



MARIANA DOS SANTOS PELEGRINI

**AVALIAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA SUB BACIA JACAREÍ PARA
FINS DE QUALIDADE HÍDRICA**

Sorocaba
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

*ciências
ambientais*



unesp
Sorocaba

MARIANA DOS SANTOS PELEGRINI

**AVALIAÇÃO DA FRAGILIDADE AMBIENTAL NA SUB BACIA JACAREÍ PARA
FINS DE QUALIDADE HÍDRICA**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Luiz Martins Pompêo
Coorientadora: Prof.^a Dra. Marisa Dantas Bitencourt

Sorocaba
2025

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO em

ciências ambientais

P381a	Pelegri, Mariana dos Santos Avaliação da fragilidade ambiental na sub bacia Jacaré para fins de qualidade hídrica / Mariana dos Santos Pelegri. -- Sorocaba, 2025 73 p. : tabs., mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Marcelo Luiz Martins Pompêo Coorientadora: Marisa Dantas Bitencourt 1. Análise Ambiental. 2. Bacias Hidrográficas. 3. Abastecimento de Água. 4. Qualidade Ambiental. I. Título.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Avaliação da fragilidade ambiental na sub bacia Jacaré para fins de qualidade hídrica

AUTORA: MARIANA DOS SANTOS PELEGRINI
ORIENTADOR: MARCELO LUIZ MARTINS POMPÊO
COORIENTADORA: MARISA DANTAS BITENCOURT

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

Prof. Dr. MARCELO LUIZ MARTINS POMPÊO (Participação Virtual)
Departamento de Ecologia / Instituto de Biociências - Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. MANUEL ENRIQUE GAMERO GUANDIQUE (Participação Virtual)
Engenharia Ambiental / Unesp Instituto de Ciencia e Tecnologia de Sorocaba

Profª Drª SHEILA CARDOSO DA SILVA (Participação Virtual)
Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) – ICT

Prof. Dr. FERNANDO LUIZ DE PAULA SANTIL (Participação Virtual)
Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Profª. Drª. QUÊZIA LEANDRO DE MOURA GUERREIRO (Participação Virtual)
Instituto de Ciências e Tecnologia das Águas / Universidade Federal do Oeste do Pará

Sorocaba, 11 de setembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Deus por me dar força e proteção ao longo de minha jornada. *“A minha alma engrandece ao Senhor, e o meu espírito se alegra em Deus, meu Salvador, porque olhou para a humildade de sua serva. De agora em diante, todas as gerações me chamarão bem-aventurada, porque o Poderoso fez grandes coisas em meu favor. Santo é o seu nome.”* (Lucas 1:46-49)

À minha família, pela presença e apoio em todos os meus dias de luta e pelos aplausos nos dias de glória. Serei infinitamente grata pela minha base familiar. Foi por ela que consegui conquistar meu maior e precioso presente, o conhecimento.

Ao Professor Marcelo, meu orientador, pela sua exemplar dedicação e esforço para com a minha aprendizagem, progresso acadêmico e desenvolvimento pessoal. Serei imensamente grata.

À minha coorientadora, Professora Marisa, pela mentoria e conhecimento. Sua participação fora imprescindível, tanto para o andamento da minha tese, quanto para meu crescimento profissional. Muito obrigada.

Aos colegas do Laboratório de Limnologia da USP, expressei meu sincero carinho e reconhecimento. Não posso deixar de citar um agradecimento especial às alunas Tatiane e Zahia, amigas que participaram do início ao fim do meu processo de evolução acadêmica.

À UNESP Campus Sorocaba que forneceu um ambiente tranquilo e propício para meu aprendizado e realização desta tese.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À cada um dos que citei e também, aos membros da banca de defesa, foram pessoas que desempenharam um papel crucial em minha trajetória e por isso, meu mais profundo agradecimento!

RESUMO

Considera-se bacia hidrográfica a área do território delimitada naturalmente por divisores de água, onde toda a água das chuvas, nascentes e afluentes converge para um ponto comum de saída, que pode ser um rio principal, lago ou reservatório, ressaltando sua total importância para o meio ambiente. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a fragilidade ambiental de uma sub bacia denominada Jacareí, integrante do Sistema Cantareira de Abastecimento, considerando questões geomorfológicas em sua relação direta com a manutenção da qualidade hídrica. A presente pesquisa adotou ferramentas de geotecnologias, incluindo metodologias de análise ambiental, integrando dados de uso e ocupação do solo, características físicas do relevo, cobertura vegetal e aspectos hidrológicos, de modo a identificar áreas mais suscetíveis a processos de degradação. A avaliação permitiu compreender como diferentes formas de uso impactam a capacidade do reservatório Jaguari Jacareí e conseqüentemente, o conhecimento da disponibilidade e atual qualidade da água. Os resultados obtidos permitem que futuros projetos sustentáveis sejam implantados e políticas públicas subsidiarem ações de planejamento e gestão ambiental, principalmente nos pontos mais críticos detectados através das análises.

Palavras-chave: Fragilidade Potencial; Geoprocessamento; Jaguari Jacareí; Sub Bacia; Uso e Ocupação do Solo.

ABSTRACT

Watershed is defined as the area of land naturally delimited by watersheds, where all rainwater, springs, and tributaries converge to a common outlet, which may be a main river, lake, or reservoir, highlighting its significant environmental importance. This study aimed to assess the environmental fragility of a subbasin called Jacareí, part of the Cantareira Water Supply System, considering geomorphological issues in their direct relationship to maintaining water quality. This research adopted geotechnological tools, including environmental analysis methodologies, integrating data on land use and occupation, physical relief characteristics, vegetation cover, and hydrological aspects to identify areas most susceptible to degradation processes. The assessment allowed us to understand how different forms of use impact of Jaguari Jacareí reservoir's capacity and, consequently, knowledge of water availability and current quality. The results obtained allow for the implementation of future sustainable projects and public policies to planning and management actions, especially in the most critical points identified through the analyses.

Keywords: Potential Fragility; Geoprocessing; Jaguari Jacareí; Sub Basin; Land Use and Occupation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de funcionamento do Sistema Cantareira.....	17
Figura 2 - Esquema da reversão de água do Sistema Cantareira.....	18
Figura 3 - Pontos de monitoramento da CETESB.....	19
Figura 4 - UGRHI 05 Piracicaba/Capivari/Jundiaí 2023.....	21
Figura 5 - Representação de uma bacia hidrográfica e uma das suas sub bacias.....	22
Figura 6 - Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.....	33
Figura 7 - Etapas para delimitação da Sub bacia por dados SRTM.....	35
Figura 8 - Fragilidade Potencial da sub bacia de captação.....	40
Figura 9 - Limite ótimo para os parâmetros de qualidade hídrica.....	63
Figura 10 - Esboço do uso e ocupação para a análise temporal.....	66
Figura 11 - Uso e ocupação do solo da sub bacia Jacareí para 1985 até 2023.....	67

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Localização da área de estudo.....	31
Mapa 2 - Estrutura das relações entre as sub bacias.....	32
Mapa 3 - Levantamento de campo para validação das classes de uso do solo.....	39
Mapa 4 - Mapa hipsométrico da sub bacia Jacareí	46
Mapa 5 - Declividade aplicada na sub bacia Jacareí	48
Mapa 6 - Uso e ocupação na sub bacia Jacareí	53
Mapa 7 - Fragilidade potencial apresentada na sub bacia Jacareí	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Representação matemática da matriz de confusão.....	27
Tabela 2 - Interpretação do índice kappa.....	28
Tabela 3 - Níveis de fragilidade,dissecação, solos dominantes e cor trazida.....	41
Tabela 4 - Níveis hierárquicos em relação à declividade.....	43
Tabela 5 - Níveis hierárquicos em relação aos tipos de solos.....	43
Tabela 6 - Níveis de proteção do solo.....	44
Tabela 7 - Classes de declividade encontradas na sub bacia Jacareí.....	50
Tabela 8 - Áreas classificadas utilizando a metodologia MAXVER.....	54
Tabela 9 - Matriz de confusão utilizando o algoritmo MAXVER.....	56
Tabela 10 - Resultado obtido dos coeficientes utilizados no mapeamento do uso do solo....	56
Tabela 11 - Quantificação do mapa de fragilidade potencial.....	61
Tabela 12 - Resultado das análises qualitativas dos parâmetros em pontos de coleta.....	62
Tabela 13 - Uso e ocupação para a análise temporal.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP - Analytic Hierarchy Process
ANA - Agência Nacional de Águas
CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPAM - Conselho Estadual de Meio Ambiente
DQA - Diretiva Quadro da Água
FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FLAASH - Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MAXVER - Máxima Verossimilhança
MDE - Modelo Digital de Elevação
MNT - Numérico de Terreno
OLI - Operational Land Imager
PCJ - Piracicaba, Capivari e Jundiaí
PERH - Política Estadual de Recursos Hídricos
QGIS - QuantumGis
RGB - Red-Green-Blue
RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIBCS - Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SigRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
UGRHI - Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1 A complexidade do Sistema de Abastecimento Cantareira.....	16
3.2 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos.....	20
3.3 Fundamentos e conceitos sobre bacias hidrográficas.....	23
3.4 Informações geomorfológicas das bacias hidrográficas.....	24
3.5 Estudos sobre uso e ocupação da terra.....	25
3.6 Exatidão do mapeamento de uso e ocupação	27
3.7 Aplicações de imagens SRTM e MDE.....	28
3.8 Parâmetros para análise da fragilidade ambiental.....	29
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1 Caracterização da área.....	30
4.2 Fluxograma do trabalho.....	33
4.3 Delimitação da sub bacia com a ferramenta watershed.....	34
4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo.....	35
4.5 Classificação das imagens de sensoriamento remoto.....	36
4.6 Hierarquização dos níveis de fragilidade.....	42
4.7 Parâmetros físico-químicos de qualidade no reservatório.....	44
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 Hipsometria e influências altimétricas.....	45
5.2 Análise da declividade.....	48
5.3 Mapa de uso e ocupação do solo.....	52
5.4 Análise da fragilidade potencial.....	57
5.5 Impactos na qualidade hídrica causados pela fragilidade.....	60
5.6 Dados de qualidade da água monitorados pela CETESB.....	62
5.7 Limite ótimo para os parâmetros de qualidade hídrica.....	63
5.8 Análise temporal do cenário na região desde 1985.....	65
6 CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, aspectos ligados ao meio ambiente ganharam grande espaço e importância no mundo por destacarem práticas como planejamento, gestão e análise. Em estudos relacionados à temática ambiental, as bacias hidrográficas são consideradas bases ideais de análise e gerenciamento de espaços. Este fato, de acordo com Belato e Serrão (2019), descreve um sistema capaz de envolver inúmeras variáveis naturais e sociais, bióticas e abióticas que se interagem, promovendo alterações na estrutura morfológica, geológica, pedológica e vegetal.

Botelhos e Da Silva (2004) afirmam que uma bacia hidrográfica é o maior elemento natural para analisar a superfície terrestre. Este caminho permite explicar o complexo sistema das relações existentes entre componentes geomorfológicos, de hidrografia e uso do solo. Neste caso, um aperfeiçoamento metodológico que compreenda a realidade da cobertura do solo se faz necessário como parte integrante de um diagnóstico essencial para controle ambiental no entorno da bacia, buscando estratégias e melhorias sustentáveis (Prado *et al.*, 2003).

Para Silva, Guerra e Dutra (2002), o planejamento ambiental enquadra-se neste contexto como o processo onde executam-se os levantamentos e diagnósticos das condições ambientais que otimizam o uso dos recursos naturais disponíveis. Assim, as bacias hidrográficas se apresentam como unidades físicas escolhidas para a implantação de políticas públicas voltadas à gestão territorial, destacando, acima de tudo, vulnerabilidade perante as atividades antrópicas.

Santana (2013) afirma que as bacias hidrográficas são uma porção geográfica delimitada por divisores de água que engloba toda área de drenagem e por isso, apresentam-se como espaços naturais de limites estabelecidos pelo escoamento hídrico sobre a superfície. Resultam-se, portanto, da interação da água com outros recursos naturais, conectando forma de uso da terra, relevo, vegetação, desmatamento com a pressão das atividades urbanas.

Durante muito tempo acreditava-se na questão de que o desenvolvimento de uma região estava diretamente atrelado ao crescimento econômico. Entretanto, ao longo dos anos, questionamentos acerca do ordenamento territorial assumiram grau de relevância em análise conceitual, contradizendo a ideia de que o desenvolvimento restringe-se apenas ao aspecto econômico, no qual abrange outras variáveis sob o aspecto social, políticas institucionais e ambientais (Silva e Cohim, 2008).

Com isso, Cunha e Guerra (2010) completam a ideia de que as condições naturais, quando aliadas a manejo inadequado e ocupação urbana desordenada, são índices fundamentais para revelarem aceleração dos processos de degradação ambiental, inserindo a bacia hidrográfica como objeto de análise da dinâmica destes recursos, além de compreender a interação entre os elementos do meio natural e antrópico.

Em um estudo recente, a Agência Nacional das Águas afirma que os estudos ligados às bacias e sub bacias minimizam e podem evitar a ocorrência de impactos decorrentes da ação humana, tendo como objetivo orientar a ocupação do solo para que sejam resguardadas as áreas destinadas à preservação (Ana, 2017). Dessa forma, tendo em vista a conservação dos recursos naturais, um importante tópico a ser explorado é o conhecimento da fragilidade ambiental das bacias, potencializando pontos de suscetibilidade à erosão e aos movimentos de massa que certas porções da paisagem podem apresentar ou sofrer.

De modo geral, Ross (1990), iniciou seus trabalhos sobre a fragilidade em bacias hidrográficas, destacando que essas unidades, além de conterem componentes naturais como tipos de relevo e solo, unem-se, igualmente, às questões sociais, econômicas e administrativas. A necessidade da integração entre práticas que afetam este ambiente ressalta a importância do entendimento do meio antrópico no entorno de uma região hídrica, uma vez que, neste tipo de análise, desenham-se estruturas topográficas e áreas que devem ser protegidas, segundo ideia descrita pela Cetesb, 2004.

Neste contexto, menciona-se que o meio deve ser analisado sob a perspectiva geossistêmica, que parte do pressuposto de que, na natureza, as trocas de energia e matéria se processam através de relações em equilíbrio dinâmico (Tricart, 1977). Para tanto, os ambientes, quando em estado de desequilíbrio, sofreriam maior nível de instabilidade quando expostos aos impactos ambientais adversos, enquanto ambientes em equilíbrio estariam associados ao alto grau de resiliência, estabilidade e rápida capacidade de recuperação quando necessário.

Baseado-se nestes conceitos, Ross (1994) relacionou a fragilidade dos ambientes naturais às trocas de energia e matéria que, além de estarem associadas aos processos naturais, cada vez mais destacam serem comandadas pelas ações antrópicas. Ao se apropriar do território e dos recursos naturais, compromete-se, portanto, o ambiente natural, inferindo níveis de perturbação muito mais intensos que a natureza é capaz de reciclar.

Assim, as contribuições realizadas por Ross (1994) mostram a dinâmica atual das relações entre sociedade e natureza, uma vez que, como apontado pelo autor, ao longo do tempo, o desenvolvimento científico e tecnológico acompanharam as práticas econômicas predatórias. Reconhece-se, dessa forma, que os ambientes estavam em equilíbrio dinâmico até o momento em que as intervenções antrópicas passaram a se intensificar durante a exploração dos recursos naturais.

Neste âmbito, a presente pesquisa buscou unir metodologias e combinar elementos geomorfológicos com dados qualitativos para elaboração de análises sobre um sistema hídrico, identificando as características que ampliam o conhecimento sobre uma rede de drenagem e destacando getecnologias e sensoriamento remoto como facilitadores da visualização atual dos cenários naturais. Para tanto, escolheu-se o levantamento para mapeamento da fragilidade potencial de uma região denominada sub bacia Jacareí a partir da sobreposição de informações do seu meio físico expressado pelas variáveis geomorfológicas de solo, relevo, declividade, combinados com uso e ocupação do solo e alinhados pelos dados de qualidade hídrica. Assim, foi necessário um levantamento dos componentes do estrato geográfico que serviu de suporte para o diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas sobre a potencialidade da fragilidade alimentada por Ross (1994).

Estabeleceram-se as categorias de influência de cada tema (solos, relevo e ocupação e cobertura vegetal) a partir da distribuição adaptada a cada classe temática e aos pesos com base do método de análise hierárquica Analytic Hierarchy Process (AHP) para posterior derivação do mapa de fragilidade potencial, utilizando o método de Álgebra de Mapas no Sistema de Informação Geográfica (SIG) QuantumGis (QGIS).

Para este fim, a ordem das etapas para o desenvolvimento foi, primeiramente, gerar os mapas que trouxeram informações topográficas destacando parâmetros geomorfológicos da área. Assim feito, seguiu-se para a caracterização da sub bacia através do mapa de uso e ocupação do solo e identificou-se como o espaço geográfico é utilizado e ocupado, seja por atividades humanas (como agricultura, urbanização, etc.) ou por elementos naturais (como vegetação, pastagens e solo exposto). Daí, implementou-se a última demanda da elaboração do mapa de fragilidade potencial. Partiu-se, portanto, para a etapa de identificação e quantificação do risco de degradação do ambiente natural em áreas específicas. Nesta etapa pôde-se indicar o grau de vulnerabilidade a processos de erosão, deslizamentos, poluição, entre outros, podendo auxiliar, também, no planejamento ambiental.

Neste enquadramento, os resultados atingidos contribuem para projetos, além de gestores poderem obter dados significativos, sendo eles qualitativos e quantitativos, para futuras análises mais refinadas e específicas nos pontos críticos detectados, por exemplo, pelos afluentes fragilizados. Afinal, como o objetivo deste trabalho envolve impactos potenciais na região da sub bacia Jacareí, existe, de fato, uma colaboração de material para administração de preservação dos recursos naturais embasados em princípios de sustentabilidade, permitindo reunir técnicas de geoprocessamento acerca da dinâmica das atividades realizadas na área, sob um contexto de qualidade hídrica e quantificação das classes de uso do solo.

Como orienta-se segundo um contexto de desenvolvimento sustentável, sendo a bacia hidrográfica o objeto de análise onde existem diversos elementos a serem estudados, o presente trabalho buscou levantar, especialmente, todo o meio físico da sub bacia Jacareí. Alinharam-se, portanto, atributos como hipsometria, relevo e declividade, assim como parâmetros de uso, ocupação do solo, fragilidade potencial do espaço. Dessa maneira, utilizaram-se ferramentas de geoprocessamento para detalharem a distribuição dos padrões pixel a pixel e trecho a trecho, considerando a fragmentação da sub bacia para gerar mapas temáticos e concluir que, apesar de alguns cursos fluviais estarem inseridos nos centros urbanos e sofrerem constantemente com a pressão antrópica, existe uma compreensão estrutural que fornece subsídios para futuras melhoras e aproveitamento amarrado à consciência ambiental.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a fragilidade da sub bacia Jacareí, utilizando geotecnologias e sensoriamento remoto para avaliar a qualidade dos recursos hídricos, uma vez que a qualidade da água do reservatório Jaguari Jacareí é função direta das condições geomorfológicas e de uso e ocupação em seu entorno.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa basearam-se nas seguintes etapas:

- Pesquisar indicadores e índices do eixo ambiental que representassem a dinâmica

espacial da sub bacia hidrográfica Jarareí, além de reunir ações antrópicas identificadas em campo que pudessem influenciar nas características físico-químicas do local, visando a coleta de dados da realidade terrestre;

- Realizar o corte da área para delimitar a sub bacia de interesse e iniciar a fase de geoprocessamento através de dados, imagens, extração de características topográficas como relevo, declividade, sombreamento, hipsometria, modelo digital de elevação, modelo digital do terreno e curvas de nível;

- Definir as classes de uso e ocupação do solo segundo levantamento de campo e metodologias adotadas de acordo com a alta resolução das imagens, incluindo temáticas que envolvessem graus distintos de classificação supervisionada;

- Empregar metodologias de fragilidade ambiental disponíveis na literatura, considerando fatores como geomorfologia, uso e ocupação do solo que proporcionam a elaboração do mapa de fragilidade da sub bacia;

- Utilizar dados disponíveis sobre a qualidade hídrica e relacioná-los aos mapas para melhor abrangência de interpretação e compreensão do cenário atual no entorno do reservatório Jaguari Jacareí.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A complexidade do Sistema de Abastecimento Cantareira

Apesar do sistema estar localizado integralmente em territórios paulistas, recebe-se água de uma bacia hidrográfica de gestão federal. Por isso, a Agência Nacional de Águas (ANA) juntamente ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) fazem seu acompanhamento por meio de dados de níveis da água, vazão e volume armazenado, além de definirem, dentro de suas atribuições legais, as normas e regras que determinam sua operação que, por sua vez, é realizada pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

O sistema é muito mais amplo que seus reservatórios que representam apenas 5% da área total. Formado por 2.278 quilômetros quadrados, sua área total abrange 12 municípios, sendo quatro no Estado de Minas Gerais (Camanducaia, Extrema, Itapeva e Sapucaí-Mirim) e oito em São Paulo (Bragança Paulista, Caieiras, Franco da Rocha,

Joanópolis, Nazaré Paulista, Mairiporã, Piracaia e Vargem). Portanto, cerca de 55% do sistema faz parte do Estado de São Paulo e 45% de Minas Gerais. A água que abastece o Sistema Cantareira também chega às regiões metropolitanas de Campinas e Piracicaba, através dos rios Atibaia, Jaguari e Piracicaba. Neste cenário, a sub bacia Jacaréi insere-se, majoritariamente em territórios paulistas.

