



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de Presidente Prudente

**ESTIMATIVA DE APORTE DE FERTILIZANTES POR MEIO DE
MODELAGEM AMBIENTAL EM CANAIS FLUVIAIS NO OESTE
PAULISTA**

Renata Pereira Prates

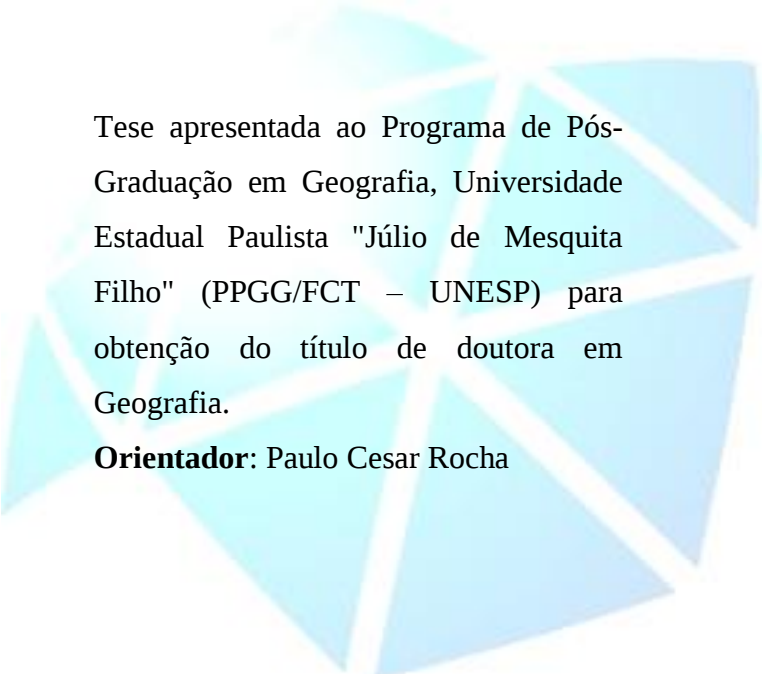


Orientador: Paulo Cesar Rocha

Presidente Prudente
2023

Renata Pereira Prates

**ESTIMATIVA DE APORTE DE FERTILIZANTES POR MEIO DE
MODELAGEM AMBIENTAL EM CANAIS FLUVIAIS NO OESTE
PAULISTA**



Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (PPGG/FCT – UNESP) para obtenção do título de doutora em Geografia.

Orientador: Paulo Cesar Rocha

Presidente Prudente
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

P912e	Prates, Renata Pereira Estimativa de Aporte de Fertilizantes por meio de Modelagem Ambiental em Canais Fluviais no Oeste Paulista / Renata Pereira Prates. -- Presidente Prudente, 2023 209 p. : tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente Orientador: Paulo Cesar Rocha 1. Cana-de-Açúcar. 2. Escoamento Superficial. 3. Conectividade. 4. Bacia Hidrográfica. I. Título.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: "Estimativa de aporte de fertilizantes por meio de modelagem ambiental em canais fluviais no Oeste Paulista"

AUTORA: RENATA PEREIRA PRATES

ORIENTADOR: PAULO CESAR ROCHA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Geografia, área:
Produção do Espaço Geográfico pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO CESAR ROCHA (Participação Virtual)

Departamento de Geografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente P

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULO CESAR ROCHA
Data: 12/01/2024 15:41:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. RENATA RIBEIRO DE ARAÚJO (Participação Virtual)

Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Documento assinado digitalmente
gov.br RENATA RIBEIRO DE ARAUJO
Data: 02/01/2024 09:29:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Edilson Ferreira

Prof. Dr. EDILSON FERREIRA FLORES (Participação Virtual)

Departamento de Estatística / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente - FCT/Unesp

Assinado de forma digital por
Edilson Ferreira Flores

Dados: 2023.12.22 10:14:41 -03'00'

Documento assinado digitalmente
gov.br JONAS OTAVIANO PRAÇA DE SOUZA
Data: 22/12/2023 20:37:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JONAS OTAVIANO PRAÇA DE SOUZA (Participação Virtual)

Departamento de Geografia / Universidade Federal da Paraíba - UFPB

Prof. Dr. FREDERICO DOS SANTOS GRADELLA (Participação Virtual)

Departamento de Geografia / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Documento assinado digitalmente
gov.br FREDERICO DOS SANTOS GRADELLA
Data: 22/12/2023 14:42:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Presidente Prudente, 21 de dezembro de 2023

Aos meus pais, Udilson e Ana, cujos abraços encontrei o calor do amor, foram a luz que guiaram meu caminho em busca do conhecimento. No silêncio dos seus olhares, a cada despedida e partida, com orgulho e esperança, me guiaram e me guiam. Vocês são: meu apoio, meu abrigo e minha força.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Parece tão simples sentar-se aqui para escrever para aqueles a quem queremos tanto agradecer, por fazerem parte desta história, destes momentos tão infinitos e importante na nossa vida acadêmica, profissional e pessoal.

A trajetória no doutorado foi bastante desafiadora. Angústia, medo, muitas experiências, alegrias, choros, desabafos e um volume de trabalho que me fazia repensar todos os dias se deveria continuar. Quarenta horas semanais entre aulas, coordenação, projeto e uma tese. Foram nos momentos de insônia, quando o corpo gelava de medo, que muitas noites me vi sentada, escrevendo ou rascunhando o que poderia vir a ser uma tese.

Tudo que está aqui faz parte de um capítulo da minha vida, algo que talvez um dia eu consiga explicar. Às vezes, é até inacreditável dizer e perceber que cheguei até aqui. Sempre fui sonhadora e aprendi com o meu avô Jovelino (*in memoriam*) a escrever. Ele tinha aqueles caderninhos onde anotava coisas importantes do dia a dia. Aprendi com ele a registrar sonhos, metas e momentos que me inspiravam. Assim, nasceu uma Renata que saiu de casa tão cedo para alcançar suas metas e sonhos.

Assim, gostaria de iniciar os meus agradecimentos ao meu orientador, o Prof. Dr. Paulo Cesar Rocha, por toda a orientação, apoio e conhecimento compartilhados ao longo desta jornada acadêmica, que se estendeu por 15 anos, desde os projetos de iniciação científica até o mestrado e doutorado. Admiro profundamente seu trabalho e sua habilidade em observar e traduzir a complexidade da paisagem. Muito obrigado pela confiança, liberdade e infinitos incentivos.

Muito obrigada minha amiga-irmã Gleice Rodrigues e sua família. Ela me resgatou em um dos momentos mais difíceis da minha vida, enquanto morava em São Paulo e não tinha lugar para morar, você me acolheu. Ganhei um quarto, uma cama quentinha e uma família. Eternamente obrigada pelo seu amor, abrigo e amizade.

As minhas hermanas Joice Konrad, Fernanda Martins e Kesia Anastácio pelo apoio infinito, pelas palavras carinhosas e incentivadoras, pelas longas conversas, conselhos e pela admiração mútua. Vocês são mulheres lindas, pesquisadoras, professoras e mães. Passaram por momentos semelhantes e, exatamente por isso, compreenderam tantos momentos de angústia e medo.

As minhas primas Briscia Rigoni e Marcia Menezes, por tantas palavras de carinho e incentivo. Obrigada pelos encontros repletos de boas risadas e saudades, que enchem meu coração de alegria, sempre.

Neste espaço de afeto e gratidão, meu muito obrigada aos meus queridos amigos Lucio Evangelista, Felipe Horta e Claudia Cerqueira. Durante minha jornada semanal entre Presidente Prudente e São Paulo, vocês transformaram o peso das horas de cada trajeto em momentos leves, com boas risadas e aconchego. À amizade que se faz luz e presença.

Aos amigos do Espírito Santo, que são laços de inspiração, Marcela, Aluizio, Zera e Kely, minha gratidão por tudo que a amizade construiu ao longo de tantos anos. Vocês são pessoas incríveis.

Aos meus amigos do Grupo de Formação e Análises Curriculares, do Centro Paula Souza, eixo de Recursos Naturais, agradeço por esses quatro anos de trabalho juntos. Uma equipe solidária, construindo currículos, conhecimento e troca de experiências. Muito obrigada, Gleise, Cesar, Cristiane, Carolina, Vânia e Belquice.

Aos queridos e amados Isabela Rigolin (Bella) e Felipe Georges (Fê), cada momento que compartilhamos, cada desafio enfrentado e cada conquista celebrada ao longo dessa jornada no doutorado tem um significado especial. Vocês são parte essencial dessa jornada, e sou imensamente grata por toda a amizade, apoio e cumplicidade que compartilhamos.

Aos meus amigos e colegas de trabalho das ETECs Mandaqui (São Paulo/SP), Prof. Dr. Antônio Eufrásio de Toledo – Colégio Agrícola e Prof. Adolpho Arruda Mello (Presidente Prudente/SP, agradeço pelos dias de construção e esperança.

Aos amigos de trabalho que sempre estiveram disponíveis para tirar dúvidas e contribuíram com a elaboração de tabelas e gráficos, Andreia Salmazo, Plínio Carielo, João César e Júlio Dominato, meu sincero agradecimento.

Muito obrigada por cada palavra de afeto, confiança e admiração que vocês compartilharam comigo e que iluminaram meus dias, lembrando-me constantemente da minha força e determinação: Elenice, Elaine Leite, Ricardo Celestino, Daniel Carvalho, Karolina Morales, André Rocha, Cintia Mello, Sidneia Marcarini e Helena Sabini.

Carla e Baltazar, minha profunda gratidão por estarem presentes nesta jornada, por todo apoio e força. Muito obrigada.

Às minhas amigas Daniela Vidoto e Juliana Abonízio, amigas de risadas sinceras, do abraço que fortalece, das conversas cheias de esperança e um olhar revolucionário sobre a vida.

Aos colegas do Laboratório de Geologia, Geomorfologia e Recursos Hídricos (Labgeo), em especial Aline Santos, Edmiler Degrande e Jhonatan Laszlo, infinitamente obrigada. Sem dúvida, a jornada até aqui não teria sido possível sem o valioso suporte de cada um de vocês. Espero sinceramente poder retribuir tamanho apoio e amizade.

Ao meu eterno amigo, José Dourado (*in memoriam*), neste lugar de reflexão e inspiração, tantas vezes me encontro lembrando nossas conversas, suas palavras sábias e o carinho que sempre demonstrou por mim. Você costumava dizer que eu era sua flor de Quiabento, e somente agora compreendo o carinhoso apelido. Era tudo sobre ser persistir e resistir.

Aos professores que participaram da banca de qualificação, Professora Dr^a Renata Ribeiro de Araújo e Professor Edilson Ferreira Flores, agradeço por todas as contribuições, sobretudo na organização dos objetivos e da metodologia, para o processo de finalização deste trabalho de pesquisa.

E, assim, agradeço do fundo do coração pelo amor, pelo afeto infinito e por sempre estarem ao meu lado, acreditando e sonhando junto comigo. Meus pais, Udilson e Ana, minhas irmãs, Kellen e Erika, meus sobrinhos e cunhados: a vocês dedico toda a gratidão e todo o amor que carrego em meu coração. Vocês são a base, o alicerce e a razão para seguir adiante e realizar cada conquista. Amo vocês!!!

William Morris Davis, o pai da geomorfologia, já dizia, em 1899¹:

*Although the river and the hill-side waste sheet do not resemble each other at first sight, they are only the extreme members of a continuous series, and when this generalization is appreciated, one may fairly extend the 'river' all over its basin and up to its very divides. Ordinarily treated, the river is like the veins of a leaf; broadly viewed, it is like the entire leaf*²

¹ Citado por CHORLEY, Richard J. "The Drainage Basin as the Fundamental Geomorphic Unit" In Water, Earth, and Man, op. cit., p.78

² Tradução própria: Embora o rio e a extensão de encosta não pareçam à primeira vista, eles são apenas membros extremos de uma série contínua; e quando essa generalização é compreendida, pode-se justamente estender o termo "rio" por toda a sua Bacia, até mesmo até suas divisas. Tratado de maneira convencional, o rio assemelha-se às veias de uma folha; visualizando de forma abrangente, assemelha-se à folha inteira.

RESUMO

A evolução tecnológica na agricultura impulsionou os processos produtivos ao introduzir técnicas como mecanização, irrigação e o uso de insumos agrícolas, tais como fertilizantes e agrotóxicos. Essas mudanças resultaram em transformações significativas na agricultura, promovendo a expansão das áreas de cultivo, principalmente em monoculturas, como é o caso da produção de cana-de-açúcar. Esta tese visa analisar a estimativa e o potencial risco de contaminação dos canais fluviais devido ao aporte de fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar, nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) 20, 21 e 22, no Oeste Paulista, durante os anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019. Assim, para alcançar esse objetivo, foi realizada revisão bibliográfica e definidas as variáveis a serem estudadas, incluindo o mapeamento do uso da terra, espacialização da cana-de-açúcar, análise do escoamento superficial e estimativa do uso de fertilizantes NPK nas áreas das sub-bacias da região de pesquisa. Constata-se que as recomendações de fertilizantes utilizados para adubação na cultura da cana-de-açúcar têm o potencial de serem carregados para os canais fluviais pelo escoamento superficial, o que representa um risco considerável de contaminação.

Palavras-chaves: Cana-de-Açúcar. Escoamento Superficial. Conectividade. Bacia Hidrográfica

ABSTRACT

Technological evolution in agriculture boosted production processes by introducing techniques such as mechanization, irrigation and the use of agricultural inputs, such as fertilizers and pesticides. These changes resulted in significant transformations in agriculture, promoting the expansion of cultivation areas, mainly in monocultures, as is the case with sugar cane production. This thesis aims to analyze the estimate and potential risk of contamination of river channels due to the input of fertilizers in sugarcane cultivation, in the Water Resources Management Units (UGRHIs) 20, 21 and 22, in West São Paulo, during the years 2002, 2007, 2013, 2017 and 2019. Thus, to achieve this objective, a bibliographic review was carried out and the variables to be studied were defined, including mapping of land use, spatialization of sugar cane, analysis of surface runoff and estimation of the use of NPK fertilizers in the sub-basin areas of the research region. It appears that the recommendations for fertilizers used for fertilization in sugarcane cultivation have the potential to be carried into river channels by surface runoff, which represents a considerable risk of contamination.

Keywords: Sugar cane. Surface runoff. Connectivity

RÉSUMÉ

L'évolution technologique dans l'agriculture a stimulé les processus de production en introduisant des techniques telles que la mécanisation, l'irrigation et l'utilisation d'intrants agricoles, tels que les engrais et les pesticides. Ces changements ont entraîné d'importantes transformations dans l'agriculture, favorisant l'expansion des zones de culture, principalement en monoculture, comme c'est le cas pour la production de canne à sucre. Cette thèse vise à analyser l'estimation et le risque potentiel de contamination des canaux fluviaux due à l'apport d'engrais dans la culture de la canne à sucre, dans les Unités de Gestion des Ressources en Eau (UGRHI) 20, 21 et 22, à l'ouest de São Paulo, au cours des années 2002, 2007, 2013, 2017 et 2019. Ainsi, pour atteindre cet objectif, une revue bibliographique a été réalisée et les variables à étudier ont été définies, dont la cartographie de l'occupation des sols, la spatialisation de la canne à sucre, l'analyse du ruissellement de surface et l'estimation de l'usage. d'engrais NPK dans les sous-bassins de la région de recherche. Il apparaît que les engrais recommandés pour la fertilisation de la culture de la canne à sucre risquent d'être entraînés dans les cours d'eau par le ruissellement de surface, ce qui représente un risque considérable de contamination.

Mots-clés : Canne à sucre. Ruissellement superficiel. Connectivité

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei	111
Gráfico 2: Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe.....	119
Gráfico 3: Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema.....	127
Gráfico 4: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGHRI 20	140
Gráfico 5: Escoamento Superficial na UGHRI 20 nas áreas com cana-de-açúcar.....	144
Gráfico 6: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGHRI 21	149
Gráfico 7: Classes de escoamento superficial na UGHRI 21 nas áreas com cana-de-açúcar	151
Gráfico 8: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGHRI 22	156
Gráfico 9: Classes de escoamento superficial na UGHRI 22 nas áreas com cana-de-açúcar	161
Gráfico 10: Classes de uso de Fertilizantes na UGHRI 20 - rio do Aguapei	166
Gráfico 11: Classes de uso de Fertilizantes na UGRHI 21 - do rio do Peixe.....	170
Gráfico 12: Classes de uso de fertilizantes na UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema	174
Gráfico 13: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 20	183
Gráfico 14: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21	187
Gráfico 15: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21	192

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processos de escoamento e condicionantes principais.....	41
Figura 2: Principais mecanismos de geração de escoamento superficial	43
Figura 3: Cadeia produtiva dos fertilizantes.....	51
Figura 4: Principais empresas produtoras de fertilizantes no mundo.....	53
Figura 5: múltiplas facetas do Plano Nacional de Fertilizantes.....	56
Figura 6: Produção de Fertilizantes: matérias-primas básicas, matérias-primas intermediárias, fertilizante simples e fertilizante mistos	59
Figura 7: Ciclo da cana de açúcar plantada	66
Figura 8: Fluxograma - Metodologia para elaboração do mapa de estimativa de contaminação por aporte de fertilizantes NPK	105

LISTA DE MAPAS

Mapa 1: Localização das UGRHIs 20, 21 e 22	24
Mapa 2: Municípios inseridos nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) 20, 21 e 22.....	75
Mapa 3: Geologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20,21 e 22. 79	
Mapa 4: Geomorfologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22	81
Mapa 5: Pedologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22	84
Mapa 6: estações pluviométricas nas UGRHIs 20,21 e 22.....	101
Mapa 7: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2002	113
Mapa 8: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2007	114
Mapa 9: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2013	115
Mapa 10: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2017	116
Mapa 11: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2019	117
Mapa 12: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2002. 121	
Mapa 13: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2007.. 122	
Mapa 14: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2013.. 123	
Mapa 15: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2017.. 124	
Mapa 16: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2019.. 125	
Mapa 17: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2002.. 129	
Mapa 18: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2007.. 130	
Mapa 19: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2013.. 131	
Mapa 20: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2017.. 132	
Mapa 21: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2019.. 133	
Mapa 22: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 20.....	138
Mapa 23: Estimativa de Escoamento Superficial na UGHRI 20 – Bacia Hidrográfica do rio Aguapei	142
Mapa 24: Escoamento Superficial na UGHRI 20 nas áreas com cana-de-açúcar.....	145

Mapa 25: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 21	147
Mapa 26: Estimativa Superficial na UGHRI 21 – Bacia Hidrográfica do rio do Peixe	150
Mapa 27: Estimativa do potencial de escoamento superficial na UGHRI 21 nas áreas com cana-de-açúcar	153
Mapa 28: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 22	155
Mapa 29: Escoamento Superficial na UGHRI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema	159
Mapa 30: Estimativa do potencial de escoamento superficial na UGHRI 22 nas áreas com cana-de-açúcar	162
Mapa 31: Estimativa de uso de fertilizantes nas sub-bacias da UGHRI 20 - rio Aguapeí	168
Mapa 32- Estimativa de uso de fertilizantes nas sub-bacias da UGHRI 21 – rio do Peixe	172
Mapa 33: Uso de fertilizantes nas sub-bacias hidrográficas do Pontal Paranapanema	176
Mapa 34: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 20 – rio Aguapeí	184
Mapa 35: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 21 – rio do Peixe	189
Mapa 36: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 22 – Pontal do Paranapanema	193

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação e definição dos diferentes tipos de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes	57
Quadro 2: Classificação dos grupos hidrológicos de solos para as classes de solos para as Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – 20, 21e 22	94
Quadro 3: valores padrão desenvolvida pelo <i>Soil Conservation Service</i> (SCS)	97

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Datas das cenas utilizadas para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra.....	90
Tabela 2: Classificação do Uso de NPK nas Sub-bacias - UGHRI 20,21 e 22.....	94
Tabela 3: Classificação do Grupos Hidrológicos de Solos para UGHRI 20, 21 e 22	96
Tabela 4: Valores de CN para o complexo hidrológico solo- vegetação para UGHRI 20, 21 e 22	98
Tabela 5: Classes de CN nas para UGHRI 20, 21 e 22	98
Tabela 6: Classes da média de precipitação anual para UGHRI 20, 21 e 22	99
Tabela 7: Classes de estimativa de escoamento superficial nas UGHRI 20, 21 e 22...	102
Tabela 8: Reclassificação do escoamento superficial.....	103
Tabela 9: Reclassificação do escoamento superficial - NPK	103
Tabela 10: - Reclassificação do escoamento superficial - com cana-de-açúcar nas sub-bacias e o índice de NPK.....	104
Tabela 11: Classes de escoamento superficial na UGRHI 20 – rio Aguapei	139
Tabela 12:Classes de escoamento superficial na UGRHI 21 – rio do Peixe.....	148
Tabela 13: Classes de escoamento superficial na UGRHI 22 – Pontal do Paranapanema	156
Tabela 14: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 20 - rio Aguapei	166
Tabela 15: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 21 - rio do Peixe.....	170
Tabela 16: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 22 - Pontal do Paranapanema	174
Tabela 17: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 20	182
Tabela 18: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21	186
Tabela 19: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 22	191

Sumário

1– INTRODUÇÃO: delineamento gerais da pesquisa	21
1.1 - OBJETIVO GERAL	25
1.1.1 - Objetivos Específicos.....	25
1.2 - HIPÓTESE DE PESQUISA.....	25
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA DA PESQUISA: BASES CONCEITUAIS	28
2.1 - Bacia Hidrográfica: escoamento superficial e os sistemas fluviais.....	35
2.2 - Dinâmica do Escoamento Superficial: fatores atuantes	37
2.2.2 - Sistemas Fluviais	44
2.3 - Uso de Fertilizantes nos sistemas agroindustriais	47
2.4 - Fertilizantes: definição, produção e impactos ambientais.....	56
2.5 Fertilizantes para Cana de Açúcar	62
2.6 - Abordagens sobre Conectividade: breves considerações.....	66
2.5.1 - Conectividade Hidrológica	69
2.5.2 - Conectividade Sedimentológica.....	70
3 - Área de Estudo: aspectos históricos e do meio físico das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapei), UGRHI 21 (Bacia Hidrográfica do rio do Peixe) e UGRHI 22 (Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema)	73
3.1 - Clima e sistemas atmosféricos	76
3.2 - Geologia.....	77
3.3 - Geomorfologia	80
3.4 Pedologia.....	82
3.5 - Breve histórico de Ocupação	85
4 - MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	89
4.1 - Levantamento dos dados de Uso e Cobertura da Terra.....	89
4.2 – Recomendação de Adubação/Fertilizantes para Cana-de-Açúcar.....	92
4.3 – Modelagem do Escoamento Superficial: Estruturação dos Dados	94
4.3.1 Estimativa a contaminação por escoamento superficial pelo aporte de fertilizantes nas UGRHI 20, 21 e 22.	102
5 - Uso e Cobertura da Terra nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapei), UGRHI 21 (Bacia Hidrográfica	

do rio do Peixe) e UGRHI 22 (Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema): análise multitemporal.....	106
5.1 - Uso e Cobertura da Terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei...	110
5.2 - Uso e Cobertura da Terra da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 21 - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe.	118
5.3 - Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema ...	126
6 - Escoamento Superficial e Expansão Canavieira: análise nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 20, 21 e 22	134
6.1 - Estimativa de Escoamento Superficial na UGRHI 20 – Bacia Hidrográfica do rio Aguapei.....	137
6.1.1 - Escoamento Superficial na UGRHI 20 nas áreas com cana-de-açúcar	143
6.2 - Estimativa Superficial na UGRHI 21 – Bacia Hidrográfica do rio do Peixe.....	146
6.2.1 - Escoamento Superficial na UGRHI 21 nas áreas com cana-de-açúcar	151
6.3 - Escoamento Superficial na UGRHI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema.....	154
6.3.1 - Escoamento Superficial na UGRHI 22 nas áreas com cana-de-açúcar	160
7 Análise e recomendação de Fertilizantes (NPK) para adubação na cultura da cana-de-açúcar nas UGRHI 20 (rio Aguapei), UGRHI 20 (rio do Peixe) e UGRHI 21 (Pontal do Paranapanema)	163
7.1 Estimativa do Uso de NPK na Cultura da Cana- de- Açúcar na Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí.....	165
7.2 - Estimativa do Uso de NPK na Cultura da Cana- de- Açúcar na UGRHI 21 – Bacia Hidrográfica do Rio Peixe	169
7.3 - Estimativa do uso de NPK na cultura da cana- de- açúcar na UGRHI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema	173
8 - Estimativa do Aporte de Fertilizantes (NPK) na Cultura da Cana-de-Açúcar em UGRHIs dos rios Aguapeí, Peixe e Pontal do Paranapanema: conectividade e análise	177
8.1 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana -de – açúcar na (UGRHI 20) - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei	181
8.2 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana -de – açúcar na (UGRHI 21) - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe	185
8.3 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana -de – açúcar na (UGRHI 22) - Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema....	190

9 - Considerações Finais: da recomendação à fiscalização de fertilizantes.....	194
REFERÊNCIAS.....	197

1– INTRODUÇÃO: delineamento gerais da pesquisa

*“Do rio que tudo arrasta,
diz-se que é violento.
Mas ninguém chama violentas
às margens que o oprimem.”*
Bertolt Brecht

Aqui delineamos os principais passos para a elaboração da pesquisa de doutorado. O problema de pesquisa surge das reflexões sobre a relevância dos rios e das Bacias Hidrográficas, especialmente no que diz respeito ao comportamento dos canais fluviais diante do processo de modernização na produção agrícola, em relação à intensificação do uso de fertilizantes recomendado na monocultura da cana-de-açúcar.

A formulação do problema de pesquisa aqui apresentado faz parte do meu percurso de formação, como Geógrafa e Técnica em Agropecuária. Como professora e pesquisadora, minha preocupação não se limitava apenas à afinidade com a temática; era também uma excelente oportunidade para ampliar o conhecimento no campo intelectual, compreender as dinâmicas regionais e investigar novos processos para entender os sistemas produtivos agrícolas e suas interações com questões ambientais e hidrológicas.

O desenvolvimento da temática sobre a estimativa e aporte de fertilizantes nos canais fluviais foi construído através da pesquisa realizada pelo grupo "Território, Saúde Ambiental e Movimentos Socioterritoriais", desenvolvida de 2013 a 2018. Esta pesquisa, intitulada **A Expansão da Cana e Interações com a Rede Hidrográfica e Fragilidade Ambiental na Região do Pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil**, assim como o projeto **“Mapeamento e Análise do Território do Agrohídronegócio Canavieiro no Pontal do Paranapanema-São Paulo - Brasil: Relações de trabalho, conflitos e formas de uso da terra e da água, e a saúde ambiental”**, receberam apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP.

Esses estudos se propuseram a discutir questões sociais e ambientais, fornecendo subsídios para reflexões sobre o modelo atual de sociedade e a relação entre o homem e a natureza. Além disso, abordaram temas como o acesso à terra e à água, gestão de recursos hídricos e resíduos sólidos, tendo como principal referência a dinâmica do agrohídronegócio canavieiro e a saúde ambiental. Essas pesquisas foram conduzidas por pesquisadores do Centro de Estudos em Educação, Trabalho, Ambiente e Saúde (Ceetas)

da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus Presidente Prudente/SP.

A compreensão da estimativa de aporte de fertilizantes nas práticas agrícolas, especialmente na monocultura da cana-de-açúcar, é fundamental para entender a situação atual dos problemas ambientais adquiridos na contemporaneidade. Isso levanta um debate amplo e urgente diante dos impactos negativos que reverberam em todas as esferas da sociedade. É premente o debate ético frente às mudanças ambientais globais, especialmente considerando toda a cadeia econômica produtiva do agronegócio e suas vastas extensões de monoculturas, as quais têm impactos significativos nos solos e no meio ambiente.

A agricultura moderna tem se difundido com o discurso de eliminar a fome no mundo, conforme a proposta da Revolução Verde iniciada na década de 1950. Entretanto, o que temos assistido é o aumento de subsídios agrícolas no intuito de beneficiar grandes produtores rurais, por meio de créditos dados para a compra de maquinários e insumos agrícolas (agrotóxicos e fertilizantes) utilizados, principalmente, nas monoculturas (PERES e MOREIRA, 2003).

A utilização de produtos agroquímicos nos processos produtivos agrícola tem como finalidade a obtenção de altas produtividade. Tal fato tem contribuído para a intensificação de práticas agrícolas, com grande potencial de contaminação associado ao manejo inadequado dos solos, podendo provocar impactos adversos tanto ao meio ambiente, como na própria saúde humana. O uso destes elementos nocivos está entre as principais formas de poluição e toxidez da vida aquática (TUCCI, 2009; ROCHA et al., 2020; TUNDISI e TUNDISI, 2020). Este processo pode ocorrer diretamente, ou seja, quando determinada categoria de produto químico entra em contato com a água, ou ainda, de modo indireto, quando o elemento químico atinge primeiramente o solo e é conduzido pelas águas da chuva até algum corpo hídrico (TUCCI, 2009).

Neste contexto, uma das principais formas de compreender os processos hidrológicos e suas dinâmicas é analisando-os dentro das Bacias Hidrográficas. Conforme Guerra & Cunha (2019, p. 353), as bacias hidrográficas integram uma visão conjunto de comportamento das condições naturais e das atividades antropogênicas nelas desenvolvidas, uma vez que mudanças significativas em qualquer dessas unidades podem provocar alterações, efeitos ou impactos a jusante da bacia e nos fluxos energéticos de saída. Estes autores explicam que, as mudanças que ocorrem no interior das bacias de

drenagem podem ter causas naturais; no entanto, nos últimos anos, o homem tem contribuído para acelerar os processos modificadores e os desequilíbrios da paisagem.

A apropriação e a reconfiguração dos territórios pela sociedade têm conduzido a processos modificadores da paisagem, principalmente aqueles relacionados ao desenvolvimento da agricultura moderna. Essas modificações ou alterações na paisagem têm reflexos diretos nos corpos hídricos. Dessa forma, a análise de uso e cobertura da terra permite avaliar as mudanças provocadas pela ação antrópica ao longo do tempo e fornece informações importantes para o manejo eficiente dos recursos naturais, assim como das Bacias Hidrográficas.

Embora o desenvolvimento da agricultura não seja o único agente responsável pela qualidade da água ou pelos processos de contaminação, ela contribui de forma significativa para degradação dos corpos hídricos, como citado por Resende (2002). Conforme o autor, a aplicação, muitas vezes de forma inadequada de defensivos, fertilizantes e de resíduos provenientes da criação intensiva de animais pode comprometer os recursos hídricos. Assim, quando os processos de lixiviação de nutrientes são muito intensos, pode ocasionar fenômeno de eutrofização, que corresponde ao aumento de nutrientes, principalmente fosforo (P) e nitrogênio (N), produzindo uma quantidade excessiva de organismo como algas e bactérias, alterando a disponibilidade de oxigênio de água. Esse fato pode causar impactos em todo ecossistema aquático.

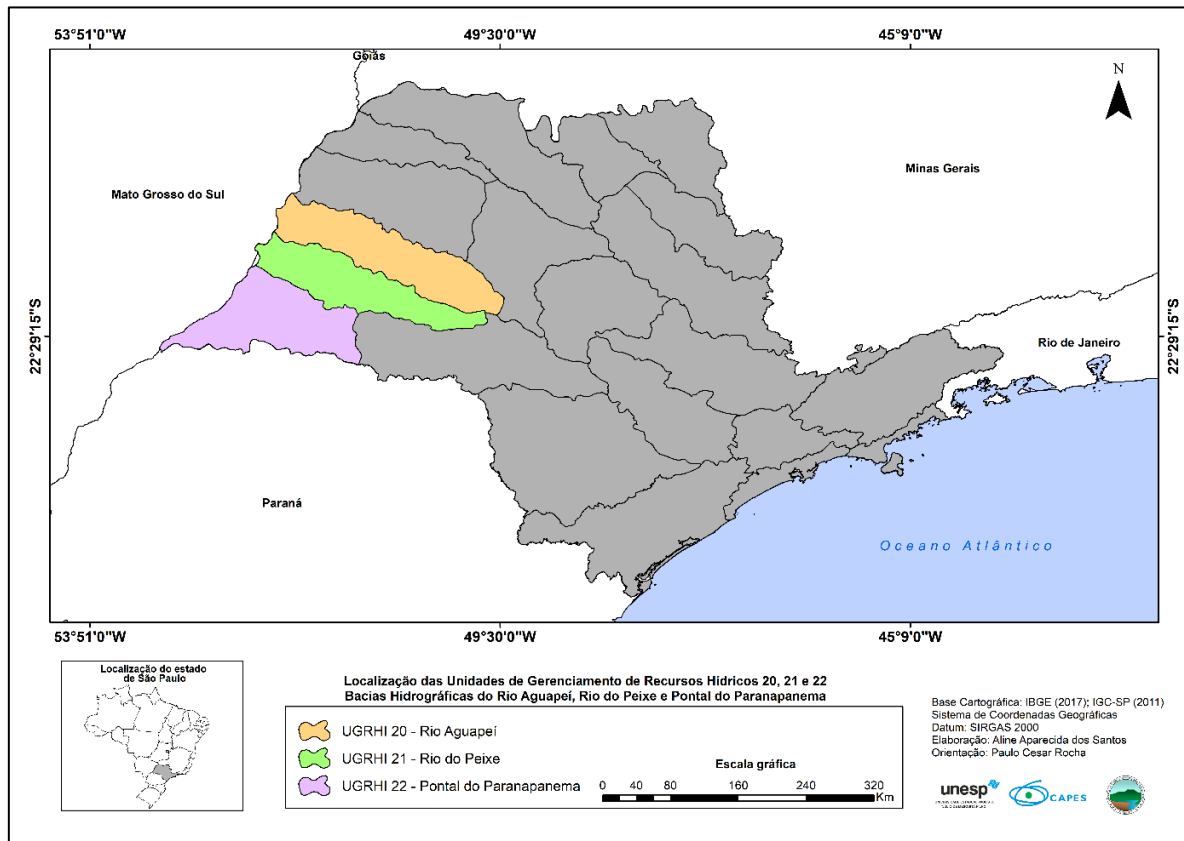
A prática da monocultura da cana-de-açúcar, juntamente com a intensa utilização de produtos químicos e o uso inadequado de insumos, como adubação intensiva e excesso de agrotóxicos, devido à dependência química característico a esse tipo de monocultura, quando aliada à falta de práticas conservacionistas, pode resultar em séria degradação ambiental (ROCHA, 2020, p. 150).

A produção de cana de açúcar está relacionada ao processo de formação e consolidação do Brasil, expandindo-se gradativamente ao longo da história econômica do país. A cultura da cana de açúcar passou por significativas transformações desde o período colonial, alternando períodos de prosperidade e crise, frequentemente relacionados a conjuntura econômica mundial (BAER, 1965; ANDRADE, 1994).

Assim, o trabalho de pesquisa nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) 20, 21 e 22, das Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí, Peixe e Paranapanema, respectivamente (Figura 1), foi baseado no intenso processo de exploração dos recursos hídricos, devido às atividades produtivas voltadas para a

monocultura da cana de açúcar e na estimativa do uso de fertilizantes durante o seu cultivo.

Mapa 1: Localização das UGRHIs 20, 21 e 22



Org: Santos (2020)

A dinâmica da produção canavieira no Estado de São Paulo é resultado de políticas de desenvolvimento econômico, como o PROALCOOL, programa lançado em 1975 pelo governo para a produção de álcool no Brasil. As usinas produtoras passaram a receber subsídios e financiamento públicos, o que proporcionou a instalação e consolidação do complexo agroindustrial sucroalcooleiro no Estado.

Diante desse cenário, a expansão da cultura da cana-de-açúcar no Oeste Paulista é reflexo das políticas de investimento em unidades sucroalcooleiras na região, principalmente impulsionadas pelo intenso crescimento da produção de açúcar e pela demanda de etanol no mercado interno e internacional. Assim, o cultivo da cana-de-açúcar foi avançando na região, transformando a paisagem e, consequentemente, impactando os canais fluviais.

1.1 - OBJETIVO GERAL

Analisar espacial e temporalmente, por meio de modelagem ambiental, o aporte de fertilizantes provenientes da cultura da cana de açúcar nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20 (Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí), 21 (Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe) e 22 (Pontal do Paranapanema), assim como os possíveis reflexos sobre a dinâmica hidrológica dos canais fluviais.

1.1.1 - Objetivos Específicos

- ✓ Analisar a evolução do uso e cobertura da terra na área de pesquisa e a expansão da cana de açúcar
- ✓ Analisar o escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos
- ✓ Avaliar a intensidade de uso de fertilizantes recomendados na monocultura da cana-de-açúcar
- ✓ Analisar e correlacionar o escoamento superficial e estimativa de aporte de fertilizantes nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

1.2 - HIPÓTESE DE PESQUISA

A tese proposta aqui, intitulada “**Estimativa de Aporte de Fertilizantes por Meio de Modelagem Ambiental em Canais Fluviais no Oeste Paulista**”, partiu da hipótese de que o uso expressivo de fertilizantes, devido à expansão do agronegócio canavieiro, associado às características do meio físico na cultura da cana-de-açúcar, pode causar degradação nos canais fluviais, considerando as vias de conectividade entre a bacia de drenagem e os canais fluviais

Desse modo, a hipótese foi abordada em quatro capítulos com resultados apresentados a partir dos dados analisados, conforme delineado no sumário. O primeiro capítulo destaca a fundamentação teórica e metodológica da pesquisa, destacando as bases conceituais que contribuíram para o estudo. Neste capítulo, são desenvolvidos conceitos fundamentais, como Bacia Hidrográfica, dinâmica do escoamento superficial e sistemas fluviais, fornecendo um quadro teórico para a análise. No decorrer do capítulo, é discutido o uso de fertilizantes na produção, com foco nos impactos ambientais associados ao cultivo da cana-de-açúcar. Esta seção examina como a aplicação de fertilizantes afeta a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas. Também são abordadas as teorias sobre conectividade, incluindo a conectividade hidrológica e conectividade sedimentológica, importantes para compreender a comportamento de água e transferência de sedimentos dentro da Bacia Hidrográfica. Essa análise integrada permite avaliar as interações complexas entre as práticas agrícolas e os processos naturais, proporcionando uma compreensão dos impactos ambientais resultantes da produção de cana-de-açúcar.

O terceiro capítulo da tese é dedicado à área de estudo, oferecendo uma análise dos aspectos históricos e do meio físico das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs). Essas unidades incluem a Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí (UGRHI 20), a Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe (UGRHI 21) e a Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema (UGRHI 22). São apresentados os climas e sistemas atmosféricos que influenciam essas regiões, seguidos por uma descrição da geologia local. Sobre a geomorfologia dessas bacias, são destacadas as características do relevo e os processos que moldam a paisagem. A pedologia é abordada para identificar os tipos de solo predominantes e suas implicações para o uso da terra. Ainda neste capítulo, é traçado um breve histórico de ocupação dessas áreas, destacando os principais processos de colonização e desenvolvimento que contribuíram para a configuração atual dessas bacias hidrográficas.

O quarto capítulo da tese, intitulado Materiais e Procedimentos Metodológicos, detalha os materiais e procedimentos utilizados na pesquisa. Foi realizado um levantamento e processamento dos dados de uso e cobertura da terra, para a compreensão das transformações na paisagem e suas implicações ambientais. Em seguida, são abordadas as recomendações de adubação e fertilizantes para o cultivo da cana-de-açúcar, baseadas em diretrizes agrônômicas. A modelagem do escoamento superficial é discutida, com a estruturação dos dados necessários para simular e prever os fluxos hídricos na

região. Esse processo inclui a coleta e análise de informações topográficas, pluviométricas e de uso do solo. Neste capítulo, é estimada a contaminação por escoamento superficial e a estimativa de aporte de fertilizantes nas UGRHI 20, 21 e 22. Esta estimativa envolve a aplicação de modelos hidrológicos que consideram tanto as características físicas da bacia quanto as práticas agrícolas, permitindo avaliar os impactos ambientais e propor medidas de mitigação.

O quinto capítulo da tese, aborda os resultados, examina a análise do uso e cobertura da terra, destacando a expansão da cana-de-açúcar e as transformações decorrentes das atividades humanas nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) 20, 21 e 22. Este capítulo está subdividido em três tópicos e descreve as variações nos diferentes tipos de uso e cobertura da terra, refletindo o processo histórico de ocupação no Oeste do Estado de São Paulo. Os tópicos apresentados evidenciam a predominância de atividades produtivas voltadas para o agronegócio canavieiro na região, demonstrando como a intensificação do cultivo de cana-de-açúcar tem influenciado significativamente as dinâmicas ambientais e socioeconômicas locais. A análise dos dados permite compreender as implicações da expansão agrícola para os recursos hídricos e a biodiversidade, além de fornecer subsídios para o planejamento sustentável do uso da terra.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA DA PESQUISA: BASES CONCEITUAIS

A Geografia é uma ciência que pertence tanto ao domínio das ciências da Terra quanto das ciências humanas (CONTI, 2014). Esta é uma discussão complexa sobre a essência da Geografia, dada a amplitude dessa ciência e as diversas possibilidades de análise e construção teórico-metodológica. Sem a intenção de ampliar o debate sobre definições que envolvem as complexidades do conhecimento científico geográfico, tentamos contextualizar a Geografia a partir de uma abordagem sistêmica e sua relação entre sociedade e natureza.

De acordo com Ross (2006), a Geografia não existe sem a sociedade, pois é com base na sociedade que as análises geográficas são elaboradas e aplicadas, fundamentando-se no conhecimento adquirido. Considerando a sociedade como objeto de análise e sua relação com a natureza, Conti (2014, p. 240) destaca que:

[...] a geografia tem por objeto próprio a compreensão dos processos interativos entre natureza e sociedade, produzindo, como resultado, um sistema de relações e de arranjos espaciais que expressam por unidades paisagísticas identificáveis em todas as escalas de grandeza”

Santos (1997, p. 61) partindo de uma construção intelectual para a definição de Geografia, propôs que “a geografia poderia ser construída a partir da consideração do espaço como um conjunto de fixos e fluxos”. Assim, Santos (1997, p. 62) passou a conceitualizar o espaço geográfico como “um sistema de objetos e um sistema de ações” que, para o autor:

[...] é formado por um conjunto indissociável, solidário e também contraditório de sistemas de objetos e sistemas de ações, não considerados isoladamente, mas como o quadro único no qual a história se dá. No começo era a natureza selvagem, formada por objetos naturais, que ao longo da história vão sendo substituídos por objetos fabricados, objetos técnicos, mecanizados e, depois, cibernéticos, fazendo com que a natureza artificial tenda a funcionar como uma máquina. (SANTOS, 1997, p. 63).

Ainda segundo Santos (1997, p. 63), o espaço na atualidade é um sistema de objetos e sistemas de ações que interagem. Os sistemas de objetos condicionam a forma como as ações se desenvolvem, enquanto os sistemas de ações levam à criação de objetos novos ou preexistentes. “É dessa maneira que o espaço encontra sua dinâmica e se

transforma”. Dessa forma, Santos vai delineando a definição do que é a Geografia e suas relações e inter-relações com a sociedade e a natureza.

A concepção de natureza tratada por Santos (1997) é de uma natureza artificial ou tecnificada. Na atualidade, no período “Técnico Científico Informacional”, não é possível pensar na natureza apenas do ponto de vista do que é natural ou dos processos que resultam exclusivamente de sua auto-organização (SUERTEGARAY, 2003; SANTOS, 1997).

A presença do homem concretamente como ser natural e, ao mesmo tempo, como alguém oposto a natureza, promoveu/promove profundas transformações na natureza mesma e na sua própria natureza. Isto exige uma reflexão efetiva sobre o que é natureza hoje. (SUERTEGARAY, 2003, p. 48)

Cassetti (1995, p. 28), ao tratar das questões ambientais, destaca que a Geografia permite a aproximação do ser humano com a natureza, rompendo a visão dualista e afirmando a unidade dialética. Para o autor, a Geografia, com suas amplas possibilidades de focar em estudos sobre fenômenos naturais e sociais, pode oferecer orientações científicas nas pesquisas ecológicas, conforme caracterizado por Guerasimov:

como o controle sobre as mudanças do meio ambiente originadas pela atividade do homem, ou como prognósticos geográficos científicos das conseqüências que implicam a influência de atividade econômica sobre o entorno, ou ainda como a otimização do meio nos sistemas técnico-naturais que o homem cria (CASSETI, 1995, p.29, *apud* GUERASIMOV, 1983).

Suertegaray & Nunes (2001) apontam que a busca de articulação entre natureza e sociedade não foi uma tarefa fácil para os geógrafos, já que construir uma ciência de articulação na época em que oficialmente a Geografia surgiu, a visão de ciência dominante privilegiava a divisão entre as ciências da natureza e da sociedade.

Embora as ciências de caráter integrativo tenham tentado se expressar nesse momento, a exemplo da Ecologia com Haeckel em 1886, e da Geografia desde antes com Humboldt e Ritter na década de 1950 a história de seus desenvolvimentos não é expressiva. Ao contrário da integração, o que prevaleceu no final do século XIX e durante mais da metade do século XX foi a fragmentação. Disto resultou algo comum aos geógrafos: o esfacelamento da Geografia e, em particular, de uma parte desta denominada Geografia Física em diferentes campos do conhecimento. A Ecologia, por sua vez, fica encoberta, sendo revigorada com o surgimento da idéia de Ecossistema com Tansley em 1935.(SUERTAGARAY & NUNES, 2001, p. 15)

A emergência das questões ambientais e a necessidade de uma análise integrada do meio físico, percorrendo os conceitos de Paisagem, Geossistemas e/ou Sistemas Físicos, contribuíram para uma articulação entre natureza e sociedade. A partir dos anos 70, a discussão ambiental, associada à Ecologia, abriu caminho para a relação entre os organismos e seu ambiente (SUERTEGARAY & NUNES, 2001).

Suertegaray (2018, p. 16) propõe uma reflexão sobre a ciência geográfica, destacando que a história da natureza e a história da sociedade perpassam pela socialização da natureza. Assim, "é tarefa da Geografia interpretar a contradição natureza x sociedade, entre outros temas, partindo da categoria da Totalidade". Para a autora, pensar a totalidade na perspectiva dialética possibilitou à Geografia uma importante contribuição para o debate/discussão na relação sociedade e natureza, principalmente ao considerar o trabalho como uma categoria analítica para compreender o espaço geográfico. "Nesse contexto, considerou o espaço geográfico como um produto das relações sociais e a paisagem como expressão da produção da natureza pela sociedade" (SUERTEGARAY, 2018, p. 44).

Neste contexto, apresentaremos aqui algumas breves considerações e concepções sobre a Teoria Geral dos Sistemas e ideias que sintetizam o pensamento sistêmico, fundamental no entendimento da dinâmica da natureza e de transformações no meio físico.

A Teoria Geral dos Sistemas é uma abordagem teórica importante que sustenta diversos estudos na área ambiental. Essa teoria foi desenvolvida pelo biólogo Ludwig von Bertalanffy, que, a partir de 1932, fez as primeiras aplicações na Termodinâmica e na Biologia (ARGENTO, 2008). Bertalanffy (1973) tinha como proposta uma linguagem científica única capaz de abranger todas as áreas do conhecimento, como biologia, engenharia, física, matemática, entre outras, "através da definição de componentes e estruturas funcionais inerentes a todos os campos da realidade, os quais servem como suporte para a sua compreensão, os sistemas" (VICENTE & PEREZ FILHO, 2003).

A necessidade de uma abordagem sistêmica surgiu da limitação da concepção mecanicista, a qual analisa apenas partes e se mostrou "insuficiente para lidar com os problemas teóricos, especialmente nas ciências bio-sociais, e com os problemas práticos apresentados pela tecnologia moderna" (BERTALANFFY, 1973, p. 28)."

A Teoria Geral dos Sistemas, proposta por Bertalanffy apresenta uma nova visão de mundo fundamentada na totalidade e na abrangência das partes, seguida de uma visão holística³ (CHRISTOFOLETTI, 2007).

Christofoletti menciona as perspectivas que envolvem a análise ecológica, geográfica e ambiental, considerando a complexidade dos sistemas. O autor aborda duas perspectivas, a holística e reducionista para compreender essa complexidade.

A abordagem holística sistêmica é necessária para compreender com as entidades ambientais físicas, por exemplo, expressando em organizações espaciais, se estruturam e funcionam como diferentes unidades complexas em si mesmas e na hierarquia de alinhamento. Simultânea e interativamente há necessidade de focalizar os subconjuntos e partes componentes em cada uma delas, a fim de melhor conhecer seus aspectos e as relações entre eles. A abordagem reducionista, também se enquadra como básica na pesquisa dos sistemas ambientais, sem contraposição com a holísticas (CHRISTOFOLETTI, 2000 p.01)

Morin (1977), ao analisar a complexidade dos sistemas, destaca que a explicação reducionista de um todo complexo, nas propriedades dos elementos e nas leis gerais que regem esses elementos, desarticula, desorganiza, decompõe e simplifica aquilo que constitui a própria realidade do sistema: a articulação, a organização e a unidade complexa. Para o autor, dessa forma, o reducionismo ignora as transformações que ocorrem nas partes, desconsidera o todo enquanto um todo e desconsidera as qualidades emergentes (concebidas como meros efeitos de ações conjugadas), bem como os antagonismos latentes ou virulentos.

Por outro lado, a perspectiva sistêmica defende a interação entre os elementos, não de forma isolada, mas buscando analisar os detalhes para compreender o todo, o que torna a Teoria Geral dos Sistemas multidisciplinar dentro do campo do conhecimento científico. Assim, Bertalanffy (1973), ao abordar a concepção sistêmica, salienta que

É necessário estudar não somente partes e processos isoladamente, mas também resolver os decisivos problemas encontrados na organização e na ordem que os unifica, resultante da interação dinâmica das partes, tornando o comportamento das partes diferentes quando estudo isoladamente e quando tratado no todo (BERTALANFFY, 1973; P.53)

³ Sobre o holismo, Christofoletti (2000, p.04) destaca que o termo foi utilizado por Jan Smuts, um acadêmico sul-africano, em 1926, que inicialmente foi sufocado por ideias envolvendo tanto o misticismo como o vitalismo, já que este surgia como um conceito da metafísica. Posteriormente, o termo foi resgatado e vem sendo aplicado em termos componentes e relações internas de unidades inseridas em seus níveis hierárquicos.

Os sistemas apresentam duas características importantes: a entrada (*input*) e a saída (*output*), simultaneamente. A entrada é constituída pelo que o sistema recebe, ou seja, o que é fornecido a ele. O rio recebe água e sedimentos das vertentes, bem como fontes de poluição difusa e pontual; uma indústria recebe matéria-prima para seu processo produtivo; a Terra recebe energia solar; um animal recebe alimentação. Cada sistema é abastecido por tipos específicos de entrada. As entradas que um sistema recebe sofrem transformações internas e, posteriormente, são direcionadas para fora. Todo *input* de um produto no sistema representa um tipo de saída ou *output* (CHRISTOFOLETTI, 1979).

Os sistemas isolados são caracterizados como 'aqueles que, dadas condições iniciais, não sofrem mais nenhuma perda nem recebem energia ou matéria do ambiente que os circundam (CHRISTOFOLETTI, 2000, p.05). Já os sistemas não isolados trocam matéria e energia com o meio circundante, podendo ser subdivididos em sistemas fechados e sistemas abertos. Os sistemas fechados são aqueles nos quais ocorre troca de energia (recebimento e perda), mas não de matéria. Os sistemas abertos são aqueles onde constantemente ocorrem trocas de energia e matéria, tanto em termos de recebimento quanto de perda. Os sistemas abertos são mais comuns, como as bacias hidrográficas, as vertentes, as áreas urbanas, as indústrias, entre outros (CHRISTOFOLETTI, 2000).

Chorley e Kennedy (1957) citados por Christofolletti (2000) propõem uma classificação estrutural distinguindo onze tipos de sistemas, sendo quatro mais relevantes para a Geografia Física e para análise ambiental: sistemas morfológicos, que envolvem propriedades físicas correlacionadas a formas ou questões geométricas (comprimento, altura, largura, declividade, granulometria, densidade e outras); sistemas em sequência ou encadeados, formados por cadeias de subsistemas, com variáveis de grandeza e localização espacial relacionadas a matéria e energia; sistemas de processos-respostas, caracterizados pela combinação dos sistemas morfológicos e sistemas em sequência, representando processos e formas resultantes, com foco na relação entre processos e formas; e sistemas controlados, em que há influência humana sobre os sistemas de processos-respostas.

Christofolletti (2000) conceitua a bacia hidrográfica como uma unidade espacial delimitada para estudos ambientais com uma abordagem sistêmica e integrada. Ao delimitar um sistema, sua definição confere um fechamento, fundamental para a investigação da estrutura e do comportamento, viabilizando sua identificação

Santos (2004) destaca a importância dos estudos sistêmicos em bacias hidrográficas:

[...] o arcabouço teórico dos sistemas e o conceito de organização se adaptam perfeitamente ao estudo de bacias hidrográficas e, faz com que os analistas do ambiente reconheçam o fato de que as partes dessa paisagem não são independentes, que a bacia hidrográfica, dentro de certos limites, constitui-se num todo interconectado, expressa espaço-temporalmente através de padrões, arranjos morfológicos e estruturais complexos

Para Rodriguez *et al.* (2011), a análise da bacia hidrográfica, a partir de uma concepção sistêmica, sustentável e complexa, consiste em compreender e considerar as relações espaço-temporais dos recursos hídricos como elementos essenciais para o funcionamento da biosfera, limitados e emergentes na complexidade geográfica.

Pesquisas integradas e sistêmicas em bacias hidrográficas devem considerar os aspectos naturais que envolvem a água, tanto em relação à qualidade quanto à quantidade, incluindo mudanças nas perdas e modificações nas vazões e intensidades dos fluxos hídricos, sejam eles atmosféricos, superficiais ou subterrâneos (ROSS, 2019). O autor aponta que:

[...] análise integrada das bacias hidrográficas se compõem pelas componentes da geodiversidade, ou seja do relevo, dos solos, da base geológica, recursos hídricos, climas e suas interações com os componentes da biodiversidade ou seja da flora e fauna, quer sejam terrestre, aérea ou aquática e suas interdependências e como estas variáveis combinadas são o suporte que dão base para a sócio-diversidade dos humanos que habitam os diferentes ambientes, tanto na perspectiva econômica, como cultural e social. (ROSS, 2019. P. 33)

A partir desse delineamento teórico, a Teoria Geral dos Sistemas compreende uma teoria totalizante, capaz de integrar as ciências, e na Geografia Física, de forma geral, essa teoria e a ideia de totalidade apresentam-se nos estudos Geossistêmicos, seguido da Ecodinâmica e abordagens integradas.

Dessa forma, sob uma perspectiva da relação morfogênese/pedogênese, em 1977 nasce a Ecodinâmica, proposta por Tricart, publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e tornou-se uma das referências mais significativa na compreensão da relação “natureza e sociedade por uma abordagem integrada, sobretudo em questões da natureza sob os efeitos da sociedade” (ROSS, 2006, p. 39).

Tricart (1977) apresenta que os objetivos da ecologia é estudar os seres vivos em suas relações mútuas e com o meio ambiente, destacando a relação do homem com o ecossistema e sua reação diante dos processos de interação/modificação.

O homem participa dos ecossistemas em que vive. Ele os modifica e, por sua vez, os ecossistemas reagem determinando algumas adaptações do Homem. As interações são permanentes e intensas, qualquer que seja o nível de desenvolvimento técnico da sociedade humana. (TRICART, 1977, p. 17).

Destaca ainda, que:

Desde a lenta aparição do Homem como espécie animal, os ecossistemas foram por ele modificados, assim como ele foi influenciado em seu desenvolvimento físico, e até intelectual, pelo meio ambiente, ou seja, pelos demais componentes do ecossistema do qual participa. (TRICART, 1977, p. 17).

Tricart (1977, p. 17) afirma que "no momento atual, já não existe nenhum ecossistema que não seja modificado pelo homem, apenas as modificações variam em natureza e importância." O autor destaca ainda que a dinâmica do meio ambiente dos ecossistemas é tão importante para a conservação e o desenvolvimento dos recursos ecológicos quanto a dinâmica das próprias biocenoses.

Tricart (1977, p. 33) destaca como as transformações antrópicas podem afetar a cobertura vegetal, o que consequentemente compromete o valor econômico da água, a pedogênese e o regime dos rios.

- a energia da radiação que alcança o solo e, por sua vez, as temperaturas do solo, com efeitos sobre a respectiva flora e fauna, a mineralização do húmus, a nitrificação, etc., ou seja, a fertilidade deste solo.
- a queda de detritos vegetais na superfície do solo e, em consequência, a nutrição dos organismos redutores, a estrutura do solo e sua resistência à erosão pluvial, e, por conseguinte, o regime hídrico e a reciclagem dos elementos minerais pelas plantas;
- a intercepção das precipitações, ou sem tempo de concentração, e a energia de impacto das gotas, que determinam a possibilidade de erosão pluvial. Novamente chegamos assim ao regime hídrico.
- a proteção do solo contra as ações eólicas, capazes de intensa degradação das terras; (TRICART, 1977, p. 33)

Assim, estudar a organização do espaço é uma ação que se insere na dinâmica natural para corrigir certos aspectos desfavoráveis e facilitar a exploração dos recursos ecológicos oferecidos pelo meio (Tricart, 1977, p. 35), que estabelece uma classificação ecodinâmica dos meios morfodinâmicos: estáveis, intermediários ou de transição e fortemente instáveis. Para o autor, a "noção de estabilidade aplica-se ao modelado à interface atmosfera-litosfera". A estabilidade da interface atmosfera-litosfera contribui para gerar modelados caracterizados pela litologia, clima, pedogênese, morfogênese e processos ecológicos.

Nos meios estáveis, observa-se o predomínio dos processos pedogenéticos sobre a morfogênese. São considerados ambientes com evolução lenta, morfodinamicamente estáveis e apresentam algumas características básicas: cobertura vegetal densa o suficiente para frear processos mecânicos da morfogênese e dissecação moderada, resultando em baixo potencial erosivo.

Os ambientes intermediários ou de transição caracterizam-se pelo equilíbrio entre a morfogênese e a pedogênese. No entanto, a pedogênese pode predominar sobre a morfogênese em determinados momentos, configurando um ambiente de transição com tendência à estabilidade. Quando ocorre o predomínio da morfogênese, observa-se uma tendência à instabilidade nesses ambientes de transição.

Os meios fortemente instáveis são caracterizados pelo predomínio dos processos morfogenéticos sobre o sistema natural em relação aos processos pedogenéticos, apresentando processos erosivos acelerados que podem comprometer os recursos naturais. Nesses ambientes, "a degradação antrópica se acrescenta às causas naturais, particularmente eficazes nas regiões acidentadas onde o clima impõe fatores limitantes severos à vegetação" (TRICART, 1977, p. 53)

2.1 - Bacia Hidrográfica: escoamento superficial e os sistemas fluviais

A bacia hidrográfica é considerada uma unidade fisiográfica complexa, um compartimento geográfico natural definido topograficamente e drenado por um curso de água principal e seus afluentes. Por meio de um processo natural de captação da água da precipitação, direciona o escoamento para um único ponto de saída, carreando sedimentos e materiais dissolvidos, resultado do uso e cobertura da terra na área da bacia (GUERRA, 1987; TUCCI, 1997; VITTE & GUERRA, 2004; MARQUES e SOUZA, 2005; PIRES; SANTOS; DEL PRETTE, 2008).

Espíndola et al. (2000) afirmam que a bacia hidrográfica corresponde a um sistema biofísico e socioeconômico, integrado e interdependente, abrangendo atividades agrícolas, industriais, comunicações, serviços, recreação, formações vegetais, nascentes, córregos, lagoas, represas e todos os habitats e unidades da paisagem.

Coelho Neto (1998, p. 98), a partir de uma análise hidrogeomorfológica, define que "a bacia de drenagem é uma área da superfície terrestre que coleta água, sedimentos e materiais dissolvidos e os direciona para um ponto comum em um canal fluvial."

Para Christofolletti (1980, p. 81), a bacia hidrográfica ou de drenagem é "definida como a área drenada por um determinado rio ou sistema fluvial", composta por um conjunto de canais de escoamento inter-relacionados.

A bacia hidrográfica constitui um sistema natural representado e integrado pelos leitos fluviais ou canais de drenagem, sendo a água seu principal referencial. No entanto, ela não se torna automaticamente um único sistema ambiental, seja em relação aos aspectos físicos (relevo, solos, subsolos, flora e fauna) ou em aspectos de origem antrópica, ao considerarmos as atividades econômicas, políticas e administrativas (ROSS & DELL PRETTE, 1998)

De acordo com Santos (2004, p.40)

“O critério de bacia hidrográfica é comumente usado porque constitui um sistema natural bem delimitado no espaço, composto por um conjunto de terras topograficamente drenadas por um curso d’água e seu afluentes, onde as interações, pelo menos físicas, são integradas e, assim, mais facilmente interpretadas. Esta unidade territorial é entendida como uma caixa preta, onde os fenômenos e interações podem ser interpretados, a priori, pelo *input* e *output*”.

