe ocorra na forma de precipitado de óxidos/hidróxidos de Fe, assim, a precipitação de óxidos hidratados de Fe está associada com o transporte e a disponibilidade de metais traço, que por sua vez, influenciarão as trocas na interface água-sedimento.

Vale destacar que a MO foi o elemento do solo encontrado em maior abundância quanto à perda por erosão (em kg/ano) na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, cujas perdas foram superiores a todos os outros elementos analisados, sendo mais expressivas nas Sub-Bacias 1 e 2 (ver Tabela no Apêndice A). No entanto, provavelmente a redução da vazão dos afluentes analisados no período seco aumentou a concentração de MO nos sedimentos, principalmente relacionados às frações coloidais destes. Fontes, Camargo e Sposito (2001) desenvolveram uma revisão acerca da eletroquímica das partículas coloidais com a mineralogia de solos intemperizados e verificaram, nos estudos de Stumm (1992), que a hidroxilação da superfície dos coloides possibilita a formação e o desenvolvimento de cargas variáveis nos coloides.

Entretanto, as frações texturais do solo mapeadas nos diferentes compartimentos trazem à luz os possíveis reflexos decorrentes de ações antrópicas, uma vez que as frações predominantes encontradas, principalmente nas Sub-Bacias 1 e 2, são compostas por areia, podendo assim, haver uma intensa lixiviação de íons na solução do solo e maior potencial de percolação de contaminantes.

Estudos realizados por Nery et al. (2020) analisaram as áreas de riscos de contaminação de poços de água no município de Sorocaba a partir do inventário de áreas contaminadas disponibilizado pela Agência Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) do ano de 2018, assim como os poços de água outorgados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Os autores mapearam 433 poços distribuídos no município e 52 áreas contaminadas. De acordo com a localização da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, existem mais de 50 poços outorgados ao longo da bacia, assim como 7 áreas contaminadas por solventes aromáticos, tais como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e combustíveis automotivos, além de contaminação por metais.

Estudos realizados por Silva et al. (2006) em um Argissolo, evidenciaram que a interação entre o HPAs com o solo ocorre devido a matéria orgânica aderida às suas partículas, assim, essa interação aumenta de acordo com a superfície de contato da partícula, ou seja, as interações são maiores nos argilominerais. Portanto, as frações predominantes de areia mapeadas na bacia hidrográfica, bem como as frações texturais encontradas nos sedimentos dos exutórios das sub-bacias que apresentaram predominantemente classificação textural Arenosa em ambos os períodos amostrados, podem reduzir a capacidade de adsorção de alguns contaminantes, e consequentemente, disponibilizá-los na coluna de água de acordo alterações do meio, como pH e potencial redox, além de favorecer a percolação para camadas mais profundas, podendo atingir o lençol freático e contaminar os poços de abastecimentos

outorgados, além daqueles que não são devidamente regularizados, denominados poços caipiras (comuns em bacias hidrográficas com predominância rural).

De acordo com Santos, Gatiboni e Kaminski (2008), as características e as propriedades do solo também exercem grande influência nas formas e no grau de labilidade do fósforo. Silva et al. (2010) relataram valores de correlação negativos de P com a argila, evidenciando maior disponibilidade do elemento em locais onde os valores de argila são menores, e correlação positiva com a areia onde os valores de areia são maiores. Todavia, esses resultados também são corroborados neste estudo ao analisar a distribuição espacial da fração de Areia Total apresentada na Figura 7.7(C) e a fração Argila (Figura 7.E), nas quais as Sub-Bacias 2 e 3 apresentam uma predominância de Areia Total, bem como os valores mais elevados de P no sedimento dos respectivos exutórios. Do mesmo modo, as sub-bacias com predominância da fração Argila, como as Sub-Bacias 5 e 6, obtiveram os menores valores de P tanto no período seco quanto no chuvoso.

Nesse sentido, devido a função reducionista da disponibilidade de P mediante processos de adsorção e fixação (MELO et al., 2019), elevada atenção deve ser dada às sub-bacias de contribuição direta do sistema Castelinho/Ferraz, bem como na bacia do rio Pirajibu-Mirim como um todo, visto o potencial do P em eutrofizar ambientes lênticos.

De acordo com Silva et al. (2020), o Zn, na maioria das vezes, está na sua forma indisponível, razão pela qual diversos estudos apontaram a carência desse elemento em termos de disponibilidade para as plantas. Contudo, o presente estudo identificou uma relação linear entre a perda desse nutriente no solo e os sedimentos dos leitos dos exutórios, principalmente para o exutório da Sub-Bacia 2, que concentrou a maioria das espécies iônicas analisadas, fato que evidencia um potencial reflexo antrópico proveniente da perda de solos na sub-bacia. Entretanto, cabe ressaltar que tanto a toxicidade quanto a mobilidade dos metais e metaloides em sedimentos não dependem apenas da sua concentração total, mas também deve ser levado em consideração a sua forma química específica (CORINGA et al., 2016).

Haja vista a complexidade dos sistemas que regem os processos geoquímicos nos diferentes compartimentos de uma bacia hidrográfica, além da interação com fatores morfofisiográficos, biológicos e antrópicos, são recomendados estudos que envolvam um maior nível de detalhamento acerca da constituição mineralógica e química do solo da bacia para melhor elucidar sobre as fontes e rotas de aporte dos sedimentos nos corpos de água, por meio da elaboração de uma malha amostral de coleta de sedimentos mais detalhada ao longo da bacia hidrográfica, envolvendo todo o seu perfil longitudinal, incluindo os mananciais de abastecimento.

Todavia, o presente estudo forneceu um ponto de partida no tocante a distribuição espacial das frações mineralógicas do solo da bacia hidrográfica, bem como a inferência da perda de nutrientes do solo e sua relação linear com os sedimentos dos leitos dos exutórios analisados.

O estudo sugere que os elementos-traço analisados (macro e micronutrientes) são residuais, e podem conter os elementos de origem natural (com silicatos), ligados às estruturas cristalinas dos minerais. Os Argissolos, predominantes na área de estudo, associado aos Latossolos, possuem um elevado grau de intemperismo, cuja mineralogia da fração argila, como analisada nos estudos de Fontes et al. (2001), é composta por minerais silicatados do tipo 1:1, assim como óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe, Al e Mn.

Tal fato, somado às concentrações consonantes às faixas preconizadas pela Resolução CONAMA 454/2012, assim como as significativas correlações encontradas entre o Zn do solo e o Zn do sedimento em ambos os períodos amostrados (seco e chuvoso), com suas respectivas correlações homólogas aos demais íons, é sugestivo do carreamento de partículas de solo de fontes difusas que, ao longo prazo, pode se tornar um problema de magnitude elevada, pois no tocante às concentrações encontradas para os elementos, destaca-se que o método utilizado avaliou os elementos na fração prontamente trocável (a mais lábil), e, segundo Alves-Neto et al. (2014), é a que se torna mais biodisponível a animais que assimilam esses elementos diretamente da água, assim como das partículas de sedimento.

Cabe ressaltar que os ambientes amostrados foram representativos da dinâmica fluvial (ambientes lóticos) e não refletem à dinâmica de ambientes deposicionais, representados por ambientes lênticos, como lagos e reservatórios. Ainda, a baixa atividade de sorção da fração areia, predominante nos solos e sedimentos, alerta para possíveis problemas relacionados à lixiviação de íons do solo, biodisponibilidade e potencial de contaminação.

7.4 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que as diferentes frações texturais do solo das sub-bacias hidrográficas não possuem correlações estatísticas que evidenciem uma relação linear de deposição nos exutórios dos leitos analisados nos diferentes compartimentos, fato que pode ser explicado pela complexidade e particularidade dos compartimentos ambientais quanto aos diferentes tipos de solos e estruturas geológicas e morfofisiográficas.