A sub bacia do rio Jacaréi é considerada um local de extrema importância para o abastecimento de São Paulo, visto que compõe a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 05, sendo uma grande potência econômica que abrange a Região Metropolitana de Campinas e centros industriais, concentrando maiores demandas para abastecimento à jusante do Sistema Cantareira. Este sistema, considerado um dos maiores sistemas de produção de água do mundo, foi implantado em duas etapas, sendo que a primeira foi constituída pela construção das barragens Paiva Castro no rio Juqueri (Bacia do Alto Tietê com regularização de 2 m³/s), Cachoeira e Atibainha (Bacia do rio Piracicaba e regularização de 9 m³/s) com início da operação desses reservatórios em 1973, 1974 e 1975, respectivamente, fornecendo uma vazão de 11 m³/s para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A segunda etapa iniciou-se na década de 70, compreendendo a construção das barragens dos rios Jaguari e Jacaréi (Bacia do Rio Piracicaba com regularização de 22 m³/s) e início da operação em 1982, conferindo ao sistema a capacidade total de 33 m³/s, de acordo com Whately e Cunha (2007). A Figura 1 apresenta a interação dos reservatórios hídricos no sistema.

Figura 1 - Estrutura de funcionamento do Sistema Cantareira.



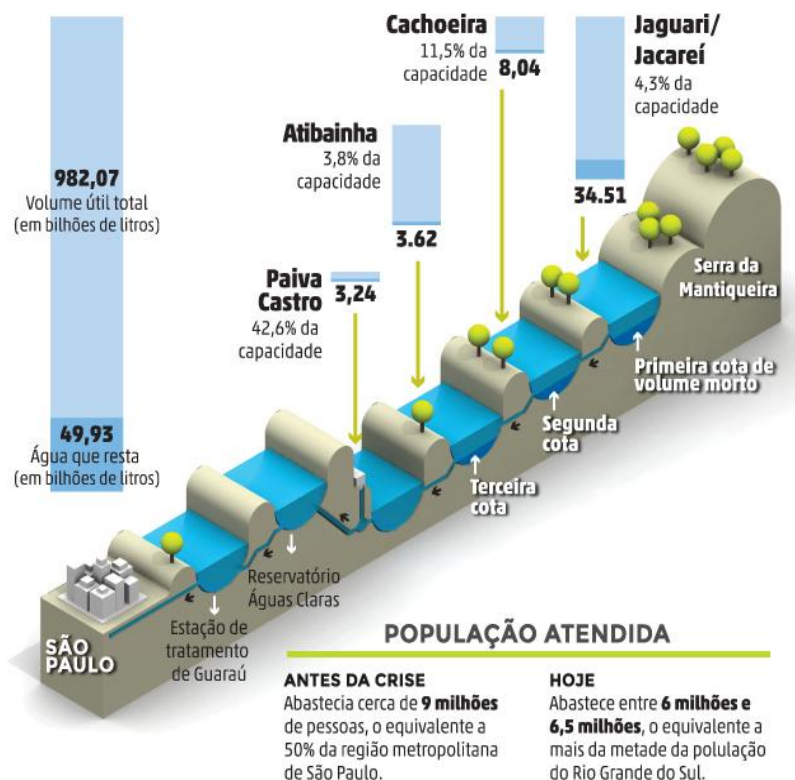
Fonte - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2023, p. 01)

Evidencia-se, portanto, os estudos sobre as características ambientais, interações e consequências dos usos dos espaços que interferem diretamente na qualidade e quantidade de água no reservatório Jaguari Jacaré.

Quando inserido em territórios paulistas, os rios Jaguari e Jacaré são represados, formando um reservatório integrantes no sistema produtor de água. O fato do Estado de São Paulo ter maior abrangência de coleta e tratamento de esgoto com relação aos outros Estados brasileiros demanda mais pontos para controle da qualidade de água, além da necessidade de pesquisas atualizadas, sendo desenvolvidas em meio às vertentes de monitoramento feitos pela CETESB.

Os recursos hídricos de um sistema de abastecimento possuem gestão organizada por bacias hidrográficas e suas complexidades se defrontam com a configuração geográfica. Este cenário necessita gestão compartilhada administração pública, órgãos de saneamento, instituições vinculadas à atividade agrícola, controle ambiental e a cada um destes setores cabe uma divisão administrativa distinta da bacia hidrográfica, conforme Porto (2004). Define-se, portanto, que o sistema foi construído para permitir a reversão de água de bacias hidrográficas interligadas como um reforço ao abastecimento público. A Figura 2 representa essa dinâmica.

Figura 2 - Esquema da reversão de água do Sistema Cantareira.

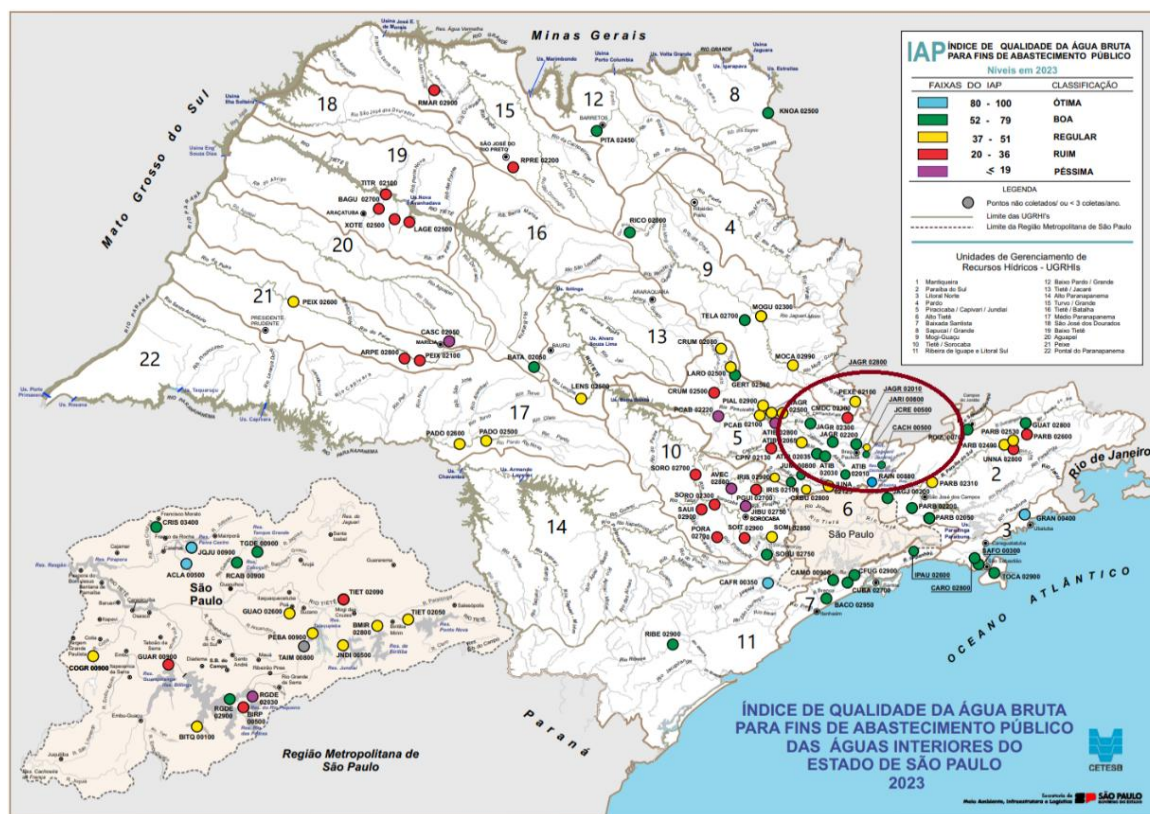


Fonte - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2023, p.01)

Nota-se, pelo esquema acima, que as bacias hidrográficas do Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) possuem o desafio de abastecer mais de 14 milhões de pessoas, sendo 5,8 milhões localmente e 9 milhões na RMSP. As bacias do PCJ, neste contexto, cobrem uma área de 15.377 km² e abrigam cerca de 6 milhões de pessoas em 76 municípios dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, dos quais mais de 96% vivem em áreas urbanas e produzem cerca de 7% do Produto Interno Bruto do país.

Assim, destaca-se a CETESB como sendo a organização de papel fundamental no monitoramento e controle da qualidade do Sistema Cantareira, responsável por garantir que a água utilizada para abastecimento público atenda aos padrões de potabilidade para o consumo humano. A Figura 3 apresenta os pontos de monitoramento da companhia.

Figura 3 - Pontos de monitoramento da CETESB.



Fonte - Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (CETESB, 2025, p. 01)

Dito isto, realiza-se o controle da qualidade da água de maneira a coletar amostras e analisar diversos dados que verificam se a água está dentro dos padrões estabelecidos pela legislação. Este monitoramento envolve análises de uma série de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, divulgando, gratuitamente, os resultados em plataformas online, permitindo a população acompanhar a qualidade da água de cada ponto no sistema.

3.2 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

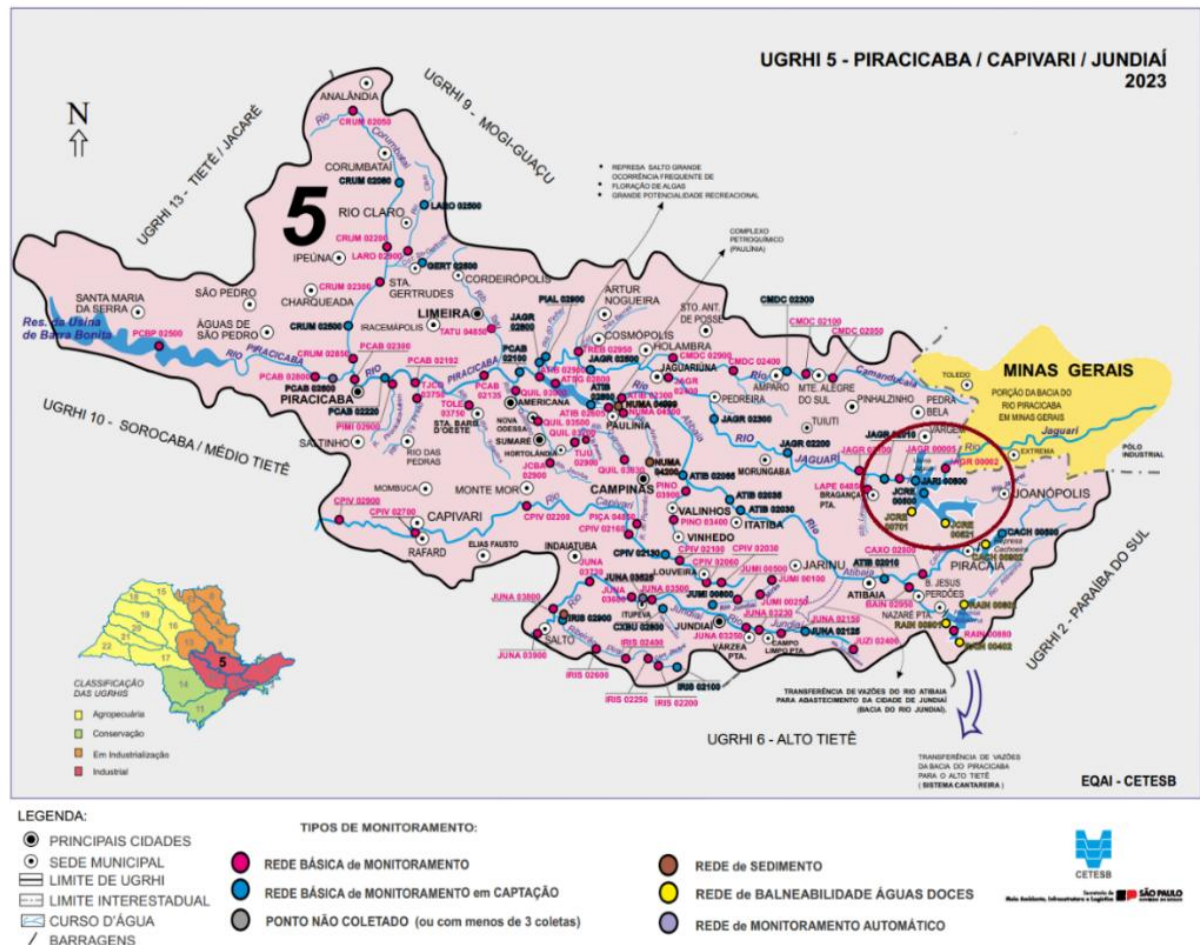
A Lei Estadual Paulista Nº 7.663 de 1991 estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH) bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SigRH), no Plano Estadual de Recursos Hídricos, constando-se 22 Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs). As unidades possuem dimensões e características que permitem e justificam todo gerenciamento descentralizado dos recursos hídricos. Com essa realidade, é imprescindível que a bacia hidrográfica seja tomada como referência nos estudos e planejamentos dos recursos hídricos. Em alguns casos, pode ser que uma determinada bacia tenha mais de uma UGRHI envolvida em sua gestão.

Essa divisão de unidades leva em consideração critérios hidrológicos, ambientais, socioeconômicos e administrativos, além de ser motivada pela necessidade de viabilizar e otimizar fluxos técnicos de forma que as divisões por bacia hidrográfica e por UGRHI, coexistissem na Política Estadual. É por isso que Bernardi *et al.*, (2012) expõe em seu trabalho que, muitas vezes, as divisões das bacias hidrográficas não levam em conta apenas aspectos físicos, mas também políticos.

A sub bacia do rio Jacaré, unidade do presente estudo, está inserida na UGRHI 05 que, em foco, apresenta três conjuntos litológicos principais: terrenos cristalinos ígneometamórficos (substrato das bacias cenozóicas, com idades desde o Arqueano até o Cenozóico), rochas sedimentares cenozóicas (Formações Caçapava e Tremembé) e terrenos sedimentares mais recentes, predominantemente aluvionares. Nesta UGRHI destacam-se, também, bens minerais de emprego imediato na indústria de construção civil, destacadamente representado pela areia. Seu potencial de areia é relativo aos depósitos aluvionares recentes na planície fluvial do rio Paraíba, principalmente em seu trecho meandrante entre Jacaré e Cachoeira Paulista, onde é ainda mais alto.

A UGRHI 05 desempenha um papel fundamental no abastecimento de água para a RMSP, atendendo residências, indústrias, comércios e atividades agropecuárias. Além disso, possui grande relevância econômica, concentrando importantes polos industriais, tecnológicos e logísticos do Brasil. A gestão eficiente dos recursos hídricos nesta região é, portanto, essencial para garantir a sustentabilidade ambiental, o desenvolvimento econômico e o bem-estar da população. A unidade em questão abrange a bacia hidrográfica PCJ, localizada na porção leste do Estado de São Paulo (Figura 4) e sua área total é de aproximadamente 15.300 km², distribuída por 76 municípios paulistas, além de influenciar direta ou indiretamente áreas nos estados de Minas Gerais e Paraná.

Figura 4 - UGRHI 05 Piracicaba/Capivari/Jundiá 2023.



Fonte - Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (CETESB. 2025, p. 01)

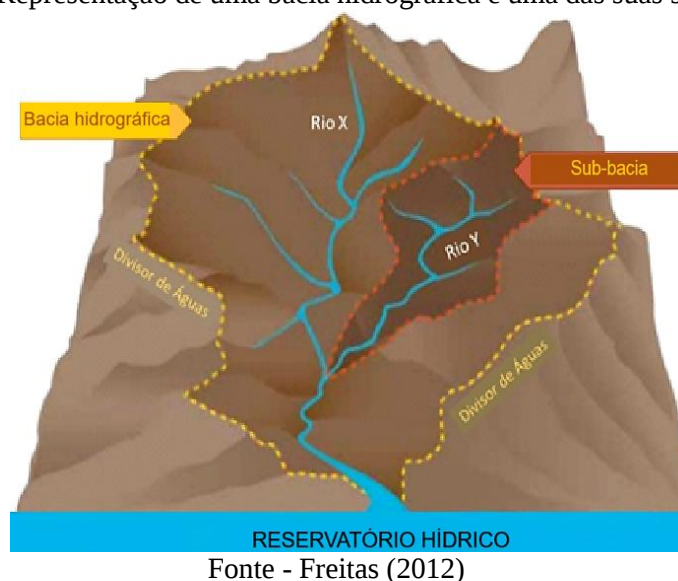
Além disso, a economia local é diversificada, com forte presença dos setores industrial, agroindustrial e de serviços, além de ser sede de importantes instituições de ensino e pesquisa, como a Unicamp (em Campinas) e a Esalq/USP (em Piracicaba). Essa diversidade, principalmente a econômica, intensifica a pressão sobre os recursos hídricos, exigindo uma gestão eficiente e integrada para garantia do abastecimento e da qualidade da água. Por isso, a região conta com o Comitê PCJ sendo uma instância colegiada e deliberativa, composta por representantes do poder público, da sociedade civil e dos usuários da água.

A atuação integrada entre os diversos atores sociais, o fortalecimento dos comitês de bacia e a aplicação eficaz dos instrumentos de gestão na região da sub bacia Jacaré são fundamentais para enfrentar os desafios atuais e futuros. Por isso, a experiência da UGRHI 05 demonstra que a governança participativa, aliada ao planejamento técnico, pode ser uma ferramenta eficaz para a promoção do uso sustentável da água.

3.3 Fundamentos e conceitos de bacias hidrográficas

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída. Compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (Tucci, 1997). Por definição, é uma área fisiográfica, delimitada por divisores topográficos, na qual toda a água que incide, converge para o mesmo ponto, chamado de exutório (Figura 5).

Figura 5 - Representação de uma bacia hidrográfica e uma das suas sub bacias.



Assim sendo, o exutório normalmente incide sobre um rio, que, consequentemente, drena toda a água precipitada nas áreas à sua montante. Logo, fica claro que qualquer característica apresentada nas áreas de contribuição ao exutório podem influenciar na qualidade e quantidade de água que passa por ele (Freitas, 2012). Igualmente, qualquer modificação imposta às áreas de montante gera impactos positivos ou negativos não só nestas áreas, mas também em toda área à jusante.

Como apresentado por Castro *et al.* (2013), a questão ambiental de abastecimento de água entra na pauta que defende a importância de uma formação de análises multidisciplinares que realizam estudos mais técnicos e em pontos mais críticos. Justifica-se, neste caso, a interação entre conhecimentos específicos da área ao apresentarem metodologias para o cruzamento de informações geoespaciais fundamentais para construir estudos da dinâmica geomorfológica e proposta de atividades para ambientes mais equilibrados, sustentáveis e condizentes com a realidade natural do espaço.

O manejo inadequado das terras e a falta de ações governamentais implicam em perdas significativas de solo, matéria orgânica, nutrientes, biodiversidade, entre outras complicações que prejudicam o equilíbrio dos sistemas hídricos em bacias. De acordo com Vaeza *et al.* (2008), analisar integralmente as atividades de uma bacia constitui auxílio à inserção ambiental de projetos de desenvolvimento e volta-se à modelagem da bacia e hierarquização de trechos, cenários e empreendimentos que dependem da porção hídrica.

Fontes e Barbassa (2003) identificam que, à medida que a ocupação urbana aumenta ao redor de uma bacia hidrográfica, fica-se cada vez mais evidente a verificação do expressivo aumento de áreas impermeabilizadas e com isso, o tempo de recorrência das precipitações tende a reduzir. Deste processo, resulta-se a redução de perdas dos recursos por infiltração, aumento do volume de forma desordenada, alta velocidade do escoamento superficial, problemas de drenagem, poluição da água, entre outras complicações (Vaeza *et al.*, 2008).

Das complicações destacam-se os impactos da agricultura nos recursos naturais como em solo e água por consequência do aumento de escoamento superficial, erosão hídrica do solo, alta produção de sedimentos e transferência de elementos químicos até os cursos d'água. A extensão e a magnitude destes processos nas áreas agrícolas afetam diretamente interesses econômicos, ambientais e sociais, não só para os produtores rurais, mas também para a sociedade urbana, já que estão inseridos dentro de uma mesma área fisiográfica. Os indicativos alertas destes impactos podem vir do depauperamento da qualidade da água, desbalanço hidrológico como secas e enchentes, assoreamento de reservatórios, saúde da população, aumento nos custos de produção e susceptibilidade às estiagens (Justino, 2003).

Sendo assim, estudos recentes utilizam geotecnologias e imagens orbitais de alta resolução espacial para a obtenção das classes de uso e ocupação, definindo técnicas de Sensoriamento Remoto para subsidiar análises sobre o ambiente terrestre através do registro das interações de radiação eletromagnética e substâncias componentes na superfície em suas mais diversas manifestações. Assim, destaca-se que o conhecimento da distribuição espacial das formas de uso e ocupação do solo necessita de informações detalhadas que possam ser obtidas com periodicidade devido ao caráter extremamente dinâmico das bacias hidrográficas (Foresti e Hamburger, 1995).

Neste âmbito, as imagens orbitais colaboram com resultados precisos que visam aplicação da identificação dos elementos que compõem bacias hidrográficas. Portanto, essa análise sobre a classificação do uso do solo é fundamental no conhecimento da dinâmica

dos ambientes, assim como no desenvolvimento de técnicas voltadas para manutenção das informações espaciais.

3.4 Informações geomorfológicas das bacias hidrográficas

Estudos geomorfológicos em bacias hidrográficas trazem mecanismos de compreensão em relação ao relevo e escoamento da água, o que permite administrações mais eficientes dos recursos e prevenção de impactos ambientais. Destacam-se como análise de um conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formadas nas regiões mais altas do relevo por divisores de água, onde as águas da chuva ou escoam superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltram no solo para formação de nascentes e do lençol freático (Barrella, 2001).

A constituição de análises geomorfológicas tendo a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento não é recente. Há tempos hidrólogos reconhecem ligações entre características físicas e quantidade de água chegando aos corpos hídricos. Por isso limnólogos consideram que as características dos corpos d'água refletem diretamente nos movimentos da drenagem. Neste sentido, as abordagens de gerenciamento ambiental utilizando bacias e sub bacias hidrográficas como unidades de estudo foram se intensificando uma vez que apresentam características biogeofísicas que denotam sistemas ecológicos e hidrológicos relativamente coesos (Dasmann *et al.*, 1973).

