



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

LUIZ FERNANDO RIBEIRO FERREIRA

**DRONES E GEOTECNOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA
APTIDÃO AGRÍCOLA E ENQUADRAMENTO TRIBUTÁRIO DO
IMPOSTO SOBRE A PROPRIEDADE TERRITORIAL RURAL –
ITR**

Londrina
2025

**DRONES E GEOTECNOLOGIAS PARA
AVALIAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA E
ENQUADRAMENTO TRIBUTÁRIO DO IMPOSTO
SOBRE A PROPRIEDADE TERRITORIAL
RURAL – ITR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, para obtenção do Título de Mestre em Geografia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Nardini Gomes

Londrina
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

F383 Ferreira, Luiz Fernando Ribeiro .
Drones e geotecnologias para avaliação da aptidão agrícola e enquadramento tributário do imposto sobre a propriedade territorial rural – ITR / Luiz Fernando Ribeiro Ferreira. - Londrina, 2025.
84 f. : il.

Orientador: Luciano Nardini Gomes.
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2025.
Inclui bibliografia.

1. UAV - Tese. 2. Aptidão Agrícola - Tese. 3. Imposto Territorial Rural - Tese. 4. Modelo Digital de Elevação - MDE - Tese. I. Gomes, Luciano Nardini. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.

CDU 91

**DRONES E GEOTECNOLOGIAS PARA
AVALIAÇÃO DA APTIDÃO AGRÍCOLA E
ENQUADRAMENTO TRIBUTÁRIO DO IMPOSTO
SOBRE A PROPRIEDADE TERRITORIAL
RURAL – ITR**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual de Londrina, para obtenção do Título de Mestre em Geografia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Orientador Dr. Luciano Nardini Gomes
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Vinicius Vasconcelos
Universidade de Brasília - UNB

Londrina, 25 de fevereiro de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à toda minha família, amigos e professores que estiveram comigo e me apoiaram direta e indiretamente nessa conquista, a vocês, minha sincera gratidão.

RESUMO

FERREIRA, Luiz Fernando Ribeiro. **Drones e geotecnologias para avaliação da aptidão agrícola e enquadramento tributário do imposto sobre a propriedade territorial rural – ITR**. 2024. 84 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2024.

O surgimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) inaugurou um novo paradigma em diversos campos de estudo, viabilizando pesquisas mais aprofundadas e economicamente acessíveis. No âmbito da gestão de propriedades rurais, as RPAs emergem como ferramentas imperativas para o monitoramento de áreas vulneráveis, a avaliação de solos e a caracterização topográfica de locais anteriormente inacessíveis. Na tributação rural, o imposto sobre a propriedade territorial rural (ITR) utiliza mecanismos para promover a otimização do uso da terra e dos recursos naturais, favorecendo propriedades com alto rendimento e aplicando alíquotas mais elevadas àquelas com menor produtividade. A correta definição da aptidão agrícola, baseada em atributos que correlacionam o potencial produtivo da terra, é base para o enquadramento tributário e é crucial para a aplicação justa do imposto. Diante disso, a presente pesquisa investigou a utilização de RPAs, seus produtos, como o Modelo Digital de Elevação (MDE) e os fatores limitantes do uso da terra para confrontar o enquadramento tributário atribuído a uma propriedade com seu real potencial produtivo. Os resultados obtidos evidenciaram que características topográficas, como declividade estão conectadas com a aptidão agrícola do solo, exercem influência determinante sobre a capacidade produtiva da terra e a necessidade de implementação de práticas conservacionistas, impactando o valor da terra nua e, conseqüentemente, a tributação. A pesquisa demonstrou que ambas as imagens orbitais SRTM, com resolução de 30 metros, e imagens suborbitais, com resolução de centímetros, são capazes de realizar a classificação do relevo, no entanto, fica evidente o potencial dos RPAs para aprimorar a avaliação de propriedades rurais, fornecendo informações detalhadas e georreferenciadas para intervenções precisas para terraceamento. A pesquisa concluiu que as imagens suborbitais são capazes de inferir a aptidão agrícola de uma propriedade agrícola, visto que o principal fator relacionado a fragilidade do solo e potencial agrícola é a declividade, e quando aliado a fatores apurados *in loco* como textura de solo, pedregosidade e incidência de erosão pode-se determinar seguramente a aptidão agrícola. Os resultados mostraram que a fazenda São Sebastião deve ser enquadrada como “Lavoura - Aptidão Regular” para base do ITR. A adoção dessa metodologia contribui para uma tributação mais justa e em consonância com a função social da propriedade, além de estimular práticas agrícolas sustentáveis e a preservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: RPA; UAV; Modelo Digital de Elevação (MDE); SRTM; Justiça Tributária Rural.

ABSTRACT

FERREIRA, Luiz Fernando Ribeiro. **Drones and geotechnologies for the assessment of agricultural suitability and tax classification of the rural land tax – ITR**. 2024. 84 f. Master's Dissertation (Master's in Geography) – State University of Londrina, Londrina, 2024.