No entanto, ficou evidente que as sub-bacias à montante da represa do Ferraz, assim como a própria sub-bacia que contempla o reservatório (Sub-Bacia 1 - Sub1), possuem quantidades significativas de frações texturais representadas pela Areia Total que podem ser transportadas e carregadas até a represa, cabendo assim, uma atenção especial quanto às práticas conservacionistas nessas áreas, bem como atenção quanto ao uso e ocupação do solo previstos para a bacia.

Portanto, uma propensão natural (intrínseca às frações mineralógicas do solo), somadas a modelos preditivos que apontam uma elevada perda de solos e nutrientes nos compartimentos da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, podem fornecer informações valiosas no âmbito da gestão municipal. Nesse sentido, o estudo demonstrou que grande parte do solo da bacia hidrográfica pode ser pouco favorável à quimiosorção de elementos químicos com potencial contaminante, embora não tenham sido detectadas grandes concentrações de elementos nos sedimentos dos leitos dos exutórios analisados. No entanto, isso também se deve à dinâmica desses ambientes lóticos que não são favoráveis à deposição de sedimentos.

Embora os valores quantitativos dos elementos químicos analisados estejam em conformidade com as resoluções normativas pertinentes, ressalta-se às significativas correlações entre os elementos do solo e sedimentos obtidos neste estudo, sugerindo fortemente que os considerados macro elementos, como o Ca, Mg, bem como os micronutrientes, como Zn e Mn, além da MO, estão sendo carregados para os tributários do rio Pirajibu-Mirim, advindos, provavelmente, da perda desses elementos por fatores antrópicos, assim como pelas condições biogeoquímicas atuantes nesses compartimentos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo possibilitou a análise pormenorizado da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, fornecendo informações a partir de compartimentos (representados pelas sub-bacias) que revelaram diferentes características quanto aos aspectos ambientais dessas áreas, tais como padrões de drenagem, características morfométricas e morfofisiográficas, que consistem em atributos que participam da dinâmica do fluxo de sedimentos na escala da bacia-vertente.

A compartimentação possibilitou a definição dos exutórios de cada uma das sub-bacias, permitindo que estes fossem comparados quanto aos parâmetros físico-químicos da água e do sedimento dos leitos fluviais, e suas correlações com a perda de macro e micronutrientes do solo. Os exutórios foram definidos como pontos amostrais em razão da gestão de custos das análises e por serem ambientes que recebem a contribuição de toda área de drenagem da sub-bacia.

Cada compartimento foi avaliado espacialmente quanto aos atributos químicos do solo que serviram de subsídio para a modelagem da perda de solos e, por conseguinte, para modelagem da distribuição espacial da perda dos principais elementos que então compuseram as correlações lineares e multivariadas de modo a retratar as perdas desses elementos no solo, na coluna de água e nos sedimentos.

Embora a bacia hidrográfica seja pequena em termos territoriais, com cerca de 55,35 km², sua contribuição é fundamental para a produção de água e consequente o abastecimento público do município de Sorocaba. Portanto, diante da relevância da bacia hidrográfica e buscando uma abordagem extensionista, a pesquisa priorizou análises (de água e solo) que pudessem ser futuramente realizadas tanto pelos gestores públicos, produtores rurais e demais interessados, integrando-as como parte de um banco de dados que poderão compor futuramente um indicador capaz de mensurar os reflexos antrópicos em bacias hidrográficas.

É importante ressaltar que qualquer ação humana deletéria ao ambiente causará reflexos de diferentes magnitudes, no entanto, algumas constatações decorrentes desta pesquisa atentam para o possível agravamento da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica.

Alguns parâmetros de água analisados possibilitaram inferir que a qualidade da água da maioria dos compartimentos está aquém do preconizado pela legislação, como o oxigênio dissolvido, encontrado em baixas concentrações em todas as sub-bacias no período seco e na réplica do período chuvoso. A condutividade elétrica (CE) apresentou valores até 11 vezes acima do máximo recomendado na Sub-Bacia 2, assim como os sólidos totais dissolvidos

(STD), que também apresentaram elevados valores para a sub-bacia que contempla a foz do rio Pirajibu-Mirim (Sub-Bacia 1).

Os valores de Fósforo estiveram acima do preconizado pela resolução CONAMA 357/05 para Classe 2 em todos os exutórios amostrados, bem como os elevados valores de nitrogênio (N) são indicativos do despejo clandestino de esgoto evidenciados nas campanhas de coleta de água.

Dentre os elementos encontrados nos sedimentos dos leitos dos exutórios analisados, o Zn foi o elemento com maior indício de deposição advinda da perda de solo. No entanto, suas formas geoquímicas não são sugestivas de biodisponibilidade para a coluna d'água, uma vez que o elemento não foi encontrado nas campanhas de água do período seco, fato que precisa ser melhor compreendido. Contudo, o Zn foi o elemento que obteve a maior quantidade de correlações com outros elementos do solo, como Ca, K, Mn, P, MO e o próprio Zn. Nas campanhas de água do período chuvoso, o Zn foi detectado em concentrações abaixo do preconizado pela Resolução CONAMA 357/05 nas Sub-Bacias 4, 5 e 6.

O Mn também foi um elemento que se destacou, sendo encontrado nas duas campanhas (seco e chuvoso) na coluna d'água, apresentando valores muito acima do preconizado pela Resolução CONAMA 357/05 no período chuvoso, que estabelece até 0,10 mg/L Mn. No entanto, todas as sub-bacias, excetuando a Sub-Bacia 6, obtiveram valores muito acima do permitido. Do mesmo modo, também foi constatada a presença de Fe e Cu acima do permitido.

Quanto à perda de solos, os resultados revelaram uma perda na ordem de 5,92 t/ha.ano, enquanto os nutrientes do solo perdidos por erosão hídrica apresentaram valores mais elevados para o Ca, Fe e MO, cujas perdas foram estimadas em aproximadamente 28,525, 15,130 e 674,088 tonelada/ano, respectivamente.

No tocante às correlações entre a perda de nutrientes do solo e os íons dissolvidos na água, o Fe dissolvido na água apresentou uma forte correlação negativa com o íon Fe do solo, sugerindo que o Fe pode estar complexado aos colóides do solo ou ligado às estruturas dos argilominerais, pois também houve correlação negativa entre o íon e a matéria orgânica do solo no período chuvoso, enquanto no período seco, o Fe não se correlacionou com nenhum elemento da água. As correlações do período seco ocorrem entre o K dissolvido na água com os íons de Ca, Mn, Zn e o próprio Mn do solo, e o Ca da água se correlacionou com os íons Mg, Mn e com o Ca do solo. Portanto, novamente as correlações são altamente sugestivas do aporte de sedimentos nos cursos de água, ressaltando que o Ca foi o segundo elemento estimado em maior quantidade em relação as perdas anuais de nutrientes do solo.

Portanto, com o aporte de sedimentos aos cursos de água a sociedade em geral é prejudicada, perdendo qualidade na água que consome, sofrendo com o assoreamento e diminuição da quantidade de água potável disponível. Os custos para tratar a água aumentam substancialmente à medida que ocorre a eutrofização dos mananciais de abastecimento público, e esse valor é repassado para a sociedade, que perde investimentos em outras áreas essenciais, como saúde, educação e pesquisa, entre inúmeras outras, uma vez que o tratamento da água se torna mais oneroso.

Entretanto, diante dos resultados obtidos nesta pesquisa, corrobora-se o pressuposto de que as atividades antrópicas estão afetando a qualidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, uma vez que foram estimadas elevadas perdas de nutrientes do solo que estão contribuindo com sedimentos e seu carreamento para os cursos de água, sendo constatados nas análises de correlações realizadas oriundos de fontes difusas e pontuais.