Por esta razão, ressalta-se a necessidade de compreensão da dinâmica natural da sub acia, com destaque em suas características geomorfológicas como base de entendimento de como o relevo influencia no escoamento da água, na formação de cursos naturais e na atividade dos sedimentos em uma bacia hidrográfica. Destaca-se, por este modo, a gestão dos recursos hídricos que permite identificar áreas mais suscetíveis a inundações, erosão ou secas e projetar medidas de prevenção e correção, evitando atividades que possam degradar o meio ambiente ou comprometer o escoamento da água. Ainda, Lima e Zakia (2000, p.33), acrescentam que: “Ao conceito geomorfológico da bacia hidrográfica, uma abordagem sistêmica se faz necessária. Para esses autores as bacias hidrográficas são sistemas abertos, que recebem energia através de agentes climáticos e perdem energia através do deflúvio, podendo ser descritas em termos de variáveis interdependentes, que oscilam em torno de um padrão, e desta forma, mesmo quando perturbadas por ações antrópicas, encontram-se em equilíbrio dinâmico.”

Para acrescentar, completa-se a ideia de que as bacias são consideradas unidades naturais onde os componentes da natureza, como relevo, solos, subsolo, flora e fauna, bem como os componentes sociais, atividades econômicas e político-administrativas devem estar atrelados. Este tipo de análise permite avaliar o impacto das atividades humanas em ambientes que devem ser preservados e entender a complexa relação entre a geomorfologia e corpos hídricos afim de garantir uma boa gestão sustentável e conservação do meio ambiente.

3.5 Estudos sobre uso e ocupação da terra

As bacias hidrográficas captam, armazenam e escoam a água da chuva para um curso d'água principal, como rios e lagos. Elas desempenham um papel essencial no equilíbrio ecológico, na disponibilidade hídrica e na manutenção da biodiversidade. No entanto, essas interações que ocorrem dentro das bacias e no entorno de reservatórios hídricos não se restringem apenas a fatores físicos e biológicos, mas também, a fatores sociais, econômicos e culturais da região.

A interferência antrópica nas sub bacias, por este motivo, pode levar à redução da disponibilidade de água potável, perda da biodiversidade, aumento da vulnerabilidade a desastres naturais como enchentes e deslizamentos, além de conflitos pelo uso da água entre diferentes setores da sociedade. De acordo com Padua (2011), estes fatores, dependendo de como são distribuídos, acabam colaborando para a melhoria ou redução da qualidade de cada localidade causando transformações significativas comprometendo a sustentabilidade.

As consequências decorrentes dos usos e processos urbanos moldam uma nova configuração ao sistema ambiental. É neste cenário que o aumento desordenado da urbanização reduz a disponibilidade da água, impactando na qualidade do recurso natural e ameaçando os ecossistemas aquáticos (Hong, *et. al.*, 2007). Além disso, ressalta-se a perda da permeabilidade do solo oriunda de processos intensos de urbanização sem planejamento associados às alterações na hidrologia, nutrientes e sedimentos, que conseqüentemente, degradam o fluxo da água, fazendo com que haja perda significativa das funções do solo.

O processo de uso e ocupação da terra, segundo Freitas (2011) é caracterizado por indicar a distribuição geográfica de classes identificadas através de padrões homogêneos de cobertura terrestre, ou seja, é a espacialização de uma área de ocupação humana. Para contemplar este conceito, o Instituto Brasileiro de Geografia Estatística esclarece que: “[...]”

O levantamento da cobertura e uso da Terra indica a distribuição geográfica da tipologia de uso, identificada por meio de padrões homogêneos da cobertura terrestre. Envolve pesquisas voltadas para interpretação, análise e registro de observações da paisagem, concernentes aos tipos de uso e cobertura da terra, visando sua classificação e espacialização por meio de cartas.” (IBGE, 2006, p.36).

Neste sentido, as geotecnologias, mais especificamente o geoprocessamento, colaboram de forma significativa para as análises de uso e ocupação do solo ao permitir a coleta, tratamento e interpretação de dados georreferenciados, fornecendo uma visão espacial detalhada e precisa das diferentes formas de utilização da terra. Segundo Hong (2007), por meio de técnicas como o sensoriamento remoto e o uso de SIG é possível identificar, mapear e monitorar as transformações no território ao longo do tempo, como expansão urbana, desmatamento e conversão de áreas naturais em agrícolas. Essas informações são fundamentais para o planejamento urbano e ambiental de uma sub bacia hidrográfica, contribuindo para gestão adequada dos recursos naturais, controle do crescimento desordenado e formulação de políticas públicas sustentáveis.

Dessa maneira, para obter a concordância entre a verdade terrestre e o mapa de uso da terra obtido, realiza-se o cálculo da matriz de erros e do coeficiente kappa-k (Congalton, Green, 2009), conforme a fórmula abaixo:

$$k = \frac{X \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{X^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}$$

Sendo:

X = número total de observações da matriz de erros;

r = número de categorias presentes na matriz de erros;

X_{ii} = elementos da diagonal principal;

X_{i+} = total da linha para uma dada categoria;

X_{+i} = total da coluna para uma dada categoria.

Mapeando, assim, o uso e ocupação do solo e verificando os resultados obtidos durante o geoprocessamento, sobressaem-se informações de alterações espaciais, podendo-se detectar as modificações na configuração ambiental da paisagem e transformações sobre as funcionalidades de um sistema. Justifica-se, desta forma, o conhecimento das interferências ocorridas na cobertura do solo, devendo serem analisadas com maior atenção para controle da capacidade de armazenagem, de transferências no ciclo hidrológico e de

atividades que trazem sérios prejuízos ambientais, conforme Dechen (2015).

3.6 Exatidão do mapeamento de uso e ocupação

De acordo com Congalton e Green (2009), a verificação da confiabilidade da classificação das imagens para detectar a realidade do terreno deve ser baseada numa matriz de confusão. Essa matriz é formada por um conjunto de números arranjados em um quadrado delimitado por linhas e colunas. Este arranjo define o número de unidades de cada classe amostrada. Apresenta-se na Tabela 1 a maneira como é organizado o cálculo de dados desta matriz.

Tabela 1- Representação matemática da matriz de confusão.

Classificação	Dados de referência				Total nas linhas n_{i+}
	1	2	...	c	
1	X_{11}	X_{12}	...	X_{1c}	X_{1+}
2	X_{21}	X_{22}	...	X_{2c}	X_{2+}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	...	$\vdots$	$\vdots$
c	X_{c1}	X_{c2}	...	X_{cc}	X_{c+}
Total nas colunas n_{+i}	X_{+1}	X_{+2}	...	X_{+c}	n

Fonte - Adaptada de Landis e Koch (1977).

A partir da matriz de confusão, popularmente chamada de matriz de erros, obtém-se três estatísticas de avaliação da exatidão do mapeamento: Exatidão Global, Índice Kappa e Coeficiente Tau. Para o cálculo da exatidão global foi utilizada a seguinte expressão:

$$Po = \frac{\sum_{i=1}^c X_{ii}}{N}$$

Onde N é o número total de unidades amostrais; X_{ii} , os elementos da diagonal principal; c, o número de classes presentes na matriz de erro; i, o número de colunas; e i, o de linhas. O índice Kappa, proposto por Chambers e Hastie (1992), utiliza as seguintes expressões:

$$K = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad Pc = \frac{\sum_{i=1}^c X_{i+} * X_{+i}}{N^2}$$

Onde: K é o valor do índice Kappa; Po é a exatidão global; Pc é a proporção de unidades que concordam por casualidade; c, o número de classes presentes na matriz de erro e X_{i+} e X_{+i} , os totais marginais da linha i e da coluna i, respectivamente; e N, o

número total de unidades amostrais contempladas pela matriz. A interpretação do índice Kappa é feita utilizando a Tabela 2.

Tabela 2 - Interpretação do índice kappa.

VALOR KAPPA	QUALIDADE DO MAPA
< 0,00	Péssima
0,00 - 0,20	Ruim
0,21 - 0,40	Razoável
0,41 - 0,60	Moderada/Boa
0,61 - 0,80	Muito Boa
0,81 - 1,00	Excelente

Fonte - Adaptada de Landis e Koch (1977).

Onde: K é o valor do índice Kappa; Po é a exatidão global; Pc é a proporção de unidades que concordam por casualidade; c, o número de classes presentes na matriz de erro e Xi+ e X+i, os totais marginais da linha i e da coluna i, respectivamente; e N, o número total de unidades amostrais contempladas pela matriz. A interpretação do índice Kappa é feita utilizando a Tabela 2.

Ma e Redmond (1995) propuseram a metodologia, por eles denominada Tau, para avaliar a exatidão do mapeamento. Para o cálculo do Tau foi utilizada a expressão que segue abaixo:

$$T = \frac{Po - \frac{1}{m}}{1 - \frac{1}{m}}$$

Onde: T é o coeficiente Tau; Po é a exatidão global e m, o número de classes.

3.7 Aplicações de imagens SRTM e MDE

Conforme Egg (2012), existem diversas denominações para conceituar os modelos que representam tridimensionalmente os diferentes fenômenos que ocorrem no espaço geográfico. O Projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) faz parte de um programa que visa examinar a superfície terrestre, dos oceanos e da atmosfera como um sistema integrado. Os dados obtidos nesta missão são resultado de um projeto cooperativo com o objetivo de elaborar o Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando a interferometria e possibilitando a geração do mapa hipsométrico. Este material é capaz de

identificar o comportamento de toda superfície terrestre e tipos de relevo, assim como características que possuem papel fundamental na regulação da distribuição do fluxo de água, energia e atividades nas bacias, sendo essencial para a geração do mapa da declividade. A declividade, por sua vez, é importante para a modelagem do escoamento, uma vez que a velocidade de fluxo depende desta variável.

Em geral, a declividade consiste na razão entre a diferença das altitudes dos pontos extremos de um curso d'água e o comprimento desse curso, podendo ser expressa em porcentagem. Logo, analisa-se a diferença entre elevação máxima e elevação mínima, resultando na amplitude altimétrica de uma região. Em função disto, através de manipulação numérica do mapa de declividade obtém-se informações necessárias para análise da elevação do terreno (Paiva, 2001).

Para completar as aplicações de imagens SRTM, destaca-se o mapa de unidades do relevo, o qual, a partir da proposta de Ross (1992), tem como base técnicas aplicadas no Projeto RADAMBRASIL, focando-se no 4º táxon, averiguando-se as formas de modelado, bem como distâncias interfluviais, porém delimitando padrões de relevo verificados no processo de mapeamento. Para essa análise, necessita-se do cruzamento de informações das informações associadas à hipsometria, declividade e relevo sombreado com o intuito de identificar os padrões das formas que prevalecem em determinadas áreas.

Na delimitação inicial dos modelados e formas, bem como na definição das unidades de relevo, consideram-se as etapas relacionadas à metodologia de IBGE (2009), aferindo-se os padrões a partir das texturas e a profundidade das incisões a partir dos modelos digitais SRTM, sendo os limites elaborados manualmente em *software* de geoprocessamento.

3.8 Parâmetros de análise da fragilidade

As diferenças nos atributos físicos e químicos de uma região hidrográfica explicam, em muitos casos, o fato de alguns solos erodirem mais que outros, mesmo estando expostos a uma mesma condição ambiental. É neste âmbito que considera-se a ideia da fragilidade ambiental determinar a vulnerabilidade natural de um ambiente, enquanto a fragilidade potencial ser a resistência à vulnerabilidade associada aos graus de proteção que os diferentes tipos de uso e cobertura vegetal exercem. Logo, para quantificar estes fatos, Kawakubo *et al.* (2005) aponta a utilidade das técnicas de geoprocessamento na estimativa das fragilidades e potencialidades.

Ao iniciar os conceitos sobre parâmetros e como são analisados em relação à fragilidade de ambientes naturais, Ross e Moroz (1997) publicaram o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo indicando classes de fragilidade ambiental segundo tipos de solos e de dissecação. A dissecação do relevo pode ser de dois tipos: agradação (terraços fluviais; planícies marinha, fluvial e intertital) e denudação (topos convexos, agudos e tabulares). A numeração que acompanha os três tipos de denudação indicam o grau da erosão sofrido pelo relevo. Outro elemento que interfere no processo erosivo é o tipo de uso do solo e a cobertura vegetal. Além de proteger o solo contra a perda de material, o uso adequado e a cobertura vegetal protegem o solo direta e indiretamente contra os efeitos modificadores das formas do relevo.

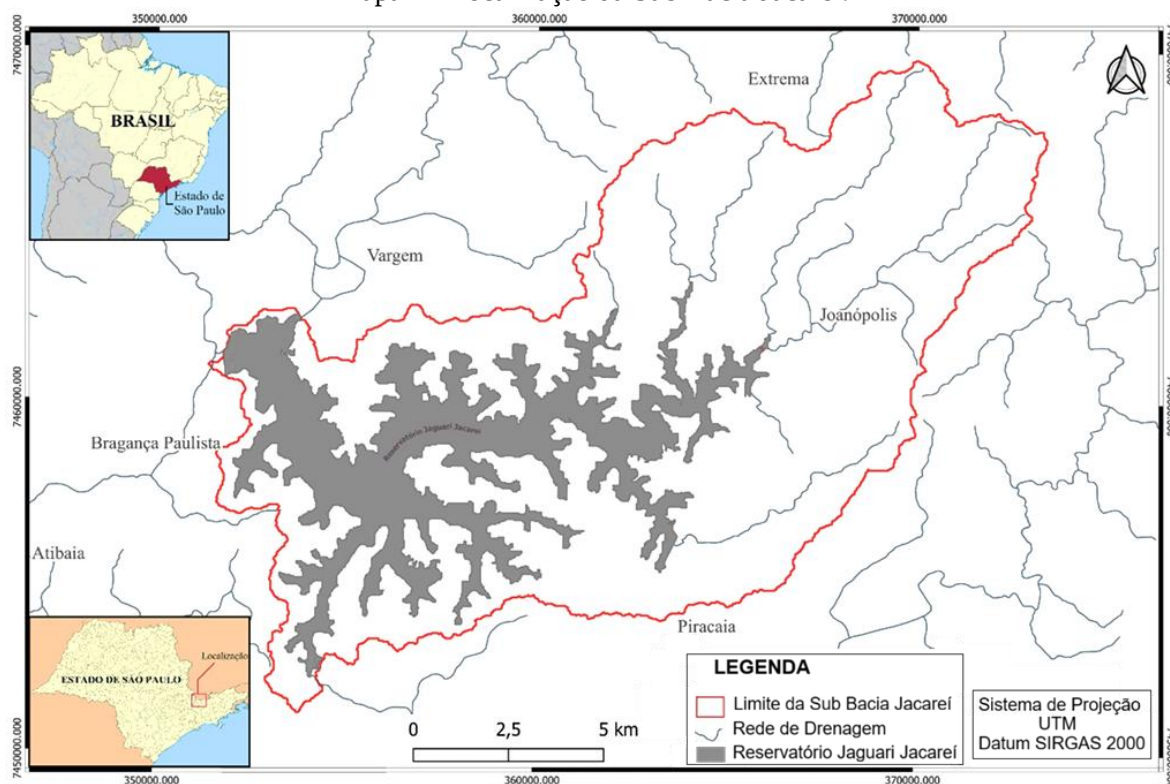
Santos (2015) também apresenta relações entre fragilidade potencial e vulnerabilidade na susceptibilidade aos riscos objetivando-se demonstrar em que medida dos parâmetros da vulnerabilidade social se combinam na susceptibilidade aos riscos ambientais. As diferenças nos atributos físicos e químicos explicam, em muitos casos, o fato de alguns solos erodirem mais que outros mesmo estando expostos a uma mesma condição ambiental. Ainda, outro elemento que interfere no processo erosivo é o tipo de uso do solo e a cobertura vegetal. Além de proteger o solo contra a perda de material, o uso adequado e a cobertura vegetal protegem o solo direta e indiretamente contra os efeitos modificadores das formas do relevo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área

Os recursos hídricos desta pesquisa compõem um sistema aberto de abastecimento e por este motivo, sua qualidade depende de vários fatores e elementos que interferem, tanto associando-se aos impactos antrópicos, quanto à composição natural ecossistêmica. Assim, tendo como exemplo os componentes que podem impactar em sua qualidade, destaca-se a importância da localização em que o reservatório está inserido. Para tal conhecimento, o estudo foi desenvolvido no entorno da sub bacia hidrográfica do rio Jacaréi o qual, juntamente ao rio Jaguari, abastece um importante reservatório de água localizado no Município de Bragança Paulista, São Paulo, conforme apresenta o Mapa 1.

Mapa 1 - Localização da Sub Bacia Jacareí.



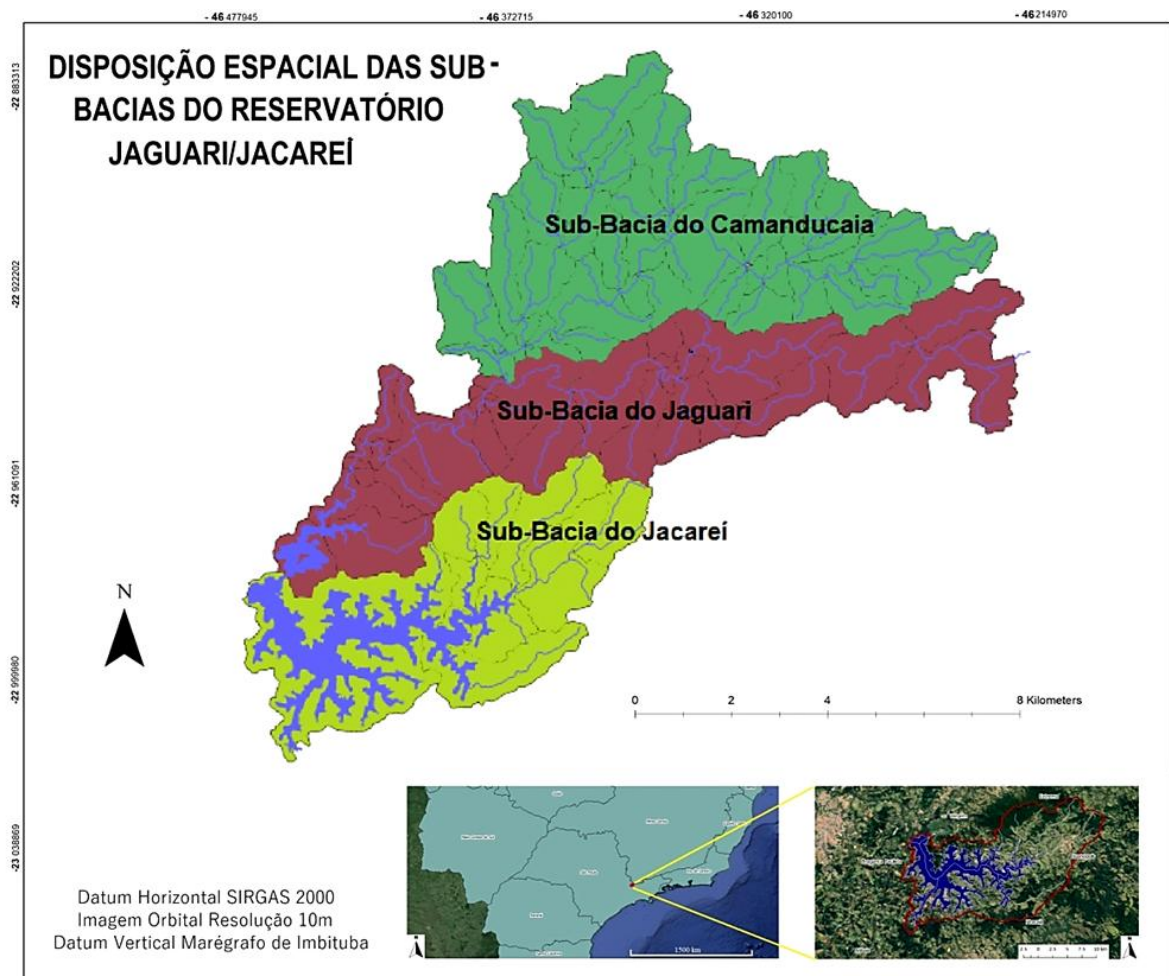
Fonte – Autoria própria. Dados: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020).

É importante citar que o afluente Jacareí possui características estratégicas ambientais e de localização as quais permitem a intensificação do desenvolvimento agrícola, industrial e populacional, acentuado pelo crescimento econômico. Tais fatores provocam elevadas modificações físicas, biológicas e químicas no local.

Conforme estudos de CBH-PCJ (2001), as nascentes dos rios Jaguari e Jacareí encontram-se no Estado de Minas Gerais. O rio Jaguari, o qual nasce nos Municípios de Sapucaí-Mirim, Camanducaia e Itapeva, recebe os afluentes dos rios Camanducaia e Jacareí. Ambos são pertencentes à Bacia do Rio Piracicaba, passando há algumas décadas, por substituição da vegetação original do entorno de Cerrado e Mata Atlântica, por diversos usos agrícolas, predominando, principalmente, pastagens, pequenos cultivos familiares e plantações de eucalipto.

Pelo fato da grande extensão da bacia hidrográfica que alimenta o reservatório Jaguari Jacareí e para maior refinamento do mapeamento e estudo da área, optou-se por metodologias mais aprofundadas e específicas as quais alinham-se melhor quando priorizada sub bacia, ou seja, uma área em maior escala. Neste contexto, apresenta-se, no Mapa 2, a estrutura das sub bacias hidrográficas que abastecem o reservatório.