Do ponto de vista do planejamento, a bacia hidrográfica é caracterizada pelo recurso hídrico, seja para irrigação, navegação, abastecimento público ou industrial. Além disso, a necessidade de considerar aspectos relacionados aos usos múltiplos da água faz parte da abordagem do planejamento, visando resolver conflitos entre os usuários, já que o uso dos recursos hídricos resulta de uma interação complexa de fatores naturais, econômicos, sociais e políticos, sendo a água o ponto central dessas complexidades ambientais (PIRES; SANTOS; DEL PRETTE, 2008).

Ross & Del Prette (1998) explicam que, dada a importância da água como recurso natural na sociedade industrial moderna, a bacia hidrográfica passa a ser frequentemente utilizada como referência geográfica para a adoção de práticas de planejamento e para o manejo e aproveitamento dos recursos naturais.

De acordo com Guerra & Cunha (2019, p. 353), as bacias hidrográficas integram uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades antropogênicas nelas desenvolvidas. Mudanças significativas em qualquer uma dessas unidades pode provocar alterações, efeitos ou impactos a jusante da bacia, assim como

nos fluxos energéticos de saída. Os autores salientam que as mudanças que ocorrem no interior das bacias de drenagem podem ter causas naturais, mas, nos últimos anos, o ser humano tem contribuído para acelerar os processos modificadores e os desequilíbrios da paisagem.

2.2 - Dinâmica do Escoamento Superficial: fatores atuantes

A compreensão dos processos hidrológicos é fundamental para diversas áreas do conhecimento, como destacado por Moraes (2003, p. 61). Esses processos referem-se à dinâmica da água na superfície terrestre, incluindo desde a precipitação atmosférica até a sua distribuição, armazenamento, escoamento e interação com o meio ambiente.

[...] O tempo de residência da água nos diversos compartimentos da hidrosfera influencia, entre outros, a disponibilidade hídrica, a ocorrência de inundações e a dinâmica de elementos, nutrientes e poluentes. A importância dessas inter-relações é responsável pelo crescente interesse em estudos hidrológicos e por consequência dos processos através dos quais a água chega nos rios.

Os estudos hidrológicos são considerados interdisciplinares, despertando o interesse de diversas áreas no campo dos recursos naturais devido à necessidade de prever não apenas os processos hidrológicos, mas também outros fenômenos correlacionados, como dinâmicas de nutrientes, estabilidade das encostas, qualidade da água e problemas ambientais causados pela entrada de águas pluviais nas encostas (COELHO NETTO, 1994, p. 95).

De acordo com Tucci (2004), a hidrologia é considerada uma ciência interdisciplinar com uma evolução significativa devido ao crescimento dos problemas associados à ocupação das bacias, ao aumento da utilização da água e aos impactos no ambiente global. A utilização de pesquisas hidrológicas em recursos hídricos busca compreender o comportamento físico e o aproveitamento da água na bacia hidrográfica, quantificando os recursos hídricos no tempo e no espaço e avaliando o impacto das modificações na bacia hidrográfica sobre os processos hidrológicos (TUCCI, 2004, p. 26).

Nesse sentido, destaca-se que a precipitação desempenha um papel crucial no ciclo hidrológico, influenciando as condições ecológicas e geográficas de uma região específica, como mencionado por Coelho Neto (1998). A precipitação é definida nos

estudos hidrológicos como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Devido à sua capacidade de gerar escoamento superficial, a chuva é considerada o tipo de precipitação mais relevante para a hidrologia (BERTONI e TUCCI, 2004).

As precipitações podem ter origem em mecanismos de abrangência regional ou local. As chuvas de origem regional resultam do encontro de massas de ar com características físicas distintas, geralmente associadas à entrada de massas polares em áreas de ar mais quente e úmido, correspondendo ao avanço das chamadas frentes frias. É importante ressaltar que a magnitude dos efeitos pluviométricos resultantes da entrada de uma frente fria depende das diferenças de temperatura entre as massas de ar e da quantidade de umidade presente na massa de ar sob perturbação (COELHO NETO, 1998). A autora enfatiza os mecanismos locais que podem influenciar esses efeitos, como: a) movimentos convectivos do ar resultantes de áreas com temperaturas mais elevadas em comparação com os arredores; e b) elevação dos fluxos de ar devido à existência de barreiras orográficas

Dunne e Leopold (1978), conforme referenciados por Coelho Neto (1998), ressaltam a relevância de registros extensos e padronizados para avaliar a variabilidade nos totais de precipitação, seja diária, mensal ou anual, possibilitando uma análise mais precisa. A avaliação da frequência da precipitação permite a identificação variações pluviométricas, incluindo eventos regulares, moderados e extremos

A distribuição espacial e temporal das chuvas está intimamente relacionada com correntes marinhas, zonas de temperatura, ventos oceânicos e dinâmicas da baixa atmosfera (MENDONÇA & DANII-OLIVEIRA, 2007). Compreender a distribuição das chuvas contribui para a compreensão das dinâmicas dos recursos naturais, bem como para entender a disponibilidade e potencialidades hídricas regionais.

Conforme Mendonça & Dании-Oliveira (2007, p. 146), a distribuição e a variabilidade das chuvas são influenciadas pela atuação sazonal dos sistemas convectivos em macro e mesoescala, em particular a frente polar atlântica (FPA). Além disso, Suguio & Bigarella (1990) destacam que a distribuição irregular das chuvas no Brasil tem um papel determinante nas características hidrológicas do sistema fluvial

A distribuição espacial e temporal da precipitação é um fenômeno climático considerado complexo devido às variações ao longo dos anos e às alterações nos regimes mensais (BOIN, 2000). Essas irregularidades estão associadas à dinâmica atmosférica regional, caracterizada no Sudeste por um verão com "predomínio das correntes de leste,

originadas pelo deslocamento dos ventos alísios, materializada na baixa troposfera pela massa tropical atlântica". Enquanto no período primavera/verão, a frente fria é provocada por anticiclones migratórios polares atuando na região. "No outono/inverno, os bloqueios das frentes tornam-se mais frágeis e o anticiclone polar avança para latitudes mais baixas" (SANT'ANNA NETO, 2005, p. 48-49). A evolução e atuação da massa polar na região contribuem para temperaturas mais frias.

De acordo com SANT'ANNA NETO (2005, p. 50), a instabilidade na região Sudeste resulta em dinâmicas complexas

Além dos sistemas atmosféricos da baixa troposfera, com as massas de ar e as frentes, outros sistemas são responsáveis por perturbações e instabilidades. As ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) resultantes do corredor de umidade de massa equatorial continental, no sentido noroeste/sudeste, alimentam e intensificam a perturbação frontal, notadamente nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Além destes, também atuam na região as linhas de instabilidade do ar tropical e os Complexos Convectivos de meso-escala (CCM's). As linhas de instabilidade ocorrem principalmente, no encontro do ar úmido do oceano com o ar seco do continente e os CCM's, da depressão do Chaco, sobre o oeste paulista.

Conforme mencionado por Grimm (2009), a variabilidade interanual do clima no Brasil desempenha um papel significativo na variação da precipitação em diversas regiões. Os fenômenos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS) são reconhecidos como a principal fonte de variabilidade climática interanual em escala global

[...] uma oscilação acoplada do oceano-atmosfera, que produz alterações na Temperatura da Superfície do Mar (TSM), na pressão, no vento e convecção tropical, principalmente no oceano, com reflexos em muitos lugares do planeta, incluindo o Brasil (GRIMM, 2009. p. 353).

Assim, torna-se evidente que as anomalias nas Temperaturas da Superfície do Mar (TSM) podem impactar o regime de precipitação e as flutuações de temperatura, afetando, por conseguinte, a dinâmica dos canais fluviais. Durante o processo de precipitação, parte da água é interceptada pela vegetação, outra parte se infiltra no solo e uma fração adicional é retida de acordo com a morfologia do terreno. De acordo com Pinto *et al.* (1973), o volume de água transportado pelos canais fluviais é composto tanto pelo escoamento superficial quanto pelo influxo de água subterrânea, também conhecido como escoamento de base. No entanto, é importante salientar que o escoamento superficial

resultante das precipitações desempenha um papel significativo no aumento do fluxo nos canais fluviais.

Assim, torna-se evidente que o escoamento superficial é um dos elementos mais cruciais no ciclo hidrológico, devido ao seu potencial para desencadear processos de erosão, sedimentação dos cursos d'água e inundações. Consequentemente, esse fenômeno tem sido alvo de intensas pesquisas e modelagens no campo da hidrologia. O escoamento superficial ocorre quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração da água no solo ou quando a capacidade de absorção do solo é ultrapassada (PRUSKI et al., 2003)

O escoamento superficial (*runoff*) faz parte do ciclo hidrológico e trata da água resultante das precipitações, movendo-se pela gravidade sobre a superfície do solo. Ele consiste no volume de água proveniente da precipitação sobre solo saturado ou superfícies impermeáveis, fluindo superficialmente ao longo das linhas de maior declive em direção ao curso d'água mais próximo, desembocando nos oceanos. Sua duração está praticamente associada à duração da precipitação (TUCCI, 2000).

Na bacia hidrográfica, o escoamento superficial pode ser gerado por dois mecanismos distintos: (1) escoamento por exceder a capacidade de infiltração (escoamento superficial hortoniano); e (2) escoamento por saturação (escoamento dunniano), conforme mencionado por Santos (2009).

Mendiondo e Tucci (1997) mencionam que existem uma combinação de mecanismos que atuam nas encostas e, portanto, nas bacias hidrográficas proposto por Dunne (1978) que permite esboçar elementos dominantes na geração do escoamento, tais como: clima, solos, topografia, vegetação e uso do solo, conforme pode ser observado na figura 1

Figura 1: Processos de escoamento e condicionantes principais



Fonte: Dunne (1983) *apud* Mendiondo e Tucci (1997)

Mendiondo e Tucci (1997) citam que o escoamento como excedente de um mecanismo de infiltração (ESI) foi introduzido por Horton em 1933 de forma bastante simples:

[...] a superfície do solo divide a chuva numa parte que rapidamente é convertida em escoamento superficial até chegar aos cursos d'água naturais, a outra parte é introduzida no solo e assim, de forma gradual, escoar através da matriz do solo até o canal ou perde-se por evapotranspiração para a atmosfera [...]. A infiltração divide a precipitação em duas partes, que posteriormente prosseguem por diferentes caminhos através do ciclo hidrológico. Uma parte vai alimentar os rios como escoamento superficial durante os eventos de precipitação, a outra vai inicialmente para o solo e daí, vai alimentar os rios como escoamento subterrâneo ou retorna para a atmosfera pelos processos de evaporação. Portanto, o solo atua como uma superfície de separação e o autor acredita que diversos problemas hidrológicos são simplificados se cada parte da precipitação prosseguir seu percurso assim dividida, separadamente (HORTON, 1933. P. 445).

A abordagem Hortoniana, apresentava a caracterização “de “sistema”, delimitava os processos externos como precipitação, a evaporação e o escoamento. Por outro lado, é introduzida a noção de “fluxos” ou taxas, de entrada (precipitação) como de perda Hortoniana (infiltração).”, de acordo com Mendiondo e Tucci (1997. p.82)

Dessa forma, Santos (2009) ressalta que Horton (1933) propôs um modelo hidrológico de encostas baseado na relação infiltração-escoamento:

[...] o modelo clássico de hidrologia de encostas por meio da teoria infiltração-escoamento, onde a superfície do solo atua como um filtro

capaz de separar a precipitação em dois componentes básicos. O escoamento direto produzido basicamente pelo escoamento superficial que provêm de todas as partes da bacia, ocorrendo toda vez que a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração do solo, e a água que infiltra no terreno e alimenta o lençol freático, para depois chegar ao rio na forma de escoamento de base. (SANTOS, 2009, p. 17)

Moraes et al. (2002, p. 61) afirmam que o escoamento superficial Hortoniano, definido por Horton (1973), "ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo". Os autores ressaltam que, de acordo com a hipótese de Horton (1973), o escoamento superficial é gerado em toda a área da bacia hidrográfica.

Siefert & Santos (2012, p. 231), considerando as observações de Chow et al. (1994) e Hornberger et al. (1998), destacam que atualmente, a teoria do "escoamento superficial hortoniano" refere-se ao processo ocorrido em perfis de solo alterados pela ação antrópica ou em áreas com baixa densidade de vegetação, onde as taxas de infiltração são inferiores à intensidade da chuva.

Durante a década de 60, uma hipótese alternativa associada ao escoamento superficial surgiu nos trabalhos de Cappus (1960), Hewlett & Hibbert (1967), Tsukamoto (1963) e Dunne & Black (1970), introduzindo o conceito de "área variável de contribuição/afluência" (AVA), na qual o processo é observado em áreas de escoamento superficial por saturação dominante, conforme afirmam Moraes et al. (2002) e Siefert & Santos (2012).

O termo "área variável de contribuição", segundo Dunne & Black (1970) citado por Moraes et al. (2002), refere-se à natureza variável dessa área, tanto temporal quanto espacialmente, influenciada pela umidade da bacia de drenagem e pela dinâmica de cada evento de precipitação.

Esses mecanismos distribuem a água vinda da precipitação, e sua resposta rápida ou lenta na alimentação do canal principal depende, principalmente, das condições iniciais de umidade, da textura, estrutura e profundidade do solo, da cobertura vegetal, da intensidade da chuva e da topografia superficial e do leito rochoso. (MORAES et al, 2002, p. 61)

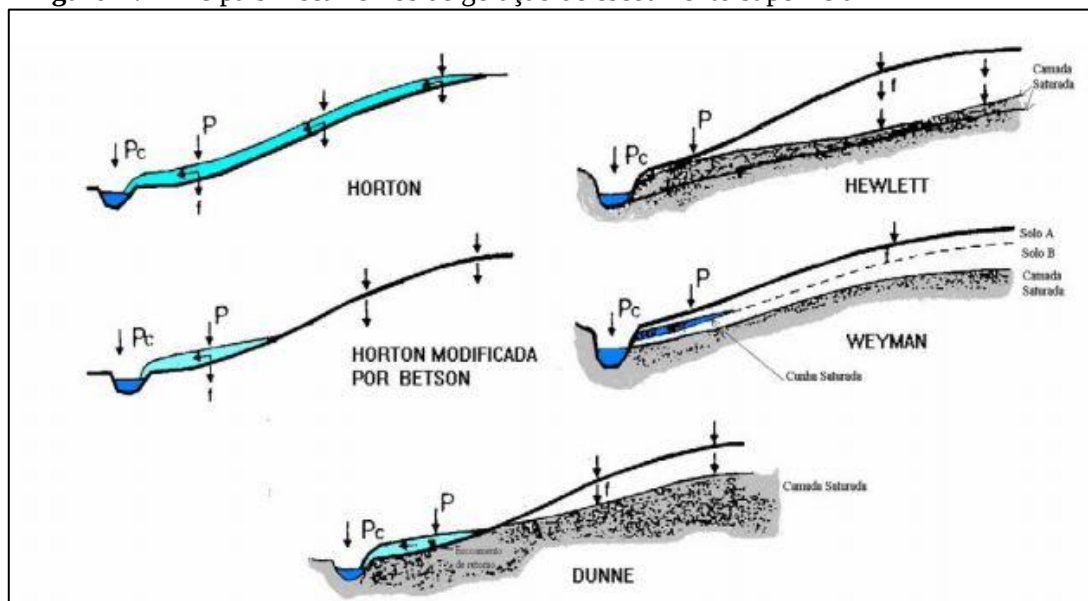
De acordo com Santos (2009):

O conhecimento deste processo de geração de escoamento superficial chamado de "área parcial de contribuição" (*partial source area*) levou naturalmente a constatação de que o fluxo subsuperficial, a chuva e a umidade inicial do solo influenciam a expansão e a contração da porção saturada e da rede de drenagem da bacia, originando assim o conceito de "área variável de afluência" – AVA (SANTOS, 2009, p. 86).

Mendiondo & Tucci (1997, p. 83) apontam que nas áreas saturadas, de acordo com as suposições de Hewlett e Hibbert (1963 e 1967), posteriormente por Weyman (1970) “mostram que até nas chuvas intensas, toda a precipitação nas partes altas da bacia se infiltrava dentro do solo, aumentando o teor de umidade local e transmitindo saturação para as áreas de jusante”. Nessa perspectiva, conforme os autores às área saturadas, atuam como fonte de “escoamento rápido” e são “contíguas” aos rios naturais, alimentadas pela chuva e pelo fluxo subsuperficial das áreas a montante.

A figura 2 apresenta os principais mecanismos de geração de escoamento na escala da vertente, mencionados pelos autores supracitados e que representam o processo de desenvolvimento da ciência no campo da hidrologia.

Figura 2: Principais mecanismos de geração de escoamento superficial



Fonte: Beven (1986) adaptado de Mendiondo & Tucci, 1997.

Siefert & Santos (2012) consideram que o escoamento superficial em áreas saturadas resulta de uma porcentagem variável da área da bacia hidrográfica, que passa por um processo de contração (período de estiagem) ou expansão (período chuvoso), de acordo com a intensidade da precipitação e umidade antecedente do solo.

Setvaux e Latrubesse (2017, p. 52) considerando as características dos solos, os processos de precipitação, percolação e saturação total da camada superficial superior solo, “a água pode voltar a aflorar na superfície sob a forma de fluxo superficial de saturação ou fluxo de retorno”. Para os autores, o afloramento do fluxo promove um

aumento repentino da vazão do fluxo hortoniano, contribuindo para os processos de erodibilidade. Dessa forma, “o fluxo hortoniano e o fluxo superficial de saturação são dois importantes fatores na hidrodinâmica da vertente e promovem, a formação e incisão dos canais de drenagem” (SETVAUX & LATRUBESSE 2017, p. 52).

Ainda sobre a dinâmica do fluxo nas vertentes, Setvaux e Latrubesse (2017) salientam que o tipo e a duração da precipitação, a capacidade de infiltração dos solos, o clima e a vegetação são fatores que contribuem para caracterizar o tipo de fluxo.

Botelho & Silva (2020, p. 161) salienta que a água da chuva ao atingir a superfície do solo, com exceção de parte da água que evapora, dois caminhos possíveis podem acontecer: infiltração e escoamento superficial. Segundo os autores, a quantidade de água que irá escoar pela superfície, “dependerá de diversos fatores, tais como: volume e intensidade da chuva, características das encostas e propriedades dos solos”, destacando a importância das encostas para o escoamento superficial.

[...] as características das encostas, tais como declividade e forma, e, rugosidade do terreno, podem ampliar ou diminuir a velocidade do escoamento superficial. Encostas com maior declividade aumentam o volume e a velocidade da enxurrada, pois não há tempo suficiente para que o solo absorva a quantidade de água.

Nessa sequência, a função da encosta está na concentração ou dispersão dos fluxos de água. Encostas côncavas concentram maior volume de água, proporcionando a saturação dos poros, reduzindo a capacidade de infiltração do solo, acelerando o processo de escoamento superficial. Enquanto, as encostas convexas atuam como zonas dispersoras de água, devido à maior declividade, aumento a velocidade do escoamento, de acordo Botelho & Silva (2020).

2.2.2 - Sistemas Fluviais

O termo fluvial vem da palavra latina *fluvius*, um rio. Porém, quando levado à interpretação mais ampla, como de sistema, envolve não apenas os canais fluviais, mas toda a rede drenagem, às áreas de depósitos, as zonas de descarga (volume de água), os sedimentos transportados, a morfologia dos canais, a morfologia do relevo e as atividades antrópicas (uso e cobertura da terra), além das diferentes possibilidades de análise considerado as escalas temporais e espaciais de atuação no sistema (PIÉÂGAY & SCHUMMM, 2003; SCHUMMM, 2005).

O sistema fluvial é um sistema aberto caracterizado por uma combinação de fatores complexos, conexões, inter-relações e trocas de energia e matéria, entre os demais sistemas que os circundam. A entrada e saída de material e energia na forma de fluxo e material sedimentar são chamados de fluxos hidrossedimentológicos, que servem como parâmetro de indicação e análise de equilíbrio desse sistema, pois sua dinâmica pode gerar formas resultantes de seus processos (CHRISTOFOLETTI, 1979; PIEÂGAY e SCHUMMM, 2003).

Considerando que os rios podem ser estudados de forma localizada e efêmera ou mais regionais e duradouras, um dos conceitos fundamentais sobre os estudos fluviais é a escala espaçotemporal e as variáveis que podem afetar essa escala, como destaca Stevaux e Latrubesse (2017).

[...] as varáveis fluviais hierarquizam-se no espaço e no tempo, de modo que, durante o período decorrido para a delineação do perfil longitudinal de um rio, muitas formas e processos de menor hierarquia surgiram e desapareceram no sistema [...] (STEVAUX e LATRUBESSE, 2017, p. 22).

Piégay e Schumm (2003) apontam a possibilidade de uma variabilidade correlacionada morfologia e a dinâmica do sistema fluvial, através do tempo. Além, de destacar que existe uma grande variabilidade no espaço, que é resultado dos processos e diferenças na geologia, no clima, na morfologia do relevo e no ambiente social.

Para simplificar a discussão sobre as contribuições da morfologia do relevo no sistema fluvial e compreender a bacia hidrográfica em setores, Schumm (1977) elaborou um conceito teórico a partir de compartimentação, subdividindo o sistema fluvial em três zonas. A zona 1 corresponde às áreas com maior potencial erosivo, gerando maior aporte de sedimentos e associadas às áreas de cabeceira de drenagem. A zona 2 é caracterizada pela transferência de sedimentos, onde há uma certa estabilidade e equilíbrio, com entrada de sedimentos igual à saída. Já a zona 3 compreende áreas de deposição de sedimentos (delta e leques aluviais)."

Para Schumm (2005) o sistema fluvial pode ser analisado em diferentes escalas, de acordo com o objetivo de cada pesquisa. Conforme, a figura x, em a as informações podem estar correlacionadas com o processo de escoamento superficial ou direcionamento dos lineamentos estruturais da região analisada. Em **b**, quando analisado em escala com maior detalhe, como apresentado na figura x, pode identificar o comportamento e a história morfológica, a partir das transformações que ocorrem no padrão de canal.

Assim, cada zona do sistema fluvial é um sistema aberto. Dentro de cada zona, os sedimentos são erodidos, transportados e depósitos, porém cada processo pode ser dominante em escala espacial e temporal e, repetida várias vezes ao longo do canal fluvial. Dessa forma, cada um tem seu próprio conjunto de atributos morfológicos, que podem estar relacionados à descarga de água e transporte de sedimentos (PIEÂGAY & SCHUMMM, 2003; SCHUMMM, 2005).

Conforme Carvalho (2014, p. 82)

Um sistema fluvial pode ser considerado como um sistema modelador da superfície terrestre, o qual, através de um sistema complexo de rede de drenagem, tem a capacidade de dissecar o relevo e assim gerar novas superfícies de aplainamento, erodindo e transportando sedimentos. É um termo designado para um sistema de canais fluviais, de variados tamanhos, os quais se conectam conformando uma bacia de drenagem [...]

Christofolletti (1980, p. 65) destaca que “os rios constituem os agentes mais importantes no transporte dos materiais intemperizados das áreas elevadas para as mais baixas e dos continentes para o mar”. Do ponto vista, geológico e geomorfológico, o termo rio relaciona-se a qualquer fluxo canalizado e, que por sua vez, faz referência a “canais destituídos de água”. Para o autor supracitado, os rios funcionam como canais de escoamento fluvial que integra o ciclo hidrológico e é alimentado através das águas superficiais e subterrâneas.

Uma bacia hidrográfica, as características de tipologia de leito, tipologia dos canais, tipologia de padrões de drenagens, analisadas em conjunto, promovem uma dinâmica peculiar das águas correntes que, associada a uma geometria e hidráulica, culmina em processos específicos fluviais de erosão, transporte e deposição, como menciona Cunha (2001a). Dessa forma, a análise do conjunto e características fluviais é importante para compreender os processos e dinâmicas fluviais dentro da bacia hidrográfica.

2.3 - Uso de Fertilizantes nos sistemas agroindustriais

O uso de fertilizantes na produção agrícola está associado a tentativas de conservação e melhora da fertilidade da terra e é justificada por alguns setores agroindustriais como um dos principais fatores para promover a segurança alimentar global na atualidade. Drew (1998) afirma que com a invenção dos fertilizantes químicos, no século XIX, e com o reconhecimento da natureza dos nutrientes das plantas, possibilitou alterar certos aspectos da composição química dos solos. “Hoje, os países desenvolvidos usam em geral fertilizantes sintéticos. Basicamente, os fertilizantes artificiais misturam os nutrientes primordiais: nitrogênio, potássio e fosforo” (DREW, 1998, p. 50).

O uso de fertilizantes sintéticos como prática agrícola passou a ser difundido nos países europeus na segunda metade do século XIX, porém o aumento do consumo ocorreu após a Segunda Guerra Mundial como parte do pacote tecnológico de modernização da agricultura, com inserção de insumos industriais e mecanização que se estendeu em várias regiões do mundo, na chamada de “Revolução Verde” (IFA, 2000; ANDRADES & GANINI, 2007; SANTILLI, 2009;).

[...] Este processo de integração técnica-agricultura-indústria, caracterizado de um lado pela mudança na base técnica de meios de produção utilizados pela agricultura, materializada na presença crescente de insumos industriais (fertilizantes, defensivos, corretivos do solo, sementes melhoradas e combustíveis líquidos etc.); e máquinas industriais (tratores, colhedoras, implementos, equipamentos de injeção, entre outros) [...] (DELGADO, 2001, p. 164).

Andrades e Ganini (2007) destacam que a Revolução Verde é um modelo de produção agrícola fundamentado no uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes sintéticos. Essa abordagem explica os principais objetivos da Revolução, que, a partir do avanço tecnológico, também buscava ampliar a produtividade agrícola em escala global por meio da modernização das práticas agrícolas e do desenvolvimento de pesquisas voltadas para o melhoramento genético vegetal e a multiplicação do banco de sementes. Isso possibilita a adaptação das culturas a diferentes tipos de solos e climas, bem como a proteção contra pragas e doenças agrícolas.

Conforme Andrades e Ganini (2007, p. 45), "a Revolução Verde não é meramente um avanço técnico destinado a aumentar a produtividade, mas também reflete uma intencionalidade inserida dentro de uma estrutura e um processo histórico".

A Revolução Verde teve um impacto significativo na agricultura mundial, promovendo uma rápida expansão da produção de alimentos, especialmente de cereais como trigo, arroz e milho, e desempenhando um papel crucial na luta contra a fome e a desnutrição em muitas partes do mundo.

A evolução do processo de Revolução Verde gerou preocupações ambientais e socioeconômicas, incluindo a degradação do solo e da água devido ao uso excessivo de produtos químicos, a perda de diversidade genética das culturas em função da dependência de variedades de alto rendimento e a marginalização de pequenos agricultores em decorrência do elevado custo dos insumos agrícolas

Nesse contexto histórico, observa-se que no final da Segunda Guerra Mundial um conjunto de variáveis e transformações nas relações de poder por meio das tecnologias, inclusive aquelas de caráter político, social, ideológico, econômico para o desenvolvimento da Revolução Verde (PORTO-GONÇALVES, 2004). De acordo com Porto-Gonçalvez (*op.cit*) todo um complexo técnico-científico, financeiro, logístico e educacional (formação de engenheiros e técnicos em agronomia) foi desenvolvido, fortemente apoiado por organismos internacionais como o Grupo Consultivo para Pesquisa Agrícola Internacional (CGIAR), além do envolvimento de instituições privadas – como a Ford e Rockellers⁴ (FUCK & BONACELLI, 2011).

As instituições privadas observando na agricultura uma oportunidade para reprodução do capital, passaram a investir em técnicas para melhoramento de sementes, denominadas, Variedade de Alta Produtividade (VAP), nos Estados Unidos, México, Filipinas e com menor intensidade no Brasil (ROSA, 1998). Dessa forma, a Revolução Verde foi considerada a porta de entrada, expansão e fortalecimento das grandes corporações no processo de transnacionalização, permitindo que o número significativo de empresas passasse a produzir insumos e equipamentos no período da guerra, assim, como as instituições Ford e Rockefeller.

⁴ A Fundação Rockeeller surgiu em 1913, seu capital era oriundo da Standard Oil, empresa controlada pela família Rockefeller. A Fundação foi pioneira na cooperação científica internacional, especialmente no pós-Segunda Guerra Mundial. A Rockefeller compreendia um “modelo de filantropia em larga escala” e desenvolveu pesquisas em diversas áreas (ciências naturais, saúde pública e educação superior), além de ser responsável pelo Programa Agrícola Mexicano, em 1943, base para atuação da Fundação em escala global. “O conjunto de medidas adotadas pela Fundação Rockefeller no México, na modernização da agricultura, ficou conhecido como a Revolução Verde.” (ALVES, 2013, p. 22)

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, o cenário estava propício para as empresas alavancarem seus investimentos no fornecimento de máquinas e insumos, já que “[...] muitas indústrias químicas que abasteciam a indústria bélica norte-americana começaram a produzir e a incentivar o uso de agrotóxico: herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes químicos” [...] (ROSA, 1998; ANDRADES & GANINI, 2007)

[...] “Grandes empresários perceberam que um dos caminhos do lucro permanente eram os alimentos. Possuindo grandes sobras de material da guerra (indústria química e mecânica), direcionaram tais sobras para agricultura. Encarregaram as fundações Ford e Rockefeller, o Banco Mundial, entre outros, para sistematizarem o processo” [...] (ZAMBERLAN & FRONCHET, 2001, p. 17)

O processo de modernização da agricultura, proporcionado pela Revolução Verde, levou ao surgimento das primeiras fábricas de fertilizantes no Brasil nos anos 1940, associado ao processo de industrialização no país (DIAS & FERNANDES, 2006). No entanto, a implementação do uso generalizado de fertilizantes na agropecuária brasileira ocorreu durante os anos 1970, subsidiada pela política de crédito rural, correlacionada ao pacote tecnológico, com destaque para o uso de agroquímicos (PINTO, 1980). Para Gonçalves *et. al.* (2008) a ação governamental de depreciação dos insumos tinha como meta apenas concretizar e ampliar a utilização dos fertilizantes e outros insumos nos setores produtivos da agropecuária, bem como criar demandas para as agroindústrias na produção desses produtos, ampliando a capacidade produtiva durante os anos de 1970.

Dias e Fernandes (2006) salientam que as fábricas de fertilizantes no Brasil dedicavam-se exclusivamente à combinação de NPK com base em fertilizantes simples importados. Esse procedimento permitiu que as formulações NPK se adaptassem melhor às condições dos solos brasileiros. Diversas fábricas de fertilizantes foram instaladas no território brasileiro, durante o processo de evolução histórico do setor, com destaque para as primeiras unidades instaladas próximas aos portos marítimos, nos municípios de Cubatão (SP) e Rio Grande (RS).

A produção nacional de fertilizantes aproximou -se da autossuficiência no início da década de 1980, estimulada pela implantação do II Plano Nacional de

Desenvolvimento (II PND) ⁵, mesmo diante da demanda em função do aprofundamento da modernização agropecuária concretizada na década de 1970 (GONÇALVES, 2008).

As importações e demandas de fertilizantes impulsionaram a criação do 1º Programa Nacional de Fertilizantes e Calcário Agrícola (PNFCA), entre os anos de 1974 e 1980, com o objetivo de ampliar e modernizar a indústria de fertilizantes e calcário agrícola. O PNFCA está inserido no II Plano Nacional de Desenvolvimento, que surgiu em nova fase de substituição de importações e promoveu a instalação de vários complexos industriais destinados à produção interna de matérias-primas e fertilizantes (DIAS & FERNANDES, 2006).

De acordo com, Dias e Fernandes (2006) no período de 1987 a 1995, desenvolveu-se o 2º Plano Nacional de Fertilizantes e possibilitou a concretização dos projetos de ampliação da capacidade de produção de rocha fosfática, nos estados de Minas Gerais e São Paulo. A instalação dos PNFs, contribuiu para substituição de importações, assim como geração de renda, emprego, melhora na eficiência e da produtividade para os setores agrônômicos, tecnológicos e logísticos. Entre os anos de 1992 e 1994, durante o governo de Itamar Franco, ocorreu o processo de privatização de todo o setor da indústria de fertilizantes no Brasil.

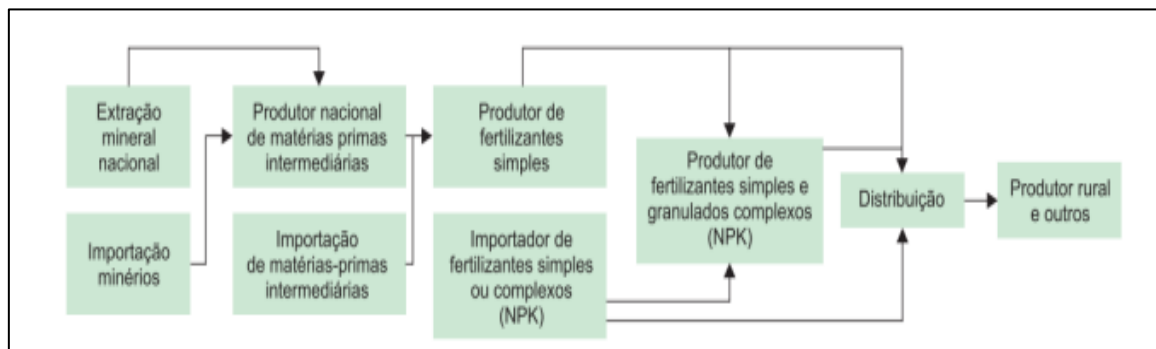
O Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto país do mundo, atrás apenas da China, Índia e Estados Unidos, o que destaca a potencialidade agrícola do país. A velocidade de crescimento da demanda brasileira tem superado o crescimento da oferta nacional, e, para suprir essas demandas, o mercado interno de fertilizantes é abastecido por meio do aumento de importações. O Brasil deixou de ser exportador de fertilizantes para se tornar um grande importador do insumo entre 1994 e 2020, o que representa mais de 80% do consumo de fertilizantes de origem estrangeira (BRASIL, 2021).

Saab & Paula (2008, p. 06) reproduz, esquematicamente, a cadeia produtiva de fertilizantes, composta por seis principais elos: i) o segmento extrativo mineral, fornecedor da rocha fosfática, do enxofre, do gás natural e das rochas potássicas; ii) o setor produtor de matérias-primas intermediárias, como o ácido sulfúrico, o ácido fosfórico e a amônia anidra; iii) o elo produtor de fertilizantes simples; iv) a indústria de

⁵ II Plano Nacional de Desenvolvimento (II PND) priorizava o aumento da capacidade energética, a produção de insumos e bens de capital, definindo uma série de investimentos no setores-chaves da economia (IPEA, 2016).

fertilizantes mistos e granulados complexos; v) o setor de distribuição (atacado, varejo e logística); e vi) o produtor rural, conforme figura 3.

Figura 3: Cadeia produtiva dos fertilizantes



Fonte: Saab & Paula (p. 6, 2008).

A cadeia de fertilizantes é complexa, pois interage com vários setores, incluindo a produção de alimentos, energia, indústrias químicas, de mineração, de óleo e gás, comércio exterior, segmento de mistura, entre outros. Isso implica uma intensa logística e infraestrutura para seu funcionamento (BRASIL, 2023).

No setor produtivo, especialmente na agricultura e pecuária, o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) são os elementos fundamentais. Embora outros macronutrientes e micronutrientes sejam igualmente vitais do ponto de vista biológico, sua relevância econômica na indústria de fertilizantes é limitada, dada sua utilização em quantidades ínfimas que não resultam em uma valorização comercial expressiva (DIAS & FERNANDES, 2006).

A indústria de fertilizantes no mundo é representada pela *International Fertilizer Industry Association* (IFA), que tem o objetivo de promover a comercialização e o aprimoramento na eficiência do uso de fertilizantes, além de indicar boas práticas para a adubação, visando beneficiar os agricultores no aumento da produtividade. Os trabalhos e pesquisas divulgados pela Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes destacam o compromisso com a melhoria da qualidade dos alimentos e a preservação do meio ambiente (IFA, 2021).

A IFA é composta por cerca de 480 empresas e representa mais de 80 países. Aproximadamente metade das empresas coordenadas pela IFA está sediada em países desenvolvidos. A associação mantém parcerias importantes com organizações internacionais, tais como o Banco Mundial, a Organização das Nações Unidas para

Alimentação e Agricultura (FAO), o Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (UNEP) e outras agências da Organização das Nações Unidas (IFA, 2021).

A crescente demanda por expansão das áreas de cultivo em todo o mundo está gerando um aumento significativo no consumo de fertilizantes. Isso está impulsionando a necessidade de gerar novos estímulos para a produção em larga escala desses insumos agrícolas essenciais. De acordo com dados da *International Fertilizer Association* (IFA, 2020), o mercado global de fertilizantes NPK exigiu 190 milhões de toneladas em 2018, considerando as toneladas de N, P_2O_5 e K_2O . Este aumento na demanda destaca a importância crítica de uma produção contínua e escalável de fertilizantes para sustentar a produção agrícola em todo o mundo (BRASIL, 2023).

Observa-se que o mercado global de fertilizantes se destaca por sua considerável concentração e consolidação. Segundo os dados fornecidos pela GlobalFert (2022), as principais empresas produtoras de fertilizantes identificadas, desempenham papéis fundamentais nesse setor. Esse cenário reflete a influência significativa dessas empresas na dinâmica e na oferta desses insumos considerados essenciais para a agricultura mundial (figura 4)

As empresas líderes na produção de fertilizantes fosfatados têm suas sedes em países como China, Estados Unidos, Marrocos e Rússia. Além disso, a Arábia Saudita, Jordânia, Egito, Bielorrússia, Catar, Alemanha e Holanda destacam-se como alguns dos principais exportadores desses insumos para o Brasil. Esses países têm exercido um papel importante no fornecimento e na contribuição para o mercado de fertilizantes, sobretudo no contexto das importações brasileiras (CONAB, 2021; GLOBALFERT, 2022).

Figura 4: Principais empresas produtoras de fertilizantes no mundo



Fonte: GlobalFert (2022)

No Brasil, durante a década de 1960, a média de uso de fertilizantes não ultrapassava 18 quilos por hectare, o que representava 30% das áreas cultivadas utilizando adubação. Diante dessa situação, quatorze empresas se juntaram para a criação da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) em 1967, incluindo: Benzenex, CBA, Copebrás, Fertibrás, Granubrás, IAP, Itaú, Manah, Murakami, Uimbrasil, Takenaka, Ultrafertil e Zanaga. A missão era convencer os agricultores sobre a importância do preço e custo amplo associado ao uso de fertilizantes no processo produtivo, considerada pela Associação uma 'ação pioneira de marketing institucional na agricultura' (DIAS, 2005; ANDA, 2022)

A Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA) publica o Anuário Estatístico, um dos bancos de dados de fertilizantes mais completos do Brasil, compilado desde 1986. Reconhecido como fonte oficial de pesquisa pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, além das Comissões de Agricultura do Senado e da Câmara Federal (DIAS, 2005; ANDA, 2022).

O Plano Nacional de Fertilizantes 2050 (PNF), em processo de elaboração ao longo de vários, foi lançado em 2022 e posteriormente reformulado em 2023 pelo governo federal. Esse reposicionamento foi impulsionado pela preocupação com a possibilidade de uma crise no abastecimento do mercado nacional, agravada pelo conflito entre Rússia e Ucrânia. O PNF é uma estratégia governamental com objetivo de reduzir a dependência

de importações de fertilizantes e promover o crescimento da produção nacional nesse setor (BRASIL, 2023).

O Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas (Confert) é um órgão colegiado do governo federal responsável por revisar, debater e implementar o Plano Nacional de Fertilizantes (PNF). Presidido pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC), o Confert conta com o apoio dos Ministérios da Agricultura e Pecuária; Ciência, Tecnologia e Inovação; Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar; Fazenda; Meio Ambiente e Mudança do Clima; Minas e Energia; além da Embrapa, Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil; Confederação Nacional da Indústria; e Petrobras, conforme destacado pelo governo federal (IPEA, 2022; MDIC, 2023).

Com base nas informações e projeções do *Department of Economic and Social Affairs Population* da Organização das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2019), que apontam que a população mundial pode atingir cerca de 9,6 bilhões de habitantes até 2050, o governo federal intensificou a elaboração do Plano Nacional de Fertilizantes 2050. A justificativa para tal iniciativa reside na necessidade crucial de expandir as terras cultiváveis e alcançar a máxima produtividade alimentar possível. Nesse cenário, o governo tem direcionado investimentos significativos para destacar a importância do uso extensivo de fertilizantes, combinado com a implementação de novas tecnologias na nutrição de plantas e na agricultura, com o objetivo de aprimorar os padrões de produtividade por hectare cultivado (CALIGARI et al, 2022)

A lógica por trás dessa abordagem está fundamentada na necessidade premente de enfrentar o desafio crescente da oferta de alimentos para uma população global em constante expansão. O Plano Nacional de Fertilizantes 2050 estabeleceu diversas metas para o cenário agrícola e econômico do país. Entre elas estão o aumento da produtividade, a busca pela segurança alimentar, considerando a produção de alimentos como prioridade mundial, o aprimoramento da qualidade dos produtos da agropecuária nacional e a implementação de políticas, programas e investimentos destinados a fortalecer a infraestrutura agrícola e a competitividade do setor. Além disso, estratégias de sustentabilidade ambiental foram delineadas, reconhecendo que o uso inadequado ou excessivo de fertilizantes pode gerar impactos negativos ao meio ambiente. O Plano Nacional de Fertilizantes ressalta a importância de direcionar investimentos para a inovação no mercado de fertilizantes com o objetivo de mitigar as emissões de gases de

efeito estufa (GEE) e outros impactos ambientais associados ao uso desses insumos (BRASIL, 2023).

Conforme o relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) intitulado “Global food losses and food waste”, publicado em 2011, aproximadamente um terço dos alimentos produzidos globalmente são desperdiçados anualmente, totalizando mais de 1,3 bilhão de toneladas ao ano. Portanto, enfatizamos que a redução do desperdício e das perdas de alimentos ao longo da cadeia produtiva, desde a produção até o consumo, tem o potencial de reduzir significativamente a demanda por fertilizantes.

A Rede FertBrasil representa um projeto de inovação tecnológica no setor de fertilizantes no Brasil, liderado pela Embrapa. Essa iniciativa agrega um conjunto de competências provenientes de esferas públicas e privadas, todas dedicadas à melhoria da eficiência agrônômica dos fertilizantes na agricultura. Seu foco reside em aumentar a eficiência desses insumos e mitigar impactos ambientais, promovendo a sustentabilidade associada à produção de fertilizantes (BENITES, 2014).

De acordo com Caligari et al. (2022, p. 05), o Plano Nacional de Fertilizantes aborda a temática dos fertilizantes e insumos para nutrição de plantas de maneira abrangente e multifacetada (Figura 5).

Figura 5: múltiplas facetas do Plano Nacional de Fertilizantes

Fonte: Caligari *et al* (2022); Brasil (2023)

2.4 - Fertilizantes: definição, produção e impactos ambientais

Os fertilizantes são substâncias naturais ou sintéticas incorporadas ao solo ou outro meio de plantio que tem como finalidade suplementar a disponibilidade natural de nutrientes no solo necessário ao desenvolvimento de determinada cultura, atender as demandas da produção agrícola com alto potencial de produtividade econômica, compensar a perda de nutrientes por processos de lixiviação ou perda gasosa e melhorar a capacidade dos solos para produção agrícola, também chamados de novas safras (IFA, 2000).

Os fertilizantes são definidos de acordo com a lei 6.894 (BRASIL, 1980, p. 1) como "substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes vegetais". O Decreto 4.954 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2004, p 1), que regulamentou a lei 6.894 (BRASIL, 1980),

regula e “estabelece as normas gerais sobre registro, padronização, classificação, inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura”, conforme detalhado no Quadro

Quadro 1: Classificação e definição dos diferentes tipos de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes

Classificação	Definição
Fertilizante mineral	produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas.
Fertilizante orgânico	Produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais
Fertilizante mononutriente	Produto que contém um só dos macronutrientes primários
Fertilizante binário	Produto que contém dois macronutrientes primários
Fertilizante ternário	Produto que contém os três macronutrientes primários
Fertilizante com outros macronutrientes	Produto que contém os macronutrientes secundários, isoladamente ou em misturas destes, ou ainda com outros nutrientes
Fertilizante com micronutrientes	Produto que contém micronutrientes, isoladamente ou em misturas destes, ou com outros nutrientes
Fertilizante mineral simples	Produto formado, fundamentalmente, por um composto químico, contendo um ou mais nutrientes de plantas
Fertilizante mineral misto	Produto resultante da mistura física de dois ou mais fertilizantes minerais
Fertilizante mineral complexo	Produto formado de dois ou mais compostos químicos, resultante da reação química de seus componentes, contendo dois ou mais nutrientes
Fertilizante orgânico simples	Produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas
Fertilizante orgânico misto	Produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas
Fertilizante orgânico composto	Produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matériaprima de origem

	industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas
Fertilizante organomineral	Produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos
Corretivo	Produto de natureza inorgânica, orgânica ou ambas, usado para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, isoladas ou cumulativamente, não tendo em conta seu valor como fertilizante, além de não produzir característica prejudicial ao solo e aos vegetais são subdivididos em corretivos de acidez, de alcalinidade de sodicidade e condicionador de solo
Inoculante	Produto que contém microorganismos com atuação favorável ao crescimento de plantas
Biofertilizante	Produto que contém princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante

Fonte: Adaptado de Brasil (2004, p.1 e 2)

Os fertilizantes, em sua maioria, são compostos por sais minerais, com exceção de alguns compostos orgânicos, como a uréia, que é facilmente convertida em amônio. A classificação usual entre fertilizantes simples ou complexos geralmente se refere aos três macronutrientes. Muitos fertilizantes chamados de “simples” na verdade fornecem mais de um nutriente; por exemplo, o sulfato de amônio contém nitrogênio e enxofre (REETZ, 2017; ZONTA *et al.*, 2021).

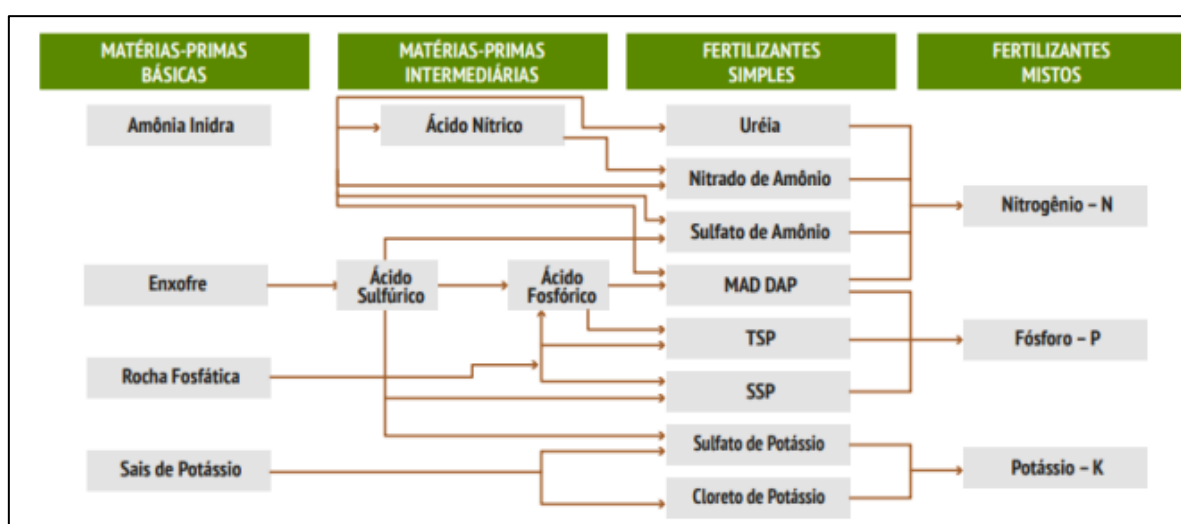
Silva (2017, p. 21) menciona que nitrogênio (N), potássio (K) e fósforo (P) são considerados macronutrientes devido a maior demanda pelas plantas. “Apesar da alta disponibilidade do gás N_2 na atmosfera, a assimilação ocorre principalmente a partir do N mineral: o amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-)”. No meio ambiente, estas fontes são obtidas pelo processo de mineralização de compostos orgânicos, fixação biológica do nitrogênio por bactérias e fixação atmosférica que acontece através de descargas elétricas combinadas a partir da precipitação de chuva.

Segundo Malavolta *et al.* (2002) os principais fertilizantes utilizados na preparação e adequação dos solos às necessidades nutricionais das plantas são os chamados macronutrientes: nitrogênio, fósforo e potássio. As principais matérias-primas

para a produção de fertilizantes incluem a rocha fosfática e o enxofre, utilizados na fabricação de adubos fosfatados, além do petróleo e do gás natural, empregados na produção de adubos nitrogenados. Também, a rocha potássica é essencial na fabricação de adubos potássicos (CELLA; ROSSI, 2010; RODRIGUES *et al.*, 2015).

O primeiro elo da cadeia é constituído pela indústria extrativa mineral, responsável pelo fornecimento das matérias-primas básicas, como rocha fosfática, rocha potássica, enxofre, gás natural ou nafta, essenciais para a produção de fertilizantes. Na sequência, a indústria de fabricação de produtos químicos inorgânicos, utiliza os insumos provenientes da indústria extrativa para gerar matérias-primas básicas e intermediárias, como ácido sulfúrico, ácido fosfórico e amônia anidra. O terceiro elo da cadeia é formado pela indústria de fabricação de fertilizantes simples e intermediários, responsável pela produção de produtos como superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), fosfato de amônio (MAP e DAP), nitrato de amônio, sulfato de amônio, ureia, cloreto de potássio, termofosfatos e rocha fosfática parcialmente acidulada. No estágio final, os fertilizantes passam pelo processo de granulação e mistura, resultando nos produtos finais conhecidos como NPK (nitrogênio, fósforo e potássio), conforme podemos observar na figura 6. Após isso, são distribuídos e comercializados, alcançando os produtores rurais para uso na agricultura (COSTA & SILVA, 2012).

Figura 6: Produção de Fertilizantes: matérias-primas básicas, matérias-primas intermediárias, fertilizante simples e fertilizante mistos



Fonte: SAE-PR (p. 8, 2020)

Reetz (2017), destaca que a melhoria da fertilidade do solo integra princípios básicos da biologia do solo, química do solo, e física do solo que tem como finalidade

desenvolver as práticas necessárias para manejar os nutrientes de uma maneira lucrativa e de forma ambientalmente saudável. Segundo este autor, os solos divergem na habilidade de atender as exigências de nutrientes das plantas, considerando que a maioria apresenta apenas uma fertilidade moderada, justificando que para atingir os objetivos da produção, mais nutrientes são necessários do que aqueles que podem ser supridos pelo solo.

[...] Altas produtividades das culturas implicam em grande esgotamento no suprimento de nutrientes, que, eventualmente precisa ser balanceado pelo aumento no uso de insumos contendo nutrientes para manter os solos férteis, necessários para nossa sociedade. Assim um marco da agricultura de alta produtividade é a dependência de fertilizantes minerais para restaurar a fertilidade do solo (REETZ, 2017, p. 23)

A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em seu relatório sobre o Código Internacional de Conduta para o Uso e Manejo de Fertilizantes, destaca um desafio crucial associado à gestão dos solos para a produção de alimentos e prestação de serviços ecossistêmicos através do uso adequado de nutrientes. Este desafio implica em dois riscos aparentemente opostos: por um lado, as emissões de gases de efeito estufa e a contaminação do solo e dos recursos hídricos resultantes do uso excessivo ou inadequado de fertilizantes; por outro lado, os baixos rendimentos ligados à insuficiência de fertilizantes nos processos produtivos. Estes riscos se mostram preocupantes diante do rápido crescimento populacional, das mudanças climáticas globais, da crescente frequência de desastres naturais e da degradação do capital natural (FAO, 2019).

O Código Internacional de Conduta para o Uso e Manejo de Fertilizantes ressalta que a fertilização apropriada deve considerar os sistemas agrícolas globais (rotação e combinação de culturas, solo, mão de obra, mercados etc.), bem como as condições climáticas e hidrológicas. Este Código procura estabelecer sistemas para monitorar a produção, distribuição (incluindo comercialização), qualidade, manuseio e uso de fertilizantes, visando tornar a agricultura mais sustentável, em linha com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), promovendo o uso integrado e eficaz de fertilizantes. Seu objetivo é otimizar o uso eficiente de fertilizantes para atender à demanda agrícola, minimizando simultaneamente as perdas de nutrientes para o meio ambiente (FAO, 2019).

O uso excessivo de fertilizantes pode contribuir para o processo de eutrofização, seja ela de origem cultural, artificial ou antrópica, quando estimulada pelas ações humanas, causando alterações significativas no funcionamento dos ecossistemas. A

eutrofização “proveniente dos despejos de esgotos domésticos e industriais e da descarga de fertilizantes aplicados na agricultura”(TUNDISI & TUNDISI, 2011, p. 101). A eutrofização artificial, resultante da introdução de uma quantidade maior de nutrientes no meio, pode desequilibrar a relação entre a disponibilidade de matéria orgânica e a capacidade do ecossistema em processar e decompor esses nutrientes (ESTEVES, 2012, p. 207)

A erosão acelerada ou antrópica, que consiste no processo de remoção e transporte de partículas do solo para água, conhecido como erosão hídrica, pode gerar desequilíbrios no meio, através da perda de carbono e nutrientes e, afetar a capacidade produtiva dos solos. Dessa forma, para compensar as perdas por erosão hídrica (lixiviação), os agricultores intensificar o uso de fertilizantes, agrotóxicos e outros insumos agrícolas, com objetivo de aumentar a produtividade (MERTEN e MINELLA, 2002).

Um estudo internacional publicado na *Nature* (2020) destaca que o uso de fertilizantes nitrogenados utilizados na agricultura causa uma concentração significativa de óxido nitroso na atmosfera. A pesquisa destaca que a concentração de óxido de dinitrogênio (óxido nitroso), na atmosfera aumenta e acelera as mudanças climáticas globais, assim como o CO₂ e o metano, considerado o terceiro gás de efeito estufa emitido por atividades antrópicas. Dados da pesquisa indicam que o aumento da concentração de óxido nitroso na atmosfera é causado, principalmente pelo uso de fertilizantes que contém em sua formulação nitrogênio, devido uso de fertilizantes sintéticos e de fertilizantes orgânicos (excreções de animais) (TIAN *et al.*, 2020).

Os impactos ambientais provenientes do uso intenso de fertilizantes sintéticos, agrotóxicos, máquinas e equipamentos estão intrinsecamente ligados ao padrão agrícola brasileiro. Um modelo agrário fortemente baseado na monocultura, sendo considerado o ideal na produção de alimentos destinados principalmente à comercialização de *commodities* para o mercado externo.

No contexto da modernização agrícola, os sistemas produtivos adotados frequentemente envolvem cadeias de produção complexas, estruturada na monocultura, no latifúndio e em extensos complexos agroindustriais. Esses modelos, embora proporcionem altos índices de produtividade, despertam preocupações ambientais significativas, sobretudo devido à contaminação da água, dos solos e do ar, decorrentes do uso intensivo de insumos agrícolas, como fertilizantes e agrotóxicos.

Os fertilizantes sintéticos têm um impacto significativo na produtividade agrícola, mas pouco contribuem para a melhoria da qualidade do solo. Os fabricantes têm o

interesse comercial em vender mais, embora isso acarrete altos custos ambientais e energéticos. Esses produtos contaminam tanto o solo quanto a atmosfera, sendo a agricultura a principal fonte de contaminação. A aplicação de fertilizantes resulta em altas concentrações de nitrato e metais pesados no solo, nos rios e nas águas subterrâneas. No Brasil, há uma escassez de estudos abrangentes que avaliem esse tipo de contaminação até o momento (SANTOS e GLASS, 2018).

O uso de fertilizantes químicos é uma solução rápida para lidar com questões de fertilidade e qualidade do solo. Entretanto, os desdobramentos dessa prática vão além, constituindo um risco significativo para o meio ambiente. A contaminação no solo proveniente do uso de fertilizantes na adubação mineral pode acidificar o solo, causando a perda gradual de nutrientes e contribuindo para torná-lo cada vez mais improdutivo ao longo do tempo. Fertilizantes químicos, principalmente os fosfatados e nitrogenados, são considerados biocidas, pois destroem a microvida presente no solo. Dessa forma, o uso de fertilizantes gera um ciclo vicioso: em solos de baixa fertilidade, é necessário utilizar uma quantidade maior de fertilizantes nas próximas plantações (CIVITEREZA, 2021).

No Brasil, as formas químicas mais usadas para adubação nitrogenada são a amoniacal, a nítrica, a amídica (uréia) e a protéica. Na forma amoniacal, o fertilizante perde eficiência em condições alcalinas, com a liberação de amônia por volatilização. Na reação com o solo, forma-se amônio, que pode ser fixado ao solo, imobilizado pelos microrganismos ou nitrificado por bactérias ou ainda absorvido pelas plantas. No processo de nitrificação, além da acidificação do solo, o ânion nitrato pode ser absorvida em grandes quantidades pelas plantas, contaminando-as, ou ser lixiviado, podendo, neste caso, contaminar a água subterrânea (FILIZOLA et al, 2002).

2.5 Fertilizantes para Cana de Açúcar

A cana-de-açúcar foi classificada por Linneu, em 1753, como *Saccharum officinarum* e *Saccharum spicatum*, uma gramínea semiperene, própria de climas tropicais e subtropicais. A combinação entre clima, solo e variedades determina a produtividade da cultura da cana de açúcar. Os maiores índices de produtividades são alcançados quando a variedade é indicada ao ambiente ideal para o plantio, com características que correspondem as necessidades da cultura, como um solo com

propriedades físicas, químicas e biológicas apropriadas (SANTIAGO e ROSSETTO, 2022).

A avaliação da fertilidade do solo é um dos processos significativos que reflete de forma direta na produtividade e que compreende a correção da acidez e adubação, considerados como fatores determinantes da produtividade das culturas, conforme apontam Rossetto e Santiago (2022). Entretanto, os autores alertam que o emprego de fertilizantes e corretivos deve ser criterioso e equilibrado e devem ser feitos de forma a manter a fertilidade em equilíbrio com o solo e o meio ambiente.

A cana de açúcar apresenta um sistema radicular diferente de outras culturas, que quando não há impedimentos físicos ou químicos, a cultura pode atingir camadas mais profundas do solo, quando comparada com o sistema radicular de outras culturas, principalmente as anuais. Por ser considerada uma cultura, semiperene e com ciclo de 5 a 7 anos, o desenvolvimento radicular em maior profundidade é fundamental para o acréscimo, visto que, quanto maior o volume de solo explorado para retirada de água e nutrientes, maior a produtividade (DEMATTE, 2005; ROSSETTO E SANTIAGO, 2022).

Dessa forma, dois fatores são essenciais no preparo solo para o plantio da cultura da cana de açúcar, o uso de corretivos e adubação correta, seguindo as orientações técnicas necessárias e recomendadas. O uso de corretivos tem como finalidade melhorar a fertilidade do solo e dos ambientes produtivos. Uma das práticas corretivas é o uso do calcário para corrigir a acidez do solo, além do uso do gesso para diminuir a atividade do alumínio e nesse processo, acrescenta cálcio em profundidade, e a fosfatagem, no qual o fosforo é adicionado na área total com o objetivo de aumentar o teor de fosforo (P) em solos que apresentam baixo teor deste elemento (ROSSETTO E SANTIAGO, 2022).

De acordo com OLIVEIRA *et al.* (2007) a maioria dos solos brasileiros são naturalmente ácidos e por conseguinte apresentam baixa saturação por cátions básicos, como cálcio, magnésio e potássio. A carência de cátions como cálcio, associados a baixos teores de alumínio, podem prejudicar o crescimento do sistema radicular, assim como todo o desenvolvimento da cultura da cana de açúcar.

Sobre a recomendação do calcário como corretivo para os solos com acidez acentuada, destaca-se que existem alguns métodos que fazem a estimativa da necessidade de calagem (NC), estabelecida “como a quantidade de calcário com poder relativo de neutralização total (PRNT) 100%”, aplicada no solo para reduzir a acidez (OLIVEIRA *et al.*, p. 32, 2007).

Rossetto e Santiago (2022) mencionam que a adubação na cana de açúcar tem como objetivo garantir a máxima de produtividade econômica, no entanto, é importante subtrair no cálculo os nutrientes necessários que serão fornecidos pelos solos, no processo produtivo. Assim, a relação de adubação é calculada, considerando que **F** é o fator de aproveitamento do fertilizante, que tem por objetivo corrigir perdas entre a aplicação e a absorção dos nutrientes pelas plantas, conforme os autores supracitados.

Adubação = (nutrientes requeridos pela planta – nutriente fornecido pelo). F

Sobre a adubação mineral de NPK, geralmente, o nitrogênio é o nutriente as plantas necessitam em maior quantidade. No entanto, para a cultura da cana de açúcar, o nutriente requerido em maior quantidade é o potássio, elemento que faz parte de muitos compostos no desenvolvimento da planta, como de proteínas, e é componente da clorofila, ácidos orgânicos e hormônios vegetais (ROSSETTO e SANTIAGO, 2022).

A adubação para cana-planta e para cana-soca, ocorrem de forma diferenciadas. A seguir, são apresentadas as recomendações de adubação mineral para o Estado de São Paulo, indicadas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), no Boletim Técnico nº 100 (IAC, 1996 e 2022).

