UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CAMPUS CASCAVEL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA – PGEAGRI

THAIS VIEIRA ELLER

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO COMO MECANISMO DE AUXÍLIO AO PLANEJAMENTO URBANO E RURAL NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2025

THAIS VIEIRA ELLER

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO COMO MECANISMO DE AUXÍLIO AO PLANEJAMENTO URBANO E RURAL NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais.

Orientador: Dr. Erivelto Mercante

Coorientador: Dr. Guilherme Irineu Venson

CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL

2025

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Eller, Thais Vieira
Mapeamento geológico-geotécnico como mecanismo de auxílio ao planejamento urbano e rural no município de Cascavel / Thais Vieira Eller; orientador Erivelto Mercante; coorientador Guilherme Irineu Venson. -- Cascavel, 2025.
54 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2025.

1. Processamento de imagens. 2. Mapas de solo. 3. Sondagem. I. Mercante, Erivelto , orient. II. Venson, Guilherme Irineu , coorient. III. Título.

Revisão de língua portuguesa, língua inglesa e normas: Dra. Dhandara Capitani.

unioeste
Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Reitoria
CNPJ 78.680.337/0001-84
Rua Universitária, 1619, Jardim Universitário
Tel.: (45) 3220-3000 - www.unioeste.br
CEP: 85819-110 - Cx. P.: 701
Cascavel - PARANÁ

PARANÁ
GOVERNO DO ESTADO

THAIS VIEIRA ELLER

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO COMO MECÂNISMO DE AUXÍLIO AO PLANEJAMENTO URBANO E RURAL NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ERIVELTO MERCANTE
Data: 14/02/2025 14:09:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador(a) - Erivelto Mercante
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

gov.br Documento assinado digitalmente
HENRIQUE DOS SANTOS FELIPETTO
Data: 14/02/2025 14:43:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Henrique dos Santos Felipetto
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

gov.br Documento assinado digitalmente
MARITANE PRIOR
Data: 17/02/2025 08:31:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 14 de fevereiro de 2025.

BIOGRAFIA

Thais Vieira Eller, nascida em 20 de setembro de 1994, é natural de Ponte Nova, MG. Possui graduação em Engenharia Geológica, pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), pelo Centro de Engenharias (CEng) em Pelotas, RS, com orientação da professora doutora Paola Bruno Arab, finalizada em 2022. Nos meses de março até maio de 2020, realizou estágio na Embrapa Clima Temperado, unidade Pelotas, RS, no setor de Núcleos Temáticos Recursos Naturais com atuação em modelagem SIG e processamento de imagens de sensoriamento remoto. Posteriormente, entre janeiro e setembro no ano de 2021, durante o último ano da graduação, trabalhou como estagiária no Parque Tecnológico Itaipu (PTI), em Foz do Iguaçu, PR, no setor do Centro de Competência em Estruturas de Barragens na área de Geotecnia. No ano de 2022, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Sistemas Biológicos e Agroindustriais – SBA sob orientação do Prof. Dr. Erivelto Mercante.

Dedico este trabalho ao meu marido, Augusto, e aos meus pais, Adilseia e Percy, por incentivarem e apoiarem.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, pela infraestrutura e o apoio;
À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos no curso de mestrado;
À empresa Fundações e Geologia Ltda. (Fungeo), por disponibilizar os dados de sondagens e o espaço da empresa para a realização do trabalho;
Ao meu orientador, Erivelto Mercante, pela orientação, os ensinamentos e o incentivo neste trabalho;
Ao meu coorientador, Guilherme Irineu Venson, pela confiança, pelos sábios conselhos e a ajuda que me proporcionou;
Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PGEAGRI, a todos os docentes e funcionários, pelos conhecimentos e ensinamentos compartilhados;
Ao Laboratório de Topografia e Geoprocessamento – GeoLab, por apoiar o desenvolvimento do trabalho e disponibilizar o espaço;
A todos os colegas do laboratório GeoLab, pelo apoio e a ajuda;
E a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram e apoiaram este projeto.

MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO COMO MECANISMO DE AUXÍLIO AO PLANEJAMENTO URBANO E RURAL NO MUNICÍPIO DE CASCAVEL

RESUMO

Eller, Thais Vieira. **Mapeamento geológico-geotécnico como mecanismo de auxílio ao planejamento urbano e rural no município de Cascavel**. Orientador: Erivelto Mercante. Coorientador: Guilherme Irineu Venson. 2025. 54 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2025.

O mapeamento digital de solos, por meio da coleta de imagens de radar, proporciona o conhecimento, a otimização e o manejo do solo, e promove práticas mais sustentáveis. A área de estudo abrange uma região de especial interesse geológico e ambiental, por ser onde ocorre a interseção das três bacias hidrográficas, sendo elas: Piquiri, Iguaçu e Paraná 3, que se conectam no município de Cascavel. Com isso, este projeto tem como objetivo principal desenvolver o mapeamento geológico-geotécnico dessa região, utilizando técnicas de geoprocessamento como ferramenta para o planejamento ambiental. A pesquisa integra dados de relatórios de sondagens do tipo SPT (Standard Penetration Test) disponibilizados pela empresa Fundações e Geologia Ltda. (Fungeo), imagens do radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e dados pluviométricos de estações de chuva do Instituto de Água e Terra (IAT) da região. Esses dados são processados e analisados com o uso do software QGIS e AutoCAD Civil 3D, visando a elaboração de mapas de vulnerabilidade ambiental. O estudo propõe a criação de mapas que avaliem o grau de vulnerabilidade ambiental de atributos como geomorfologia, geologia, solos, vegetação e clima, além da identificação da vulnerabilidade potencial e emergencial da área de estudo. A metodologia aplicada busca fornecer uma visão integrada das condições ambientais e dos riscos associados ao uso e à ocupação do solo, auxiliando no planejamento urbano e rural do município. Por meio desse mapeamento, foi possível identificar que a vulnerabilidade potencial foi predominantemente da classe Medianamente Estável/Vulnerável com 1683,4 km^2 (81,39%) de área. Já a análise de vulnerabilidade emergente obteve uma predominância da classe Moderadamente Vulnerável com 1129,6 km^2 (54,91%) de área. Esse padrão está diretamente associado à substituição de vegetação nativa por monoculturas, pastagens e áreas urbanizadas. A análise da vulnerabilidade emergencial revelou um quadro mais preocupante, indicando a influência significativa das atividades antrópicas sobre o equilíbrio ambiental. Dessa forma, a fragilidade ambiental observada reforça a necessidade de ações conservacionistas e de um planejamento territorial mais eficiente, medidas como a recuperação de áreas degradadas, a promoção de práticas de manejo sustentável e a aplicação de políticas públicas direcionadas à preservação ambiental.

Palavras-chave: Processamento de imagens, mapas de solo, sondagem.

GEOLOGICAL-GEOTECHNICAL MAPPING AS A SUPPORT MECHANISM FOR URBAN AND RURAL PLANNING IN THE MUNICIPALITY OF CASCAVEL

ABSTRACT

Eller, Thais Vieira. **Geological-geotechnical mapping as a support mechanism for urban and rural planning in the municipality of Cascavel.** Advisor: Erivelto Mercante. Co-advisor: Guilherme Irineu Venson. 2025. 54 f. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) - Western Paraná State University, Cascavel – Paraná, 2025.

Digital soil mapping through radar image acquisition enables enhanced understanding, optimization, and management of soil resources, thereby promoting more sustainable practices. The study area encompasses a region of significant geological and environmental interest, as it marks the convergence of three major hydrographic basins: Piquiri, Iguaçu, and Paraná 3, all intersecting within the municipality of Cascavel. The primary objective of this research is to develop a geological-geotechnical mapping of the region, employing geoprocessing techniques as tools for environmental planning. The study integrates data from Standard Penetration Test (SPT) borehole reports provided by Fundações e Geologia Ltda. (Fungeo), radar images from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) supplied by the National Institute for Space Research (INPE), and rainfall data from meteorological stations of the Institute for Water and Land Management (IAT). These datasets were processed and analyzed using QGIS and AutoCAD Civil 3D software, with the aim of generating environmental vulnerability maps. The research proposes the creation of maps assessing the degree of environmental vulnerability based on attributes such as geomorphology, geology, soils, vegetation, and climate, in addition to identifying the potential and emergent vulnerability of the study area. The applied methodology seeks to provide an integrated view of environmental conditions and associated risks related to land use and occupation, thus supporting both urban and rural planning within the municipality. The mapping revealed that the potential vulnerability predominantly falls within the "Moderately Stable/Vulnerable" class, covering an area of 1,683.4 km² (81.39%). In contrast, the emergent vulnerability analysis indicated a predominance of the "Moderately Vulnerable" class, accounting for 1,129.6 km² (54.91%). This pattern is directly linked to the replacement of native vegetation with monocultures, pastures, and urbanized areas. The emergent vulnerability analysis highlighted a more concerning scenario, demonstrating the significant influence of anthropogenic activities on environmental balance. Consequently, the observed environmental fragility underscores the urgent need for conservation efforts and more efficient territorial planning, including measures such as the restoration of degraded areas, promotion of sustainable land management practices, and implementation of public policies aimed at environmental preservation.

Keywords: Image processing, soil maps, borehole logs.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS ..... **X**
LISTA DE FIGURAS ..... **XI**
1 INTRODUÇÃO **1**
2 OBJETIVOS **3**
2.1 Objetivo geral 3
2.2 Objetivos específicos 3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **4**
3.1 Sensoriamento remoto 4
3.2 Sistemas de informações geográficas 7
3.3 Geoprocessamento aplicado aos solos 7
3.4 Os principais métodos de reconhecimento do solo 8
3.5 Sondagem SPT (Standard penetration test) 9
3.6 Vulnerabilidade ambiental 11
3.7 Estabilidade morfodinâmica 12
3.7.1 Vulnerabilidade geológica 14
3.7.2 Vulnerabilidade geomorfológica 15
3.7.3 Vulnerabilidade solos 16
3.7.4 Vulnerabilidade do clima 17
3.7.5 Vulnerabilidade vegetal 17
4 MATERIAL E MÉTODOS **19**
4.1 Fluxograma 19
4.2 Área de estudo 21
4.3 Delimitação das bacias hidrográficas 22
4.4 Dados geológicos 23
4.5 Dados geomorfológicos 23
4.6 Dados de solos 24
4.7 Dados de vegetação 24
4.8 Dados de clima 25
4.9 Metadados utilizados 25
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO **27**
6 CONCLUSÕES **37**
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS **38**
8 REFERÊNCIAS **39**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Análise da estabilidade das classes morfodinâmicas 14
Tabela 2 Escala de vulnerabilidade das rochas mais comuns 15
Tabela 3 Índice de vulnerabilidade da declividade 16
Tabela 4 Índice de vulnerabilidade pedológica 16
Tabela 5 Índice de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica 17
Tabela 6 Base de dados para o desenvolvimento do estudo 26
Tabela 7 Base de dados para o desenvolvimento do estudo 27
Tabela 8 Índice de vulnerabilidade para uso e cobertura do solo 33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Aplicações dos níveis de coleta no sensoriamento remoto 5
Figura 2 Espectro eletromagnético. 6
Figura 3 Gráfico comprimento de onda da reflectância de alguns alvos..... ..6
Figura 4 Croqui do arranjo de uma sondagem SPT. 10
Figura 5 Exemplo de relatório de sondagem SPT. 11
Figura 6 Escala de vulnerabilidade à perda de solo de unidades territoriais locais..... 13
Figura 7 Fluxograma das etapas realizadas no trabalho. 20
Figura 8 Local do estudo. 22
Figura 9 Mapa de declividades da área de estudo. 28
Figura 10 Mapa de geologia da área de estudo..... 29
Figura 11 Mapa de solos da área de estudo..... 30
Figura 12 Mapa de localização dos perfis das sondagens da área de estudo. 31
Figura 13 Perfil A-A' das sondagens da área de estudo. 31
Figura 14 Perfil B'-B das sondagens da área de estudo 32
Figura 15 Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo. 33
Figura 16 Mapa de vulnerabilidade potencial da área de estudo. 34
Figura 17 Mapa de vulnerabilidade emergencial da área de estudo 35

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e a expansão agrícola têm gerado pressões significativas sobre os recursos naturais e o uso do solo, especialmente em regiões de grande importância ambiental e econômica como o município de Cascavel, no Paraná. Diante desse cenário, a necessidade de planejamento territorial eficiente e sustentável torna-se cada vez mais evidente. O mapeamento geológico-geotécnico, utilizando técnicas de geoprocessamento e a integração de múltiplas fontes de dados, apresenta-se como uma ferramenta essencial para a compreensão detalhada das características ambientais e para a gestão adequada desses recursos (Zuquette,1993).

A região do município de Cascavel no estado do Paraná apresenta solo propício para plantação, por exemplo, de soja e milho, que com o avanço de novas tecnologias no agronegócio, leva ao melhoramento do aproveitamento do solo de forma consciente e com custos mais baixos. As informações geradas por essas inovações tecnológicas possibilitam uma maior capacidade do sistema fornecer informações adequadas para o tipo de função que o solo pode proporcionar em uma determinada região.

Nesse contexto, o geoprocessamento destaca-se como uma ferramenta essencial para a obtenção dos dados ecos por radar interferométrico de abertura sintética (interferometria SAR), como é o caso do SRTM, sendo essencial o processamento desses dados obtidos pelo sistema SAR (Radar de Abertura Sintética), para que seja possível a geração de imagens. Segundo o INPE, esse procedimento é utilizado pois a região espectral de operação do radar possibilita a alta transmissão das ondas eletromagnéticas na atmosfera indiferente da iluminação solar, mesmo durante períodos de precipitação ou quando a atmosfera se apresenta nublada, permitindo assim gerar imagens sob diversas condições.

Assim, a aplicação do mapeamento geológico-geotécnico por meio de geoprocessamento (na interseção das bacias no município de Cascavel) é fundamental para identificar e avaliar as áreas de maior e de menor vulnerabilidade ambiental, fornecendo informações cruciais para a proteção dos recursos naturais e o desenvolvimento ordenado da região. Para que isso seja possível, existe a metodologia de Crepani et al. (2001), que é amplamente utilizada para a avaliação da vulnerabilidade ambiental, considerando atributos essenciais como geomorfologia, geologia, solos, vegetação e clima, além da análise das fragilidades potencial e emergencial da área de estudo.

Aplicar essa metodologia no contexto de Cascavel permite uma compreensão mais precisa dos riscos e das vulnerabilidades do solo e dos recursos hídricos, contribuindo para a elaboração de estratégias mais eficazes de mitigação e manejo ambiental. Ao integrar diversos tipos de dados e tecnologias de geoprocessamento, este estudo busca fornecer subsídios técnicos para as autoridades locais e a comunidade, auxiliando na tomada de decisões fundamentadas e no planejamento sustentável do uso do solo e da ocupação do

município.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um mapeamento geológico-geotécnico detalhado na região pertencente ao município de Cascavel, localizado na interseção de três importantes bacias hidrográficas: Piquiri, Paraná 3 e Iguaçu. Para isso, foi utilizada uma metodologia integrada que combina dados de sondagens do tipo SPT (Standard Penetration Test), fornecidos pela empresa Fungeo, imagens do radar SRTM disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e dados pluviométricos das estações de chuva da região, disponibilizados pelo Instituto de Água e Terra (IAT). Esses dados foram processados e analisados utilizando softwares como QGIS e AutoCAD Civil 3D, com o intuito de elaborar mapas de vulnerabilidade ambiental baseados na metodologia de Crepani et al. (2001).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Elaborar um mapeamento geológico-geotécnico detalhado na região que conecta as três bacias dentro do município de Cascavel, utilizando técnicas de geoprocessamento e a integração de dados de sondagem SPT, imagens de radar SRTM e dados pluviométricos regionais, com base na metodologia de Crepani et al. (2001), quantificando a vulnerabilidade ambiental, e elaborar mapas que orientem o planejamento urbano e rural, contribuindo para o uso sustentável do solo e a preservação dos recursos naturais da região localizada na interseção das bacias hidrográficas Piquiri, Paraná 3 e Iguaçu.