Mapa 2 - Estrutura das relações entre as sub bacias interligadas ao reservatório Jaguari Jacareí.



Fonte - Autoria própria.

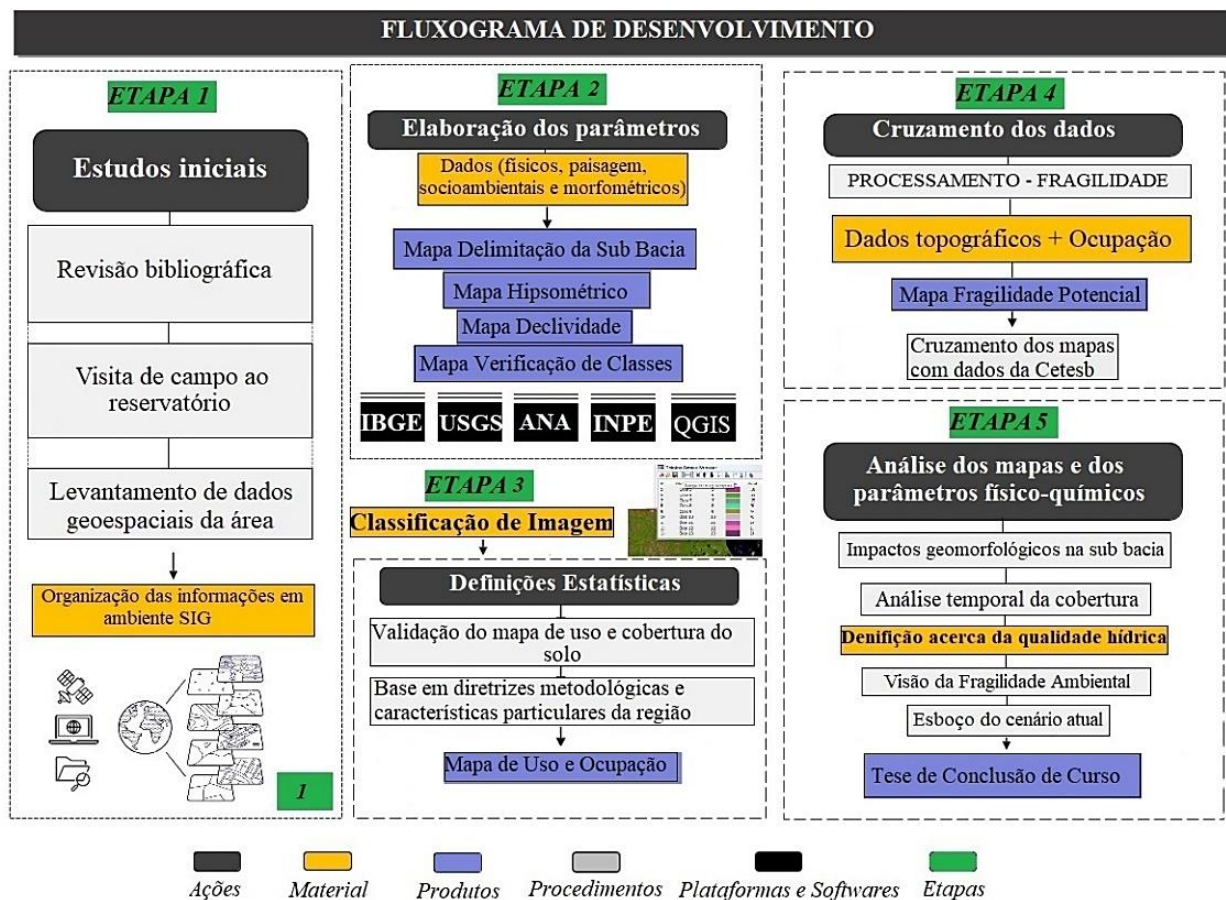
Neste cenário apresenta-se a RMSP, abastecida pelos mananciais dos reservatórios hídricos Billings, Guarapiranga, Alto Tietê e um dos maiores do mundo, o Sistema Cantareira (Whatley e Cunha, 2007). Segundo a SABESP (2010), este sistema é o maior produtor de água da região, utilizando cerca de $33\text{m}^3/\text{s}$ de água ao abastecimento para, aproximadamente, 46% da população. É formado pelos reservatórios Jaguari Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro, os quais estão conectados por túneis subterrâneos e canais e formam o Sistema Equivalente do Cantareira.

Em consequência disto, eleva-se ainda mais a justificativa do interesse nesta área, em paralelo com pesquisas realizadas por Pompêo *et al.* (2021), que estudou alguns dos reservatórios do Sistema Cantareira, em São Paulo, Brasil empregando procedimentos de sensoriamento remoto para analisar aspectos biológicos da água, somando à comunidade informações ambientais da sub bacia Jacareí.

4.2 Fluxograma do trabalho

Para facilitar a compreensão da estrutura e da lógica desta pesquisa, apresenta-se, na Figura 6, um fluxograma que sintetiza as etapas desenvolvidas ao longo desta tese. O diagrama ilustra, de forma clara e sequencial, os principais procedimentos metodológicos, caminhos teóricos percorridos e as fases de análises adotadas, permitindo uma visualização integrada do processo investigativo.

Figura 6 – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa.



Fonte – Autoria própria.

Nota-se o esquema foi subdividido em ações como material, produtos, procedimentos, plataformas e *softwares* para melhor compreensão. Assim, é destacado o possível encadeamento entre a formulação do problema, metodologias, análises dos dados e as conclusões alcançadas, contribuindo para coerência e coesão entre as partes que compõem o trabalho.

4.3 Delimitação da sub bacia com a ferramenta watershed

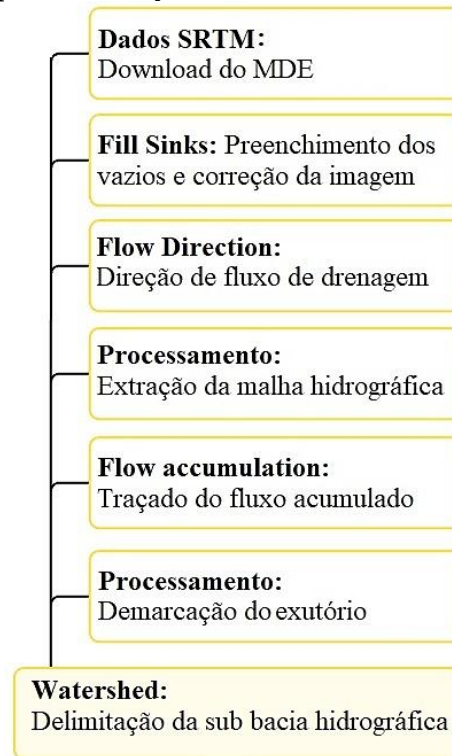
O desenvolvimento de ferramentas de delimitação automática de bacias ou sub bacias têm sido objeto de estudo em diversas áreas. Constitui-se de técnicas implementadas em ambientes SIG promovendo resultados relevantes às áreas ambientais, conforme trabalhos publicados por Turcotte *et al.* (2001).

Os parâmetros hidrológicos extraídos de Modelos Numéricos do Terreno (MNT) mostram-se compatíveis e precisos se comparados a parâmetros obtidos por métodos manuais que demandam mais tempo de processamento. Dessa forma, Walker e Wilgoose (1999) descrevem que o MNT apresenta boa correlação entre a declividade e a área de contribuição, destacando-se pontos de inflexão que marcam o início de captação fluvial, de modo que a rede de drenagem possa ser determinada de maneira fiel e compatível à realidade. Este elemento colabora com o processo de delimitação automática de bacias hidrográficas em SIG pois utilizam-se informações de relevo representadas por uma estrutura numérica de dados correspondente à distribuição espacial da altitude e da superfície do terreno (Rabus *et al.*, 2003).

O MNT neste trabalho desenvolveu-se a partir de um modelo obtido por meio da interpolação das curvas de nível extraídas da imagem obtida através de sensoriamento remoto. Assim, ressalta-se a missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), a qual fora realizada em 2000 a bordo da nave Endeavour e dispõe publicamente seus dados em escala global por intermédio do United States Geological Survey (USGS). Dessa forma, diversas pesquisas, inclusive a presente análise, vem sendo conduzidas com o objetivo de comparar e atualizar informações da superfície terrestre por meio de dados SRTM.

Deste modo, esta etapa do trabalho teve como objetivo a aplicação de metodologias para delimitação automática de bacias, optando pelo uso de dados do projeto SRTM, processados em ambiente SIG e validados na sub bacia hidrográfica Jacareí. Este processo da delimitação automática foi desenvolvido no programa computacional *QuantumGIS 2.18.28 with GRASS 7.6.0*, juntamente com as extensões sendo preenchimento de depressões (“*fill sinks*”), direção de fluxo (“*flow direction*”), fluxo acumulado (“*flow accumulation*”) e delimitação de bacias (“*Watershed*”), conforme Figura 7.

Figura 7 - Etapas para delimitação da Sub bacia Jacareí a partir de dados SRTM.



Fonte - Autoria própria.

A delimitação serviu para identificar as áreas de drenagem dos tributários dos rios principais da sub bacia que abastece o reservatório Jaguari Jacareí, formando uma base topográfica concisa para estudo e gestão da qualidade da água. Essa delimitação foi fundamental para o andamento da pesquisa, uma vez que, permitiu identificar a unidade territorial onde a água se concentra e por consequência de ações antrópicas e geomorfológicas, o local que as cargas poluidoras se acumulam.

4.4 Mapeamento do uso e ocupação do solo

Atravé da identificação em campo dos tipos de uso e ocupação do solo que ocorrem na sub bacia Jacareí, destacou-se a necessidade de conhecer melhor a dinâmica do local e encontrar melhores referências sobre as relações entre natureza e atividades humanas. Com isso, o uso da terra foi determinado por meio da classificação automática das imagens orbitais com o *semi-automatic classification plugin*, gerada com base no mosaico.

A técnica da classificação automática retolou pequenas amostras de pixels dos dados, como amostras representativas das classes de interesse e a análise foi realizada por meio da extrapolação de amostras-teste para todo o conjunto de dados conforme sugerido por Landgrebe (2002). Essa técnica de interpretação é realizada por meio de análise

multiespectral dos padrões de características como cores, texturas, arranjos conforme proposta do IBGE (2006), sendo que, para isso, extraíram-se padrões de imagem de cada classe já executado para a montagem de um álbum de referência ou chave de classificação.

Após feita a classificação, utilizou-se a metodologia de Ross (1994) para obtenção da fragilidade, considerando-a potencial sob as variáveis de dissecação do relevo, solos, cobertura e, principalmente, ocupação da terra. Somaram-se os valores das atividades detectadas inseridas nos espaços com a fragilidade em cada nível de hierarquia, contribuindo, de modo complementar, para a avaliação entre fragilidade e sustentabilidade ambiental, caracterizando interações relacionadas ao uso dos elementos naturais com a capacidade de resistir à dinâmica imposta na sub bacia Jacareí.

Esta abordagem foi também utilizada em métodos de Santos (2015), nos quais foram estabelecidos graus de suscetibilidade dos ambientes pelo mapa de uso e ocupação, em busca de melhor conhecimento sobre o entorno de sub bacias hidrográficas. Tais procedimentos tornaram-se fundamentais para atender o objetivo geral deste trabalho, uma vez que consiste em analisar a fragilidade juntamente a dados de qualidade hídrica no reservatório.

Por fim, depois de abordadas metodologias disponíveis na literatura sobre os métodos de levantamento para material fidedigno com a realidade de uso e ocupação do solo na sub bacia Jacareí, foi elaborado o mapa em busca de resultados capazes de serem cruzados com informações pontuais. Obteve-se, com isso, uma compreensão em grande escala dos processos históricos e socioeconômicos da região, os quais mostraram-se importantes para o entendimento da formação do território, indicando potencialidades e limitações das unidades ambientais identificadas. Além disto, o estudo sobre o mapa de uso e ocupação do solo ao ser analisado com a fragilidade potencial e com informações qualitativas da água disponibilizadas pela CETESB apresentou resultados que destacaram ainda mais pontualmente os cenários mais críticos, permitindo propostas de visualização espacial e subsídios ao ordenamento territorial.

4.5 Classificação das imagens de sensoriamento remoto

Ressalta-se que o primeiro passo na realização da pesquisa foi a preocupação e cuidado na seleção das imagens orbitais as quais foram escolhidas de acordo com os dados disponíveis no período e na região de interesse. Durante a fase do mapeamento, utilizou-se um conjunto de imagens do satélite Landsat TM 8 órbita 219-76 na data de 18/10/2023,

resolução espacial de 30 metros e disponibilizadas gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As imagens passaram por calibração, normalização radiométrica e correção atmosférica através do algoritmo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) e todos os procedimentos foram realizados no sistema computacional *QuantumGIS* e no *TerraView* 5.7.0, ambos livres.

Antes de realizar a classificação das imagens, foi feito o processo de segmentação, cujo objetivo é reconhecer objetos com as mesmas características do cenário através de parâmetros matemáticos e estatísticos e preparar o material para que fosse feita a supervisão. Logo, a classificação supervisionada, como sendo um procedimento utilizado com maior frequência para análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto, segundo Barbosa *et al.* (2019), utiliza algoritmos para nomear os pixels em uma imagem de forma a representar tipos específicos de cobertura terrestre e caracterizar as classes.

Neste trabalho foi utilizado o Landsat-8/OLI (*Operational Land Imager*) o qual consiste num mosaico gerado e disponibilizado pelo projeto Brazil Data Cube que cobre todo o território nacional. O mosaico utiliza imagens de reflectância de superfície do satélite Landsat-8 e câmera imageadora (ou sensor) OLI. Neste contexto, ressalta-se que os dados Landsat possuem as seguintes faixas espectrais OLI:

- Band 1 Ultra azul (0.433 - 0.453 μm) 30 m (oceanos e aerossóis)
- Band 2 Azul (0.450 - 0.515 μm) 30 m
- Band 3 Verde (0.525 - 0.600 μm) 30 m
- Band 4 Vermelho (0.630 - 0.680 μm) 30 m
- Band 5 Infravermelho próximo (0.845 - 0.885 μm) 30 m
- Band 6 Infravermelho médio 1 (1.560 - 1.660 μm) 30 m
- Band 7 Infravermelho médio 2 (2.100 - 2.300 μm) 30 m
- Band 8 Pancromático (PAN) (0.500 - 0.680 μm) 15 m
- Band 9 Cirrus (1.360 - 1.390 μm) 30 m (nuvens do tipo cirrus)

Existem diversas técnicas de classificação digital para levantamento, análise e monitoramento da paisagem agroflorestal, todas procurando extrair um máximo de informações temáticas das imagens, num tempo computacional mínimo. Antes de iniciar qualquer tipo de tratamento digital, afirma-se que o usuário deve refletir sobre os objetivos do trabalho e estabelecer qual tipo de produto é o mais adequado, relacionando-o

prioritariamente com o nível de estratificação temática e com o tipo de algoritmo classificatório. Portanto, neste trabalho, optou-se pela classificação supervisionada, como citado anteriormente, cujo critério de decisão é da Máxima verossimilhança realizada de maneira a interpretar as imagens TM 8.

Inicialmente as imagens foram transformadas em composição colorida ou Red-Green-Blue (RGB), sendo elas: a banda 3 recebendo a cor Red, a 5 recebendo a cor Green e a 4 recebendo a cor Blue para escolher os alvos de interesse.

O método de classificação por máxima verossimilhança (também conhecido como Maxver) baseia-se no cálculo da distância estatística entre cada pixel e a média dos níveis de cinza da classe previamente definida a partir de amostras de treinamento (Lillesand e Kiefer, 1994). Ainda, neste tipo de classificação, a perspectiva de um dado pixel pertencer a uma das classes predefinidas é calculada por uma função de probabilidade. O cálculo é realizado para o conjunto de classes que intervêm na classificação temática. Em resumo, o pixel foi atribuído àquela classe que maximiza a função de probabilidade. A regra de decisão deste método de máxima verossimilhança pressupõe que as várias classes têm a mesma probabilidade de ocorrência, fato que na prática nem sempre ocorre.

Baseando-se nas pesquisas aplicadas em imagens espectrais utilizadas por Whately e Cunha (2007) e as classificações expostas no Manual Técnico de Uso da Terra, elaborado pelo IBGE (2006), a classificação de imagens por máxima verossimilhança serviu para identificar e categorizar elementos ou objetos em imagens, utilizando-se método estatístico que atribui cada pixel à classe com a maior probabilidade de pertencer.

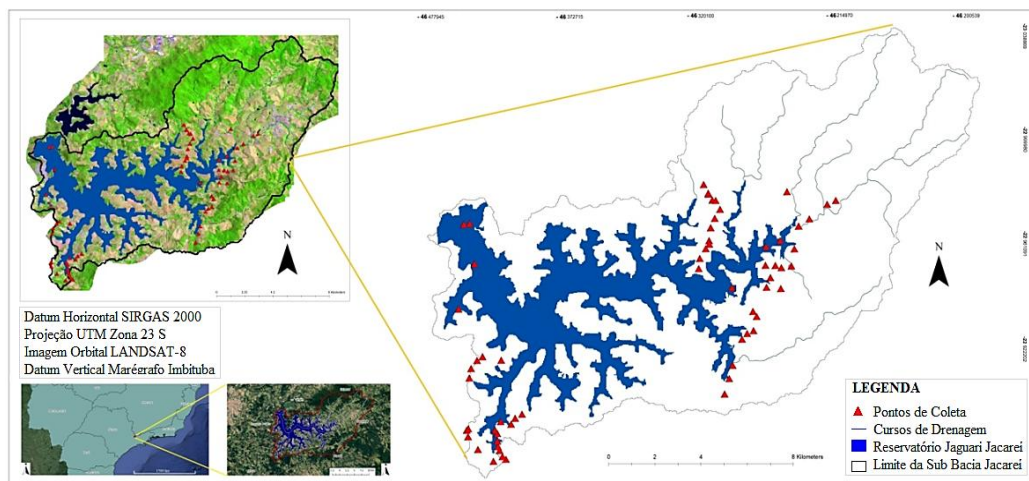
Este processo é especialmente útil em imagens de sensoriamento remoto e outros tipos de imagens multiespectrais, onde diferentes bandas de luz podem indicar diferentes características, funcionando basicamente entre as etapas 1. Definição de Classes, onde define-se um conjunto de classes ou categorias que se pretende identificar na imagem (por exemplo, água, vegetação, solo, construção). 2. Estatísticas das Classes, para serem calculadas as estatísticas (média e desvio padrão) para cada classe em diferentes bandas da imagem, criando um conjunto de "assinaturas espectrais". 3. Probabilidade de Pertencimento, pois para cada pixel, calcula-se a probabilidade de ele pertencer a cada classe, com base nas assinaturas espectrais das classes e nos valores do pixel nas diversas bandas. 4. Atribuição à Classe, onde o pixel é então atribuído à classe com a maior probabilidade de pertencer, criando uma imagem classificada onde cada pixel é rotulado com a sua classe correspondente Lillesand e Kiefer (1994).

Em suma, a classificação por máxima verossimilhança foi o método estatístico

utilizado para identificar e categorizar os elementos nas imagens da sub bacia Jacaréí, atribuindo cada pixel à classe mais provável, com base nas estatísticas das classes e nos valores dos pixels nas diferentes bandas. Com as imagens prontas, definiram-se os tipos de uso e cobertura do solo que foram: 1. Corpos d'água: compreende áreas ocupadas por cursos d'água, brejos, represas, açudes. 2. Agricultura: áreas onde solo estava sendo utilizado por alguma cultura anual ou áreas utilizadas pela pecuária com predominância de espécies gramíneas. 3. Vegetação Nativa: abrange toda a vegetação arbórea nativa da região. 4. Solo exposto e Pastagem: compreende as localidades de solo exposto e sem cobertura vegetal, podendo apresentar o momento da passagem do sensor em áreas de terra onde são cultivadas plantas forrageiras para alimentar animais em determinadas épocas do ano. 5. Áreas urbanizadas que refletem todo e qualquer tipo de ação construída. 6. Cobertura Vegetal.

Depois das classes processadas, apresentam-se juntamente características e definições metodológicas contendo áreas as quais serviram para treinar o classificador MAXVER e gerar o mapa de uso e ocupação do solo. O classificador portanto, através de treinamento, buscou a semelhança dos pixels vizinhos. Vale ressaltar que o Mapa 3 apresenta a localização dos pontos coletados para verificação dos tipos de classes, maior nível de representação de campo e reclassificação da imagem.

Mapa 3 - Levantamento de campo para validação das classes de uso do solo.



Fonte - Autoria própria. Dados: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

De acordo com Ross (1994), dentro desta concepção ecológica o ambiente é analisado sob o prisma da Teoria do Sistema que parte do pressuposto que na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações em equilíbrio dinâmico. Esse

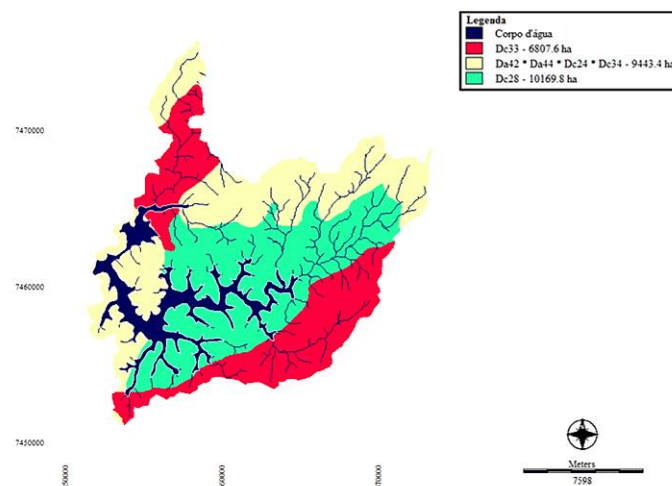
equilíbrio é frequentemente alterado pelas intervenções humanas, gerando estados de desequilíbrios temporários ou até permanentes.