As fontes de nitrogênio (N) mais utilizadas são a ureia (45% de N), sulfato de amônio (21% de N e 23% de enxofre - S), nitrato de potássio (13% de N e 44% de K₂O), fosfato monoamônico ou MAP (10% de N e 46 a 50% de P₂O₅) e fosfato diamônico ou DAP (16% de N e 38 a 40% de P₂O₅).

O nitrogênio é um componente importante na nutrição e fisiologia da cana de açúcar, já que entre outras funções, é constituinte das proteínas e dos ácidos nucleicos (MALAVOLTA, et al., 1989), que em conjunto com o potássio é absorvido em maiores quantidades pela cultura (OLIVEIRA et al., 2002b). A quantidade de nitrogênio na cana-soca poderá ser diferenciada conforme a análise preliminar do solo e a produtividade esperada.

Rossetto e Santiago (2022), afirmam que a adubação fosfatada para a cana-de-açúcar é uma prática eficaz para elevar a produtividade da cultura canavieira, sobretudo, nos solos brasileiros, devido à baixa disponibilidade natural do nutriente e que torna um dos fatores mais limitantes nos processos produtivos, inclusive na cana.

As principais fontes minerais de fósforo são o fosfato monoamônico ou MAP (10% de N e 46 a 50% de P₂O₅) e fosfato diamônico ou DAP (16% de N e 38 a 40% de

P₂O₅), superfosfato simples ou super simples (16 a 18% de P₂O₅ e 18 a 20% de Ca - Cálcio), superfosfato triplo ou super triplo (41% de P₂O₅ e 7 a 12% de Ca) e termofosfato (18 % de P₂O₅, 9% de Mg - Magnésio, 20% de Ca e 25% de SiO₄) (IAC, 2022)

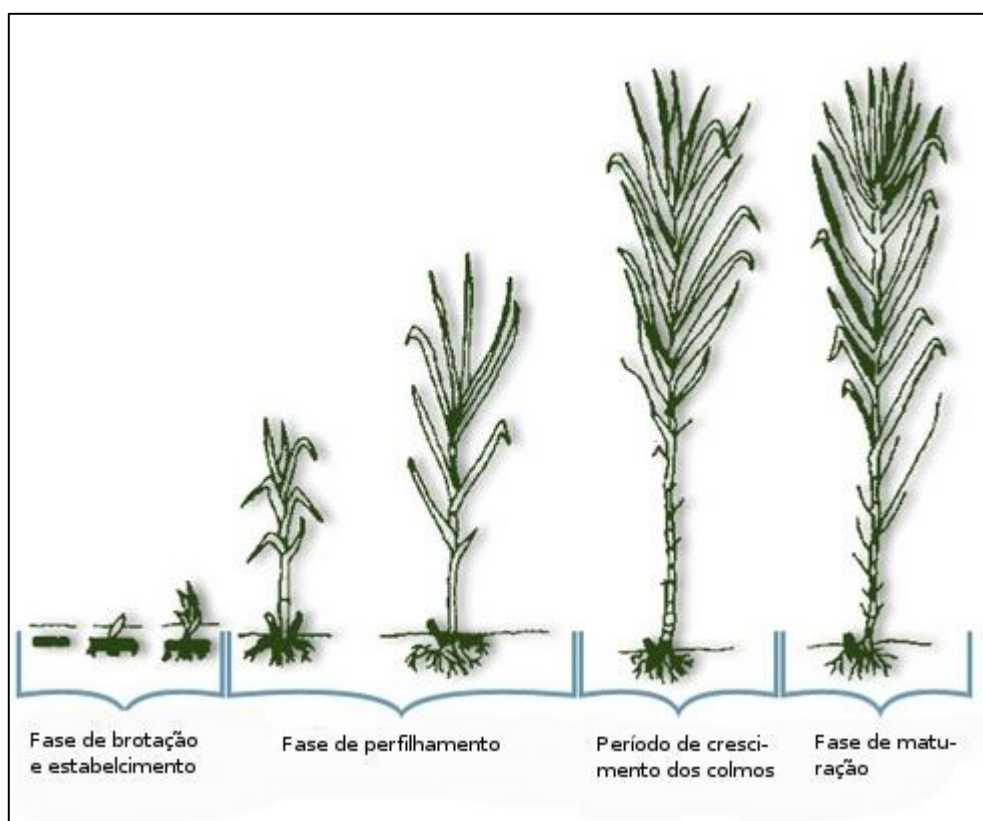
Para a cana-planta, a adubação fosfatada é recomendada ao longo de cinco anos, especialmente no momento do plantio (nos sulcos), pois é nessa etapa que a planta recebe fósforo em profundidade. A cana-soca também recebe adubação fosfatada devido à baixa mobilidade do elemento mineral no solo. Quanto maior a profundidade do sistema radicular da cana, menor é a eficiência do nutriente para a cana-soca. A adubação potássica é recomendada tanto durante o plantio quanto após cada corte, pois a cana-planta e as rebrotas respondem bem a essa adubação (Oliveira et al., 2007).

Os principais elementos utilizados como fonte de potássio para adubação mineral na agricultura são o cloreto de potássio e o nitrato de potássio, sendo o cloreto de potássio o mais utilizado, representando cerca de 90% do volume aplicado para suprir a necessidade de potássio na produção agrícola no Brasil. A aplicação de qualquer adubação dependerá da análise de solo, o que também se aplica à quantidade de potássio, tanto para a cana-planta quanto para a cana-soca, além da avaliação da produtividade esperada.

Rossetto e Santiago (2022) afirmam que o uso do potássio tem como objetivo estimular a vegetação e o perfilhamento, aumentar o teor de carboidratos, óleos, lipídios e proteínas. Além disso, o potássio promove o armazenamento de açúcar e amido, auxilia na fixação do nitrogênio, regula a utilização da água e aumenta a resistência à seca, geada e doenças.

Normalmente, o plantio da cana-de-açúcar é feito com colmos ou mudas com mais de 12 meses de idade. Denomina-se "cana-planta" a primeira produção de colmos (caule típico das gramíneas) que ocorre após o plantio. O primeiro ciclo da cana-de-açúcar, plantada pela primeira vez e que receberá o primeiro corte, é chamado de cana-planta. Os demais cortes na produção de colmos são chamados de "cana-soca", que consistem nos colmos provenientes da rebrota (nova brotação). Assim, após o corte da cana-planta, inicia-se um novo ciclo reprodutivo de aproximadamente 12 meses, denominado ciclo da cana-soca (PAES, 2007; INFORME AGROPECUÁRIO, 2007; SANTOS et al., 2010; SEGATO, 2006), conforme observamos na figura 7.

Figura 7: Ciclo da cana de açúcar plantada



Fonte: Gascho & Shih (1983).

A cana-de-açúcar, uma cultura agrícola de grande relevância econômica, demanda micronutrientes cruciais para seu desenvolvimento e alta produtividade. Entre esses elementos, boro, cobre e zinco destacam-se como os mais importantes. A ausência ou deficiência desses micronutrientes pode resultar em perdas significativas na produção de cana-de-açúcar, afetando diretamente seu rendimento.

Embora elementos como ferro, molibdênio e manganês também desempenhem papéis essenciais, sua aplicação na produção canavieira ainda é limitada. Isso se deve, em parte, à falta de resultados expressivos relacionados ao aumento significativo da produtividade quando comparados com outros micronutrientes. (RAIJ et al., 1996; ROSSETTO & SANTIAGO, 2022)

2.6 - Abordagens sobre Conectividade: breves considerações

O termo “conectividade” é cada vez mais utilizado para auxiliar pesquisas na área das ciências ambientais, principalmente aquelas correlacionadas a hidrologia,

geomorfologia e ecologia. Michaelides & Chappel (2009) ressaltam que geralmente a conectividade se refere às macroconexões físicas existentes entre as diferentes partes da Bacia Hidrográfica, como a encosta, às áreas de várzeas e o canal fluvial, conforme pesquisas realizadas por Amoros e Bornette (2002); Michaelides e Wainwright (2002) Brierly et al., (2006).

Wohl (2017) salienta que a conectividade descreve o grau em que a matéria e os organismos podem ser mover entre unidades espacialmente definidas no sistema natural. Para a autora, a conectividade de um rio normalmente é descrita em dimensões longitudinais, laterais e verticais, enquanto no canal fluvial e na bacia hidrográfica pode ser conceituado como um *continuum* conectado e que pode desconectar em diversas escalas temporais e espaciais.

As pesquisas em conectividade podem contribuir para o entendimento de variáveis importantes sobre o rio. Wohl (2017) menciona cinco dessas variáveis: 1) escalas espaciais e temporais dos diferentes tipos e graus de conectividade, que podem ajudar a compreender disparidades entre medições de fluxos e mudanças na paisagem; 2) a conectividade influencia fortemente a resistência e resiliência dos rios quanto à perturbação natural e induzida pelo homem; 3) conceituar rios no contexto da conectividade possibilita identificar limites espaciais dentro da paisagem; 4) a estrutura de conectividade permite identificar os fatores e processos que afetam a retenção ou armazenamento de diversos materiais, incluindo a água, solutos, sedimentos e matéria orgânica; 5) a conectividade fornece *insights* sobre como os comportamentos não lineares ocorrem nos rios.

As pesquisas sobre conectividade aplicadas a hidrologia e geomorfologia podem ser classificadas, segundo Bracken & Croke (2007) em: **a) conectividade da paisagem**, correlacionada as formas do relevo; **b) conectividade hidrológica**, que se refere à passagem de água de uma parte da paisagem dentro da bacia hidrográfica; **c) conectividade sedimentológica**, que se relaciona com a transferência de sedimento na bacia.

Fryirs (2013) afirma que a conectividade nos sistemas geomórficos ocorrem pela ação de transferência de sedimentos entre dois compartimentos da bacia hidrográfica através na água, na produção de sedimento. As diferentes formas do relevo da bacia podem contribuir para o transporte de sedimentos, adicionados, removidos ou armazenados em diferentes escalas temporais. Dessa forma, conceito de (des)conectividade pode ser descrito como o grau em que o transporte contínuo de

sedimento é interrompido ou limitado no processo de transferência de material e é usado para estudar os de desconexão de transporte de sedimentos (BAARTMAN et al., 2013).

Numerosas definições sobre conectividade têm sido publicadas e buscam sintetizar diferentes tipos de abordagens e terminologias adotadas para o entendimento de processos geomórficos, pesquisados dentro e entre as disciplinas de ecologia, hidrologia e geomorfologia (BRIERLEY et al, 2006; BRACKEN e CROKE, 2007; TURNBULL et al., 2008; WAINRWRIGHT et al, 2011; FRYIRS, 2013). WAINRWRIGHT et al (2011) apresenta uma base contextual interdisciplinar sobre conectividade estrutural e funcional que são propostas como termos universais. A conectividade estrutural descreve até que ponto as unidades da paisagem são contíguas ou fisicamente ligadas, em múltiplas escalas espaciais e temporais. A conectividade funcional é responsável pela maneira como múltiplas características estruturais no sistema afetam os processos geomórficos, ecológicos e hidrológicos (WEST et al, 2014).

Heckmann et al. (2018) destaca que a conectividade se torna uma propriedade emergente do estado do sistema, refletindo a continuidade e as forças das vias de escoamento da água e sedimentos em determinado intervalo de tempo. Assim, a configuração espacial dos sistemas dos componentes do sistema caracteriza a conectividade estrutural, ao mesmo tempo que a conectividade funcional é inferida a partir da dinâmica dos processos do sistema, com a transferência real de água e sedimentos (WAINRWRIGHT et al., 2011; HECKMANN et al. 2018).

De acordo com Turnbull et al. (2008) a conectividade estrutural se refere aos padrões espaciais na paisagem, como a distribuição espacial das unidades da paisagem que podem interferir nos padrões de movimentação da água e caminhos de fluxo. A conectividade funcional é caracterizada por padrões espaciais que interagem com os processos de captação para produzir escoamento e fluxo conectado (transferência de água nas bacias).

Em termos gerais, os conceitos relacionados à "conectividade" frequentemente expressam uma ideia mais específica do que a teoria geral dos sistemas (TGS) oferece. Dentro da TGS, torna-se mais simples compreender a questão estrutural e funcional da conectividade ao considerar essencialmente os fluxos de matéria e energia dentro e entre os sistemas geo-hidro-ecológicos. Esta abordagem holística proporcionada pela TGS oferece uma visão mais ampla e integrada da conectividade, reconhecendo os intercâmbios complexos entre os componentes desses sistemas e suas inter-relações (ROCHA, 2015)

2.5.1 - Conectividade Hidrológica

A conectividade hidrológica é caracterizada pela passagem de água ou sedimento entre os componentes da paisagem e que se relacionam com a encosta e sua resposta se dá no escoamento da bacia hidrográfica. O termo é frequentemente usado para descrever as ligações internas entre o escoamento superficial e as fontes de sedimento nas partes superiores das bacias hidrográficas e sua dissipação (CROKE, et al, 2005; BRACKEN & CROKE, 2007; BORSELLI et al.,2008).

Bracken e Croke (2007, p. 1757) apontam que a conectividade hidrológica apresenta dois aspectos ligeiramente diferentes, mas igualmente importantes para geração de escoamento: estático/estrutural e dinâmico/funcional. o primeiro correlacionado aos “padrões espaciais, como unidades de escoamento hidrológico, que podem ser categorizados, classificados e estimado”. Os aspectos dinâmicos utilizados na conectividade hidrológica representam “o desenvolvimento da paisagem de longo prazo, como mudanças após o abandono da agricultura e de curto prazo, quanto a variação nas condições antecedentes e entradas de chuva para sistemas que resultam em não linearidades na encosta e na resposta da bacia à chuva” (BRACKEN & CROKE, 2007, p. 1758); como os padrões espaciais interagem com a entrada de chuva para transferir água dentro da bacia (TURNBULL et al., 2008). Assim, padrões dentro de uma paisagem (encostas, solos, vegetação) podem produzir diferentes respostas hidrológicas de acordo com o escoamento hidrológicos e conectividades resultantes a partir dos diferentes eventos de chuva ou diferentes períodos (BRACKEN et al., 2013).

A transferência de água de uma parte da paisagem para outra e o movimento físico realizado pela matéria através da bacia hidrográfica, está relacionado à facilidade com que a água pode se mover pela paisagem, e dessa forma afetar diferentes componentes dessa paisagem, conforme Pringle (2003); Tetzlaff et al. (2007) Lexartza- Artza & Wainwright (2009) ao caracterizar a conectividade hidrológica.

A conectividade hidrológica compreende também o comportamento das variáveis do ciclo hidrológico, o que permite descrever o grau de acoplamento entre os diferentes componentes (MICHAELIDES; CHAPPEL, 2009). Para Pringle (2003) conectividade hidrológica pode ser definida como a “transferência de água mediada de matéria, energia e organismos dentro ou entre os elementos do ciclo hidrológico”.

Bracken e Croke, (2007), em um sentido amplo, estruturam o conceito de conectividade hidrológica destacando cinco componentes principais: **clima** – refere-se a natureza, a intensidade, duração da precipitação e distribuição das chuvas dentro da bacia hidrográfica; **escoamento potencial da encosta** – caracterizada pela formas do relevo, a capacidade de infiltração, as condições de umidade antecedentes, rugosidade da superfície, vegetação, uso da terra e variabilidade temporal; **paisagem** – correlacionada a declividade ou comprimento da encosta e distância do escoamento até o ponto de menor altitude da bacia hidrográfica (exutório); **padrão de transferência do escoamento** - compreende os fatores de controle de escoamento, como a topografia e vias de fluxos de forma superficial, subsuperficial ou subterrâneos; **efeito tampão lateral** – relaciona-se a intensidade com que a encosta está fisicamente conectada ao canal e como o grau de conectividade da zona ripária atual para limitar o escoamento e o aporte de sedimento para o canal fluvial.

Pringle (2003) destaca que o conhecimento da conectividade hidrológica é essencial para gerenciar os recursos naturais de maneira adequada e para compreender potenciais mudanças ambientais nos sistemas. Além disso, a conectividade hidrológica é reconhecida por integrar conhecimentos de diferentes áreas e, assim, proporcionar uma compreensão mais holística dos sistemas complexos e contribuir para a gestão integrada da bacia (BRIERLY et al., 2006; PETTS et al., 2006).

2.5.2 - Conectividade Sedimentológica

A dinâmica de produção e transferência de sedimentos em partes de uma bacia hidrográfica podem ser analisados a partir do fluxo de matéria, condicionados as características geomórficas e que compreende os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

De acordo com Bracken et al. (2014) o conceito de conectividade de sedimentos pode ser usado para explicar a continuidade de transferência de sedimento a partir de uma fonte para um dissipador da bacia hidrográfica, bem como a movimentação do sedimento entre diferentes zonas dentro de uma bacia hidrográfica: nas encostas, entre as encostas e canais, e dentro dos canais. Destaca-se que a conectividade de sedimentos é baseada na interação de componentes estruturais (morfologia) e componentes correlacionados a processos (fluxo de energia/ transporte de material) que determinam o comportamento a

longo prazo do fluxo de sedimento e, que pode se manifestar com as transformações nas zonas geomórficas (PRESTON & SCHMIDT, 2003; TURNBULLET et al., 2008; BRACKEN et al. 2008). Assim, a conectividade de sedimentos não depende de processos individuais, mas de todos os aspectos do sistema geomórfico, que controlam o fluxo de sedimentos (processos de desprendimento, de arrasto e transporte) e das características emergentes de deposição de sedimento e tempo de residência do material em deposição (PRESTON & SCHMIDT, 2003; SANDERCOCK & HOOKE, 2011).

O conceito de conectividade de sedimentos foi definido por Hooke (2003) como “transferência de sedimentos de uma zona ou local para outro e o potencial de uma partícula específica se mover através do sistema”, que implica na transferência física de sedimentos de uma área fonte ao longo da bacia hidrográfica, a partir da desagregação e transporte de sedimentos, controlados pela forma como os sedimentos se movem entre os compartimentos da paisagem. Dessa forma, a conectividade de sedimentos envolve a compreensão das fontes geradoras de sedimentos, mecanismos, locais, condições e distância de deslocamento das partículas no sistema (HOOKE, 2003; FRYRIS, 2013; BRACKEN; CROKE, 2007; CAVALLI et al., 2013; BRACKEN et al., 2015., WOHL et al., 2018).

A conectividade de sedimentos pode ser caracterizada a partir da estimativa de entrada e saída de sedimentos dentro e entre os trechos nos sistemas fluviais. A morfologia do canal e estabilidade, refletem o balanço dos sedimentos, com evidências do processo de erosão, assoreamento ou equilíbrio aproximado. Dessa forma, a ênfase aqui está correlacionada a conexão física e transferência de sedimentos e é comparável com o uso do termo do termo conectividade em ecologia e em aplicações hidrológicas para os sistemas fluviais (como por exemplo, WARD & STANFORD, 1995) e está começando a ser pesquisado na geomorfologia (FRYIRS & BRIERLY, 2000; HARVEY, 2000) em escalas que variam de acordo com o objetivo da pesquisa, desde trechos menores/locais como toda a bacia hidrográfica.

Segundo Harvey (2002) os mecanismos de conexão unem os componentes do sistema fluvial, controlam o transporte de sedimentos para jusante e promove mudanças no nível de base a montante. Essas mudanças são analisadas em diferentes escalas temporais e espaciais de conexões (coupling), de acordo com Harvey (op.cit.). Quanto as escalas espaciais, destaca as ligações envolvendo a escala local, dentro de uma zona ou entre duas zonas contíguas sistema fluvial (na encosta, entre encosta e canal, na junção tributário e conexão entre o canal principal e entre os elementos do canal), enquanto, as

conexões em escalas maiores são divididas em zonas no sistema fluvial e regional, referente as bacias de drenagem de forma completa.

Fryirs (2013) destaca que a conectividade em uma bacia de drenagem pode atuar em três dimensões: longitudinal, lateral e vertical. Para Brierly et al. (2006) a **conectividade longitudinal** pode ser definida como a relação de fluxos de trechos montante/jusante e tributário/canais principais, o que permite a transferência de fluxo de sedimentos na rede de drenagem. A **conectividade lateral** é caracterizada pela ligação entre a rede de drenagem e a paisagem, e compreende a relação entre encosta-canal fluvial e planície de inundação-canal, que controlam o fornecimento de materiais para a rede de canais. Já a **conectividade vertical** as ligações referem-se às interações superfície-subsuperfície de água, sedimentos e nutrientes.

O grau de conectividade de sedimentos em um sistema fluvial permite compreender a interação entre as zonas geomorfológicas da paisagem e como o sistema funciona e evolui a partir da dinâmica fluvial. A conectividade de sedimento possibilita analisar possíveis mudanças e o grau de conectividade de forma espaço-temporal dentro da bacia hidrográfica. (HOOKE, 2003).

3 - Área de Estudo: aspectos históricos e do meio físico das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí), UGRHI 21 (Bacia Hidrográfica do rio do Peixe) e UGRHI 22 (Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema)

A área de pesquisa compreende as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) 20, 21 e 22, localizadas na porção oeste do Estado de São Paulo. As UGRHIs 20 e 21 são consideradas unidades de gerenciamento contíguas, fazendo parte das Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí (UGRHI 20) e Peixe (UGRHI 21). Enquanto isso, a Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema compreende a UGRHI 22.

A Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí possui uma área de drenagem de 13.196 km², limitando-se ao norte com a Bacia Hidrográfica do Rio Tietê e a oeste com o Estado do Mato Grosso do Sul, onde sua divisa é o Rio Paraná. Na parte leste, seu limite compreende a Serra de Agudos, enquanto ao sul faz fronteira com a Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe (CBH-AP, 1997).

Dentro da área da Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí, estão inseridos 32 municípios: Arco Íris, Álvaro de Carvalho, Clementina, Dracena, Gabriel Monteiro, Garça, Getulina, Guaimbê, Herculândia, Iacri, Júlio Mesquita, Lucélia, Luisiana, Monte Carlo, Nova Guataporanga, Nova Independência, Pacaembu, Panorama, Parapuã, Paulicéia, Piacatu, Pompéia, Queiroz, Quintana, Rinópolis, Salmorão, Santa Mercedes, Santópolis do Aguapeí, São João do Pau D'Alho, Tupã, Tupi Paulista e Vera Cruz (**mapa 2**).

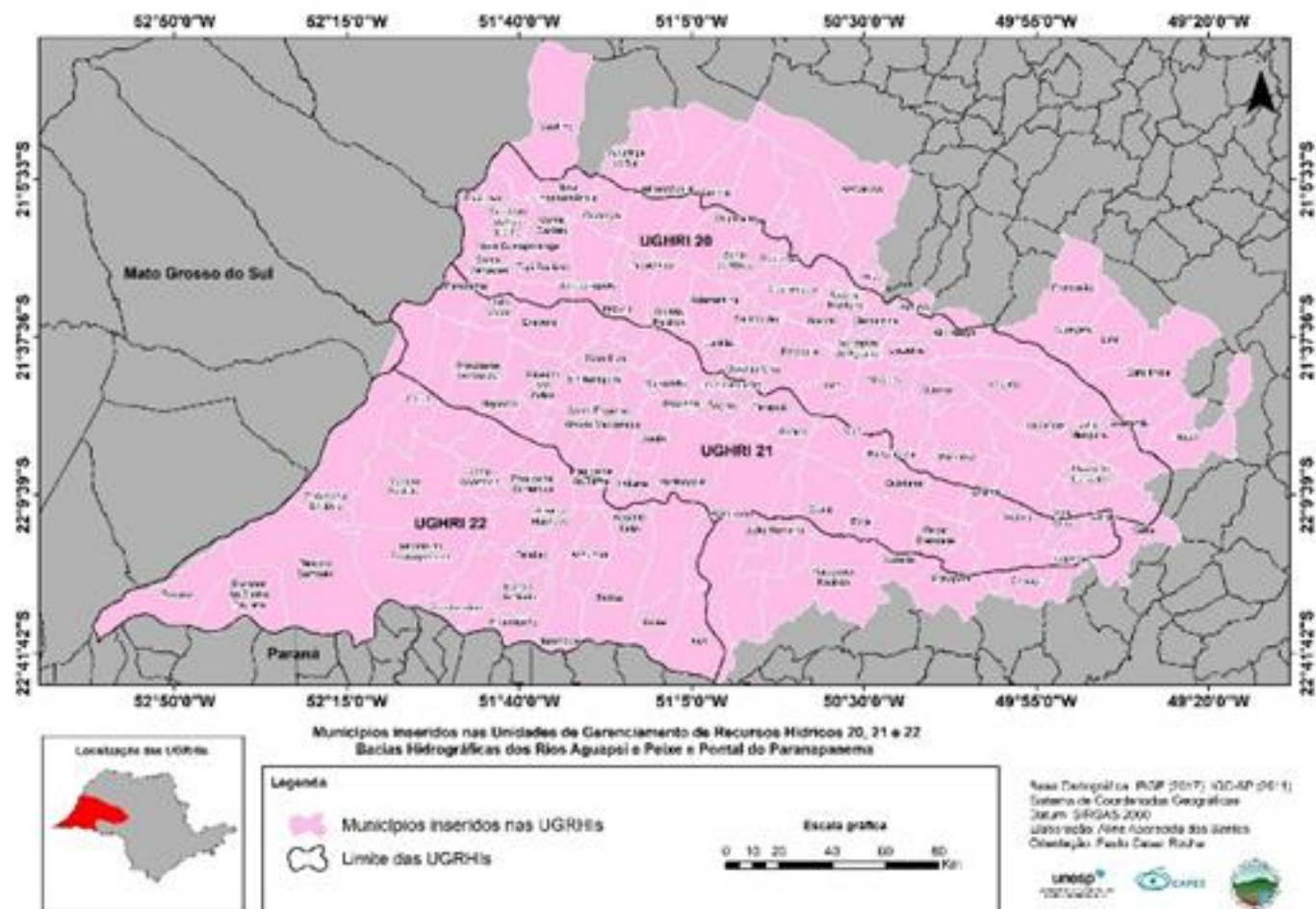
A Bacia Hidrográfica do rio do Peixe limita-se com a Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí ao norte, ao sul com a Bacia Hidrográfica do rio Paranapanema, a oeste com o rio Paraná e a Leste com a Serra dos Agudos e a Serra do Mirante (CBH-AP, 1997). Sua área de drenagem é de 10.769 km².

A Bacia Hidrográfica do rio do Peixe abrange 27 municípios, incluindo Adamantina, Alfredo Marcondes, Álvares Machado, Bastos, Borá, Caiabu, Emilianópolis, Flora Rica, Flórida Paulista, Indiana, Inúbia Paulista, Irapuru, Junqueirópolis, Lutécia, Mariápolis, Marília, Martinópolis, Oriente, Oscar Bressane, Osvaldo Cruz, Ouro Verde, Piquerobi, Presidente Prudente, Pracinha, Ribeirão dos Índios, Sagres e Santo Expedito.

Por sua vez, a UGRHI-22, localizada no extremo oeste do Estado de São Paulo, compreende a Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema, situada na vertente

paulista. Esta bacia faz divisa com os estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, abrangendo uma área de drenagem de 12.333 km². São 26 municípios integrantes, total ou parcialmente inseridos na UGRHI-22, que incluem Anhumas, Álvares Machado, Caiuá, Estrela do Norte, Euclides da Cunha Paulista, Iepê, Indiana, Marabá Paulista, Martinópolis, Mirante do Paranapanema, Nantes, Narandiba, Pirapozinho, Piquerobi, Presidente Bernardes, Presidente Epitácio, Presidente Prudente, Presidente Venceslau, Rancharia, Rosana, Regente Feijó, Taciba, Tarabai, Teodoro Sampaio, Santo Anastácio e Sandovalina (CBH-PP, 2016).

Mapa 2: Municípios inseridos nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) 20, 21 e 22.



Org: Santos (2020)

3.1 - Clima e sistemas atmosféricos

Caracterizar e conhecer o clima de uma determinada região é importante para entender as dinâmicas dos fenômenos atmosféricos, tais como: tempestades, furacões, variações e inversões térmicas e os diferentes períodos, como os de estiagem e de disponibilidade hídrica, sendo “fundamental para a organização das atividades humanas, sejam elas culturais, econômicas, sociais etc.” (MONTEIRO, 1976; SANT’ANNA NETO, 2013, p.60).

Segundo Nimer (1977) e Monteiro (1973), o sudoeste do Estado de São Paulo apresenta clima tropical quente e úmido, caracterizado pelas chuvas verão e estação seca durante os meses de inverno. A região situa-se em uma zona de transição climática onde a circulação atmosférica é controlada pela dinâmica das massas tropicais, setentrionais e meridionais. O período seco (inverno), sob influência dos sistemas polares e o período chuvoso (verão) é influenciado pela atuação dos sistemas tropicais que provocam chuvas intensas e de curta duração.

Nesse contexto espacial a atuação dos sistemas atmosféricos no Oeste Paulista, caracteriza-se por uma zona de transição climática, influenciada pelos conflitos entre as massas Tropical Atlântica, Tropical Continental e a massa Polar Atlântica, podendo ainda sofrer influência mesmo de forma esporádica da massa Equatorial Continental, conforme apresentadas por Monteiro (1964; 1973; 1976); Nimer (1979); (SANT’ANNA NETO, 1995). Barrios e Sant’Anna Neto (1996), Boin (2000); Brigatti e Sant’Anna Neto (2003); (BEREZUK,2006).

A atuação dos sistemas atmosféricos na região do Oeste Paulista, descrita por Barrios e Sant’Anna Neto (1996), Berezuk (2006) e Boin (2000), destaca que a Massa Polar Atlântica (MPA) tem origem no anticiclone polar Atlântico, responsável pelas baixas temperaturas na região. Quando essa massa encontra a Massa Tropical Atlântica, com alta umidade, provoca chuvas na região "graças aos mecanismos frontológicos que então ocorrem" (Boin, 2000, p. 53). A Massa Tropical Atlântica (MTA) predomina no Oeste Paulista durante todo o ano e é "proveniente da atuação do Anticiclone do Atlântico Sul" (Berezuk, 2007, p. 63).

Outro tipo de sistema atmosférico que atua na região do Oeste Paulista é caracterizado Massa Equatorial Continental (EC), e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). O Sistema Equatorial Continental tem origem na planície Amazônica e atua

com maior frequência no período de verão (BARRIOS & SANT'ANNA NETO, 1996). Considerada uma massa quente e úmida, a Massa Equatorial Continental chega até o oeste paulista atraída pela atuação de uma frente fria e que deixa o tempo instável em todo o Brasil Central (BEREZUK, 2007).

Segundo BEREZUK (2007), a partir do terceiro dia de atuação da Massa Equatorial Continental no território nacional é que se tem o predomínio do sistema atmosférico da ZCAS. A ZCAS é "responsável por grande parte da precipitação total de verão sobre o Brasil e está relacionada a secas severas e inundações extremas no sudeste do Brasil." (ROSA *et al*, 2020, p.01). Assim, Quadro (1994) destaca que grande parte da precipitação durante os meses de verão é provocada pela intensa atividade convectiva sobre a América do Sul e que a presença da ZCAS, contribui para a persistência da precipitação em algumas regiões brasileiras. O intenso volume de chuvas, devido a atuação da Massa Equatorial Continental e da Zona de Convergência do Atlântico Sul é considerada de grande importância para as atividades agrícolas e para os recursos hídricos regionais (BEREZUK, 2007).

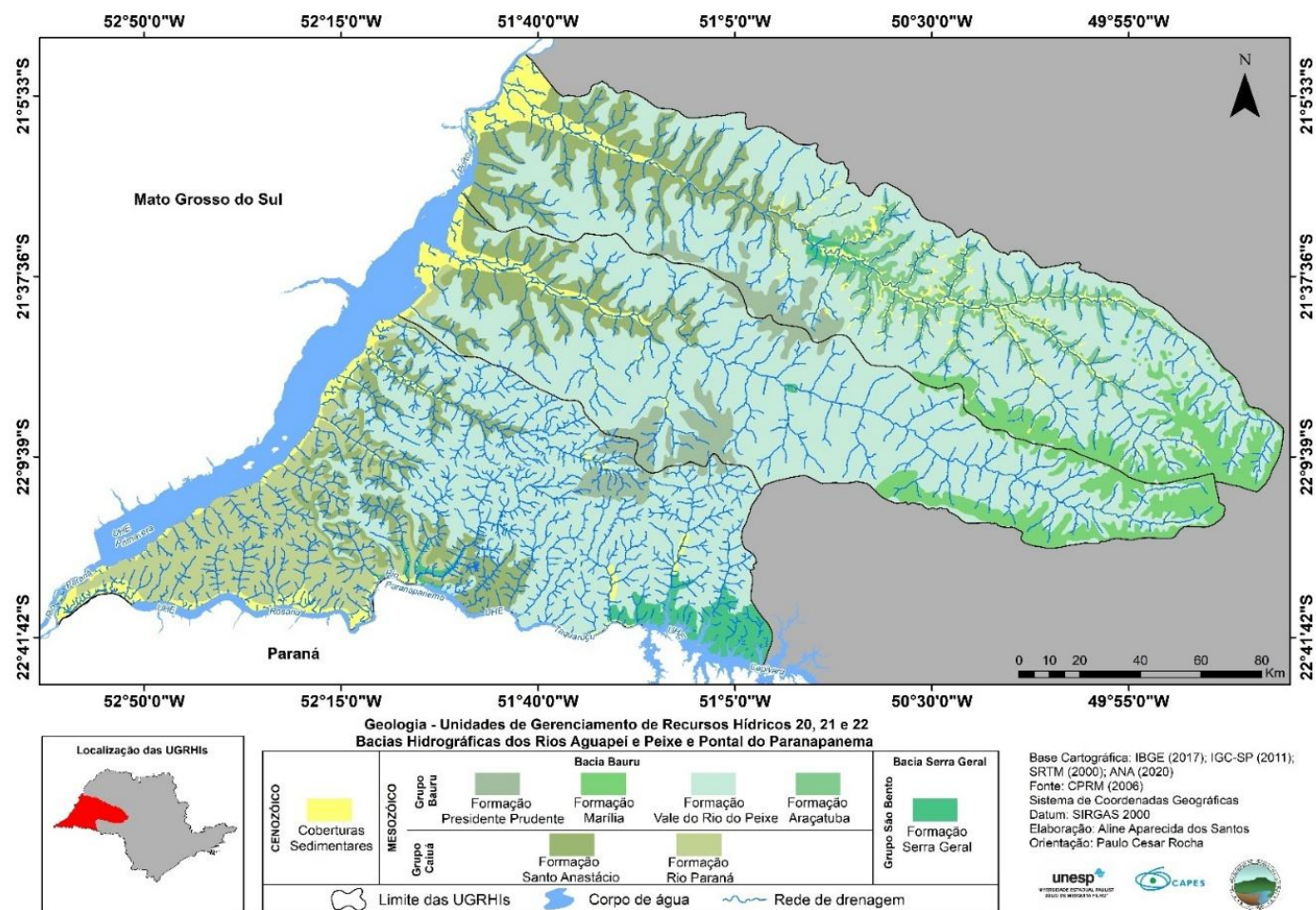
3.2 - Geologia

Baseados nos levantamentos apontados no Relatório zero do CBH-AP (1997), o substrato geológico aflorante nas Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Pontal do Paranapanema, Peixe e Aguapei são constituídos por rochas vulcânicas e sedimentares da Bacia do Paraná de idade mesozóica e depósitos aluvionares da idade cenozóica. Sua coluna estratigráfica apresenta respectivamente da base para o topo a seguinte seqüência de formação geológica: Grupo São Bento – Formação Serra Geral, Grupo Bauru – Formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina, Marília e Depósitos Cenozóicos.

O mapa das Bacias Hidrográficas dos rios do Peixe e Aguapeí mostram a formação geológica das bacias, identificadas por rochas vulcânicas e sedimentares do período mesozoico da Bacia do Paraná, além de depósitos aluvionares de idade cenozoica. A estratificação geológica fragmenta-se em rochas pertencentes ao Grupo Bauru (Formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina) e depósitos cenozoicos. Esses elementos contribuíram para a formação de colinas amplas e topos de colinas médias nessa região (IPT, 1981). Enquanto, no Pontal do Paranapanema, a região apresenta um

substrato geológico de rochas sedimentares cretáceas, pertencentes aos grupos Caiuá e Bauru, "cobertas por mantos regolíticos espessos e por sedimentos cenozoicos inconsolidados, incluindo terraços fluviais, colúvios e depósitos aluviais recentes" (SANTOS et al, 2011, p.492), conforme mapa 7.

Mapa 3: Geologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20,21 e 22.



Fonte: Santos (2022)

3.3 - Geomorfologia

O mapa geomorfológico apresentado em escala 1:250.000 é compilado do *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo* - Escala 1:1.000.000, baseado nos trabalhos de compartimentação do relevo do IPT (1981b) e Ross e Moroz (1997). Observa-se, que as UGRHI-20, 21 e 22 estão integralmente inseridas na Província Geomorfológica denominada Planalto Ocidental.

As UGRHIs 20, 21 e 22 estão situadas no Planalto Ocidental Paulista, ocupa aproximadamente 50% da área total do Estado de São Paulo. Segundo o IPT (1981), o Planalto Ocidental está situado sobre rochas do Grupo Bauru, constituído por diversas formações predominantemente areníticas, em algumas regiões estão cimentadas por carbonato de cálcio. Também são caracterizados por basaltos expostos nos vales dos principais rios em ocorrências descontínuas, exceto ao longo do Paranapanema e do rio Pardo, onde o material rochoso aflora extensivamente

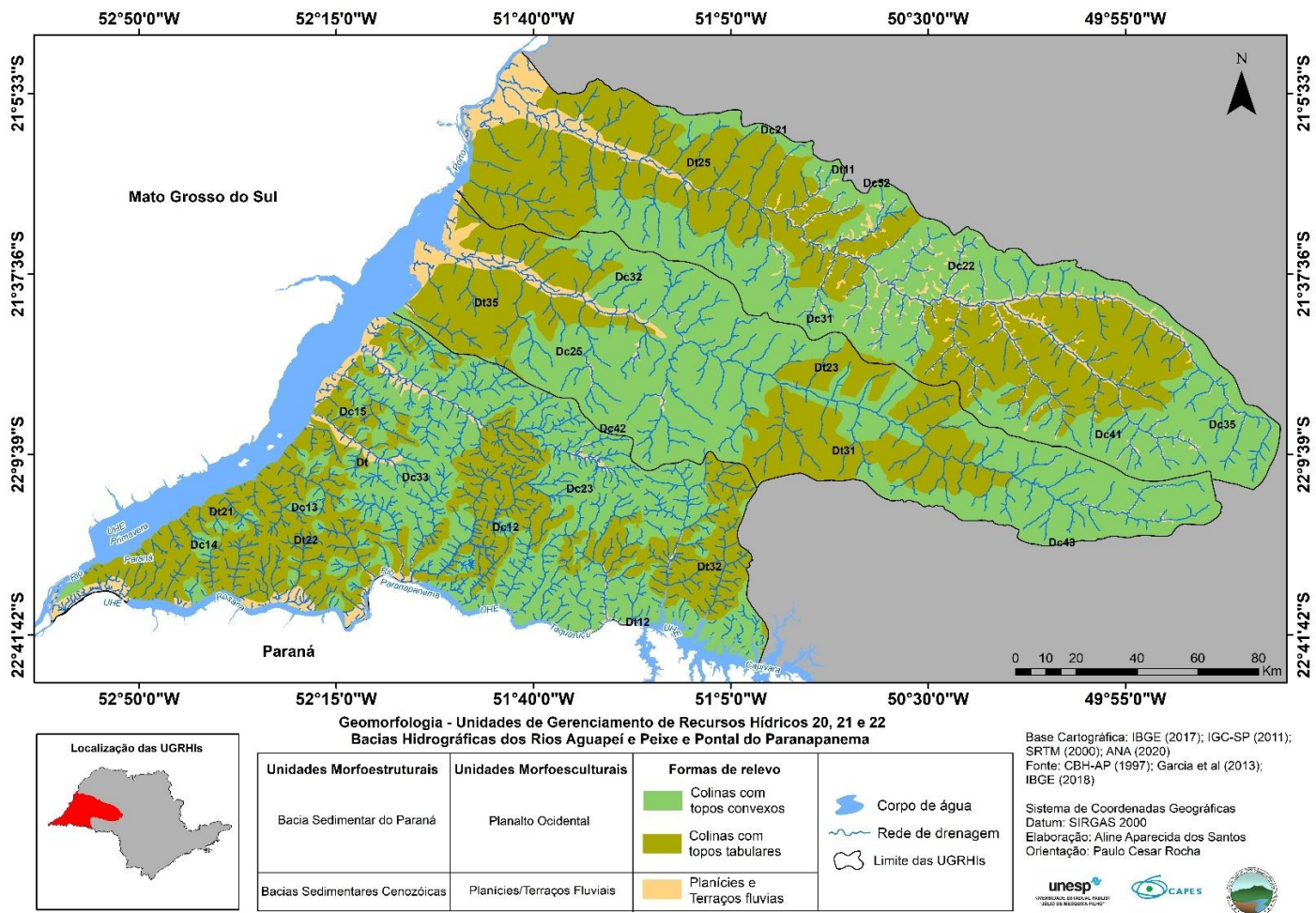
Segundo Ross e Moroz (1997), a área de pesquisa insere-se na unidade morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, caracterizada também pela morfoestrutura denominada Bacias Sedimentares Cenozóicas, representadas pelas planícies fluviais

Às unidades morfoesculturais, estão presentes na área o Planalto Ocidental Paulista (Sub-unidade Planalto Central Ocidental) e Planícies Fluviais (morfoestrutura Bacias Sedimentares Cenozóicas). O Planalto Central Ocidental caracteriza-se por apresentar modelados de dissecação com topos tabulares e com topos convexos que constituem Formas de Relevos com o predomínio de colinas amplas e baixas, e colinas baixas a médias com topos mais estreitos e alongados, respectivamente. (ROSS & MOROZ, 1997)

Ross e Moroz (1997) apontam que as unidades morfoesculturais Planícies Fluviais são relevos que correspondem às áreas consideradas essencialmente planas, geradas pela aggradação de sedimentos associados aos depósitos do Quaternário, principalmente do Holoceno.

O relevo tem predominância de colinas amplas e médias, morrotes e espigões alongados, feições de morros amplos e planícies aluviais, (CPTI, 1999), apresentados nos mapas 8, 9 e 10, no mapa 4.

Mapa 4: Geomorfologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22



Fonte: Santos (2022)

3.4 Pedologia

Para caracterização pedológica da área de estudo foi utilizado como referência os levantamentos realizados pelo Projeto Radambrasil (RADAMBRASIL, 1983) e compilados dos IPT (1987), elaborado a partir de cartas bases pedológicas em escala 1:250.000, resultantes de levantamentos realizados pela Divisão de Pedologia do Projeto Radambrasil. São encontradas as seguintes associações pedológicas, consideradas mais expressivas: Latossolo Vermelho Escuro, Podzólico Vermelho Amarelo, Litólico, Planossolo, Gleissolos Pouco Húmico e Areias Quartzonas, de acordo com a figura 5.

Destaca-se que no contexto geral da paisagem da UGRHI- 20, 21 e 22 os perfis de solos estudados, características morfológicas tais como cor, textura, espessura e processos pedológicos atuantes, traduzem influências correlacionados as formas de relevo como da composição mineralógica do substrato (CBH-AP, 1997; CBH-PP, 1999).

Os Latossolos de modo geral, são bastante evoluídos com elevado estágio de intemperização e fortemente ou bem drenado (EMBRAPA, 2018). Tal fator está associado à sua localização que, normalmente, ocorre em áreas de relevo plano e suavemente ondulados, o que permite maior capacidade de infiltração e tolerância a processos erosivos (LOMBARDI NETO, 1992). Na área em questão os Latossolos estão distribuídos por todos os compartimentos das bacias, embora concentrados no baixo curso da bacia, encontrados principalmente entre os gradientes de até 6% a 12%.

Quanto aos Neossolos, o IAC (1999) define-os como solos rasos, ou seja, com baixo desenvolvimento pedogenético. A categoria de Neossolos denominada Quartzarênico ocorre somente na bacia do rio do Peixe, especialmente nas proximidades da foz do rio principal.

As demais classes de Neossolos (Flúvico e Litólicos) ocorrem em ambas as bacias, sendo as primeiras associadas a ambientes aluvionares como planícies de fluviais e terraços (EMBRAPA, 2018). Já os Neossolos Litólicos estão relacionados a regiões de alta declividade, ou seja, podendo ultrapassar a 30%, ocorrendo na porção leste das bacias.

No que concerne aos Gleissolos, possuem estreita relação com as planícies fluviais, estando sujeitos a inundações periódicas. Sua presença nas bacias está associada a declividade de até 6%, com maior ocorrência em seu baixo curso.

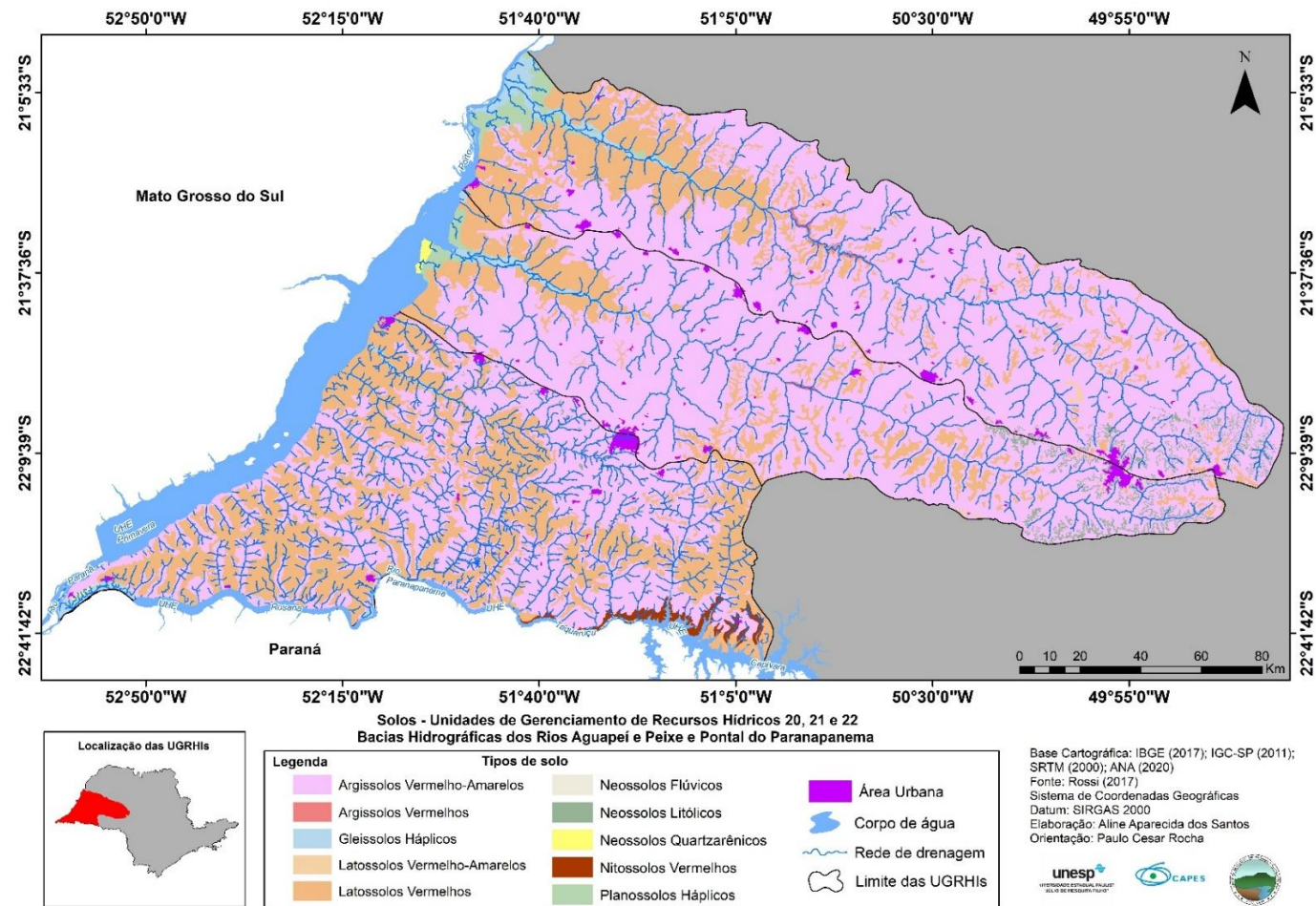
Enquanto, Planossolos são os que também estão inerentes a baixa declividades e estão presentes em uma pequena porção situada na extrema jusante das bacias. Estes solos podem ser encontrados em áreas de relevo plano ou suave ondulado e, com ocorrência periódica anual que permite excesso de água, mesmo em condições de clima semiárido (EMBRAPA, 2018).

Na UGRHI 20 e 21, observa-se o predomínio dos os Argissolos Vermelho-Amarelos e dos solos Argissolos apresentam textura média ou arenosa em superfície e, em sua maioria e considerados solos profundos a muito profundos, com boa drenagem (SARTORI et al, 2005; IBGE 2007).

Na UGRHI 21, no médio e baixo curso, verifica-se a presença mais significativa de Latossolos Vermelhos, além dos Gleissolos Háplicos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos.

Enquanto, os Latossolos Vermelhos e Argissolos Vermelho-Amarelos são predominantes na UGRHI-22, conforme demonstra no mapa 5. Assim, como a presença dos Argissolos Vermelho-Amarelos na porção nordeste da UGRHI, e de Latossolos na porção sudoeste.

Mapa 5: Pedologia nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22



Fonte: Santos (2022)

3.5 - Breve histórico de Ocupação

O contexto atual de ocupação do Oeste Paulista e da sua dinâmica produtiva e os processos de intensidade relacionados as condições históricas e naturais que possibilitaram o avanço da zona pioneira, que despertava esperanças do ponto de vista produtivo na região. As diversas vantagens e possibilidades produtivas eram observadas, a partir de uma topografia sem obstáculos, clima favorável (acolhedor), solos virgens, hábitos e meios técnicos considerados necessários aos pioneiros, destaque (MONBEIG, 1984)⁶.

Todo o movimento de ocupação do Oeste Paulista, deu-se a partir da década de 1920, proporcionado pelo avanço da frente pioneira e pelo desenvolvimento da cafeicultura. O surto cafeeiro contribuiu para um processo significativo de devastação em grande escala da Floresta Tropical, ocupada por povos indígenas e por outras culturas, como amendoim, algodão, além das pastagens para criação de gado, hoje ocupadas pela monocultura da cana de açúcar.

Como mencionado, a cultura do café foi responsável pelo avanço da “frente pioneira” no Oeste Paulista, que de forma intensa já havia ocupado a região montanhosa do estado do Rio de Janeiro e já estendia pelo território paulista, no Vale do Paraíba na primeira metade do século XIX. “As plantações de café eliminavam lenta, porém seguramente a agricultura tradicional e a cana de açúcar” (MONBEIG, 1984, p. 95).

O avanço da “fronteira” agrícola no território paulista, seguia o roteiro do café, que segundo Giavara (2016, p. 149):

[...] se abria grandes áreas, os trilhos ferroviários cortavam o sertão, cidades se erguiam, por fim, um mundo “civilizado” o “capital cafeeiro”, tomavam conta dos territórios “desocupados”. Nessa fronteira se constituiu como *locus* da tensão entre o encontro cultural, do “civilizado” e o “selvagem” a disputa de terras, a violência e a destruição do mundo natural eram realidades permanentes [...].

Monbeig (1984) apresenta que o povoamento moderno desprovido de virtude é capaz de desencadear um avanço desbravador para garantir o seu desenvolvimento econômico. Um avanço e processo de ocupação histórica no estado de São Paulo que

⁶ O trabalho de pesquisa de Pierre Monbeig foi publicado pela primeira vez em 1952, com o título original *Pionniers et Planteurs* de São Paulo. Para o desenvolvimento deste trabalho, a obra utilizada é uma versão brasileira, publicada em 1984.

encontrou pelo caminho os povos indígenas, que habitavam a região do Planalto Ocidental Paulista e que devido os conflitos de ocupação pelo movimento “colonizador” (fazendeiros) levaram quase que extermínio dos indígenas.

[...] nas matas dos planaltos ocidentais, os fazendeiros lá encontraram os índios. Eram estes de todo separados do movimento de expansão, economicamente. Todavia, foram eles os verdadeiros pioneiros, se nos ativermos ao sentido mais restrito da palavra, pois que foram os primeiros a queimar a mata e a aproveitar o solo. Impossível é fornecer a menor indicação sobre o número de índios, que viviam nos planaltos ocidentais, no fim do século XIX e início do século XX. Quase sempre violentos foram os contatos que mantiveram com os brancos e pouco sabemos sobre a localização dos principais grupos e seus gêneros de vida. (MONBEIG, 1984, p.129)

A marcha pioneira que tomou pé nos planaltos ocidentais do estado de São Paulo deu-se com a expansão da cafeicultura, marcado pela velocidade como o desenvolvimento avançava ferozmente sobre a região, conforme destaque Monbeig:

Desde que tomou pé nos planaltos ocidentais, prosseguiu a vaga pioneira em sua marcha infatigável, sacudida pelas crises econômicas, acelerada às vezes pelo jogo das circunstâncias políticas mundiais. Incessantemente engrossada por elementos novos, a multidão dos plantadores e dos pioneiros não cessou de progredir, mais ou menos depressa, mas sem fatigar-se. Testemunham avanços sucessivos as cidades, que se sucedem como contas de um rosário, ao longo das ferrovias. Por toda a parte, traz a paisagem a marca ofensiva contínua, nos restos de florestas que subsistem, sobre solos talados por essa cultura devastadora. (MONBEIG, 1984, p. 125).

O processo de devastação da vegetação nativa, a abertura das estradas, a instalação dos trilhos da Estrada de Ferro Sorocabana, contribuíram para o surgimento das primeiras propriedades para o desenvolvimento da cultura do café. Observa-se que os critérios de aquisição das propriedades não eram muito bem definidos, já que não havia nessa época uma legislação adaptada para comprovar a veracidade da aquisição dessas propriedades (LEITE, 1998)

Até meados do século XIX, na falta de legislação mais adaptada ao trato da propriedade no Brasil, era prática a declaração de posse de glebas de terras por meio de escrituração em livros existentes em paróquias, feita pelo próprio vigário, assinadas pelo interessado ou seu procurador e por algumas testemunhas. Era o “Registro Paroquial”, ou o “Registro do Vigário. O termo de posse assim praticado em que se mencionavam os

limites do terreno, conquanto não conferisse domínio definitivo ao interessado, servia-lhe, mais tarde, para legitimar as terras em seu nome, desde que “nelas tivesse cultura efetiva e morada habitual”. Quando o interessado requeria a legitimação da posse em juízo, a autoridade mandava apurar a veracidade das informações constantes no requerimento, tais como: divisas, benfeitorias, roças ou criações existentes, ouvia testemunhas etc. Tudo legalizado, demarcava-se a área da gleba e expedia-se o título de legitimação. (LEITE, 1998, p. 36-37-38)

Sobre a legitimação das terras, Leite (1998, p. 38) destaca que “a Lei nº 601, de 1850, pusera fim a esse tipo de posse. Abria, contudo, a possibilidade de se legitimarem as terras já ocupadas antes do referido ano.” Observa-se que o processo de legitimação das terras no oeste paulista, foram em sua maioria consolidadas sem uma investigação a respeito da veracidade dos documentos que eram apresentados, além dos conflitos entre grupos de grileiros (LEITE, 1998).

[...] algumas propriedades eram adquiridas, porém não ocupadas, visando obviamente a valorização das terras, estas acabam sendo invadidas por intrusos (...). Houve conflitos entre os próprios grileiros, em contenda pelas mesmas terras, e não eram raros os grandes grileiros terem a seu soldo grupos de jagunços armados visando a expulsão de pequenos ocupantes” (LEITE, 1998, p. 44)

Leite (1998, p. 48) destaca o longo processo de consolidação das terras na região do oeste paulista e que “os pequenos lavradores eram importantes aos portadores de títulos de qualidade duvidosa”. Assim, as glebas eram povoadas, aumentava as áreas desmatadas para o aproveitamento das terras, o que colaborou para a movimentação do comércio nas cidades e para criação de escolas.

De acordo com Victor *et al* (2005, p 24), a estrutura fundiária era dominada por grandes latifundiários, passou a ser subdivida e retalhada, dando espaço as pequenas e médias propriedades, o que favoreceu o desmatamento de matas ainda existentes nessas propriedades. Quanto maior o avanço do mercado imobiliário sobre as terras, maior a pressão sobre as áreas de vegetação nativa.

A partir dos trabalhos de pesquisas de A.C CAVALLI, Jr GUILLAUMON e R. SERRA FILHO, apresentado em 1974, sobre o desmatamento das áreas de vegetação nativa é possível observar a evolução do desmatamento em um intervalo de cinquenta anos, de 1920 a 1970, reduzido a pequenos fragmentos de mata, principalmente no Pontal do Paranapanema, Oeste Paulista.

É preciso ressaltar que a expressiva derrubada da vegetação nativa (floresta tropical) durante o avanço da frente pioneira no Oeste Paulista foi avassaladora, com a expansão cafeeira. Victor *et al* (2005) afirma que a devastação se processa em grande escala e com relação estreita entre o caminhamento do café em direção ao interior paulista e com isso o avanço das derrubadas das matas. Como o café é uma cultura extremamente exigente quanto ao clima e ao solo, o autor ressaltava que em busca do “humus rico do solo ou do bafo do sertão”, expressão da época, novas terras de matas eram derrubadas e ocupadas, durante a implantação e produção cafeeira.

Boin (2000, p. 08) afirma que Oeste Paulista, passou por intensas transformações antropogênicas, que foram ocasionadas pela ação de grileiros e especuladores imobiliários, por fazendeiros cafeicultores e pelo processo de implantação das ferrovias, grandes consumidoras de lenha, que fortaleceu a derrubada da vegetação natural, que rapidamente foi extinta e substituída por culturas e pastagens.

Neste momento, as Bacias hidrográficas dos Rios Aguapei, Peixe e Pontal do Paranapanema encontra-se ocupadas por culturas temporárias que dominam o processo produtivo no setor agropecuário, na região do Oeste Paulista, como a cana-de-açúcar e algumas áreas de pastagem para criação de gado. As áreas de vegetação nativa ficaram limitadas a proximidade com o canal o fluvial e área do Parque Estadual Morro do Diabo, que possui quase 34 000 hectares de mata atlântica de interior, localizado no município de Theodoro Sampaio, no Pontal do Paranapanema.

4 - MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados para essa pesquisa buscam fornecer informações e dados para investigar o tema do trabalho de tese – Estimativa de Aporte de Fertilizantes por meio de Modelagem Ambiental em Canais Fluviais. Os procedimentos consistem em uma sequência de etapas elaboradas para alcançar os objetivos propostos e responder às questões de pesquisa.

Para fundamentar o desenvolvimento desta pesquisa, foram realizadas leituras, (estudos de gabinete) para a construção do arcabouço teórico, levantamentos de dados sobre a temática e de atividades de campo.

Através do levantamento bibliográfico, tornou-se possível compreender os principais conceitos temáticos que servem de alicerce para este trabalho, destacando: a Geografia como ciência de interação entre a sociedade e a natureza; Bacias Hidrográficas, Escoamento Superficial e Sistemas Fluviais, o contexto dos fertilizantes - suas definições, produção e impactos ambientais - especificamente seu uso na produção de cana-de-açúcar, e as principais abordagens sobre conectividade.

4.1 - Levantamento dos dados de Uso e Cobertura da Terra

O mapeamento de uso e cobertura da terra é um processo que envolve a identificação, classificação e representação cartográfica das diferentes categorias de uso e cobertura da superfície terrestre em uma região específica.

A pesquisa busca compreender a dinâmica da paisagem, as mudanças de uso e cobertura da terra e a produção de cana-de-açúcar ao longo do tempo nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí, Peixe e Pontal do Paranapanema. O mapeamento desempenha um papel fundamental na tomada de decisões em diversas áreas, incluindo conservação ambiental, agricultura e a gestão de recursos naturais.

Para realizar o mapeamento de uso e cobertura da terra, foram seguidos procedimentos operacionais que envolvem o processamento de dados orbitais, cadastrais e temáticos em um ambiente de sistemas específicos para aquisição, armazenamento, manipulação, análise e apresentação de dados georreferenciados, ou seja, um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para isso, a análise considerou a escala temporal dos anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019.

A escala temporal de análise foi delimitada considerando o levantamento prévio de dados já realizados em pesquisas anteriores sobre a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Oeste Paulista. Esses estudos abordaram os aspectos limnológicos, a produção de sedimentos e o potencial de escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapei), 21 (Bacia Hidrográfica do rio do Peixe) e 22 (Bacia Hidrográfica do Pontal do Parnapanema), bem como a vulnerabilidade e o risco de contaminação por glifosato na rede de drenagem na UGHRI 22. Com base nessa análise, a escala temporal tem o propósito de gerar dados e informações para contribuir com pesquisas futuras e analisar os possíveis impactos causados pelos fertilizantes nos canais fluviais da região.

Os mapas temáticos foram gerados a partir de imagens dos satélites *Landsat 7* ETM + C2 L2 (para os anos de 2002 e 2007) e *Landsat 8* OLI/TIRS C2 L2 (para os períodos de 2013, 2017 e 2019), na escala de 1:250.000 e resolução de 30 metros, disponibilizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*USGS - United States Geological Survey*).