Ressalta-se que o conjunto de dados utilizados nesta pesquisa pode ser facilmente replicado pelos gestores públicos e demais interessados para fins de monitoramento e diagnóstico dos reflexos antrópicos no solo e água de bacias hidrográficas e demais áreas de interesse ambiental do município e demais localidades, contribuindo no âmbito das cidades sustentáveis.

Nesse sentido, esta pesquisa atua no bojo dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (PNUD, 2015), que preconiza, no ODS (6) – Água potável e saneamento, o acesso universal e equitativo da água, garantindo a disponibilidade e a gestão sustentável da água potável e do saneamento para todos.

Nesse prisma, as fragilidades relacionadas ao saneamento na bacia, principalmente nas sub-bacias localizadas nas porções centrais do Pirajibu-Mirim merecem destaque, pois durante as campanhas de coleta de água e solo foram realizados diversos contatos com moradores que relataram que praticam o despejo clandestino de esgoto porque não possuem condições de regularizar suas residências. Portanto, isso demonstra apenas uma face das inúmeras desigualdades existentes no município e que se reverberam por todo o país (e em grande parte do planeta), pois uma considerável parcela da população não possui condições básicas de saneamento.

Outro ponto que chama atenção refere-se à gestão da água na bacia, pois, de acordo com Corrêa et al. (2017), a atualização do plano diretor do município (SOROCABA, 2014) promoveu a redução, de acordo com o zoneamento obrigatório para a gestão das cidades, da zona rural (ZR), zona de conservação ambiental (ZCA), assim como no tamanho mínimo estipulado para lotes em zonas de chácaras urbanas (ZCH). Ações municipais como essas estão

em completa desarmonia com o ODS (11) – Cidades e comunidades sustentáveis, que tem como uma das metas tornar as cidades resilientes e sustentáveis, pois a redução dessas zonas pode reduzir significativamente a permeabilidade do solo e, consequentemente, reduzir a recarga dos lençóis freáticos.

Cabe destacar que tanto as análises realizadas por sensoriamento remoto quanto às visitas a campo evidenciaram que áreas altamente vulneráveis, como áreas de nascentes da bacia, estão sofrendo impactos antrópicos, como soterramento de nascentes por especulação imobiliária e construções de loteamentos. Portanto, essa pesquisa também está alinhada ao ODS (11), trazendo evidências de que são necessárias ações que permitam a produção de água na bacia, mas, para isso, o poder público precisa fomentar políticas públicas que garantam a sustentabilidade dessas bacias hidrográficas estratégicas, como a do rio Pirajibu-Mirim.

Também são pressupostos desta tese o ODS (15) - Vida terrestre, que tem como meta diversas frentes, como proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, deter e reverter a degradação da terra, pois as informações obtidas irão subsidiar ações que podem ser desenvolvidas de forma pontual, tais como as áreas mais propícias à perda de solos e suas consequências ambientais, as implicações na qualidade da água e do solo e seus possíveis impactos relacionados à bioacumulação de elementos químicos e os impactos na vida aquática e terrestre.

No entanto, são recomendados trabalhos futuros que realizem a intercomparação da qualidade da água em longo prazo entre os tributários analisados nesta pesquisa, não apenas para ajudar no reconhecimento das condições ambientais e reflexos atuais da bacia, mas também para indicar soluções eficazes para o futuro controle da poluição na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim, uma vez que estes tributários irão condicionar a qualidade da água da represa do sistema Castelinho/Ferraz.

8.1 REFERÊNCIAS

- AHMADIANFAR, I.; SHIRVANI-HOSSEINI, S.; HE, J.; SAMADI-KOUCHEKSARAEI, A.; YASEEN, Z. M. An improved adaptive neuro fuzzy inference system model using conjoined metaheuristic algorithms for electrical conductivity prediction. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 1-34, 2022. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08875-w>
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717-723, 2001. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300021>
- ALEWELL, C.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; PANAGOS, P. Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 7, n. 3, p. 203-225, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- ALVES-NETO, J. L.; BARBOSA, A. V. L.; MEDEIROS, M. A.; CASARTELLI, E. A.; GUARINO, A. W. S.; MERÇON, F. Transposição de Cádmi e Zinco da Baía de Sepetiba, e sua Deposição em Sedimentos do Estuário do Rio Cabuçu-Piraquê (Rio de Janeiro, Brasil). **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, p. 1295-1315, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140085>
- ANDRIYANTO, C.; SUDARTO, S.; SUPRAYOGO, D. Estimation of soil erosion for a sustainable land use planning: RUSLE model validation by remote sensing data utilization in the Kalikonto watershed. **Journal of Degraded and Mining Lands Management**, v. 3, n. 1, p. 459, 2015. doi: <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2015.031.459>
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed. Washington, 1999.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141-149, 2014. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200003>
- BAPTISTA, M. B.; VON SPERLING, M. **Morfologia fluvial. Estudos e Modelagem da Qualidade da Água em Rios**. Editora UFMG Horizonte, 2007. 588p.
- BATISTA, R. A. W.; NERY, L. M.; MATUS, G. N.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Estimativa do Fator de Erosividade do Solo da Região do Vale do Ribeira Paulista, Brasil. **Formação (Online)**, v. 28, n. 53, 2021. doi: <https://doi.org/10.33081/formacao.v28i53.8015>
- BAUDE, M.; MEYER, B. C.; SCHINDEWOLF, M. Land use change in an agricultural landscape causing degradation of soil based ecosystem services. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 1526-1536, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.455>
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. – 8ª. ed. – São Paulo: Ícone, 2012.

- BHUTIANI, R.; KULKARNI, D. B.; KHANNA, D. R.; GAUTAM, A. Water quality, pollution source apportionment and health risk assessment of heavy metals in groundwater of an industrial area in North India. **Exposure and Health**, v. 8, n. 1, p. 3-18, 2016. doi: <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0178-2>
- BORAH, H.; DEKA, S. Morphometric Analysis for Prioritization of Sub-Watersheds of Jamuna River Watershed, Assam, India Using Remote Sensing and GIS Technique. **International Journal of Control and Automation**, v. 13, n. 2s, p. 18-26, 2020.
- BORRELLI, P. et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2017. doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- BOURAMTANE, T. et al. Statistical approach of factors controlling drainage network patterns in arid areas. Application to the Eastern Anti Atlas (Morocco). **Journal of African Earth Sciences**, v. 162, p. 103707, 2020. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2019.103707
- BOWEN, M. W.; JOHNSON, W. C. Anthropogenically accelerated sediment accumulation within playa wetlands as a result of land cover change on the High Plains of the central United States. **Geomorphology**, v. 294, p. 135-145, 2017.
- BRANDÃO, C. J.; BOTELHO, M. J. C.; SATO, M. I. Z.; LAMPARELLI, M. C. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.
- BRITO, G. B., DA SILVA JÚNIOR, J. B., DIAS, L. C., DE SANTANA SANTOS, A., HADLICH, G. M., & FERREIRA, S. L. C. Evaluation of the bioavailability of potentially toxic metals in surface sediments collected from a tropical river near an urban area. **Marine pollution bulletin**, v. 156, p. 111215, 2020.
- BUENO, C. C.; FRASCARELI, D.; GONTIJO, E. S.; VAN GELDERN, R.; ROSA, A. H.; FRIESE, K.; BARTH, J. A. Dominance of in situ produced particulate organic carbon in a subtropical reservoir inferred from carbon stable isotopes. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69912-0>
- CAIRES, S. M. D.; FONTES, M. P. F.; FERNANDES, R. B. A.; NEVES, J. C. L.; FONTES, R. L. F. Desenvolvimento de mudas de cedro-rosa em solo contaminado com cobre: tolerância e potencial para fins de fitoestabilização do solo. **Revista Árvore**, v. 35, p. 1181-1188, 2011. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000700004>
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; NOVAK, J. M.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CARDOSO-SILVA, S. et al. Paleolimnological evidence of environmental changes in seven subtropical reservoirs based on metals, nutrients, and sedimentation rates. **Catena**, v. 206, p. 105432, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105432>