2.2 Objetivos específicos

a. Elaborar mapas de vulnerabilidade ambiental com base na metodologia de Crepani et al. (2001), avaliando os atributos geomorfologia, geologia, solos, vegetação e clima, e realizar o mapeamento geológico-geotécnico dentro do município de Cascavel;
b. Avaliar a fragilidade potencial e emergencial da área de estudo, identificando áreas de maior e de menor vulnerabilidade ambiental na interseção das bacias Iguaçu, Paraná 3 e Piquiri no município de Cascavel;
c. Propor diretrizes e recomendações para o planejamento urbano e rural, baseadas nos resultados dos mapas, visando a gestão sustentável do território e a mitigação de riscos ambientais;
d. Fornecer subsídios técnicos e informações para as autoridades locais e a comunidade, visando a tomada de decisões fundamentadas sobre o uso e a ocupação do solo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sensoriamento remoto

De acordo com Florenzano (2011), o termo sensoriamento remoto (SR) é definido como uma tecnologia que possibilita obter imagens e outras informações da superfície terrestre por meio do registro da energia emitida ou refletida pela superfície. Esse registro da energia na cobertura vegetal, no solo, corpos de água ou estrutura física da terra variam entre uma e outra e de lugar para lugar, dependendo do ângulo que o sensor está posicionado e do tempo de captura (Siddiqui et al., 2018).

Há diversas pesquisas que utilizam métodos de sensoriamento remoto para a realização de estudos do comportamento de culturas como, por exemplo, trigo, soja e milho (Deng et al., 2018). As tecnologias do SR tornaram-se menos caras nos últimos anos, o que melhorou seu potencial para fins operacionais (Rodrigues, 2018).

O SR é aplicado como uma forma não destrutiva de analisar alguns parâmetros do desenvolvimento de culturas, e assim se torna uma ferramenta indireta para a detecção de estresses por meio da medição de reflectância em comprimentos de ondas diferentes (Rustioni et al., 2018). A realização de monitoramento e a estimação da variabilidade das culturas dentro do campo podem auxiliar os agricultores a decidirem a melhor opção em diferentes situações (Kayad et al., 2019). Entretanto, segundo Weiss, Jacob e Duveiller (2020), nenhuma das informações obtidas pelo SR é feita de forma direta, visto que a relação entre os parâmetros e o que é medido devem ser modelados, com o intuito de inferir a resposta desejada.

Se comparados com dados in situ, o sensoriamento remoto e produtos modelos apresentam algumas vantagens, por exemplo, menos dados ausentes, maior abrangência de cobertura espacial e séries temporais maiores (Juca; Ribeiro Neto, 2022), como é possível observar na Figura 1.

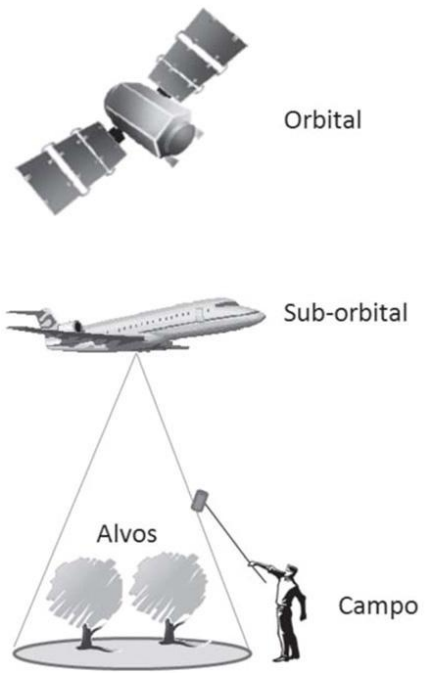

Figura 1 Aplicações dos níveis de coleta no sensoriamento remoto.
Fonte: Shimabukuro, Maeda e Formaggio (2009).

Segundo a NASA, uma imagem de radar é baseada em reflexão de ondas eletromagnéticas, o que permite a visualização de superfícies independente das condições de iluminação ou climática, por meio de emissão de pulsos de ondas de rádio os quais atingem a superfície e são refletidos de volta ao receptor. A observação do tempo de retorno e da intensidade do sinal refletido possibilita a construção de uma imagem detalhada do alvo estudado.

A obtenção de dados por sensoriamento remoto, como qualquer outra atividade, requer o uso de energia. A energia com a qual operam os sensores remotos pode ser proveniente de uma fonte natural, como a luz do sol e o calor emitido pela superfície da Terra, ou pode ser de uma fonte artificial como, por exemplo, a do flash utilizado em uma máquina fotográfica e o sinal produzido por um radar.

A imagem é conseguida de forma remota por meio de sensores imageadores que são acoplados em satélites artificiais. Esses sensores são como uma máquina fotográfica do satélite, que podem ser passivos ou ativos, no qual o passivo utiliza Radiação Eletromagnética (REM) natural refletida ou que é emitida por meio da superfície terrestre; já os ativos utilizam a Radiação Eletromagnética artificial, que é produzida por radares instalados em satélites. A Radiação Eletromagnética é determinada como a propagação de energia, por intermédio de variação temporal dos campos magnéticos e elétricos da onda portadora. A REM apresenta regiões espectrais nomeadas como espectro eletromagnético, que são divididas em intervalos de comprimentos de onda: infravermelho, visível, próximo médio, microondas e termal (Figura 2).

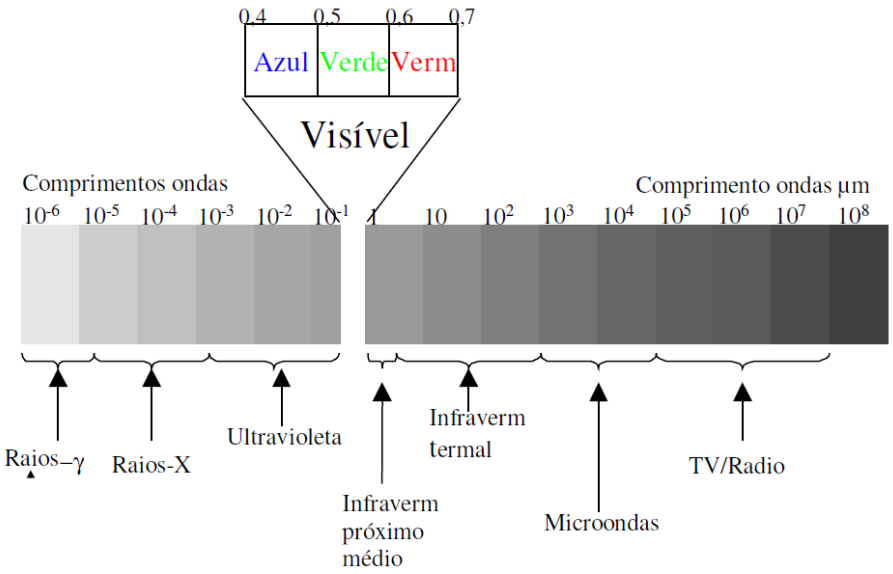

Figura 2 Espectro eletromagnético.
Fonte: Figueiredo (2005).

Objetos de interesse a serem estudados na superfície terrestre, como, por exemplo, água, solo e vegetação, absorvem, transmitem e refletem radiação eletromagnética que irão variar dependendo do comprimento da onda, de suas propriedades físicas e químicas, que irão gerar assinaturas espectrais como mostra a Figura 3. Em função dessa interação, a radiação que é aplicada nos alvos encaminha para os radares a assinatura espectral destes alvos, já que os radares apresentam sensibilidade às diferenças de comportamento, por meio dos sensores instalados nos satélites, no qual registram estas diferenças no formato de imagens (Florenzano, 2011).

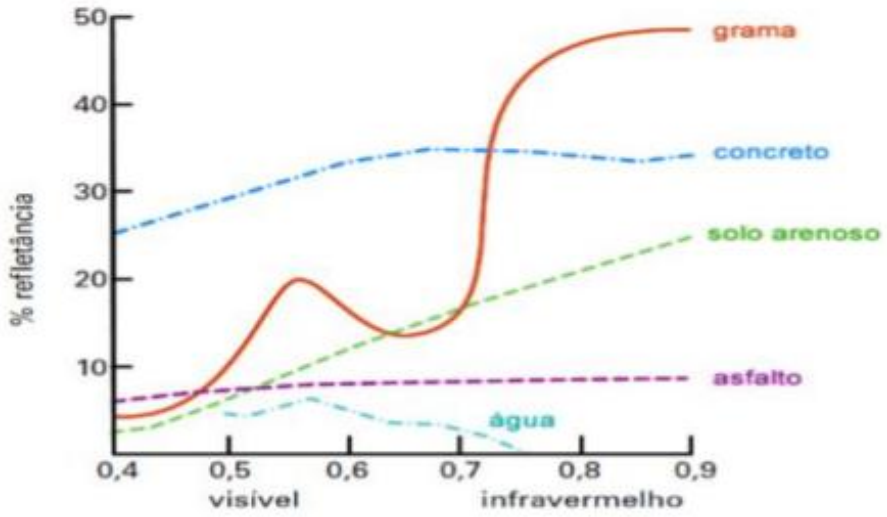

Figura 3 Gráfico comprimento de onda da reflectância de alguns alvos.
Fonte: Souza (2010).

Em minerais e rochas, os íons ferroso e férrico, água e hidroxila são os elementos e

substâncias mais importantes que determinam as bandas de absorção. Enquanto a assinatura espectral dos solos mais importantes são a granulometria, composição mineral, umidade, capacidade de troca catiônica e matéria orgânica, no qual a material orgânico provoca o aumento da absorção espectral na faixa 8 espectro reflexivo entre 0,4 e 2,5 µm. Já a água limpa consegue absorver mais a luz do que água suja, na faixa do espectro a água diminui a reflectância conforme se desloca para os comprimentos de ondas que são maiores; em particular nas faixas azul e verde é possível observar maior reflectância da água, no qual diminui aos poucos na direção do infravermelho (Figueiredo, 2005).

3.2 Sistemas de informações geográficas

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilita a confecção de planilhas de dados, uso de Sistemas de Posicionamento, também de processos de digitalização e vetorização de imagens, que foram obtidos por meio de sensoriamento remoto (Martini et al., 2006). O SR coleta imagens orbitais que podem ser adquiridas por diferentes tipos de satélites, os quais são ferramentas de grande utilidade para avaliação da distribuição espacial e da condição de elementos ambientais (Martini et al., 2006). À proporção que a tecnologia aprimora e a disponibilidade de dados geoespaciais aumentam, o mapeamento da área será capaz de melhorar sua qualidade de detalhes (Schmeltz; Marcotullio, 2019).

Segundo Cosme (2012), o Geoprocessamento engloba tecnologias que são capazes de coletar informações processadas posteriormente pelos SIG computacionais direcionados ao processamento de dados georreferenciados. Com isso, o Sistema de Informação Geográficas compõe um conjunto de elementos que geram informações e dados geográficos em um âmbito que possibilita, dentre várias outras atribuições essenciais, interpretar, monitorar, analisar e proporcionar informações georreferenciadas.

Utilizar o sistema SIG, de acordo com Sanches de Oliveira (2008), é essencial no controle e monitoramento ambiental, já que é capaz de proporcionar, além de armazenar imagens e informações, a junção desses, como também permite uma visualização mais ampla e precisa da área de estudo. Com isso, a utilização do SIG possibilita gerenciar e realizar uma avaliação espacial de uma área que compõe aspectos climatológicos e geográficos (Javid et al., 2019). Além disso, o uso da tecnologia SIG permite a integração de dados morfométricos da bacia, associação da suscetibilidade natural de bacias hidrográficas, solos e intervenções externas (Elsadek; Ibrahim; Mahmod, 2019).

3.3 Geoprocessamento aplicado aos solos

Produtos com vínculo às geotecnologias são de suma importância para se obter e renovar registros do uso e cobertura do solo, uma vez que se torna possível gerar

mapas temáticos e quantificação de áreas como: campo (vegetação nativa composta de gramíneas), água (compreendem açudes, barragens e canais fluviais), solo exposto (áreas com atividades agrícolas e em pousio), florestas (nativas e exóticas), entre outras (Fantinel, 2020).

Dessa forma, o planejamento ambiental é fundamental, pois conhecer as áreas de uso de uma determinada região possibilita o manejo de forma adequada e, ademais, identificar possíveis problemas causados por meio de ações antrópicas sobre essa área. Além disso, mapas de potencialidades agrícolas, quando comparados e sobrepostos com mapas de uso e cobertura da terra, tipologias de solo, declividade, geomorfologia e geologia permitem definir áreas que apresentam diferentes níveis de acordo com o tipo de uso (Silveira et al., 2015).

O mapeamento digital dos solos é uma alternativa econômica e mais ágil, quando comparada aos métodos tradicionais de mapeamento, que pode ser definido como a elaboração de sistemas espaciais de informação que utilizam modelos numéricos para identificar as variações espaciais nos tipos de solos, por meio de reconhecimento, observações e de aspectos ambientais relacionados, por exemplo, geomorfométricas, curvaturas e declividades (Lagacherie, 2008).

Segundo Hudson (1992), boa parte de novas formas de levantamento de solos compõe a indicação dos padrões de ocorrência natural do solo, que é feita por meio de modelagem solo-paisagem, que tem se tornado um importante método para levantamento de solo. Os modelos de solo-paisagem são combinados com SIG e bancos de dados para a determinação da distribuição espacial e variação das propriedades do solo (Petersen et al., 1991).

3.4 Os principais métodos de reconhecimento do solo

Dentro da geotecnia, existem várias maneiras de realizar prospecção e a análise do solo e suas características, e para tal é necessário escolher o método que melhor combina com o tipo de obra, importância, tamanho e orçamento. Segundo Monticeli e Tressoldi (2013) e Costa (2012), as investigações geotécnicas e geoambientais são divididas entre investigações de superfície e de subsuperfície, que utilizam três métodos de reconhecimento dos solos, os quais podem ser classificados em: métodos indiretos, métodos diretos e métodos semidiretos.

Nos métodos indiretos, não há contato entre a pessoa que está realizando a investigação e o material que está sendo analisado. O reconhecimento das propriedades pode ser feito por meio de métodos geofísicos, como, por exemplo, a velocidade de propagação das ondas, enquanto os métodos diretos são os que permitem a realização da análise do investigador, o contato direto com o material a ser investigado, por exemplo, por meio de

escavações. Já nos métodos semidiretos, o investigador não se encaminha até a profundidade onde se encontra o material, porém permite o contato direto ao material por meio de amostras coletadas por diversos tipos de sondagens (Monticeli; Tressoldi, 2013; Costa, 2012).