Sobre o levantamento dos dados para o mapeamento temático é importante destacar que o sensoriamento remoto é reconhecido como uma ferramenta que possibilita a obtenção de dados da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os elementos que a compõem. As atividades associadas a esse método envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres, sendo registradas por sensores remotos (MORAES, 2002 p. 7)

Dessa forma, para análise temporal espacial das Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos 20, 21 e 22, foi necessário o uso de quatro cenas para cada ano, devido a extensão da área de pesquisa. As datas das cenas para elaboração dos mapas temáticos podem ser observadas na tabela 1

Tabela 1 - Datas das cenas utilizadas para a elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra

Cenas	2002	2007	2013	2017	2019
1	25/09	07/09	30/08	10/09	16/09
2	15/08	14/09	06/09	17/09	23/09
3	06/08	05/09	13/09	23/08	30/09
4	06/08	05/09	13/09	07/08	30/09

Fonte: USGS (2021); Org: Degrande (2021); Prates (2021)

Após aquisição destas imagens referentes a cada um dos períodos analisados, gerou-se o mosaico por meio das ferramentas *Data Management Tools>Raster> Raster Dataset> Mosaic*, em prosseguimento, as imagens passaram por tratamento denominado a melhor composição de bandas (6 -5- 4), resultando em um novo *raster* com falsa cor. Nesta nova composição colorida destas imagens e iniciou-se o processo de classificação supervisionada, realizada por intermédio dos seguintes instrumentos: *Classification> Maximum Likelihood Classification*. A atribuição dos usos da terra foi realizada com base no Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE, disponível em sua biblioteca digital.

As classes temáticas geradas a partir da classificação supervisionada foram: Águas Continentais, Área Urbana, Cobertura Florestal, Pastagem, Outras Culturas e Área Descoberta.

Para o levantamento dos dados de apropriação da Cana-de-Açúcar as informações foram obtidas a partir do banco de dados do Centro de Estudos do Trabalho, Ambiente e Saúde (CETAS) e do projeto MapBiomias (2020). É importante ressaltar que o Projeto MapBiomias utiliza uma série de imagens dos satélites Landsat 5-7 e 8, com resolução de 30 metros, para disponibilizar o mapeamento dos usos da terra no território brasileiro desde 1983. Os resultados desse mapeamento compreendem todas as variações que cada cultura teve ao longo do ano. Em relação à acurácia, o MapBiomias tem correlacionado os dados de uso com os valores de produção agrícola fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).

Durante o desenvolvimento da pesquisa e do mapeamento de uso e cobertura da terra, foi identificada a necessidade de realizar atividades de campo para reconhecer as áreas produtivas de cana-de-açúcar, possíveis discrepâncias entre o que foi mapeado e o observado *in loco*, os aspectos socioambientais mais relevantes e transformadores da paisagem na área de pesquisa, bem como os possíveis impactos ambientais decorrentes das intensas mudanças no uso da terra nos últimos anos nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGHRI 20, 21 e 22)

Foram realizadas duas saídas de campo na UGRHI 20 – Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí cobrindo o alto, médio e baixo cursos das bacias. A primeira atividade de campo ocorreu em com a finalidade de verificar e analisar áreas do baixo curso do rio Aguapeí e relação com a produção canavieira. Enquanto as saídas de campo na UGHRI 21 – Bacia Hidrográfica do rio do Peixe, foram analisados três pontos, situados entre o médio e baixo

curso, com objetivo de observar a exposição da rede de drenagem frente à expansão da atividade canavieira.

4.2 – Recomendação de Adubação/Fertilizantes para Cana-de-Açúcar

Para determinar a estimativa ou quantidade de fertilizantes por hectare a ser fornecido para a cultura da cana-de-açúcar a partir do Boletim 100 (IAC, 2022) e de acordo com a análise de solo⁷, no entanto, aqui utilizamos apenas a quantidade recomendada para produtividade esperada nas áreas com cultivo da cana-de-açúcar.

Assim, determina-se a quantidade de N-P₂O₅ e K₂O a ser fornecido, após encontrar a relação entre os fertilizantes dividindo pelo menor número do fertilizante e a partir dessa relação, determina a fórmula aproximada e quantidade de adubo formulado a ser fornecido por hectare, somando as quantidades e multiplicando por 100 (dado pela fórmula da adubação), após esse processo, soma-se os números da fórmula, resultando na quantidade do adubo a ser fornecido por hectare.

Analizando os dados de produtividade e rendimentos históricos de 2000 a 2022 em áreas plantadas, colhidas e rendimento por hectare, observa-se que nas áreas destinadas à cana-de-açúcar nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22 do IBGE (2023), os valores estão abaixo de 100 toneladas por hectare. Portanto, para áreas com produtividade inferior a 100 t/há, são recomendados pelo IAC (2022) 30 kg de N, 180, 140 e 80 kg de P₂O₅ e 140, 120, 100 e 60 kg de K₂O, conforme mg/dm³ (parâmetro para inserir na análise e no cálculo da formulação de adubação, chamados de níveis de fertilizantes)⁸. Levando em consideração que os solos brasileiros geralmente são ácidos e carentes em fósforo (EMBRAPA, 2002, 2018, 2020), foi utilizado o valor de 140 kg para essa formulação.

Assim:

1-Dividir os 3 números pelo menor, sendo: $\frac{30}{30}$, $\frac{140}{30}$ e $\frac{100}{30}$, resultando em 1 – 4,66 – 3,33 (valor sem aproximação). Como não temos um adubo formulado para dividir e encontrar a recomendação exata, então para esse caso, formulamos uma adubação – multiplicando o menor número que aproxima do valor recomendado de NPK.

⁷ Para estimativa de fertilizantes NPK e de aporte nas áreas com cana-de-açúcar não foram utilizadas análise de solo para as áreas das sub-bacias. Utilizamos a recomendação do IAC (2022) de acordo com as recomendações de adubação em função da produtividade esperada.

⁸ Os níveis de nutrientes/fertilizantes estão descritos no Boletim 100 (2022, p.183).

2 – Multiplicamos $1 * 6$; $4,66 * 6$; $3,33 * 6$, nesse caso, encontramos os valores aproximados do adubo formulado $6 - 28 - 20$; - formulação pronta no mercado $8 - 28 - 16$

3 – Depois de encontrar a formulada aproximada, somamos os valores de recomendação de NPK, multiplicamos por 100 (estimativa de produtividade por hectare) e dividimos pelo valor da soma do adubo formulado, nesse caso temos:

$$30 + 140 + 100 = 270 * \frac{100}{54} = 500 \text{ Kg/ha} \quad \textbf{Equação 1}$$

Nessa perspectiva, para realizar a produção cartográfica referente à estimativa do uso de nutrientes (NPK) na cultura da cana-de-açúcar, foi empregada a ferramenta *Statistic > Tabulate Intersection*. Essa ferramenta permitiu correlacionar as tabelas de atributos da área de cana com as áreas das sub-bacias dos rios Aguapei, Peixe e Pontal do Paranapanema. O resultado desse procedimento foi a elaboração de uma nova tabela de atributos contendo os valores da área de cana-de-açúcar em cada sub-bacias. Posteriormente, utilizando a ferramenta *Field Calculator*, foi possível calcular a quantidade de NPK utilizado na produção de cana-de-açúcar (Equação 1).

Dessa forma, a equação utilizada para a estimativa do uso de NPK na cultura da cana-de-açúcar foi:

$$\textbf{Área de cana na subbacia * 0,5 toneladas} \quad \textbf{Equação 2}$$

Na análise das classes de uso de fertilizantes NPK nas sub-bacias das UGHRI 20, 21 e 22, os dados foram organizados conforme demonstrado na tabela 2. A distribuição dessas classes foi realizada utilizando a ferramenta *quantile*, um método que se baseia na divisão dos dados em valores representativos, ou seja, uma quebra de classe. Esse processo permite que cada classe contenha uma quantidade aproximadamente igual de observações, facilitando a compreensão e análise dos números associados às diferentes sub-bacias.

Tabela 2: Classificação do Uso de NPK nas Sub-bacias - UGHRI 20,21 e 22

Classes	Uso de NPK (toneladas)
1	12
2	136
3	388
4	1.010
5	> 1.010

Elaboração: Renata Pereira Prates

4.3 – Modelagem do Escoamento Superficial: Estruturação dos Dados

Uma classificação implica agrupar objetos com base na semelhança de suas características para atender a um objetivo específico. Na hidrologia, a classificação dos solos está intrinsecamente ligada a dois objetivos principais: avaliar sua suscetibilidade à erosão e analisar sua contribuição para o escoamento hídrico (Sartori; Neto; Genovez, 2005).

Para elaborar o mapa com a estimativa do escoamento superficial, foi adotada a metodologia empregada por Santos (2018) em estudos hidrológicos na UGHRI 22 – Pontal do Paranapanema. A produção dos mapas de escoamento superficial baseou-se no método do Curve Number (CN), que reflete a impermeabilidade da superfície. Isso demandou a associação entre as classes dos grupos hidrológicos de solo e as classes de cobertura e uso da terra das UGRHIs dos anos de pesquisa.

Os tipos de solos foram reclassificados para se alinharem com as classes definidas pelo Grupo hidrológico de Solos (GHS). Essa reclassificação foi realizada seguindo a proposta estabelecida por Sartori; Neto; Genovez (2005) e Rossi (2017), conforme apresentado no quadro 2

Quadro 2: Classificação dos grupos hidrológicos de solos para as classes de solos para as Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – 20, 21e 22

Grupos Hidrológicos de Solo
Grupo A Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência e tolerância à erosão; Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20);

Solos de textura média; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil;
 Solos bem drenados ou excessivamente drenados;
 Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
 A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/argilosa e muito argilosa/muito argilosa

Enquadra-se neste grupo o: Latossolos vermelhos

Grupo B

Solos profundos (100 a 200 cm);
 Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão;
 Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50;
 Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso;
 Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1;
 A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa, argilosa/argilosa e argilosa/muito argilosa

Enquadra-se neste grupo: Latossolos vermelho- amarelos e Neossolos quartzarênicos;

Grupo C

Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm);
 Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão;
 São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta;
 Solos associados a argila de atividade baixa (Tb);
 A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.

Enquadra-se neste grupo: Argissolos vermelho e Argissolos vermelho- amarelos

Grupo D

Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão;
 Solos rasos (prof. < 50 cm);
 Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1;
 Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta);
 Solos orgânicos.

Enquadra-se neste grupo: Gleissolos Háplicos, Planossolos Háplicos, Neossolos Litólicos e Neossolos Flúvicos

Fonte: SARTORI, LOMBARDI NETO e GENOVEZ (2005) e ROSSI (2017)

Elaboração e adaptação: Renata Pereira Prates

O levantamento das informações pedológicas foi realizado conforme o mapeamento de solos do Estado de São Paulo (São Paulo, 2017). Com base nessas informações e na proposta de classificação hidrológica dos solos, a reclassificação dos solos das UGRHI 20, UGRHI 21 e UGRHI 22 foi estabelecida considerando as características dos tipos de solo. A tabela 3 apresenta as classes de solo na área de pesquisa e sua reclassificação de acordo com os grupos hidrológicos de solos:

Tabela 3: Classificação do Grupos Hidrológicos de Solos para UGRHI 20, 21 e 22

Tipo de solo	GHS
Argissolos Vermelhos	C
Argissolos Vermelho-Amarelos	C
Latossolos Vermelhos	A
Latossolos Vermelho-Amarelos	A
Planossolos Háplicos	D
Neossolos Flúvicos	C
Neossolos Litólicos	D
Neossolos Quartzarênicos	B
Nitossolos Vermelhos	B
Gleissolos Háplicos	B

Fonte: SÃO PAULO (2017); SANTOS (2023);

Elaboração e adaptação: Renata Pereira Prates

A espacialização das informações foi executada utilizando um software de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o *ArcGIS 10.3* e representada através da elaboração de mapas temáticos. O SIG foi empregado não apenas para a visualização espacial, mas também para a extração dos dados quantitativos. Para o tratamento estatístico dos dados, foi utilizado o software de planilhas *Excel*.

Para atribuir os valores de CN, recorreu-se o quadro 3 de valores padrão desenvolvida pelo *Soil Conservation Service* (SCS) fundamentada em estudos empíricos conduzidos em diversas regiões dos Estados Unidos, contemplando diferentes condições e tipos de cobertura do solo (PRUSKI, et al., 2001). Santos (2019) baseada nos estudos de (MOCKUS, 2004) destaca que o método apesar de ter sido desenvolvido em pequenas bacias experimentais, ele pode ser adaptado para aplicação em grandes áreas desde que levem em consideração as variações geográficas das chuvas e as características de cobertura e uso do solo.

Quadro 3: valores padrão desenvolvida pelo *Soil Conservation Service* (SCS)

Número	Classe	Tabela padrão Classe/Superfície	GHS			
			A	B	C	D
1	Corpo de água	-	100	100	100	100
2	Área urbana em desenvolvimento	Área urbana em desenvolvimento	77	86	91	94
3	Área urbana Adensada	Área urbana Adensada	91	75	83	87
4	Florestal	Florestas Normais	36	60	70	76
5	Florestas (Unidade de Conservação)	Florestas Densas, de alta transposição	26	52	62	69
6	Área de inundação	Florestas Esparsas	46	68	78	84
7	Silvicultura	Florestas, Muito esparsas, de baixa transpiração	56	75	86	91
8	Cultura Permanente	Combinação de bosques Deficiente	57	73	82	86
9	Café	Sem cobertura do solo, sem terraços	48	68	79	83
10	Cultura Temporária	Cobertura completa Em fileiras retas	64	76	84	88
11	Cana de açúcar	Cobertura completa Em fileiras retas	39	61	74	80
12	Soja	Plantações de legumes ou cultivados normais	49	69	79	94
13	Pastagem	Pastagens Pobres, em curvas de nível	47	67	81	99
14	Cerrado	Campos permanentes Normais	36	60	73	79
15	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Campos permanentes Normais	36	60	73	79
16	Outras áreas não vegetadas	Solo lavrado Em fileiras retas	70	80	87	90

Fonte: Adaptado de NHE (2004, p. 3); TUCCI (2004, p. 405); SARTORI (2010, p. 44)

Elaboração: Renata Pereira Prates

Atribuídos os valores de CN baseados na tabela padrão do SCS, procedeu-se à elaboração dos mapas usando a extensão *HEC-GeoHMS²* no *ArcGIS 10.3*. A

especialização dos valores de CN foi executada por meio da ferramenta *Gerar grade CN*, na qual foram importadas uma tabela contendo os valores de CN, um arquivo vetorial com informações de solos, uso e cobertura da terra da área de estudo.

O mapa de uso e cobertura da terra desempenhou um papel fundamental, permitindo a interligação entre os diferentes grupos hidrológicos de solos e o uso da terra. Essa interconexão possibilitou a obtenção do complexo hidrológico solo-vegetação e a determinação dos valores de CN.

Os valores do Curve Number (CN) são adimensionais e variam de 0 a 100. Valores próximos a 0 indicam uma superfície incapaz de gerar escoamento superficial, enquanto aqueles próximos a 100 representam uma superfície com alto potencial para gerar escoamento superficial (MAGALHÃES, 2005), como observamos na tabela 4.

Tabela 4: Valores de CN para o complexo hidrológico solo- vegetação para UGHRI 20, 21 e 22

Cobertura vegetal e uso da terra	GHS			
	A	B	C	D
Classes				
Água	100	100	100	100
Área urbana	61	75	83	87
Cobertura florestal	26	57	62	69
Pastagem	47	67	81	99
Cana- de- açúcar	64	76	84	88
Outras culturas temporárias	64	76	84	88
Solo Exposto	77	86	91	94

Elaboração: Renata Pereira Prates

Com base nesses dados, foi elaborado o mapa de CN, o qual delineou as seguintes classes

Tabela 5: Classes de CN nas para UGHRI 20, 21 e 22

Classes	CN
1	26- 66
2	67-76
3	77-80
4	81-83
5	83-100

Elaboração: Renata Pereira Prates

A capacidade máxima de infiltração foi elaborada com base no mapa de CN. Através deste mapa, é possível calcular essa capacidade. Sua geração se deu mediante a aplicação do seguinte Equação (3):

$$S = \left[\frac{25400}{CN} \right] - 254 \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

S= Infiltração (adimensional)

CN= Número da curva que define o complexo hidrológico solo- cobertura

* Os valores numéricos são coeficientes para ajuste de unidades

Os dados de precipitação foram extraídos do banco de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE,2011;2020). As médias mensais de chuva foram coletadas das estações situadas nas fronteiras das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) 20, 21 e 22, selecionadas com base na disponibilidade e extensão das séries temporais. No total, foram analisadas 41 estações na UGRHI 20, 38 estações nas fronteiras da UGRHI 21 e 42 estações na UGRHI 22. Essa seleção permitiu uma abrangência representativa para a avaliação das tendências e padrões de precipitação ao longo do período considerado, conforme mapa 6.

Com estas informações gerou-se o mapa de chuvas com as seguintes classes, descritos abaixo (tabela 6)

Tabela 6: Classes da média de precipitação anual para UGRHI 20, 21 e 22

Classes	Média de precipitação anual (mm)
1	1.290
2	1.311
3	1.333
4	1.360
5	1.597

Elaboração: Renata Pereira Prates

O escoamento superficial, conforme definido pelo método CN (Tucci, 2004), é determinado pela seguinte Equação (4):

$$Q = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S}$$

Equação 3

Onde:

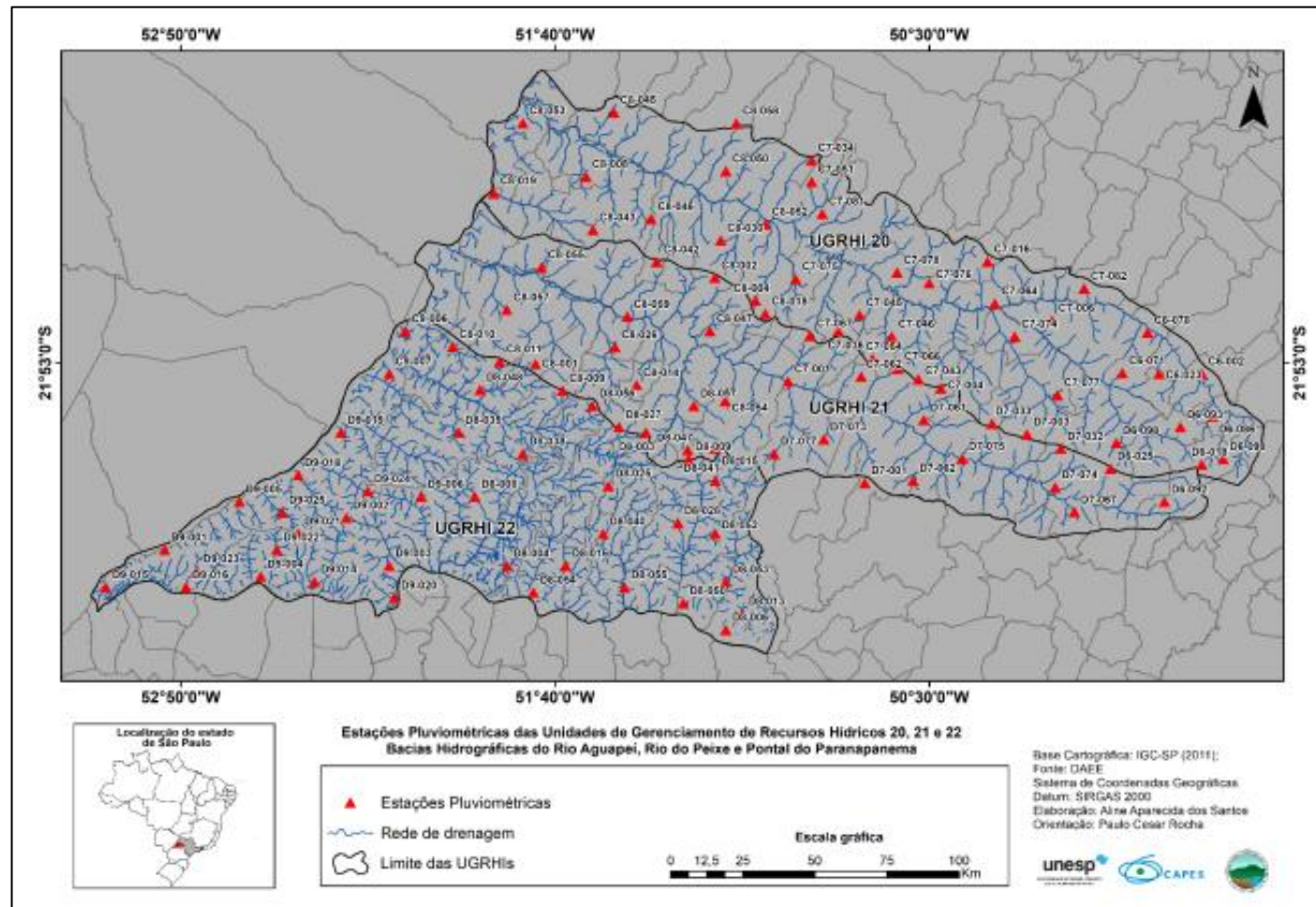
Q= Escoamento superficial (mm)

P= Precipitação (mm)

S= Capacidade máxima de infiltração

* Os valores numéricos são coeficientes para ajuste de unidades

Mapa 6: estações pluviométricas nas UGRHIs 20,21 e 22



Fonte: Santos (2022)

Considerando os dados de precipitação extraídos do banco de dados hidrológicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo (DAEE, 2011; 2020) e a média anual dos anos de 2002 a 2019 e da Equação CN, foi gerado o mapa de estimativa escoamento superficial dividido em cinco classes para as Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos 20, 21 e 22 (tabela 7)

Tabela 7: Classes de estimativa de escoamento superficial nas UGHRI 20, 21 e 22

Classes	Estimativa de escoamento superficial (mm)
1	1.228
2	1.288
3	1.310
4	1.522
5	1.554

Elaboração: Renata Pereira Prates

Para gerar o escoamento superficial exclusivamente em áreas de plantio de cana-de-açúcar, foi utilizado o mapa de escoamento gerado na fase anterior em conjunto com o arquivo de delimitação das áreas de cana. Com base nesses arquivos, aplicou-se o *intersect*, resultando no escoamento superficial específico para as áreas de cultivo de cana. As classes de escoamento são iguais às apresentadas na tabela 6.

4.3.1 Estimativa a contaminação por escoamento superficial pelo aporte de fertilizantes nas UGHRI 20, 21 e 22.

Para desenvolver o procedimento de estimativa e avaliação do risco de contaminação decorrente do aporte de fertilizantes, a partir do escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos, entre os escoamentos superficiais em áreas com cultivo de cana-de-açúcar nas subbacias hidrográficas e o uso de NPK.

Para estimar a contaminação do escoamento superficial devido ao uso de NPK, inicialmente, realizou-se a reclassificação do escoamento superficial associado à cana-de-açúcar. Nesta etapa, utilizou-se a ferramenta de reclassificação - *reclassify*, resultando na geração das seguintes classes, conforme tabela 8:

Tabela 8: Reclassificação do escoamento superficial

Estimativa de escoamento superficial em áreas com cana (mm)	Índice de escoamento superficial em áreas com cana
1.228	Muito fraco
1.288	Fraco
1.310	Médio
1.522	Forte
1.554	Muito forte

Elaboração: Renata Pereira Prates

Após a reclassificação do escoamento associado à cultura de cana-de-açúcar, procedeu-se à análise por meio das sub-bacias hidrográficas. Utilizando a ferramenta *Zonal Statistic*, calculou-se a média do escoamento superficial para cada sub-bacia hidrográfica.

Seguindo esta etapa, procedeu-se à reclassificação para o mapa de fertilizantes NPK para valores qualitativos, utilizando a ferramenta *Reclassify*, de acordo com a **tabela 9:**

Tabela 9: Reclassificação do escoamento superficial - NPK

Uso de NPK (toneladas)	Índice do uso NPK
12	Muito fraco
136	Fraco
388	Médio
1.010	Forte
> 1.010	Muito forte

Elaboração: Renata Pereira Prates

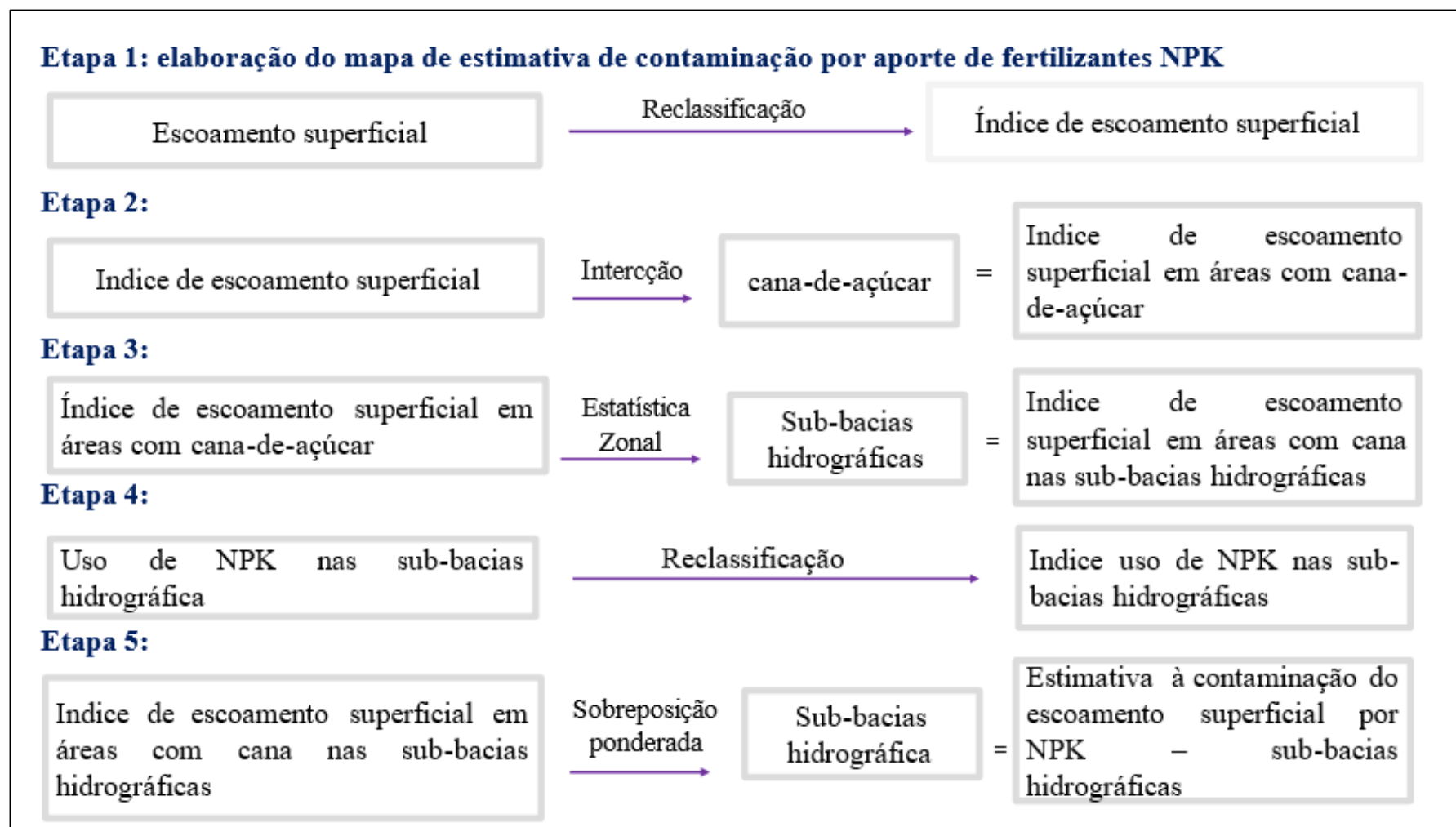
Para gerar o mapa síntese que avalia a estimativa e os riscos de contaminação devido ao aporte de fertilizantes no escoamento superficial ocasionado pelo uso de NPK, foi estabelecida uma correlação entre os mapas que indicam o índice de escoamento superficial em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nas sub-bacias e o índice de utilização de NPK nessas mesmas sub-bacias. Esse processo foi realizado por meio da ferramenta *Weighted Overlay*. Como resultado, foram definidas 5 classes para representar a estimativa da contaminação do escoamento superficial proveniente do uso de NPK (**tabela 10**).

Tabela 10: - Reclassificação do escoamento superficial - com cana-de-açúcar nas sub- bacias e o índice de NPK

Classes	Índice do uso NPK
1	Muito fraco
2	Fraco
3	Médio
4	Forte
5	Muito forte

Elaboração: Renata Pereira Prates

Figura 8: Fluxograma - Metodologia para elaboração do mapa de estimativa de contaminação por aporte de fertilizantes NPK



Elaboração: Renata Pereira Prates

5 - Uso e Cobertura da Terra nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapei), UGRHI 21 (Bacia Hidrográfica do rio do Peixe) e UGRHI 22 (Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema): análise multitemporal

O levantamento do uso e cobertura da terra em áreas específicas, especialmente em Bacias Hidrográficas, reúne informações que possibilitam a análise e interpretação do grau de ocupação do território, bem como das transformações decorrentes das atividades humanas. Assim, as variações nos diferentes tipos de uso e cobertura da terra são resultado do processo histórico de ocupação no Oeste do Estado de São Paulo, com a predominância de atividades produtivas voltadas para a agropecuária/agronegócio.

Ao longo do tempo, as áreas com vegetação nativa, como a Mata Atlântica, vão sendo desmatadas para dar lugar às atividades agropecuárias, resultando na conversão de áreas naturais para cultivo de monoculturas e pastagens. O desenvolvimento urbano e a expansão das cidades também contribuíram para a modificação do uso da terra no Oeste do estado de São Paulo. O crescimento demográfico levou à ocupação de áreas para construção de residências, infraestrutura urbana, indústrias e comércios, impulsionado pelos ciclos econômicos do café e do algodão, especialmente.

No contexto regional do Oeste Paulista, as atividades agrícolas e pecuárias emergem como protagonistas, destacando-se os cultivos de café, cana-de-açúcar e milho. Uma análise temporal revela um padrão de transformação na estrutura do uso e cobertura da terra, onde as áreas anteriormente destinadas à pastagem, predominantes em grande parte da região, têm cedido espaço progressivamente ao avanço da cultura da cana-de-açúcar.

Esse redirecionamento na ocupação do solo indica uma transição significativa nas práticas agrícolas e no perfil produtivo da região, em especial para o agronegócio e, conseqüentemente para o mercado de *commodities*. Anteriormente voltadas predominantemente à pecuária, as áreas de pastagem testemunham uma crescente transformação, agora alocadas para o cultivo intensivo de cana-de-açúcar. Esse fenômeno revela não apenas uma reconfiguração na economia agrícola regional, mas também implicações no equilíbrio e na dinâmica ambiental da região.

É perceptível que essas mudanças estruturais proporcionam implicações complexas, não apenas nas estruturas produtivas e econômicas, mas também nos sistemas ambientais. O avanço da cana-de-açúcar em áreas historicamente destinadas à pecuária

levanta questões sobre a gestão sustentável dos recursos naturais, a perda potencial de biodiversidade e os impactos na qualidade do solo e dos recursos hídricos.

O crescimento da produção canavieira é respaldado pela tecnificação orientada para alta produtividade, pelo desenvolvimento biotecnológico das plantas, pela certificação ambiental voltada para o mercado internacional e pela necessidade de substituição da matriz energética e regulamentação ambiental. Esses fatores, aliados à disponibilidade de recursos (terras, energia e infraestrutura de transporte) e à proximidade tanto de um grande mercado consumidor quanto de um sistema de inovação (composto por produtores, indústrias, institutos de pesquisa e universidades), fundamentam o avanço da lavoura no oeste do estado, onde estão localizadas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 20 (Bacia Hidrográfica do rio Aguapei), UGRHI 21 (Bacia Hidrográfica do rio do Peixe) e UGRHI 22 (Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema), conforme mencionado por Grego et al. (2014)

A expansão da cana-de-açúcar tem ocorrido desde a década de 1990. Durante esse período, o principal fator que contribuiu para isso foi a criação do programa PROOESTE, desenvolvido em meio à crise do petróleo. No entanto, o impulso para o cultivo de cana na área de estudo aconteceu no início dos anos 2000, impulsionado pelo desenvolvimento da tecnologia flex. A ampliação da atividade canavieira na região do Oeste Paulista e em outras regiões do Brasil é justificada pelo discurso do agronegócio, apresentado como um modelo eficiente de desenvolvimento econômico, gerador de emprego e renda (CARDOSO, 2009).

Dessa forma, o agronegócio canavieiro na região teve uma trajetória histórica marcada por dois momentos distintos, correlacionados com fases de reestruturação do setor canavieiro. O primeiro desses momentos se caracterizou pela formação dos primeiros canaviais e pela implantação das primeiras unidades canavieiras na região, ocorridas em meados da década de 1970 durante o segundo período do PROALCOOL. O segundo momento significativo teve início a partir de 2005 e foi impulsionado por incentivos estatais. Esse período foi marcado pela ascensão dos carros *flexfuel*, o que contribuiu para intensificar a expansão do agronegócio canavieiro (BARRETO, 2012, p. 32-33)

A evolução e expansão da produção de cana-de-açúcar na região do Oeste Paulista, mais especificamente nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapei (UGRHI 20), Peixe (UGRHI 21) e Pontal do Paranapanema (UGRHI 22), podem ser atribuídas a uma combinação de fatores que incluem características climáticas favoráveis, logística

facilitada e particularidades geomorfológicas favoráveis. A região é caracterizada por um relevo por colinas amplas e médias, proporcionando condições propícias para a adoção e desenvolvimento de técnicas agrícolas avançadas.

A presença desse relevo suave, com colinas de dimensões variadas, desempenha um papel crucial no estabelecimento e expansão da cultura da cana-de-açúcar. A topografia favorável facilita a implementação de práticas agrícolas mecanizadas, como a mecanização do plantio e da colheita, resultando em maior eficiência e produtividade.

Adicionalmente, a localização estratégica e a infraestrutura logística bem desenvolvida da região do Oeste Paulista contribuem para a expansão dessa cultura. A existência de vias de transporte considerada eficientes facilita o escoamento da produção, conectando de forma eficaz as áreas de cultivo aos centros de processamento e distribuição.

Assim, a combinação desses fatores - relevo propício, condições climáticas favoráveis e infraestrutura logística bem estabelecida - tem sido determinante para o desenvolvimento e expansão bem-sucedidos da produção de cana-de-açúcar nessas áreas específicas do Oeste Paulista, fornecendo uma base sólida para o avanço contínuo da monocultura canavieira na região.

Trabalhos de pesquisa desenvolvidos por Rocha (2017) revela uma análise contundente e reveladora acerca das transformações e evoluções significativas no processo de apropriação das unidades hidrográficas, especialmente evidenciadas pela considerável pressão exercida sobre a rede de drenagem. Esta pressão, conforme indicada pelo autor, implica uma intensa mobilização do solo e um manejo extensivo em toda a área correspondente ao Pontal do Paranapanema. Processos de desequilíbrio da paisagem e de transformação da natureza estão correlacionados à apropriação do meio físico para o desenvolvimento da agricultura e pecuária. Essa relação tem sido estudada através dos índices de apropriação por Rocha (2020), o qual aponta que a transformação da natureza com a finalidade de produção é um fenômeno social apropriado pela sociedade e pelo Estado.

Assim, observa-se que a transformação constante do uso e cobertura da terra é um processo em constante evolução, intimamente ligado a fatores econômicos que ecoam em mudanças ambientais profundas, esculpindo a paisagem ao nosso redor. Essa interconexão entre atividades econômicas e seus impactos no meio ambiente cria uma teia de influências. Decisões orientadas por objetivos econômicos podem desencadear efeitos significativos na dinâmica natural. Cada ação antrópica, seja ela relacionada à

exploração de recursos ou ao desenvolvimento de atividades econômicas, reflete no meio físico, provocando alterações em sua fisionomia e afetam profundamente a estrutura e o equilíbrio dos ambientes naturais.

As transformações no uso e cobertura da terra desencadeiam uma série de resultados complexos, que permanecem por um tempo longo ou permanente no ambiente e na sociedade. Cada mudança na forma como utilizamos a terra e alteramos sua cobertura tem ramificações que ecoam por múltiplos domínios.

No cenário de evolução e transformações no uso e cobertura da terra, destaca-se a análise de dados fornecidos pelo MapBiomas (2023). Entre os anos de 1985 e 2022, observou-se um aumento significativo de 50% na área dedicada à atividade agropecuária no Brasil. Esse crescimento representa uma expansão territorial equivalente ao terceiro maior estado brasileiro, o Mato Grosso, englobando mais de 95 milhões de hectares e totalizando 282,5 milhões de hectares destinados à agropecuária. Dentro dessa extensão, a área reservada para pastagem corresponde a 58% do total, concentrada principalmente na região Amazônica. Esta expansão expressiva da atividade agropecuária destaca não apenas o crescimento territorial, mas também evidencia a alteração substancial na paisagem e no uso do solo, impactando diretamente a ecologia e os ecossistemas naturais da região.

A análise do MapBiomas (2023) revela que 64% do crescimento das atividades voltadas para a agropecuária no país ocorreu por meio do desmatamento para formação de pastagens. Além disso, 26% da expansão da agricultura se deu em áreas previamente utilizadas e degradadas, enquanto os restantes 10% correspondem ao desmatamento direto para agricultura.

Os dados apresentados pelo MapBiomas (2023) evidenciam que o uso da terra para atividades agropecuárias foi o que mais se expandiu nas últimas décadas no Brasil. Houve um aumento de 60% nas áreas de pastagem e de 219% nas áreas destinadas à agricultura entre 1985 e 2022. A intensificação de áreas previamente impactadas para agricultura foi a transição predominante no estado de São Paulo, representando 58% das mudanças, com destaque para o crescimento significativo da área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar.

A caracterização e descrição obtidas por meio do mapeamento de uso e cobertura da terra são consideradas processos complexos, dada a diversidade de classes de uso e as variáveis analisadas em uma região específica. Geralmente, o mapeamento temático é um recurso apropriado para compreender as alterações no ambiente físico, promovendo o

desenvolvimento sustentável em termos ambientais e sendo fundamental para o planejamento regional.

Neste capítulo, são apresentados dados qualitativos sobre os diferentes tipos de uso e cobertura da terra das Bacias Hidrográficas dos rios Aguapeí (UGRHI 20), Peixe (UGRHI 21) e Pontal do Paranapanema (UGRHI 22) para cinco períodos: 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019. Foram elaborados mapas temáticos na escala de 1:250.000 para identificar os diferentes usos e cobertura da terra em cada período de estudo.

Ao longo dos cinco períodos analisados, observou-se um predomínio das atividades produtivas ligadas ao setor agropecuário nas Bacias Hidrográficas dos rios Aguapeí, Peixe e Pontal do Paranapanema. Essas atividades integram uma variedade de culturas, desde as permanentes até as temporárias, como a cana-de-açúcar. Esta última tem uma contribuição significativa para as transformações antropogênicas mais significativas na dinâmica natural das bacias hidrográficas estudadas ao longo deste processo histórico.

5.1 - Uso e Cobertura da Terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei

Os resultados da qualificação do uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei são apresentados em cinco mapas temáticos referentes aos anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019. Nestes mapas, foram classificadas as seguintes classes temáticas: área urbana, culturas temporárias, pastagens, florestas, corpos d'água continentais, áreas descobertas e unidades de conservação.

Ao analisar os dados, verifica-se que em 2002, nas Bacias hidrográficas estudadas, houve um predomínio de pastagens, ocupando aproximadamente 840.424 hectares, o que representava 64,6% da área total da Bacia. Em 2007, houve uma redução significativa na área de pastagem, diminuindo em 37,7%. Nos anos de 2013 e 2017, essa classe temática apresentou estabilidade nos mapas. Porém, em 2019, houve uma redução de 15% na área de pastagem na Bacia hidrográfica do Rio Aguapei. O declínio da pastagem pode ser atribuído a mudanças nos padrões de uso da terra, à expansão da cultura da cana-de-açúcar, à migração para outras culturas e à inserção de diferentes atividades econômicas, entre outros fatores.

A análise da classe temática de cobertura florestal revelou um aumento expressivo entre os anos de 2017 e 2019. Em 2002, a cobertura vegetal era de 115.953 hectares,

representando 8,9% da Bacia. Em 2017, ela alcançou 14,2% da área, e em 2019, houve um crescimento para 215.822 hectares, correspondendo a 17,4% da Bacia do rio Aguapeí. Esse aumento na cobertura florestal não necessariamente indica uma proteção efetiva das florestas na região do Oeste Paulista. O gráfico 1 apresenta as porcentagens das classes temáticas mapeadas para a Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí.

Gráfico 1- Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí



Elaboração: Renata Pereira Prates

As áreas dedicadas a outras culturas temporárias compreendiam 3,2% em 2002, declinando para 1,8% em 2007, mas experimentaram um crescimento significativo em

2013, chegando a 7,5% da área total da Bacia. Nos anos seguintes, houve uma queda para 3,4% em 2017 e 3,1% em 2019, indicando a implementação de outras culturas na região.

No que se refere à classe temática das áreas descobertas, que incluem solos predominantemente expostos ou em preparação para plantio, em 2002 ocupavam 15,4% da Bacia Hidrográfica do rio Aguapei. Em 2007, essas áreas quase dobraram, representando 34,5%, sugerindo possíveis mudanças nos ciclos de produção, como a inserção e expansão das áreas destinadas à produção de cana de açúcar.

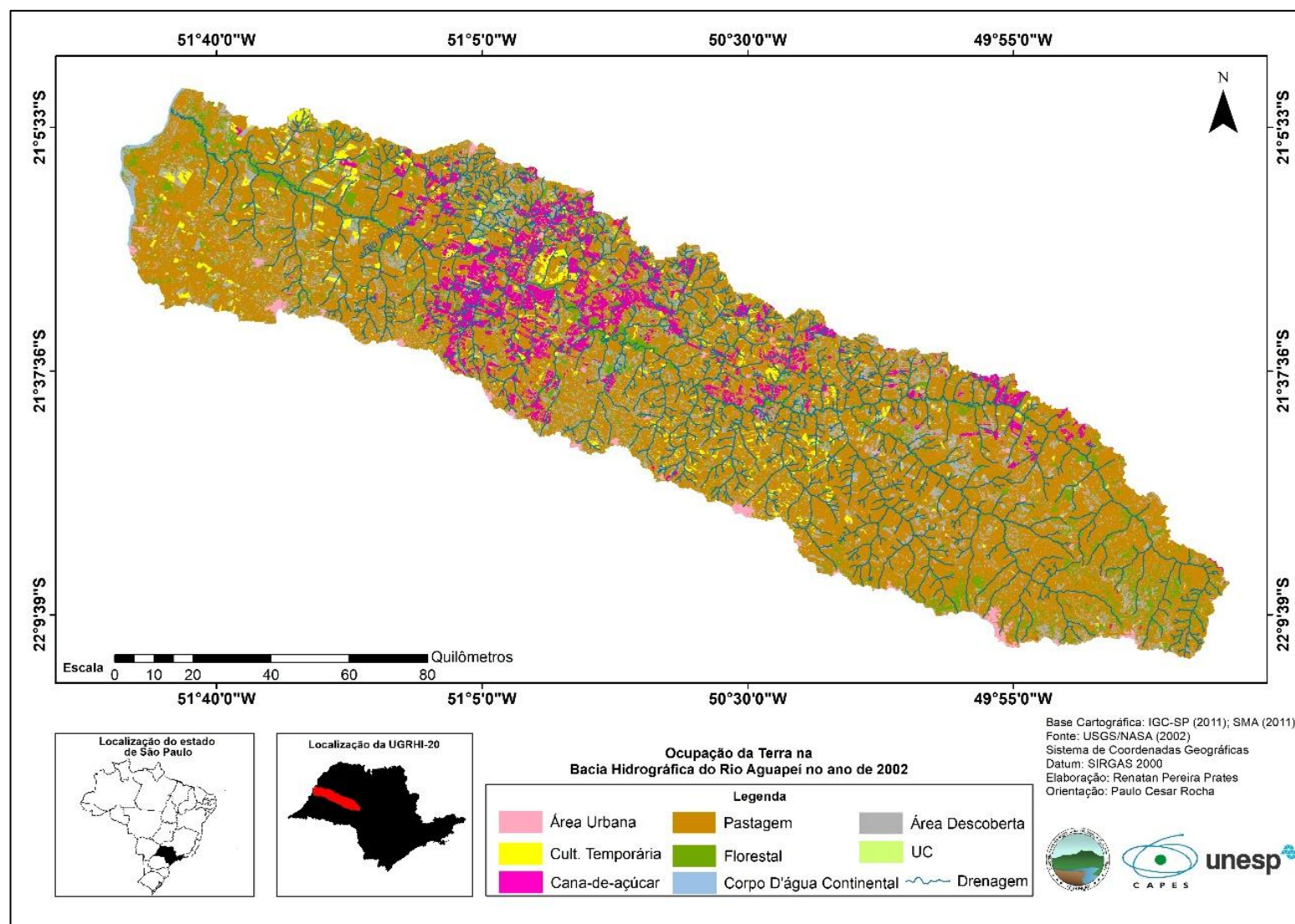
As áreas destinadas a outras culturas temporárias representavam 3,2% em 2002, diminuíram para 1,8% em 2007 e tiveram um aumento expressivo atingindo 7,5% em 2013 da área total da Bacia. Nos anos seguintes, houve uma queda, alcançando 3,4% em 2017 e 3,1% em 2019, o que indica a implantação de outras culturas na região. A redução das áreas de culturas temporárias pode ser atribuída a diversos fatores, como o avanço do agronegócio canavieiro, a diversificação dos setores produtivos na região ou a transição para outras culturas permanentes.

Quanto à categoria de áreas descobertas, que engloba solos predominantemente expostos ou em preparação para plantio, em 2002 ocupavam 15,4% na Bacia Hidrográfica do rio Aguapei. Em 2007, essas áreas praticamente dobraram, representando 34,5%, o que sugere possíveis mudanças nos ciclos de produção, como a inserção e expansão das áreas dedicadas à produção de cana-de-açúcar.

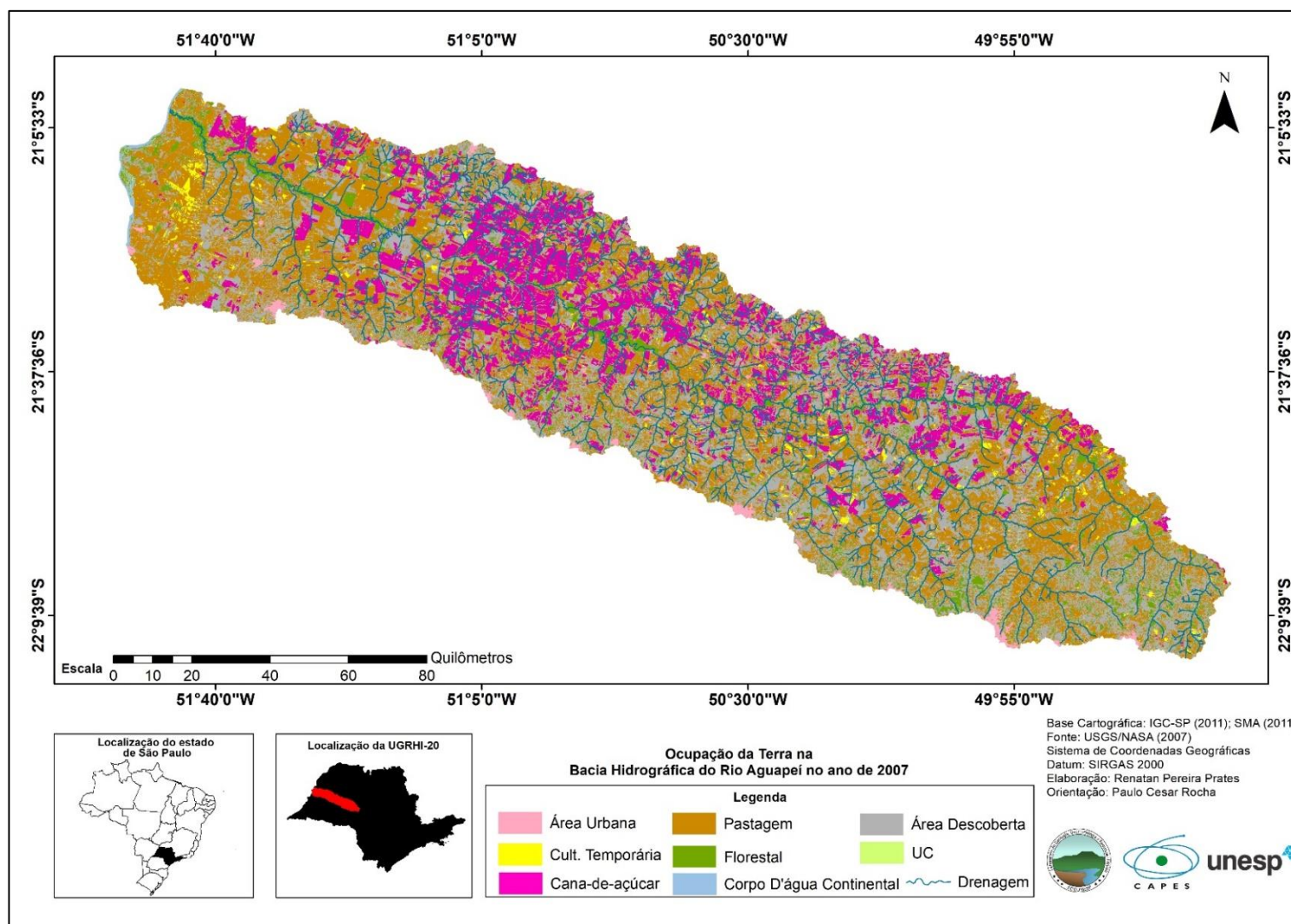
Ao longo dos anos analisados, a cana-de-açúcar foi progressivamente a classe temática com maior alteração em áreas ocupadas na Bacia Hidrográfica do rio Aguapei. Em 2002, as áreas destinadas à cana de açúcar eram de aproximadamente 85.900 hectares, correspondendo a apenas 6,6% da Bacia. Em 2007, houve um avanço significativo, ocupando 207.056 hectares, totalizando 15,9%. Nos anos seguintes, sua área cultivada aumentou, representando 32,0% em 2013, 35,4% em 2017 e atingindo 473.718 hectares em 2019, predominando a cultura com maior desenvolvimento na área da Bacia, com 38,1%.

Enquanto os mapas 7, 8, 9, 10 e 11 oferecem uma representação visual das classes temáticas, revelam-se como ferramentas fundamentais na compreensão e análise de dados geoespaciais.

Mapa 7: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2002

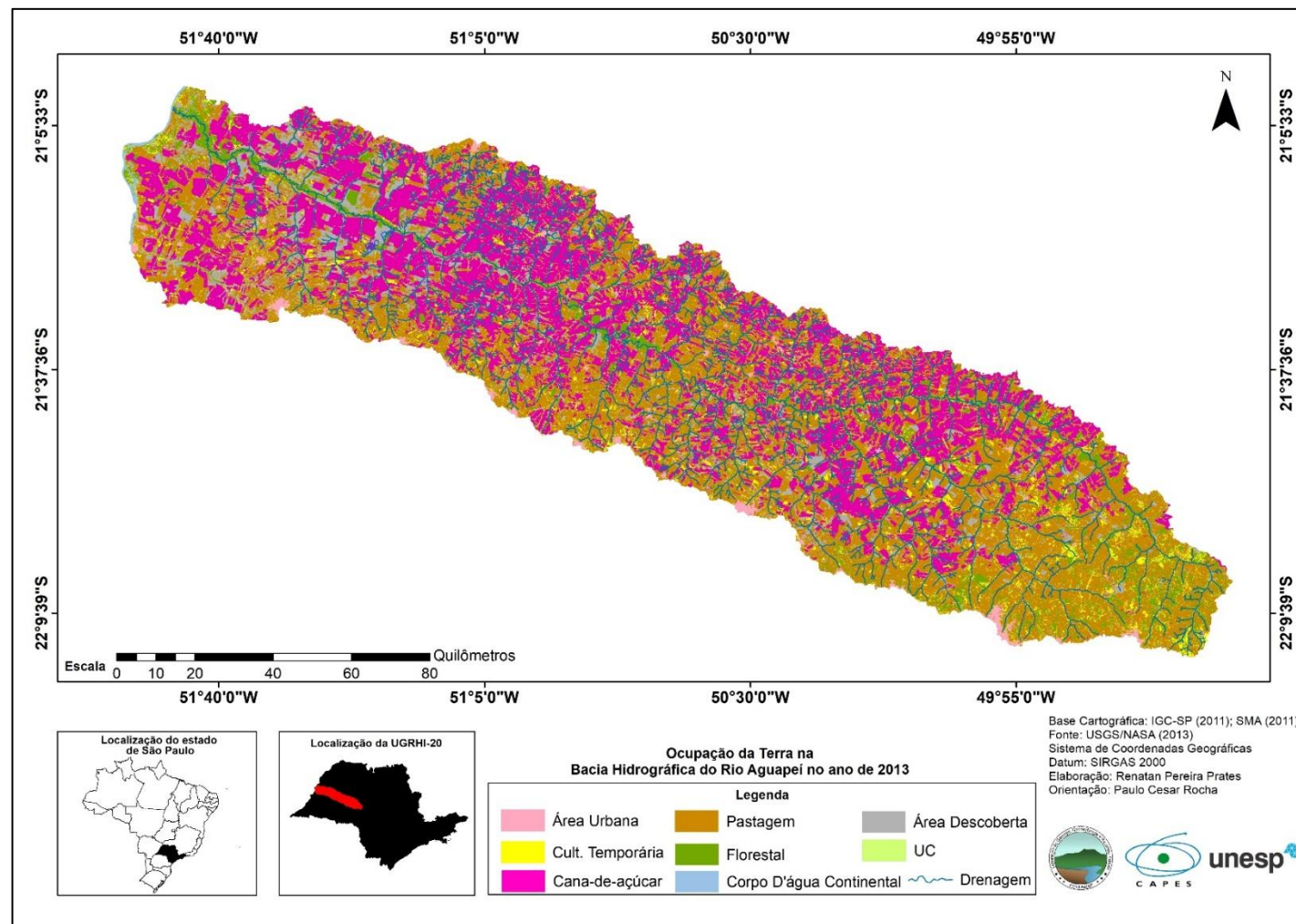


Mapa 8: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2007

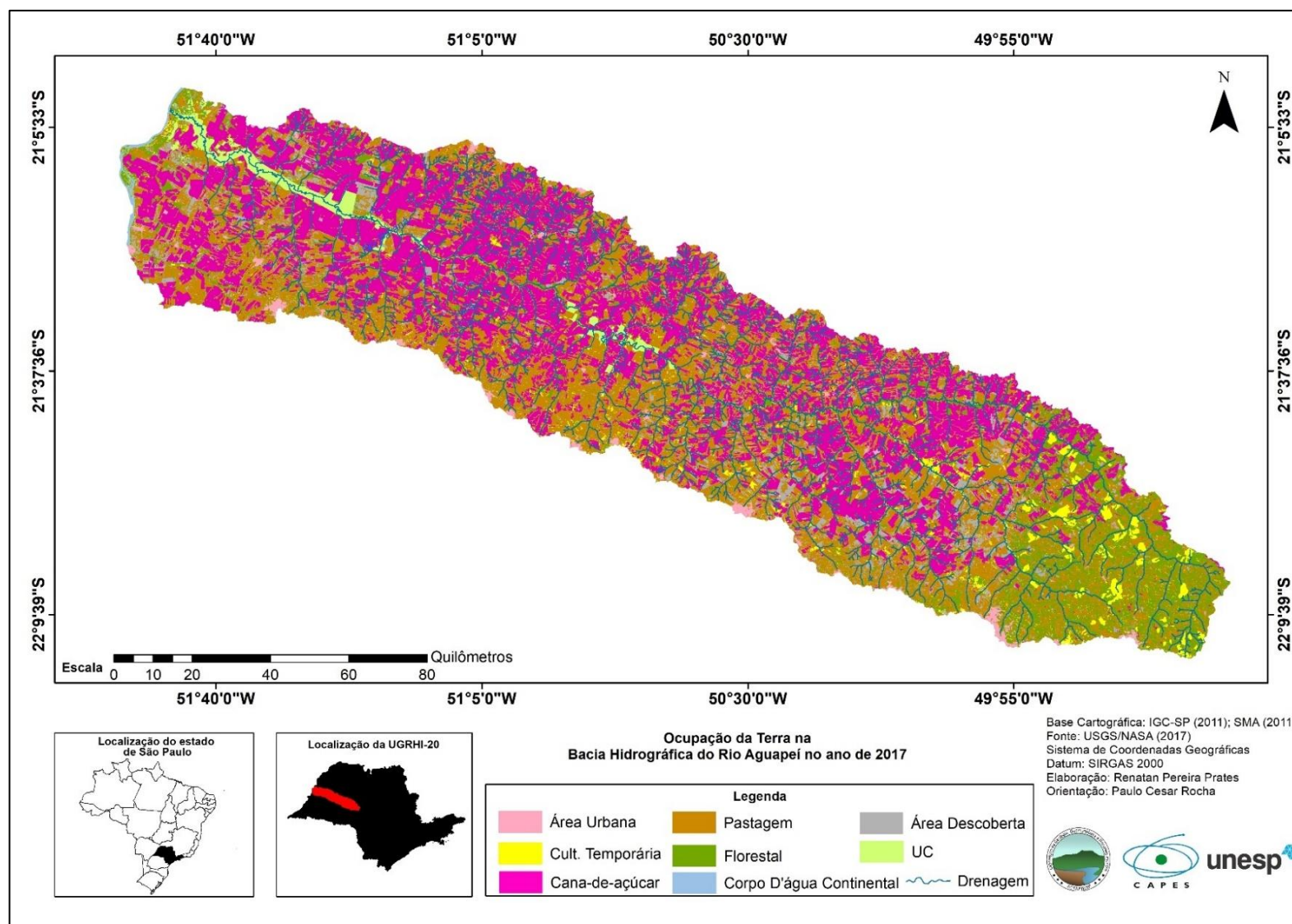


Fonte: Landsat 7 e 8 (2011); Mapbiomas (2011)

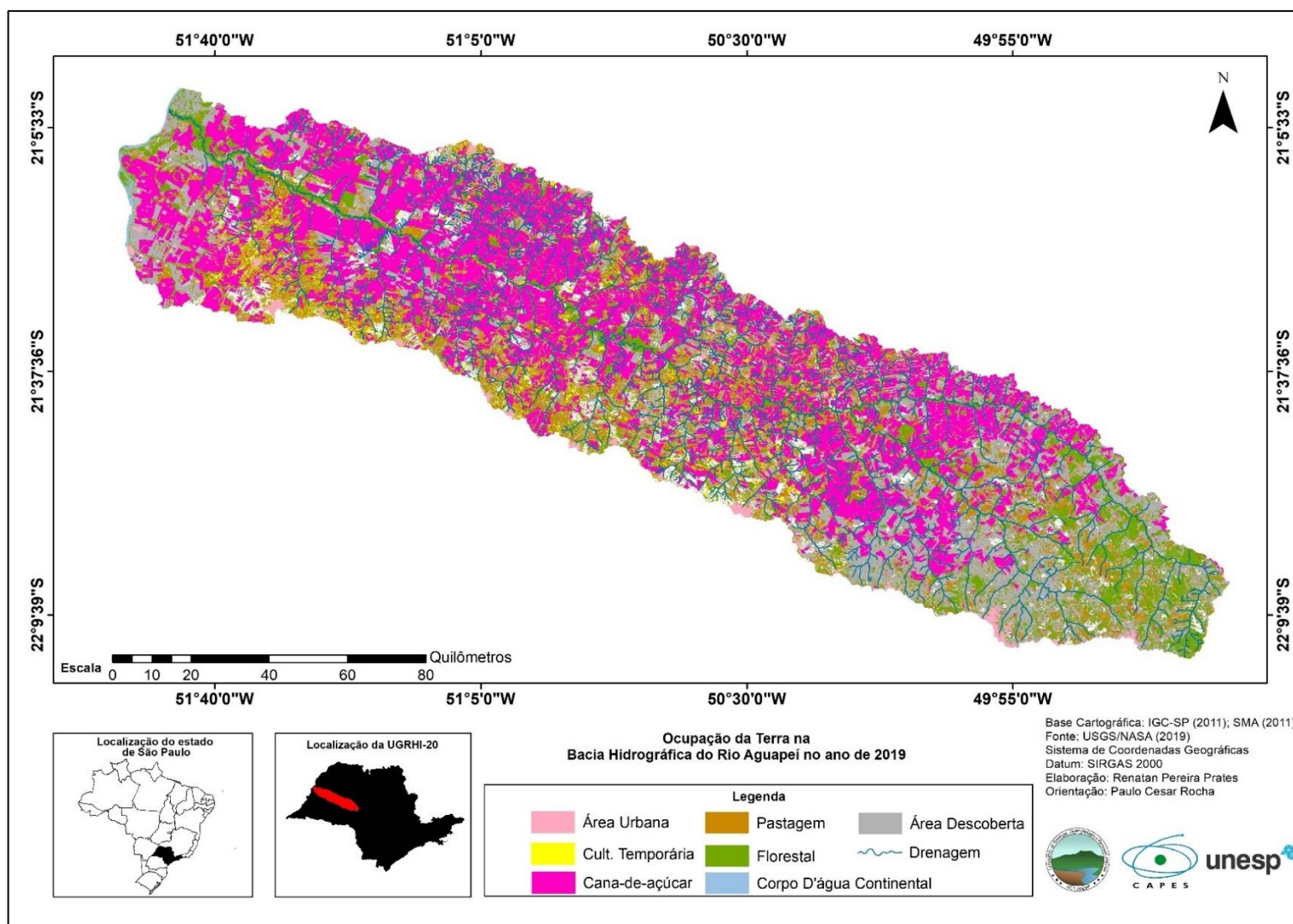
Mapa 9: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2013



Mapa 10: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2017



Mapa 11: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei - 2019



5.2 - Uso e Cobertura da Terra da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 21 - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe.