- CARRERA, A. L.; MAZZARINO, M. J.; BERTILLER, M. B.; DEL VALLE, H. F.; CARRETERO, E. M. Plant impacts on nitrogen and carbon cycling in the Monte Phytogeographical Province, Argentina. **Journal of Arid Environments**, v.73, p.192-201, 2009. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.09.016>
- CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CARVALHO, T. M.; LATRUBESSE, E. M. Aplicação de modelos digitais do terreno (MDT) em análises macrogeomorfológicas: o caso da bacia hidrográfica do Araguaia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 5, n. 1, 2004. doi: <https://doi.org/10.20502/rbg.v5i1.34>
- CERRI, R. I.; REIS, F. A. G. V.; GRAMANI, M. F.; GABELINI, B. M.; ZAINE, J. E.; SISTO, F. P.; CARMO GIORDANO, L. Análise da influência de atributos fisiográficos e morfométricos na definição da suscetibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de massa. **Geologia USP**, v. 18, n. 1, p. 35-50, 2018. doi: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v18-133737>
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas de amostragem**. São Paulo, 2009
- CHEN, S.; ZHANG, Q.; CHEN, H.; ZHENG, S.; WU, M.; MEI, X.; LIU, D. Variation of surface water quality based on crop-livestock structure change and its pollution assessment in Sichuan Hilly Area. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 32, n. 1, p. 52-59, 2016.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.
- COLIADO, P. H. S.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Avaliação das características físicas da bacia hidrográfica do Rio Pariquera-Açu no Baixo Ribeira De Iguape (SP). **Holos Environment**, v. 20, n. 3, p. 320-334, 2020. doi: <https://doi.org/10.14295/holos.v20i3.12386>
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2005.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 454 - 01 de novembro de 2012**. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Brasília, DF. 2012
- CORINGA, J. D. E. S.; PEZZA, L.; CORINGA, E. D. A. O.; WEBER, O. L. D. S. Distribuição geoquímica e biodisponibilidade de metais traço em sedimentos no Rio Bento Gomes, Poconé-MT, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 161-174, 2016.
- CORRÊA, C. J. P.; TONELLO, K. C.; FRANCO, F. S. Análise hidroambiental da microbacia do Pirajibu-Mirim, Sorocaba, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 4, p. 943-953, 2016. doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1969>

CORRÊA, C. J. P.; TONELLO, K. C.; FRANCO, F. S.; LIMA, M. T. O plano diretor influencia na produção de serviços ambientais? um estudo de caso na microbacia do Pirajibu-Mirim, em Sorocaba, SP. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 45, p. 115-129, 2017.

CUNHA, D. G. F.; SABOGAL-PAZ, L. P.; DODDS, W. K. Land use influence on raw surface water quality and treatment costs for drinking supply in São Paulo State (Brazil). **Ecological Engineering**, v. 94, p. 516-524, 2016.

CUNHA, J. E. M.; CAMPOS, M. C.; GAIO, D. C.; NOGUEIRA, J. E. S.; SOARES, M. D.; SILVA, D. M.; OLIVEIRA, I. A. Fractal analysis in the description of soil particle-size distribution under different land-use patterns in Southern Amazonas State, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 23, p. 2032-2042, 2016. doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10649>

DJIMI, E. G. D.; ABIA, A. L. K.; BELIBI, P. D.; TAKAM SOH, P.; CHE, R. N.; GHOGOMU, J. N.; KETCHA, J. M. Multivariate Statistical and Hydrochemical Analysis of Drinking Water Resources in Northern Cameroon Watersheds. **Water**, v. 13, n. 21, p. 3055, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/w13213055>

DAS, B.; PAUL, A.; BORDOLOI, R.; TRIPATHI, O. P., PANDEY, P. K. Soil erosion risk assessment of hilly terrain through integrated approach of RUSLE and geospatial technology: a case study of Tirap District, Arunachal Pradesh. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 4, n. 1, p. 373-381, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0435-z>

DAY, J. W.; LI, B.; MARX, B. D.; ZHAO, D.; LANE, R. R. Multivariate analyses of water quality dynamics over four decades in the Barataria Basin, Mississippi Delta. **Water**, v. 12, n. 11, p. 3143, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/w12113143>

DUARTE-JARAMILLO, L.; MENDOZA-ATENCIO, M. A.; JARAMILLO-COLORADO, B. E.; GONZÁLEZ-ÁLVAREZ, Á. Water quality in the municipalities of Sincerín and Gambote, Bolívar, Colombia (2017-2018). **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**, n. 103, p. 77-87, 2022. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210217>

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 2011. 230p.

EMPLASA – Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo S.A. **Plano de Ação da Macrometrópole Paulista 2013/2040**. São Paulo: Emplasa, 2019. Disponível em: <<https://www.observatoriodasmegropoles.net.br/plano-macrometropole-paulista-2040/>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2020.

ESRI – **Environmental Systems Research Institute, ArcGIS for Desktop**. Versão 10.5.1 Redlands: Estados Unidos, 2016.

ESTEVEES, F. A.; GUARIENTO, R. D. Elementos-traço. In: ESTEVEES, F. A. **Fundamentos de Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciências, 2011, cap. 8, p. 323- 337.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Voluntary Guidelines for sustainable soil management food and agriculture organization of the united nations**. Rome-Italy, 2017.

FAO-PNUMA. Food and Agriculture Organization of the United Nations - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos**. Publicaciones de la FAO. Roma-Italia, 1980.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P.; SILVA, F. D.; CHAN, B. L. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009. doi: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/viewFile/3852/3156>

FILIZOLA, F. F.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental: solo, água e sedimentos**. EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna, Brasil, pp. 169, 2006.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v. 58, p. 627-646, 2001. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>

FRASCARELI, D. et al. Statistical Approaches Link Sources of Sediment Contamination in Subtropical Reservoirs to Land Use: An Example from the Itupararanga Reservoir (Brazil). **Water, Air and Soil Pollution**, v. 233, n. 142, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05574-0>

FRASCARELI, D.; CARDOSO-SILVA, S.; MIZAEL, J. D. O. S. S.; ROSA, A. H.; POMPEO, M. L. M.; LÓPEZ-DOVAL, J. C.; MOSCHINI-CARLOS, V. Spatial distribution, bioavailability, and toxicity of metals in surface sediments of tropical reservoirs, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 4, p. 1-15, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6515-8>

FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@ mbiente On-line**, v. 8, n. 2, p. 155-164, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v8i2.1684>

GAJBHIYE, S.; MISHRA, S. K.; PANDEY, A. Prioritizing erosion-prone area through morphometric analysis: an RS and GIS perspective. **Applied Water Science**, v. 4, n. 1, p. 51-61, 2014. doi: <https://doi.org/10.1007/s13201-013-0129-7>

GALLART, F.; LLORENS, P. Catchment management under environmental change: impact of land cover change on water resources. **Water International**, v. 28, n. 3, p. 334-340, 2003. doi: <https://doi.org/10.1080/02508060308691707>

GOMES, C. H.; SCHMIDT, A. M.; DESSART, R. L.; NOVA, G. P. C. Geochemical analyses of water and public health of the Mangueirão and Salso Streams in Caçapava do Sul, RS, Brazil.