Diante dos diferentes estados de equilíbrio e desequilíbrio que o ambiente está submetido, Ross (1994) sistematizou uma hierarquia nominal de fragilidade representadas por códigos: muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5). Estas categorias expressam especialmente a fragilidade do ambiente em relação aos processos ocasionados pelo escoamento superficial difuso e concentrado das águas pluviais e será melhor detalhado no tópico 4.5.

Mesmo que em escalas diferentes, o trabalho de Bitencourt *et al.* (2020) foi utilizado como referência para delimitar a estrutura fragilizada, partindo-se do pressuposto de obter um ponto de partida para o processamento de um mapa que analisasse de forma parcial a fragilidade ambiental. Por isso, foi feito um recorte do mapa das classes de fragilidade dessa pesquisa para a área de interesse das bacias de captação onde pôde ser aplicada à sub bacia Jacareí, conforme a dissecação e segundo o solo dominante citado por Ross e Moroz (1997).

Conforme mostra a Figura 8, a cor vermelha representa as áreas com fragilidade potencial média, as cores verdes e amarela representando a fragilidade potencial alta e muito alta, respectivamente. já os tipos de dissecação foram representadas pelas letras Da, Dc e Dt bem como a área de cada classe, em hectare (ha). A cor roxa se refere a agradação de planície fluvial que corresponde a uma fragilidade potencial muito alta. em azul estão as lâminas d'água. Monta-se, portanto, um delineamento adequado aos objetivos que foram definidos.

Figura 8 – Fragilidade potencial da sub bacia de captação que inscreve o reservatório Jaguari Jacareí em maior escala geral para a obtenção do recorte parcial desta metodologia.



Fonte – Bitencourt *et al.* (2020)

Neste sentido, ressalta-se que a fragilidade pontencial, segundo Ross e Moroz (1997), varia conforme o tipo de dissecção do relevo e solos dominantes, podendo ser resumida conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis de fragilidade potencial, índices de dissecção, solos dominantes e a cor trazida.

Níveis de potencial de fragilidade	Índice de Dissecção do Relevo	Solos dominantes	Cor no Mapa	
Muito baixa	Dt11	Latossolos	Nude	
Baixa	Dt12	Latossolos	Mostarda	
Média	Da23, 32 e 33 Dc13, 23, 32 e 33	Podzólicos e Latossolos	Vermelho	
Alta	Da52 e 54 Dc15, 25, 28 e 35	Cambisolos, Podzólicos e Latossolos	Verde	
Muito alta	Da34, 42, 43 e 44 Dc14, 24, 34, 42, 43 e 44	Cambisolos, Podzólicos e Latossolos	Amarelo	
Muito alta	Apf	Planícies aluviais	Roxo	

Fonte – Bitencourt *et al.* (2020)

Utilizaram-se, portanto, as informações de Bitencourt *et al.* (2020) para realizar a técnica de geoprocessamento denominada tabulação cruzada (também conhecida como *cross-tabulation*), onde executa cálculos de estatística que permitem analisar a relação entre duas ou mais variáveis categóricas, ou seja, apresenta a frequência de ocorrência de cada combinação de categorias das variáveis envolvidas.

Assim, selecionam-se duas ou mais variáveis categóricas. Analisou-se, primeiramente, a relação entre o tipo de cobertura vegetal e o tipo de solo, relacionando-se com a geomorfologia da sub bacia Jacareí. Dessa maneira, a tabulação cruzada foi organizada de forma que cada linha representasse uma categoria da primeira variável e cada coluna uma categoria da segunda variável. Logo, cada célula da tabela continha a frequência de ocorrência de uma combinação específica de categorias.

Portanto, o método foi desenvolvido através de critérios múltiplos que atendessem às decisões sobre localização quando objetivos múltiplos estão envolvidos e gerados os mapas de classes de declividade, solos, uso e ocupação no entorno do reservatório. Por fim, para tornar possível a integração desses mapas, foi necessário fazer a sua padronização, de maneira que ficassem em uma mesma escala de valores. Esta padronização se deu através do comando Fuzzy, no qual há a possibilidade de se criar uma curva que represente a variação dos valores de cada fator em função da sua influência na fragilidade da área.

4.6 Hierarquização dos níveis de fragilidade

A análise da fragilidade potencial em uma sub bacia hidrográfica é fundamental para o planejamento ambiental e a gestão sustentável dos recursos naturais. A fragilidade refere-se à suscetibilidade do meio físico a processos de degradação, como erosão, assoreamento e perda de cobertura vegetal. Para uma compreensão mais aprofundada, Ross (1994) afirma que é necessário considerar diferentes níveis hierárquicos na avaliação, partindo desde elementos locais, como o uso do solo e declividade, até aspectos mais amplos, como a estrutura geológica e o regime hídrico da bacia. Essa abordagem escalonada permite identificar áreas prioritárias para ações de conservação e mitigação de impactos ambientais.

A metodologia de Ross (1994) para a análise hierarquiza os níveis de fragilidade em cinco categorias: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Essa hierarquização é obtida através da combinação de variáveis como solo, relevo, declividade e clima, além do uso e ocupação do solo. Portanto, a avaliação da fragilidade potencial é centrada em múltiplos planos de informação que se interligam e se relacionam. Este enfoque, formalizado por Ross (1994), permite que cada fator seja reclassificado em categorias de fragilidade, hierarquizadas e ao combinar esses elementos, obtém-se um diagnóstico espacial detalhado das zonas de fragilidade, crucial para subsidiar políticas de ordenamento territorial e manejo ambiental.

No nível mais básico, a análise considera atributos físicos pontuais que, geralmente, são obtidos por meio das geotecnologias de aquisição de dados, fornecendo os primeiros indícios da vulnerabilidade ambiental. Em um nível intermediário, são agregadas informações sobre o uso e ocupação do solo, práticas agrícolas e expansão urbana, que influenciam diretamente a pressão sobre os recursos naturais. A integração desses dados em unidades de paisagem homogêneas é o que permite uma classificação mais precisa da fragilidade potencial, identificando as zonas de risco conforme a intensidade e a combinação dos fatores analisados.

Por exemplo, declividades mais acentuadas ou solos mais erodíveis recebem classificações de fragilidade mais elevadas. Já o nível intermediário considera o uso e a ocupação do solo como um fator que amplia ou reduz a fragilidade natural, sendo em áreas urbanizadas ou de solo exposto tendendo a apresentar uma fragilidade alta ou muito alta. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os níveis de hierarquização para a elaboração do mapa de fragilidade potencial.

Tabela 4 – Níveis hierárquicos em relação à declividade.

Classes de Declividade	Níveis de Fragilidade
< 6%	1 - Muito Fraco
6 a 12%	2 - Fraco
12 a 20%	3 - Médio
20 a 30%	4 - Forte
>30%	5 - Muito Forte

Fonte – Adaptado de Ross (1994)

Tabela 5 – Níveis hierárquicos em relação aos tipos de solos.

Tipos de Solo	Níveis de Fragilidade
Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho - Escuro, Vermelho-Amarelo e Textura Argilosa	1 - Muito Fraco
Latossolo Amarelo e Vermelho-Amarelo, Textura Média Argilosa	2 - Fraco
Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa, Podzólico Vermelho-Amarelo, Textura Média Argilosa	3 - Médio
Podzólico Vermelho-Amarelo, Textura Média Arenosa, Cambissolos	4 - Forte
Podzolizados com cascalho, Litólicos e Areias Quartzosas	5 - Muito Forte

Fonte – Adaptado de Ross (1994)

Tabela 6 – Níveis de proteção do solo.

Uso e Cobertura do solo	Níveis de Proteção
Florestas/Matas Naturais, Florestas cultivadas com biodiversidade	1 - Muito alta
Formações Arbustivas Naturais com extrato herbáceo denso, Formações Arbustivas Densas (Mata Secundária, Cerrado), Mata Homogênea de Pinus Densa, Pastagem cultivada com baixo pisoteio de gado, Cultivo de ciclos longos.	2 - Alta
Cultivos longos em curvas de nível como café, laranja, pastagem com baixo pisoteio, Silvicultura de Eucaliptos.	3 - Média
Culturas de ciclos longos de baixa densidade, Culturas de ciclo curto como Arroz, Trigo, Feijão, Milho, Algodão, Cultivos em curvas de nível.	4 - Baixa
Áreas Desmatadas e Queimadas recentemente, Solo Exposto, Caminhos e Estradas, Terraplanagem, Culturas de curto ciclo sem práticas conservacionistas	5 - Muito Baixa

Fonte – Adaptado de Ross (1994)

Por fim, no nível hierárquico mais alto, a análise incorpora dinâmicas hidrológicas, conectividade entre os compartimentos da paisagem e impactos cumulativos da intervenção humana. Esse nível sistêmico considera a sub bacia como uma unidade funcional, interligando os processos biofísicos e antrópicos que ocorrem em diferentes escalas espaciais. A compreensão dessa complexidade hierárquica foi essencial para o entendimento da dinâmica no entorno do reservatório Jaguari Jacareí, podendo subsidiar políticas públicas de uso do solo, manejo integrado da bacia e estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

Assim, a abordagem da fragilidade potencial permite uma gestão territorial mais eficaz e ecologicamente equilibrada, não apenas refletindo em complexidade do sistema natural, mas também orienta ações de restauração, preservação e planejamento territorial com maior precisão.

4.7 Parâmetros físico-químicos de qualidade no reservatório

Como citado, a qualidade da água é um indicador fundamental da saúde ambiental e do bem estar humano. A CETESB realiza o monitoramento da qualidade das águas em corpos hídricos do Estado de São Paulo, produzindo relatórios anuais de parâmetros físico-químicos para avaliar o estado ambiental do recurso hídrico e subsidiar ações de preservação e recuperação. Esses dados objetivam a interpretação da qualidade hídrica em estações pontuais de tratamento nos reservatórios disponibilizados pela companhia, identificando os principais parâmetros, tendências e possíveis fontes de poluição.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, notou-se que, devido à importância estratégica do reservatório Jaguari Jacareí, o controle e monitoramento da qualidade da água garante sustentabilidade de seus usos múltiplos como abastecimento público, irrigação, recreação e preservação dos ecossistemas aquáticos. Assim, os Parâmetros Físico-Químicos Avaliados nesta sessão da pesquisa incluem compreender o grau de poluição e a qualidade da água do reservatório.

Os parâmetros analisados foram: 1- Turbidez, indicando as variações que podem afetar o metabolismo dos organismos aquáticos e a solubilidade de gases, como o oxigênio. 2- pH, medindo o grau de acidez ou alcalinidade da água e processos de poluição orgânica ou industrial. 3- Oxigênio Dissolvido (OD), o qual quantificou a respiração dos organismos aquáticos nas estações de coleta, ressaltando que baixos níveis indicam contaminação por matéria orgânica e degradação de qualidade. 4- Condutividade Elétrica, onde indicou a

presença de íons dissolvidos podendo ser um indicativo de poluição por efluentes industriais ou agrícolas. 5- Fósforos Totais, os quais apresentaram os nutrientes que, quando em excesso, podem levar à eutrofização do corpo hídrico, com crescimento excessivo de algas e deterioração da qualidade da água.

5. RESULTADOS

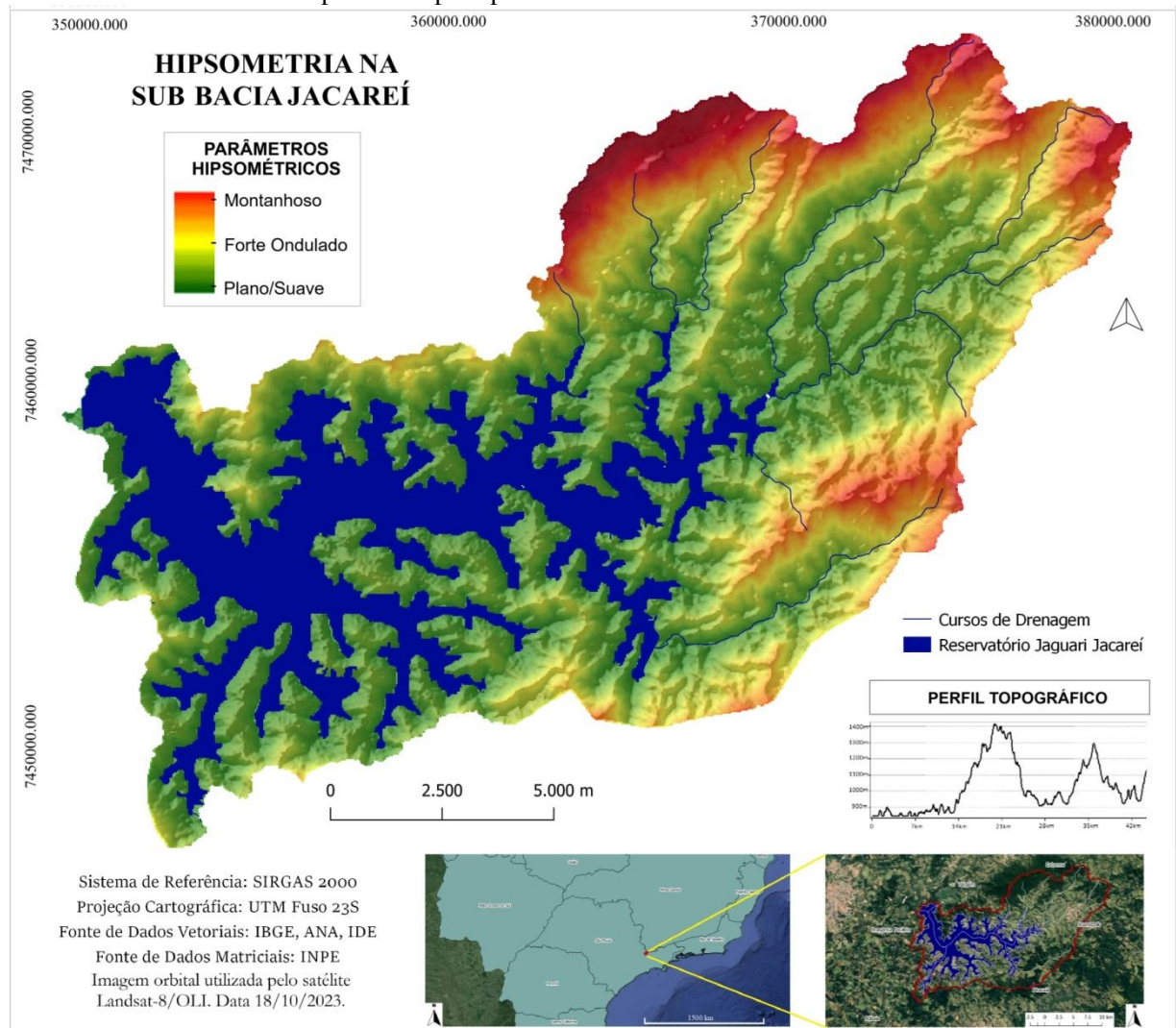
5.1 Hipsometria e influências altimétricas

A atividade hidrológica e as características do relevo foram elementos utilizados nesta pesquisa por intensificarem os processos erosivos que, diretamente, apresentaram influência na perda de solo e assoreamento dos rios, diminuindo a capacidade produtiva da bacia. Das análises iniciais da dinâmica hidrológica e altimétrica da sub bacia Jacareí, aponta-se que a hipsometria se destacou como sendo uma importante variável no diagnóstico integrado de elementos físicos deste estudo.

Contudo, como a área constitui um setor de transição entre unidades morfoesculturais relacionada aos processos geomorfológicos, destacou-se que quanto maior é o desnível da sub bacia, maior será seu escoamento, alterando de forma direta o solo, relevo, uso e ocupação e demais elementos presentes. Todavia, a análise da hipsometria e da declividade formaram os atributos geomorfológicos necessários para avaliações de processos de conflitos e impactos ambientais.

Dessa forma, determinou-se, inicialmente, a identificação dos princípios altimétricos por meio de carta hipsométrica, o que permitiu o detalhamento e entendimento da dinâmica de um relevo bastante diversificado, manifestando regiões montanhosas situadas ao extremo jusante da bacia. Como resultado, as análises da sub bacia permitiram a visualização de altitudes e cotas mínimas de 600 metros, junto aos vales e algumas vezes ultrapassando 1400 metros, conforme apresenta o Mapa 4, inclusive no perfil topográfico gerado de leste a oeste da bacia. Vale resaltar que a análise topográfica, juntamente aos elementos do tipo de solo, determinam as questões geomorfológicas do local. Neste âmbito, fez-se necessário segmentar a imagem para que fosse possível a soma destas informações com as classes de uso e ocupação e assim, apresentar os níveis da fragilidade ambiental.

Mapa 4 – Mapa hipsométrico da sub bacia Jacareí .



Fonte – Autoria própria.

Neste trabalho a segmentação de imagens serviu para identificar e isolar regiões de interesse na imagem digital, destacando-se as áreas com características semelhantes (homogêneas) e facilitando-se a análise da extração de informações obtidas por técnicas de sensoriamento remoto. Este tipo de análise tem como principal foco a identificação de objetos. Sendo assim, a segmentação ajudou a identificar as regiões de interesse, como áreas de floresta, corpos d'água, ou construções e reduziu os dados, ou seja, ao agrupar pixels com características semelhantes em regiões, a segmentação reduziu a complexidade da imagem e o volume de dados a serem analisados, facilitando o processamento e a interpretação dos resultados obtidos.

Notou-se que a análise do mapa hipsométrico demonstrou questões que sinalizam influência na dinâmica hídrica sobre os demais componentes integradores. Logo, a região central da sub bacia hidrográfica apresentou uma variação altimétrica muito elevada,

podendo ser constatados morros residuais que, em alguns casos, atingem variações altimétricas acima de 1.400 metros.

Existem, também, planaltos na região próxima ao reservatório que permanecem acima de 600 metros, sobretudo em áreas de relevo onde a área plana favorece a siveicultura, milho e café, visto que beneficia a mecanização e plantio. Com isso, a análise do perfil transversal do alto curso (norte-sul da sub bacia) demonstrou que as grandes variações ocorrem nos morros residuais.

Ainda na região central, apresentaram-se variações altimétricas devido à grande quantidade de falhas e lineamentos estruturais as quais traduzem um relevo mais acidentado, deixando os rios Jaguari e Jacareí mais encaixados em meio às escarpas, trazendo velocidade de fluxo mais elevada. Entretanto, seu entorno é formado por planaltos com relativa área mais plana, especialmente nas zonas mais próximas aos extrtemos, caracterizando estrutura ideal para a implantação do reservatório. Já o trassado do perfil topográfico trouxe informações de que existem consideráveis variações altimétricas na área, favorecendo planos de preservação, que levem em consideração tanto a vegetação como os mananciais. Além disso, na área do baixo curso também foi observada pouca variação altimétrica, principalmente por estar localizada em superfícies planas e suavemente onduladas.

5.2 Análise da declividade na sub bacia

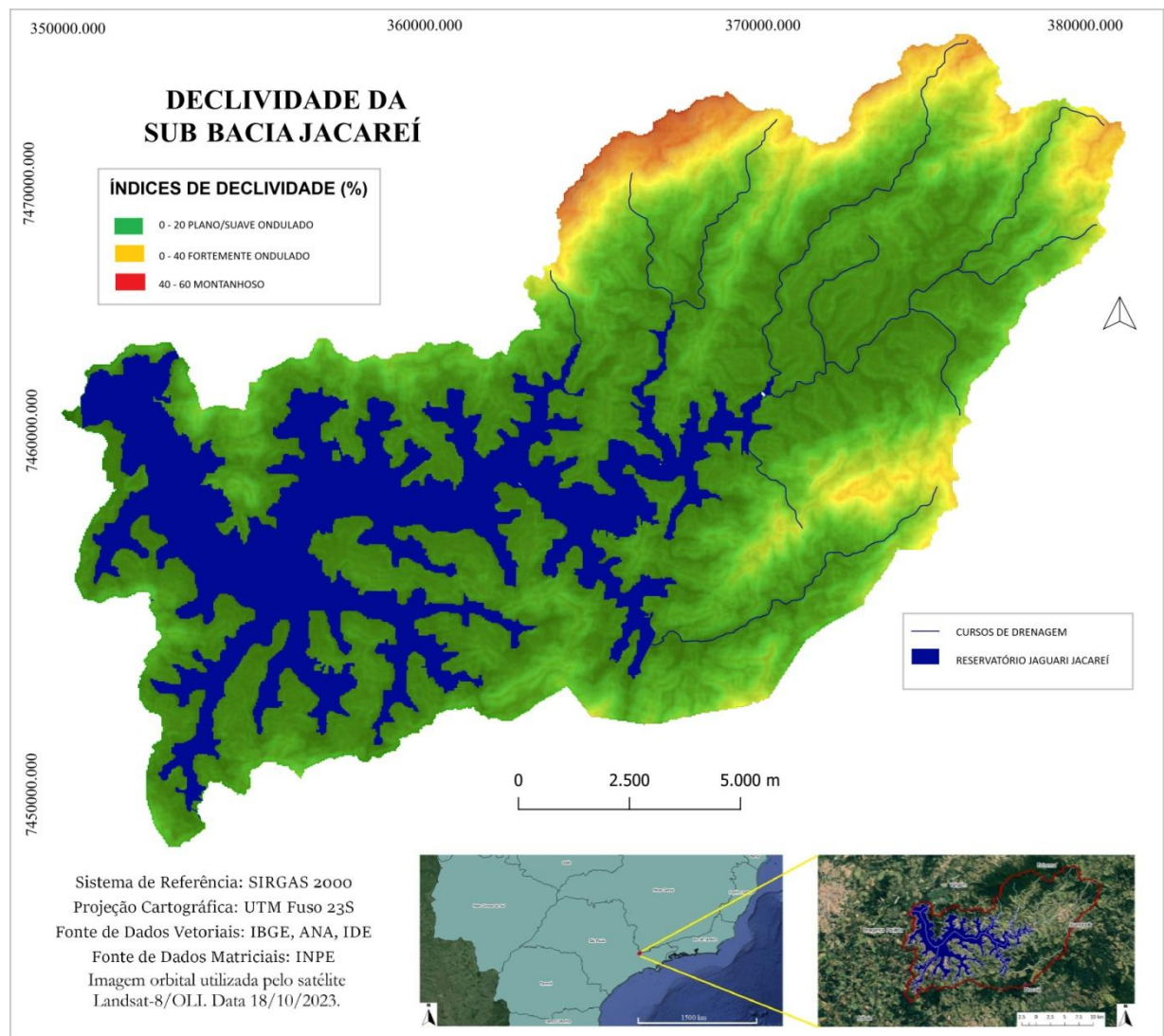
Como observado, o mapa hipsométrico apresentou visualização geral do território, com possibilidade de individualização de áreas específicas como os vales, topos, áreas íngremes e outras feições do relevo. Após sua análise, elevou-se a importância dos estudos que integrem o contexto superficial da área, buscando compreender a dinâmica ambiental e a declividade da sub bacia. De modo geral, as águas subterrâneas referem-se à toda quantidade de água presente abaixo da superfície terrestre. Essas águas se posicionam em poros e falhas litológicas, fomando um importante recurso natural para abastecimento da população. Isto posto, entende-se que existem determinadas vantagens na utilização das águas subterrâneas e uma delas é sobre a qualidade hídrica.