As principais investigações na superfície são os mapeamentos, enquanto as investigações de subsuperfície são as sondagens mecânicas e investigações geofísicas. Como existem certas limitações em caracterizar o meio físico, qualquer utilização de um desses métodos requer a combinação da utilização de dois ou mais métodos, para uma melhor qualidade e confiabilidade dos resultados (Costa, 2012).

Dependendo do objetivo do trabalho, será determinado o tipo de levantamento e com isso as decisões que serão tomadas em relação à composição de unidades de mapeamento, qualidade e escala do material cartográfico e sensores remotos, métodos de prospecção. Por meio dessa decisão do método de análise, resultará na qualidade das informações contidas nos mapas e relatórios gerados (ABGE, 2018).

3.5 Sondagem SPT (Standard penetration test)

A sondagem SPT (Standard Penetration Test) é um dos métodos mais utilizados no Brasil para ensaios de prospecção e estudo de solos e é regulamentado por meio da ABNT NBR 6484:2001 – Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – Método de ensaio. É por meio dessa normativa que se deve seguir os procedimentos de ensaio e os itens a serem colocados no relatório do ensaio. Também segundo a norma ABNT NBR 6484:2001, o ensaio utiliza um equipamento que possui as seguintes peças: a base é um tripé com roldana na parte superior, guincho mecânico, trados (concha e helicoidal), hastes, corda, ressalto, haste, martelo de 65kg e barrilete (Figura 4).

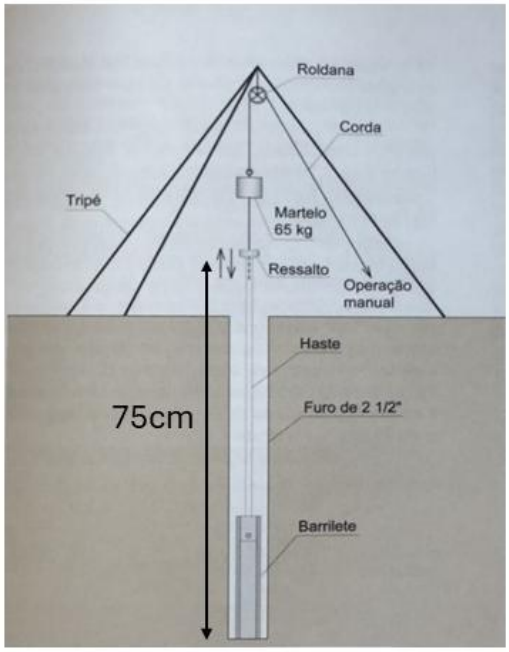

Figura 4 Croqui do arranjo de uma sondagem SPT.
Fonte: Adaptado de ABGE (2018).

O ensaio SPT consiste na inserção de uma haste em um furo anteriormente definido, por meio da energia de um batente de 65 kg em queda livre a 75 cm de altura, na parte de cima da haste. Na realização do ensaio do SPT, retiram-se amostras de solo, que posteriormente são enviadas ao laboratório para serem analisadas. Por último, é realizado o relatório da sondagem (Figura 5), no qual é apresentada a resistência à penetração (N), que é determinada por meio dos números de golpes necessários para a cravação de 30 cm. O material obtido na realização da sondagem apresenta também espessura das camadas e o nível d’água (Velloso, 2010).

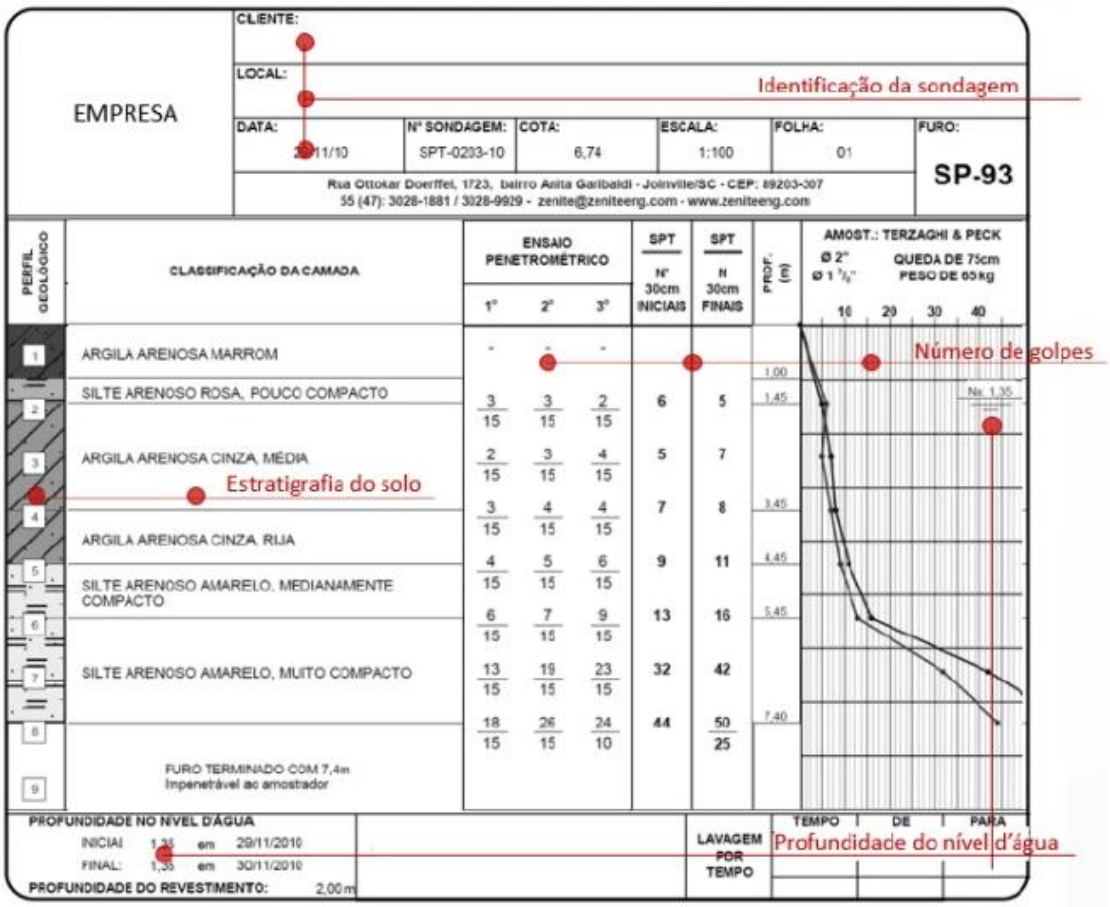

Figura 5 Exemplo de relatório de sondagem SPT.
Fonte: Santos (2016).

3.6 Vulnerabilidade ambiental

Segundo Aquino (2017), a vulnerabilidade ambiental refere-se à medida em que um sistema natural é sensível ou incapaz de enfrentar os impactos resultantes de interações externas. Ela pode surgir das características intrínsecas do ambiente ou das pressões geradas por atividades humanas. Além disso, a vulnerabilidade também está presente em sistemas frágeis que possuem baixa resiliência, ou seja, uma limitada capacidade do ambiente de retornar ao seu estado natural ideal após passar por uma situação crítica.

Dessa forma, as questões relacionadas à vulnerabilidade se tornaram um dos principais focos da ciência dedicada à sustentabilidade, funcionando como um amplo conceito que engloba os desafios nas relações entre humanos e o meio ambiente, incluindo estudos sobre as mudanças climáticas e as transformações ambientais globais (Jordão; Moretto, 2015).

Para lidar com a vulnerabilidade em um mundo dinâmico e imprevisível, é essencial que os tomadores de decisão em diferentes níveis mudem efetivamente sua abordagem em relação ao desenvolvimento socioeconômico e ao uso dos recursos naturais. Reformas institucionais e legais são fundamentais para que os processos de planejamento e gestão

sejam orientados para o futuro e incluam considerações sobre vulnerabilidade, como as sensibilidades e a capacidade de adaptação dos ecossistemas (Luers, 2005).

Diversos estudos destacam a importância de integrar múltiplas variáveis ambientais para uma avaliação abrangente da vulnerabilidade. Segundo Birkmann (2006), a vulnerabilidade ambiental deve considerar aspectos físicos, sociais e econômicos, permitindo uma abordagem multidisciplinar que favoreça o planejamento sustentável. A metodologia de Crepani et al. (2001) oferece uma estrutura robusta para a análise de vulnerabilidade, combinando dados geotécnicos, geomorfológicos, climáticos e vegetacionais para produzir mapas detalhados que auxiliam na tomada de decisões estratégicas para a gestão ambiental. Essa avaliação é fundamental para identificar áreas prioritárias para conservação e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de impactos ambientais. Em regiões como Cascavel, onde há a interseção das bacias hidrográficas Piquiri, Iguaçu e Paraná 3, a vulnerabilidade ambiental assume uma relevância ainda maior devido à complexa interação entre diferentes sistemas ecológicos e às pressões decorrentes do uso intensivo do solo.

Assim, para avaliar a vulnerabilidade ambiental, é necessário desenvolver um plano que também possa considerar outros aspectos, como os sociais e econômicos de uma região, selecionando indicadores adequados que permitam ao pesquisador identificar a real fragilidade ou resistência de um sistema aos riscos a que ele pode estar sujeito. Medeiros et al. (2012), ao estudarem as áreas mais vulneráveis na zona Oeste de Natal (RN), utilizaram uma metodologia que classifica as áreas de risco e o grau de vulnerabilidade com base em processos morfodinâmicos, relacionando os resultados aos possíveis riscos para a população direta ou indiretamente afetada.

Além disso, ferramentas como o sistema de informação geográfica (SIG) podem ser incorporadas na avaliação para facilitar a identificação das áreas mais vulneráveis. No trabalho de Costa et al. (2006), os autores utilizaram SIG para a criação de mapas de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de mapas base de geologia, solos, vegetação, geomorfologia e uso e ocupação da Bacia Potiguar (RN), possibilitando a identificação de áreas mais sensíveis a problemas ambientais e permitindo sugestões para um melhor planejamento das ações de controle e proteção. Figueiredo et al. (2007) e Figueiredo (2010), ao analisarem a vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização utilizaram SIG como ferramenta de álgebra de mapas para manipular dados e identificar áreas de alta vulnerabilidade.

3.7 Estabilidade morfodinâmica

De acordo com Cristofoletti (1980), a Teoria do Equilíbrio Dinâmico define o equilíbrio de uma paisagem como o resultado do balanço entre os processos morfogenéticos e a resistência das rochas, levando em consideração também as influências tectônicas na região. O ajuste entre essas forças ocorre simultaneamente em diferentes partes da bacia de

drenagem. Dessa forma, em áreas onde as rochas são mais resistentes (como os quartzitos, por exemplo), as encostas tendem a ser mais íngremes em comparação com aquelas compostas por rochas de menor resistência.

A metodologia que Crepani et al. (2001) estabeleceu em seu modelo de vulnerabilidade possibilitar a análise de situações que ocorram de forma natural, estabelecendo classes de vulnerabilidade à perda do solo (Figura 6) que é dividido dentro de 21 cores, o qual baseou-se nas três cores primárias (Vermelho, Azul e Verde), que identifica onde há a predominância do processo de pedogênese.

UNIDADE DE PAISAGEM	MÉDIA			GRAU DE VULNERAB.	GRAU DE SATURAÇÃO			
					VERM.	VERDE	AZUL	CORES
U1		3,0		VULNERÁVEL	255	0	0	
U2		2,9			255	51	0	
U3		2,8			255	102	0	
U4	V	2,7			255	153	0	
U5	U	2,6		MODERADAM. VULNERÁVEL	255	204	0	
U6	L	2,5	E		255	255	0	
U7	N	2,4	S		204	255	0	
U8	E	2,3	T		153	255	0	
U9	R	2,2	A	MEDIANAM. ESTÁVEL/ VULNERÁVEL	102	255	0	
U10	A	2,1	B		51	255	0	
U11	B	2,0	I		0	255	0	
U12	I	1,9	L		0	255	51	
U13	L	1,8	I		0	255	102	
U14	I	1,7	D	MODERADAM. ESTÁVEL	0	255	153	
U15	D	1,6	A		0	255	204	
U16	A	1,5	D		0	255	255	
U17	D	1,4	E		0	204	255	
U18	E	1,3		ESTÁVEL	0	153	255	
U19		1,2			0	102	255	
U20		1,1			0	51	255	
U21		1,0			0	0	255	

Figura 6 Escala de vulnerabilidade à perda de solo de unidades territoriais locais.
Fonte: Crepani et al. (2001).

Esse modelo apresenta três categorias morfodinâmicas, onde se tem como resultado a definição de valores que intercalam de 1,0 a 3,0, o qual identifica se a condição morfodinâmica tenderá a apresentar instabilidade ou estabilidade, conforme apresentado na Tabela 1 (Crepani et al., 2001).

Tabela 1 Análise da estabilidade das classes morfodinâmicas

Categoria morfodinâmica	Relação Pedogênese/morfogênese	Valor
Estável	Prevalece a pedogênese	1,0
Intermediária	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2,0
Instável	Prevalece a morfogênese	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

Na determinação de grau de vulnerabilidade, a metodologia proposta por Crepani et al. (2001) é adotada separadamente nas unidades territoriais básicas (UTBs), as quais podem ser divididas em duas etapas, as unidades de paisagem natural (Fragilidade Potencial) e os polígonos de ações antrópicas (Fragilidade Emergencial), considerando os temas: Geomorfologia, Geologia, Vegetação, Solos e Clima. Cada tema recebe um valor no fim, obtido pela média aritmética dos valores individuais, conforme a Equação 01, que indica o posicionamento da unidade na escala de vulnerabilidade à perda de solo.

$$V = \frac{G+R+S+Vg+C}{5} \qquad \text{Eq.01}$$

Em que: V - Vulnerabilidade; G - vulnerabilidade da Geologia; R - vulnerabilidade da Geomorfologia; S - vulnerabilidade dos Solos; Vg - vulnerabilidade da Vegetação; C - vulnerabilidade do Clima.

Segundo Crepani et al. (2001), os valores atribuídos a cada unidade territorial indicam maior estabilidade se estão próximos de 1,0, sendo que unidades com valores próximos a 2,0 apresentam estabilidade moderada, enquanto aquelas com valores próximos a 3,0 indicam uma maior vulnerabilidade por sua instabilidade.

3.7.1 Vulnerabilidade geológica

Na vulnerabilidade associado a geologia, é de grande importância a utilização de informações acerca da evolução geológica do local de estudo como, por exemplo, a resistência da rocha e também por meio de informações do grau de coesão das rochas que a formam. O grau de coesão refere-se à força de ligação entre os minerais ou partículas que compõem essas rochas, cada tipo de rocha determina as características dos processos erosivos (Crepani et al., 2001). A proporção definida da vulnerabilidade da composição das rochas pode ser estabelecida, segundo Crepani et al. (2001), em rochas com baixa coesão, em que predominam processos erosivos (morfogênese), recebendo valores próximos a 3,0; enquanto em rochas coesas predominam os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese), sendo atribuídos valores próximos a 1,0. É possível que esses dados sejam reunidos em uma tabela, como a Tabela 2.