No contexto da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 21, Bacia Hidrográfica do rio do Peixe, a análise do mapeamento de uso e cobertura da terra durante os anos destacados na metodologia apontam para alterações relevantes nos dados obtidos, assemelhando-se aos padrões identificados em outras UGRHIs abordadas no estudo da tese. As transformações observadas ao longo desse período temporal demonstram dinâmicas significativas nas configurações de uso da terra, na região.

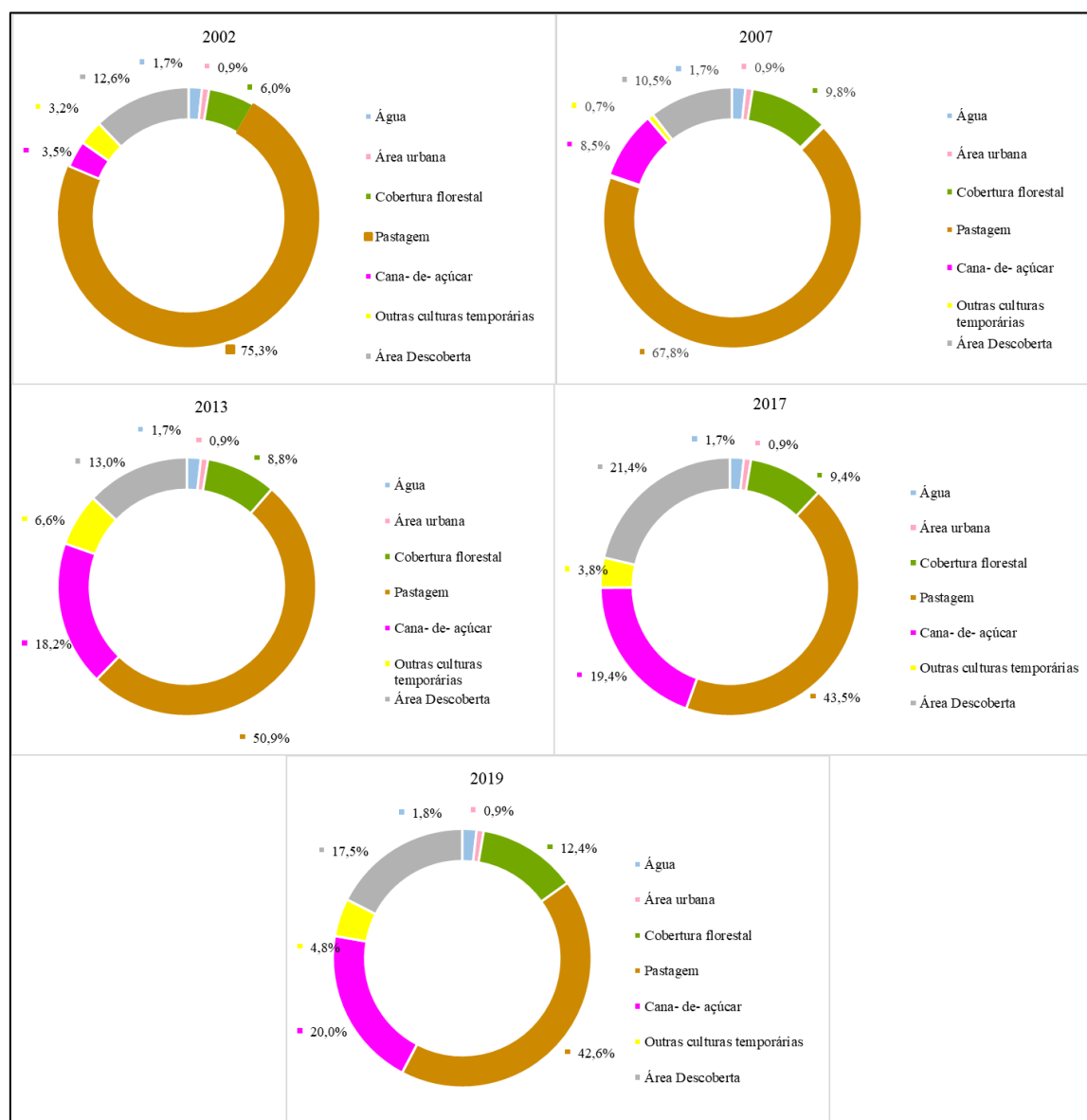
Entre 2002 e 2007, uma parte considerável da Bacia do Peixe era ocupada por pastagens, totalizando 796.670 hectares, representando 75,3% da área em 2002 e 738.951 hectares, o equivalente a 67,8% da área em 2007. Já em 2013, houve uma redução significativa das áreas de pastagem, passando a ocupar 50,9%, e nos anos subsequentes, essa porcentagem diminuiu para 43,5% em 2017 e 42,6% em 2019.

Os dados analisados sobre o uso e cobertura da terra na Bacia destacam um predomínio significativo das áreas de pastagem, reflexo das atividades pecuárias. Entre 2002 e 2019, houve uma variação de 41,75% nessas áreas, indicando uma notável dinâmica ao longo do tempo na forma como a terra tem sido utilizada e coberta nessa região.

Em relação à cobertura florestal, foram identificadas algumas alterações notáveis ao longo dos anos analisados. Em 2002, as áreas de cobertura vegetal na Bacia do Rio do Peixe totalizavam 63.086 hectares, representando 6,0% da área da Bacia. Em 2007, esse percentual aumentou para 9,8%, mas houve uma retração para 8,8% em 2013 e 9,4% em 2017. Em 2019, as áreas de cobertura florestal praticamente dobraram em relação a 2002, alcançando 135.533 hectares e ocupando 12,4% da Bacia.

Ao longo dos anos pesquisados, as áreas produtivas com cana-de-açúcar na Bacia do Rio do Peixe mostraram um crescimento progressivo. Em 2002, abrangiam 36.544 hectares, correspondendo a 3,5% da Bacia. Em 2007, essa porcentagem subiu para 8,5%, chegando a 18,2% em 2013, 19,4% em 2017 e, em 2019, essas áreas representavam 218.411 hectares, ou 20,0% da Bacia, conforme o gráfico 2.

Gráfico 2: Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe



Elaboração: Renata Pereira Prates

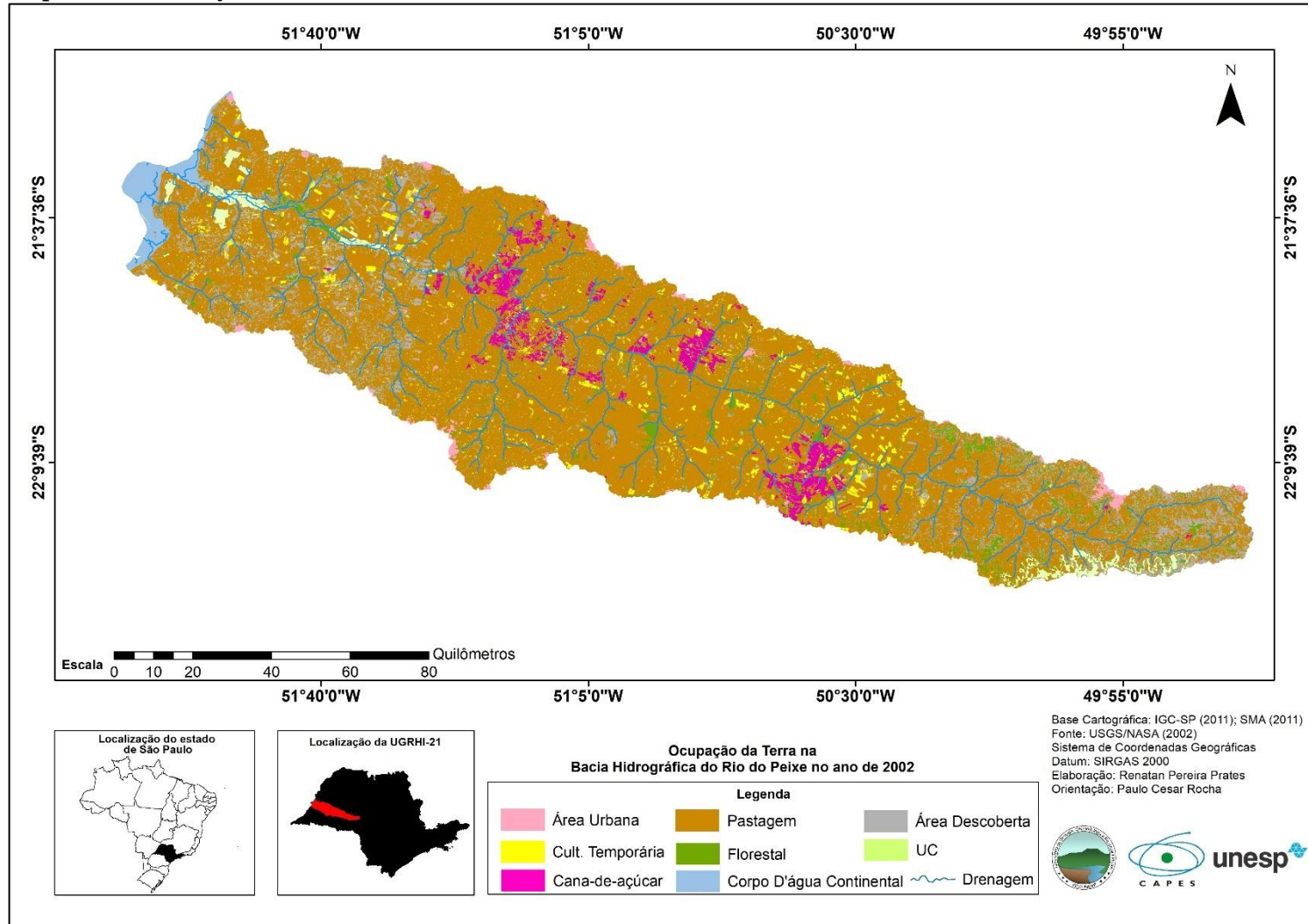
Sobre o uso e cobertura da terra das áreas classificadas como outras culturas temporárias, os dados indicam uma dinâmica produtiva voltada para monoculturas, como a cana-de-açúcar. Em 2007, essas áreas representavam 0,7%. O ano de maior representatividade é 2013, quando ocupavam 6,6% da área da Bacia. Já em 2017, houve uma queda acentuada para 3,8%. Em 2019, houve um aumento de 1% em relação a 2017, ocupando 4,8% da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe.

As áreas descobertas, também conhecidas como solo exposto ou aquelas em processo de preparação para o plantio, apresentaram variações ao longo dos anos analisados. Em 2002, eram 12,6%, diminuindo para 10,5% em 2007 e retornando a 13,0%

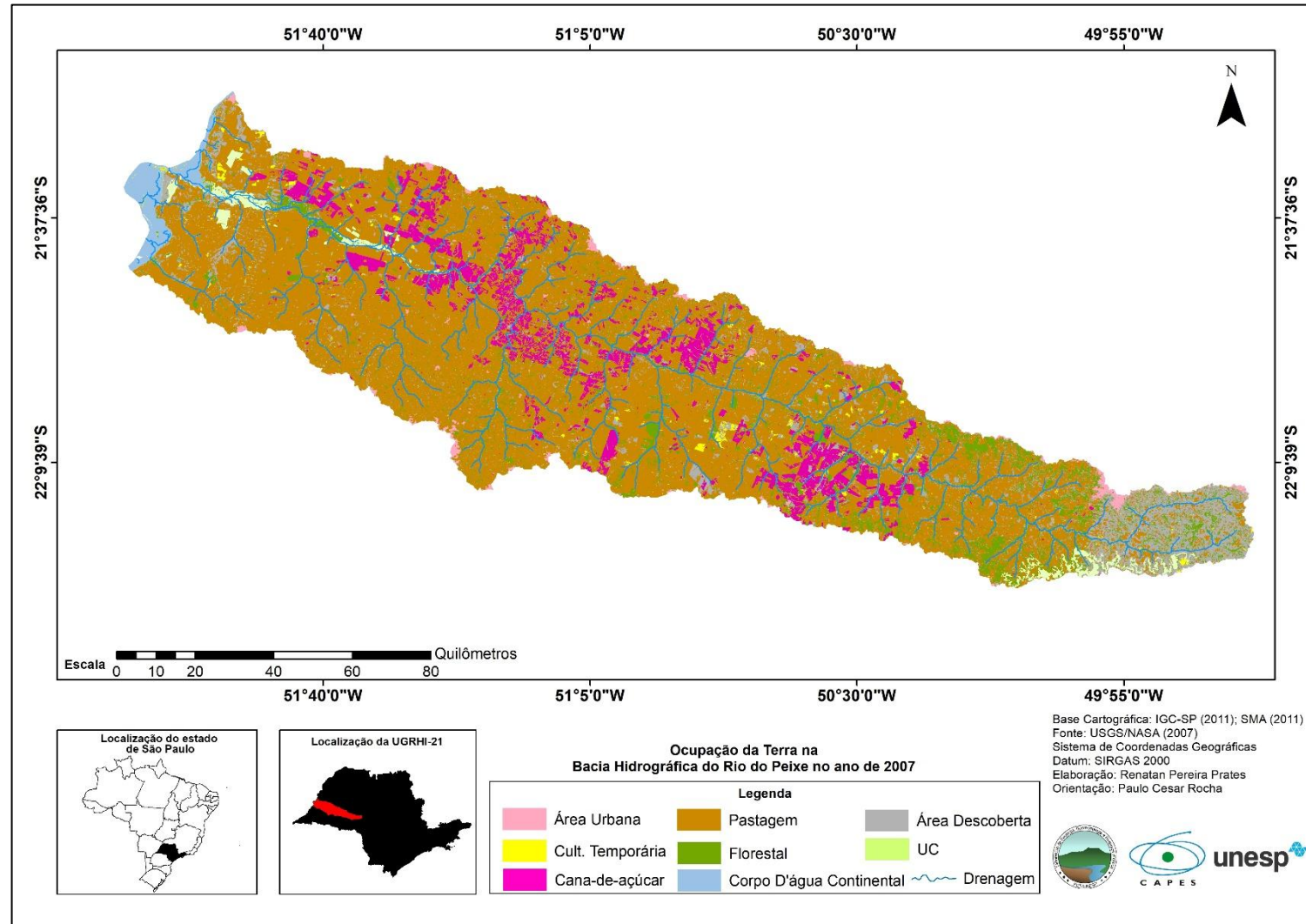
em 2013. Em 2017, essas áreas totalizavam 232.741 hectares, representando 21,4% do total da Bacia do Rio do Peixe, e reduziram para 17,5% em 2019. Os dados dessa classe temática indicam que as mudanças nessas áreas são resultado das atividades antrópicas na região, destinadas a cultivos temporários ou permanentes, ou áreas devastadas para exploração dos recursos naturais.

Os mapas 12, 13, 14, 15 e 16 correspondentes a esta análise estão representados referentes aos anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019, respectivamente

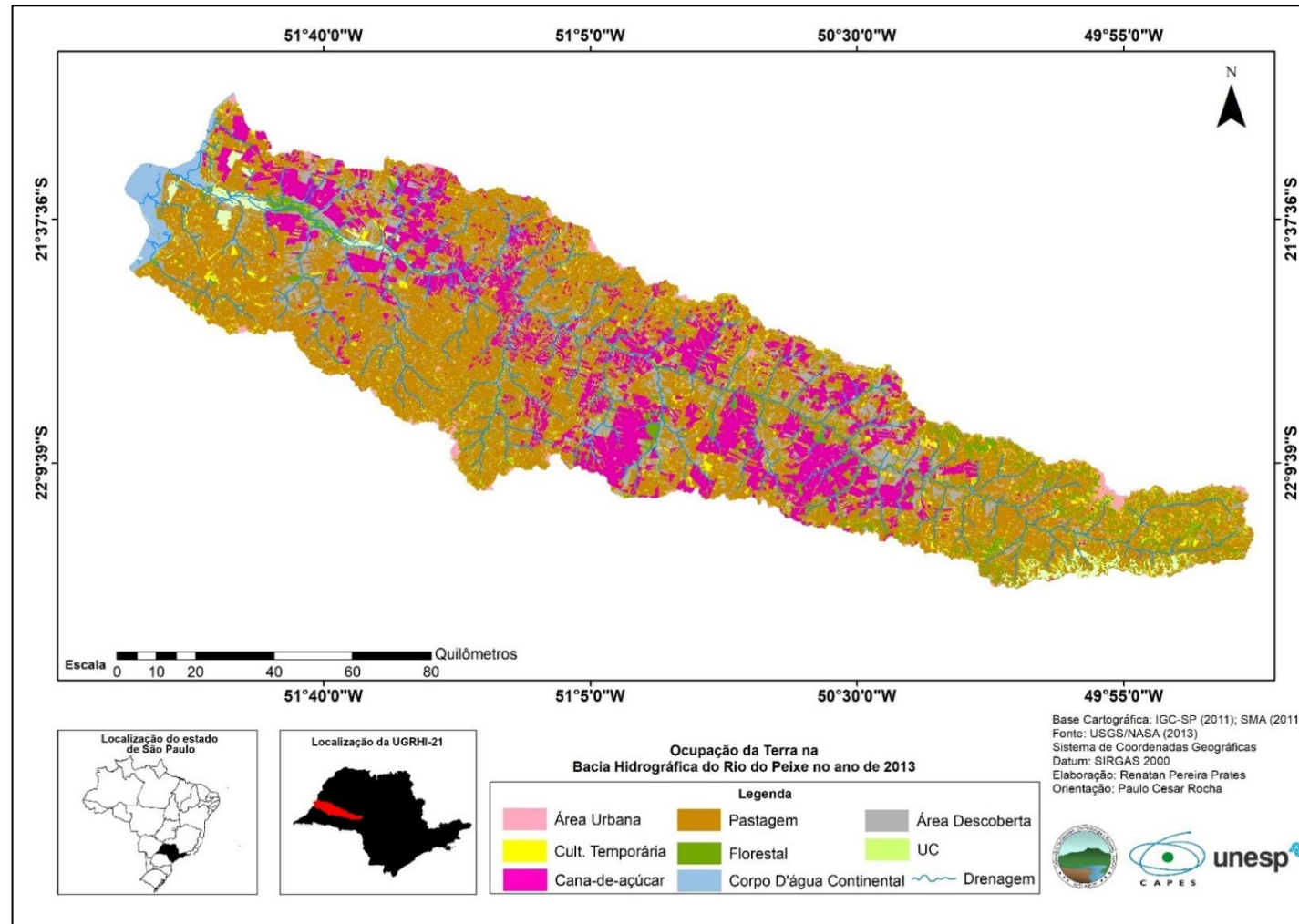
Mapa 12: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2002



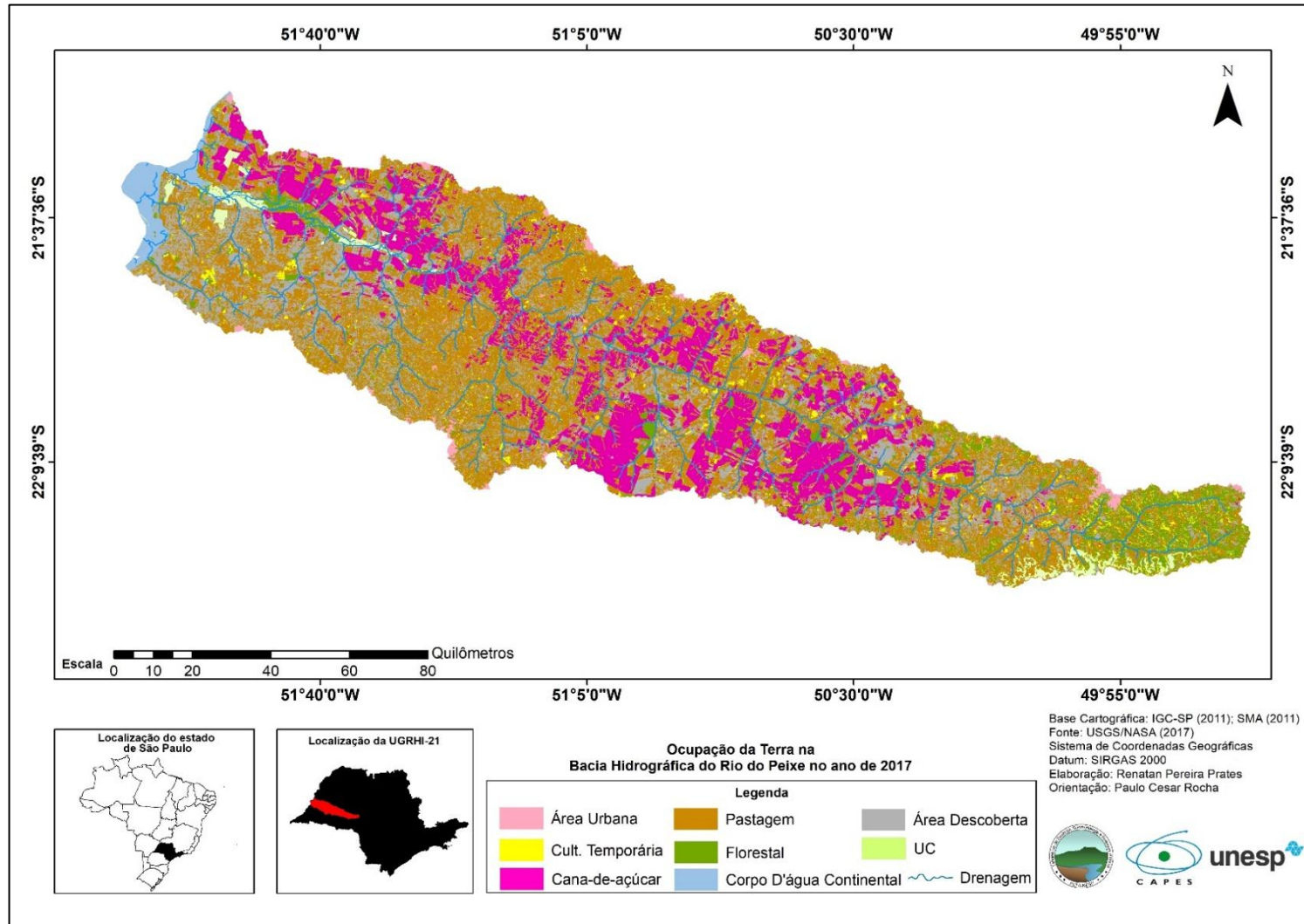
Mapa 13: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2007



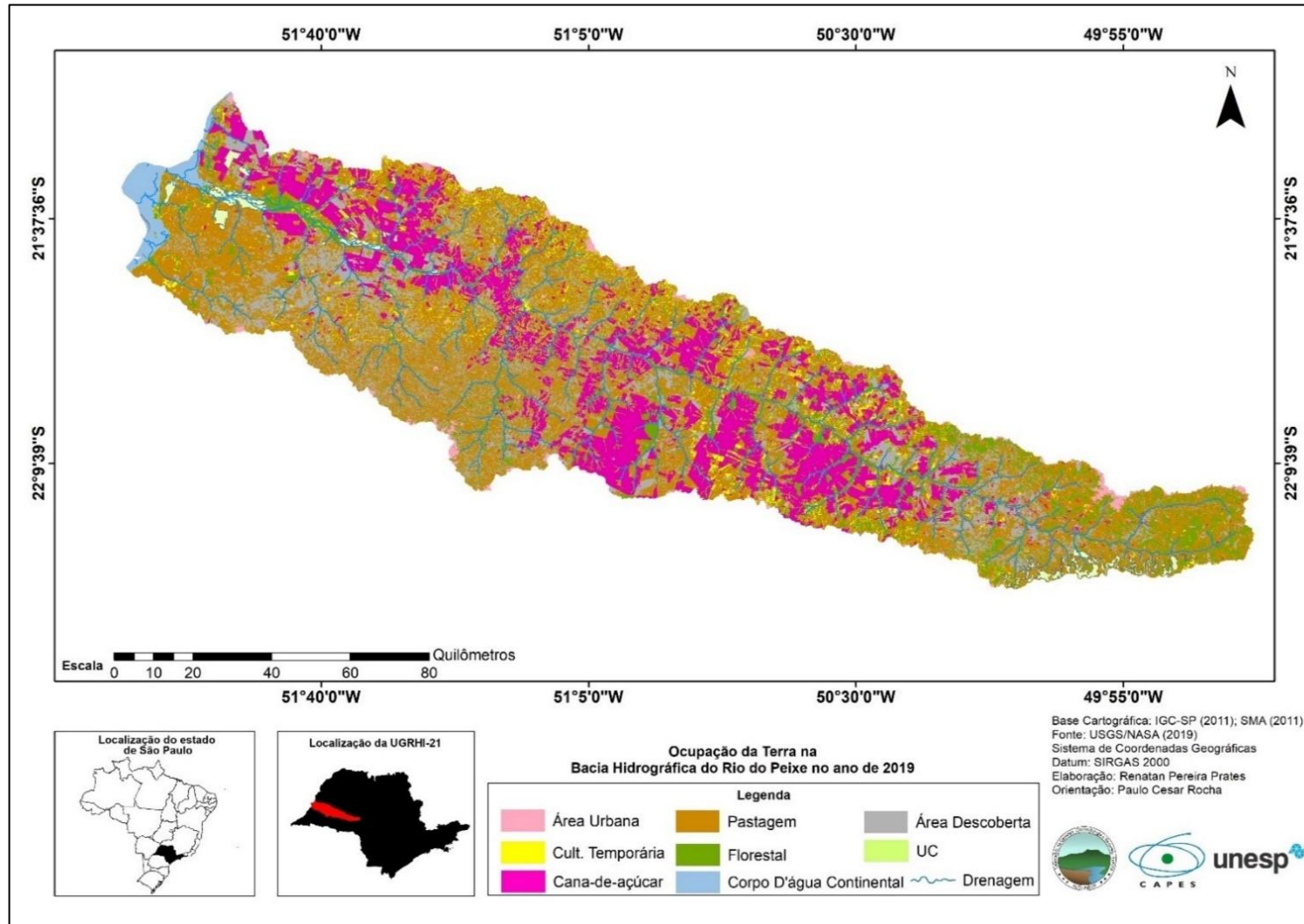
Mapa 14: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2013



Mapa 15: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2017



Mapa 16: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 21 - 2019



5.3 - Uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema

O mapeamento de uso e cobertura da terra na Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema evidencia mudanças expressivas em duas classes temáticas principais: a redução das áreas de pastagens e o aumento das áreas dedicadas ao cultivo da cana-de-açúcar. Destaca-se que os mapas elaborados seguem a sequência dos anos analisados, conforme descrito na metodologia, e para as classes temáticas água e área urbana, os dados permaneceram inalterados considerando a escala dos mapas.

Em relação à cobertura florestal na Bacia do Pontal do Paranapanema, não foram observadas alterações significativas nos anos analisados. Em 2002, representavam 9,5%, diminuindo para 8,4% em 2007. Em 2013, houve um aumento para 9,1%, subindo para 10,5% em 2017 e permanecendo em 10,3% em 2019.

A classe temática das pastagens mostrou mudanças expressivas ao longo dos anos, com oscilações de áreas. Entretanto, as pastagens continuam predominantes na Bacia do Pontal do Paranapanema, de acordo com o mapeamento. Em 2002, ocupavam 827.919 hectares, representando 67,2% da área total. Em 2007, as pastagens ocupavam 38,0%, enquanto as áreas descobertas representavam 41,0%. Em 2013, as pastagens cresceram para 49,2%, declinando para 29,5% em 2017 e retornando a 38,1% em 2019. Observou-se uma transição notável nas áreas de pastagens, com variações expressivas nas áreas dedicadas à cana-de-açúcar e outras culturas temporárias ao longo dos anos analisados.

Outra categoria de uso e cobertura da terra na Bacia do Pontal do Paranapanema é o cultivo de cana-de-açúcar. Houve um aumento de 1,3%, 5,4%, 17,0%, 20,3% e 21,3% nos anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019, respectivamente. O aumento mais expressivo das áreas de cana-de-açúcar ocorreu entre 2007 e 2013, com um crescimento de 22,82% em relação a 2007. Compreende-se que a expansão contínua da cultura da cana-de-açúcar no Pontal do Paranapanema apresenta uma dinâmica importante ao longo do tempo, refletindo mudanças significativas do ponto de vista socioeconômico, bem como na paisagem regional, em destaque no gráfico 3.

Gráfico 3: Percentual de uso e cobertura da terra na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema



Elaboração: Renata Pereira Prates

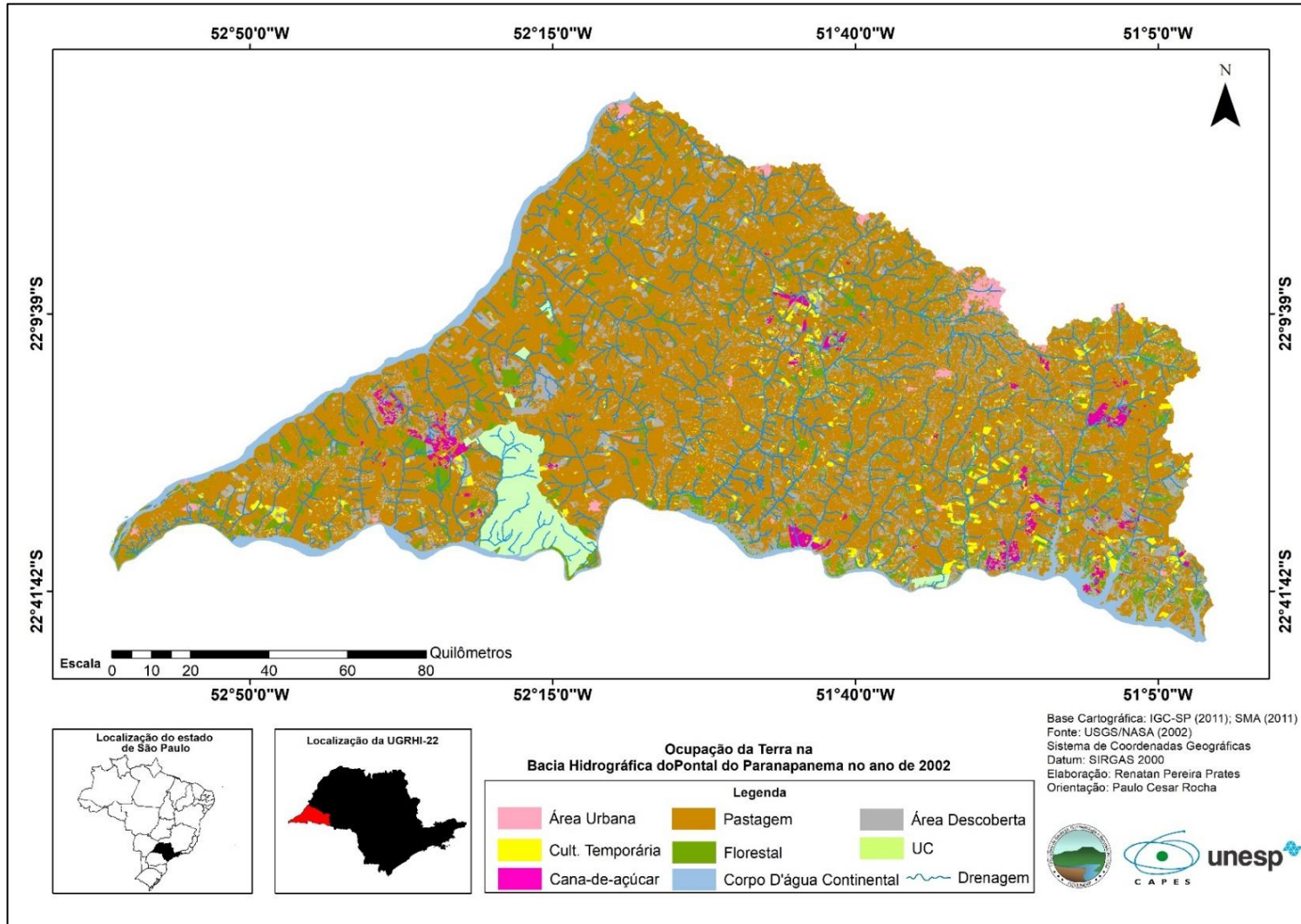
As áreas com outras culturas temporárias representaram 2,3% em 2002 e 2,8% em 2007 na área de estudo. Em relação a 2007, essas áreas tiveram um aumento significativo de 82,79% em 2013, chegando a ocupar 16,3% da Bacia do Pontal do Paranapanema. Nos anos seguintes, houve uma redução dessas áreas, ocupando 9,7% em 2017 e 4,9% em 2019.

A classe de áreas descobertas apresentou valores consideráveis ao longo dos anos na Bacia do Pontal do Paranapanema. Em 2002, representavam 15,4%, e em 2007 esse valor subiu para 41,0%, totalizando 505.402 hectares. Essa área descoberta está correlacionada com áreas de pastagens degradadas, processos erosivos, preparação para

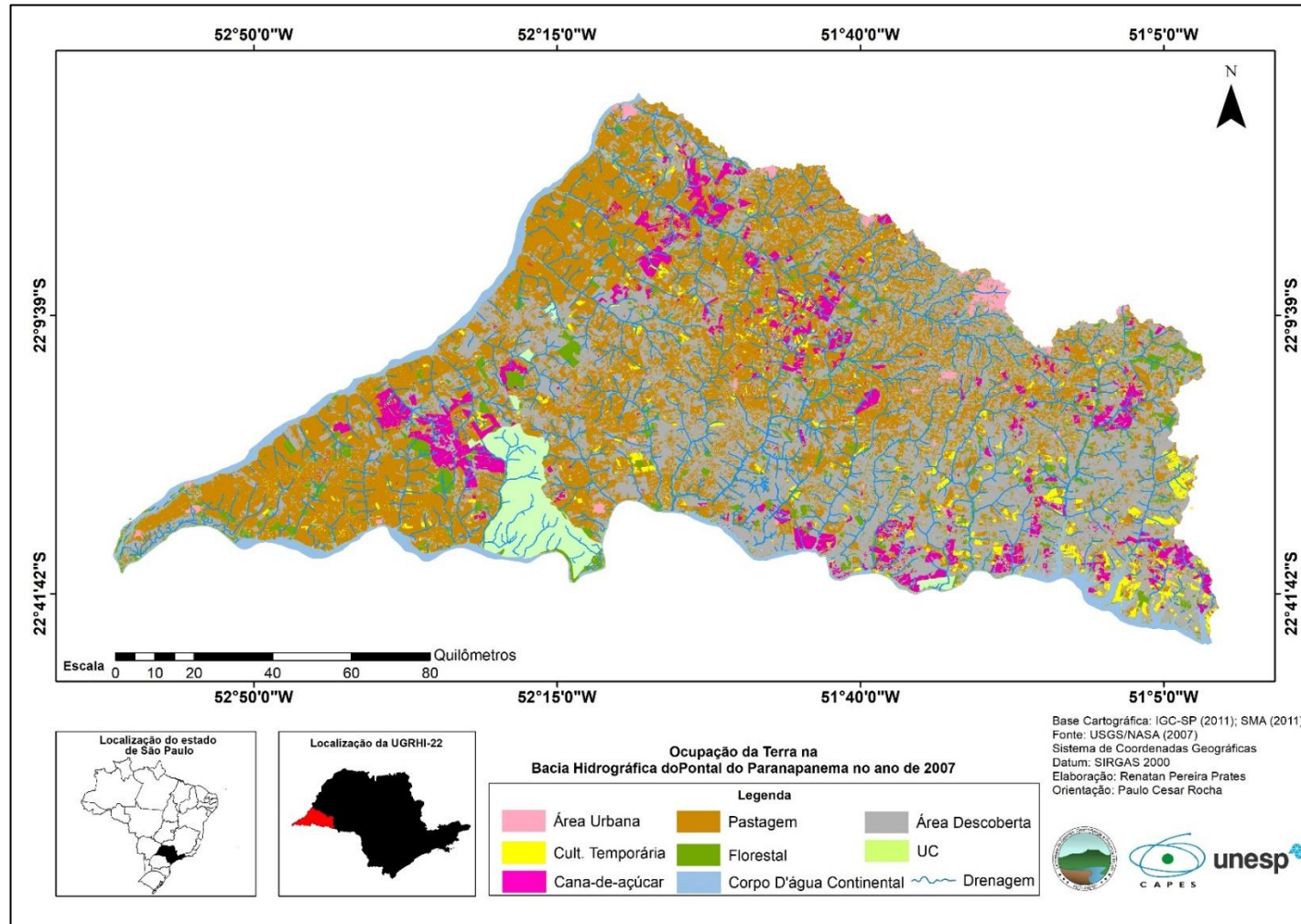
plantio ou áreas desflorestadas. Em 2013, as áreas descobertas reduziram para 4,0%, representando uma queda de 90,24% em relação a 2007. Em comparação a 2017, essa categoria temática representava 25,6%, enquanto em 2019 foi de 21,0%, indicando intensas transformações no uso e cobertura da terra na região.

Na análise dos dados de uso e cobertura da terra na Bacia do Pontal do Paranapanema, três classes temáticas se destacam pela dinâmica produtiva da região. As áreas de pastagens ainda predominam, mas há um crescimento considerável no cultivo da cana-de-açúcar. Essas transformações nos sistemas produtivos ao longo do tempo resultam nos expressivos valores das áreas descobertas. Os mapas 17, 18, 19, 20 e 21 apresentados para os anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019.

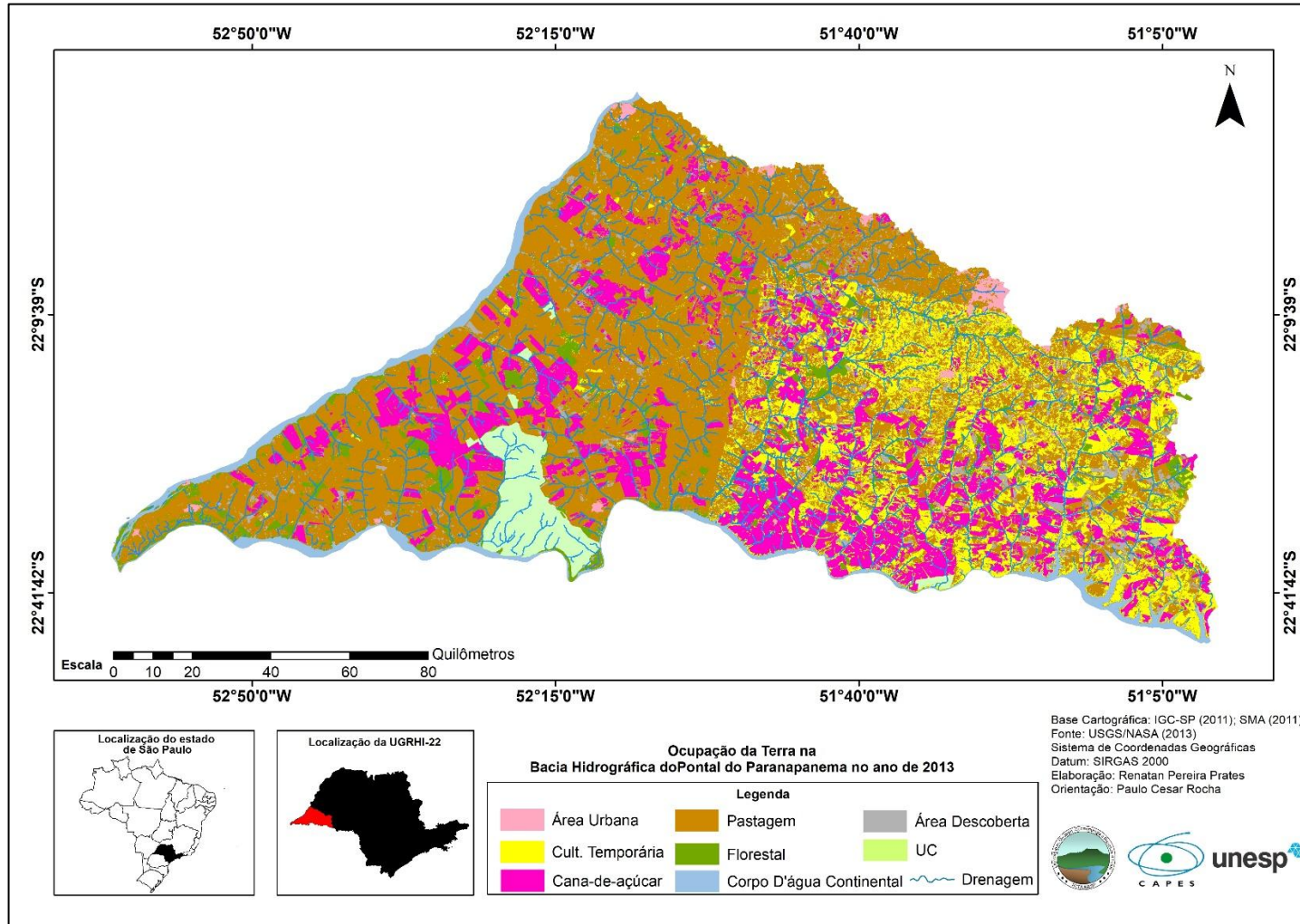
Mapa 17: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2002



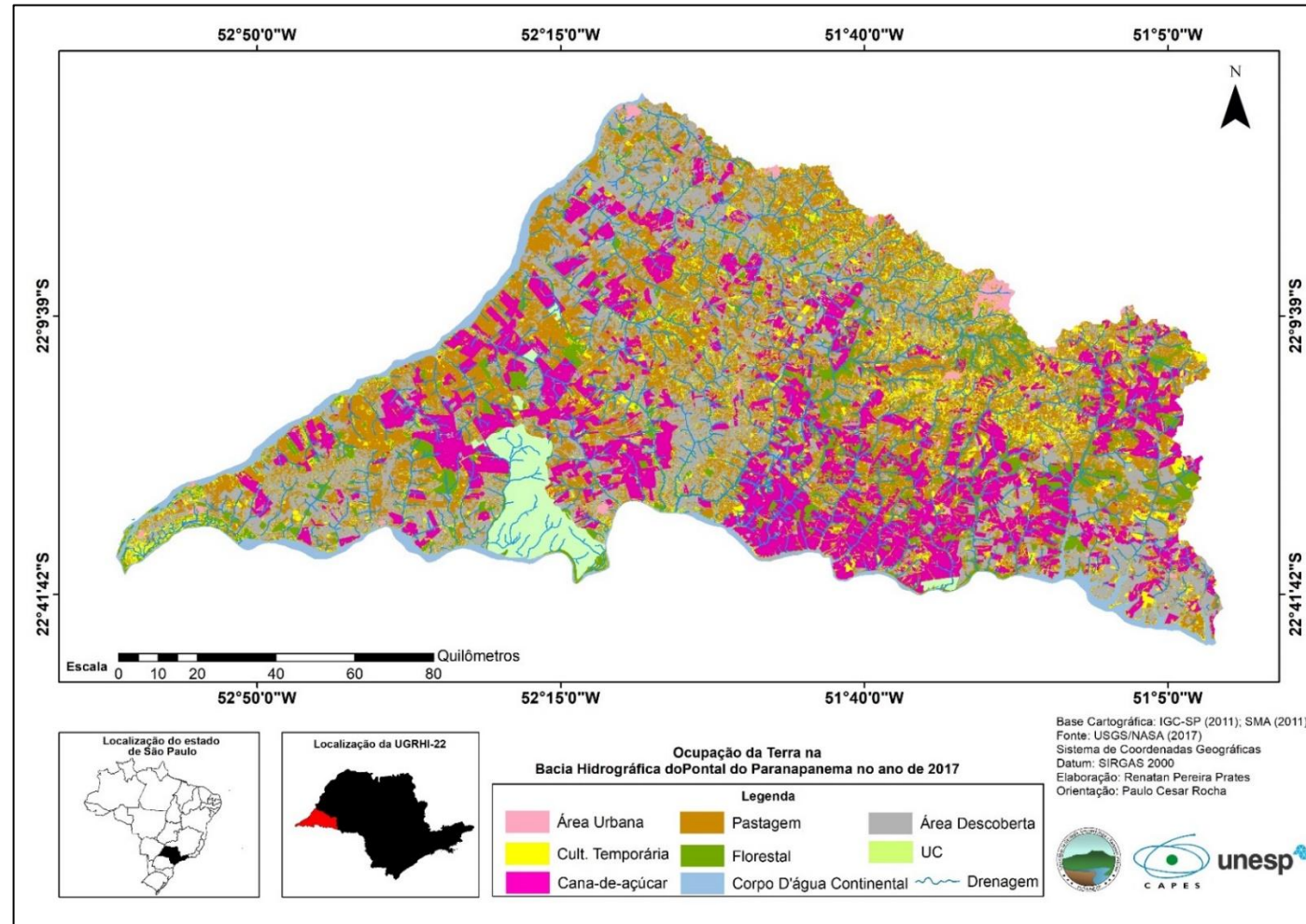
Mapa 18: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2007



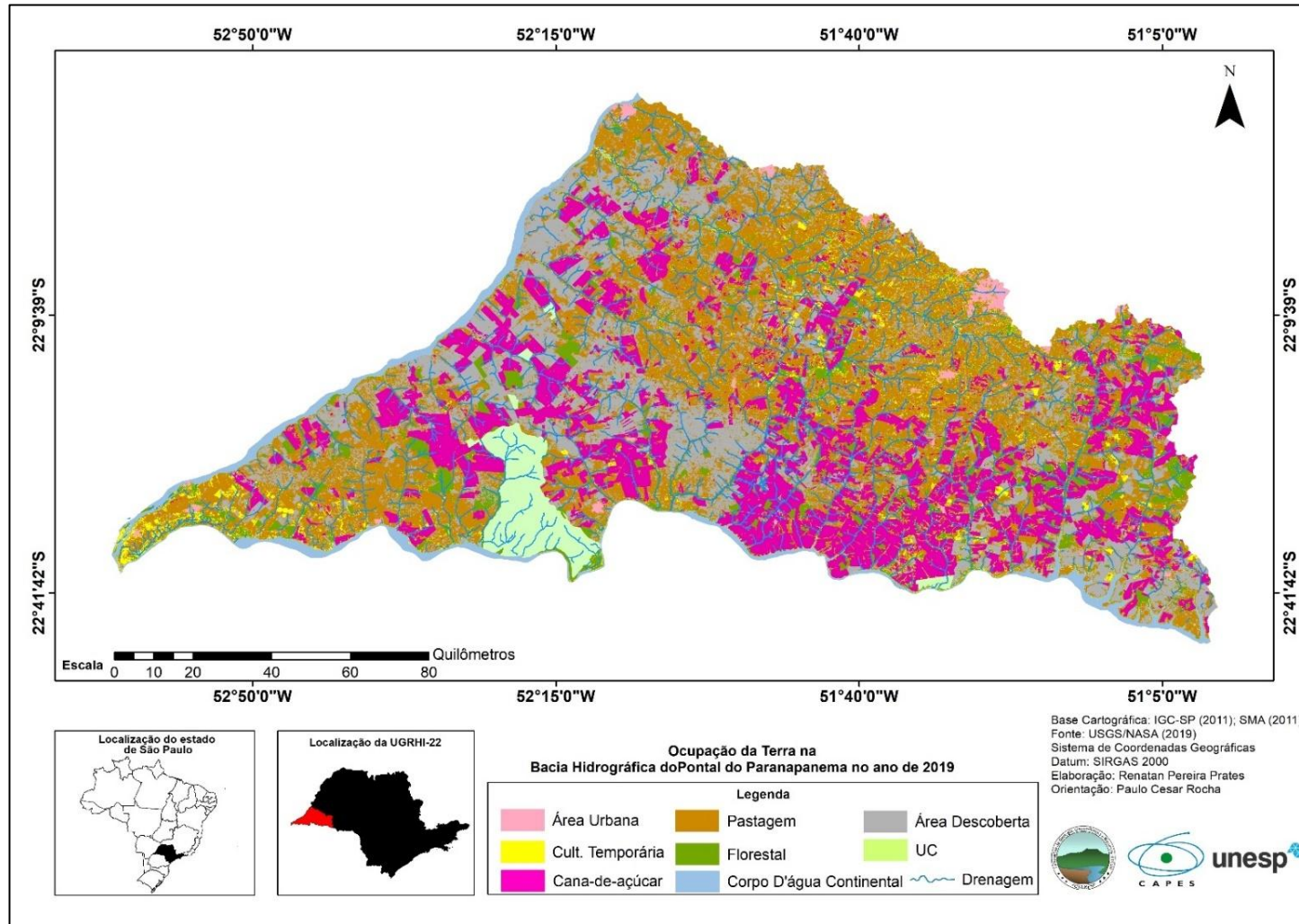
Mapa 19: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2013



Mapa 20: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2017



Mapa 21: Distribuição das classes de uso e cobertura da terra na UGRHI 22 - 2019



6 - Escoamento Superficial e Expansão Canavieira: análise nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 20, 21 e 22

A estimativa do escoamento superficial em bacias hidrográficas desempenha um papel fundamental no planejamento e na execução de projetos de gestão de recursos hídricos (Tucci, 2001). O escoamento superficial em uma bacia pode ser influenciado por diversos fatores. Alguns desses fatores estão relacionados à natureza climática, como a intensidade e a duração da precipitação, essenciais para análise do escoamento, enquanto outros fatores estão associados as características topográficas, como a declividade do terreno. (MANTOVANI et al, 2013).

A intensidade e a duração da chuva são fatores importantes na análise do escoamento superficial. Quanto mais intensa for a precipitação, mais rapidamente o solo atinge sua capacidade de infiltração, resultando em um aumento no escoamento excessivo. Da mesma forma, chuvas prolongadas contribuem significativamente para o aumento do escoamento superficial, especialmente em precipitações de intensidade constante. Outro fator climático relevante é a precipitação antecedente, uma vez que uma chuva subsequente em solo úmido devido a precipitações anteriores terá maior tendência ao escoamento (CARVALHO & SILVA, 2006).

As condições de superfície do solo desempenham um papel fundamental na determinação do escoamento superficial. As características físicas do solo, como textura, porosidade, o grau de compactação, a impermeabilização do solo, a capacidade de infiltração e a cobertura vegetal, são fatores que influenciam diretamente a quantidade de água que percola, permanece e escoar na superfície do solo. Sobre as áreas com cobertura vegetal, Bigarella & Suguio (1979) apontam que ela exerce um papel fundamental no escoamento superficial. Quando degradada, tende a aumentar o escoamento, enquanto, quando preservada, o processo é retardado.

Nesse contexto, o desmatamento e a supressão da cobertura florestal têm efeito considerável na perda de água. A ausência da cobertura florestal, curto prazo, reduz a perda de água do solo por transpiração, já que as raízes profundas das árvores são removidas. Ao mesmo tempo, isso provoca um aumento no escoamento superficial, visto que a antiga camada de folhas caídas que atuava como um amortecedor foi substituída pela exposição do solo. Isso, por sua vez, pode levar a um aumento no fluxo direto da água para os rios, afirma Rocha (2009).

A dinâmica do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica pode ser impactada por atividades antropogênicas. Dentre elas, destaca-se o manejo da irrigação, que envolve o planejamento da quantidade, frequência e método de irrigação adequados para as necessidades das plantas, considerando fatores como as características físicas do solo, o tipo de cultura, topografia, clima e disponibilidade de água. Além disso, as alterações no uso e cobertura da terra, como o desmatamento, a conversão de áreas naturais em agrícolas, urbanas ou industriais, e as mudanças nas práticas agrícolas exercem influência direta no fluxo superficial e, conseqüentemente, na circulação da água no solo, seja por escoamento superficial, infiltração ou outras formas de transporte hídrico.

Ao analisar a dinâmica do escoamento superficial, é essencial considerar a conectividade hidrológica, conceituada como a interligação física da água e do transporte de sedimentos por meio do sistema fluvial (HOOKE, 2003). Dessa forma, o padrão de conectividade potencial nas áreas analisadas pode ser determinado pelo escoamento superficial. Este fenômeno revela-se como um indicador importante para compreender a interligação e a extensão da conectividade hidrológica dentro desses espaços.

A dinâmica do escoamento superficial reflete a capacidade de interconexão entre diferentes regiões de uma área específica, delineando o potencial de movimentação da água e dos sedimentos ao longo do terreno. Ao considerar o escoamento superficial como um marcador dessa conectividade, é possível estimar a extensão dos fluxos hídricos dentro dessas áreas, fornecendo informações e dados pertinentes sobre a complexa interação entre a topografia, a cobertura do solo e a distribuição da água ao longo do sistema fluvial.

De acordo com Bracken e Croke (2007), é essencial considerar os padrões temporais e espaciais que dizem respeito à complexidade da conectividade de escoamento. A conectividade hidrológica é grandemente influenciada pela caracterização do meio física entre as encostas e os canais. Essa interligação afeta diretamente o transporte de sedimentos para os canais, sendo fundamental para compreender e limitar essa transferência. É importante identificar os elementos, sejam eles naturais ou artificiais, que impactam essa conectividade hidrológica. A construção de barragens pode reduzir significativamente o fluxo de conectividade, enquanto superfícies compactadas de estradas tendem a aumentar o escoamento, alterando drasticamente os padrões naturais de conectividade hidrológica (FRANCO & SOUZA, 2019).

No contexto, a análise dos dados de escoamento superficial destaca uma relação estreita com as características dos solos e as dinâmicas de uso e cobertura da terra. A interação complexa entre os solos, a cobertura do solo e as alterações resultantes das atividades antrópicas têm um impacto direto na dinâmica do fluxo de água sobre a superfície terrestre. Em áreas com monocultura, por exemplo, a compactação do solo pode ter um impacto considerável no escoamento, afetando o escoamento da água pela superfície e alterando os padrões naturais de escoamento superficial, que podem influenciar na dinâmica hidrológica e na conectividade nas áreas das Bacias Hidrográficas com intensa atividade agrícola.

A análise dos mapas de escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) da área de pesquisa fundamentou-se em trabalhos anteriores conduzidos na (UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema. Santos e Rocha (2018), Santos e Rocha (2019) e Carmo et al. (2021) apresentam contribuições relevantes nesse campo. Os estudos publicados abordam de forma abrangente a temática, destacando o potencial de escoamento superficial e considerando as diferentes formas de uso e cobertura da terra na região.

Para embasar e compreender o escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos, a classificação hidrológica dos solos nas UGRHIs 20, 21 e 22, utilizando o método do Número da Curva (CN), desenvolvido por Santos e Rocha (2021) buscou caracterizar esses solos em termos de capacidade de infiltração e resistência a processos erosivos. Os resultados revelaram a predominância de solos com baixa capacidade de infiltração nessas áreas, mas também identificaram uma presença considerável de solos do grupo A, conhecidos por sua alta taxa de infiltração. Isso sugere uma predominância de solos com baixa capacidade de infiltração e resistência à erosão, embora os solos do grupo A, como os Latossolos Vermelho-Amarelos e Latossolos Vermelhos, tenham uma presença notável e se destaquem pela alta infiltração e resistência a processos erosivos.

Salienta-se que a classificação hidrológica dos solos é fundamental para compreender as interações entre o solo e a água em diferentes ambientes, bem como seu comportamento hídrico. Esta classificação considera fatores intrínsecos de análise, como a capacidade de infiltração, a retenção de água e a suscetibilidade a processos erosivos. A capacidade de infiltração refere-se à quantidade de água que o solo consegue absorver durante um determinado período, influenciada pela textura, estrutura e grau de compactação do solo. A retenção de água diz respeito à capacidade do solo de armazenar

água para uso posterior pelas plantas, sendo considerada um dos processos essenciais para a manutenção da vegetação, especialmente em períodos de seca. A suscetibilidade a processos erosivos está condicionada pela facilidade com que o solo pode ser erodido pela ação da água ou do vento (erosividade), pelo tipo de solo e rocha (erodibilidade) e pela declividade do terreno.

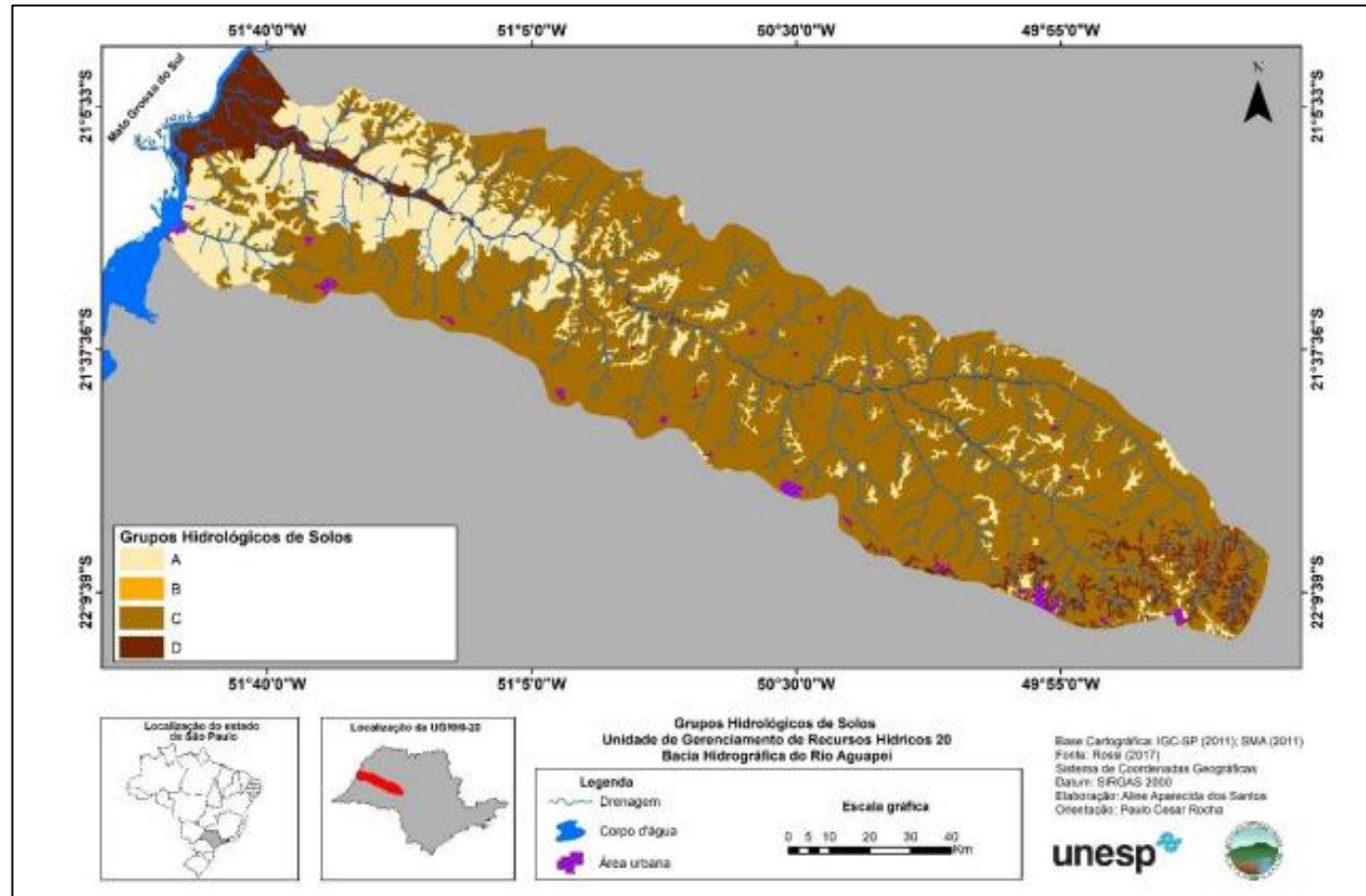
6.1 - Estimativa de Escoamento Superficial na UGHRI 20 – Bacia Hidrográfica do rio Aguapei

Para compreender a dinâmica do escoamento superficial na UGHRI 20, baseou-se na análise dos solos hidrológicos. Os solos são elementos fundamentais nos ciclos hidrológicos na regulação do fluxo de água e na interação entre as águas superficiais e subterrâneas. A capacidade de infiltração dos solos, ou seja, sua capacidade de absorver a água da chuva, é um dos principais aspectos hidrológicos. Solos com alta capacidade de infiltração são importantes para a recarga dos aquíferos e para a redução do escoamento superficial. Por outro lado, solos com baixa capacidade de infiltração podem aumentar o escoamento superficial, contribuindo para o carreamento de sedimentos e poluentes, afetando a qualidade das águas superficiais.

Verifica-se na UGRHI 20 - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei que os solos mais representativos são os Argissolos vermelhos-amarelos. Conforme a metodologia apresentada por Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005, p.12). Com base nas pesquisas conduzidas por Santos & Rocha (2018, 2019 e 2023) na região, os Argissolos Vermelho-Amarelos foram classificados no Grupo C, de acordo com a classificação hidrológica de solos. Esses solos são caracterizados por sua baixa capacidade de infiltração e por apresentarem pouca resistência e tolerância à erosão.