É neste contexto que a declividade da sub bacia Jacareí, quando analisada juntamente à hipsometria, apresenta-se como elemento estrutural onde são extraídos valores os quais realizam balanços de entrada proveniente da chuva e saída de água através do exutório, região de mais baixa altitude na bacia, permitindo que sejam delineadas sub

bacias e reservatórios do Sistema Cantareira, cuja a interconexão se dá pelos sistemas hídricos.

Com isso, para avaliar a morfometria do relevo, iniciou-se a análise das classes de declividade da sub bacia, sendo possível identificar as classes encontradas segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, além de apontar uma grande variedade de características na região, desde terrenos planos no baixo curso, com planícies, até terrenos extremamente acidentados no médio e alto curso, sobretudo, devido à grande quantidade de morros residuais existentes. Com isso, o Mapa 5 apresenta a declividade e a Tabela 7 suas classificações e extensões.

Mapa 5 – Declividade aplicada na sub bacia Jacareí.



Fonte – Autoria própria.

A partir da identificação das diferentes unidades de relevo da sub bacia Jacaréí, bem como a diversidade de formas expressas no mapa hipsométrico, ressalta-se outra importante característica a ser considerada na análise integrada da dinâmica ambiental que refere-se à declividade. Este atributo topográfico do terreno possui grande destaque como aspecto restritivo em diferentes legislações ambientais, influenciando práticas e conflitos relacionados aos diversos tipos de uso e ocupação da terra.

Tabela 7 - Classes de declividade encontradas na sub bacia Jacaréí.

Classes de Declive (%)	Tipo de Relevo	Área da bacia (m²)	Área da bacia (%)	Proposta de uso Conforme o IBGE
0 a 20	Plano/ Suave Ondulado	99,626	43,55	• Urbanização sem restrições quanto à possibilidade de inundação. • Restrições à mecanização agrícola e priorização de técnicas de manejo e conservação do solo.
20 a 40	Forte Ondulado	40,971	17,91	• Suscetibilidade à erosão e perda de potencial produtivo. • Permite área de manutenção da vegetação natural e reflorestamento.
40 a 60	Montanhoso	88,164	38,54	• Área inadequada para a urbanização. Manutenção da vegetação original. • Área de preservação ambiental
Total		228,761	100	

Fonte - Autoria própria.

Isto posto, foram evidenciados alguns setores de forte declividade, principalmente relacionados às unidades de relevo Planalto Atlântico e Planalto de Ouro Fino-Munhoz, localizadas na Serra da Mantiqueira Meridional e no Vale do Paraíba, onde derivam as nascentes do rio Jacaréí e Jaguari, nas regiões mais altas, com áreas de escarpadas e morros testemunhos, presentes no setor norte da bacia. Enfatizou-se que a formação da sub bacia Jacaréí ocorre através dos desníveis dos terrenos que direcionam os cursos d'água das áreas mais altas mineiras para as mais baixas em solos paulistas, determinados por dois tipos de divisores de água, o superficial, condicionado pela topografia local destacado no mapa altimétrico e o subterrâneo, determinado pela estrutura geológica do terreno. Desta forma,

a declividade apresentou uma área expressiva com forte grau de inclinação do terreno, muitas vezes ultrapassando 45%, marcando o contato entre a superfície da depressão periférica e o planalto residual ou cuestas.

Outro destaque relacionado ao mapa da presente análise constituiu na forte dissecação dos cursos fluviais na sub bacia Jacareí, com vales entalhados em alguns setores, denotando possíveis ajustes do nível de base em função de alterações climáticas ou influência litro-estrutural. A qualidade da água dentro neste panorama costuma ser superior à da superfície, uma vez que, enquanto se infiltra, passa por sucessivos processos físicos, químicos e biológicos que a tornam própria para o consumo humano. Além disso, destacam-se suas reservas abundantes e o fato de serem relativamente protegidas de agentes poluidores.

Dessa forma, analisou-se a tabela das classes de declividade encontradas na sub bacia Jacareí e destacou-se que quanto maior o nível de infiltração da água no solo, maiores deveriam ser as reservas subterrâneas hídricas, uma vez que a quantidade de infiltração depende diretamente de fatores como porosidade, velocidade de escoamento, presença de vegetação e claro, da declividade. Neste sentido, as informações que o mapa destacou são que as várias regiões montanhosas da sub bacia devem apresentar maiores preocupações para os gestores públicos, visto que são áreas onde as características físicas não favorecem a dinâmica hídrica, podendo trazer dificuldade para o armazenamento de água no solo, escoamento superficial prejudicado e ocorrência de processos erosivos e degradando a qualidade do reservatório. Isso significa que a quantidade de infiltração, a qual depende de terrenos mais planos ou com baixíssimo nível de declividade, apresenta maior tendência à infiltração, uma vez que a água ficará mais tempo sobre o solo.

Ainda, o caso de áreas mais íngremes correspondeu à cerca de 38% da sub bacia Jacareí e desta forma, apresentou um nível de escoamento bem maior e com maior atuação de processos erosivos do que nos 43,55% nas regiões mais baixas. Pode-se afirmar que neste caso, a declividade em locais fortemente ondulados e montanhosos da área influencia na velocidade de escoamento superficial, o que interfere no tempo de concentração, causando picos de enchentes e erosão do solo, preocupando a população que reside no entorno do reservatório.

Neste cenário, diversas publicações relacionam os índices de declividades e atividades de uso do solo estabelecendo algumas considerações sobre o tema, apontando que o índice da declividade indica importante correlação entre diferentes classes e justificativas para os tipos de uso e ocupação. Tendo em vista que a área total da sub bacia

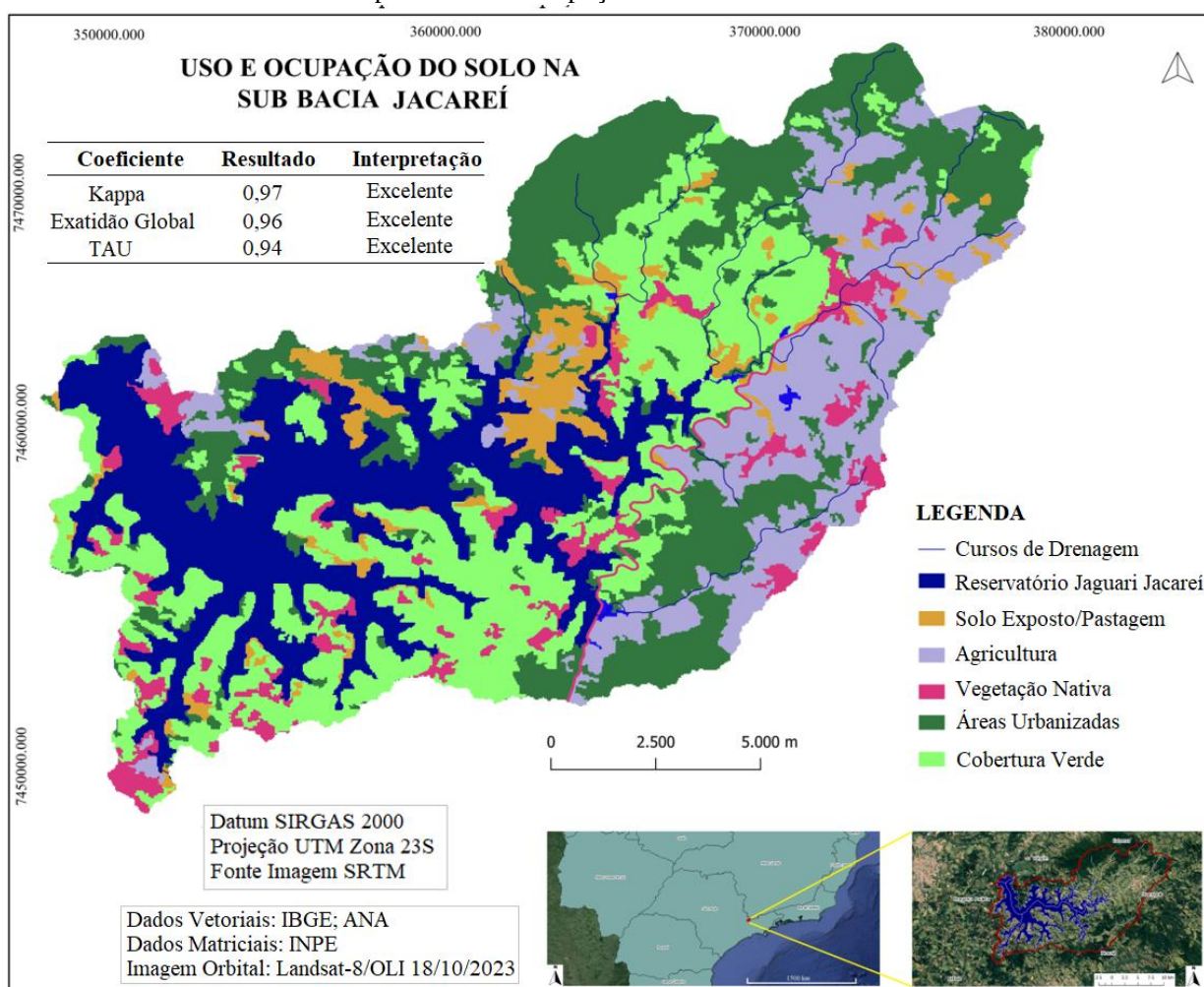
é de 228,7 m² e aproximadamente 38% dessa região é montanhosa, a análise de uma altitude mais elevada somada à declividade acentuada potencializam os processos geomorfológicos, resultando em relevo regional com características de susceptibilidade aos impactos ambientais e intensas preocupações aos agricultores locais. Portanto, essa pré-disposição é assim problematizada quando o uso do solo não é correspondente às características da sub bacia e manejo inadequado, o que pode causar perda de solo e excessivo acúmulo de sedimentos nos cursos d'água, ocasionando assoreamento e danos na qualidade hídrica.

5.3 Mapa de uso e ocupação do solo

Para o monitoramento da qualidade da água, observam-se diversas variáveis físicas, químicas e biológicas, que, após mensuração, comparam-se aos valores de referência de legislações como Leis e Decretos Federais, Estaduais e Municipais, assim como as resoluções e deliberações de órgãos fiscais e consultivos, como o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Conselho Estadual de Meio Ambiente (COPAM) e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH). Ao utilizar as informações geomorfológicas citadas acima, notou-se que a instalação do reservatório Jaguari Jacareí foi feita em regiões de altitudes intermediárias, em torno de 650 metros de altitude, porém em interflúvios de topos levemente convexizados, aspectos estes que, do ponto de vista topográfico, foi o que tornou o ambiente favorável à construção do reservatório para o armazenamento de água. Assim, a partir dos pontos de treinamento identificados nas composições RGB, obteve-se o mapa de uso e ocupação do solo (Mapa 6) gerado pelo algoritmo MAXVER.

Vale ressaltar que a segmentação de imagem neste processo foi um passo importante antes da classificação de imagens, onde as regiões identificadas foram atribuídas às classes de interesse. Ainda, a tabulação cruzada foi uma ferramenta essencial para esta análise de dados, permitindo identificar padrões e relações entre variáveis categóricas. É amplamente utilizada em diversas aplicações, desde a validação de classificações de imagens de satélite à análise da relação entre atributos espaciais.

Mapa 6 – Uso e ocupação na sub bacia Jacareí .



Fonte – Autoria própria.

Conforme o mapa gerado, notou-se que as classes que apresentaram maiores área ocupadas são corpos hídricos e vegetação nativa, o que significa que a região carrega o desafio de assegurar a qualidade da água para abastecer consumidores e cidades do entorno da bacia, além de indústrias em meio a crescimento da irrigação voltada para produção agrícola. Embora o uso da água seja essencial para garantia do cultivo de alimentos, ao viabilizar a produção, seu uso indiscriminado e sem fiscalização afeta diretamente a quantidade e o principal, a qualidade dos recursos hídricos. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a agricultura é o setor onde a escassez de água causa maiores impactos e o setor, neste caso, responde pela retirada de água para um consumo superior a 13% da sub bacia. Sendo assim, a agricultura no entorno da bacia do Jaguari/Jacareí pode ser considerada como uma das principais fontes de fósforo e nitrogênio para os ecossistemas, contrapondo a atividade pecuária uma vez que tem efeitos mais reduzidos sobre a eutrofização artificial de corpos d'água.

Essas informações se encaixaram perfeitamente na publicação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, a qual afirma que no Brasil, cerca de 50% da água doce retirada dos cursos d'água destina-se à irrigação. Assim, grande parte deste uso ocorre no contexto das sub bacias, apontando que a bacia enfrenta conflitos de disponibilidade por conta do aumento do consumo hídrico para a agroindústrias e para a irrigação. Com isso, a Tabela 8 descreve as áreas de cada classe de uso do solo classificadas na bacia hidrográfica.

Tabela 8 - Áreas classificadas utilizando a metodologia MAXVER.

Tipos de uso	Área (km²)	Área (%)
Agricultura	31,186	13,63
Vegetação nativa	39,921	17,45
Corpos d'água	61,696	26,96
Pastagem e solo exposto	28,431	12,42
Áreas Urbanizadas	24,072	10,52
Cobertura verde	43,455	19,02
TOTAL	228,761	100

Fonte – Autoria própria.

Após analisado o mapa de uso e ocupação, para entrar na questão do monitoramento da qualidade da água, observam-se variáveis que, após mensuração, comparam-se a valores de referência de legislações citadas anteriormente. Utilizou-se, neste estudo, uma análise intergada do uso e ocupação da sub bacia, ressaltando a relação entre os usos e indicadores, além da possibilidade da relação ser responsável pelas condições e enquadramentos dos cursos d'água, os quais muitas vezes recebem efluentes sem tratamento adequado e até mesmo resíduos sólidos que percorrem as cidades e áreas rurais, atingindo diretamente o reservatório.

Partindo-se desta linha de raciocínio, observou-se que a classe que representa as regiões urbanizadas e industriais possui quantidade significativa de quase 11% da área total da sub bacia. Este valor indica que a urbanização no entorno pode crescer cada vez mais próxima ao reservatório e às áreas de nascentes, trazendo maior preocupação com descarte de lixo, esgoto industrial, resíduos sólidos oriundos do escoamento superficial, agravamento da instalação populacional em zonas de risco e inexistência de serviços públicos essenciais para saúde básica e educação ambiental. Dito isto, mesmo a região

sendo mais afastada de áreas antropizadas, a consequência feita pela urbanização e industrialização na região é disseminar graves impactos até as margens dos rios que circundam a área do reservatório caso não haja maior fiscalização dos efluentes e controle da ocupação do solo.

Ainda, a porcentagem de agricultura em contraste com apenas 17% de vegetação nativa realça que grande parte da vegetação no entorno da bacia foi removida, o que implica em recursos hídricos comprometidos, mesmo a água sendo um recurso indispensável para as cidades. Neste contexto de avaliação do uso e cobertura do solo, todos os fatos detectados e analisados na presente pesquisa deixam o reservatório com grandes quantidades de poluentes, nutrientes e até mesmo produtos tóxicos, que dificultam a utilização da água como fonte de recursos para abastecimento e lazer, encontrando-se, em algumas partes, degradados e poluídos. Assim, ao observar a classe de solo exposto, destacou-se que este indicador foi o principal receptor de água da chuva, ficando exposto à intensificação de processos erosivos, tornando-se cada vez mais suscetível ao arraste mecânico do escoamento superficial da água. Portanto, conclui-se que a conversão dessas áreas em formações florestais acontece, conseqüentemente, pela expansão da agricultura e pastagem.

Neste contexto, vale ressaltar que as informações adquiridas para as análises foram validadas com o cálculo da matriz de confusão, o qual considera-se fundamental para validação da classificação supervisionada, pois permitiu avaliar, de forma objetiva, a precisão dos resultados obtidos. Por meio da comparação entre os dados classificados e as amostras de referência (verdade de campo), foi possível identificar os acertos e erros em cada classe, quantificando tanto a exatidão global quanto a precisão e a confiabilidade de cada categoria. Este diagnóstico foi essencial para verificar a qualidade do mapeamento realizado, orientar correções no processo de classificação e fornecer maior segurança na utilização do mapa como base real para os estudos ambientais e tomadas de decisão. Com isso, a confiabilidade do mapeamento, obtida pela matriz de confusão (Tabela 9), descreveu que poucos erros foram encontrados utilizando o algoritmo MAXVER das classes estudadas.

Tabela 9 - Matriz de confusão utilizando o algoritmo MAXVER.

Classes	Agri	Veg	Água	Urb	Pasto/Exp	Cob.	Total
Agricultura	36	0	0	0	0	0	36
Vegetação Nativa	0	40	0	0	0	0	40
Corpos d'água	0	0	38	0	0	0	38
Urbanização	0	0	0	40	0	0	40
Pastagem e Solo Exposto	0	0	2	0	40	0	42
Cobertura Verde	4	0	0	0	0	40	44
Total	40	40	40	40	40	40	240

Fonte – Autoria própria.

Pôde-se compreender que a matriz de confusão obtida para o mapeamento do uso do solo mostrou que as classes de agricultura e pastagem se confundiram ao serem processadas, uma vez que quatro pontos que representariam a classe agricultura foram classificados de maneira incorreta na classe de pastagem. Assim, resultou-se num erro de omissão de 11% para a classe agricultura e erro de comissão de 9% para a classe Pastagem. Ainda, a matriz revelou que a classe de corpos d'água em certos momentos do processo da classificação confundiu-se com a classe de solo exposto. Desta forma dois pontos correspondentes à classe de água foram classificados incorretamente como solo exposto, obtendo erro de omissão de 5% para a água e erro de comissão de 4,7% para a classe de solo exposto. Com isso, o resultado da matriz de confusão e os coeficientes propostos foram recalculados e os resultados foram interpretados conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Resultado obtido dos coeficientes utilizados no mapeamento do uso do solo.

Coeficiente	Resultado	Interpretação
Kappa	0,97	Excelente
Exatidão Global	0,96	Excelente
TAU	0,94	Excelente

Fonte – Autoria própria.

Por fim, de acordo com o Índice Kappa, Exatidão Global e coeficiente Tau, a confiabilidade deste mapeamento do uso do solo para a sub bacia Jacaré foi determinada como excelente, obtendo confiabilidade superior a 93%, garantindo a validade das informações apresentadas no mapa e confirmando a metodologia aplicada no processamento.

5.4 Análise da fragilidade potencial

O procedimento para o diagnóstico e mapeamento da fragilidade potencial consistiu na aplicação do método que baseou-se na integração dos mapas de elementos geomorfológicos do meio físico, concentrando-se na vulnerabilidade associada aos atributos do terreno como formas do relevo, declividade, tipos de solos e uso e cobertura da terra. A partir da interpretação dos mapas temáticos e consultas de campo, foram definidos critérios para a classificação e a hierarquização dos planos de informação e do grau de fragilidade, de acordo com a vulnerabilidade de cada área a sofrer processos de degradação do solo por erosão.

O método proposto realizou um diagnóstico do ambiente através dos atributos do terreno e suas contribuições nos diferentes graus de fragilidade do ambiente e assim, trouxe a técnica de tabulação cruzada na qual fora permitido identificar espacialmente as áreas mais suscetíveis aos danos ambientais. Neste contexto, a tabulação cruzada, utilizada para gerar o mapa de fragilidade potencial, consistiu em combinar diferentes fatores ambientais numa só matriz para avaliação da interação entre eles e identificar as regiões mais vulneráveis. Com isso, cada fator identificado foi mapeado separadamente, criando o mapa temático que mostrou a distribuição espacial de cada característica. Ainda, as informações foram sobrepostas e tabuladas cruzadamente, utilizando uma matriz de decisão que avaliou a interação entre os fatores, identificando as áreas com maior combinação de fatores de risco, ou seja, as áreas com maior fragilidade.

A análise revelou a predominância de 24% de áreas classificadas como de alta e muito alta fragilidade ambiental, o que indica uma vulnerabilidade significativa do meio físico diante pressões antrópicas e características naturais do terreno. Estes resultados refletem a interação entre fatores geomorfológicos, pedológicos e de uso e ocupação do solo, os quais exercem papel determinante na estabilidade ambiental do entorno do reservatório.