Tabela 2 Escala de vulnerabilidade das rochas mais comuns

Rochas	Escala vulnerabilidade	Rochas	Escala vulnerabilidade	Rochas	Escala vulnerabilidade
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Riólito, Granito, Dacito	1,1	Piroxenito, Anfibolito Kimberlito, Dunito	1,8	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2	Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9	Grauvacas, Arcózios	2,6
Migmatitos, Gnaisses	1,3	Estaurolita xisto, Xistos granatíferos	2,0	Siltitos, Argilitos	2,7
Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4	Filito, Metassiltito	2,1	Folhelhos	2,8
Andesito, Diorito, Basalto	1,5	Ardósia, Metargilito	2,2	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6	Mármores	2,3	Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.7.2 Vulnerabilidade geomorfológica

Para avaliar o índice de vulnerabilidade a sofrer erosão no fator de vulnerabilidade geomorfológica, é estabelecida por Crepani et al. (2001) a análise individual de três parâmetros, que são: grau de dissecação do relevo pela drenagem, declividade e amplitude altimétrica, por meio da Equação 02. A dissecação do relevo pela drenagem é um fator que se encontra por meio da largura dos interflúvios ou também pela densidade da drenagem; enquanto, a declividade é determinada pela inclinação do relevo, pois a sua relação direta com a velocidade altera de energia potencial em energia cinética.

$$R = \frac{G+A+D}{3} \qquad \text{Eq. 02}$$

Em que: R - Vulnerabilidade Geomorfológica; G - vulnerabilidade do grau de dissecação; A - vulnerabilidade à amplitude altimétrica; D - vulnerabilidade à declividade.

É proposto por Crepani et al. (2001) a relação de vulnerabilidade com a classe morfométrica e a declividade (Tabela 3), a qual é definida em ordem crescente de valores da vulnerabilidade que variam de 1,0 a 3,0, aplicável para declividades muito baixas (<2%) e o maior para declividades muito altas (>50%).

Tabela 3 Índice de vulnerabilidade da declividade

Classes Morfométricas	Declividade (%)	Valores de Vulnerabilidade
Muito Baixa	< 2	1,0
Baixa	2 – 6	1,5
Média	6 – 20	2,0
Alta	20 - 50	2,5
Muito Alta	> 50	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.7.3 Vulnerabilidade solos

Para o fator da vulnerabilidade pedológica é considerada a vulnerabilidade à erosão do solo em relação à maturidade pedológica, em que se considera o grau de desenvolvimento desse solo. Essa relação é observada na Tabela 4, em que Crepani et al. (2001) considerou a classificação de solos da Embrapa (1999), resultando em menor valor de vulnerabilidade para solos estáveis, desenvolvidos e profundos (1,0) e os mais suscetíveis à erosão para solos jovens (3,0) para solos mais vulneráveis.

Tabela 4 Índice de vulnerabilidade pedológica

Classificação de Solos (Embrapa, 1999)	Vulnerabilidade
Latossolos Amarelos Latossolos Vemelhos-Amarelos Latossolos Vermelho Latossolos Brunos Latossolos (...) Húmicos Latossolos Bruno (...) Húmicos	1,0
Argissolos Argissolos Luvissolos Alissolos Nitossolos Argissolos Nitossolos Luvissolos Chernossolos Planossolos Espodossolos	2,0
Cambissolos	2,5
Neossolos Litólicos Neossolos Flúvicos Neossolos Rogolíticos Neossolos Quarzarênicos Vertissolo Organossolo Gleissolos Gleissolos Plintossolos Plintossolos Afloramento Rochosos	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.7.4 Vulnerabilidade do clima

Um dos principais motivos para o processo de exposição de partes subjacentes das rochas é a ação da chuva, que inicialmente provoca o intemperismo e, em seguida, retira o solo por meio de erosão. As gotas de chuva e o escoamento superficial impactam diretamente no resultado da erosão hídrica, no qual essa ação é o resultado final dessa interação (Crepani et al., 2004). Sendo assim, a Equação 03, segundo Crepani et al. (2004), determina a intensidade pluviométrica, por dados de precipitação média anual, por meio de pluviômetros espalhados na área de estudo.

$$I.P = Intensidade\ Pluviométrica = \frac{Precipitação\ Média\ Anual}{\frac{Número\ de\ dias\ com\ chuva}{30}} = mm/mês \qquad \text{Eq. 03}$$

O resultado da intensidade pluviométrica pode ser interpretado como indicadores da energia potencial os quais se transformam em energia cinética, em que é responsável pela capacidade erosiva da chuva. Assim, quanto maior a intensidade pluviométrica, maior a erosividade da chuva, que permite a criação de uma escala para representar a influência climática nos processos morfodinâmicos como é possível observar na Tabela 5 (Crepani et al., 2001).

Tabela 5 Índice de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade	Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Vulnerabilidade
< 50	1,0	200 – 225	1,7	375 – 400	2,4
50 – 75	1,1	225 – 250	1,8	400 – 425	2,5
75-100	1,2	250 – 275	1,9	425 – 450	2,6
100-125	1,3	275 – 300	2,0	450 – 475	2,7
125 - 150	1,4	300 – 325	2,1	475 -500	2,8
150 - 175	1,5	325 – 350	2,2	500 – 525	2,9
175 - 200	1,6	350 – 375	2,3	> 525	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani et al. (2001).

3.7.5 Vulnerabilidade vegetal

A densidade de cobertura vegetal desempenha um papel crucial na proteção contra processos morfogenéticos, como a erosão. Segundo Crepani et al. (2001), áreas com maior densidade de vegetação apresentam maior capacidade de proteção do solo, reduzindo a suscetibilidade à degradação ambiental. Esse fator é analisado com base na interpretação de dados disponibilizados pelo Instituto Água e Terra, que permitem identificar o uso e a ocupação do solo e atribuir graus de vulnerabilidade ambiental de acordo com a densidade da cobertura vegetal.

De maneira geral, a metodologia aplicada por Crepani et al. (2001) em áreas com alta densidade de vegetação, como florestas densas, recebem valores de vulnerabilidade próximos a 1,0, indicando menor fragilidade. Já áreas com densidade intermediária, como pastagens ou vegetação rala, são classificadas com valores em torno de 2,0, representando um grau moderado de vulnerabilidade. Por outro lado, locais com baixa densidade vegetal, como solos expostos ou áreas urbanizadas, recebem valores próximos a 3,0, indicando alta vulnerabilidade aos processos erosivos.

A análise da densidade de cobertura vegetal e sua relação com a vulnerabilidade ambiental é uma abordagem amplamente utilizada em estudos de planejamento territorial e conservação do solo. Além de permitir a identificação de áreas críticas, essa metodologia subsidia a definição de estratégias para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade do uso da terra (Crepani et al., 2001).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A elaboração do modelo de vulnerabilidade ambiental por meio da definição das Unidades Territoriais Básicas (UTBs) foi realizada com base na análise de imagens de radar, considerando a interpretação de padrões fotográficos, como variações de forma, cor, drenagem, textura e relevo.

Na etapa seguinte, o mapa preliminar das unidades homogêneas, gerado a partir das imagens analisadas, foi integrado às informações temáticas existentes, incluindo mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos, de cobertura vegetal, além de dados sobre a intensidade das chuvas e complementado com dados de sondagens in situ.

4.1 Fluxograma

Para facilitar a compreensão das etapas realizadas neste estudo, foi elaborado um fluxograma que apresenta, de forma estruturada e sequencial, os principais passos adotados na execução do trabalho. Esse fluxograma (Figura 7), organiza as etapas metodológicas desde a coleta de dados até a análise e interpretação dos resultados, permitindo uma visão clara e objetiva do processo seguido.

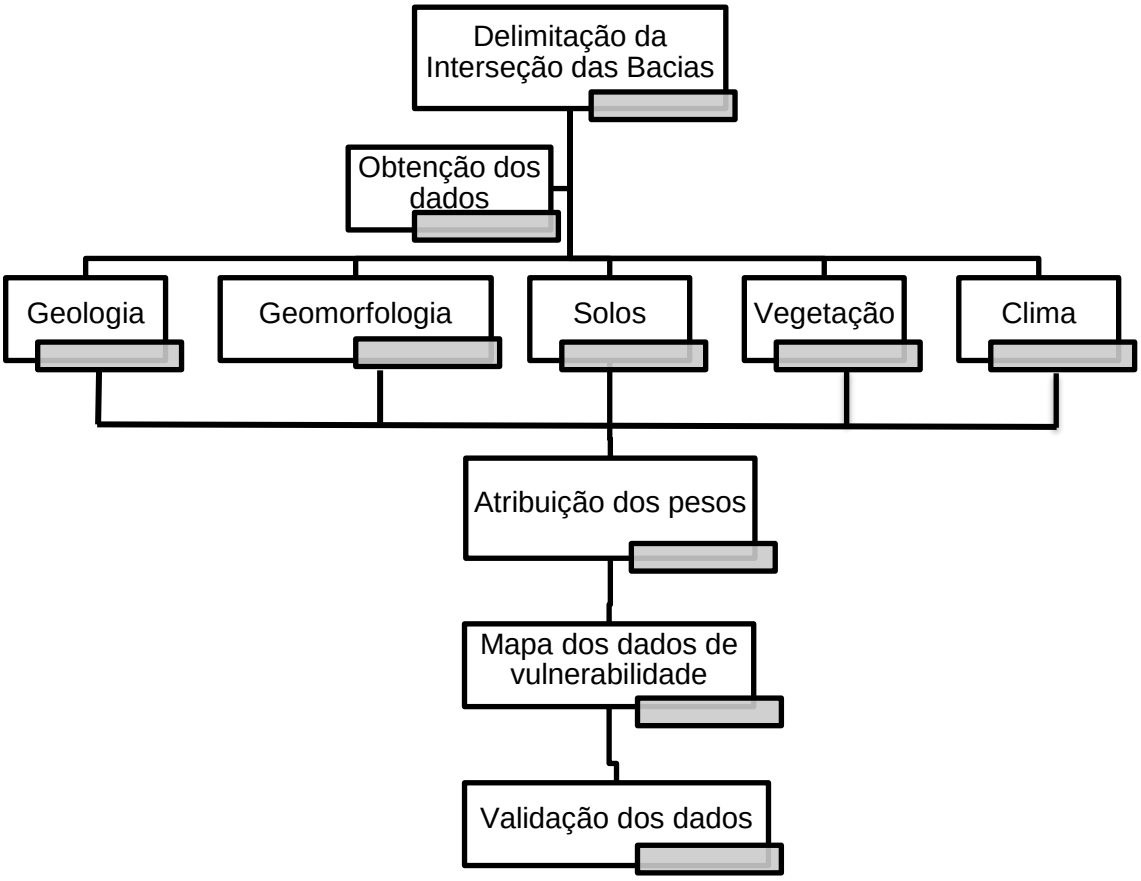

Figura 7 Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.

Durante a etapa de coleta de dados, foram empregadas bases cartográficas georreferenciadas para definir os limites das Bacias Hidrográficas e elaborar os mapas temáticos de Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Clima.

Posteriormente, foi realizada a análise das informações e atribuídos os pesos correspondentes à vulnerabilidade ambiental para cada temática, com base na metodologia proposta por Crepani et al. (2001). Além disso, os pesos das variáveis foram ajustados, resultando na geração do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental por meio da aplicação da Álgebra Raster.

As bases cartográficas foram desenvolvidas a partir de mapas disponíveis em formato shapefile, obtidos junto a órgãos oficiais e instituições científicas. O processamento dos dados foi realizado utilizando o software QGIS, versão 3.28.12. Todas as bases foram convertidas para o sistema de referência Datum SIRGAS 2000 e projetadas no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22S. Nesse contexto, foram gerados o mapa das bacias hidrográficas, o mapeamento geológico, o modelo digital do terreno para análise geomorfológica, o mapeamento de solos, o mapeamento do uso do solo com foco na

elaboração do mapa de vegetação e o mapeamento das precipitações.

4.2 Área de estudo

O estado do Paraná possui grande relevância nacional, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, sendo caracterizado por uma diversidade de paisagens, solos e recursos hídricos. Nesse contexto, o município de Cascavel, situado na região Oeste do Paraná, destaca-se como um importante centro agroindustrial e logístico. A área de estudo está localizada na interseção de três bacias hidrográficas: Bacia do Piquiri, Bacia do Paraná 3 e Bacia do Iguaçu, que se conectam no território de Cascavel. O município está inserido no domínio do Terceiro Planalto Paranaense, especificamente no compartimento de Guarapuava, a aproximadamente 514 km a oeste da capital Curitiba. Localiza-se na latitude 24º 57' 21'' S e longitude 53º 27' 19'' W, com uma área total de 2.112,85 km² e altitude média em torno de 600 metros. Segundo o Censo de 2022, a população é de 348.051 habitantes. O relevo do município apresenta variação altimétrica significativa, com a maior cota em torno de 866 m ao leste e a menor, de aproximadamente 400 m, no extremo sudeste. Metade do território é composta por áreas planas ou suavemente onduladas, enquanto a outra metade apresenta declividades médias a altas, com vales profundos escavados em derrames de basalto, resultando em desníveis superiores a 100 metros (SEIM, 2004).

Segundo o Instituto de Água e Terra (IAT, 2019) o principal tipo de solo presente na região de Cascavel é classificado como Latossolo Vermelho e Nitossolo Vermelho. O Latossolo Vermelho apresenta cores vermelhas fortes, por ter um teor mais alto de óxido de ferro, que são originados de ambientes bem drenados e características de textura, cor e estruturas bem uniformes em profundidade, com pouca diferenciação visível dos horizontes. Já os Nitossolos Vermelhos se caracterizam por apresentarem matriz com camada de solo mais jovem ou por serem de coloração mais vermelha nos primeiros 100 cm no horizonte B, derivados de rochas básicas e ultrabásicas, denominado anteriormente como Terra Roxa Estruturada (EMBRAPA, 2006).

O estado do Paraná apresenta grande diversidade de formações geológicas, abrangendo um extenso intervalo de tempo, com idades que vão desde 2,8 bilhões de anos até a atualidade. De acordo com Maack (1969), as rochas mais antigas, tanto metamórficas quanto magmáticas, estão localizadas nas regiões da Baixada Litorânea, da Serra do Mar e do Primeiro Planalto. Essas rochas são, em grande parte, cobertas por sedimentos mais recentes, originados tanto do mar quanto das áreas continentais; enquanto o relevo do Segundo Planalto é composto de afloramento dos sedimentos paleozóicos da Bacia do Paraná. Em sobreposição a estes sedimentos paleozóicos, houve a formação de rochas vulcânicas de idade mesozóica, as quais pertencem ao Grupo Serra Geral, que forma o relevo do Terceiro Planalto, que são posteriormente recobertos por sedimentos cretáceos no

noroeste do Paraná. Há presença de sedimentos mais recentes em todas as regiões, principalmente formados nos vales dos rios (SEIM, 2004).

No município de Cascavel, a drenagem está organizada em três grandes bacias: a Bacia do Rio Paraná 3, Bacia do Rio Iguaçu e Bacia do Rio Piquiri (Figura 8), onde se encontra a localização do estudo. As drenagens que fluem no sentido sul do município apresentam convergência dominante para a bacia do Rio Iguaçu, onde se destacam os rios Tormenta e Andrada. A noroeste, para o Lago de Itaipu, o sentido é para o Rio São Francisco, Rio Central e vários córregos. No norte, a convergência é predominante para os rios Boi Piguá, Memória, Melissa, Tourinho e Sapucaia (PDI, 2012).