Na UGRHI 20, foi constatada a predominância de solos do grupo C, predominantemente associada à presença dos Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Flúvicos, conforme mapa 22 e Neossolos Flúvicos. Essa composição de solos define a UGRHI com predominância de solos com baixa capacidade de infiltração, o que pode ter implicações consideráveis nos processos hidrológicos da região (SANTOS e ROCHA, 2021).

Mapa 22: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 20



Fonte: Santos e Rocha (2021)

Os registros de escoamento superficial na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGRHI) 20 - Aguapei evidenciam notáveis variações entre as classes de escoamento, demonstrando uma oscilação significativa entre as classes que variam de fraco a forte ao longo dos anos estudados, e predominância de potencial de escoamento considerável na porção sudeste da Bacia.

No ano de 2002, o índice de escoamento foi classificado como fraco, com uma média estimada de 1.288 mm. Essa medida representa aproximadamente 33% do total da área de drenagem da Bacia. Contrariamente, a categoria identificada com o menor escoamento foi caracterizada como muito forte, apresentando uma estimativa de escoamento de 1.522 mm. Enquanto isso, a classe de escoamento médio abarcou cerca de 20% da área da Bacia, registrando aproximadamente 1.310 mm de escoamento (tabela 11).

Tabela 11: Classes de escoamento superficial na UGRHI 20 – rio Aguapei

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
1	18,1	20,1	22,3	24,4	27,0
2	33,1	26,5	23,6	23,5	21,9
3	19,5	11,8	12,0	11,4	11,2
4	12,3	25,1	26,4	25,2	25,2
5	16,9	16,4	15,7	15,4	14,7
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Elaboração: Renata Pereira Prates

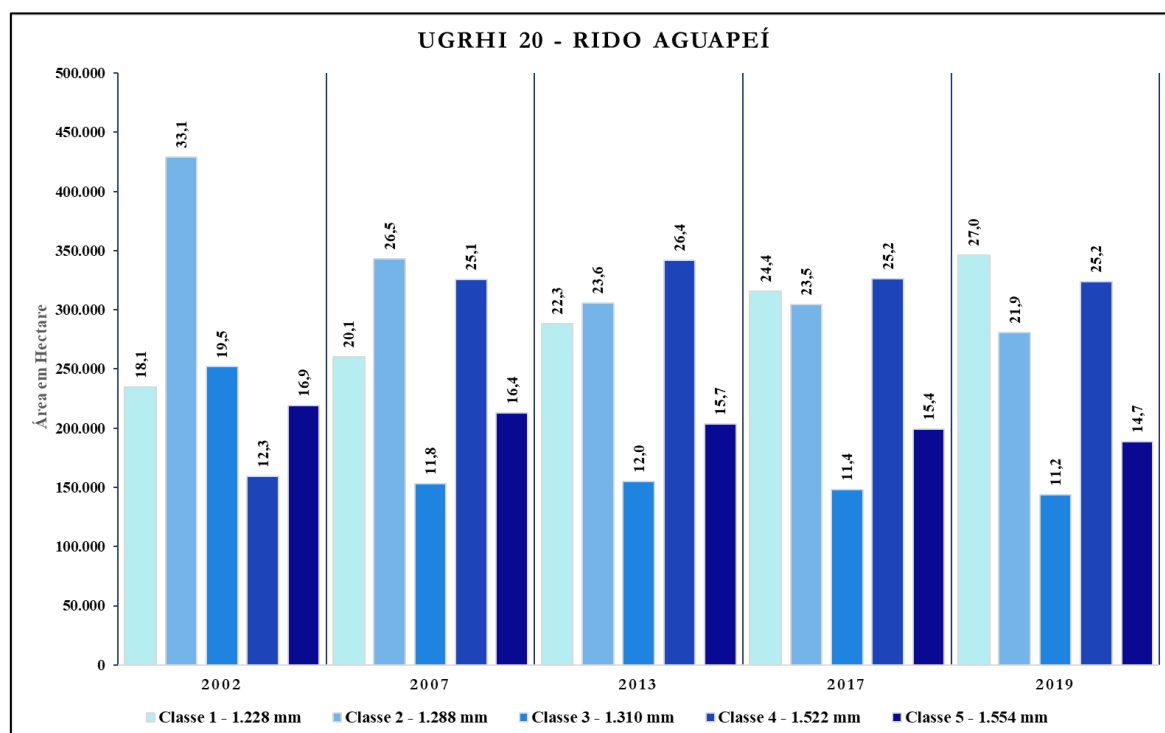
No ano de 2007, os índices de escoamento superficial se apresentaram predominantemente em duas categorias principais: fraco e médio, conforme evidenciado no gráfico 4. O escoamento fraco apresentou uma área representativa de 27%, enquanto a classe média compreendeu 25% da área estudada. Área relacionada ao escoamento muito fraco alcançou 20%, registrando uma média de 1.288 mm, enquanto o escoamento muito forte atingiu uma estimativa de 1.554 mm, cobrindo aproximadamente 16% da área da Bacia.

Já em 2013, houve uma mudança notável na dinâmica do escoamento superficial. A classe de escoamento forte assumiu a dianteira, representando 27% da área da UGRHI 20, equivalendo a uma estimativa de escoamento de 1.522 mm. Em sequência, as classes

de escoamento fraco e muito fraco compreenderam, respectivamente, 24% e 22% da área da bacia.

Estes resultados indicam uma variação na distribuição das classes de escoamento ao longo desses períodos analisados. A transição entre categorias, especialmente a mudança de predominância entre os tipos de escoamento, ressalta a dinâmica do escoamento superficial e complexidades dos processos hidrológicos na região indicando áreas com maior potencial de conectividade.

Gráfico 4: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGRHI 20



Elaboração: Renata Pereira Prates

Os dados referentes à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 20 do rio Aguapei, especificamente nos anos de 2017 e 2019, evidenciam uma alteração considerável nas classes e intensidades do escoamento superficial, apontando possíveis correlações com o uso da terra e a presença dos Argissolos Vermelho-Amarelos na região.

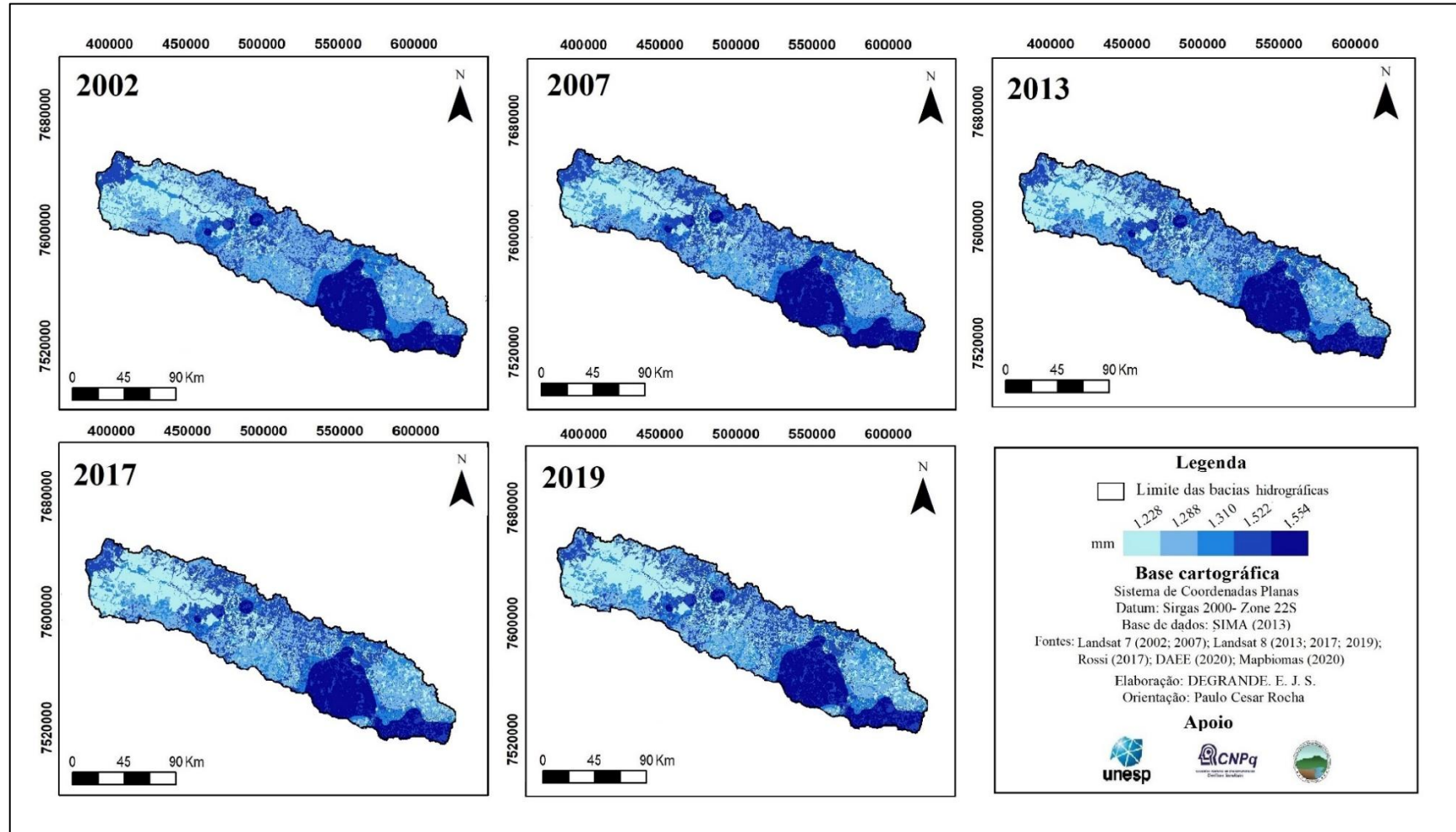
No ano de 2017, a classe 4 de escoamento superficial destacou-se, com uma estimativa de 1.522 mm, representando aproximadamente 26% do total. Em contraste, as classes 1 e 2 de escoamento corresponderam a 24% e 23%, respectivamente. Esta distribuição indica uma gama diversificada de intensidades de escoamento ao longo da área da UGRHI 20.

Já em 2019, o cenário de escoamento superficial apresentou uma alteração, onde a classe de escoamento muito fraco ganhou destaque, atingindo 27% da área, seguida pela classe de escoamento médio, representando 26%. As classes de escoamento fraco e muito forte corresponderam a 22% e 14% da área, respectivamente.

A análise do mapa 23 de Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGRHI) 20 - Aguapei revela uma predominância de solos com características que propiciam baixa taxa de escoamento superficial. Esta condição exerce influência direta no padrão de escoamento observado na área da UGRHI.

Os Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos – Amarelos surgem como os principais tipos de solo responsáveis pela condição observada na região da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGRHI) 20. Essas variedades de solo exibem propriedades específicas relacionadas às suas características morfológicas, as quais tendem a resultar em uma baixa taxa de infiltração.

Mapa 23: Estimativa de Escoamento Superficial na UGHRI 20 – Bacia Hidrográfica do rio Aguapei



6.1.1 - Escoamento Superficial na UGHRI 20 nas áreas com cana-de-açúcar

Ao analisar as classes de escoamento superficial em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, percebe-se uma evolução na sua distribuição nas bacias hidrográficas ao longo do tempo. Esse fenômeno está diretamente ligado ao crescimento constatado na produção canavieira nos últimos anos na região.

Na bacia hidrográfica do rio Aguapeí, por exemplo, no ano de 2002 sua área total de cana-de-açúcar foi de 85.616 hectares. Considerando este valor, a classe 4 foi a que mais se destacou neste ano, representando 37% da área desta bacia hidrográfica. Este percentual, por sua vez, representou uma área de aproximadamente 31.619 hectares.

Em 2007, a área total de cana-de-açúcar na Bacia, com extensão de 206.346 hectares, foi marcada pela predominância da classe, correspondendo a 51% da totalidade da Bacia Hidrográfica. Nessa categoria, essa porcentagem equivale a 104.987 hectares no mesmo ano.

Nos anos de 2013 e 2017, assim como nas outras classes da Bacia Hidrográfica do rio Aguapeí, a classe de escoamento superficial mais significativa foi a classe 4, atingindo 39% e 38%, respectivamente. Em 2013, a área total de cana dentro da Bacia era de 414.811 hectares, sendo que a classe 4 representava 163.491 hectares, com um escoamento de 1.554mm. Já em 2017, a área destinada ao cultivo de cana atingiu 459.160 hectares, dos quais 174.129 hectares pertenciam à classe 4.

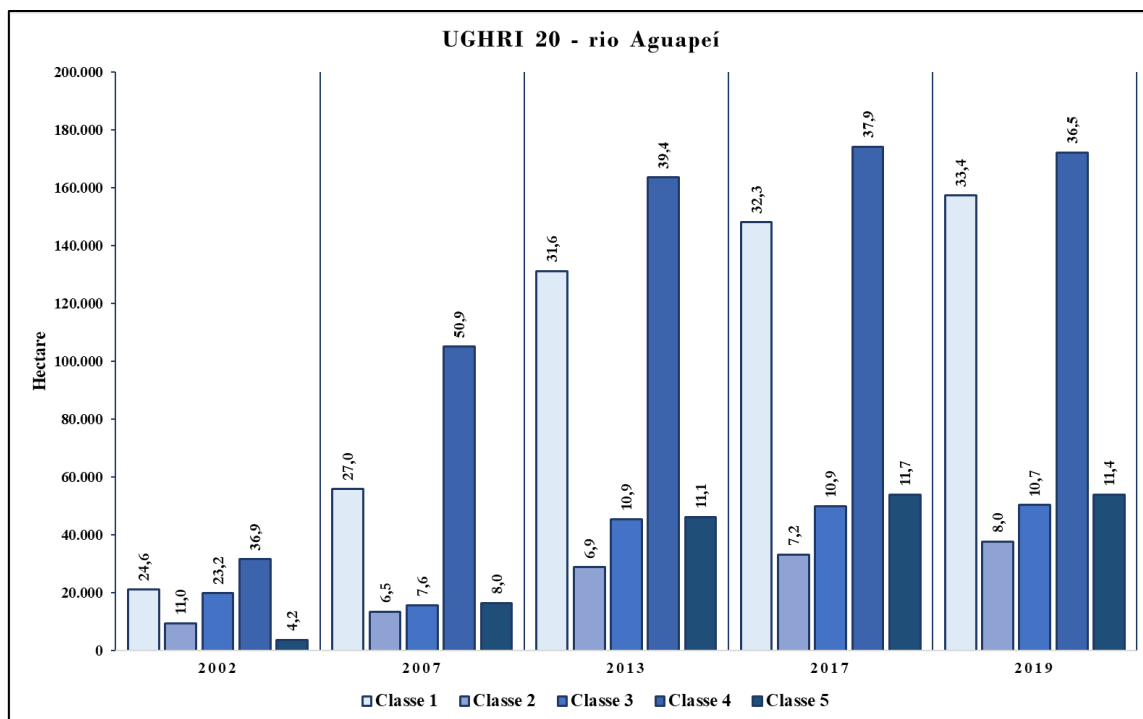
Em 2019, a área total de cultivo de cana na Bacia Hidrográfica (BH) do rio Aguapeí alcançou 473.574 hectares, destacando-se mais uma vez o escoamento superficial, no qual a classe 4 obteve o maior percentual, correspondendo a 37% da extensão da Bacia Hidrográfica. Contudo, devido ao expressivo aumento do cultivo de cana e, por conseguinte, do escoamento em suas áreas, esse percentual representou aproximadamente 170.000 hectares nesse ano, apresentados no gráfico 5 e no mapa 24.

O escoamento superficial em áreas onde a cana-de-açúcar é cultivada pode ser afetado por vários fatores, como o tipo de solo, as práticas de manejo agrícola e as condições climáticas. A extensiva atividade agrícola pode diminuir a capacidade de infiltração do solo, levando a um aumento no escoamento superficial devido à compactação resultante das práticas de mecanização.

As atividades agrícolas que envolvem a movimentação do solo e a circulação de maquinário impactam a estrutura do solo, afetando as condições para o crescimento das raízes. A compactação do solo representa uma das principais restrições ao

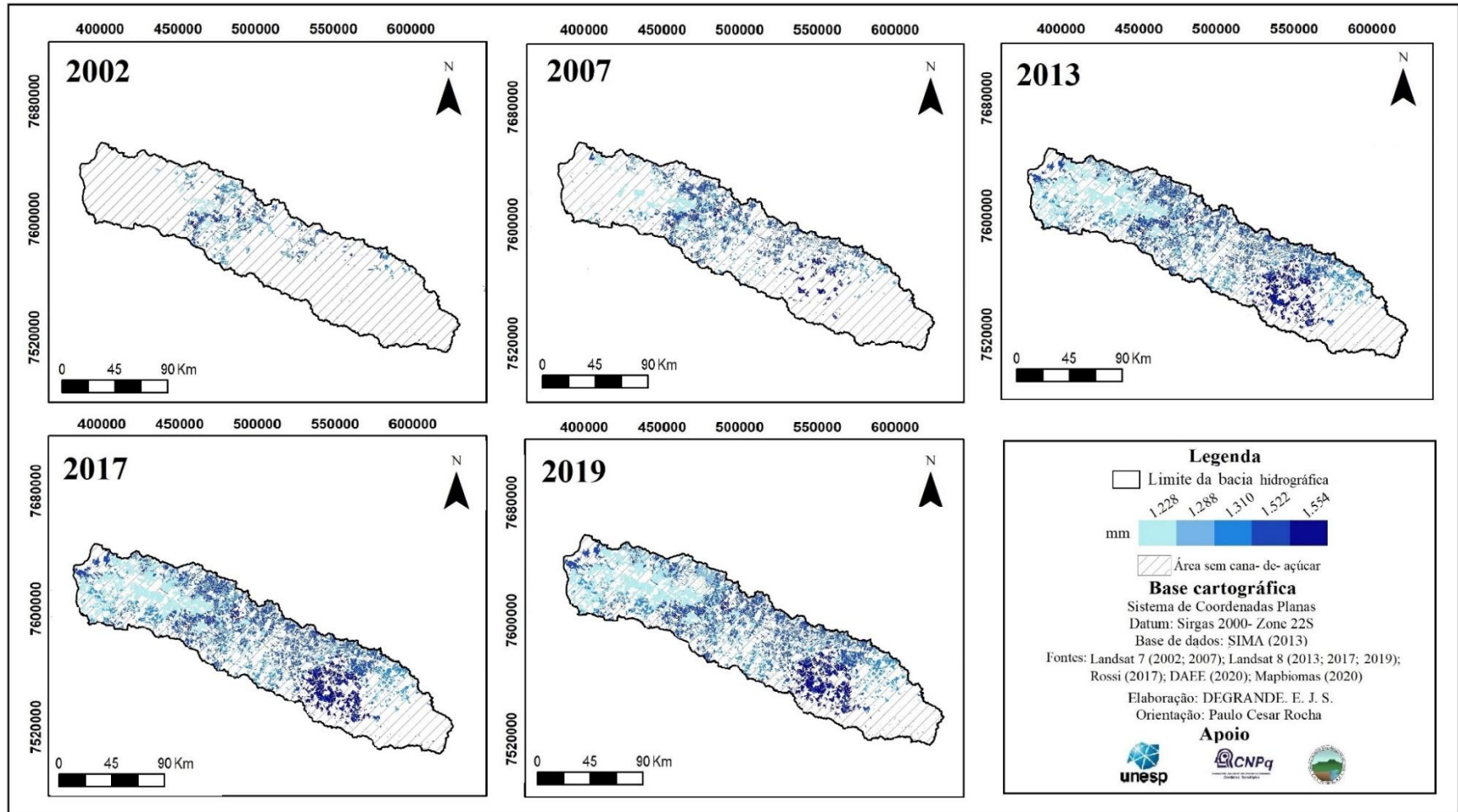
desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, reduzindo sua capacidade de absorver água e nutrientes/fertilizantes, conforme observado por Oliveira Filho et al. (2016, p.721). Observa-se que o processo de mecanização na colheita da cana-de-açúcar, quando realizada em solos com altos níveis de umidade, é identificado por Severiano et al. (2010) como um fator significativo para a compactação do solo.

Gráfico 5: Escoamento Superficial na UGHRI 20 nas áreas com cana-de-açúcar



Elaboração: Renata Pereira Prates

Mapa 24: Escoamento Superficial na UGHRI 20 nas áreas com cana-de-açúcar



6.2 - Estimativa Superficial na UGHRI 21 – Bacia Hidrográfica do rio do Peixe

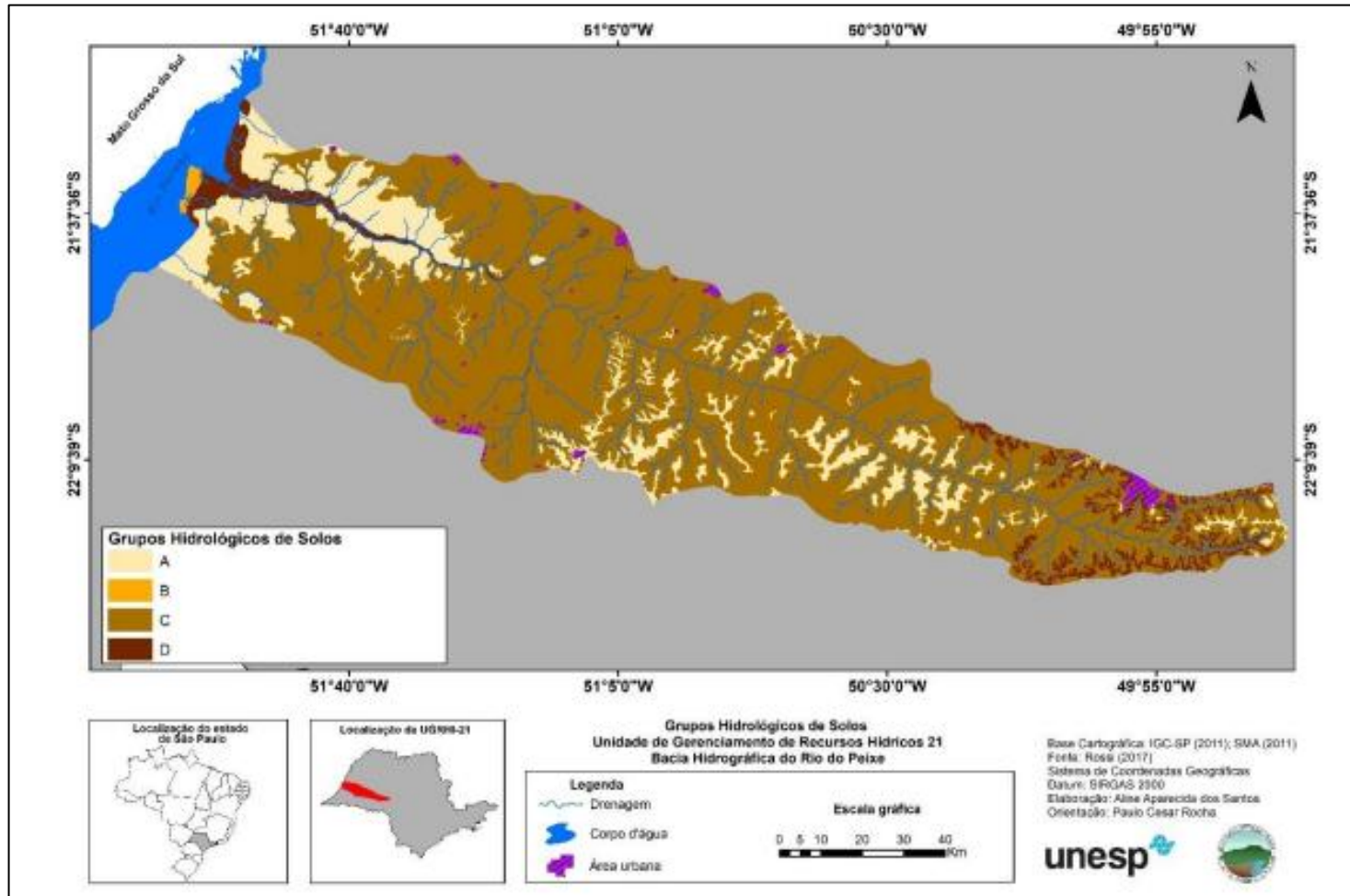
A análise dos dados de escoamento superficial na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGHRI) 21, associada ao rio do Peixe, revela distribuições diferenciadas nas áreas com maior potencial de escoamento durante distintos períodos. Destacam-se as porções leste e sudoeste da bacia como áreas de maior potencial de escoamento superficial.

Na UGRHI 20 - Bacia do rio do Peixe, os tipos de solo predominantes incluem Argissolos Vermelhos-Amarelos, Latossolos Vermelhos e Neossolos Litólicos, especialmente a montante da bacia. Conforme descrito por Sartori et al. (2005), esses solos são classificados nos grupos hidrológicos C, A e D, respectivamente. Os solos do grupo C exibem baixa taxa de infiltração e são pouco resistentes aos processos erosivos. Por outro lado, os solos do grupo A demonstram alta taxa de infiltração e considerável resistência à erosão, enquanto os do grupo D apresentam taxa de infiltração muito baixa e baixa resistência à erosão.

De acordo com Santos e Rocha (2021), constatou-se que área da bacia hidrográfica na UGRHI 21 é composta por solos classificados no grupo D, atribuído à presença predominante de Gleissolos Háplicos, Neossolos Litólicos e Planossolos Háplicos. Por outro lado, grupos de solo B, diretamente vinculados à ocorrência de Neossolos Quartzarênicos, mapa 25

A distribuição espacial dos solos com baixa capacidade de infiltração e resistência reduzida aos processos erosivos mostra-se uniforme em grande parte da UGRHI 21, exceto na porção noroeste da área. Nesta região específica, há uma variabilidade significativa, com a presença de solos caracterizados por diferentes capacidades de infiltração, variando entre alta, média e muito baixa.

Mapa 25: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 21



Fonte: Santos e Rocha (2021)

Em 2002, observou-se uma expressividade nas classes de escoamento médio e fraco, representando 29% e 28%, respectivamente. Por outro lado, a classe muito forte alcançou 16% de representatividade, seguida pela classe muito fraca, que registrou 15%, equivalente a uma estimativa de escoamento de aproximadamente 1.228 mm.

Já em 2007, os índices de escoamento superficial na UGRHI 21 mostraram-se distintos. A classe de escoamento fraco representou 24%, enquanto a classe de escoamento forte atingiu 22%. A área associada ao escoamento médio registrou 20%, correspondendo a 1.288 mm, ao passo que o escoamento muito fraco apresentou uma estimativa de 1.554 mm, cobrindo 18% da área da bacia (tabela

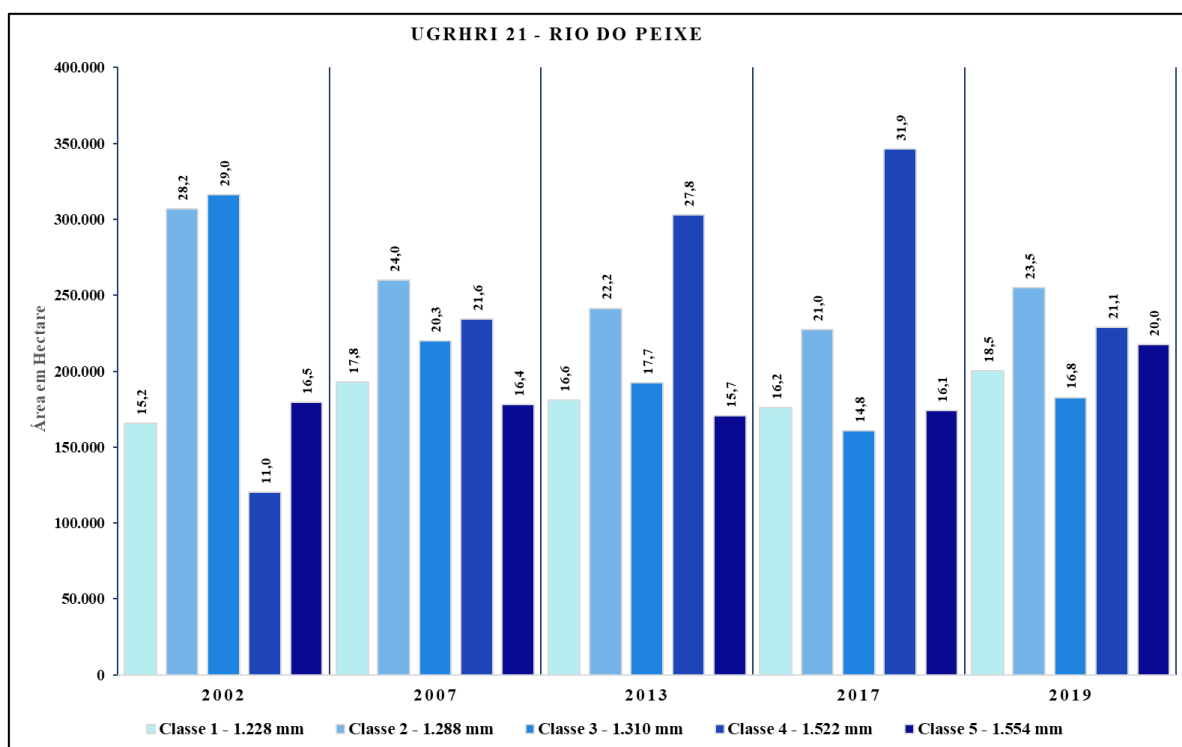
Tabela 12: Classes de escoamento superficial na UGRHI 21 – rio do Peixe

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
1	15,2	17,8	16,6	16,2	18,5
2	28,2	24,0	22,2	21,0	23,5
3	29,0	20,3	17,7	14,8	16,8
4	11,0	21,6	27,8	31,9	21,1
5	16,5	16,4	15,7	16,1	20,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Elaboração: Renata Pereira Prates

Em 2013, a classe de escoamento superficial predominante foi a forte, cobrindo 28% da área, com uma estimativa de escoamento de 1.522 mm. Em seguida, as classes de escoamento fraco abrangeram 22%, enquanto o índice de escoamento médio correspondeu a 18% da área da UGRHI 20.

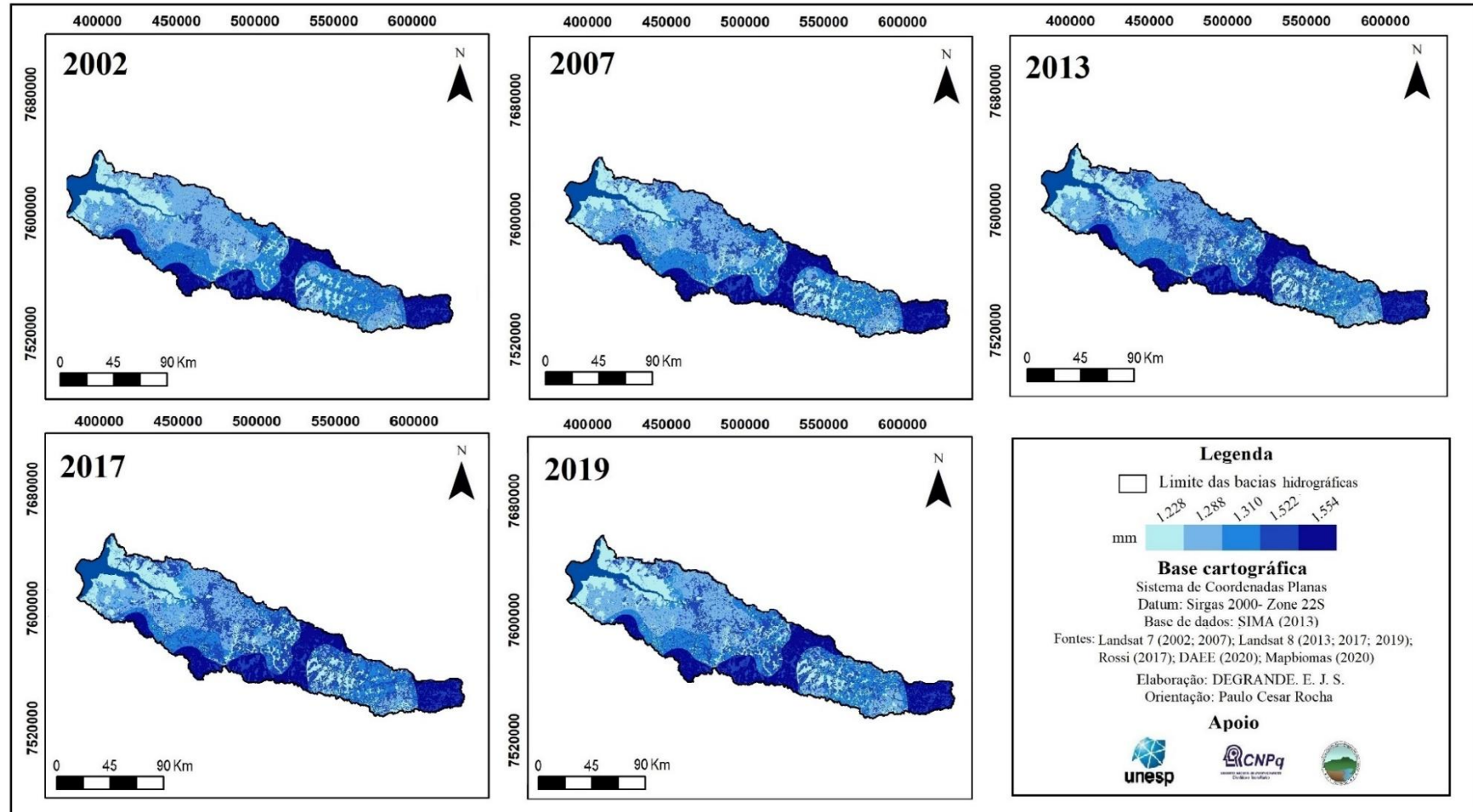
Em 2017, os dados do escoamento superficial na Bacia do rio do Peixe indicam um índice de escoamento forte, atingindo uma estimativa de 1.522 mm, o que corresponde a 32% da área total da Bacia. A classe de escoamento fraco representa 21%, enquanto as classes de escoamento muito fraco e muito forte totalizam 16%. Já em 2019, observa-se que o índice de escoamento muito fraco representa 24%, seguido pelo escoamento médio, representando 21%. Os valores para as classes de escoamento estão bem distribuídos, com a classe muito forte registrando 20%, e as classes muito fraco e médio com 18% e 17%. Ao longo dos anos analisados, as áreas com pastagem têm prevalecido na Bacia do rio do Peixe, conforme indicado no gráfico 6 e no mapa 26

Gráfico 6: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGRHI 21

Elaboração: Renata Pereira Prates

A análise do escoamento superficial na UGRHI 20, evidencia o predomínio de áreas com pastagem na região ao longo dos anos de pesquisa, o que pode influenciar significativamente a dinâmica do escoamento na Bacia do rio do Peixe. De acordo com Botelho e Silva (2020, p.165), há diferenças no comportamento do escoamento em áreas de agricultura e pastagem. Nas pastagens, o sistema radicular das gramíneas ajuda na infiltração, reduzindo as perdas de solo e água pelo escoamento superficial. Por outro lado, nas áreas agrícolas, a exposição do solo às gotas da chuva, a falta de cobertura vegetal durante o preparo do solo para o plantio e a ausência de práticas adequadas de manejo contribuem para a formação do escoamento superficial.

Mapa 26: Estimativa Superficial na UGHRI 21 – Bacia Hidrográfica do rio do Peixe

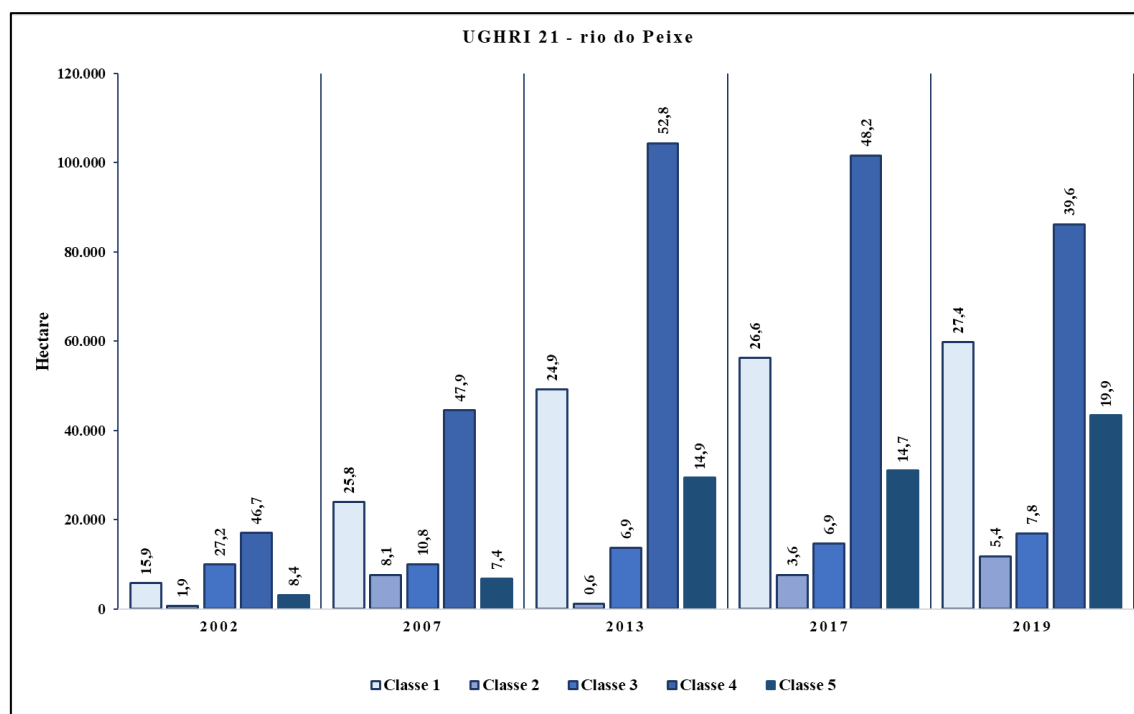


6.2.1 - Escoamento Superficial na UGHRI 21 nas áreas com cana-de-açúcar

Ao analisar as diferentes categorias de escoamento superficial na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada - UGHRI 21, que compreende a Bacia Hidrográfica do rio do Peixe, e seu relacionamento com o cultivo de cana-de-açúcar, é perceptível uma evolução ao longo do tempo na distribuição das classes de escoamento. Esse processo está intimamente relacionado com o crescimento notável na produção de cana-de-açúcar na região nos últimos anos. À medida que as áreas de cultivo de cana-de-açúcar se expandem, o escoamento também aumenta na área da Bacia.

Em 2002, a área total de cultivo de cana-de-açúcar na UGHRI 21 era de 36.500 hectares. Destaca-se a classe 4, representando 47% da área da Bacia Hidrográfica. Dentro dessa classe, a área compreende 17.030 hectares, registrando um índice de escoamento forte de 1.522 mm. conforme podemos observar no gráfico 7.

Gráfico 7: Classes de escoamento superficial na UGHRI 21 nas áreas com cana-de-açúcar



Elaboração: Renata Pereira Prates

Os dados de 2007 apontam um aumento nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar na Bacia, atingindo uma extensão de 92.721 hectares. Assim, como em 2002, a classe 4 se destaca, representando 48% do cultivo de cana-de-açúcar, equivalente a 44.450 hectares

da área total. Em seguida, a classe 1 abrange 26%, ocupando uma área de 23.933 hectares. Para a classe 1, o índice de escoamento superficial é de 1.228 mm

Em 2013, observa-se um crescimento significativo no cultivo de cana-de-açúcar na UGHRI 21, atingindo 197.685 hectares. A classe 4 se destaca, representando 52% da extensão total da Bacia, totalizando 104.323 hectares, e registrando um índice médio de escoamento de 1.522 mm. Em sequência, a classe 1 ocupa 49.160 hectares, correspondendo a 25% da área total disponível para cultivo. O aumento do escoamento superficial neste cenário revela que à medida que o cultivo da cana-de-açúcar avança na Bacia, o escoamento se intensifica.

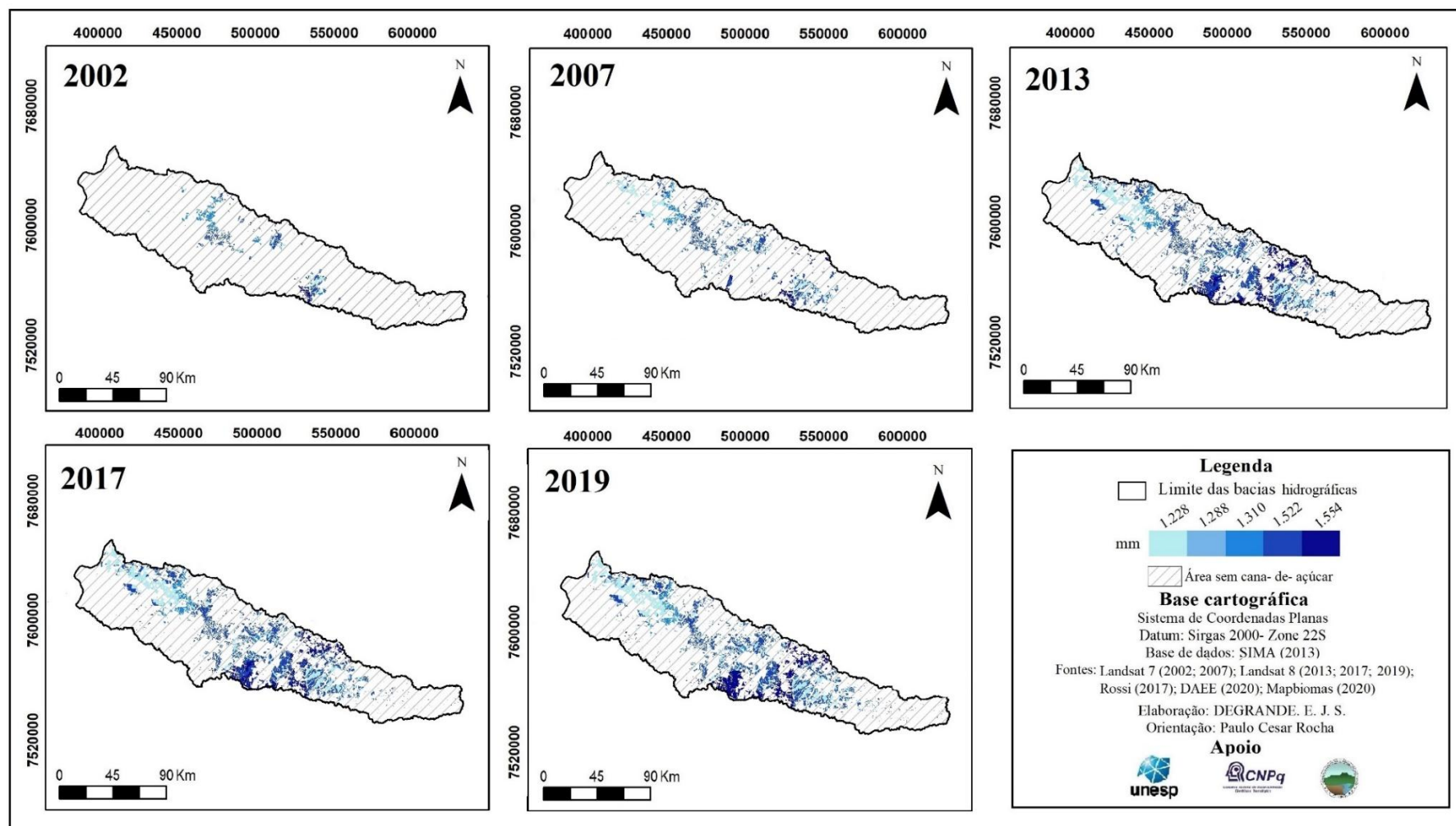
Em 2017, as classes 4 e 1 se destacaram, representando 48% e 27% das áreas com escoamento superficial na UGHRI 21, respectivamente. A classe 4 apresentou uma área de 101.598 hectares, enquanto a classe 1 compreendeu 56.228 hectares, totalizando 211.003 hectares na Bacia. É notável também a presença da classe 5, cobrindo 30.989 hectares, o equivalente a 15% das áreas de escoamento, resultando em um índice de escoamento forte de 1.554 mm.

Analisando os dados de 2019, a área total destinada ao cultivo de cana atingiu 217.944 hectares, destacando-se as classes 4, 1 e 5. A classe 4 representa 40% da área de escoamento superficial da Bacia, o que compreende 86.205 hectares. A classe 1 corresponde a 27%, totalizando 59.739 hectares, enquanto a classe 5 abrange 43.375 hectares, equivalente a 20% da área da Bacia com escoamento superficial.

Ao analisar o padrão de conectividade potencial do escoamento superficial em áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar ao longo dos anos estudados, destaca-se uma correlação direta com a distribuição das classes de escoamento superficial. O aumento progressivo das áreas dedicadas ao cultivo da cana-de-açúcar pode influenciar o padrão de conectividade potencial nessas áreas.

O mapa 27 oferece uma representação espacial que evidencia a relação direta entre a distribuição da cana-de-açúcar e a estimativa do escoamento superficial na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGHRI) 21. A observação revela que áreas com maior concentração de cultivo de cana-de-açúcar tendem a correlacionar-se com maiores índices de escoamento superficial

Mapa 27: Estimativa do potencial de escoamento superficial na UGHRI 21 nas áreas com cana-de-açúcar



6.3 - Escoamento Superficial na UGHRI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema.

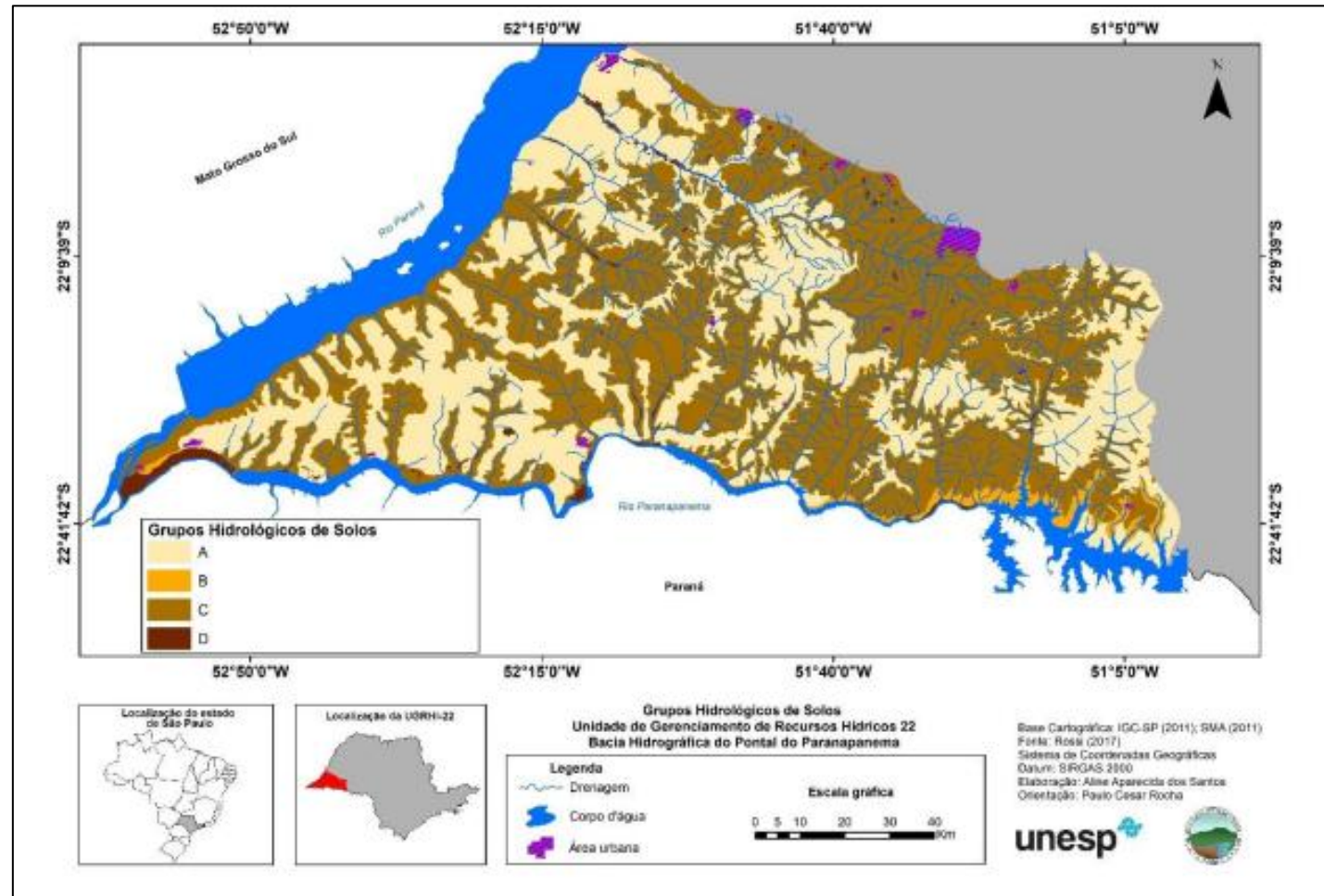
Na análise do **mapa 36** de escoamento de 2002 da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGRHI), tornou-se evidente a predominância de áreas com maior potencial de escoamento nas porções leste e sudeste da região. Este padrão sugere uma distribuição diferenciada da dinâmica de escoamento nessa área específica.

Santos e Rocha (2019), ao elaborarem o mapa dos grupos de solos hidrológicos para a UGHRI 22, identificaram a predominância dos solos do Grupo C na região. Essa predominância é atribuída à alta incidência de Argissolos Vermelho-Amarelos, que são caracterizados por apresentarem baixa capacidade de infiltração e menor resistência a processos erosivos. As áreas classificadas como Neossolos Flúvicos também se enquadram no grupo hidrológico C, evidenciando igualmente uma baixa taxa de infiltração.

Por outro lado, o Grupo A, composto por Latossolos Vermelho e Latossolos Vermelhos-Amarelos, engloba solos com altas taxas de infiltração e maior resistência a processos erosivos. Essas características destacam a importância da composição e distribuição dos tipos de solo na região para a dinâmica do escoamento superficial, influenciando diretamente os padrões hidrológicos observados.

Na análise do mapa de escoamento de 2002 da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Integrada (UGRHI), tornou-se evidente a predominância de áreas com maior potencial de escoamento nas porções leste e sudeste da região. Este padrão sugere uma distribuição diferenciada da dinâmica de escoamento nessa área específica.

Mapa 28: Distribuição dos Grupos Hidrológicos de Solos na UGRHI 22



Fonte: Santos e Rocha (2021)

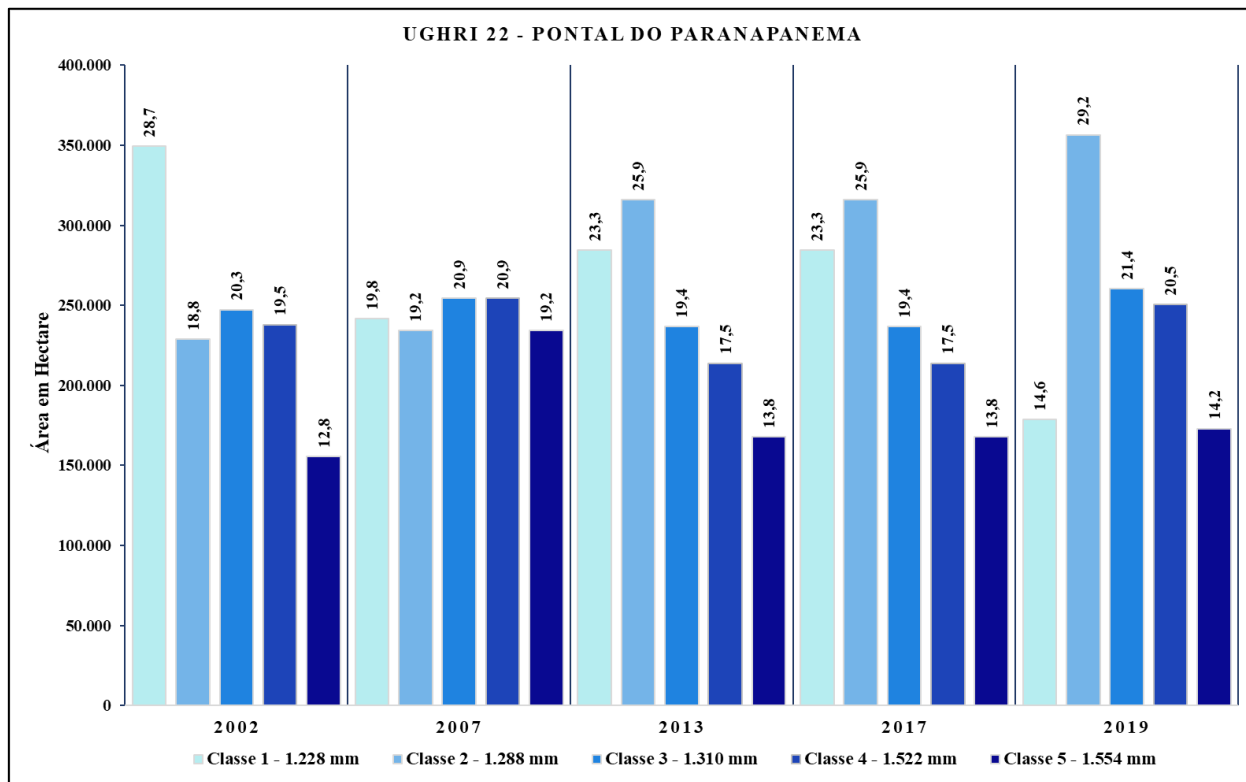
Os valores de estimativa de escoamento superficial variaram de 1.228 mm a 1.554 mm, refletindo índices de escoamento desde muito fraco até muito forte na UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema. A distribuição espacial ao longo dos anos analisados revela uma certa homogeneidade no escoamento dentro da área da Bacia. Essa homogeneidade das classes em relação ao escoamento superficial pode estar associada ao uso e cobertura da terra, com predomínio de áreas de pastagem ou de pastagens degradadas, assim como em áreas descobertas que representavam 41% em 2007, apresentados na

Tabela 13: Classes de escoamento superficial na UGRHI 22 – Pontal do Paranapanema

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
1	28,7	19,8	23,3	23,3	14,6
2	18,8	19,2	25,9	25,9	29,2
3	20,3	20,9	19,4	19,4	21,4
4	19,5	20,9	17,5	17,5	20,5
5	12,8	19,2	13,8	13,8	14,2
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Elaboração: Renata Pereira Prates

Gráfico 8: Classes e Porcentagem de Escoamento na UGRHI 22



Elaboração: Renata Pereira Prates

No ano de 2002, a classe 1 destacou-se como a mais representativa na Bacia, cobrindo 28,7% da área com um índice de escoamento muito fraco. Este predomínio sugere que uma porção significativa da bacia possuía características favoráveis à infiltração de água, como solos permeáveis e vegetação densa, reduzindo o escoamento superficial. Em seguida, a classe 3, caracterizada por um escoamento médio, compreendeu 20,3% da área. A presença significativa desta classe indica a existência de áreas com pouca permeabilidade e consequentemente a retirada da cobertura vegetal nativa, resultando em maior escoamento superficial.

No ano de 2007, áreas com maior potencial de escoamento foram observadas nas porções leste e sudeste da UGRHI 22. As classes de escoamento médio, com 1.310 mm, e forte, com 1.552 mm, representaram ambas 20,9% da área. O escoamento superficial em 2007 apresentou um equilíbrio entre todas as classes, desde muito fraco até muito forte, refletindo as mudanças no uso e cobertura da terra na área da Bacia, com a presença de pastagens degradadas, áreas com solo exposto ou em preparo para o plantio agrícola, que influenciam na capacidade de infiltração e o escoamento.

Para o ano de 2013, o escoamento superficial na UGRHI 22 concentra-se principalmente nas regiões nordeste e sudeste da Bacia, como observamos no mapa 29. A classe com o índice de escoamento fraco, aparece com 25,9%, seguida pela classe 1, com escoamento muito fraco, correspondendo a 23,3% e uma estimativa de escoamento de 2.228 mm. Assim, como em 2007 os índices de escoamento mostram-se distribuídos de forma equitativa, mesmo diante de alterações significativas no uso e cobertura da terra.

Os dados evidenciam uma transformação significativa no uso e cobertura da terra entre os anos de 2007 e 2013, sinalizada por um crescimento expressivo nas áreas destinadas às culturas temporárias e ao cultivo de cana-de-açúcar na UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema. Em 2007, as áreas destinadas ao cultivo de cana representavam 5,4% da região, ampliando-se para 17% em 2013. De modo paralelo, as áreas ocupadas por culturas temporárias, que representavam 2,8% em 2007, aumentaram para 16,3% em 2013. Esse crescimento significa uma expansão de aproximadamente 1.235.000 hectares, refletindo mudanças substanciais nas práticas agrícolas e no uso do solo. Tais transformações são indicativos de uma intensificação do uso do solo agrícola, com possíveis impactos sobre os recursos naturais, bem como na dinâmica hidrológica e a sustentabilidade ambiental da região.

Em 2017, o escoamento superficial na UGRHI 22 se concentra principalmente na porção nordeste, apresentando um índice de escoamento fraco de 1.288 mm,

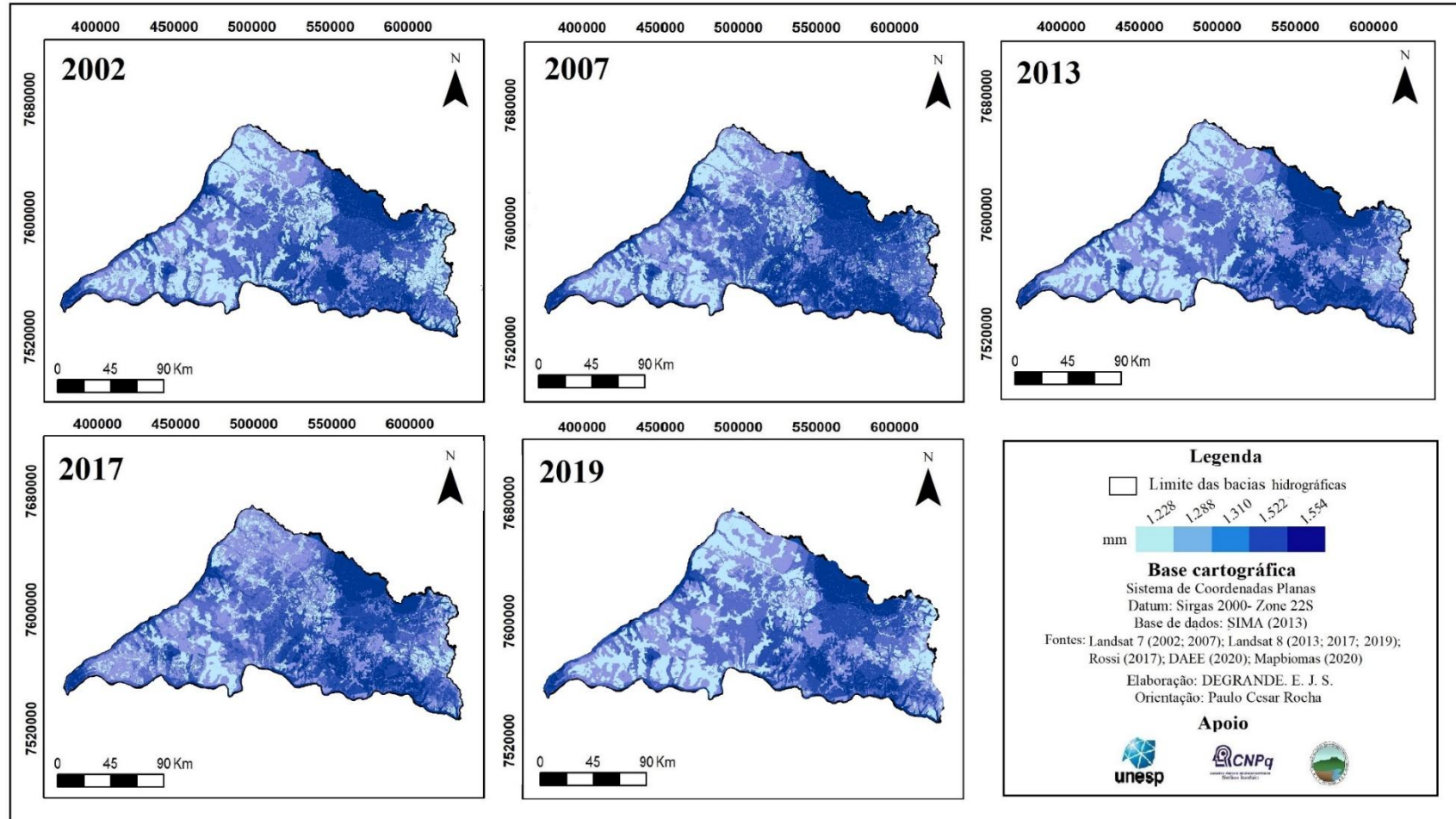
representando 26% do total. A classe de escoamento médio corresponde a 19,4%, enquanto a menor classe observada foi a de escoamento muito forte, atingindo 13,8% da área total da Bacia.

Em 2017, o escoamento superficial na UGRHI 22 concentrou-se predominantemente na porção nordeste, onde apresentou um índice de escoamento fraco de 1.288 mm, representando 26% do total. A classe de escoamento médio ocupou 19,4% da área, indicando uma distribuição moderada de escoamento nas regiões com solos menos permeáveis ou cobertura vegetal variada. A menor classe observada foi a de escoamento muito forte, abrangendo apenas 13,8% da área total da bacia, o que pode ser atribuído a fatores como a presença de solos compactados, que facilitam a rápida movimentação da água superficial. Esses dados sugerem uma heterogeneidade no comportamento hidrológico da bacia, influenciada por exemplo por mudanças no uso da terra e características topográficas.