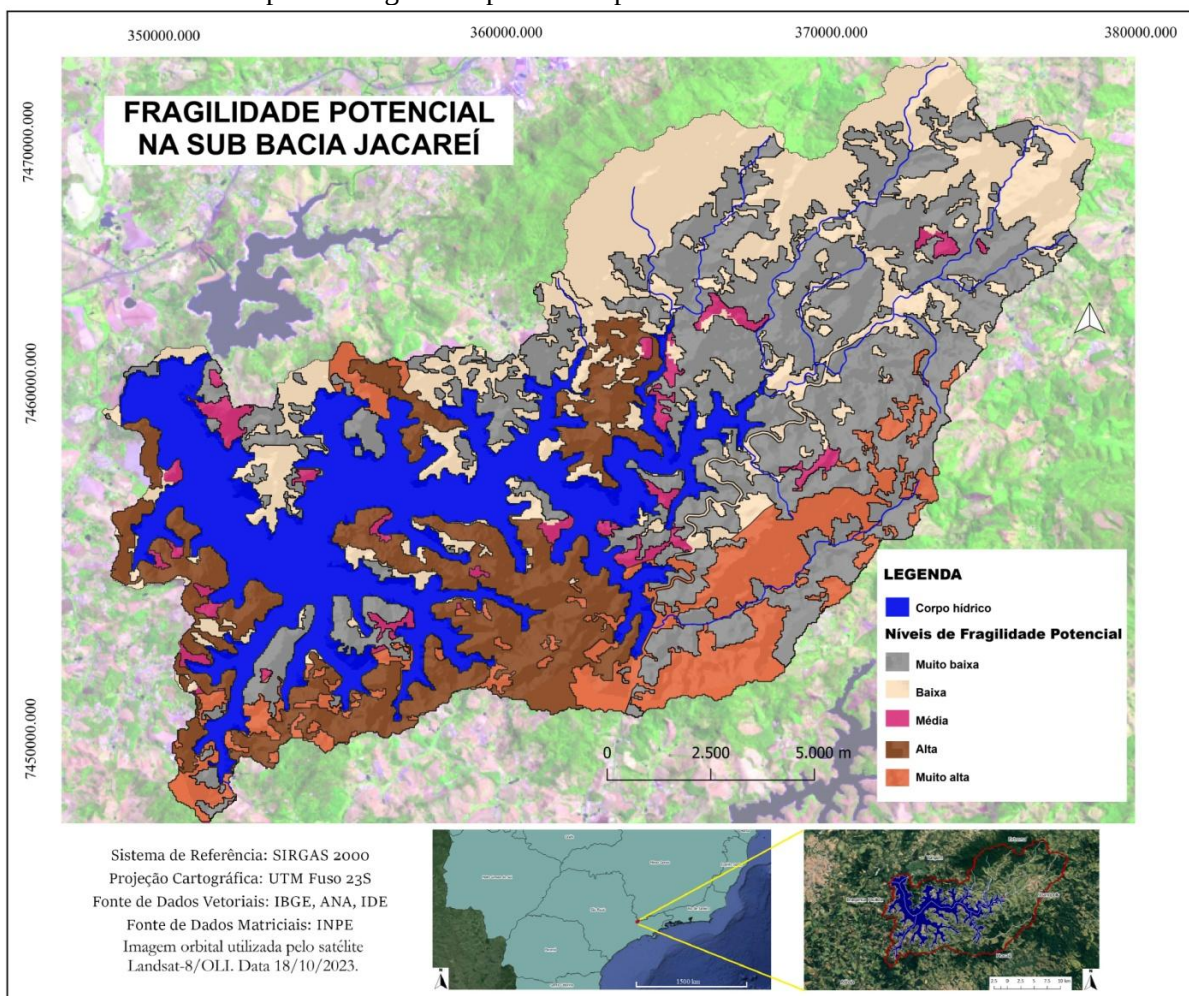
Notou-se que as áreas de alta fragilidade concentram-se, principalmente, em regiões com declividades acentuadas e solos pouco desenvolvidos, condições que favoreceram processos erosivos quando associadas aos usos inadequados da terra, como pastagens degradadas, cultivos intensivos e áreas urbanizadas. Já as zonas destacadas como sendo de muito alta fragilidade corresponderam, em grande parte, aos setores onde o relevo ondulado coincide com ausência de cobertura vegetal nativa, revelando um quadro de susceptibilidade extrema à erosão e ao assoreamento dos cursos d'água.

Nestes locais ressalta-se a prioridade para ações de manejo e conservação, especialmente quanto à recuperação da vegetação ciliar, controle do uso do solo em encostas e práticas conservacionistas agrícolas. A identificação das zonas críticas é fundamental para o planejamento ambiental e territorial, permitindo que gestores públicos e comunidades locais adotem estratégias de uso sustentável dos recursos naturais.

Além disto, a distribuição espacial das classes de fragilidade evidenciou a influência direta do uso e ocupação do solo sobre a estabilidade ambiental da sub-bacia, observando-se que as áreas preservadas com cobertura florestal apresentaram baixa fragilidade, funcionando como zonas de proteção natural contra processos de degradação.

Em contrapartida, as áreas antropizadas apresentaram maiores índices de fragilidade, reforçando a necessidade de integração entre políticas ambientais, agrícolas e urbanísticas. Dessa forma, os resultados obtidos confirmam a importância da análise da fragilidade ambiental como instrumento de apoio ao planejamento territorial, permitindo não apenas o diagnóstico das áreas mais vulneráveis, mas também a definição de zonas prioritárias para ações de mitigação e recuperação ambiental. Assim, o mapa de fragilidade (Mapa 7) foi elaborado por meio desta sobreposição de tabulação cruzada e informações de declividade do terreno (%), formas de relevo e pedologia (unidades de mapeamento de solos) e informações adquiridas pelo mapa de uso e ocupação do solo, evidenciando os locais e pontos críticos mais susceptíveis à vulnerabilidade.

Mapa 7 – Fragilidade potencial apresentada na sub bacia Jacareí.



Fonte – Autoria própria.

Observou-se, que a fragilidade potencial da sub bacia Jacareí, neste cenário, é resultante de práticas de uso e ocupação do solo inadequadas, podendo levar a impactos significativos na qualidade da água, incluindo poluição, assoreamento, diminuição do caudal e alteração dos ciclos naturais. Esses impactos podem ter consequências diretas na saúde humana, na agricultura e na fauna aquática. Abrem-se, portanto, discussões plausíveis neste caso sobre o descarte incorreto de resíduos, despejo de esgoto sem tratamento e uso de produtos químicos na agricultura e na grande variedade de indústrias na região que contaminam as fontes de água, tornando-as impróprias para o consumo.

Ao considerar a fragilidade potencial, que se refere à associação dos atributos naturais e ao desenvolvimento de atividades antrópicas sobre a área, observou-se uma redução das áreas ocupadas por alta e muito alta fragilidade convertendo-se em baixa e média fragilidade. Essas mudanças deram-se em função da predominância de áreas ocupadas por pastagens em boas condições, e em destaque, as áreas ocupadas por floresta, que lhe garante maior grau de proteção.

A perda de solo nas áreas ocupadas por cobertura vegetal apresentou-se inferior que em áreas ocupadas por pastagem em condições degradadas ou área agrícola perene. Isto também é apresentado no estudo de mapeamento da fragilidade ambiental em unidades de conservação realizado por (Torres; Cosenza, 2017), onde destacou-se essa mesma questão quanto à cobertura verde e a vegetação nativa. Tanto em sub bacias quanto em unidades de conservação, mostram-se nestes mapas, informações de localidade capazes de oferecerem programas de proteção ao solo, minimizando a intensidade e as consequências de processos erosivos, reduzindo os níveis e fragilidade.

Quanto à vulnerabilidade, pesquisas realizadas por Belato e Serrão (2019) em áreas de proteção ambiental na mesma região também ressaltam o uso excessivo e não sustentável da água em reservatórios, aliando-se aos quesitos que explicam a diminuição da capacidade de infiltração do solo por conta da degradação detectada nos mapas, podendo levar à escassez hídrica e afetar o abastecimento de água por diminuição da infiltração e alteração do ciclo natural.

Figueiredo *et al.*, (2010), por exemplo, identificaram em análises referentes à variabilidade espaço-temporal de ocorrência e recorrência de ações antrópicas intensificadas que, em áreas de altos níveis de fragilidade ambiental, pontuam-se os locais onde de expansão à urbanização e crescimento industrial, preocupando potencialidades naturais e ressaltando geograficamente os espaços para restrições da área.

Salienta-se que, embora as variáveis tenham sido utilizadas de forma conjunta, os métodos foram adaptados para que todas elas expressassem o mesmo peso, ou seja, consideradas com a mesma importância, o que pôde atenuar o resultado final de fragilidade, uma vez que toda a análise depende de todas as características que determinado ambiente possui. Além disto, outras abordagens também poderiam ser empregadas, admitindo-se temáticas e diferentes formas de cálculo com pesos diferentes.

5.5 Impactos na qualidade hídrica causados pela fragilidade

Observou-se também em campo que, na área urbana, a necessidade de proteger e manter espaços naturais não está apenas relacionada com a conservação dos recursos naturais, mas também, com a atenuação dos desequilíbrios térmicos, prevenção de desastres e melhoria da qualidade hídrica no reservatório Jaguari Jacareí. Nota-se que uma consequência preocupante para a população deve ser a acelerada perda de solo e a diminuição da qualidade da água, uma vez que constatou-se que a contaminação é causada

pela ação antrópica. É neste panorama que se destacam as degradações de Áreas de Preservação Permanentes (APPs), erosões e alguns setores com assoreamento no local. Estes resultados são vertentes que geram visualizações onde auxiliam no planejamento e gestão adequada, uma vez que indicaram a fragilidade da área, permitindo a compreensão do potencial natural do solo frente aos diversos usos. Como resultado disto, apresenta-se na Tabela 11 a quantificação do mapa e as quantidades de cada classe de fragilidade potencial da sub bacia Jacareí.

Tabela 11 - Quantificação do mapa de fragilidade potencial

Classe de Fragilidade Potencial	Área (km²)	Porcentagem (%)
Muito Alta	19,604	8,57
Alta	35,823	15,66
Média	31,980	13,98
Baixa	58,265	25,47
Muito Baixa	83,089	36,32
Total	228,761	100

Fonte – Autoria própria.

Em conclusão, para ser efetivo, o planejamento ambiental e territorial da paisagem deve relacionar as formas de uso e ocupação da terra e considerar a fragilidade do ambiente à degradação, monitorando processos que afetam diretamente o fornecimento de bens e serviços ecossistêmicos, como características relacionadas à erosão do solo, assoreamento de cursos d'água e perda de biodiversidade. Faz-se necessário, portanto, o estabelecimento da análise ambiental a partir de uma abordagem sistêmica que busque a integração dos aspectos que compõe a paisagem e observando os conflitos e desequilíbrios que marcam sua dinâmica. Evidenciou-se, neste caso, a necessidade de projetos que visem identificar as localidades apresentadas com maior fragilidade potencial e atuar efetivamente sobre elas e suas problemáticas cotidianas, a fim de resolver ou reduzir significativamente a possibilidade de ocorrência de eventos de degradação relacionadas às dinâmicas naturais do relevo.

Tendo em vista essas discussões, considerou-se adequada a pontuação atribuída às classes, na medida em que aos atributos foi conferido o mesmo peso na qualidade ambiental. O procedimento para análise pôde representar limitação em determinadas regiões, nas quais alguns dos fatores considerados possam representar uma maior ou menor

contribuição para a qualidade e a fragilidade potencial, sugerindo a necessidade de ponderação dos critérios, além da pontuação hierárquica. Entretanto, mesmo com algumas limitações relativas à escala de mapeamento, estudos dessa natureza são capazes de contribuir para a gestão de bacias hidrográficas através da representação da fragilidade das terras e do potencial natural para erodibilidade, uso agrícola e florestal.

5.6 Dados de qualidade da água monitorados pela CETESB

A relação entre os dados de qualidade hídrica do reservatório e o mapa de fragilidade potencial foi fundamental para a compreensão dos impactos ambientais na região e fechamento das análises da pesquisa. O mapa de fragilidade potencial da sub bacia Jacareí identificou as áreas mais suscetíveis à degradação ambiental, sendo elas identificadas com base em fatores do uso e cobertura do solo, declividade, tipo de solo e proximidade dos corpos hídricos. Ao sobrepor-se essas informações com os dados de qualidade da água, como níveis de turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e fósforos totais, foi possível estabelecer correlações entre regiões mais frágeis e a ocorrência de contaminação ou degradação da água. Desta forma, o mapa de fragilidade funcionou como uma ferramenta concreta, orientando ações de conservação e gestão ambiental no entorno do reservatório. Apresentam-se, na Tabela 12, os valores qualitativos médios anuais realizados pela CETESB para o ano de 2023 (dados mais recentes) no reservatório Jaguari Jacareí.

Tabela 12 - Resultado das análises qualitativas dos parâmetros em pontos de coleta do reservatório Jaguari Jacareí para 2023.

Sistema Hídrico	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	Turbidez (UNT)	Fósforo Total (mg/L)
JARI 00800	43	9,0	12,5	0,03
JCRE 0500	43	8,2	4,6	0,02
JAGR 00005	74	8	11,8	0,04
JAGR 00002	47	8,1	96,8	0,16

Fonte - Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (SIMQUA, 2023)

A análise dos dados da CETESB ao longo dos últimos anos indicou que o reservatório Jaguari Jacareí apresenta variações sazonais e espaciais na qualidade da água,

podendo ser influenciadas por fatores climáticos, hidrológicos e antrópicos. Em geral, os níveis de oxigênio dissolvido permanecem dentro dos limites aceitáveis, embora possam ser reduzidos em períodos de estiagem ou em áreas de maior depósito de matéria orgânica, trabalho este devendo se estreitar em casos mais específicos. A turbidez, embora controlada em boa parte do reservatório, tende a apresentar picos próximos a áreas urbanizadas ou com influência de atividades agrícolas.

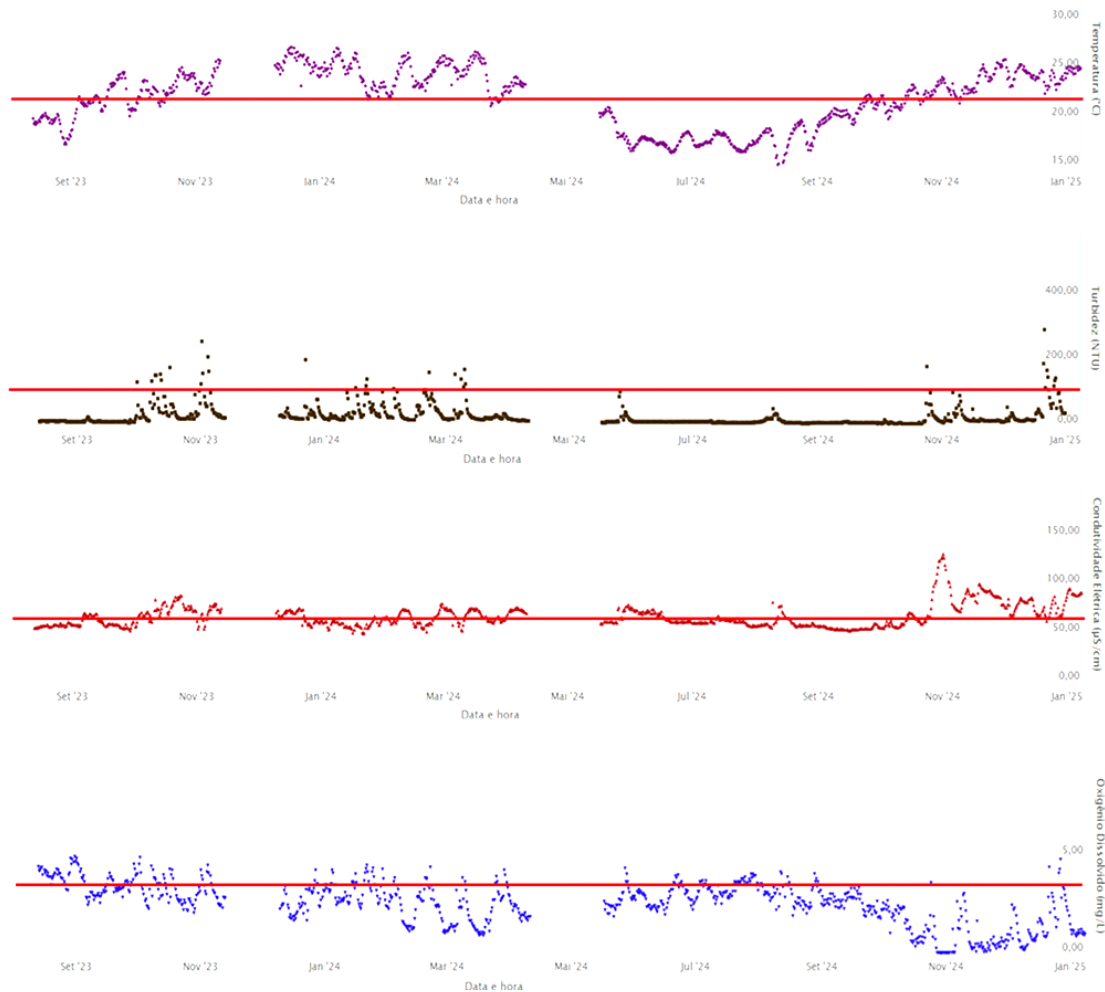
Os teores de nutrientes, neste caso, analisados em fósforos totais, foram os parâmetros que mais preocuparam, pois em determinados pontos ultrapassaram os limites recomendados no ponto de coleta denominado JAGR 00002, favorecendo a ocorrência de florações de cianobactérias, um indicativo de início de processo de eutrofização em curso.

Contudo, a análise dos parâmetros físico-químicos da água no reservatório Jaguari-Jacareí, com base nos dados fornecidos pela companhia, revelaram a importância do monitoramento contínuo, da gestão integrada dos recursos hídricos e do possível aprofundamento de análises mais voltadas à questão química da água. Embora a qualidade hídrica neste local ainda permita o uso para abastecimento com tratamento adequado, os sinais de pressão ambiental, como o aumento de nutrientes e a ocorrência de eutrofização, acabam exigindo ações preventivas e corretivas. Neste cenário, a conservação da sub bacia hidrográfica, o controle do uso do solo, a fiscalização de lançamentos de efluentes e a educação ambiental são medidas essenciais para garantia da preservação da qualidade da água no longo prazo.

5.7 Limite ótimo para os parâmetros de qualidade hídrica

O estabelecimento de limites ótimos para os parâmetros de qualidade hídrica como temperatura, turbidez, condutividade elétrica e oxigênio dissolvido dos pontos de coleta citados no tópico acima foi essencial para a avaliação precisa do estado ambiental dos corpos d'água na sub bacia Jacareí e, também, para o manejo sustentável dos recursos hídricos. Apresenta-se, portanto, o esboço desta análise na Figura 9, de acordo com dados disponíveis da CETESB.

Figura 9 - Limite ótimo para os parâmetros de qualidade hídrica.



Fonte - Sistema Integrado de Monitoramento da Qualidade das Águas (SIMQUA, 2023)

A determinação desses limites permitiu identificar os desvios em relação às condições naturais e diagnosticar possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas, como o lançamento de efluentes, o desmatamento e a urbanização. Com isso, apresentou-se, no esboço, que a temperatura, quando muito alta, pode influenciar diretamente os processos biogeoquímicos e a solubilidade do oxigênio na água. Já a extrapolação do limite do parâmetro de análise da turbidez reflete o grau de material em suspensão podendo afetar a penetração de luz, enquanto os níveis mais elevados de condutividade elétrica indicam a presença de íons dissolvidos e, portanto, o nível de salinização ou poluição. Por fim, o oxigênio dissolvido, como representa a capacidade do ecossistema aquático sustentar a vida, quando muito eminente, ou seja, acima de 10 a 12mg/L, dependendo da temperatura, pode indicar desequilíbrios ecológicos.

Assim, a definição de faixas ótimas para estes parâmetros não apenas orienta o monitoramento ambiental, mas também subsidia políticas públicas voltadas à preservação da qualidade e à manutenção do equilíbrio ecológico dos sistemas hídricos.

5.8 Análise temporal do cenário na região desde 1985

O aprimoramento das ferramentas de geotecnologias e a disponibilidade de imenso banco de dados com informações temáticas georreferenciadas possibilitou um diagnóstico cada vez mais eficiente da fragilidade do ambiente deste estudo através do zoneamento das áreas de expansão urbana e recuperação preservação de áreas prioritárias considerando-se o modelo produzido. A área em estudo foi diagnosticada como de média fragilidade e isso indicou suscetibilidade da ocorrência de processos erosivos, considerando-se as características topográficas e naturais, assim como as intervenções antrópicas no meio ambiente, ressaltando-se as litologias areníticas friáveis e os setores de relevo declivosos, comuns na sub bacia.

A determinação da fragilidade possibilitou a identificação das áreas que merecem maior cuidado quanto ao uso do solo e à necessidade de adoção de práticas agrícolas. Dito isto, a metodologia da presente análise incluiu componentes naturais e antrópicos possibilitando o mapeamento de forma a expandir a compreensão da área.

Para tanto, uma análise temporal do uso e ocupação do solo na sub bacia Jacareí através de informações do MapBiomas acrescentou ainda mais nas análises permitindo-se compreender as transformações espaciais ocorridas ao longo do período de 1985 (dados mais antigos disponíveis), 1993, 2003, 2013 e 2023 (dados mais recentes) ao evidenciar a dinâmica das atividades humanas e seus reflexos sobre os recursos naturais, especialmente os hídricos ao redor do reservatório.