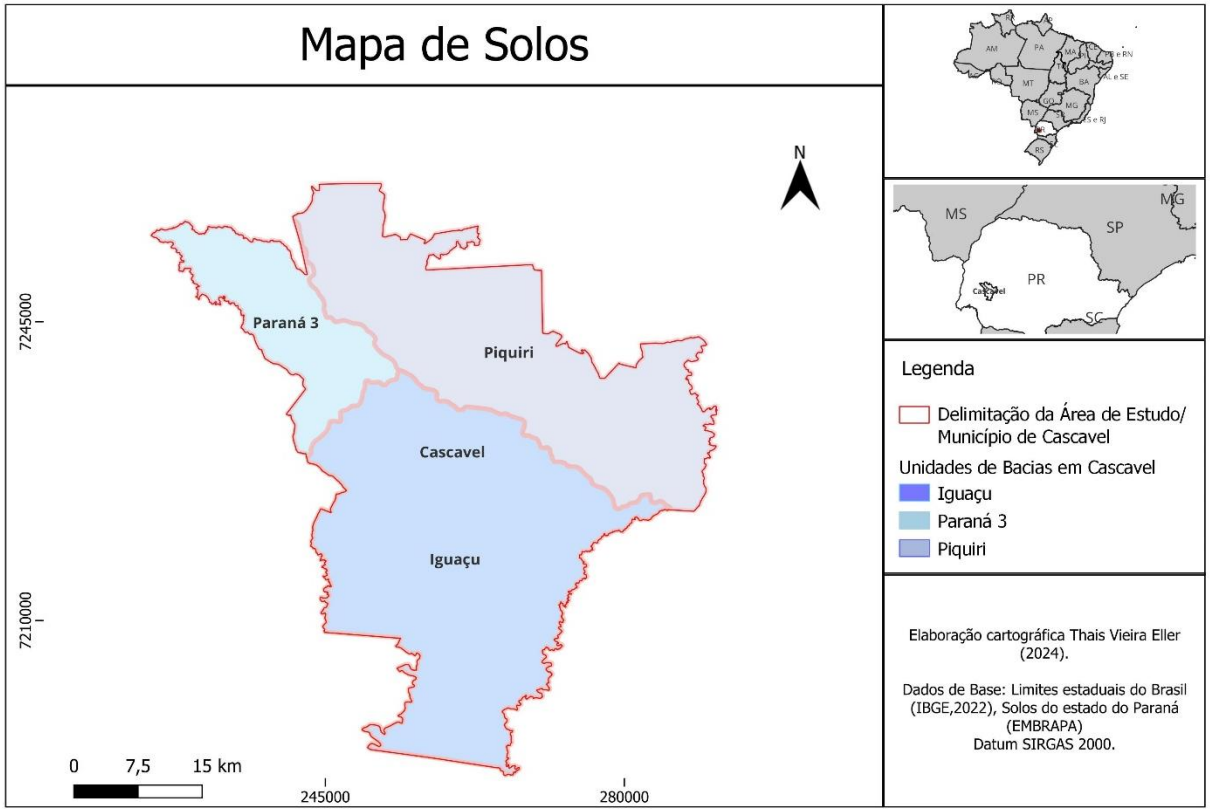

Figura 8 Local do estudo.
Fonte: O autor (2024).

4.3 Delimitação das bacias hidrográficas

O levantamento da delimitação das bacias hidrográficas envolvidas no estudo foi realizado utilizando ferramentas de geoprocessamento no software QGIS, versão 3.28.12. Como base, foi utilizado shapefile de Bacias Hidrográficas fornecido pelo Instituto Água e Terra (IAT, 2007), com escala de 1:50.000. Esse arquivo serviu como ponto de partida para a definição da área de estudo, que abrange a interseção das bacias hidrográficas Piquiri, Iguaçu e Paraná 3.

4.4 Dados geológicos

A análise do mapeamento geológico da área de estudo foi realizada com base no Mapa Geológico do Estado do Paraná, produzido pelo CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2021). Este mapa, disponível em escala 1:600.000, serviu como principal referência para identificar e delimitar as formações geológicas presentes nos limites das bacias hidrográficas em estudo.

A partir do uso do software QGIS, as informações geológicas foram integradas ao modelo espacial da área de estudo, permitindo sobrepor os dados geológicos com os limites previamente estabelecidos das bacias Iguaçu, Paraná 3 e Piquiri. Essa integração foi fundamental para compreender as características litológicas e estruturais da região, fornecendo uma base sólida para as análises posteriores relacionadas à vulnerabilidade ambiental e à dinâmica morfodinâmica.

Esse procedimento garantiu uma visão detalhada da geologia local, facilitando a identificação das formações predominantes e contribuindo para a elaboração de mapas que auxiliaram no planejamento ambiental e territorial da área de estudo.

4.5 Dados geomorfológicos

Para a avaliação do índice de vulnerabilidade à erosão relacionado ao fator Geomorfologia, foi necessário analisar separadamente três parâmetros principais: amplitude altimétrica, grau de dissecação do relevo pela drenagem e declividade. Essas variáveis permitem uma compreensão detalhada das características geomorfológicas da área de estudo.

O processamento dos dados geomorfológicos foi realizado utilizando o Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido a partir de imagens de radar disponibilizadas pelo projeto Topodata, fornecido pelo INPE. Segundo a metodologia de Crepani et al. (2001), a dissecação do relevo pela drenagem pode ser avaliada considerando a largura dos interflúvios ou a densidade de drenagem. Esse processamento foi executado em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo uma análise detalhada do relevo.

A declividade foi determinada em porcentagem por meio do processamento do MDE em um algoritmo específico de SIG. Para a classificação dos índices de vulnerabilidade, foi considerado um limite superior de 45° de inclinação, acima do qual predominam processos morfogenéticos, com maior exposição de material rochoso, sendo atribuído o valor de 3,0. Os índices foram definidos a partir da reclassificação dos pixels do arquivo de declividade, organizados conforme os valores tabelados propostos por Crepani et al. (2001). Após a reclassificação, as unidades de paisagem foram convertidas para o formato vetorial, e os índices atribuídos diretamente às tabelas de atributos dessas unidades.

Para a distribuição dos valores relacionados à amplitude altimétrica e à densidade de

drenagem, foi necessário dividir a bacia hidrográfica em sub-bacias. Esse procedimento foi realizado utilizando uma rotina computacional que analisa a direção e a acumulação do fluxo hídrico em conjunto com as informações topográficas. Cada sub-bacia foi então caracterizada pela amplitude altimétrica, obtida pela diferença entre os valores máximo e mínimo de altitude registrados nos pixels correspondentes. Esse método permitiu identificar as variações de relevo e os padrões geomorfológicos de cada parcela da área estudada.

4.6 Dados de solos

O mapeamento dos solos foi desenvolvido utilizando o software QGIS, com base na digitalização do mapa de solos do estado do Paraná, disponibilizado pela EMBRAPA, em escala de 1:2.000.000. Essa base de dados foi complementada com informações pedológicas provenientes de sondagens fornecidas pela empresa Fungeo.

Os dados de sondagem foram utilizados para a criação de perfis detalhados em pontos específicos da área de estudo. Para isso, foi empregado o software AutoCAD Civil 3D, que permitiu uma melhor representação e análise dos dados no contexto local, facilitando a visualização das características pedológicas in situ. Essa abordagem integrada possibilitou uma compreensão mais detalhada e precisa dos atributos do solo na região analisada.

Os dados de solos foram analisados e representados tridimensionalmente utilizando o software AutoCAD Civil 3D, no qual foram gerados perfis detalhados de sondagem. As informações foram organizadas em uma planilha no Excel, contendo os seguintes dados: identificação da sondagem, coordenadas (longitude e latitude), altitude (nível do solo superficial), profundidade final do furo e a descrição das camadas de solo identificadas nos relatórios de sondagem disponibilizados pela empresa Fungeo.

Em seguida, os dados da planilha foram exportados no formato CSV e importados para o Civil 3D. Utilizando o módulo Geotechnical Module, as superfícies tridimensionais foram criadas, proporcionando uma representação precisa das condições do solo. O sistema de referência adotado para o estudo foi o Datum SIRGAS 2000 e projetado no sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22S.

4.7 Dados de vegetação

A densidade da cobertura vegetal das unidades de paisagem foi obtida a partir de arquivos shapefile de Unidades Fitoambientais/Uso e Cobertura da Terra disponibilizados pelo Instituto Água e Terra (IAT, 2021). A determinação dos valores de índice referentes ao fator vegetação na fragilidade potencial foi baseada na proposta de Crepani et al. (2001), que considera os tipos de vegetação presentes na área, sendo os fatores atribuídos às classes: Estacional Semidecidual (1,6) e Ombrófila Mista (1,3).

Para a classificação da vulnerabilidade emergencial, são considerados todos os fatores de clima, geologia, geomorfologia, solo e vegetação. Após a obtenção do resultado da vulnerabilidade potencial, são incluídos os dados de uso e ocupação da área, para obtenção dos dados de vulnerabilidade emergencial, que incluem as classes que foram categorizadas conforme os seguintes critérios: solo exposto (índice 3,0), áreas urbanizadas (2,0), florestas (1,0), corpos d'água (1,0), áreas agrícolas (2,5) e pastagens (2,0).

A classificação foi realizada utilizando um algoritmo de máxima verossimilhança, que atribui os valores com base na densidade da cobertura vegetal em cada classe. As áreas urbanizadas receberam uma classificação intermediária devido à presença de superfícies impermeabilizadas, que interferem diretamente nos processos ambientais e na vulnerabilidade do terreno. Essa metodologia permite uma análise precisa e padronizada da vegetação no contexto da paisagem estudada.

4.8 Dados de clima

Os dados climáticos utilizados neste estudo foram obtidos a partir das estações pluviométricas monitoradas pelo Instituto Água e Terra (IAT), situadas nas proximidades da área de estudo. As estações selecionadas possuem séries históricas superiores a 20 anos de registros contínuos, o que garante a confiabilidade dos dados analisados. A distribuição espacial da precipitação foi realizada utilizando o método de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, conforme proposto por Crepani et al. (2001).

Foram consideradas informações das estações pluviométricas localizadas em São João do Oeste e Rio do Salto, abrangendo a série temporal de 1994 a 2023. A escolha dessas duas estações, localizadas nesses municípios, deve-se ao fato de serem as únicas com registros completos ao longo dos 20 anos analisados, o que possibilitou obter resultados mais consistentes e representativos na análise. Esses dados permitiram a elaboração do mapa de distribuição da precipitação na área estudada, fornecendo uma representação detalhada do comportamento pluviométrico regional e sua influência nos processos ambientais analisados.

4.9 Metadados utilizados

O mapeamento dos índices de vulnerabilidade à perda de solo seguiu a abordagem proposta por Crepani et al. (2001), que consiste na atribuição de valores empíricos a 21 classes distintas, organizadas conforme o grau de suscetibilidade à erosão. Essa análise foi desenvolvida com base no processamento, na classificação e na integração de informações referentes aos fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, vegetativos e climáticos.

Cada uma dessas características atua como um elemento que influencia a vulnerabilidade ambiental. A integração dos dados foi realizada por meio da técnica de álgebra

de mapas, em que a média aritmética dos índices atribuídos a cada fator foi calculada. O resultado corresponde ao valor do índice de suscetibilidade à erosão, permitindo a identificação das áreas mais frágeis dentro da região de estudo (Tabela 6).

Tabela 6 Base de dados para o desenvolvimento do estudo

Informação	Dados	Fonte	Escala
Delimitação da área de estudo	Bacias hidrográficas	Instituto Água e Terra	1:50.000
Geologia	Mapa geológico	CPRM	1:600.000
Geomorfológico	Modelo Digital de Elevação	INPE	30x30
Solos	Mapa de solos	EMBRAPA	1:2.000.000
Vegetação/Uso e cobertura da terra	Unidades fitoambientais/uso e cobertura da terra	IAT	1:25.000
Clima	Estações pluviométricas	IAT	-

O procedimento metodológico de obtenção dos índices para a suscetibilidade à erosão de cada fator foi elaborado no Sistema de Informação Geográfico (SIG) QGIS versão 3.28.12.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área de estudo apresenta uma intensidade pluviométrica média mensal variando entre 180 e 250 mm/mês. Esses valores foram obtidos a partir das médias mensais registradas nas estações pluviométricas de Cascavel, identificadas pelos códigos 2553035 e 2453056, com série histórica contínua de 29 anos, iniciada em 1994. A precipitação média anual na região é de aproximadamente 1.841 mm. De acordo com a metodologia de Crepani et al. (2001), os índices de vulnerabilidade do solo para essa área foram estimados em 1,6 e 1,8, respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7 Base de dados para o desenvolvimento do estudo

Pluviométrico	Código	Intensidade pluviométrica média (mm/mês)	Índice de vulnerabilidade (Crepani et al., 2001)
Rio do Salto	2553035	180	1,6
São João do Oeste	2453056	250	1,8

Esses índices refletem a influência direta da intensidade pluviométrica sobre os processos de erosão e degradação do solo, pois volumes elevados e frequentes de precipitação aumentam a susceptibilidade das áreas analisadas, favorecendo o escoamento superficial e a perda de material pedológico, especialmente em regiões com relevo mais acentuado e uso inadequado do solo.

Já os índices atribuídos ao subfator declividade são apresentados na Figura 9. É possível observar que, na área de estudo, predominam regiões com declividades de 0-10% e 10-20%, porém a região urbanizada se torna relevante como contribuidor da vulnerabilidade à erosão hídrica. Esse tipo de erosão ocorre devido a forças ativas, como características das chuvas, inclinação do terreno, bem como a capacidade do solo de infiltrar água. Além disso, também é influenciada por forças passivas, como a resistência do solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal. Esses elementos foram considerados na metodologia de Crepani et al. (2001), que orienta a avaliação dos índices de suscetibilidade à erosão. O resultado da geomorfologia apresentou índice de vulnerabilidade 2,0 a 2,9, sendo de medianamente estável a moderadamente vulnerável.