Pesquisas realizadas por Santos e Rocha (2018) para o ano de 2014 verificaram que a distribuição espacial do escoamento superficial no Pontal do Paranapanema pode sofrer influência significativa dos tipos de solo, cobertura e uso da terra, além da distribuição das chuvas. Esses fatores combinados afetam a capacidade do solo de infiltrar e armazenar água, bem como a velocidade e o volume do escoamento superficial. Solos com alta permeabilidade e boa cobertura vegetal tendem a apresentar escoamento reduzido, enquanto áreas com solos compactados, urbanizadas ou com pouca vegetação sofrem maior escoamento superficial, aumentando os riscos de erosão e enchentes.

A análise dos dados de escoamento superficial para o ano de 2019 revela uma concentração significativa na região nordeste da UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema. As classes de escoamento observadas incluem a classe de escoamento fraco, que compreende 29% da área, com um índice de 1.288 mm. A classe de escoamento médio representa 21,4% da área, com um escoamento de 1.310 mm. A classe com menor representatividade é a de escoamento muito forte, abrangendo apenas 14,2% da área, com uma estimativa de escoamento de 1.554 mm. Esses dados indicam uma variabilidade no comportamento hidrológico da bacia, corroborando para os estudos desenvolvidos de Santos e Rocha (2018) sobre a importância dessas variáveis na determinação do escoamento superficial. O escoamento superficial fraco e médio sugere áreas com solos mais permeáveis ou apresentam melhor manejo dos solos nas áreas cultiváveis, enquanto a menor representatividade do escoamento muito forte pode estar relacionada a regiões específicas com condições menos favoráveis à infiltração.

Mapa 29: Escoamento Superficial na UGHRI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema



6.3.1 - Escoamento Superficial na UGHRI 22 nas áreas com cana-de-açúcar

Os dados apresentados sobre o avanço da cultura canavieira e a estimativa de escoamento superficial na UGHRI 22 – Pontal do Paranapanema apresentam uma relação do ponto de vista do meio físico, influenciado pelo relevo predominantemente suave, com colinas amplas e médias e de baixa declividade, favorecendo o cultivo da cana-de-açúcar. Essas condições favorecem particularmente o cultivo da cana-de-açúcar. Entretanto, é importante ressaltar que a UGHRI 22 é intensamente impactada pela atividade antrópicas, e a expansão da cana-de-açúcar poderá gerar uma demanda adicional de água para irrigação.

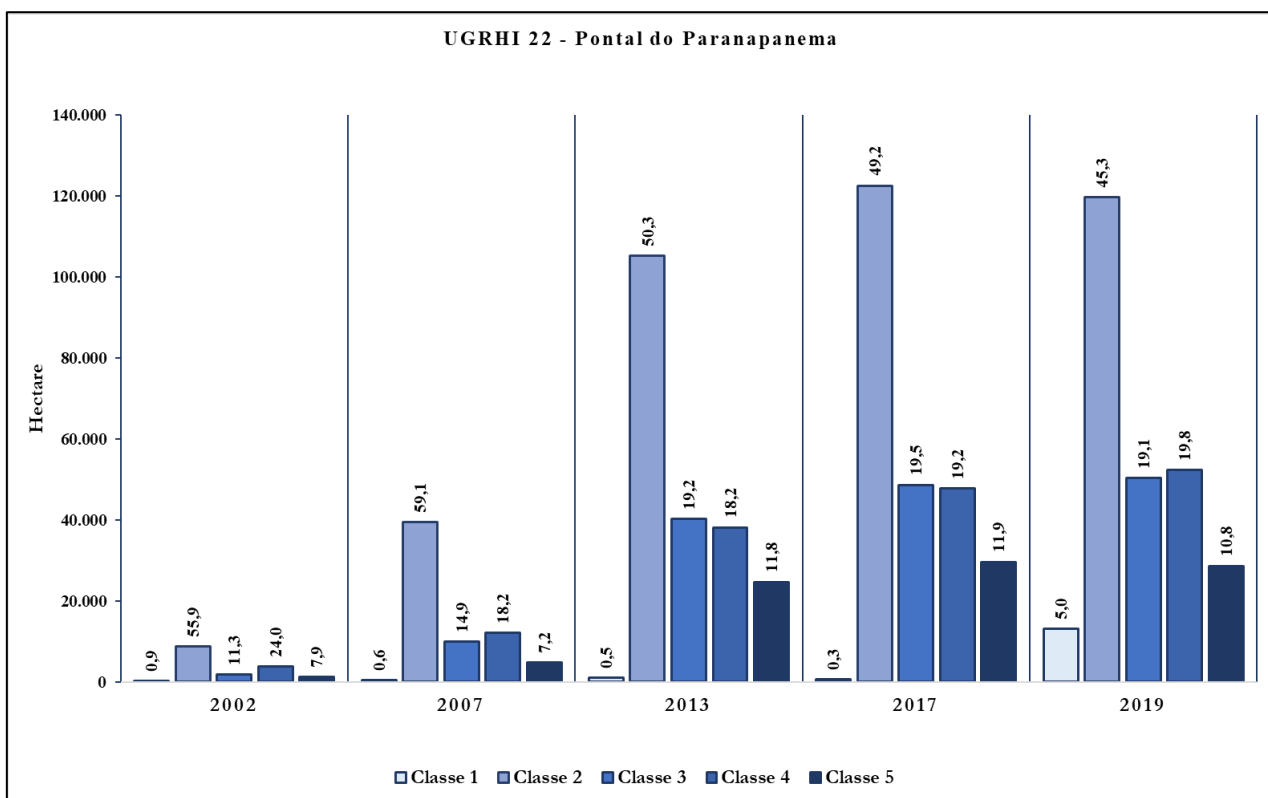
Assim, podemos observar que a evolução da monocultura canavieira na região está diretamente relacionada ao aumento do escoamento superficial na área da Bacia. Em 2002, a área total de cultivo de cana-de-açúcar na UGHRI 22 era de 15.574 hectares, com destaque para a classe 2, representando 56% da área, e um índice de escoamento considerado fraco, apresentando 1.228 mm.

No ano de 2007, os dados apontam um crescimento significativo das áreas de cana-de-açúcar na região da UGHRI 22, de acordo com o mapa 30, com uma extensão de aproximadamente 66,65 hectares. Com uma representatividade de 59,1% para a classe 2 e um índice de escoamento superficial de 1.228 mm, evidencia-se que o relevo regional, aliado à compactação do solo devido ao intenso processo de mecanização na produção, contribui para o escoamento superficial nessas áreas. A classe 4 surge em seguida, representação de 18,2%, com índice de escoamento forte e sua extensão é de 12,23 hectares da área da Bacia.

Em 2013, a cultura de cana-de-açúcar na UGHRI 2 ocupava uma extensão de 209.263 hectares, com ênfase na classe 4, representando 50,3% e com índice de escoamento considerado fraco. Conforme a monocultura canavieira avança na área da Bacia, há um aumento perceptível do escoamento superficial. No mesmo ano, as classes 3 e 4 apresentam 19,2% e 18,2% de escoamento superficial das áreas produtivas de cana-de-açúcar. Para o ano de 2017, a classe 2 mantém sua posição dominante, assim como nos anos anteriores analisados, exibindo um escoamento superior de 49,2%. Esta classe demonstra um índice de escoamento superficial fraco, com uma área de cana-de-açúcar correspondente a 47,76 hectares. Em seguida, as classes 3 e 4 apresentam níveis de escoamento superficial de 19,5% e 19,2%, acompanhados por índices de escoamento

médio e forte de aproximadamente 1.310 mm e 1.522 mm, respectivamente, apresentados no **gráfico 9**.

Gráfico 9: Classes de escoamento superficial na UGHRI 22 nas áreas com cana-de-açúcar

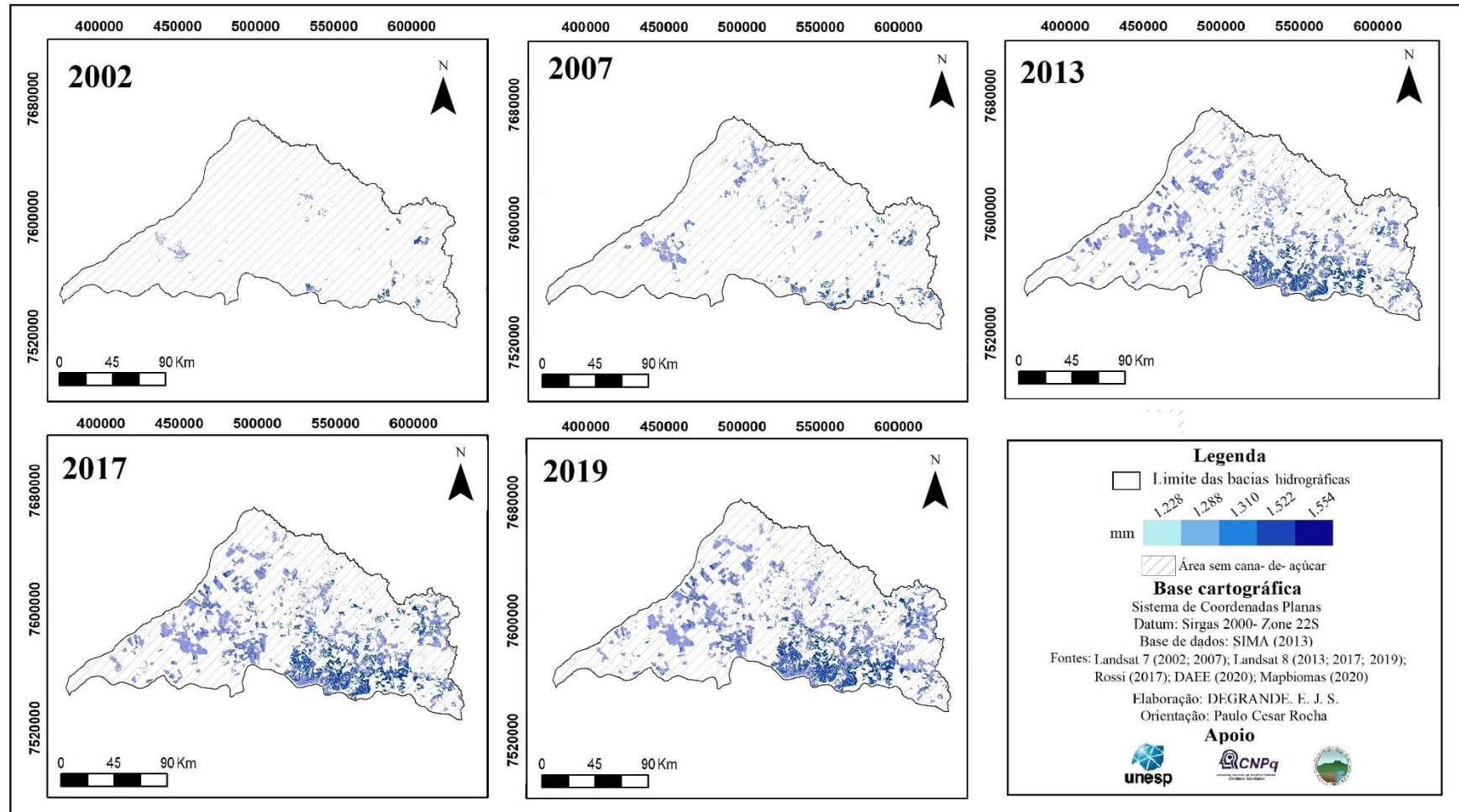


Elaboração: Renata Pereira Prates

Analisando a extensão total do cultivo de cana-de-açúcar no ano de 2019, nota-se um aumento significativo na atividade canavieira, representando 263,92 hectares do total da área da UGHRI 22. Dentro dessa área, a classe 2 detém 50,34 hectares, correspondendo a 45,3% do escoamento superficial fraco, atingindo 1.288 m.

De forma consistente como anos anteriores, verifica-se um crescimento nas áreas das classes 3 e 4 na região da Bacia para o ano de 2019. A classe 4 registra 19,8% da área total, enquanto a classe 3 apresenta 19,1%, um escoamento aproximado de 1.522 mm para a classe 3.

Mapa 30: Estimativa do potencial de escoamento superficial na UGHRI 22 nas áreas com cana-de-açúcar



7 Análise e recomendação de Fertilizantes (NPK) para adubação na cultura da cana-de-açúcar nas UGHRI 20 (rio Aguapei), UGRHI 20 (rio do Peixe) e UGRHI 21 (Pontal do Paranapanema)

A tecnificação da agricultura propiciou melhorias nos processos produtivos por meio do desenvolvimento de técnicas, especialmente a mecanização, a irrigação e a introdução de insumos agrícolas (agroquímicos), promovendo grandes transformações na agricultura. Essas mudanças levaram à modernização agrícola e à expansão de áreas produtivas, sobretudo de monoculturas.

O desenvolvimento da monocultura da cultura da cana-de-açúcar tem sido acompanhado por uma intensificação significativa das atividades humanas sobre os recursos naturais e que podem influenciar e comprometer a disponibilidade desses recursos. Os dados coletados e apresentados referentes à área cultivada com cana-de-açúcar nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGHRIs) para os anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019 revelam um crescimento acentuado da monocultura canavieira ao longo desse período

A utilização de agroquímicos, como fertilizantes na agricultura, resulta no aumento de impactos adversos, sobretudo no meio ambiente e, conseqüentemente, na saúde humana. O uso indiscriminado de fertilizantes pode contribuir significativamente para a poluição e toxicidade dos ecossistemas aquáticos (TUCCI, 2009; TUNDISI e TUNDISI, 2020). Esses processos podem ocorrer diretamente, quando determinado produto químico entra em contato com a água, ou de maneira indireta, quando o elemento químico atinge inicialmente o solo e é então transportado pelas águas da chuva até um corpo hídrico (TUCCI, 2009).

O avanço expressivo do cultivo extensivo da cana-de-açúcar representou uma significativa expansão sobre os recursos naturais, levando à ampliação considerável das áreas dedicadas a essa cultura. Estas áreas, destinadas à produção de cana-de-açúcar, passaram a utilizar intensivamente insumos agrícolas, notadamente os fertilizantes Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), visando atingir metas de produtividade e rendimento que atendessem às exigências do mercado sucroalcooleiro, seja para a produção de açúcar ou etanol.

É amplamente difundida a justificativa dos setores agroindustriais sobre o uso de fertilizantes na produção de alimentos em escala global. No entanto, a crescente dependência e uso indiscriminado desses insumos têm suscitado questões relacionadas à sustentabilidade ambiental, incluindo preocupações sobre possíveis impactos diversos no solo, na água e no ar.

O uso excessivo de fertilizantes nos processos produtivos com a sobrecarga desses elementos químicos, pode provocar a contaminação de lençóis freáticos e corpos hídricos, bem como os efeitos nocivos nos organismos e na biodiversidade dos ecossistemas são algumas das questões associadas a essa prática.

É fundamental salientar que esses canais podem receber uma carga considerável de fertilizantes, resultante da intensa atividade agrícola. A contaminação dos canais fluviais, por sua vez, pode alterar significativamente a qualidade da água, estimulando o crescimento excessivo de plantas aquáticas e algas. Esse crescimento descontrolado reduz a disponibilidade de oxigênio na água e desencadear processos de eutrofização, impactando negativamente o equilíbrio ecossistema aquático.

Dessa forma, a evolução do uso de fertilizantes, especialmente NPK, está diretamente ligada à expansão das áreas destinadas ao cultivo da cana de açúcar. Esse avanço impulsionou o uso estratégico desses insumos visando à melhoria da qualidade do solo, ao aumento da eficiência das plantações e à adequação aos requisitos de produção estabelecidos na área destinada ao cultivo da cana-de-açúcar.

Nesta análise, busca-se uma compreensão da dinâmica do uso de fertilizantes nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí (UGRHI 20), Peixe (UGRHI 21) e Pontal do Paranapanema (UGRHI 22), sobre os dados quantitativos relativos ao emprego de fertilizantes nos sistemas produtivos voltados à cana-de-açúcar. Para alcançar tal propósito, foi adotada uma metodologia específica para estimar o uso desses insumos.

A consideração da variação temporal, considera os anos de referência essenciais para avaliar a evolução e as mudanças no uso de fertilizantes nas práticas agrícolas adotadas na cultura da cana-de-açúcar. Ao analisar o crescimento na aplicação de fertilizantes ao longo desses anos, é possível delinear e compreender os fatores diversos fatores, sejam eles econômicos, tecnológicos, regulatórios ou ambientais.

7.1 Estimativa do Uso de NPK na Cultura da Cana-de-Açúcar na Bacia Hidrográfica do Rio Aguapeí

Os dados apresentados sobre a estimativa de uso de fertilizantes, Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) na Bacia Hidrográfica do rio Aguapei refletem a dinâmica e as mudanças no uso e cobertura da terra. É possível identificar a conversão de áreas de pastagens para o cultivo de cana-de-açúcar, oferecendo aos produtores rurais a possibilidade de obter uma remuneração maior por meio de parcerias ao cederem suas terras para a inserção da monocultura de cana-de-açúcar na região.

Ao analisar os dados de estimativa de NPK com base no mapa de espacialização de recomendação de NPK para a cultura da cana-de-açúcar na Bacia Hidrográfica do rio Aguapei, é possível identificar um crescimento exponencial da exposição da rede de drenagem à ação dos macronutrientes. Esse crescimento é notório especialmente nas regiões do alto e médio curso do rio Aguapei.

No decorrer do ano de 2002, nas sub-bacias do rio Aguapeí, destaca-se a estimativa de 42.979 toneladas por hectare de fertilizantes NPK distribuídos e utilizados, nas cinco classes mapeadas. Neste período, a classe 2 se destacou, representando os maiores valores de uso de fertilizantes, correspondendo a 29,3% da área das sub-bacias. Em seguida, a classe 3 surge com 24,2%, seguida pela classe 5, que alcançou 21,2% de aplicação de fertilizantes NPK na cultura da cana de açúcar na área das sub-bacias.

No ano de 2007, aproximadamente 63,8% das sub-bacias do rio Aguapeí estavam categorizadas na classe 5, representando uma significativa estimativa de uso de NPK, alcançando a marca de 103.542 toneladas por hectare na área das sub-bacias. Em contrapartida, a classe 2 apontou 11,9% da área das sub-bacias na UGRHI 20.

À medida que as áreas dedicadas à cultura da cana-de-açúcar se expandem, há um correspondente aumento na quantidade de fertilizantes utilizados. No ano de 2013, a estimativa apontou o uso de 208.144 toneladas de fertilizantes por hectare nas áreas das sub-bacias do rio Aguapeí, em uma área 416.289 hectares de cana-de-açúcar, conforme tabela 14 e gráfico 10. A distribuição desses fertilizantes se deu em diferentes classes: a classe 5 representou 77,0% da estimativa de NPK, seguida pela classe 4 com 9,2% e pela classe 2 com 6,9%.

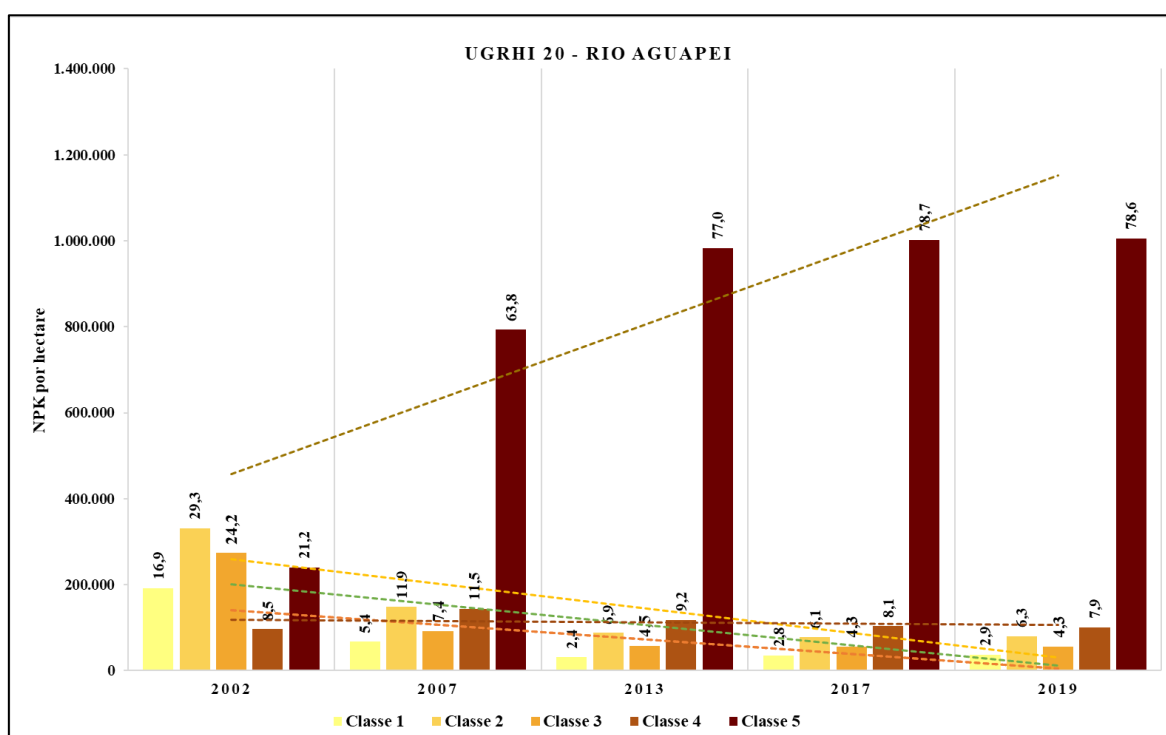
Thomaz Junior (2009) destaca que o ápice da produção de cana-de-açúcar foi registrado em 2006, o que pode explicar a elevada estimativa de fertilizantes utilizados e, por conseguinte, a busca por níveis mais altos de produtividade.

Tabela 14: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 20 - rio Aguapei

Área de cana-de-açúcar/hectares	2002	2007	2013	2017	2019
	85.959	207.085	416.289	460.791	473.574
Uso de NPK (em toneladas)	42.979	103.542	208.144	230.395	236.787

Elaboração: Renata Pereira Prates

Gráfico 10: Classes de uso de Fertilizantes na UGHRI 20 - rio do Aguapei

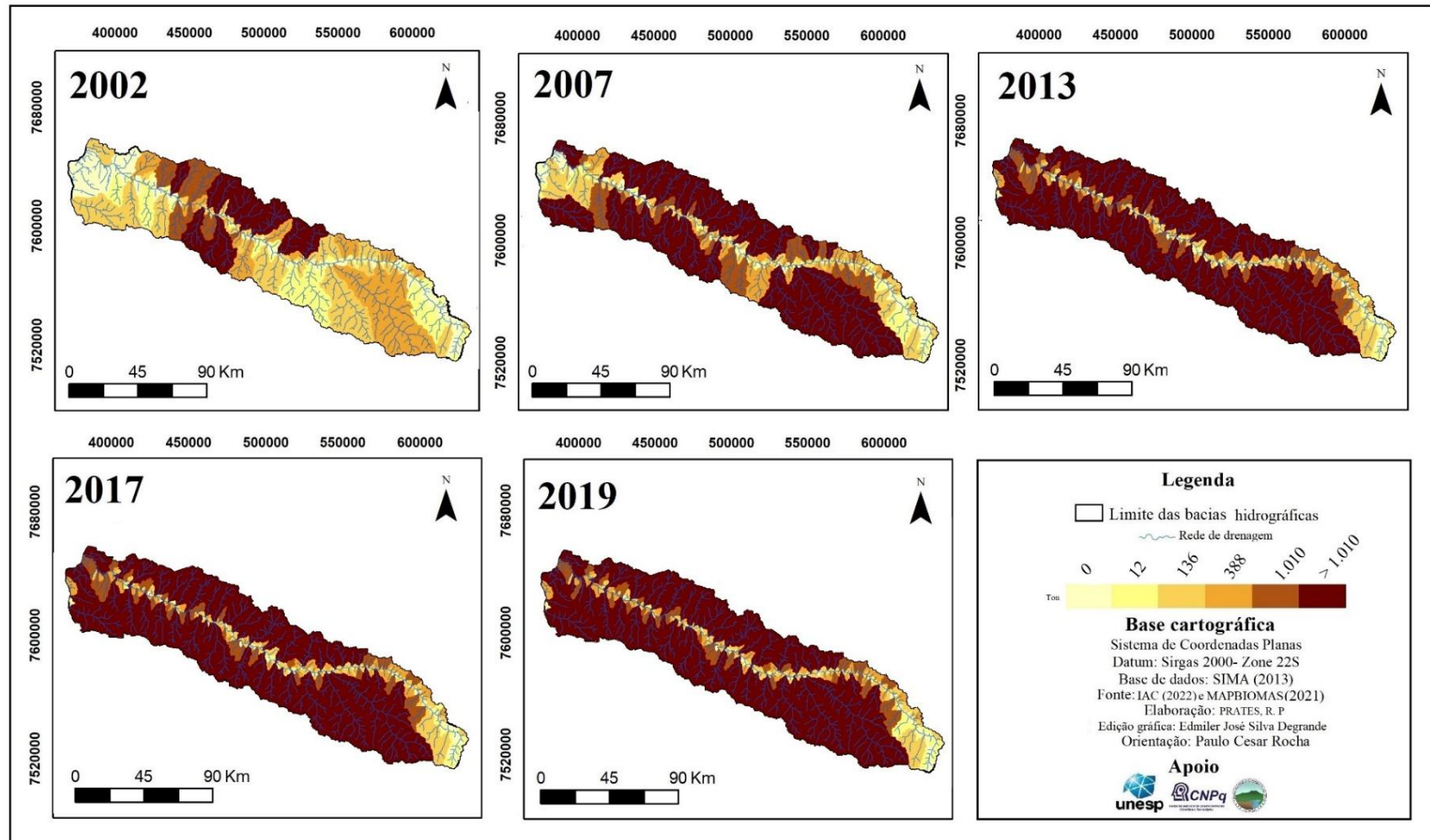


Elaboração: Renata Pereira Prates

No ano de 2017, destaca-se o predomínio da classe 5, representando expressivos 78,7% da estimativa de NPK utilizada na área das sub-bacias, totalizando 230.395 toneladas de fertilizantes por hectares. Neste período, a área dedicada ao cultivo de cana-de-açúcar alcançou 460.791 hectares. A classe 4 surge em seguida, com 8,1%, enquanto as demais classes exibem valores pouco expressivos, sinalizando um uso considerável de fertilizantes na região da UGHRI 20.

O mapa 31 apresentada a espacialização da estimativa de fertilizantes na UGHRI 20, revela um aumento expressivo nos dados analisados ao longo dos anos de estudo, relacionados ao uso de fertilizantes nos processos produtivos do setor canavieiro. Esse crescimento é possivelmente correlacionado com a expectativa de aumento na produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

Mapa 31: Estimativa de uso de fertilizantes nas sub-bacias da UGHRI 20 - rio Aguapeí



7.2 - Estimativa do Uso de NPK na Cultura da Cana-de-Açúcar na UGRHI 21 – Bacia Hidrográfica do Rio Peixe

Na Bacia Hidrográfica do rio do Peixe, os dados analisados sobre a estimativa de uso de fertilizantes, Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), também estão correlacionados com as atividades e mudanças de uso e cobertura da terra, com predomínio das áreas de pastagem na Bacia e um considerável avanço da cultura da cana de açúcar na região.

A espacialização dos dados de recomendação de NPK na Bacia Hidrográfica do rio do Peixe para as áreas de cultivo da cana de açúcar pode ser observada na figura 43. Nota-se que as áreas produtoras de cana-de-açúcar estão concentradas principalmente no médio curso da Bacia, onde é possível identificar um crescimento exponencial do uso de Fertilizantes no cultivo da cana-de-açúcar.

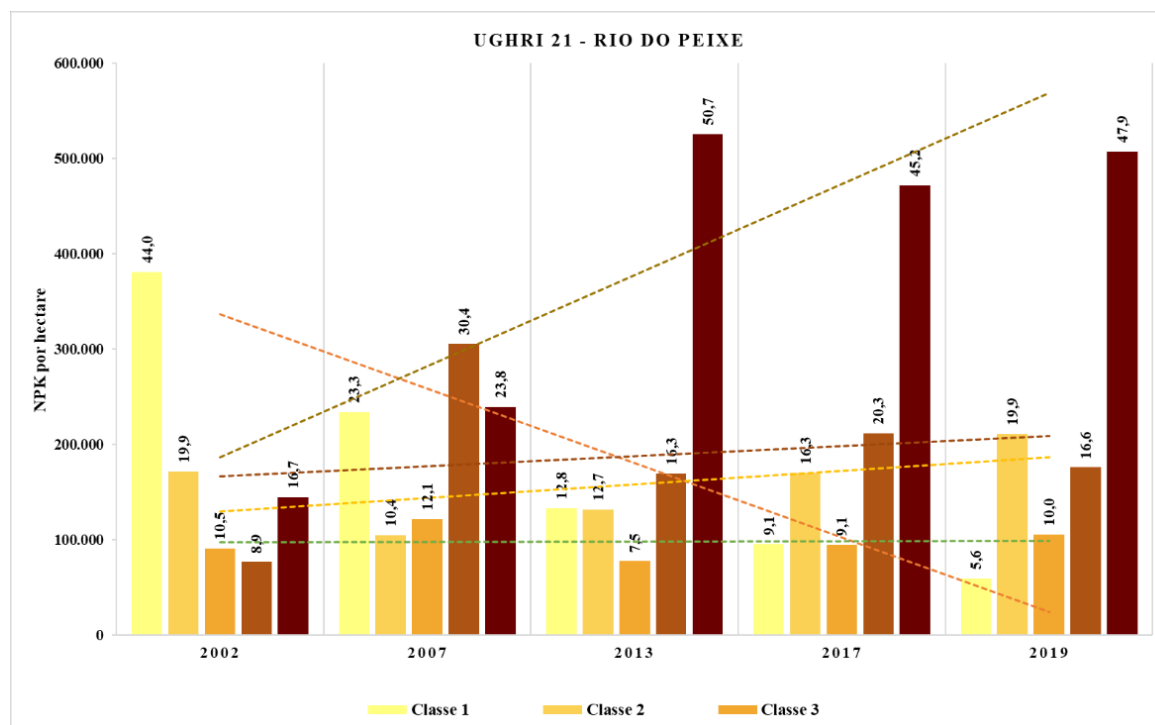
Sobre a estimativa de fertilizantes (NPK) totalizados e distribuídos nas sub-bacias do rio do Peixe, registrou-se um total de 18.275 toneladas por hectare no ano de 2002. A classe 1 apresentava como a principal contribuinte, representando 44,0% da estimativa de fertilizantes nas áreas das sub-bacias. A classe 2, por sua vez, compreendia uma parcela significativa, alcançando 19,9%. Além disso, a classe 5 apresentava 16,7% do total distribuído na área das sub-bacias da UGRHI 21.

No ano de 2007, foi registrado um aumento na estimativa total de fertilizantes distribuídos nas sub-bacias do rio do Peixe, atingindo a marca de 46.435 toneladas por hectare. Esse aumento correspondeu com a expansão das áreas dedicadas ao cultivo de cana-de-açúcar, as quais ocupavam uma extensão de 92.870 hectares. A distribuição desses fertilizantes entre as classes revelou que a classe 4 representava 30,4% do total, seguida pela classe 5 com 23,8%, e pela classe 1, que alcançava 23,3% do volume total de fertilizantes utilizados nessas áreas.

Em 2013 a estimativa de uso de fertilizantes por hectare atingiu 98.864 toneladas na área das sub-bacias do rio do Peixe, correspondendo a uma extensão de 197.729 hectares destinados ao cultivo de cana-de-açúcar. A distribuição desses fertilizantes por classe mostrou que a classe 5 representava 50,7% do total de fertilizantes NPK distribuídos nas sub-bacias, seguida pela classe 4 com 16,3%. Os dados fornecidos evidenciam um crescimento significativo das áreas cultivadas de cana-de-açúcar na região da Bacia Hidrográfica, como é possível observar na tabela 15 e no gráfico 11.

Tabela 15: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 21 - rio do Peixe

Área de cana-de-açúcar/hectares	2002	2007	2013	2017	2019
	36.550	92.870	197.729	211.408	218.370
Uso de NPK (em toneladas)	18.275	46.435	98.864	105.704	109.185

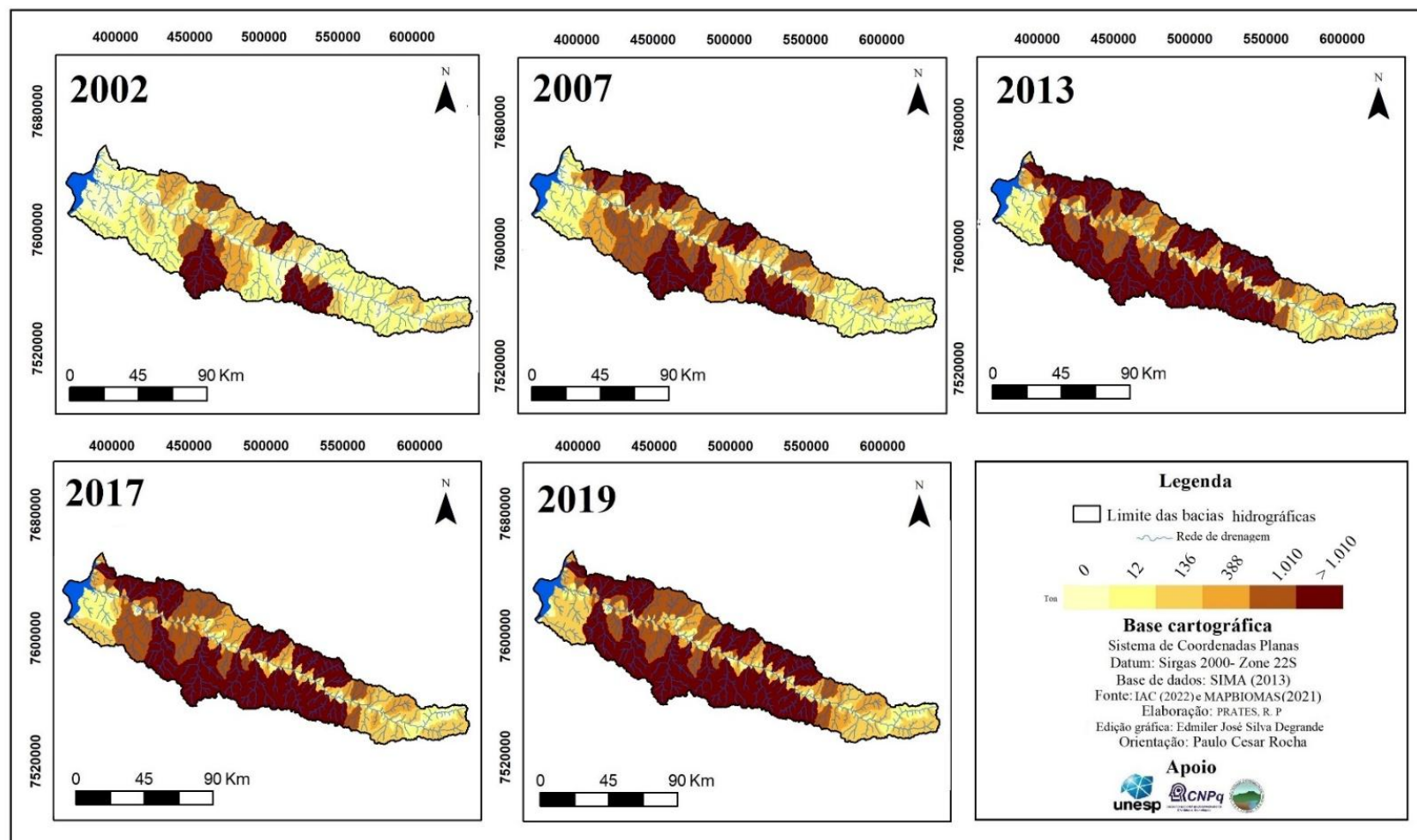
Elaboração: Renata Pereira Prates**Gráfico 11:** Classes de uso de Fertilizantes na UGRHI 21 - do rio do Peixe**Elaboração:** Renata Pereira Prates

A análise dos dados de estimativa de fertilizantes para o ano de 2017 destaca o domínio da classe 5, que representava 45,2% nas sub-bacias do rio do Peixe, seguida pela classe 4 com 20,3%, e pela classe 2, com 16,3%. Nesse mesmo ano, as áreas dedicadas ao cultivo de cana-de-açúcar abrangeram 211.408 hectares, com um total de 105.704 toneladas de fertilizantes utilizados nas áreas das sub-bacias. Esses números demonstram uma distribuição considerável dos fertilizantes por classe, com uma forte presença da classe 5, indicando uma intensidade do uso de fertilizantes áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar nas sub-bacias do rio do Peixe no ano de 2017, observados no mapa 32.

No ano de 2019, a análise dos dados sobre a estimativa de fertilizantes de NPK nas sub-bacias do rio do Peixe aponta para a predominância da classe 5, com 47,9%, mantendo um padrão similar aos anos de 2007, 2013 e 2017. Além disso, a classe 2

representou 19,9% da estimativa de NPK na área das sub-bacias, seguida pela classe 4, com 16,6%. Em 2019, essas áreas alcançaram 218.370 hectares, com uma estimativa de utilização de 109.185 toneladas de fertilizantes por hectare.

Mapa 32- Estimativa de uso de fertilizantes nas sub-bacias da UGHRI 21 – rio do Peixe



7.3 - Estimativa do uso de NPK na cultura da cana- de- açúcar na UGRHI 22 – Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema

Os dados sobre a estimativa totalizada e distribuída de fertilizantes Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) na Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema indicam um notável crescimento nas áreas produtivas de cana de açúcar na região. Essa tendência também é observada no Oeste do Estado de São Paulo ao longo dos anos pesquisados, compreendendo os anos de 2002, 2007, 2013, 2017 e 2019.

A cultura da cana de açúcar é amplamente cultivada no Oeste Paulista, reconhecido como a maior região produtora de cana de açúcar do Estado de São Paulo e do país. No entanto, a monocultura da cana de açúcar enfrenta vários desafios ambientais, sociais e uma demanda significativa por grandes quantidades de insumos químicos, como fertilizantes e agrotóxicos no processo produtivo.

Observa-se um crescimento considerável do cultivo de cana de açúcar na Bacia Hidrográfica do Pontal ao longo dos anos estudados, resultando consequentemente no aumento da utilização de fertilizantes na produção canavieira.

No ano de 2002, em relação à estimativa de fertilizantes NPK distribuídos e totalizados, foram identificadas 7.786,9 toneladas por hectare de NPK na área das sub-bacias do Pontal do Paranapanema, com uma área de cultivo de cana-de-açúcar de 15.574 hectares. Cerca de 36,1% desses insumos estavam concentrados na classe 4, seguidos pelas classes 3 e 1, com 33,3% e 17,4%, respectivamente, em relação à estimativa de NPK para a área das sub-bacias.

No ano de 2007, destaca-se um percentual expressivo das sub-bacias do Pontal do Paranapanema na classe 5, que apresentou 60,9% do total de fertilizantes, alcançando um volume de 33.486 toneladas. Isso representa uma área de 66.973 hectares dentro das sub-bacias, indicando uma expansão considerável da monocultura canavieira na região.

A análise da espacialização dos dados de estimativa de fertilizantes NPK nas sub-bacias do Pontal do Paranapanema em 2013 revela um crescimento expressivo das áreas de cultivo de cana-de-açúcar na região UGRHI 22, tal como ocorrido em 2007. Essas áreas continuam em expansão, indicando um aumento na utilização de fertilizantes. Em 2013, aproximadamente 71,0% das sub-bacias estavam concentradas na classe 5, representando um volume significativo de 125.046 toneladas de fertilizantes por hectare

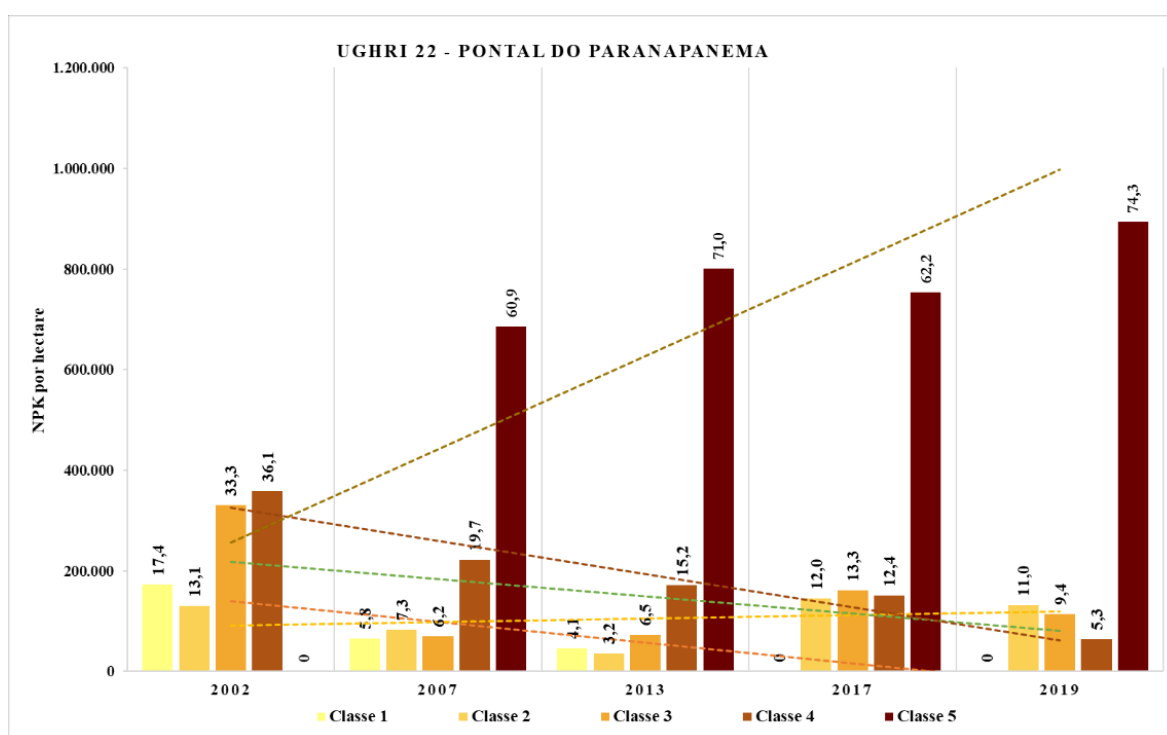
de cana de açúcar, considerando uma área de cultivo de 210.200 hectares, como observa-se na tabela 13 e gráfico 12.

Tabela 16: Estimativa de Fertilizantes - NPK – UGHRI 22 - Pontal do Paranapanema

Área de cana-de-açúcar/hectares	2002	2007	2013	2017	2019
	15.574	66.973	210.200	250.093	265.034
Uso de NPK (em toneladas)	7.786	33.486	105.100	125.046	132.517

Elaboração: Renata Pereira Prates

Gráfico 12: Classes de uso de fertilizantes na UGRHI 22 - Pontal do Paranapanema



Elaboração: Renata Pereira Prates

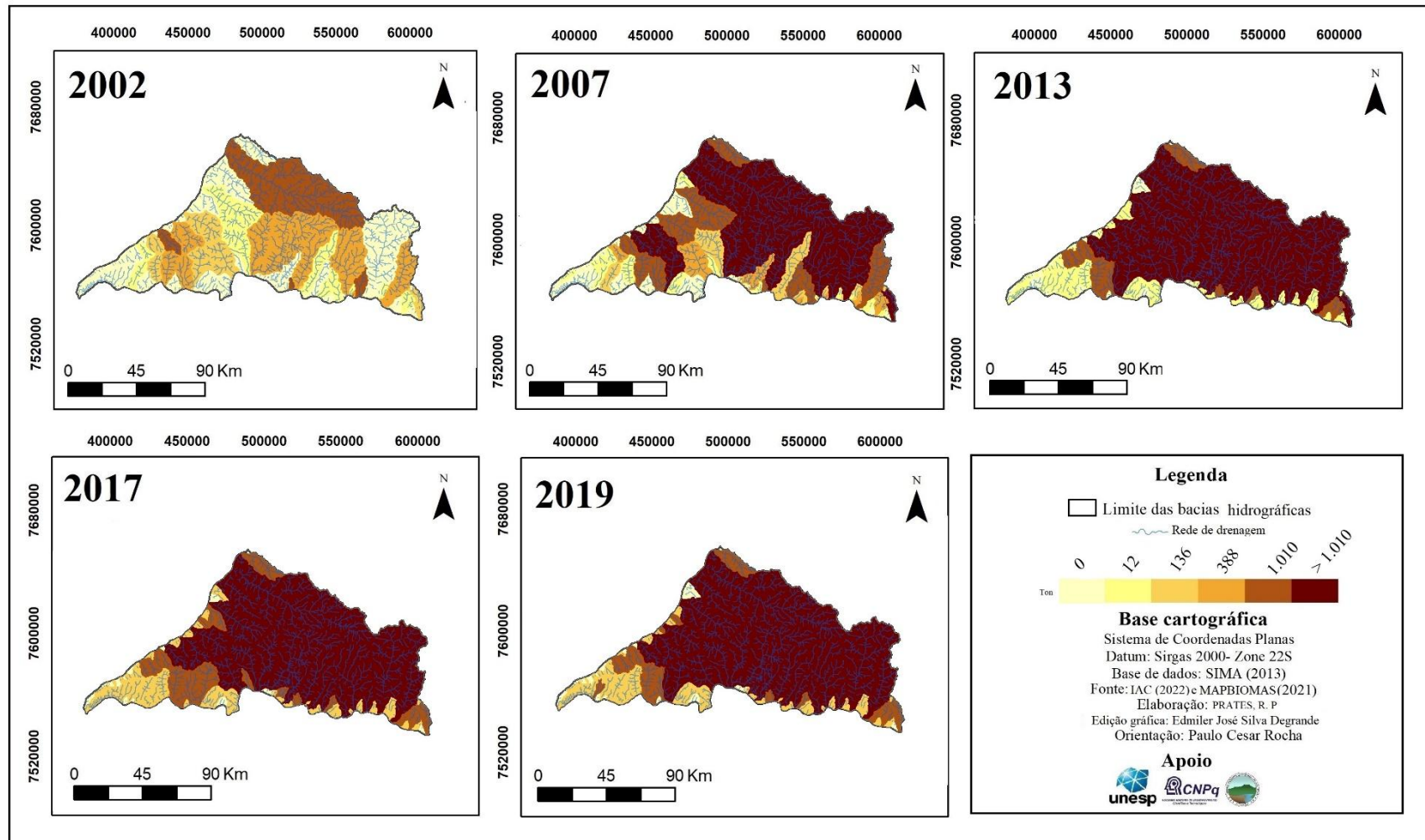
No ano de 2017, os dados de estimativa de fertilizantes NPK totalizados nas subbacias do Pontal revelam uma expressiva presença na classe 5, representando 62,2%. Isso corresponde a 125.046 toneladas de fertilizantes por hectare nas áreas produtivas de cana de açúcar, com extensão de 250.093 hectares, também apresentados no mapa 33.

No ano de 2019, os dados de fertilizantes especializados na área das sub-bacias do Pontal do Paranapanema mostram um aumento significativo no uso desses insumos. A classe 5 se destaca, representando 74,3% do total, o que totaliza 132.517 toneladas de

fertilizantes por hectare nas sub-bacias. Esses insumos foram aplicados em uma área de cultivo de cana-de-açúcar que abrangeu 265.034 hectares dentro das sub-bacias.

Os dados apresentados sobre a utilização de fertilizantes na Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema indicam uma associação direta entre o aumento das áreas de cultivo de cana-de-açúcar e um uso expressivo de fertilizantes. O uso inadequado e indiscriminado de fertilizantes, seja minerais ou orgânicos, pode resultar no aumento de nutrientes na água, comprometendo assim a qualidade hídrica (EMBRAPA (2002)).

Mapa 33: Uso de fertilizantes nas sub-bacias hidrográficas do Pontal Paranapanema



8 - Estimativa do Aporte de Fertilizantes (NPK) na Cultura da Cana-de-Açúcar em UGRHIs dos rios Aguapeí, Peixe e Pontal do Paranapanema: conectividade e análise

Para analisar as interações e complexidades relacionadas à estimativa do aporte de fertilizantes (NPK) na monocultura da cana-de-açúcar nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 20, 21 e 22 - compreendendo as Bacias Hidrográficas dos rios Aguapeí, do Peixe e do Pontal do Paranapanema é fundamental salientar os desafios associados aos sistemas do cultivo intensivo canavieira.

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil, especialmente na área de pesquisa em questão, demanda volumes consideráveis de fertilizantes. Esses insumos são direcionados para proporcionar melhorias na produtividade e aumentar a disponibilidade dos produtos derivados da cana-de-açúcar. Contudo, essa busca incessante por produtividade, associada à extensas áreas da monocultura canavieira, desperta preocupações quanto ao potencial risco de contaminação ambiental, especialmente dos canais fluviais.

O uso de fertilizantes passa a revolucionar o processo produtivo agropecuário e fortalece o agronegócio, que podemos chamar conforme Santos (2000, p.43) de uma agricultura científica globalizada, que por meio do aprofundamento das técnicas e de sua difusão, atribui ao homem a capacidade de alterar aspectos naturais, sem preocupar com os resultados desses impactos e que é responsável por profundas mudanças quanto a produção agrícola, a partir da introdução da “ciência, técnica e informação, levando ao aumento exponencial das quantidades produzidas em relação às superfícies plantadas”

Com base nas reflexões apresentadas por Santos e Glass (2018) acerca do agronegócio global e brasileiro, é necessário mencionar que a agricultura moderna, altamente tecnificada e frequentemente denominada pelo agronegócio, constitui um amplo mercado de *commodities*. Este setor é reconhecido como um símbolo significativo do avanço tecnológico, operando com um domínio abrangente de diversas tecnologias, inclusive as mais avançadas no cenário do desenvolvimento, a agricultura de precisão/digital.

A agricultura contemporânea se baseia na aplicação estratégica de insumos, como fertilizantes e corretivos, para superar as limitações químicas do solo e suprir as demandas nutricionais das culturas. No Brasil, o uso de adubação e que são chamados de “nutrientes” essenciais para as principais plantações é predominantemente realizado por

meio da adubação mineral e orgânica. Ambas são fundamentais para o êxito das atividades agrícolas, garantindo a produtividade desejada.

No contexto da agricultura contemporânea e dos processos de tecnificação que acontecem a expansão da cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo, que representa um capítulo fundamental na história agrícola e econômica da região. Ao longo das décadas a expansão canavieira moldou significativamente a paisagem e a dinâmica socioeconômica do estado. São Paulo se destaca como o principal produtor de cana-de-açúcar, liderando a produção nacional do agronegócio canavieiro. Essa expansão foi impulsionada por diversos fatores, incluindo a demanda crescente por biocombustíveis, especialmente com o advento da produção em larga escala de etanol para abastecer o mercado de combustíveis automotivos brasileiro (carro *flex-fuel* - gasolina e álcool).

A expansão expressiva da cultura da cana-de-açúcar no estado São Paulo quanto em outros estados, é um fenômeno em constante evolução. Conforme apontado por Moreira (2010), a expansão canavieira resultou em mudanças consideráveis na distribuição geográfica do setor canavieiro, principalmente para o Oeste Paulista. Essa transformação tem conferido crescente importância aos estados da região Centro-Sul na produção de cana-de-açúcar e seus subprodutos.

Os dados provenientes da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) a partir de 2013 delineiam um panorama notável e ao mesmo tempo preocupante no contexto do agronegócio canavieiro no estado de São Paulo. Nesse ano, a área reservada para a cultura da cana-de-açúcar atingiu a marca de 4.552.040 hectares, não somente evidenciando o crescimento de novas unidades produtivas, mas também a consolidação das áreas já estabelecidas. Em paralelo, a safra de cana-de-açúcar em São Paulo apresentou um expressivo aumento de 57,19%, totalizando a colheita de 602,27 milhões de toneladas na região centro-sul do Brasil. Este cenário implica uma série de considerações acerca dos impactos ambientais associados a essa expansão e intensificação do setor canavieiro.

Ao longo dos anos subsequentes, os números continuaram a evidenciar a importância do estado na produção canavieira. Em 2017, São Paulo colheu aproximadamente 4.509,2 mil hectares, representando cerca de 54% da cana-de-açúcar. Esse índice destacou a relevância do estado na produção sucroalcooleira nacional.

No ano de 2019, o estado de São Paulo manteve sua posição proeminente, sendo responsável por aproximadamente 50,6% da área colhida na safra de cana-de-açúcar. Dados provenientes da Conab (2023) evidenciam um avanço substancial na adoção da colheita mecanizada ao longo dos anos. Esse avanço passou de 33% na safra 2007/2008

para 62,7% na safra 2010/11 e atingiu 99,2% na safra mais recente. A crescente implementação da colheita mecanizada é resultado direto do avanço tecnológico no âmbito agrícola, trazendo consigo algumas implicações.

A região sudeste representa 75% da produção nacional de açúcar, com destaque para o estado de São Paulo, com previsão de safra 2023/2024 de 29,9 milhões de toneladas. Já a região Centro-Sul concentra 93% da produção etanol, com grande destaque para quantidade produzida em São Paulo, que representa 36,5% do volume nacional esperado para as safras 2023/2024 (Conab, 2023).

Diante desse cenário, destaca-se a estreita relação entre as práticas agrícolas e a expansão da monocultura da cana-de-açúcar, especialmente no que se refere ao uso de fertilizantes. A busca por um aumento na produção de açúcar e etanol, impulsionada pelo amplo mercado consumidor em grande escala, contribuiu para a expansão das áreas destinadas ao cultivo da cana, o que frequentemente exige o uso intensivo de fertilizantes para otimizar produtividade e rendimento das plantações.

A análise das interações entre a estimativa de fertilizantes e a dinâmica do escoamento superficial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos não apenas identifica os potenciais riscos ambientais de contaminação associados ao aporte desses insumos, mas também fomenta a necessidade de monitoramento contínuo e estratégias de mitigação ajudam a reduzir impactos ambientais do aporte excessivo de fertilizantes em canais fluviais.

A estimativa do aporte de fertilizantes NPK nos canais fluviais é um processo complexo que envolve a análise de múltiplos fatores. A quantidade de fertilizantes que chega aos canais pode alterar de forma significativa devido a diversos aspectos, como as práticas agrícolas adotadas, as condições climáticas, as características do solo, como a permeabilidade e retenção, o relevo regional, bem como os métodos de aplicação de fertilizantes.

Geralmente, a água da chuva ou a irrigação podem transportar parte dos fertilizantes aplicados durante os ciclos produtivos da cultura canavieira para os canais fluviais. O nitrogênio, fósforo e potássio podem ser carregados pela água superficialmente ou infiltrar-se no solo por lixiviação e, posteriormente, atingir os lençóis freáticos, seguindo para os rios e córregos. Observa-se que, mesmo em solos compactos, o escoamento superficial ocorre de forma rápida, reduzindo a probabilidade de interação do fertilizante com a planta no solo. Esse processo acelerado limita a absorção e a utilização do fertilizante pelo sistema radicular das plantas, afetando diretamente a

eficiência do fertilizante aplicado e consequentemente contribuindo para a contaminação dos corpos hídricos.

De acordo com a Embrapa (2018) o conceito sobre compactação do solo é atribuído à circulação de máquinas e animais sobre a superfície terrestre. Essa ação, de natureza mecânica, aplica uma pressão sobre o solo, promovendo a aproximação das partículas e na diminuição da porosidade do solo. Dessa forma, considerando os solos arenosos, a perda de fertilizantes pode ocorrer por lixiviação, um processo no qual a água e os insumos presentes no solo, provenientes da adubação, se movem de forma vertical a partir da percolação no solo.

Os fertilizantes frequentemente utilizados na cultura da cana-de-açúcar, nitrogênio e fósforo, o nitrogênio é o elemento mais preocupante. Devido à sua alta solubilidade e baixa retenção no solo, há riscos significativos de contaminação de fontes hídricas superficiais ou subterrâneas, dependendo da direção do fluxo da solução do solo.

Na prática agrícola, a poluição da água por nutrientes ocorre quando os fertilizantes são aplicados em quantidade superior à capacidade de retenção do solo ou quando são removidos do perfil do solo antes que as plantas possam absorvê-los. Assim, fertilizantes como nitrogênio e fósforo, presentes em fertilizantes químicos e orgânicos, como em excrementos animais, são frequentemente detectados na água na forma de nitrato, amônia ou fosfato, constituindo os principais agentes com potencial de contaminação hídrica (FAO, 2017).

Estudos mostram que o potássio é o fertilizante mais absorvido pela cana-de-açúcar durante seu ciclo de crescimento. No entanto, a perda por lixiviação da forma solúvel é alta (OTTO et al., 2010).

As mudanças no padrão de conectividade na bacia podem provocar efeitos significativos nos processos de erosão, sedimentação e transporte de sedimentos, resultando em impactos diretos nos canais fluviais. Essas alterações podem desencadear a eutrofização acelerada devido ao aumento na disponibilidade de nutrientes, comprometendo assim a qualidade dos recursos hídricos (FREEMAN et al., 2007). Além disso, tais mudanças na conectividade também têm o potencial de afetar a fertilidade do solo, uma vez que podem promover a perda intensificada de solo. Essa interligação complexa entre os processos de conectividade hidrológica e os impactos no solo e na água destaca a importância de monitorar e compreender as alterações na bacia, visando preservar a saúde dos ecossistemas e dos recursos naturais associados.

É pertinente mencionar a pesquisa realizada por Vanacker et al. (2005), que observou discretas mudanças no uso do solo, mas com notáveis variações na distribuição espacial desses usos dentro da bacia hidrográfica. Embora a vegetação natural e a regeneração de encostas e áreas descobertas por processos erosivos tenham representado uma parcela limitada da mudança total no uso da terra para a pesquisa, essas alterações no uso e cobertura tiveram impactos significativos na conectividade hidrológica e sedimentar da paisagem.

Pesquisas realizadas por Harvey (1991, 2001), Hooke (2003) e Vanacker et al. (2003b) demonstraram que a produção, transporte e deposição de sedimentos nos canais dos rios a jusante não estão unicamente relacionados à fisiografia geral da bacia hidrográfica, mas também à organização espacial e à conectividade interna de diversas unidades fisiográficas.

As vias de conectividade hidrológica referem-se aos caminhos e interligações através dos quais a água e os sedimentos fluem em uma bacia hidrográfica. Estas vias constituem uma rede complexa de canais, riachos, rios e cursos d'água que interagem dinamicamente, transportando água e materiais ao longo do ambiente fluvial. A conectividade hidrológica é essencial para compreender a interação entre diferentes partes de uma bacia, influenciando diretamente processos como a erosão, sedimentação, distribuição de nutrientes e a qualidade da água. Ela é influenciada por fatores geográficos, topográficos, climáticos e intervenções humanas, moldando os fluxos de água e sedimentação em um sistema interdependente que desempenha um papel vital na dinâmica dos ecossistemas aquáticos e terrestres. A compreensão detalhada dessas vias é fundamental para o planejamento e gestão adequados dos recursos hídricos e para a preservação dos ecossistemas aquáticos.

8.1 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana-de-açúcar na (UGRHI 20) - Bacia Hidrográfica do rio Aguapei

Com base nos dados apresentados no mapa síntese, percebe-se que as áreas das sub-bacias da UGRHI 20 demonstram diferentes níveis de estimativa e risco de contaminação pelo aporte de fertilizantes ao longo dos anos estudados, relacionados à cultura da cana-de-açúcar. Essas áreas alteram de categorias que vão desde Fraca até Muito Forte. As sub-bacias com escoamento superficial classificado como classe 1 e

estimativa de fertilizantes NPK na classe 5 apresentaram um nível Médio de aporte e risco de contaminação, classificados como classe 3.

Ao analisar as informações, nota-se uma tendência marcante nas classes de avaliação, predominando as categorias Forte, Média e Fraca. Em 2002, na UGHRI 20, registrou-se uma área com cultivo de cana-de-açúcar correspondente a 6,6%. Houve uma estimativa de fertilizante na classe 2, totalizando 29,3% e um escoamento superficial forte de 1.522 mm em áreas destacadas para a cultura. Essa convergência de informações sugere uma aplicação considerável de fertilizantes nesse período, evidenciando a relevância e o impacto desses insumos nessas áreas específicas.

Ao avaliar os dados de 2007 relativos ao aporte de fertilizantes e ao risco de contaminação, destaca-se um aumento notável nas classes Muito Forte e Forte em comparação com os registros de 2002. No ano de 2007, as áreas destinadas ao cultivo da cana-de-açúcar representavam 15,9% da região em análise, e o escoamento superficial para essas áreas foi classificado como forte, atingindo 51%.

Já em 2013, a classe Forte alcançou 39,4%, seguida pelas classes "Média" e Muito Forte. Mesmo com um aumento significativo das áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar, que chegaram a 32%, a estimativa de aporte de fertilizantes não sofreu alteração significativa em comparação ao ano de 2007, conforme podemos observar na tabela 17.