Revista Ambiente & Água, v. 12, n. 5, p. 760-773, 2017. doi: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2006>

GONZÁLEZ-GUADARRAMA, M. J.; ARMIENTA-HERNÁNDEZ, M. A.; ROSA, A. H. Aquatic Humic Substances: Relationship Between Origin and Complexing Capacity. **Bulletin of environmental contamination and toxicology**, v. 100, n. 5, p. 627-633, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2318-4>

GRASS DEVELOPMENT TEAM - **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS)**. Software [online]. Disponível em: <<http://grass.osgeo.org>>. Acesso em: 25 de maio de 2021.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Palaeontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontol. Electron**, v. 4, n. 9, 2001.

HOLZ, M.; AUGUSTIN, J. Erosion effects on soil carbon and nitrogen dynamics on cultivated slopes: A meta-analysis. **Geoderma**, v. 397, p. 115045, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115045>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**, 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sorocaba/panorama>>. Acesso em: 25 jan. 2021

IDRIS, N. S. U.; LOW, K. H.; KOKI, I. B.; KAMARUDDIN, A. F.; SALLEH, K. M.; ZAIN, S. M. Hemibagrus sp. as a potential bioindicator of hazardous metal pollution in Selangor River. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 5, p. 220, 2017. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5939-x>

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil, 1981-2010**. 2009. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 20 de maio de 2021.

JALALI, M.; HEMATI, N. Chemical fractionation of seven heavy metals (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, and Zn) in selected paddy soils of Iran. **Paddy and Water Environment**, v. 11, n. 1, p. 299-309, 2013.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v. 423, n. 6939, p. 528-531, 2003. doi: <https://doi.org/10.1038/nature01675>

KELLNER, E.; OLIVEIRA, Felipe Eduardo de Souza. Water aggressiveness and the possibility of changing quality for human consumption. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, p. 159-168, 2022. doi: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200372>

KIRBY, K. J.; BAZELY, D. R.; GOLDBERG, E. A.; HALL, J. E.; ISTED, R.; PERRY, S. C.; THOMAS, R. C. Five decades of ground flora changes in a temperate forest: The good, the bad and the ambiguous in biodiversity terms. **Forest Ecology and Management**, v. 505, p. 119896, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119896>

KOKI, I. B.; LOW, K. H.; ZAINA, S. M.; JUAHIR, H.; BAYEROB, A. S.; AZIDD, A.; ZALIE, M. A. Spatial variability in surface water quality of lakes and ex-mining ponds in Malacca, Malaysia: the geochemical influence. **Desalination and Water Treatment**, v. 197, p. 319-327, 2020. doi: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25982>

KÜKRER, S.; MUTLU, E. Assessment of surface water quality using water quality index and multivariate statistical analyses in Saraydüzü Dam Lake, Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 2, p. 71, 2019. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7197-6>

KUMAR, S.; KUSHWAHA, S. P. S. Modelling soil erosion risk based on RUSLE-3D using GIS in a Shivalik sub-watershed. **Journal of Earth System Science**, v. 122, n. 2, p. 389-398, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12040-013-0276-0>

LOUREIRO, D.; FERNANDEZ, M.; HERMS, F.; ARAÚJO, C.; LACERDA, L. D. Distribuição dos metais pesados em sedimentos da Lagoa Rodrigo de Freitas. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 3, p. 353-364, 2012. doi: <https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/8216>

MANFREDINI, F. N.; GUANDIQUE, M. E. G.; MORAIS, L. C. Custos de Oportunidades de um Programa de Pagamento por Serviços Ambientais. **REVIBEC-Revista IberoAmericana de Economía Ecológica**, p. 84-103, 2019.

MANNIGEL, A. R.; PASSOS, M.; MORETI, D.; ROSA MEDEIROS, L. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 24, p. 1335-1340, 2002. doi: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v24i0.2374>

MARQUES, V. V. **Fragilidade ambiental associada à conectividade do escoamento superficial indireto na bacia do Rio Pirajibu-Mirim, Sorocaba/SP**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). ICTS, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba. 2017. 104p.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; FOSTER, G. R.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L. D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 30, n. 5, p. 1387-1396, 1987. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.30576> @1987

MELO, D. S. et al. Self-organizing maps for evaluation of biogeochemical processes and temporal variations in water quality of subtropical reservoirs. **Water Resources Research**, v. 55, n. 12, p. 10268-10281, 2019. doi: <https://doi.org/10.1029/2019WR025991>

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P.; FERRAUDO, A. S. Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1358-1367, 2012. doi: <https://seer.sct.embrapa.br/index.php/pab/article/view/11120>

MOREIRA, C. A.; CAVALHEIRO, M. L. D.; PEREIRA, A. M.; CARON, F. Relações entre condutividade hidráulica, transmissividade, condutância longitudinal e sólidos totais dissolvidos para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 193-202, 2012.

MOREIRA, M. C.; CECÍLIO, R. A.; PINTO, F. D. A. D. C.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 1069-1076, 2006. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600016>

NACHTIGALL, S. D. et al. Modelagem espacial da erosão hídrica do solo associada à sazonalidade agroclimática na região sul do Rio Grande do Sul, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. AHEAD, 2020. doi: <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020190136>

NERY, L. M.; RIBEIRO, M. V. C.; SOUZA, M.; OLIVEIRA, R. A.; SILVA, D. C. C.; SIMONETTI, V. C. Estudo da capacidade de uso da terra na Bacia Hidrográfica do Rio Pirajibú-Mirim. In: ANDRADE, D. F. (org.) **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia**. Editora Poisson, Belo Horizonte: p. 52-62, 2019. Disponível em: <<https://poisson.com.br/2018/produto/meio-ambiente-sustentabilidade-e-tecnologia-volume-2/>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

NEVES, A. K.; KÖRTING, T. S.; FONSECA, L. M. G.; ESCADA, M. I. S. Avaliação dos dados do TerraClass e do MapBiomas acerca da legenda e concordância dos mapas para o bioma brasileiro Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 50, p. 170-182, 2020. doi: <https://doi.org/10.1590/1809-4392201900981>

NOVAIS, R. F; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

NSANGOU, D. et al. Urban flood susceptibility modelling using AHP and GIS approach: case of the Mfoundi watershed at Yaoundé in the South-Cameroon plateau. **Scientific African**, p. e01043, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01043>

O'DRISCOLL, J. H.; SIGGINS, A.; HEALY, M. G.; MCGINLEY, J.; MELLANDER, P. E.; MORRISON, L.; RYAN, P. A risk ranking of pesticides in Irish drinking water considering chronic health effects. **Science of The Total Environment**, p. 154532, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154532>

OLIVEIRA, A. B.; NASCIMENTO, W. A. Formas de manganês e ferro em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 99-110, 2006.

OUYANG, W.; HAO, X.; WANG, L.; XU, Y.; TYSKLIND, M.; GAO, X.; LIN, C. Watershed diffuse pollution dynamics and response to land development assessment with riverine sediments. **Science of the Total Environment**, v. 659, p. 283-292, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.367>

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K. A new European slope length and steepness factor (LS-Factor) for modeling soil erosion by water. **Geosciences**, v. 5, n. 2, p. 117-126, 2015. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences5020117>

PEREIRA, L.; MERCANTE, C. A amônia nos sistemas de criação de peixes e seus efeitos sobre a qualidade da água. Uma revisão. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 31, n. 1, p. 81-88, 2018.

PEREIRA, P. S.; VEIGA, B. V.; DZIEDZIC, M. Avaliação da influência do fósforo e do nitrogênio no processo de eutrofização de grandes reservatórios. Estudo de caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 43-52, 2013.