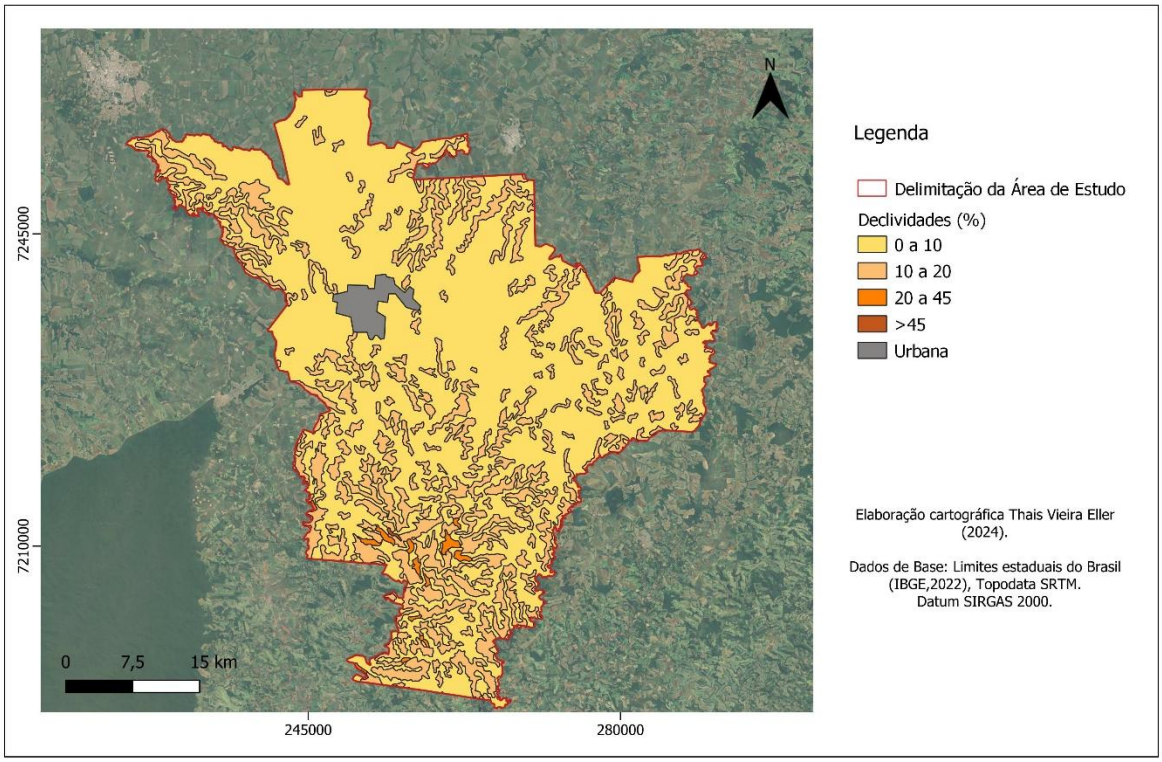

Figura 9 Mapa de declividades da área de estudo.

O resultado da atribuição dos índices à carta geológica reflete os níveis de suscetibilidade à erosão relacionados às características geológicas da área de estudo. Com base nos valores atribuídos, que consideram a resistência das rochas ao processo de denudação e o grau de coesão entre suas partículas, identificou-se a presença de Derrames de Basalto na área.

Esses derrames pertencem à Formação Serra Geral, que apresenta um índice de 1,5 (Figura 10), indicando maior vulnerabilidade à erosão hídrica, segundo proposto por Crepani et al. (2001).

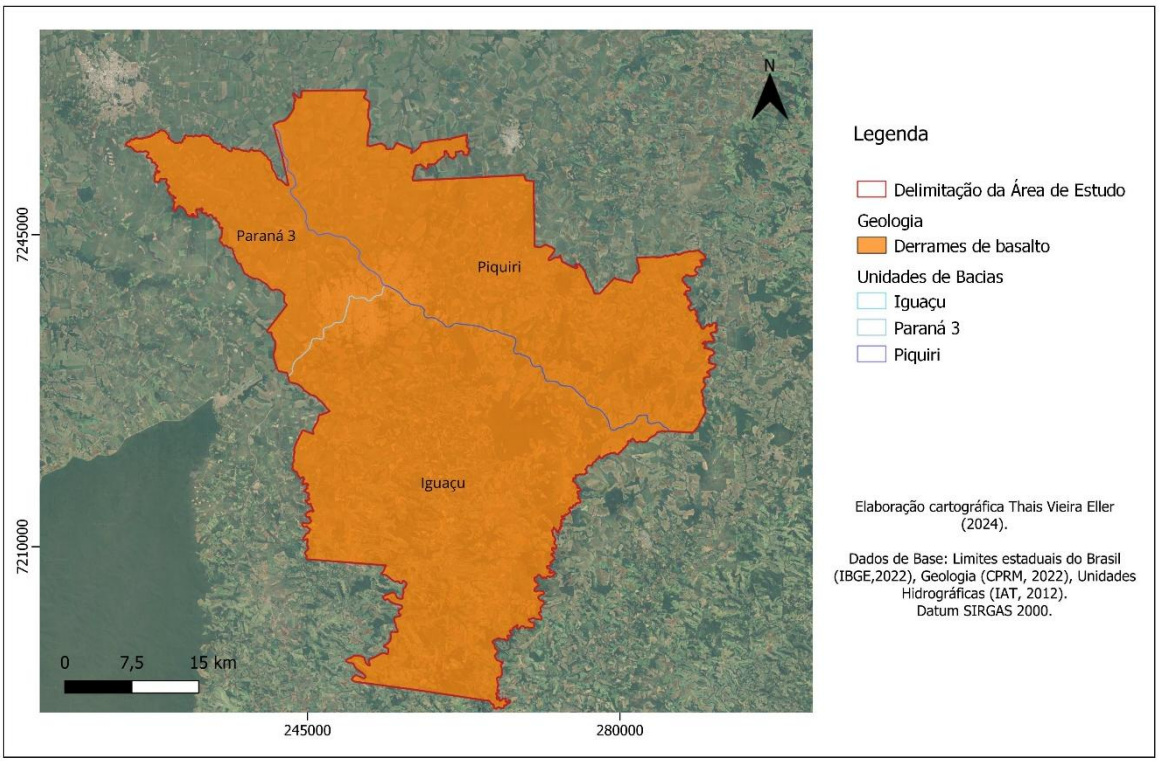

Figura 10 Mapa de geologia da área de estudo.

Nas áreas onde o relevo apresenta inclinações entre 10 e 20% e há ocorrência de Neossolos, o índice de vulnerabilidade foi classificado como nível 3. A análise revelou que os Neossolos, caracterizados por sua textura argilosa, ocupam 25,05% da área total. Em contrapartida, os Latossolos, também argilosos, abrangem 68,57% da superfície, classificado com nível 1 (Figura 11). Já os dados de Nitossolo Vermelho e Gleissolos Háplicos apresentam grau de vulnerabilidade na área respectivamente 2 (6,32%) e 3 (0,04%). Dada a distribuição dessas classes de solo, os índices variaram entre 1,0 e 3,0, evidenciando a importância de implementar práticas de uso e manejo que respeitem as capacidades específicas de cada tipo de solo. Conforme apontado por Miguel et al. (2014), a erosão superficial do solo é a principal responsável pela geração de sedimentos nas bacias hidrográficas.

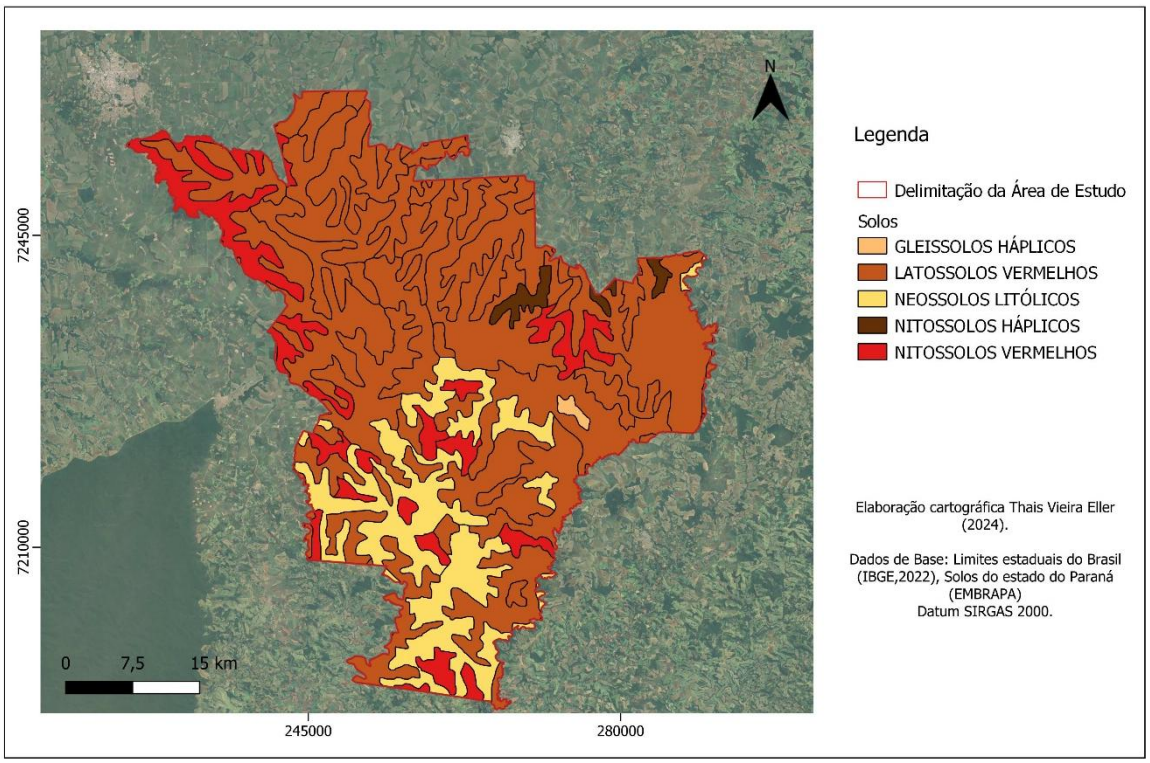

Figura 11 Mapa de solos da área de estudo.

Para a validação das características dos dados de solo foram analisados relatórios de sondagens disponibilizados pela empresa Fungeo como complementação dos dados disponibilizados pelo mapa de solos da EMBRAPA.

A análise possibilitou a elaboração de dois perfis de sondagem em área de propensão maior a vulnerabilidade por ser áreas urbanizadas. Na Figura 12, é possível observar as linhas A-A’ e B’-B de referência no mapa onde foram realizadas as sondagens na área do estudo e elaborados os perfis de sondagens.

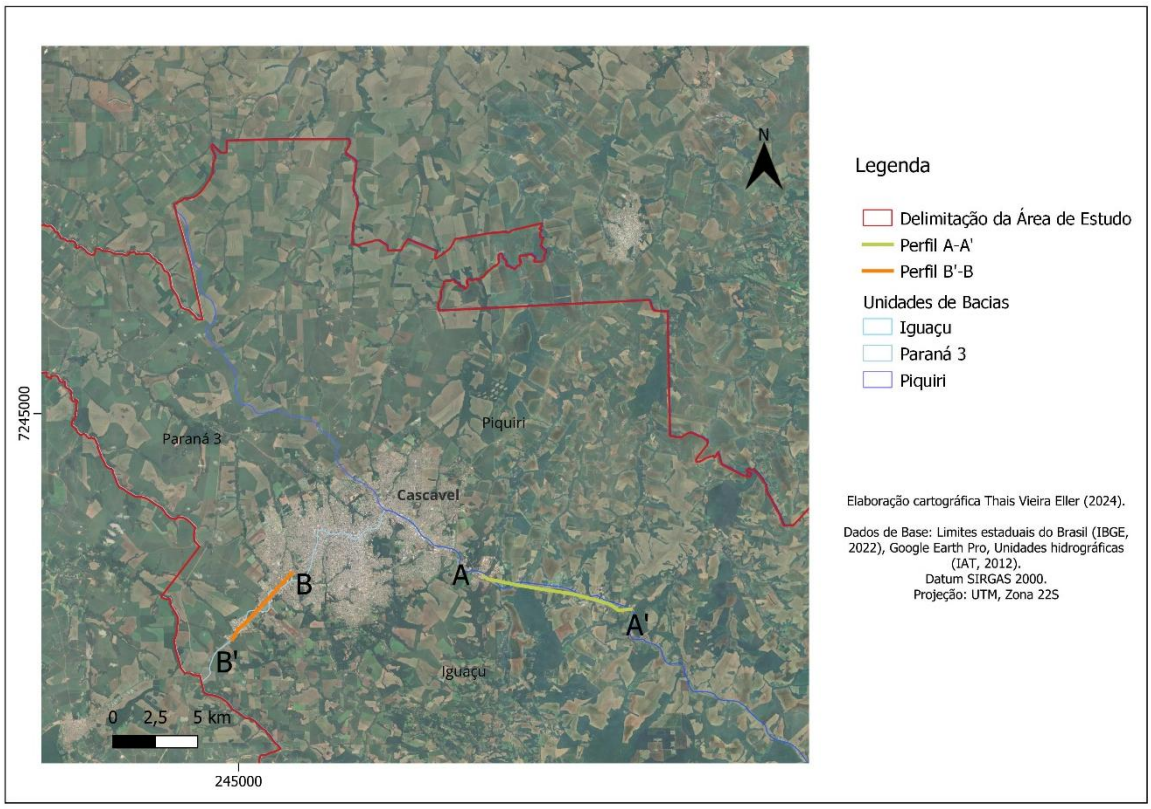

Figura 12 Mapa de localização dos perfis das sondagens da área de estudo.

A análise do perfil A-A’, realizada com base nos resultados de sondagens no local, revelou três camadas distintas de solo. A primeira camada é composta por argila acinzentada, apresentando características marcantes como alto grau de alteração, com percolações escuras e manchas esbranquiçadas, além de uma consistência extremamente rígida. Na segunda camada, foi identificada uma argila de tonalidade roxa, que exibe sinais de alteração, também com manchas esbranquiçadas. Sua consistência varia de média a rígida, indicando menor alteração estrutural em relação à camada superior. Por fim, a terceira camada consiste em uma argila siltosa de coloração marrom avermelhada. Diferentemente das anteriores, esta camada não apresenta textura interna visível, sendo caracterizada por uma consistência que varia de muito mole a média. Essas informações fornecem subsídios importantes para a compreensão das propriedades mecânicas e hidrogeológicas do solo na área analisada (Figura 13).

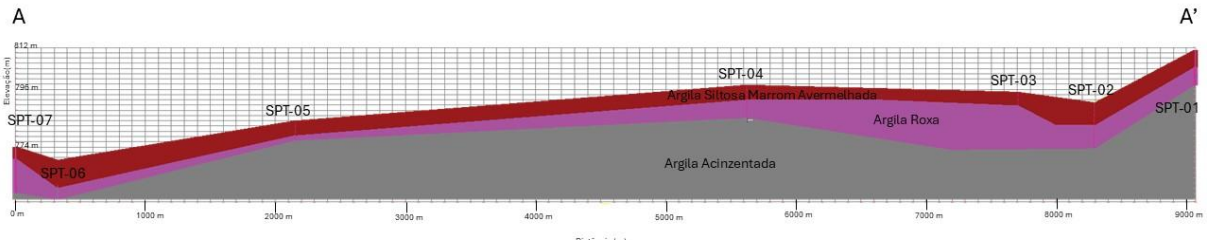

Figura 13 Perfil A-A’ das sondagens da área de estudo.

O perfil B'-B, realizado com base nos furos de sondagem efetuados no local, revelou duas camadas distintas de solo. A primeira camada é composta por argila roxa, que apresentou características marcantes, incluindo alterações esbranquiçadas, percolações com variações de cores e uma consistência que varia de média a muito rígida. Esses traços indicam a presença de processos de alteração química e mecânica no material. A segunda camada, formada por argila siltosa de tonalidade marrom avermelhada, mostrou-se pouco arenosa, com uma consistência que varia de muito mole a média. Essa camada sugere uma menor compactação em comparação com a camada superior, possivelmente devido às condições deposicionais ou de alteração a que foi submetida. Esses resultados são essenciais para compreender as propriedades geotécnicas do solo ao longo do perfil estudado (Figura 14).