Tabela 17: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 20

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
Muito fraca	3,4	5,7	1,4	0,4	0,3
Fraca	21,8	7,8	7,8	4,7	4,1
Média	24,5	29,7	29,0	28,7	29,1
Forte	44,7	34,0	39,4	17,3	15,9
Muito forte	5,6	22,8	22,5	48,9	50,6
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

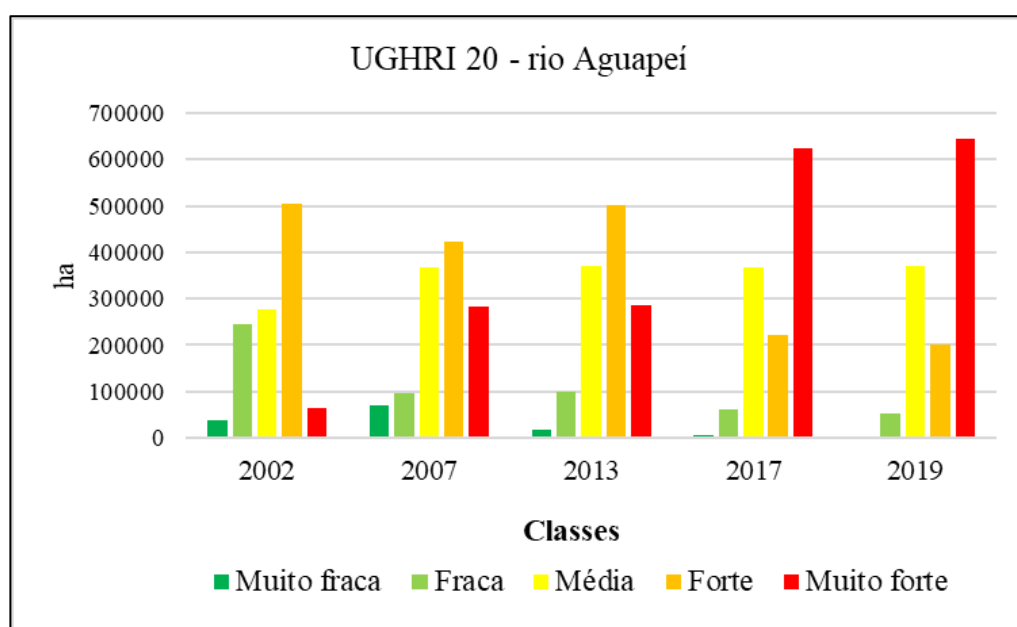
Elaboração: Renata Pereira Prates

As sub-bacias localizadas na porção sul da UGHRI 20 apresentaram uma concentração mais elevada na estimativa de aporte de fertilizantes. Essa característica sugere que nessa área específica há um maior escoamento superficial, onde os padrões de dissecação do relevo se apresentam com topos convexos e topos tabulares, de acordo com

os índices de dissecação (ROSS, 1992). Essa configuração topográfica mais acentuada contribui para um maior risco de contaminação, que possivelmente apresenta uma conectividade hidrológica superficial significativa para a escala da Bacia. A presença de topos convexos e vales com forte entalhamento gerar uma condição favorável para o escoamento mais rápido da água da chuva ou da irrigação, que aumenta o potencial de aporte e risco de contaminação dos fertilizantes nos canais fluviais.

Nos anos de 2017 e 2019, as áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar representaram 34,4% e 38,1%, respectivamente. Esses períodos foram caracterizados por um escoamento superficial considerado forte e com estimativa de aporte de fertilizantes e potencial risco de contaminação dos canais fluviais da UGRHI 20, concentrando-se principalmente nas classes Muito Forte, Forte e Médio, observadas no **gráfico 13**.

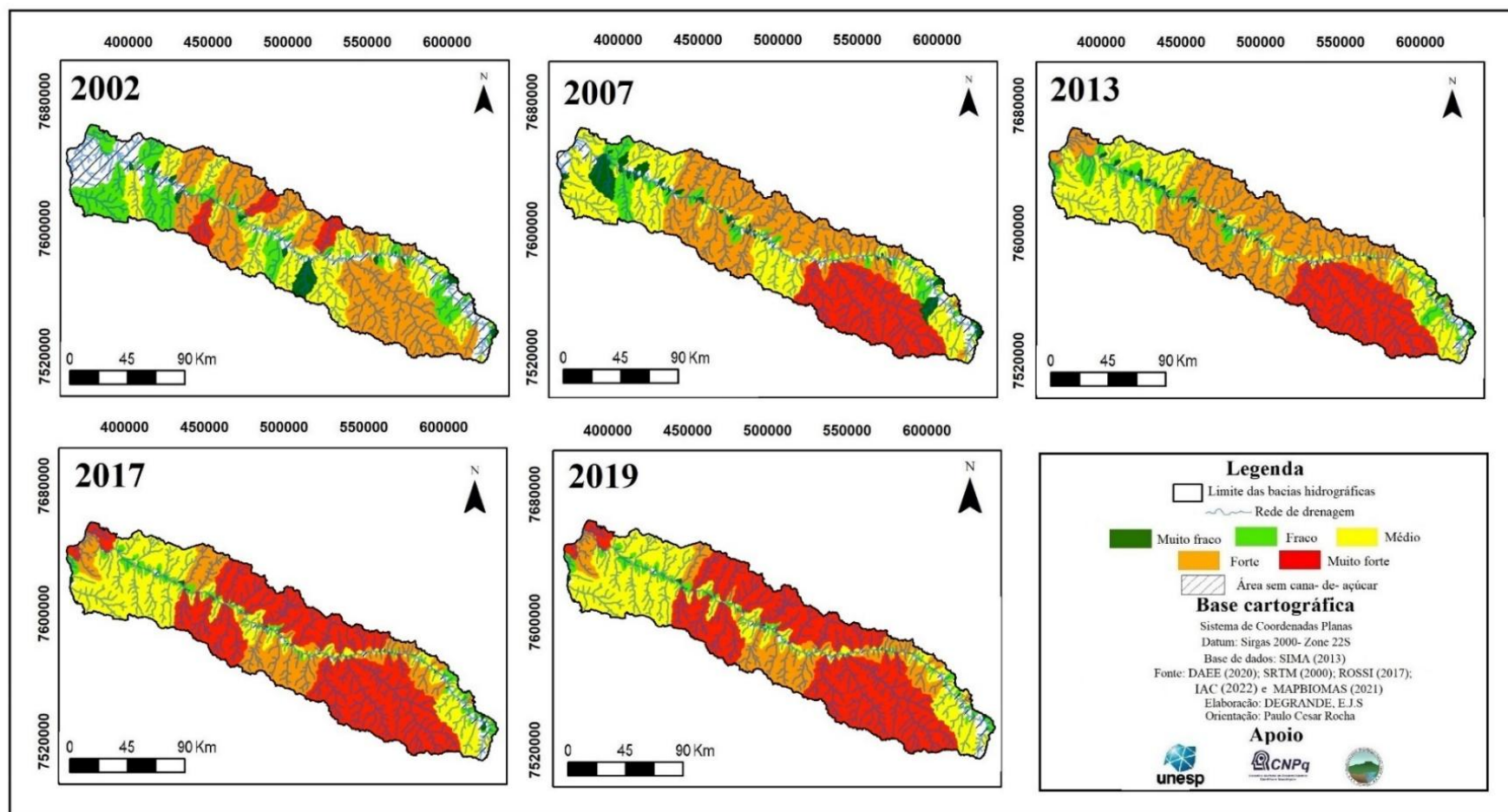
Gráfico 13: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGRHI 20



Elaboração: Renata Pereira Prates

Os dados apresentados para os anos de 2017 e 2019, indicam uma exposição da rede de drenagem ao aporte de fertilizantes e risco de contaminação dos canais fluviais. Observa-se um escoamento superficial e estimativa de fertilizantes, que ocorrem da vertente até o canal fluvial foram das áreas concentradas a montante e no médio curso da UGHRI 20, observado no mapa 34.

Mapa 34: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 20 – rio Aguapei



8.2 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana-de-açúcar na (UGRHI 21) - Bacia Hidrográfica do rio do Peixe

A análise dos dados da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 21, representados no mapa síntese, revela a presença de diferentes classes de estimativa e risco de contaminação por fertilizantes NPK nas áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar. Quanto maior as áreas com cultivo concentrado da monocultura canavieira, maior a probabilidade de os fertilizantes serem transportados por escoamento superficial para os canais fluviais. As classes apresentadas para os anos de análise são de Média, Forte e Muito Forte, indicando estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizante significativo.

No ano de 2002, a UGRHI 21 registrou uma área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar correspondente a 3,5% do total. Nessa área, a estimativa de fertilizantes foi classificada como classe 1, e o escoamento superficial atingiu 46,7%, sendo classificado como forte. Esses números combinados representam o cenário delineado no mapa síntese. As análises de estimativa e risco de contaminação por fertilizantes destacam as classes Média, Forte e Muito Forte, como mais expressivas na UGRHI. Identificam-se sub-bacias com risco de contaminação dos canais no médio curso, do escoamento da vertente em direção ao rio.

Em 2007 análise de dados apresentou um crescimento de 8,5% nas áreas dedicadas ao cultivo de cana-de-açúcar. Esse aumento foi acompanhado por uma mudança substancial na classificação de estimativa e risco de contaminação, onde a classe Forte tornou-se mais predominante, o que compreende 43,1% das sub-bacias que recebem aporte de fertilizantes do tipo NPK. Isso indica que uma parcela significativa dessas áreas apresentava um potencial considerável de contaminação dos canais fluviais, atribuído ao uso desses fertilizantes no cultivo da cana-de-açúcar.

Em 2013, a classe Forte atingiu 55%, seguida pelas classes Média e Muito Forte, evidenciando um crescimento expressivo no cultivo de cana-de-açúcar, demonstrando um aumento considerável em comparação com os anos anteriores. No mesmo período, o escoamento superficial nas áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar apresentou uma classificação Forte, alcançando 52,8% (**tabela 18**)

Durante os anos de 2017 e 2019, foi observada um predomínio de classes classificadas como Forte e Muito Forte em relação à estimativa e risco de contaminação

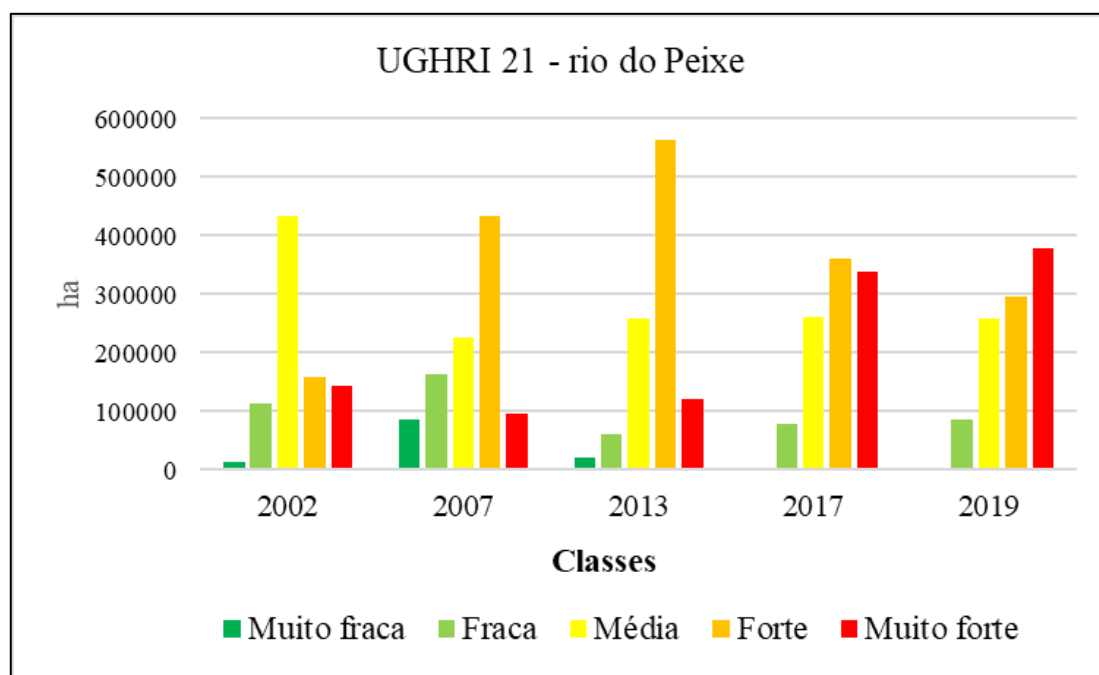
devido ao aporte de fertilizantes. Esses períodos foram identificados por condições em que o potencial de contaminação dos canais fluviais pode ser considerado significativo, na UGHRI 21 do rio do Peixe.

Tabela 18: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
Muito fraca	1,4	8,5	2,1	0,4	0,2
Fraca	13,1	16,4	5,8	7,6	8,5
Média	50,2	22,4	25,2	25,0	25,4
Forte	18,5	43,1	55,0	34,6	28,9
Muito forte	16,7	9,6	11,8	32,4	37,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Elaboração: Renata Pereira Prates

Em 2017, especificamente, houve uma representação expressiva das áreas de cultivo de cana-de-açúcar relação ao escoamento superficial, atingido 48,2% na classe forte. Já em 2019, embora a presença dessas classes tenha diminuído, ainda era considerável, com 39,6% de escoamento superficial também na classe forte, conforme gráfico 14 e apresentadas no mapa 35.

Gráfico 14: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21

Elaboração: Renata Pereira Prates

A combinação dos dados evidencia outro fator importante: as áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar exercem uma influência significativa na dinâmica do escoamento superficial e o transporte de sedimentos. Esse transporte pode ser caracterizado por ser rápido e, ao mesmo tempo, segmentado, dependendo das características do terreno e das práticas agrícolas adotadas.

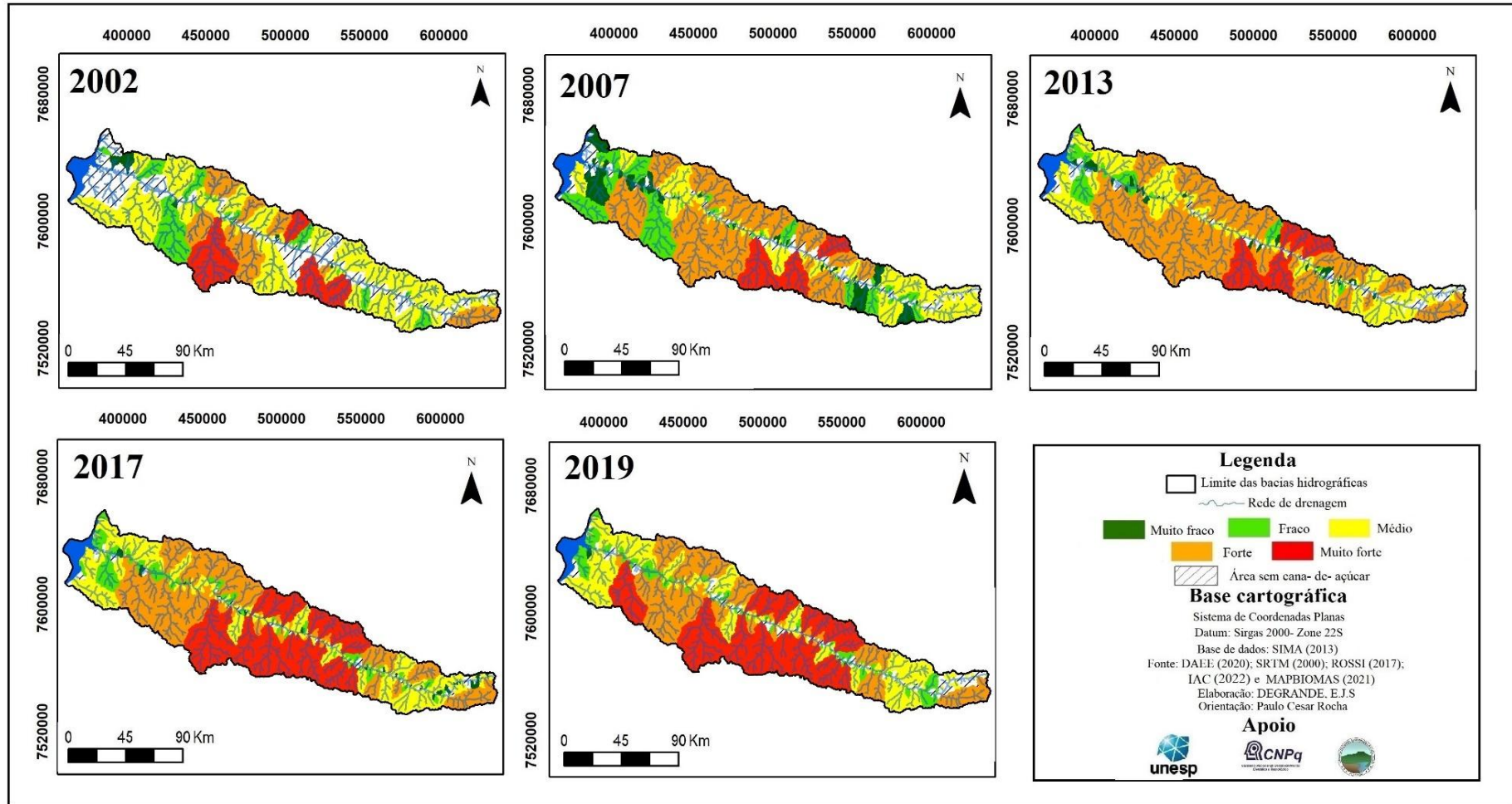
O escoamento superficial pode ser facilitado em regiões onde o solo foi compactado devido à intensa mecanização empregada no cultivo da cana-de-açúcar. Essa compactação do solo é responsável por acelerar a velocidade do escoamento superficial, intensificando os riscos de erosão e o transporte de sedimentos e fertilizantes na rede de drenagem.

Em regiões onde são adotadas técnicas de terraceamento, especialmente em terrenos com declividade mais acentuadas, o escoamento pode adquirir um padrão de escoamento superficial. O principal objetivo observado em áreas com terraceamento é reduzir a velocidade do escoamento superficial, exercendo um papel na contenção da erosão do solo. Em relação aos fertilizantes, como eles em sua maioria são solubilizados, a perda pode ocorrer de ambas as formas.

A velocidade de liberação dos fertilizantes nos solos está fortemente ligado à sua solubilidade. Em comparação aos fertilizantes nitrogenados, os potássicos geralmente possuem menor solubilidade. Por outro lado, os adubos fosfatados convencionais são

conhecidos por sua limitada capacidade de solubilização, como indicado pela Embrapa (2021). Dessa forma, ressalta que fertilizantes altamente solúveis tendem a ser mais suscetíveis à perda por lixiviação, aumentando, assim, o risco de contaminação e eutrofização dos cursos fluviais.

Mapa 35: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 21 – rio do Peixe



8.3 - Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes (NPK) na cultura da cana-de-açúcar na (UGRHI 22) - Bacia Hidrográfica Pontal do Paranapanema

A análise dos dados provenientes da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 22, no mapa sintética, destaca uma correlação direta entre a extensão das áreas dedicadas à monocultura canavieira e a probabilidade de aporte de fertilizantes através do escoamento superficial para os canais fluviais. As classes identificadas foram de Fraco, Médio e Forte para os anos analisados. As classes indicam de estimativa e risco associados à contaminação por aporte de fertilizantes na região da UGRHI 22.

No ano de 2002 UGRHI 22 – Pontal do Paranapanema apresentou uma área cultivada com cana-de-açúcar de 15.574 hectares, correspondendo a 1,3% da extensão total da UGRHI 22. Nesse período, os índices de uso de fertilizantes NPK foram de Muito Fraco a Médio, enquanto as classes de escoamento superficial apresentaram índice de Muito Fraco a Forte, destacando-se especialmente a classe de escoamento Muito Fraco. Esses dados indicam uma estimativa e um potencial risco de contaminação considerado Médio para o ano de 2002, com um valor percentual de 73,9% para a UGRHI 22, sinalizando a possibilidade de impacto dos fertilizantes na região.

No ano de 2007, as áreas de monocultura de cana-de-açúcar na UGRHI 22 tiveram um aumento significativo, alcançando aproximadamente 66.65 hectares. Esse crescimento consequentemente acabou refletindo nos índices de uso de fertilizantes, que foram entre Médio e Forte, ao passo que o escoamento superficial evidenciou predominantemente níveis de Médio a Muito Forte. Essa conjunção de dados indicou que, para a UGRHI 22 no ano de 2007, a estimativa de aporte de fertilizantes foi classificada de Médio a Forte, apresentando 61,5% na classe considerada Forte, sugerindo um potencial risco de contaminação nos canais fluviais da região do Pontal do Paranapanema.

Em 2013, a análise da estimativa de aporte de fertilizantes na região da UGRHI 22 apresenta classes entre Fraca e Forte, sendo a classe Forte a mais expressiva, representando 55,3%. Esse dado indica um possível aumento na aplicação de fertilizantes nesse período, resultado do crescimento das áreas dedicadas ao cultivo de cana-de-açúcar, atingindo a marca de 209,26 hectares, o que representa aproximadamente 20,3% da área total da UGRHI. O escoamento superficial foi classificado como Médio, com níveis também considerados Médios nas áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar.

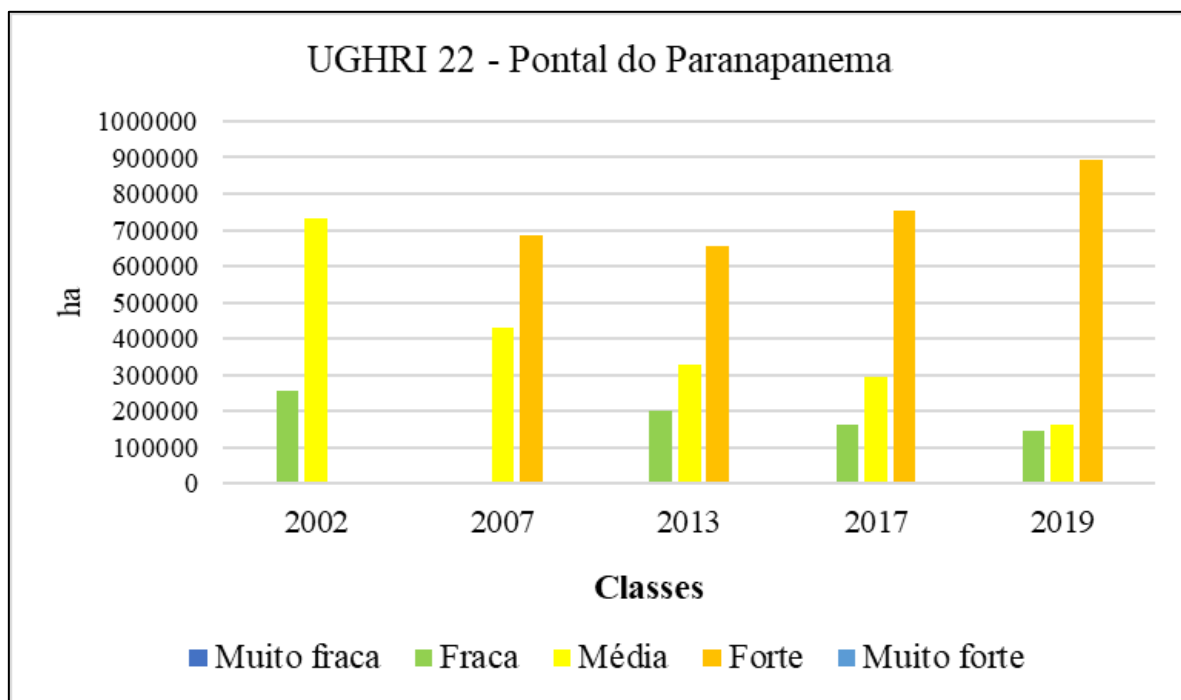
Tabela 19: classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 22

Classes	2002	2007	2013	2017	2019
Muito fraca	0	0	0	0	0
Fraca	26,0	0,0	17,1	13,4	12,1
Média	73,9	38,5	27,7	24,2	13,7
Forte	0,07	61,5	55,3	62,4	74,3
Muito forte	0	0,006	0	0	0
Total	100	100	100	100	100

Elaboração: Renata Pereira Prates

O estudo de Rocha (2017) analisou os índices de apropriação do ambiente físico na UGRHI, destacando a expansão do cultivo de cana-de-açúcar de 2002 a 2016. Durante esse período, houve um crescimento exponencial superior a 30 vezes na área destinada ao cultivo da monocultura canavieira. Esse aumento teve implicações significativas na ocupação do relevo e na pressão exercida sobre a rede de drenagem na região. Entre 2002 e 2007, houve um avanço intenso, com percentuais chegando a cerca de 40 a 50% em cada compartimento do relevo, de dissecação e acumulação na UGHRI 22 – Pontal do Paranapanema e em torno de 20% nas áreas de acumulação. O autor explica também que, houve uma preferência na ocupação das áreas tabulares devido à sua maior adequação para a mecanização. Os valores analisados tiveram um aumento expressivo entre 2002 e 2007, mantendo-se elevados entre os anos 2013 e 2016, marcando os maiores índices ao longo da série temporal.

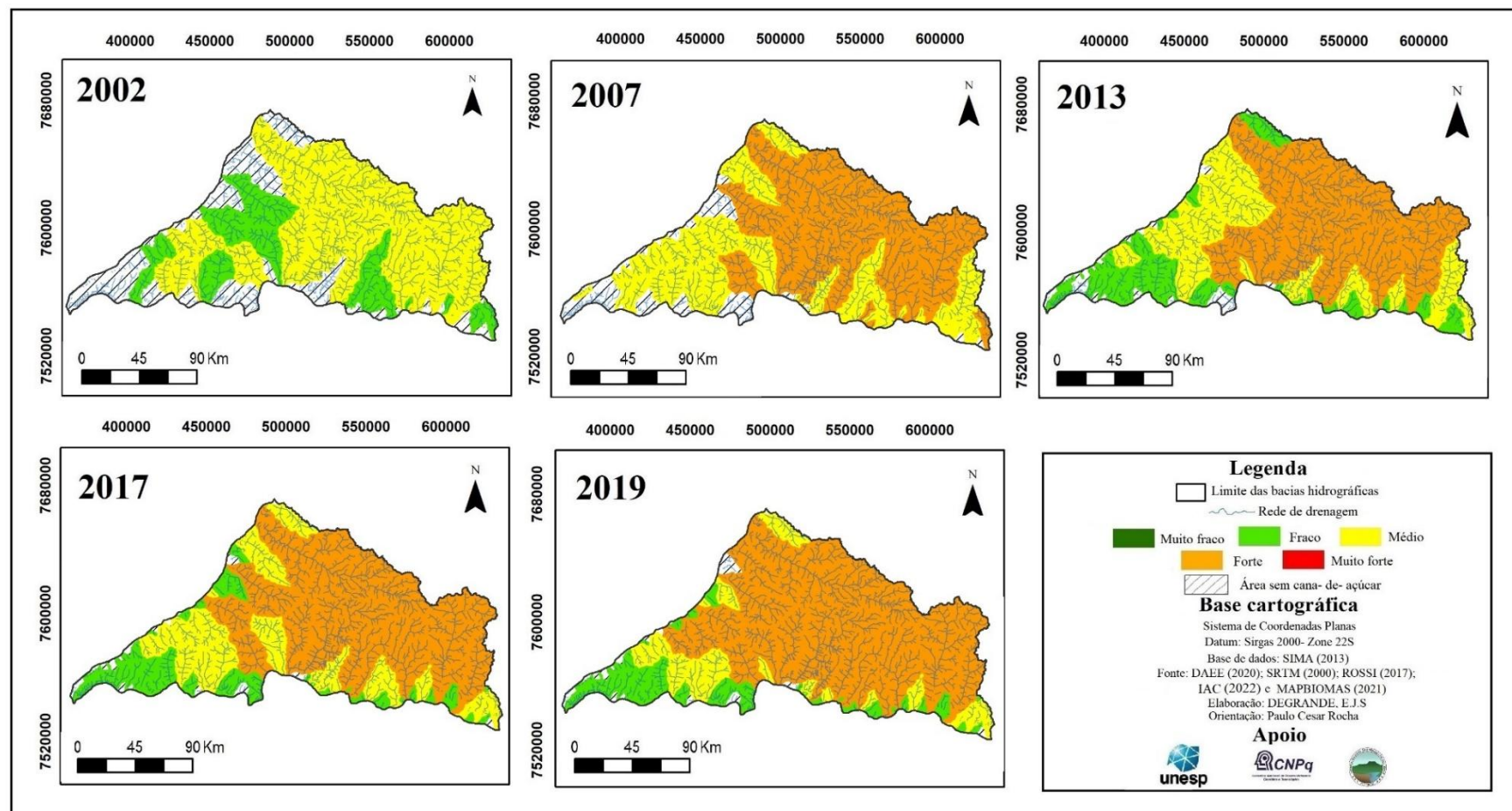
No decorrer dos anos de 2017 e 2019, ocorreu predomínio da classe Forte em relação à estimativa e ao risco de contaminação devido ao aporte de fertilizantes na UGRHI 22, acompanhado por um escoamento considerado Médio. As áreas destinadas ao cultivo de cana-de-açúcar alcançaram 250.090 hectares em 2017 e 265.03 hectares em 2019. Ao analisarmos o escoamento superficial nessas áreas, identificou-se um índice de escoamento classificado como Forte, registrando aproximadamente 1.522 mm. Esse índice mais elevado de escoamento pode ter implicações significativas, associadas à atividade canavieira, já que pode influenciar no aporte de fertilizantes, contribuindo para o risco de contaminação da rede de drenagem, assim apresentados no gráfico 15 e no mapa 36.

Gráfico 15: Classes de escoamento superficial e uso de fertilizantes – NPK – UGHRI 21

Elaboração: Renata Pereira Prates

Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008) abordam a influência das práticas agrícolas em áreas onde não há um manejo adequado do solo. Os autores destacam que nessas áreas, onde as atividades agrícolas são intensas, o arraste de sedimentos ocorre em proporções consideráveis. Esse fenômeno exerce um impacto significativo nos cursos d'água, resultando na alteração das características biológicas, químicas e físicas, o que por sua vez desencadeia consequências negativas nos ecossistemas aquáticos, comprometendo sua saúde e funcionalidade.

Mapa 36: Estimativa e risco de contaminação por aporte de fertilizantes NPK nas sub-bacias da UGHRI 22 – Pontal do Paranapanema



9 - Considerações Finais: da recomendação à fiscalização de fertilizantes

A análise dos processos de desenvolvimento e expansão da agricultura moderna, particularmente da agricultura científica globalizada, suscita questionamentos inevitáveis sobre o impacto negativo dessas novas possibilidades, resultantes da evolução tecnológica ou tecnificada, nos recursos naturais. Ao observar o panorama abrangente e buscar compreender as dinâmicas regionais, especialmente a expansão canavieira nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos da área de pesquisa – UGRHI 20, 21 e 22, fica evidente que essa modernização agrícola pode ser caracterizada como conservadora, estruturada na concentração dos meios de produção.

Essa caracterização baseia-se no padrão predominante de monocultura, onde as metas de produtividade e as exigências do mercado têm sido e continuam a ser os principais objetivos dos produtores. Nesse contexto, os prejuízos ambientais decorrentes dessas práticas não são devidamente considerados ou contabilizados.

A ênfase constante na maximização da produtividade e no atendimento às demandas do mercado tem perpetuado uma abordagem unilateral na agricultura moderna, negligenciando os impactos adversos nos recursos naturais. O foco incessante nas metas econômicas e na eficiência produtiva tem, lamentavelmente, desconsiderado a um segundo plano a preservação e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos.

Dessa forma, os dados apresentados na tese revelam que a produção de mapas de uso e cobertura da terra tem desempenhado um papel fundamental na identificação e análise das áreas de culturas temporárias ou semi-perene, como no caso da cana-de-açúcar. Esses mapas têm sido instrumentos importantes que permitem a correlação entre esses dados e as recomendações de fertilizantes (NPK) em toneladas no ciclo produtivo na monocultura canavieira.

O aumento no cultivo de cana-de-açúcar e a consequente expansão do escoamento superficial podem ser atribuídos a fatores como o tipo de solo, práticas de manejo agrícola e condições climáticas. A mecanização intensa e a movimentação do solo para o cultivo diminuem a capacidade de infiltração, aumentando o escoamento superficial devido à compactação do solo.

Ao longo dos anos, houve uma redistribuição das classes de escoamento, refletindo mudanças no uso e cobertura da terra. Em 2007 e 2013, o escoamento

superficial mostrou-se equilibrado entre as classes, apesar das alterações significativas no uso do solo, como a expansão das culturas temporárias e do cultivo de cana-de-açúcar.

Os dados indicam que as transformações no uso da terra, especialmente o aumento das áreas agrícolas, influenciam diretamente a dinâmica do escoamento superficial na bacia, destacando a importância de práticas de manejo sustentável para mitigar os impactos hidrológicos e ambientais

A análise das informações históricas e a espacialização dos dados de recomendação de NPK evidenciam um aumento expressivo no uso de insumos como forma de sustentar os rendimentos agrícolas na produção de cana-de-açúcar. Tal aumento está intrinsecamente relacionado à pressão por elevados índices de produção e ao uso intensivo do solo agrícola. A correlação direta entre a expansão das áreas destinadas à cana-de-açúcar e o consequente incremento no uso de fertilizantes sinaliza a necessidade premente de uma análise mais aprofundada dos impactos ambientais associados a essa prática.

A concentração desses insumos químicos, em particular o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), tem implicações diretas na saúde dos ecossistemas aquáticos das bacias hidrográficas em questão. O aumento desproporcional desses elementos químicos pode gerar efeitos adversos, como a eutrofização do canal fluvial e a subsequente degradação da qualidade da água, afetando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos associados.

A distribuição espacial da recomendação de NPK para a cultura da cana-de-açúcar, juntamente com o crescimento exponencial das áreas produtivas nas UGRHIs 20, 21 e 22, contribuíram para expor a rede de drenagem à ação dos macronutrientes recomendados para adubação.

As diversas formas de conectividade hidrológica representam a complexa teia de caminhos e interações que regem o fluxo de água e sedimentos dentro de uma bacia hidrográfica. A compreensão dessas vias pode explicar as interações entre as diferentes áreas de uma bacia, impactadas por processos como erosão, sedimentação e, portanto, pela distribuição de fertilizantes por lixiviação e escoamento superficial. A conectividade hidrológica é influenciada por variáveis geográficas, topográficas, climáticas e intervenções antrópicas, o que contribui para a compreensão de como a monocultura canavieira e o uso expressivo de fertilizantes NPK influenciam nos canais fluviais das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Oeste Paulista

A busca por maior produtividade leva os produtores a aplicarem fertilizantes em quantidades superiores às necessidades reais das plantas. Portanto, é necessário

estabelecer diretrizes claras, baseadas em análises de solo específicas para cada região e cultura, a fim de orientar os agricultores na aplicação correta e eficiente de fertilizantes. Além disso, é fundamental fortalecer os mecanismos de fiscalização para garantir o cumprimento dessas diretrizes e evitar o uso indiscriminado e inadequado desses insumos, visando a preservação ambiental e implementação de políticas que promovam a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de uma fiscalização rigorosa e de práticas de manejo apropriadas para a recomendação e aplicação de fertilizantes no contexto do plantio agrícola, um ponto fundamental e urgente. A ausência de um guia agrônomo que direcione a adubação de acordo com a análise específica do solo para cada cultura se configura como um desafio a ser enfrentado por pesquisadores, órgãos reguladores e na formulação de políticas ambientais, que visam essa fiscalização. Essa lacuna frequentemente resulta na aplicação excessiva de fertilizantes, uma vez que não há orientações precisas, levando a um uso além do recomendado e à falta de fiscalização adequada sobre essas práticas.

Além da necessidade de fiscalizar a recomendação de adubação, considerar a diversificação e a rotação de culturas é fundamental. Essas práticas não apenas reduzem a excessiva dependência de fertilizantes, mas também preservam a saúde do solo, da água e do ar. A diversificação e a rotação de cultivos são práticas agrícolas essenciais que podem promover uma melhor retenção de água no solo, reduzindo tanto a erosão quanto o escoamento superficial, contribuindo assim para a conservação dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R. R. et al. Métodos agrometeorológicos para controle da irrigação. Campinas: Instituto Agrônomo, 1990.
- ALMEIDA, J. D. M.; SOUZA, J. O. P.; CORRÊA, A. C. B. Dinâmica e caracterização fluvial da bacia do Riacho Grande, Serra Talhada-PE: abordagem da conectividade da paisagem. **Geo UERJ**, v. 1, p. 308-331, 2016.
- ANDRADE, J. M. F.; DINIZ, K. M. **Impactos Ambientais da Agroindústria da Cana de Açúcar: Subsídios para Gestão**. ESALQ. Piracicaba – SP. 2007. Disponível em: <http://arquivo.ambiente.sp.gov.br/publicacoes/2016/12/impactosAmbientaisAgroindustria.pdf> Acesso em 20/03/2021.
- ARAÚJO, A. P.; ROCHA, P. C. **O regime hidrológico na bacia do rio Paranapanema: variabilidade interanual e espacial**. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió-AL. Anais do XIX SBRH. Maceió-AL: ABRH, 2011.
- BAARTMAN, J.E.M., MASSELINK, R., KEESSTRA, S.D., Temme, A.J.A.M., 2013. **Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity**. *Earth Surf. Process. Landf.* 38 (12), 1457–1471.
- BARRETO, M. J. **Territorialização das agroindústrias canavieiras no Pontal do Paranapanema e os desdobramentos para o trabalho**. 2012. 244 f. Dissertação (mestrado em Geografia), Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, SP, 2012.
- BARRETO, M. J.; THOMAZ JUNIOR, A. Os impactos territoriais da monocultura da cana-de-açúcar no Pontal do Paranapanema-SP. **Revista Pegada Eletrônica** (on-line), v. 13, p. 46-68, 2012.
- BARROS, A. C. M.; ALMEIDA, J. D. M.; SOUZA, J. O. P.; CORRÊA, A. C. B. Dinâmica dos sedimentos em bacia do semiárido: conectividade e a relação com o escoamento superficial como suporte para a gestão dos recursos hídricos local. **Revista GeoNorte**, v. 10, n. 1, p. 332-336, 2014
- BENETIS, V.; TEIXEIRA, P.C.; POLIDORO, J.C. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/999756/1/Folder-Rede-FertBrasil-2014.pdf>. Embrapa solos (2014)
- BEREZUK, A. G. **Análise das Adversidades Climáticas no Oeste Paulista e Norte do Paraná**. 2007. 379 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2007.
- BERTALANFFY, L.V. **Teoria Geral dos Sistemas**: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 3ª ed. Petrópolis: Vozes, 2008, 360 p.

BERTONI, J.C.; TUCCI, C.E.M. Precipitação. In: TUCCI, C.E.M.(Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. p.177-242.

BEZERRA, J. P. P. Conceitos centrais e os tensionamentos em torno da Lei 4.771 de 1965. In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, v. 6, n. 2 (2010), p. 176-187. Disponível em: http://www.amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/forum_ambiental/article/view/88 Acesso em 10 junho 2021.

BIGARELLA, J. J; SUGUIO, K. **Ambiente fluvial**. Curitiba, Editora Universidade Federal do Paraná e Associação de Defesa e Educação Ambiental, 1979. 172 p.

BIGARELLA, J. J.; SUGUIO, K.; BECKER, R. D. Ambiente Fluvial. Curitiba: Ed. Universidade Federal do Paraná, 1979.

BLANTON, P.; MARCUS, W. A. Railroads, roads and lateral disconnection in the river landscapes of the continental United States. *Geomorphology*, v. 112, p. 212-227, 2009

BOLETIM LOGÍSTICO. Brasília, DF: Conab, ano 5, abr. 2021. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/boletimlogistico/item/download/37307_3037108c4e1d127665d9c6ec29b18239. Acesso em: 4 nov. 2021

BOIN, M. N. **Chuvvas e erosões no Oeste Paulista: uma análise climatológica aplicada**. 2000. 264 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

BONNETT, G. Developmental stages (phenology). In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. *Sugarcane: physiology, biochemistry and functional biology*. Wiley Blackwell. 2014, p.35-54

BORSELLI, L.; CASSI, P.; TORRI, D. Prolegomena to sediment and flow connectivity in the landscape: a GIS and field numerical assessment. **Catena**, v.75, n.3, p.268-277, 2008.

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. da. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; Guerra, A. J. T. **Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 153-192.

BRACKEN, L. J.; CROKE, J. **The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff- dominated geomorphic systems**. **Hydrological Processes**, v. 21,n. 13, p. 1749 - 1763, 2007

BRACKEN, L.; TURBULL, L.; WAINWRIGHT, J.; BOGAART, P. **Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transport at multiple scales**. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, p. 177 – 188, ago. 2015. <https://doi.org/10.1002/esp.3635> .

BRASIL . INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) **Pesquisa Agrícola Municipal** - PAM. Brasília: 2015. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/> . Acesso em: 10 de outubro 2021

BRIERLEY, G.; FRYIRS, K.; JAIN, V. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. **Area**, v. 38, p. 165-174, 2006

CALIGARIS, B. S. A.; RANGEL, L. E. P.; POLIDORO, J. C.; FARIAS, P. I. V. A importância do PNF. *Revista de Política Agrícola*, v. 31, n. 1, p. 3–8, jan./mar. 2022. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1142514/1/A-importancia-do-PNF.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2023.

CAMARA, Marcia R. G.; CALDARELLI, Carlos E. **Expansão canavieira e o uso da terra no estado de São Paulo**. Departamento de Economia, Universidade Estadual de Londrina, Paraná.

CAPUTO, M.M. et al. Acúmulo de sacarose, produtividade e florescimento de cana-de-açúcar sob reguladores vegetais. **Interciência**, Caracas, v. 32, n. 12, p. 834 - 840, 2007.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia** Prática. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.

CARVALHO, T.M.; MORAIS, R.P. Aspectos hidrogeomorfológicos do sistema fluvial do baixo rio Uraricoera e alto rio Branco como subsídio à gestão de terras. **Geografias**, v. 10, n. 2, p. 118-135, 2014.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. Hidrologia. [Acesso em 2010 Mai 20]. Disponível em www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf

CASSETI, V. **Ambiente e apropriação do relevo**. 2 ed. São Paulo: Contexto, 1995.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B. **Hidrologia**. [Acesso em 2010 Mai 20]. Disponível em www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf

CAVALLI, M.; TREVISANI, S.; COMITI, F.; MARCHI, L. **Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments**. **Geomorphology**, v. 188, p. 31-41, 2013

CBH-PP - COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO PONTAL DO PARANAPANEMA. **Plano de Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema** (UGRHI 22). Marília-SP, 2016. Disponível em: <http://cbhpp.org/publicacoes-2/> . Acesso em: 20 outubro 2021.

CELLA, Daltro; ROSSI, Mário César de Lima. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil. *Interface Tecnológica*, [S.l.], v. 7, n. 1, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1999

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS.
Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5a
Aproximação, Viçosa, MG, 1999. 359p.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS AGUAPEÍ E PEIXE
UGRHI'S 20 e 21. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2013 (Ano Base: 2012)**. Disponível em: <http://cbhap.org/publicacoes/relatorio-de-situacao.html> . Acesso em: 20 julho. 2021.

Conab | Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar | v.11 – **safr** 2023/24, n°3 – **terceiro levantamento** | novembro 2023, acesso 12/12/2023.

CONTI, J.B. **Geografia e Paisagem**. Ciência e Natura, Santa Maria, RG, v.36 Ed. Especial, 2014. p. 239-245

CROKE, J., MOCKLER, S., FOGARTY, P., TAKKEN, I. **Sediment concentration changes in runoff pathways from a forest road network and the resultant spatial pattern of catchment connectivity**. *Geomorphology*, v. 68, 257–268, 2005.

CROKE, J.; FRYIRS, K.; THOMPSON, C. **Channel-floodplain connectivity during an extreme flood event: implications for sediment erosion, deposition, and delivery**. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 38, p. 1444-1456, 2013.

CTPI - COOPERATIVA DE SERVIÇOS, PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS. Diagnóstico da situação dos recursos hídricos da UGRHI – 22. Pontal do Paranapanema: Relatório Zero. São Paulo: CPTI, 1999. Disponível em: <http://cbhpp.org/publicacoes-2/> . Acesso em 14 de novembro. 2021.

DIAS, J C. **Raízes da Fertilidade**. São Paulo: Calandra Editorial, 2005.

EMBRAPA. Embrapa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018.

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª Ed. Rio de Janeiro, 2006

FRYIRS, K. A. et al. Catchment-scale (dis)connectivity in sediment flux in the upperHunter catchment, New South Wales, Australia. *Geomorphology*, v. 89, p. 297-316, 2007

EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; JANEY, N.; PAYRASTRE, O. Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modeling: Benefit of a simulation approach? **Journal of Hydrology**, v. 531, p. 337-348, 2015

ESPÍNDOLA, E. L. G., Silva, J. dos S. V. da MARINELLI, C. E., & Abdon, M. de M. (2000). **A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho**: uma abordagem ecossistêmica e a visão interdisciplinar. São Carlos: RiMa.

FAO, 2019. The International Code of Conduct for the Sustainable Use and Management of Fertilizers. Rome

FAPESP FUNDAÇÃO DE AMPARO A PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O Crescimento da Agricultura Paulista e as Instituições de Ensino, Pesquisa e Extensão numa Perspectiva de Longo Prazo:** Contribuição da FAPESP à Agricultura do Estado de São Paulo. São Paulo, 2002.

FERRARI LEITE, J. **A ocupação do Pontal do Paranapanema.** São Paulo: Editora Hucitec, 1998. 202 p.

FILIZOLA, H. F. PESSOA, M. C. P. Y.; GOMES, M. A. F.; SOUZA, M. D. de. In: MANZATTO, C. V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J. R. R. (Ed.). Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.. cap. 7, p. 79-86

FRANCO, V. V.; SOUZA, J. O. P. Conectividade de sedimentos na Bacia Hidrográfica Riacho do Tigre, ambiente semiarido no município de São João do Tigre-PB. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 23, n. 3, p. 697-711, dez. 2019, ISSN 2179-0892.

FRYIRS, K.A.; BRIERLEY, G.J.; PRESTON, N.J.; KASAI, M. **Buffers, barriers and blankets:** The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. **Catena**, v.70, n.1, p.49-67, 2007.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. (Ed.). *Crop-water relations*. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GERASIMOV, I. P.; MESCHERIKOV, J. A. Morphostructure. **The encyclopedia of geomorphology**. Ed. RW Fairbridge, p. 731-732, 1968.

GIAVARA, E. As fronteiras do desconhecido: civilização e barbárie no Oeste Paulista. albuquerque. **Revista de história**. vol. 8, n. 16. jul.-dez./2016, p. 147-165.

GREGO, C. R.; ARAUJO, L. S.; VICENTE, L. E. e col. **Agricultura de precisão em cana de açúcar**. Biblioteca Embrapa Territorial. Brasília, DF: 2014. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1002013/1/4223.pdf> Acesso em: 18/01/2021.

GUERRA, A. J. T. (ORG). **Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p. 153-192.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011

GUERRA, A. J.T. Processos Erosivos nas Encostas. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 13 ed., 2015. p. 149 – 164.

GUMIERE, S. J.; BISSONNAIS, Y. L.; RACLOT, D. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 36, n. 1, p. 3-19, dez. 2011.

HARVEY, A.M., 1991. The influence of sediment supply on the channel morphology of upland streams: the Howgill Fells, northwest England. **Earth Surface Processes and Landforms** 16, 675 – 684.

HARVEY, A.M., 2001. Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: implications for landscape sensitivity, illustrated from Howgill Fells, northwest England. **Catena** 42, 225 – 250.

HOOKE, J. Coarse sediment connectivity in river channel systems: a conceptual framework and methodology. **Geomorphology**, v. 56, n. 1-2, p. 79-94, 2003

IBGE. **Manual Técnico de Pedologia**, 2ª edição. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE. Diretoria de Geociências. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. Manuais Técnicos em Geociências, número 4, 2007, p. 316.

INFORME AGROPECUÁRIO. Cana-de-açúcar: do plantio à industrialização. Belo Horizonte, v.28, n. 239, jul-ago/2007.

INPE. **MAPEAMENTO DE CANA VIA IMAGENS DE SATÉLITE DE OBSERVAÇÃO DA TERRA - CANASAT**. *Tabelas de produção por município do Estado de São Paulo*. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/tabelas.html>. Acesso em: 02 de maio de 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1:1000.000**. São Paulo, 1981. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br>. Acesso em 15 julho, 2021.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo: 1:500.000**. São Paulo: IPT, vol. 1, 1981. MONBEIG, P. 1984. Pioneiros e fazendeiros de São Paulo. São Paulo: HUCITEC, Polis. 392p.

LEXARTZA-ARTZA, I.; WAINWRIGHT, J. Hydrological connectivity: linking concepts with practical implications. **Catena**, v.79, n.2, p.146-152, 2009

LOMBARDI NETO, F. et al. **Terraceamento agrícola**. In: LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. I. (Coord.). Manual técnico de manejo e conservação do solo e água. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, v. 4, p. 11-35, 1994

LOPES, J. W.B., PINHEIRO, E.A.R. **Análise temporal da conectividade e da capacidade de transporte potencial de sedimentos em meso-bacia semiárida, CE, Brasil**.

LOURENZANI, Wagner L.; CALDAS, Marcellus M. **Mudanças no uso da terra em decorrentes da expansão de cana-de-açúcar no oeste do estado de São Paulo.** *Ciência rural*, Santa Maria, v. 44, n. 11, novembro de 2014.

MANTOVANI, J.R.A, ALCÂNTARA, E. H., ROCHA, P.C., CURTARELLI, M.P., IMAI, M.N.; Estimativa do Escoamento Superficial Distribuído na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe por meio de Geoprocessamento. *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

MARTINS, M.B.G.; CASTRO, P.R.C. **Efeito de giberelina e ethephon na anatomia de plantas de cana-de-açúcar.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.10, p.1855-1863, 1999. Disponível em: Acesso em: 28 dezembro. 2022. doi: 10.1590/S0100-204X1999001000012.

MENDIONDO, E. M; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas. I: conceitos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, Volume 2, n.1, 1997. p. 59-122.

MENDIONDO, E. M; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas. II: diversidade de processos na bacia vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, Volume 2, n.1, 1997. p. 81-100.

MENDIONDO, E. M; TUCCI, C. E. M. Escalas hidrológicas. III: hipótese integradora de processos na bacia vertente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, v. 2, n.2, 1997. p. 21-44.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (BRASIL). **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica.** SQA. Brasília: MMA, 2006.

MONBEIG, P. **Pioneiros e Fazendeiros de São Paulo.** São Paulo: Hucitec, Polis, 1984

MONTEIRO, C. A. de F. **Análise rítmica em climatologia.** São Paulo: IGEO/USP, 1971.

MORAES, J.M. et al. Propriedades Físicas dos Solos na Parametrização de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, Volume 8, n.1, 2002. p. 61-70

MOREIRA, E. F. P. **Expansão, concentração e concorrência na agroindústria canavieira em São Paulo: 1975 a 1987.** Campinas, SP, 1989. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas.

MORIN, E.; **Introdução ao pensamento complexo.** ESF èditer, 1990. Tradução Dulce Matos. 5ª ed, 2008.

NEVES, L.S.; Ernani, P.R.; SIMONETE, M.A. Mobilidade de potássio em solos decorrentes da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2009.

O Mercado de Fertilizantes no Brasil: **Diagnósticos e Propostas de Políticas**. 2008, Revista de Política Agrícola, p. 24.

MULDER, V. L. et al. The use of remote sensing in soil and terrain mapping - A review. *Geoderma*, n. 162, p. 1-19, 2011.

OLIVEIRA, M.; W.; et. al. Nutrição mineral e adubação da cana de açúcar. São Paulo, 2002. Disponível em: https://www.nutricaoeplantas.agr.br/site/downloads/unesp_jaboticabal/oliveira_cana_informeagropec.pdf Acesso em: 10 de out. 2021.

OLIVEIRA, E.C.; Freire, F.J.; Oliveira, R.I.; Freire, M.B.G.S.; Neto, D.E.; Silva, S.A.M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2010

OLIVEIRA, J. B.; et al. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: Legenda expandida. Campinas: Instituto Agronômico; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999, 64p

OLIVEIRA, J. B. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 112 p

PAES, J. M. V. et al. **Cana-de-açúcar (Saccharum spp.)**. In: PAULA JÚNIOR, T. J.;

PINTO, N. D. de S. et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. 278 p.

PRINGLE C. M. Hydrologic connectivity and the management of biological reserves: a global perspective. **Ecological Applications**. v.11, p. 981- 98, 2001

PROJETO MAPBIOMAS. Coleção 6.0 da Série **Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, 2020**. Disponível em: . Acesso em: 19 de abril de 2021.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v 25, n 2, Viçosa, p. 403-410, 2001

RAIJ, B. van et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. 285p. **Boletim técnico**, v. 100.

RAMOS, P. **Agroindústria canavieira e propriedade fundiária no Brasil**. São Paulo: Hucitec, 1999.

RAMOS, Pedro. A EVOLUÇÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA PAULISTA NO PERÍODO 1946-1980: expansionismo agrário e características da estrutura de produção. **Informações Econômicas**, v. 31, n. 8, agosto de 2001.

Relatório de Estágio de Pós-Doutorado. Geomorfologia E Conectividade Hidrodinâmica Em Sistemas Fluviais Aluviais: Uma Revisão Conceitual. **GEMA-PEA-UEM**. 2015

RHOADS, B. L.; LEWIS, Q. W.; ANDRESEN, W. Historical changes in channel network extent and channel planform in an intensively managed landscape: Natural versus human-induced effects. **Geomorphology**, v. 252, p. 17–31, jan. 2016.

ROCHA, P. C.; ARAUJO, RENATA RIBEIRO; Rizk, M.C., Exposição Da Rede De Drenagem A Agrotóxicos E Conectividade Hidrodinâmica, região pontal do paranapanema, São Paulo, Brasil. *Revista Equador*, v.1, 2020.

ROCHA, P.C. & TOMMASELLI, J. T. G. Variabilidade hidrológica nas bacias dos rios aguapeí e peixe, região Oeste Paulista. **Revista Brasileira de Climatologia**. N. 8, v. 10, 2012.

ROCHA, P.C. Dinâmica sedimentológica, escoamento superficial e conectividade na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, Oeste Paulista- Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 16., 2015, Teresina (PI). **Anais...** Teresina, 2015, p.3210- 3216.

ROCHA, P. C. Índices de apropriação do relevo e do solo em bacias hidrográficas: conceituação e estudo de caso. In: VI WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL EM BACIAS HIDROGRÁFICAS, 6, 2017, Uberlândia. **Workshop...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, julho de 2017.

ROCHA, P. C.; SANTOS C. R.; SANTOS, A. A. A expansão da atividade canavieira e interações com a rede hidrográfica na região do Pontal do Paranapanema, São Paulo, Brasil. IX SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO E V SEMINÁRIO IBERO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, **Anais...** Guimarães, Portugal, 2016, p. 611-622, 2016.

RODRIGUES, G. S. S. C.; ROSS, J. L. S. **A trajetória da cana- de- açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia- MG: Edufu, 2020.

RODRIGUES, Rafael Branco et al. Opção de troca de produto na indústria de fertilizantes. **Revista Administração**, São Paulo, v. 50, n. 2, abr./mai./jun. 2015.

ROSS, J. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para planejamento ambiental. São Paulo. Oficina de Textos, 2006.

ROSS, J. L. S. **Geografia do Brasil**. 4. ed. São Paulo: EdUSP, 2001.

ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: planaltos, planícies e depressões. In CARLOS, A. F. A. (Org.). **Novos caminhos da Geografia**. São Paulo: Contexto, 1999. p. 41-63. (.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia – Departamento de Geografia, FFLCH/USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada – IPT/FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 1997.

SANT'ANNA NETO, J. L. Clima e Organização do Espaço. **Boletim de Geografia**, MARINGÁ, v. 15, n.1, p. 119-131, 1998.

SANTOS, F; BORÉM, A.; CALDAS, C.; Cana-de-açúcar: bionergia, açúcar e álcool: tecnologia e perspectivas. Viçosa, MG: UFV, 2010. 577p.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. 2009. TESE (Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANTOS, L. L. **Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações**. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife-PE, v. 2, n. 3, p. 01-19. set-dez, 2009.

SANTOS, M.,. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 2 ed. São Paulo, Hucitec, 1997

SANTOS, M.,. **Por uma outra globalização**. Rio de Janeiro: Record, 2000.

SANTOS, M.,. **Técnica, espaço, tempo**. São Paulo: Hucitec, 1994

SANTOS, Rozely Ferreira dos. **Planejamento Ambiental: teoria e prática**. São Paulo. Oficina de Texto, 2014

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, 2005. 05-18 p.

SEGATO, S. V. (Org.) et al. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: **LivroCeres**, 2006, 415p

SIEFERT, C. A. C; SANTOS, I. Mecanismos de geração de escoamento e áreas hidrologicamente sensíveis: uma abordagem hidrogeomorfológica para delimitação de áreas de preservação permanente. **RAEGA (UFPR)**, v. 24, 2012. p. 227-257.

SILVEIRA, A. L. L da. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade (UFRGS) e EDUSP, 1993. v. 1. p 177-231.

SILVA, J. G. da. **Progresso técnico e relações de trabalho na agricultura**. São Paulo: Hucitec, 1981.

SILVA, J. G. da. **A modernização conservadora**. Rio de Janeiro, Zahar, 1982.

SILVA, J. G. da. **A nova dinâmica da agricultura brasileira**. Campinas: Unicamp, 1996.

SILVA, J. G. da. **Tecnologia e agricultura familiar**. Porto Alegre: EUFRGS, 1999.

SOUZA, J. O. P. Sistema fluvial e açudagem no semi-árido, relação entre a conectividade da paisagem e dinâmica da precipitação, na bacia de drenagem do riacho do saco, Serra Talhada, Pernambuco. (Dissertação de mestrado) - Recife, 2011.

SOUZA, J. O. P.; CORREA, A. C. B. Conectividade e área de captação efetiva de um sistema fluvial semiárido: bacia do riacho Mulungu, Belém de São Francisco-PE. Sociedade e Natureza, Uberlândia, ano 24, n. 2, 319-332, mai/ago, 2012.

SOUZA, J. O. P. Modelos de Evolução da Dinâmica Fluvial em Ambiente Semiárido – Bacia do Riacho do Saco, Serra Talhada, Pernambuco. Tese de Doutorado: UFPE – Recife, 2014.

SOUZA, J. O. P. DE; CORRÊA, A. C. DE B. Análise da sensibilidade da paisagem na bacia do riacho do Saco – PE. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 16, n. 4, 31, out. 2015. SOUZA, J.; CORREA, A. C. Sistema fluvial e planejamento local no semiárido. Mercator, v. 11, n. 24, p. 149–168, 19 abr. 2012.

SEVERIANO EC, OLIVEIRA GC, DIAS JÚNIOR MS, CASTRO MB, OLIVEIRA LC & COSTA KAP (2010) Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. Engenharia Agrícola, 30:404-413.

STEVAUX, J. C. LATRUBESSE, E. M. **Geomorfologia fluvial**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 336 p.

SUERTEGARAY, D. M. A. **Geografia Física e Geomorfologia: uma releitura**. Porto Alegre: Compasso Lugar Cultura, 2018

SUGUIO, K. & BIGARELLA, J.J. **Ambientes fluviais**. 2.ed. Florianópolis: Editora da UFSC/UFPR, 1990.

TEIXEIRA, L.A.J.; NOMURA, E.S.; DAMATTO JUNIOR, E.R.; FUZITANI, E.J. Banana. In: AGUIAR, A.T.E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M.E.A.G.; TUCCI, M.G.S.; CASTRO, C.E.F (Eds.). Instruções Agrícolas para as principais culturas econômicas. 7.ed. **rev. Campinas**: Instituto Agrônomo, 2014. p. 46-51. (Boletim Técnico, 200)

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, Supren, 1977

TIAN, H. A comprehensive quantification of global nitrous oxide sources and sinks. **Nature**, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2780-0. <disponível em <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2780-0> > acesso em 12 de abril de 2022.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 3.ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 943 p. TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998. 669 p.

TUCCI, Carlos EM et al. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: Editora da Universidade, v. 4, 2009, 943p.

TUNDISI, J. G. **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Cienc. Cult. [online]. 2003, vol.55, n.4, pp. 31-33.

VARGAS, M. C. O gerenciamento integrado da água como problema socioambiental. **Ambiente & Sociedade**, ano II, n. 5, p. 109-134, 1999.

VANACKER, V. et al. River channel response to short-term human-induced change in landscape connectivity in Andean ecosystems. **Geomorphology**, v. 72, n. 1–4, p. 340–353, dez. 2005.

VENZON, M. (Ed.). 101 **culturas**: manual de tecnologias agrícolas. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. p. 209 – 220.

VICTOR, M. A. M. et al. **Cem anos de devastação**: revisitada 30 anos depois. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005.

VITTI, G.C.; QUEIROZ, F.E.C.; OTTO, R.; QUINTINO, T.A. **Nutrição e Adubação da Cana-de-açúcar**, 2005, Bebedouro.p.9-11.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mcgraw Hill, 1975. 250p

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. World population prospects 2019. New York, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 29 de junho de 2021

ZONTA, E.; STAFANATO, J. B.; PEREIRA, M. G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. In: BORGES, A. L. (Ed.). Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá. Brasília, DF: Embrapa, 2021. Cap. 14. p.263 - 303 <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1134679>