PNUD. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento: **Os objetivos do Desenvolvimento Sustentável**, 2015. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 20 jan. 2022.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. IAC, 2001. 285p

RITSON, J. P.; GRAHAM, N. J. D.; TEMPLETON, M. R.; CLARK, J. M.; GOUGH, R.; FREEMAN, C. The impact of climate change on the treatability of dissolved organic matter (DOM) in upland water supplies: a UK perspective. **Science of the Total Environment**, v. 473, p. 714-730, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.095>

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à química ambiental**. Porto Alegre: Bookman, 2004.

ROSSEL, R. A. V.; BUI, E. N. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Science of the Total Environment**, v. 542, p. 1040-1049, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.119>

ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

SAAE. Serviço Autônomo de Água e Esgoto. **Adequação e Revisão do Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de Água de Sorocaba**. Sorocaba, 2016. 205p. Disponível em: <<https://www.saaesorocaba.com.br/downloads/314+-Plano+Diretor+do+SES+de+Sorocaba+-+Volume+I.pdf>>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Norma Técnica 013 São Paulo, 1999. Disponível <<https://www3.sabesp.com.br/normastecnicas/>>. Acesso em 20 de jun. 2021.

SABINO, H.; VASQUES, G. M.; HERMANI, L. C.; DART, R. O. Morfometria de bacias hidrográficas de primeira ordem em áreas agrícolas sob sistema plantio direto: delimitação e propensão à erosão e inundação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. doi: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1770>

SABONARO, D. Z.; SANTOS, V.; RUSSO, L. R. M.; OLIVEIRA, A. P.; SIMONETTI, V. C. Plantio de mudas com adubações distintas nas margens do córrego, em Alumínio-SP. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 13, n. 2, p. 265-274, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v13i2.2279>

SALES, J. C. A.; SILVA, D. C. C.; LOURENÇO, R. W. Análise espacial da avifauna e sua correlação com indicadores ambientais na bacia hidrográfica do Rio Una (SP). **Boletim de Geografia (Online)**, v. 37, p. 202-217, 2019. doi: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i2.37839>

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de concentração da rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, 2014. doi: <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.376>

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 576-586, 2008. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>

SANTOS, S.; OLIVEIRA, L. C.; SANTOS, A.; ROCHA, J. C.; ROSA, A. H. Poluição aquática. In: ROSA, A. H.; FRACETO, L. F.; CARLOS, V. M. (Org.). **Meio ambiente e sustentabilidade**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2012. p. 17-46.

SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica: Roteiro para Elaboração e Fichas Técnicas dos Parâmetros**. São Paulo, 2017. Disponível em: <<http://www.si-grh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>>. Acesso em 05 dez. 2019

SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. **Situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo: 2020 – Ano Base 2019**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos, Coordenadoria de Recursos Hídricos. São Paulo: Coordenadoria de Recursos Hídricos, 2020.

SCHILLING, M. F. Some remarks on quick estimation of the correlation-coefficient. **American Statistician**, v. 38, n. 4, p. 330-330, 1984.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Ambory, New Jersey. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 67, p. 597-646, 1956. Doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1956\)67\[597:EODSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2)

SCHUMM, S. A. **The fluvial system**. John Wiley, New York, 1977. 338 pp.

SILVA, A. A. R.; LOBO, I.; GUEDES, C. L. B.; PINTO, J. P. Análise de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) em solos utilizando agitação ultrassônica, tubo aquecedor/minicondensador e cromatografia gasosa. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 27, n. 2, p. 105-112, 2006. doi: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2006v27n2p105>

SILVA, A. L.; SILVA, E. N. Aspectos do campo higrorotérmico e a formação da ilha de calor urbana no município de Sorocaba-SP, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 39-50, 2016. doi: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.117683>

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Erodibilidade dos solos paulistas: levantamento de informações e estruturação de um banco de dados. **Geociências**, v. 24, n. 1, p. 33-42, 2005. doi: <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9738>.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; OLIVEIRA, R. A.; LOURENÇO, R. W. Proposta metodológica para análise espacial de nutrientes do solo em bacias hidrográficas. **Sociedade & Natureza**, v. 30, n. 3, p. 85-107, 2018.

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Identificação de áreas com perda de solo acima do tolerável usando NDVI para o cálculo do fator C da USLE. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 42, p. 72-85, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v42i0.45524>

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 627-642, 2016a. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p627-642>

SILVA, D. C. C.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Caracterização morfométrica e suas implicações no acúmulo de sedimentos em reservatórios: O caso da Represa Hedberg, Iperó/SP. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 36, p. 225-247, 2016.

SILVA, D. C. C.; SALES, J. C. A.; SIMONETTI, V. C.; LOURENÇO, R. W. Análise espacial do custo de reposição de nutrientes do solo em uma bacia hidrográfica. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 13, n. 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2020v13n1p189-212>

SILVA, D. C. C.; SIMONETTI, V. C.; OLIVEIRA, R. A.; SALES, J. C. A.; LOURENÇO, R. W. Proposta de autocorrelação espacial da relação entre as condições socioeconômicas na Região Metropolitana de Sorocaba, SP, Brasil. **Ciência e Natura**, v. 43, p. e42, 2021. doi: <https://doi.org/10.5902/2179460X39332>

SILVA, D. M.; GRANDINE, G.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Análise espacial da cobertura vegetal no centro urbano do município de Salto de Pirapora (SP). **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 68, p. 361-371, 2018. doi: <https://doi.org/10.14393/RCG1968240>

SILVA, L. B.; DICK, D. P.; INDA JUNIOR, A. V. Solos subtropicais de altitude: atributos químicos, teor de matéria orgânica e resistência à oxidação química. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1167-1171, 2008. doi: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000400044>

SILVA, T. A. **Uso do solo e sua influência na qualidade da água e produção de sedimentos em reservatórios de abastecimento de água do município de Sorocaba-SP**. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). ICTS, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba. 2021. 82p.

SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 34, n. 3, p. 147-159, 2004. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=253025898005>

SIMONETTI, V. C.; FRASCARELI, D.; GONTIJO, E. S.; MELO, D. S.; FRIESE, K.; SILVA, D. C.; ROSA, A. H. Water quality indices as a tool for evaluating water quality and effects of land use in a tropical catchment. **International Journal of River Basin Management**, p. 1-12, 2019. doi: <https://doi.org/10.1080/15715124.2019.1672706>

SIMONETTI, V. C.; MALHEIROS, I.; NERY, L. M.; ANDRADE, E. D. L.; SILVA, D. C. C. Análise da relação espacial entre o descarte irregular de resíduos sólidos urbanos e a

vulnerabilidade social. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 19, n. 2, p. 61-76, 2021. doi: <https://doi.org/10.5016/estgeo.v19i2.15829>

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; OLIVEIRA, R. A.; SABONARO, D. Z.; ROSA, A. H. Análise da suscetibilidade do solo a processos erosivos do Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade (PNMCBIO) de Sorocaba (SP). **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 44, p. 169-180, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v44i0.48838>

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Análise da influência das atividades antrópicas sobre a qualidade da água da APA Itupararanga (SP), Brasil. **Geosul**, v. 34, n. 72, p. 01-27, 2019a. doi: <https://doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n72p01>

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Correlação espacial compartimentada dos padrões de drenagem com características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, 2022a.

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Proposta metodológica para identificação de riscos associados ao relevo e antropização em áreas marginais aos recursos hídricos. **Scientia Plena**, v. 15, p. 1-19, 2019b. doi: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.025301>

SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C.; ROSA, A. H. Reflexos ambientais da perda de nutrientes do solo por erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Pirajibu-Mirim (SP). **Revista Caminhos de Geografia**. No prelo, 2022b.