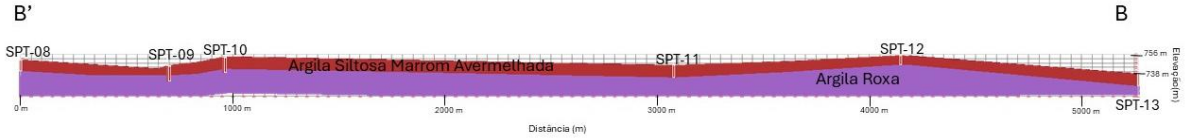

Figura 14 Perfil B'-B das sondagens da área de estudo.

A camada de argila siltosa marrom avermelhada, identificada nas Figuras 13 e 14, apresenta características que merecem atenção especial no contexto da produção agrícola em Cascavel. Com consistência variando de muito mole a média e textura pouco arenosa, essa camada indica um solo com menor compactação e maior susceptibilidade à saturação hídrica, especialmente em períodos de chuvas intensas. Essas condições podem influenciar diretamente o desenvolvimento radicular das culturas agrícolas e o escoamento superficial, impactando a produtividade. No entanto, sua composição siltosa também pode favorecer a retenção de umidade e nutrientes, o que, aliado a um manejo adequado, pode beneficiar o cultivo de grãos como milho e soja, amplamente cultivados no município. A correta interpretação dessa camada é fundamental para orientar práticas de preparo do solo, adubação e drenagem, contribuindo para a sustentabilidade da atividade agrícola na região.

Complementarmente, na área analisada foram identificadas duas formações florestais predominantes: a Floresta Estacional Semidecidual (Mata Semicaducifólia) e a Floresta Ombrófila Mista (Mata dos Pinheiros). De acordo com a metodologia de Crepani et al. (2001), essas formações apresentam graus de vulnerabilidade à erosão de 1,6 e 1,3, respectivamente. Em relação ao uso e à cobertura da terra, a área de estudo é caracterizada por uma diversidade de classes, incluindo agricultura anual e perene, áreas construídas, zonas urbanizadas, corpos d'água, floresta nativa, pastagens/campos, plantios florestais, solo exposto e várzeas (Figura 15). Essas categorias refletem a variedade de ocupações e coberturas vegetais que influenciam diretamente os índices de vulnerabilidade emergencial e suscetibilidade ao processo erosivo na região.

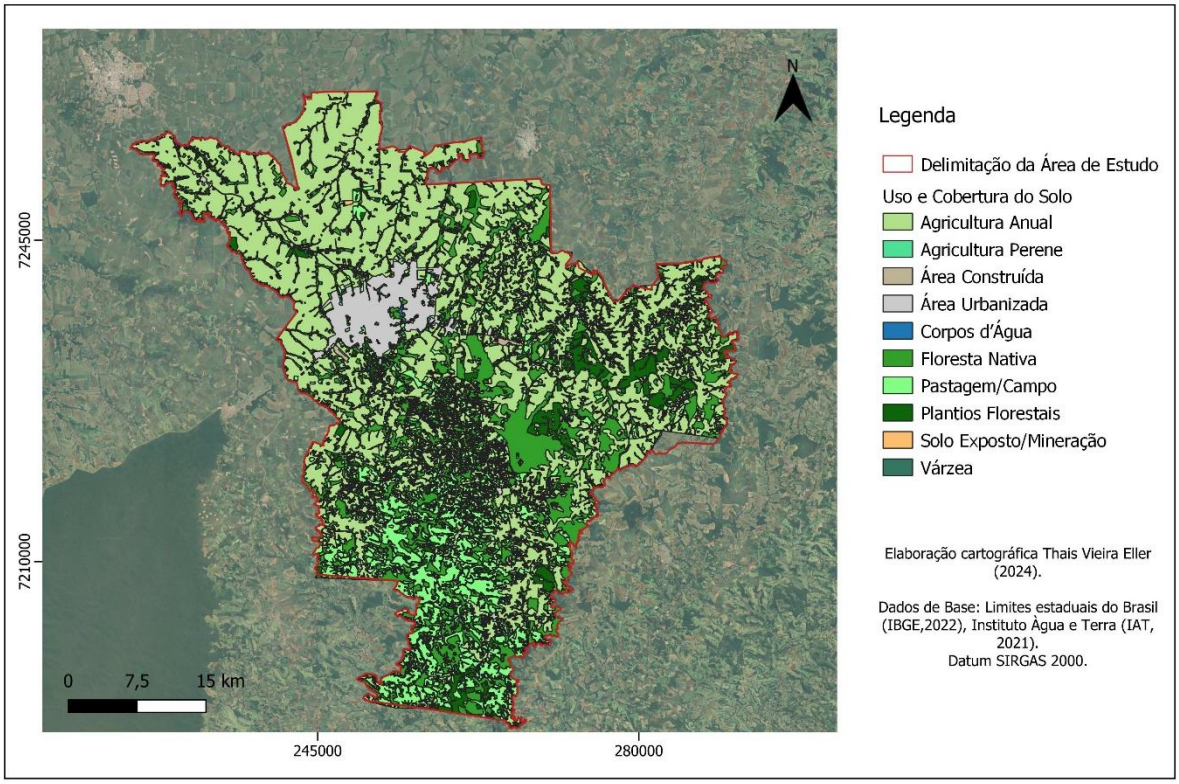

Figura 15 Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.

Os índices de vulnerabilidade associados ao uso e à cobertura do solo foram determinados com base na metodologia de Crepani et al. (2001). Esses índices foram calculados utilizando dados provenientes do projeto do Instituto Água e Terra (IAT, 2021). Para cada categoria de uso e cobertura da terra, foram atribuídos valores de índice específicos, representando a influência dessas características na suscetibilidade da área à erosão. A Tabela 8 apresenta a distribuição detalhada desses índices, proporcionando uma visão clara da relação entre os diferentes tipos de cobertura vegetal e os níveis de vulnerabilidade atribuídos.

Tabela 8 Índice de vulnerabilidade para uso e cobertura do solo

Classes	Índice de vulnerabilidade (Crepani et al., 2001)
Agricultura anual	3,0
Agricultura perene	2,5
Área construída	3,0
Área urbanizada	3,0
Corpos d`àgua	1,5
Floresta nativa/ Estacional Semidecidual	1,6
Floresta nativa/ Ombrófila Mista	1,3
Pastagem/campo	2,0
Plantios florestais	1,5
Solo exposto/mineração	3,0
Várzea	1,0

A análise da vulnerabilidade ambiental na região de interseção das bacias

hidrográficas Paraná 3, Piquiri e Iguaçu, no município de Cascavel, PR, permitiu identificar padrões variados de vulnerabilidade ambiental, com base nos fatores físicos e antrópicos da área de estudo. A aplicação da metodologia de Crepani et al. (2001) proporcionou uma classificação detalhada do território.

Na análise da fragilidade potencial, predominou a classe de vulnerabilidade Medianamente Estável/Vulnerável (Figura 16), abrangendo 81,39% da área total, equivalente a 1683,4 km², em que o grau de vulnerabilidade varia entre 1,8 a 2,2. Essa classe é caracterizada por áreas com solos férteis e relevo ondulado, que apresentam equilíbrio natural moderado, mas podem ser impactados quando submetidos a práticas de manejo inadequadas. Embora essas áreas sejam consideradas aptas para a agricultura e outras atividades produtivas, a ausência de conservação do solo pode desencadear processos erosivos e aumentar a degradação ambiental. Por outro lado, áreas classificadas como moderadamente estáveis representaram 10,90% da área de estudo, associadas principalmente a solos mais profundos e maior cobertura vegetal remanescente. Essas regiões possuem resistência natural à erosão e à degradação, devido à presença de vegetação que contribui para a estabilização do solo e a redução do impacto das chuvas. A predominância dessas duas classes reflete um território com equilíbrio ambiental relativo, mas que exige atenção para evitar a intensificação da degradação. Já a classe Moderadamente Vulnerável mostrou uma área total de 7,69%, onde se encontram os maiores graus de declividade da área de estudo em conjunto com características de solo como, por exemplo, Neossolos.

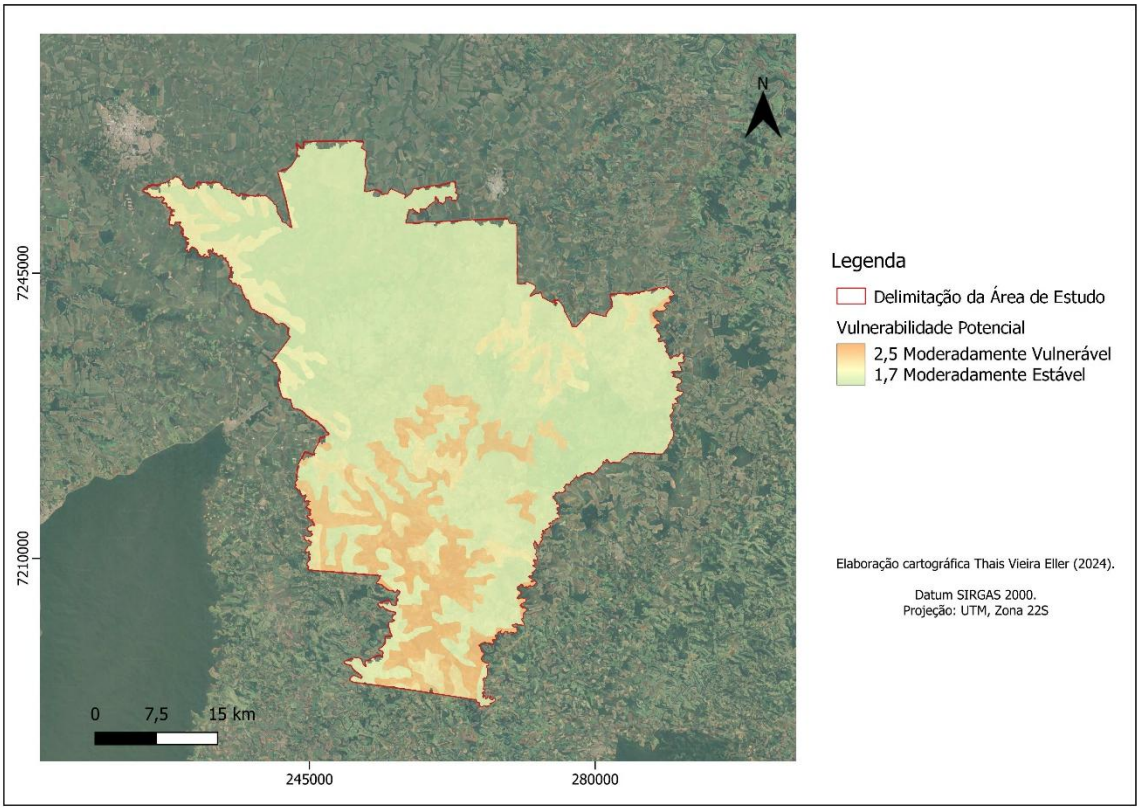

Figura 16 Mapa de vulnerabilidade potencial da área de estudo.

A análise da vulnerabilidade emergencial revelou um quadro mais preocupante, indicando a influência significativa das atividades antrópicas sobre o equilíbrio ambiental. A classe Moderadamente Vulnerável (Figura 17) foi predominante, cobrindo 54,91% da área de estudo, o que corresponde a 1129,6 km². Esse padrão está diretamente associado à substituição de vegetação nativa por monoculturas, pastagens e áreas urbanizadas, bem como à falta de práticas de manejo sustentável do solo. As demais classes apresentaram uma distribuição menos expressiva. A classe Moderadamente Estável ocupou 27,15% da área, enquanto a classe Medianamente Estável/Vulnerável correspondeu a 16,69%. A classe Estável, por sua vez, foi a menos representativa, cobrindo apenas 1,23% da região analisada. Esses resultados reforçam a necessidade urgente de políticas públicas voltadas à conservação ambiental e ao uso racional do solo, visando mitigar os impactos negativos das ações antrópicas e garantir a sustentabilidade da área de estudo.

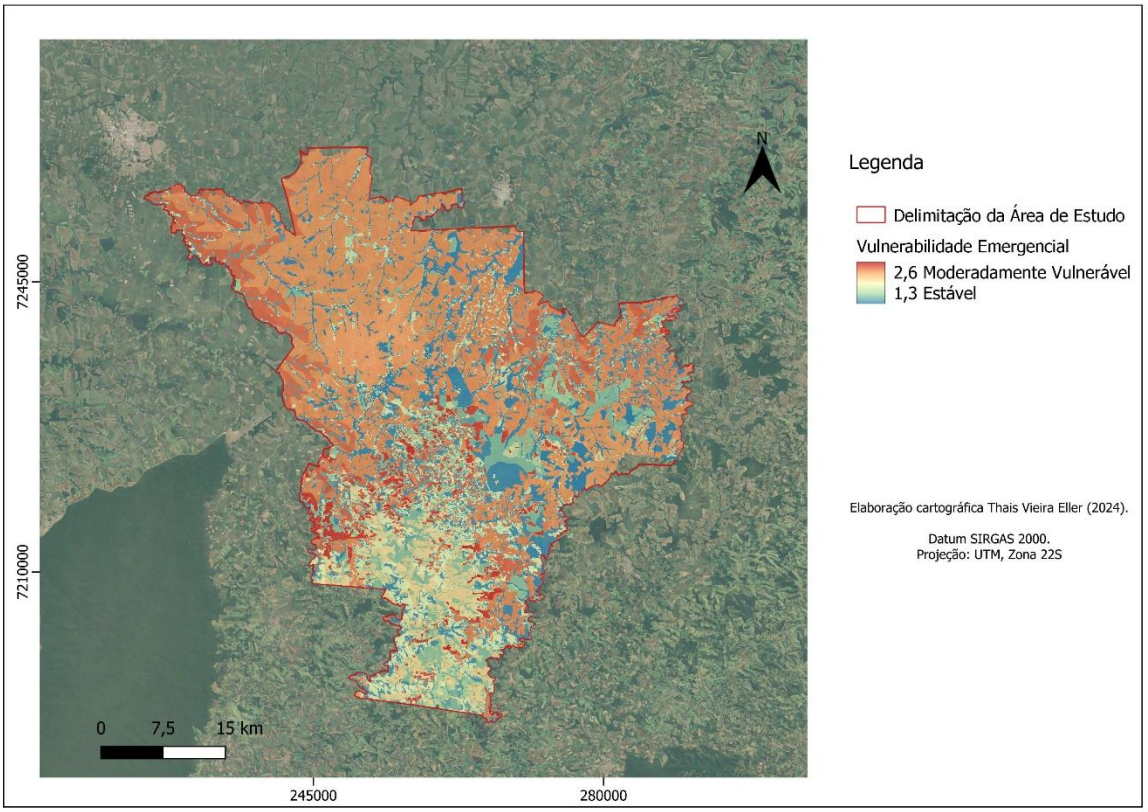

Figura 17 Mapa de vulnerabilidade emergencial da área de estudo.

As áreas de maior fragilidade emergencial estão concentradas nas proximidades de regiões urbanizadas e ao longo das margens dos rios, onde a pressão antrópica é mais intensa. Nessas áreas, o uso intensivo do solo, a impermeabilização causada pela urbanização e a ausência de cobertura vegetal adequada têm agravado os processos erosivos e aumentado o risco de degradação ambiental. A agricultura intensiva, sem a aplicação de práticas conservacionistas, contribui significativamente para a fragilidade

emergencial, ao expor o solo a chuvas intensas e remover sua capacidade de retenção e infiltração de água.