Ainda, alterações detectadas, como o avanço de áreas urbanizadas e agrícolas em detrimento à vegetação nativa, apontaram para um avanço no processo contínuo de antropização, com potenciais impactos negativos sobre a qualidade da água, regime hidrológico e sustentabilidade ambiental da bacia. Como foi concluído através dos mapas de uso e ocupação e tipos de solo na sub bacia Jacareí, a fragilidade potencial neste cenário possui predominância de média vulnerabilidade, destacando-se, juntamente aos dados temporais do MapBiomas, que a ocorrência se deu em função da presença de solos com textura média, como é o caso dos latossolos vermelhos e locais urbanizados. Já a alta fragilidade associou-se à declividade acentuada e a presença de solos com textura arenosa,

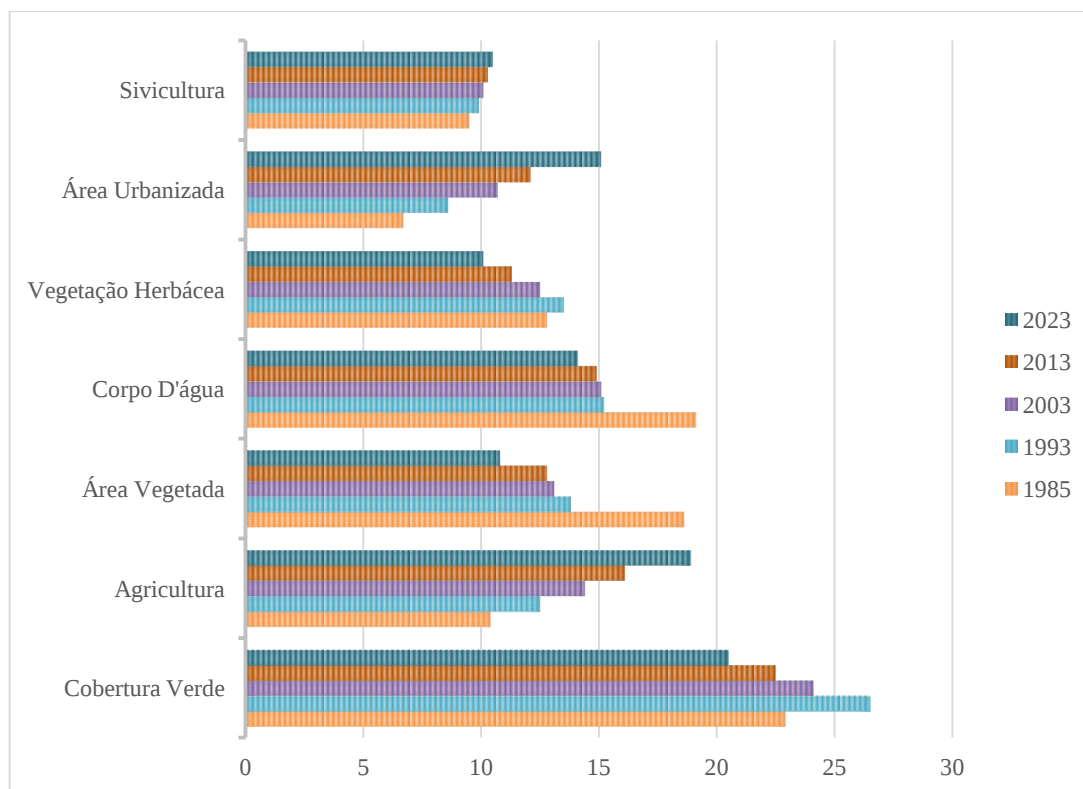
bem como altos índices de erosividade e assoreamento devido a retirada de cobertura vegetal. Isso pôde ser observado e melhor interpretado através da análise temporal do cenário na região conforme disponibilidade de dados na plataforma online do MapBiomias, como apresenta nas variadas maneiras em Figura 10, Tabela 13 e no Gráfico 1.

Tabela 13 - Uso e ocupação para a análise temporal.

Classe/Ano	1985	1993	2003	2013	2023
Cobertura Verde	22,9	26,5	24,1	22,5	20,5
Agricultura	10,4	12,5	14,4	16,1	18,9
Área Vegetada	18,6	13,8	13,1	12,8	10,8
Corpo D'água	19,1	15,2	15,1	14,9	14,1
Vegetação Herbácea	12,8	13,5	12,5	11,3	10,1
Área Urbanizada	6,7	8,6	10,7	12,1	15,1
Silvicultura	9,5	9,9	10,1	10,3	10,5
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

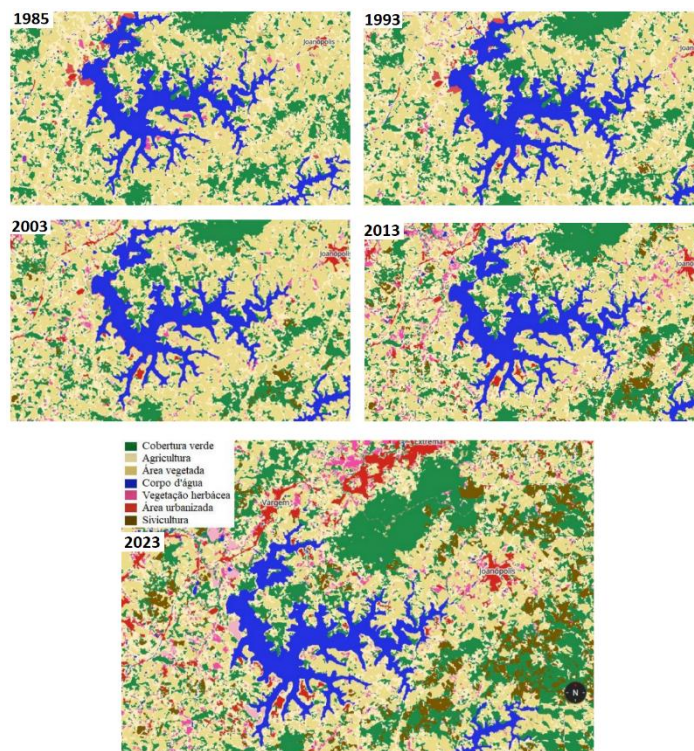
Fonte –Adaptado de Plataforma online do MapBiomias.

Figura 10 – Esboço do Uso e ocupação para a análise temporal.



Fonte – Adaptado de Plataforma online do MapBiomias.

Figura 11 – Uso e ocupação do solo na região da sub bacia Jacareí para os anos de 1985 até 2023.



Fonte – Plataforma online do MapBiomas.

Os resultados obtidos reforçam a importância de políticas públicas voltadas à gestão integrada dos recursos hídricos, aliadas ao planejamento territorial e à conservação. Neste sentido, a adoção de práticas de uso do solo que sejam mais sustentáveis e a recomposição de áreas de preservação permanente surgem como medidas essenciais para a mitigação dos impactos verificados e analisados em estudos de qualidade hídrica. Além disso, a utilização de geotecnologias, como imagens de satélite e sistemas de informação geográfica do MapBiomas, mostrou-se fundamental para o monitoramento contínuo da sub bacia Jacareí, fornecendo subsídios técnicos para o refinamento das observações, tomadas de decisões e escolhas futuras de mais pontos de coleta e análise. Por fim, recomenda-se que pesquisas se aprofundem nas análises em escalas temporais e espaciais ainda mais detalhadas, incluindo avaliação de qualidade hídrica do reservatório e sua modelagem hidrológica, de forma a ampliar o entendimento sobre as interações entre o uso do solo na sub bacia Jacareí que refletem o funcionamento da bacia hidrográfica como um sistema integrado.

6. CONCLUSÕES

Concluiu-se, primeiramente, que, pelo cenário apresentado, é imperativo que a gestão ambiental na região seja orientada por uma abordagem integrada, considerando fatores naturais e antrópicos que interagem e influenciam o equilíbrio ecológico da sub bacia Jacareí . Dito isto, acaba sendo garantida a sustentabilidade e a resiliência do território para as futuras gerações. Portanto, a conclusão deste trabalho focou-se em sintetizar as principais análises da pesquisa e refletir sobre a importância dos resultados para o manejo ambiental e preservação dos recursos naturais na região.

Com ênfase em destacar a importância das práticas sustentáveis e sugerir ações para mitigar os impactos ambientais, este estudo teve como objetivo avaliar a fragilidade potencial da sub bacia Jacareí, região esta de grande importância para a manutenção dos recursos hídricos e biodiversidade do Estado de São Paulo. Através da análise dos fatores naturais e antrópicos que influenciam o ecossistema local, foi possível identificar áreas de maior vulnerabilidade ambiental, as quais demandam uma atenção especial no planejamento e gestão territorial.

Os índices de degradação do solo, a poluição dos corpos hídricos e a alteração da cobertura vegetal natural são os principais fatores que contribuem para essa vulnerabilidade, ameaçando não apenas a qualidade da água, mas também a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos fornecidos pela região. Além disso, os resultados indicam que a fragilidade potencial é distribuída de maneira heterogênea, com algumas áreas apresentando alta sensibilidade à pressão externa, enquanto outras demonstram maior resiliência devido às características naturais da região, como a preservação de áreas de vegetação nativa e cobertura arbórea.

A partir dos resultados obtidos, foi possível afirmar também que a implementação de práticas de manejo integrado e sustentável, que considerem a particularidade de cada região dentro da sub bacia, é fundamental para mitigar os impactos ambientais e promover a recuperação das áreas mais afetadas. Neste cenário, políticas públicas voltadas para o uso consciente dos recursos hídricos, o controle da poluição e o estímulo à preservação são essenciais para garantia da continuidade da oferta de serviços ecossistêmicos e a qualidade hídrica, principalmente nos afluentes do reservatório Jaguari Jacareí.

Este estudo demonstrou de forma clara a estreita relação entre o uso e ocupação do solo e a qualidade da água nos ecossistemas aquáticos. A análise revelou que práticas inadequadas de uso do solo, como o desmatamento, a urbanização desordenada e a

agricultura intensiva, são fatores amplamente determinantes na degradação ambiental, afetando diretamente os recursos hídricos, a biodiversidade e o reservatório hídrico.

Assim, a degradação da qualidade da água, observada em diversos pontos da bacia, pode ser atribuída, principalmente, ao lançamento de efluentes domésticos e industriais, à sedimentação causada pela erosão do solo e ao uso excessivo de fertilizantes e agrotóxicos, que comprometem a saúde dos corpos hídricos e colocam em risco o abastecimento de água para as populações locais. A fragilidade potencial da bacia, portanto, é amplificada pela falta de um planejamento territorial eficaz e pela escassez de políticas públicas que integrem o uso sustentável dos recursos naturais.

O ordenamento territorial, com ênfase na recuperação de áreas degradadas, na recomposição de vegetação nativa e na utilização de tecnologias limpas na agricultura e na indústria, é fundamental para promover a resiliência da bacia frente aos desafios ambientais. Recomenda-se, portanto, a implementação de programas de educação ambiental para sensibilizar a população local sobre a importância da preservação dos recursos hídricos e do equilíbrio ecológico. Além disso, a criação de zonas de preservação permanente e a promoção de projetos de monitoramento da qualidade da água e do uso do solo são essenciais para garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Neste contexto, podem ser pontuadas as áreas mais fragilizadas acerca de um refinamento e análise mais específicas dos pontos mais críticos. Isso poderá servir de objeto de estudo para futuras análises onde, a partir do panorama aqui proposto, contribuirá para a ampliação de um trabalho em maior escala e ainda mais apurado. Este trabalho contribui para o entendimento da fragilidade potencial da sub bacia Jacaré e dinâmica dos usos e ocupações do solo, oferecendo subsídios importantes para o desenvolvimento de estratégias futuras de manejo ambiental, servindo como base para pesquisas e ações voltadas à conservação e recuperação das áreas mais degradadas.

Por fim, este trabalho trouxe atributos geomorfológicos capazes de contribuir com informações relevantes para gestores públicos e comunidades locais, incentivando a construção de estratégias de manejo mais equilibradas entre o desenvolvimento socioeconômico e a preservação dos recursos naturais, além de concentrar as regiões mais afetadas pelo meio antrópico e pela topografia, trazendo uma visão privilegiada às futuras pesquisas sobre a qualidade hídrica da região.

REFERÊNCIAS

ANA, A.N.D.Á. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017 : relatório pleno / Agência Nacional de Águas. **Agência Nacional de Águas - ANA**. Brasília. 2017.

BARBOSA, C.C.F.; NOVO, E.M.L.M.; MARTINS, V.S. **Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 161p.

BARRELLA, W. **As relações entre as matas ciliares os rios e os peixes**. In: RODRIGUES, R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BELATO, L. S.; SERRÃO, S. L. C. Aplicação da vulnerabilidade ambiental do município de Tomé-Açu, Estado do Pará. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, Aracajú, v.10, n.1, p.131-145, jan. 2019.

BERNARDI, M.R. Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 67-74, 2012.

BITENCOURT, D.P.; FUENTES, M.V.; FRANKE, A.E.; SILVEIRA, R.B.; ALVES, M.P.A. The climatology of cold and heat waves in Brazil from 1961 to 2016. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 4, p. 2464-2478, 2020.

BITENCOURT, M.D.; MANTELLI, L.R. (2015) Análise Espacial de parâmetros Limnológicos utilizando Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento: Dois Estudos de Caso. In: Pompêo, M.L.M.; Moschini-Carlos, V.; Nishimura, P. Y.; Silva, S. C.; López-Doval, J. C. (Org.) **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Capítulo 12, pgs. 160 a 176 (ISBN 978-85-85658-52-6).

BOTELHO, R.G.M.; DA SILVA, A.S. 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.

CASTRO, W.J.; LEMKE-DE-CASTRO, M.L.; OLIVEIRA LIMA, J.; OLIVEIRA, L.F.C. RODRIGUES, C.; FIGUEIREDO, C.C. Erodibilidade de solos do Cerrado Goiano. **Revista Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 4, n. 2, p.305-320, 2013.

CBH-PCJ. **Plano de bacia hidrográfica 2000-2003: relatório final - fase 3**. Piracicaba: Coplaenge/FEHIDRO. 2001. 240p. www.comitepcj.sp.gov.br/CT-EA/Diag_CT-EA.htm.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo**. 2003. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente. v.1, 273p. Série relatórios disponível em: www.CETESB.sp.gov.br/Agua/agua_geral.asp.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2004. **Relatórios de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo**. Disponível em: <https://CETESB.sp.gov.br>

CHAMBERS, J.M.; HASTIE, T.J. (eds.) (1992). **Statistical Models in S**. Wadsworth and Brooks/Cole, Pacific Grove, CA.

CONGALTON, R.G; GREEN, K. (2009) **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. 2nd Edition, Lewis Publishers, Boca Raton. 210p.

CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. Degradação ambiental. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S.B. (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010.

DASMANN, R.F.; MILTON, J.P.; FREEMAN, P.H. **Ecological Principles for Economic Development**. Washington D. C., USA. John Wiley & Sons Ltd. 1973.

DECHEN, S.C.F.; TELLES, T.S.; GUIMARAES, M.F.; MARIA, I.C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4499.0363>

EGG, G.C. Geração de Modelos Digitais de Superfícies Compostos Utilizando Imagens do Sensor PRISM/ALOS. 2012. 159 p. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)** - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

FIGUEIREDO, M. C. B.; VIEIRA, V. P. P. B.; MOTA, F. S. B.; ROSA, M. F.; SOUSA, S. A. M. **Análise da vulnerabilidade ambiental**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, Documentos, v. 127, 2010. 47p.

FONTES; A.R.M.; BARBASSA, A.P. Diagnóstico e Prognóstico da Ocupação e da Impermeabilização Urbana. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 8, n.2, abr/jun 2003. p. 137 – 142.

FORESTI, C; HAMBURGER, D.S. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo do uso do solo urbano. In: **Análise ambiental: estratégias e ações**. TAUKE, M. (Coord.). Rio Claro: Unesp, 1995. p.143-149.

FREITAS, E.P.; PECHE FILHO, A.; MORAES, J.F.L. Análise de processos erosivos em videiras com auxílio de SIG. In: **XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 2011, Uberlândia - MG. Solos nos biomas brasileiros: Sustentabilidade e mudanças climáticas, 2011.

FREITAS, E. P. Análise integrada do mapa de uso e ocupação das terras da microbacia do Rio Jundiá-Mirim para fins de gestão ambiental. **Dissertação Mestrado**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2012. 110p.

HONG, Y.; ADLER, R.F.; NEGRI, A.; HUFFMAN, G.J. (2007) Aplicações de produtos de precipitação de satélite em tempo quase real para inundações e deslizamentos. **Nat Hazards** 43:285–294.

IBGE. Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Manuais técnicos em geociências nº 07 – Manual Técnico de Uso da Terra**. 2ª edição. Rio de Janeiro. 2006. 91p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cartas de Quartéis (SF-23-Z-B-III-3-SE), Casimiro de Abreu (SF-23-Z-B-III-4-SO), Silva Jardim (SF-23-Z-BVI-1-NE) e Morro de São João (SF-23-Z-B-VI-2-NO)**. Bases cartográficas em ambiente digital (formato dgn,pdf e tif), na escala 1:50.000, agrupadas por categorias de informação: hipsometria, hidrografia e limites políticos. Rio de Janeiro: IBGE; 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. Manuais Técnicos em Geociências n. 4. Rio de Janeiro: IBGE; 2006. 316 p.

JUSTINO, E.A. Estudo do controle do Escoamento superficial com o uso de Reservatório de Retenção na Bacia do Córrego Lagoinha, município de Uberlândia - MG. **Dissertação (Mestrado)** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFU. Uberlândia, 2003. 183 p.

KAWAKUBO, F.S.; MORATO, R.G.; CAMPOS, K.C.; LUCHUARI, A.; ROSS, J.L.S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**. 12., 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: SBSR, 2005. P. 2203-2210.

LANDGREBE, D. Hyperspectral image data analysis as a high dimensional signal processing problem. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 19, n. 1, p. 17–28, 2002.

LILLESAND, T.; KIEFER, R.W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. **Hidrologia de matas ciliares**. In: RODRIGUES; R.R.; LEITÃO FILHO; H.F. (Ed.) **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000. p.33-43.

MA, Z.; REDMOND, R.L. Tau coefficient for accuracy assessment of classification of remote sensing data. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v. 61, n. 4, p. 435-439, 1995.

PADUA, S.; PADUA, C.; DITT, E.; ALMEIDA, T. **O Código Florestal é capaz de nos deixar sem água**. O Eco, 2011. Disponível em: < <https://www.oeco.com.br/suzana-padua/25289-o-codigo-florestal-e-capaz-de-nos-deixar-sem-agua>>

PAIVA, J.B.D.de.; PAIVA, E.M.C.D. **Hidrologia aplicada á gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625 pp.

POMPÊO, M.; MOSCHINI-CARLOS, V.; BITENCOURT, M.D.; SÒRIA-PERPINYÀ, X.; VICENTE, E.; DELEGIDO, J. Water quality assessment using Sentinel-2 imagery with estimates of chlorophyll a, Secchi disk depth, and Cyanobacteria cell number: the Cantareira System reservoirs (São Paulo, Brazil). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, p. 34990-35011, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12975-x>.

PORTO, M.F.A.; LOBATO, F. Mechanisms of Water Management: Command & Control and Social Mechanisms. **Revista de Gestion Del'Agua de America Latina**, v.2, p.113-29, 2004.

PRADO, D. 2003. As caatingas da América do Sul. In: I.R. Leal, M. Tabarelli & J.M.C. Silva (eds.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife-Brasil: Editora Universitária, Universidade Federal de Pernambuco. pp. 3-73.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, New York, v.57, n.4. p. 241-262, 2003.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 24-30, 1994

ROSS, J.L.S. **Geomorfologia, ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990. 88 p.

ROSS, J.L.S. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, v.6, p.17-29.1992.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, v.6, p.17-29.1997.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Dossiê Institucional Empresas de Saneamento em São Paulo**. Espaço das Águas. Fundação Patrimônio Histórico da Energia e Saneamento. 2010.

SANTANA, D.P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2013. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SANTOS, R.F. **Planejamento Ambiental: Teoria e Prática**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2015.

SILVA, P.P.L.; GUERRA, A.J.T.; DUTRA, L.E.D. **Subsídios para avaliação econômica de impactos ambientais**. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs). Avaliação e perícia ambiental. 3ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

SILVA, S.R.S., COHIM, E. Redução do desperdício de água com a medição individualizada em prédios populares de Salvador. In: **CONGRESO INTERAMERICANO AIDIS**, 31. Santiago, Chile. Anais... Santiago, Chile, 2008.

TORRES, R.; COSENZA, B. Avaliação da gestão e sustentabilidade do Parque Nacional do Caparaó (Estados de Minas Gerais e Espírito Santo), Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 8, p. 395-419, 2017.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE, Secretaria de Planejamento da Presidência da República, 1977. 97p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.P.; ROUSSEAU, A.N.; MASSICOTTE, S.; VILLENEUVE, J.P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.240, n.3, p.225-242, 2001.

VAEZA, R.F.; OLIVEIRA-FILHO, P.C.; DISPERATI, A.A.; MAIA, A.G. Uso e ocupação do solo a partir de imagens orbitais de alta resolução para estudo em bacia hidrográfica em área urbana. In: **Anais do XIX Seminário de Pesquisa; Anais da XIV Semana de Iniciação Científica**; 2008; Irati. Irati, PR: Universidade Estadual do Centro-Oeste - UNICENTRO; 2008.

WALKER, J.P.; WILLGOOSE, G.R. On the effect of DEM accuracy on hydrology and geomorphology models. **Water Resource Research**, Washington, v.357, n.7, p.2.259-2.268, 1999.

WHATLEY, M.; CUNHA, P. **Diagnóstico Socioambiental Participativo do Sistema Cantereira**. São Paulo: ISA, 2007.