SOARES, M. R. G. J.; OKA-FIORI, C.; SILVEIRA, C. T.; KAVISKI, E. Avaliação do método de levantamento morfométrico em bacias hidrográficas através da estatística multivariada. **Geosul**, v. 33, n. 68, p. 83-97, 2018. doi: [10.5007/2177-5230.2018v33n68p83](https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n68p83)

SONG, X. D.; ROSSITER, D. G.; LIU, F.; WU, H. Y.; ZHAO, X. R.; CAO, Q.; ZHANG, G. L. Can pedotransfer functions based on environmental variables improve soil total nutrient mapping at a regional scale?. **Soil and Tillage Research**, v. 202, p. 104672, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104672>

SONNENBERG, R. K. H.; SANTINELLI, E. O.; ANDRADE, E. L.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Análise de parâmetros da água por sensoriamento remoto para fins de aquíicultura em reservatórios. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 10, n. 3, p. 168-178, 2020. doi: <https://doi.org/10.29150/jhrs.v10.3.p168-178>

SOPCHAKI, C. H.; SAMPAIO, T. V. M. Estudo de metodologias para identificação de formas de vertentes na bacia do rio Curralinho-Região Metropolitana de Curitiba/PR. **Revista Geografar**, v. 8, n. 1, p. 100-124, 2013. doi: [10.5380/geografar.v8i1.30945](https://doi.org/10.5380/geografar.v8i1.30945)

SOROCABA. Lei n.º 11.022, de 16 de dezembro de 2014. **Dispõe sobre a revisão do Plano Diretor de Desenvolvimento Físico Territorial do Município de Sorocaba e dá outras providências**. Sorocaba: Câmara dos Vereadores, 2013. Disponível em: <http://www.sorocaba.sp.gov.br/portal/servicos/plano-diretor-lei-n-11-022-de-16-de-dezembro-de-2014>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

SOROCABA. Decreto n.º 26.839, de 11 de janeiro de 2022. **Institui o Plano de Contingenciamento e Racionamento no Abastecimento Público de Água no Município de Sorocaba/SP**. Sorocaba: Câmara dos Vereadores, 2022. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sorocaba/decreto/2022/2684/26839/decreto-n-26839-2022-institui-o-plano-de-contingenciamento-e-acionamento-no-abastecimento-publico-de-agua-no-municipio-de-sorocaba-sp>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SOUZA, C.; AZEVEDO, Tasso. **MapBiomas general handbook**. MapBiomas: São Paulo, Brazil, p. 1-23, 2017.

SOUZA, G. D.; LIMA, J. D. S.; XAVIER, A. C.; ROCHA, W. D. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 1, p. 73-81, 2010. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rsa.v11i1.15939>

SOUZA, M. M.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, p. 263-274, 2014.

STRAHLER, A. N. Hypsometric analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952. doi: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

TAM, Y.S.; ELEFSINIOTIS, P. Corrosion control in water supply systems: Effect of pH, alkalinity, and orthophosphate on lead and copper leaching from brass plumbing. **Journal of Environmental Science and Health Part A**, v. 44, n. 12, p. 1251-1260, 2009. <https://doi.org/10.1080/10934520903140009>

TIAN, H. Q.; LU, C. Q.; MELILLO, J.; REN, R.; HUANG, Y.; XU, X. F.; LIU, M. L.; ZHANG, Z.; CHEN, G. S.; PAN, S.F. Food benefit and climate warming potential of nitrogen fertilizer uses in China. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 044020, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044020>

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, 2005. <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43539/22807>
TUSET, J.; VERICAT, D.; BATALLA, R. J. Rainfall, runoff and sediment transport in a Mediterranean mountainous catchment. **Science of the Total Environment**, v. 540, p. 114-132, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.075>

USTAOĞLU, F.; TEPE, Y.; TAŞ, B. Assessment of stream quality and health risk in a subtropical Turkey river system: A combined approach using statistical analysis and water quality index. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 105815, 2020.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539-546, 2003. doi: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000300022>

VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, n. 1, 2003. doi: <https://doi.org/10.20502/rbg.v4i1.17>

VATANDAŞLAR, C.; YAVUZ, M. Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 2, p. 65, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-017-6388-0>

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP): I-Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 801-814, 2008. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000200034>

WELTZ, M. A.; RENARD, K. G.; SIMANTON, J. R. **Revised Universal Soil Loss Equation for Western**. General Technical Report RM., n. 150-154, p. 104, 1987.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: USDA, 1978. (Agriculture Handbook, 537)

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland**. DC: USDA, 1965 (Agricultural Handbook, 282).

WOLKA, K.; BIAZIN, B.; MARTINSEN, V.; MULDER, J. Effects of soil bunds on surface runoff, erosion and loss of nutrients. **Science of The Total Environment**, p. 142877, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142877>

ZHAO, C.; JIA, X.; ZHANG, C. Particle size distribution of soils (0–500 cm) in the Loess Plateau, China. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 3, p. 251-258, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.05.003>

ZORZAL-ALMEIDA, S.; SALIM, A.; ANDRADE, M. R. M.; NOVAES NASCIMENTO, M.; BINI, L. M.; BICUDO, D. C. Effects of land use and spatial processes in water and surface sediment of tropical reservoirs at local and regional scales. **Science of the Total Environment**, v. 644, p. 237-246, 2018. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.361>

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Perda anual de atributos do solo das sub-bacias do Pirajibu-Mirim

Perda em kg/ano por sub-bacia do rio Pirajibu-Mirim						
Atributos do solo	Sub-Bacia 1	Sub-Bacia 2	Sub-Bacia 3	Sub-Bacia 4	Sub-Bacia 5	Sub-Bacia 6
Ca	4.703,5	9.794,4	5.721,0	1.221,6	3.911,4	3.173,4
P	150,8	184,7	92,6	14,7	25,8	22,8
MO	186.293,8	194.904,2	67.337,2	47.202,3	82.020,6	96.330,8
K	700,3	1.144,0	522,3	168,7	272,4	249,6
Al	478,9	115,9	40,2	117,0	244,7	400,2
Cu	95,0	76,3	28,7	28,8	45,6	40,2
Fe	5.210,9	3.559,0	1.581,6	1.119,5	1.451,8	2.208,0
Mg	705,6	1.225,3	492,7	187,6	353,4	473,1
Mn	260,3	560,9	222,5	119,9	80,2	79,4
Zn	234,7	366,6	128,3	74,9	163,5	43,9