Os resultados da análise indicam que, apesar de a região apresentar características naturais que favorecem a produção agrícola e o uso do solo, a intervenção humana tem causado impactos significativos na sua estabilidade ambiental. A predominância da fragilidade emergencial moderada reforça a necessidade de implementar medidas de manejo sustentável e de conservação do solo para mitigar os riscos de erosão e degradação.

A implementação de políticas públicas que promovam práticas agrícolas sustentáveis, reflorestamento de áreas degradadas e controle da urbanização desordenada pode contribuir para melhorar o equilíbrio ambiental na região. Além disso, a conservação das áreas naturais remanescentes desempenha um papel crucial na manutenção da estabilidade do território, reduzindo os impactos das ações humanas e garantindo a sustentabilidade dos recursos naturais a longo prazo.

Os resultados obtidos indicam que a área analisada, embora apresente a maior área com fragilidade potencial classificada como Medianamente Estável/Vulnerável, demonstra vulnerabilidade significativamente maior quando se trata da fragilidade emergencial. Esses dados corroboram estudos realizados em regiões com características semelhantes. Por exemplo, Brandão (2020) investigou a fragilidade ambiental no oeste de Santa Catarina e identificou que, enquanto a fragilidade potencial se manteve moderada, houve aumento expressivo na vulnerabilidade ao considerar os impactos das atividades humanas.

De maneira semelhante, Bahr et al. (2012), em sua pesquisa sobre a degradação ambiental em bacias hidrográficas no estado do Paraná, ressaltaram que a substituição da vegetação nativa por atividades agrícolas e urbanização desordenada são fatores determinantes para a intensificação da fragilidade emergencial.

Essas transformações reduzem a capacidade de suporte do ambiente, agravando os processos de erosão, sedimentação e degradação do solo. Portanto, os resultados obtidos neste estudo refletem uma tendência observada em áreas com pressões antrópicas semelhantes. A análise reforça a importância de políticas públicas voltadas para a preservação da vegetação remanescente, a recuperação de áreas degradadas e a adoção de práticas de uso sustentável do solo. Essas medidas são essenciais para reduzir a fragilidade emergencial e mitigar os impactos causados pela ocupação desordenada e pelo manejo inadequado dos recursos naturais.

Por fim, a adoção de políticas públicas mais rigorosas, que estabeleçam restrições à ocupação de áreas sensíveis e incentivem práticas sustentáveis, é fundamental para a conservação ambiental. Tais políticas devem contemplar lacunas existentes nas legislações vigentes e direcionar esforços para a proteção de áreas críticas. Este estudo demonstrou que o uso de metodologias integradas e mapas temáticos pode ser um importante aliado na gestão ambiental e no planejamento sustentável de bacias hidrográficas.

6 CONCLUSÕES

Este estudo da fragilidade ambiental na interseção das bacias hidrográficas Paraná 3, Piquiri e Iguaçu, no município de Cascavel, PR, empregando a metodologia proposta por Crepani et al. (2001) e ferramentas de geoprocessamento revelou que, enquanto a fragilidade potencial apresentou predominância da classe Medianamente Estável/Vulnerável (81,39%), a fragilidade emergencial foi amplamente dominada pela classe Moderadamente Vulnerável (54,91%). Isso evidencia que fatores antrópicos, como agricultura intensiva, expansão urbana desordenada e remoção da vegetação nativa contribuem significativamente para o aumento da vulnerabilidade ambiental da região.

A fragilidade ambiental observada reforça a necessidade de ações conservacionistas e de um planejamento territorial mais eficiente. Medidas como a recuperação de áreas degradadas, a promoção de práticas de manejo sustentável e a aplicação de políticas públicas direcionadas à preservação ambiental são cruciais para mitigar os impactos da ocupação humana e assegurar o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e sustentabilidade ambiental.

Os mapas de vulnerabilidade elaborados ao longo do estudo mostraram-se ferramentas valiosas para o diagnóstico ambiental e o planejamento territorial, destacando áreas prioritárias para intervenção. A identificação de zonas críticas permitiu direcionar ações específicas para mitigação de processos erosivos e preservação dos recursos hídricos. Além disso, a metodologia utilizada, por ser robusta, acessível e de baixo custo, provou-se eficaz para caracterizar o meio físico e gerar resultados representativos da realidade da região.

A análise também apontou a relevância ambiental das bacias estudadas, especialmente considerando sua importância para o abastecimento de água, a biodiversidade local e a produção agrícola no oeste do Paraná. Assim, é essencial preservar não apenas as áreas de vegetação remanescente, mas também implementar práticas que evitem a degradação ambiental em áreas com maior pressão antrópica.

Entre as contribuições deste estudo, destaca-se a possibilidade de replicação da metodologia em outras regiões. A aplicação de dados espaciais e o uso de mapeamentos em escalas reduzidas permitem gerar resultados precisos, desde que se utilize uma base de dados confiável. No entanto, sugere-se a realização de estudos mais detalhados em áreas com altos índices de vulnerabilidade ambiental, principalmente em zonas urbanas densamente ocupadas.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora a metodologia empregada tenha se mostrado eficaz nos objetivos propostos, foram identificadas limitações, como a escassez de dados pluviométricos contínuos em áreas mais amplas da região de estudo e a ausência de furos de sondagem em locais não contemplados neste trabalho. Recomenda-se que estudos futuros incorporem um maior volume de dados in situ para aprimorar a análise e melhorar a representação dos índices de vulnerabilidade.

A pesquisa destacou a importância de práticas conservacionistas e políticas públicas direcionadas à preservação ambiental, reforçando a necessidade de equilibrar o desenvolvimento econômico com a sustentabilidade ambiental.

8 REFERÊNCIAS

ABGE. OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A (Eds.). **Geologia de engenharia.** São Paulo: ABGE, 2018, 283 p.

AQUINO, A. R.; LANGE, C. N.; LIMA, C. M.; AMORIM, E. P.; PALETTA, F. C.; FERREIRA, H. P.; BORDON, I. C. A.; ALMEIDA, J. R.; GOMES, M. A. U. G.; ZAMPIERI, M. C. T.; OLIVEIRA, M. J. A.; CORREIA JUNIOR, P. A.; SOUZA, R. R.; MATTIOLO, S. R.; RODRIGUES, S. G. "Vulnerabilidade ambiental". In: AQUINO, A. R.; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. **Vulnerabilidade ambiental.** São Paulo: Blucher, 2017. p. 15-28.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: Solo – Sondagens de simples reconhecimentos com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

BAHR, G. C.; CARVALHO, S. M. Identificação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do arroio Uvaranal, como subsídio ao projeto de expansão urbana de Telêmaco Borba. **RA E GA 26**, p.157-181, 2012.

BIRKMANN, J. Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Concept and definition. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, United Nations University Press, Tokyo, New York, Paris, v. 1, n. 1, p. 45-48, 2006.

BRANDÃO, R.A. Análise da vulnerabilidade ambiental da bacia do Rio das Flores – oeste de Santa Catarina. 2020. 70f. **Dissertação (Mestrado)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - (PPGEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Francisco Beltrão, 2020.

COSME, A. **Projeto em Sistemas de Informação Geográfica**. Lisboa: Lidel, 2012.

COSTA, F. H. S.; PETTA, R. A.; LIMA, R. F. S.; MEDEIROS, C. N. Determinação da Vulnerabilidade Ambiental na Bacia Potiguar, Região de Macau (RN), utilizando Sistemas de Informações Geográficas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 2, p. 119-127, 2006.

COSTA, W. D. Geologia de barragens. **Oficina de textos**. São Paulo. p. 352, 2012.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; LIMA, M. S.; DUARTE, A. F.; BARBIERI, M.; PEREIRA, A. **Fragilidade ambiental**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; PALMEIRA, A. F. **Intensidade pluviométrica**: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004. (INPE-11237-RPQ/760).

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**: A análise de Bacias Hidrográficas. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, p. 106-107, 1980.

DENG, L.; MAO, Z.; LI, X.; HU, Z.; DUAN, F.; YAN, Y. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: a comparison between different cameras. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 146, p. 124-136, 2018.

ELSADEK, W. M.; IBRAHIM, M. G.; MAHMOD, W. E. Runoff hazard analysis of Wadi Qena Watershed, Egypt based on GIS and remote sensing approach. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, p. 377-385, 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). **Sistema Brasileiro de Classificação de solos** 2.ed. Rio de Janeiro, 2006.

FANTINEL, R. A.; BENEDETTI, A. C. P. Geoprocessamento de dados espaciais para a análise de áreas com potencial agrícola no município de Dona Francisca – RS. **Geoprocessamento na análise ambiental**. Criciúma (SC): Unesc, 2020. Cap. 4.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto.** São Paulo, 2005. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm. Acesso em: 2 nov. 2024.

FIGUEIREDO, M. C. B. (Org.) **Análise da vulnerabilidade ambiental**. Fortaleza, CE: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

FIGUEIREDO, M. C. B.; TEIXEIRA, A. S.; PEREIRA, A. L. F.; ROSA, M. F.; PAULINO, W. D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J. C. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Reservatórios à Eutrofização. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 12, n. 4, p. 399-409, 2007.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3. ed. ampl. e atual. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

HUDSON, B. D. The soil survey as a paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 836-841, 1992.

IAT – INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA. Sistema metodológico e mapeamento de uso e cobertura da terra no estado do Paraná. **Relatório técnico de mapeamento – base integrada**. Curitiba, 2019.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Topodata**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php. Acesso em: 10 ago. 2024.

JAVID, K.; AKRAM, M. A. N.; MUMTAZ, M.; SIDDIQUI, R. Modeling and mapping of climatic classification of Pakistan by using remote sensing climate compound index (2000 to 2018). **A Water Science Journal**, v. 9, n. 152, p. 9, 2019.

JORDÃO, C. O.; MORETTO, E. M. A vulnerabilidade ambiental e o planejamento territorial do cultivo de cana-de-açúcar. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVIII, n. 1, p. 81-98, jan.-mar. 2015.

JUCA, M. V. Q.; RIBEIRO NETO, A. Remote sensing and global databases for soil moisture estimation at different depths in the Pernambuco state, Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 27, e. 15, p. 1-9, 2022. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbrh/a/MMfmL6p7qrLcyzP359d8T7s/?lang=en&format=pdf. Acesso em: 5 set. 2024.

KAYAD, A.; SOZZI, M.; GATTO, S.; MARINELLO, F.; PIROTTI, F. Monitoring within-field variability of corn yield using Sentinel-2 and machine learning techniques. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2873, 2019. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/11/23/2873. Acesso em: 13 dez. 2024.

LAGACHERIE, P. Digital soil mapping: a state of art. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA SANTOS, M. L. **Digital soil mapping with limited data**. New York: Ed. Springer, 2008.

LUERS, A. L. The surface of vulnerability: an analytical framework for examining environmental change. **Global Environmental Change**, n.15, p. 214-223, 2005.

MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2.ed. Rio de Janeiro; Curitiba: Secretaria

da Cultura e do Esporte do Governo do Estado do Paraná, 1969.

MARTINI, L. C. P.; MATTOS, D. S.; BARBOSA, D. F. P.; RECH, A. I. B. Uso de sensoriamento remoto orbital para avaliação da distribuição espacial de Clorofila_a na Lagoa da Conceição, SC. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 11, n. 4, 2006.

MEDEIROS, M. D.; PEREIRA, V. H. C.; ALMEIDA, L. Q. Áreas de Vulnerabilidade Ambiental na Zona Oeste de Natal/RN/Brasil. **Revista Geonorte**, ed.esp., v. 1, n. 4, p. 474-486, 2012.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A; MOURA-BUENO, J. M.; TIECHER, T. Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 585-598, 2014.

MONTICELI, J. J.; TRESSOLDI, M. **Diretrizes para classificação de sondagens**: 1ª tentativa. São Paulo: ABGE, 2013. 118 p.

PDI. PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE CASCAVEL. **Relatório de avaliação ambiental**. Cascavel, PR, 2012.

PETERSON, G. W.; NIELSEN, G. A.; WILDING, L. P. Geographic information system and remote sensing in land resource analysis and management. **Suelo y Planta**, n**.** 1, p. 531-543, 1991.

RODRIGUES, F. A. JR.; BLASCH, G.; DEFOURNY, P.; ORTIZ-MONASTERIO, J.I.; SCHULTHESS, U.; ZARCO-TEJADA, P.J.; TAYLOR, J.A.; GÉRARD, B. Multi-temporal and spectral analysis of high-resolution hyperspectral airborne imagery for precision agriculture: assessment of wheat grain yield and grain protein content. **Remote Sensing**, v. 10, n. 6, p. 930, 2018. Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/930. Acesso em: 13 fev. 2024.

RUSTIONI, L.; GROSSI, D.; BRANCADORO, L.; FAILLA, O. Iron, magnesium, nitrogen and potassium deficiency symptom discrimination by reflectance spectroscopy in grapevine leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 241, p. 152-159, 2018.

SANCHES DE OLIVEIRA, P. T.; AYRES, F. M.; PEIXOTO FILHO, G. E. C.; MARTINS, I. P.; MACHADO, N. M. Geoprocessamento como ferramenta no licenciamento ambiental de postos de combustíveis. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 87-99, 2008. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/9370. Acesso em: 7 jan. 2024.

SANTOS, J. V. Aplicação de SIG para análise do perfil geológico-geotécnico do Campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT. 2016. 200f. **Dissertação (Mestrado)**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016.

SCHMELTZ. M. T.; MARCOTULLIO, P. J. Examination of human health impacts due to adverse climate events through the use of vulnerability mapping: a scoping review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, ed. 17, n. 3091, 2019.

SEIM. Projeto Serviço geológico nos municípios. Avaliação geológica, geotécnica para o planejamento territorial e urbano do município de Cascavel. **Relatório técnico**. Curitiba: Mineropar, 2004.

SHIMABUKURO, Y. E.; MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agronômicos e florestais. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p.399-409, 2009. Disponível em:

http://urlib.net/ibi/J8LNKAN8RW/36KNMBK. Acesso em: 15 fev. 2024.

SIDDIQUI, S.; JAVID, K. Spatio-temporal analysis of aridity over Punjab province, Pakistan using remote sensing techniques. **International Journal of Economic and Environmental Geology**, v. 9, n. 2, p. 1-10, 2018.

SILVEIRA, G. R. P.; CAMPOS, S.; GONÇALVES, A. K.; BARROS, Z. X.; POLLO, R. A. Geoprocessamento aplicado na espacialização da capacidade de uso do solo em uma área de importância agrícola. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 4, p. 363-371, 2015.

SOUZA, R. B. **Sensoriamento Remoto**: conceitos fundamentais e plataformas. Centro Regional de Pesquisas Espaciais – CRS. Santa Maria: INPE, 2010.

VELLOSO, D.; LOPES, F. R. Fundações. São Paulo: **Oficina de textos**, 2010.

WEISS, M.; JACOB, F.; DUVEILLER, G. Remote sensing for agricultural applications: a meta-review. **Remote Sensing of Environment**, v. 236, p. 111-402, 2020.

ZUQUETTE, L. V. Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamentos e guia para elaboração. **Tese (Livre Docência)** São Carlos – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 1993.