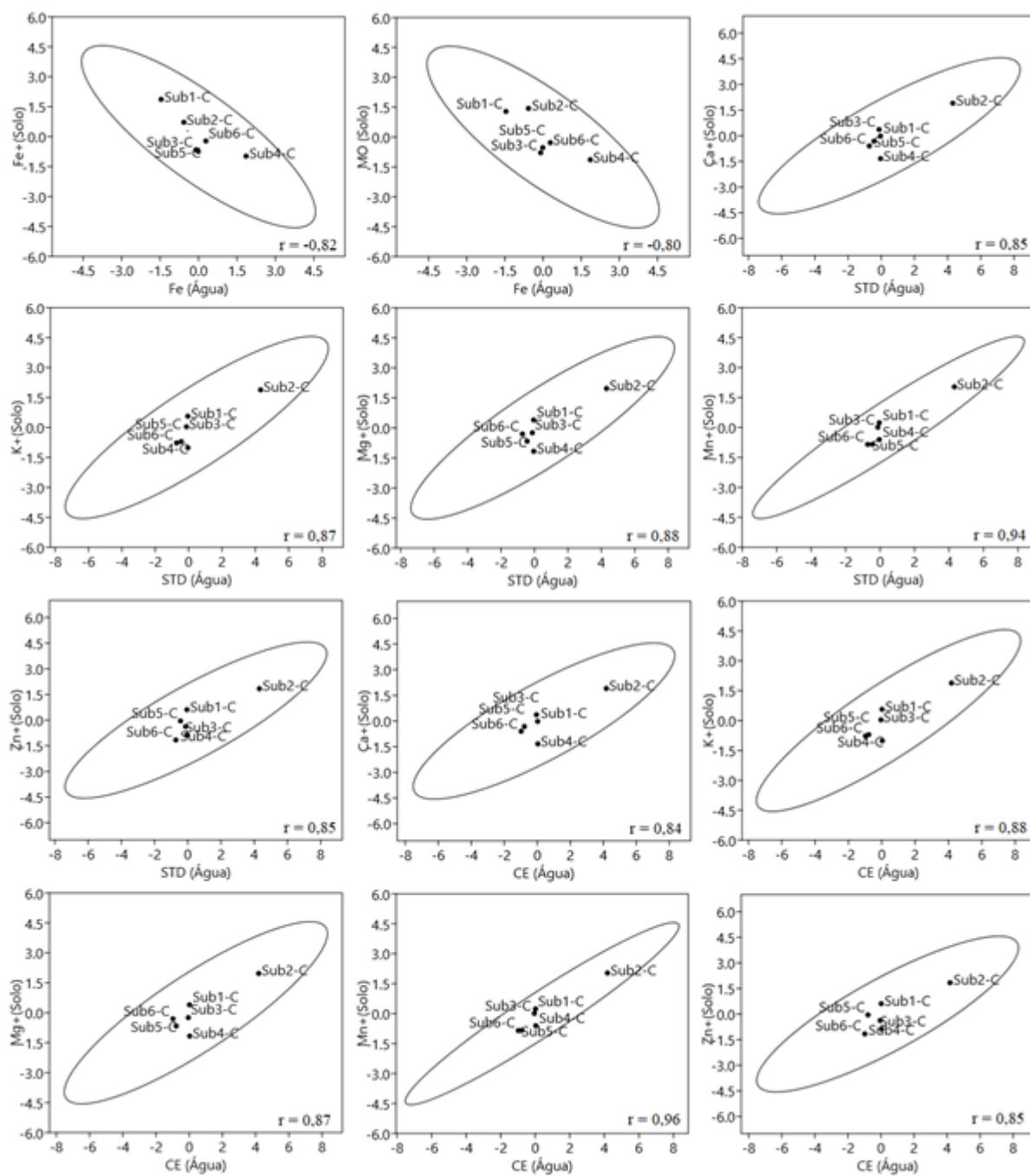
Fonte: Autoria própria.

Figura A.1 – Parâmetros de qualidade da água obtidos nas sub-bacias do rio Pirajibu-Mirim



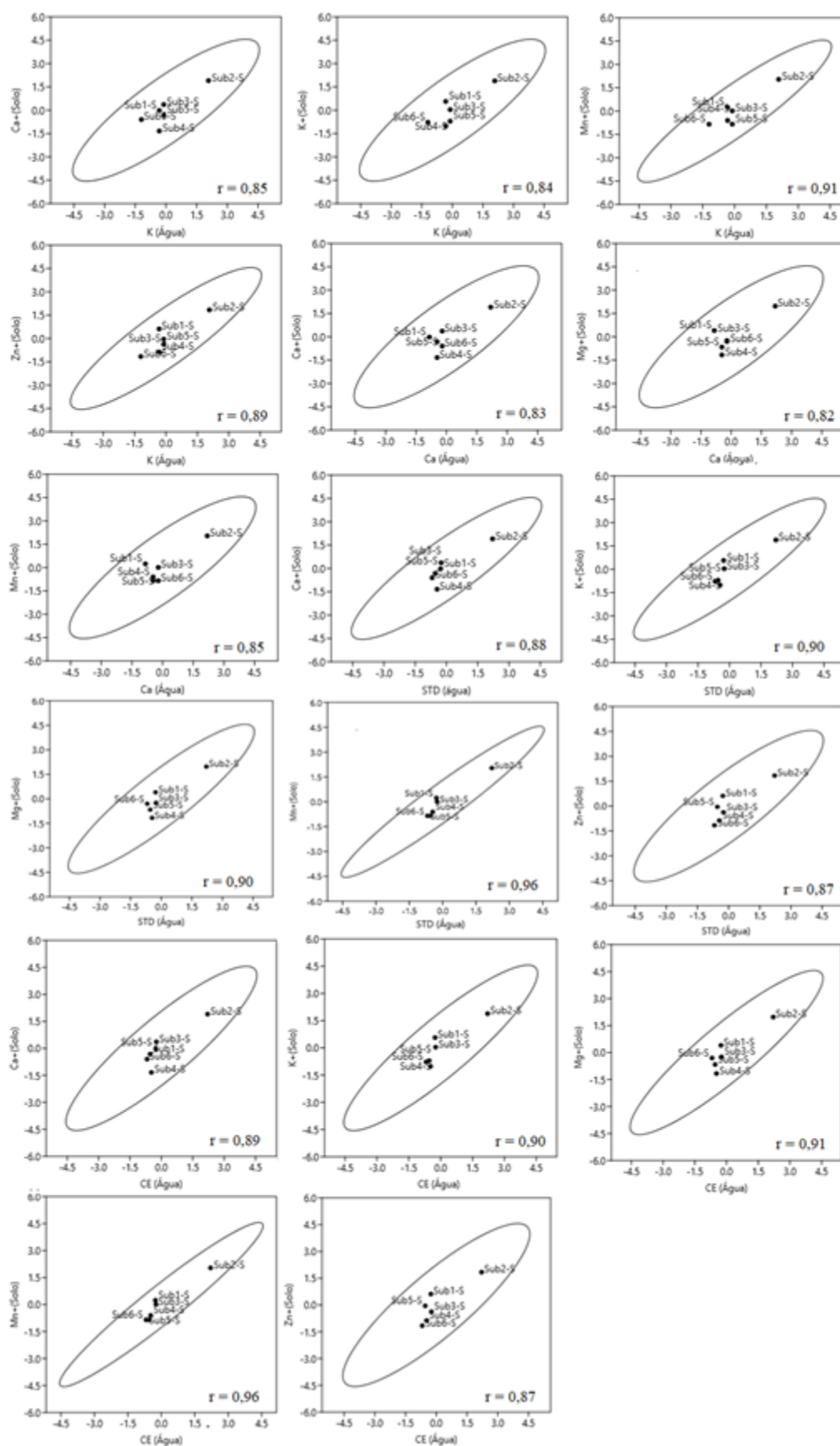
Fonte: Autoria própria.

Figura A.2 - Gráfico de dispersão das variáveis correlacionadas no período chuvoso



Fonte: Autoria própria.

Figura A.3 - Gráfico de dispersão das variáveis correlacionadas no período seco



Fonte: Autoria própria.

Tabela A.2 - Valores de precipitação mensais e anual do período de estudo

Ano	Mês	n	$\bar{x}$	Min	Max	Chuva acumulada
2021	Janeiro	31	10,1	0	54,0	97,00
	Fevereiro	28	8,6	0	25,4	74,5
	Março	31	5,9	0	25,2	112,8
	Abril	30	0,4	0	34,0	36,9
	Maio	31	4,0	0	13,4	31,2
	Junho	30	7,1	0	10,8	13,5
	Julho	31	0,3	0	22,8	10,8
	Agosto	31	2,1	0	46,8	55,7
	Setembro	30	2,4	0	6,3	12,1
	Outubro	31	4,9	0	31,4	119,7
	Novembro	30	4,8	0	46,8	82,0
	Dezembro	31	3,78	0	71,1	117,1
Precipitação anual (mm) de 2021						763,3

Fonte: Autoria própria.

Legenda: n - amostra. $\bar{x}$ - média. Min – valor mínimo; Max – valor máximo.