The advent of Remotely Piloted Aircraft (RPA) has established a new paradigm across multiple research fields, facilitating more detailed and economically accessible investigations. Within the scope of rural property management, RPAs have emerged as indispensable tools for monitoring vulnerable areas, conducting soil assessments, and characterizing the topography of previously inaccessible regions. In the domain of rural taxation, the Rural Land Tax (ITR) employs mechanisms intended to optimize land use and the management of natural resources, incentivizing highly productive properties while applying higher tax rates to those with lower productivity. Accurate determination of agricultural suitability, based on attributes correlating to the land's productive potential, constitutes the foundation for tax classification and is crucial for the equitable application of the tax. This study investigated the application of RPAs and their derived products, such as Digital Elevation Models (DEM), alongside limiting factors for land use, to assess the alignment between the tax classification assigned to a property and its actual productive potential. The findings revealed that topographic features, particularly slope, are strongly associated with soil agricultural suitability, significantly influencing land productivity and the necessity for conservation practices—factors that directly impact the bare land value and, consequently, tax obligations. The analysis demonstrated that both orbital SRTM imagery (30-meter resolution) and suborbital imagery (centimeter-level resolution) are capable of terrain classification. Nevertheless, the superior potential of RPAs in enhancing rural property assessment was evident, offering detailed and georeferenced data for precise interventions, such as the design of terraces. The study concluded that suborbital imagery is highly effective in inferring a property's agricultural suitability, especially considering that slope—when complemented by in situ observations such as soil texture, stoniness, and erosion incidence—serves as a reliable indicator of agricultural potential. Based on the results, it was determined that the São Sebastião Farm should be classified as "Cropland – Moderate Suitability" for the purposes of ITR assessment. The adoption of this methodology contributes to a more equitable taxation system consistent with the social function of land ownership, while also promoting sustainable agricultural practices and the conservation of natural resources.

Keywords: RPA; UAV; Digital Elevation Model (DEM); SRTM; Rural Tax Justice.

Figura 1 - Fluxograma das Etapas.....	48
Figura 2 - Localização dos talhões da fazenda São Sebastião em Apucarana	49
Figura 3 - Base estacionária e ponto de controle fotovisível alocados no talhão 1 da fazenda São Sebastião.....	51
Figura 4 - Plano de Voo para o talhão 1 da Fazenda São Sebastião Gerado pelo Drone Deploy.....	53
Figura 5 - Alinhamento das fotos do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape.....	55
Figura 6 - Nuvem de Pontos do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape.....	56
Figura 7 - MDE do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape	57
Figura 8 - MDE com curvas de nível a cada 5 metros do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape.....	58
Figura 9 - Linha altimétrica do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape	58
Figura 10 - Perfil topográfico da linha altimétrica do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape	59
Figura 11 – Ortofoto do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape utilizando 726 fotos.	59
Figura 12 – Classificação do Declive do talhão 1 da fazenda São Sebastião de acordo com a Embrapa (1979).....	60
Figura 13 - Classificação do relevo e porcentagem da área do talhão 1 da fazenda São Sebastião.....	61
Figura 14 – Mapa de declividade de 12% do talhão 1 da fazenda São Sebastião	63
Figura 15 - Comparação da Classificação de Relevo de acordo com a Embrapa de dados provenientes de RPA e de dados orbitais SRTM com resolução espacial de 30 metros sobre o talhão 1 da fazenda São Sebastião	64
Figura 16 - Comparativo do limiar de declividade de 12% a partir de dados provenientes de RPA e de dados orbitais SRTM com resolução espacial de 30 metros sobre o talhão 1 da fazenda São Sebastião.....	65
Figura 17 - Processos erosivos incidentes sobre região de alta declividade e presença de afloramento rochoso no talhão 1 da fazenda São Sebastião.....	66
Figura 18 - Organograma da relação entre o Declive e demais fatores limitantes do uso do solo.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de relevo elaborada pela Embrapa (1979).....	24
Tabela 2 - Alíquotas do ITR conforme grau de utilização e tamanho do imóvel rural.....	42
Tabela 3 - Tabela de aproximações de classes entre o Sistema de Capacidade e Uso do Solo e o Sistema de Preços de Terras.....	46
Tabela 4 - Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE	51
Tabela 5 - Relatório do IBGE sobre a precisão esperada para um levantamento estático em metros.....	52
Tabela 6 – Etapas do Geoprocessamento utilizando os softwares Agisoft Matashape e Qgis	53
Tabela 7 – Valores de Terra Nua – Exercício 2023	70
Tabela 8 – Preço médio de terras agrícolas elaborado pelo Deral em 2023 com destaque para o município de Apucarana e a classe III referente a lavoura de aptidão regular.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC.	Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL.	Agência Nacional de Telecomunicações
CNA.	Confederação Nacional da Agricultura
CONTAG.	Confederação Nacional dos Trabalhadores na Agricultura
CTC.	Capacidade de Troca de Cátions
DEB.	Divisão de Estatísticas Básicas
Deral.	Departamento de Economia Rural do Paraná
DGPS.	<i>Differential Global Positioning System</i>
DIAC.	Documento de Informação e Atualização Cadastral do ITR
DIAT.	Documento de Informação e Apuração do ITR
DITR.	Declaração do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural, Declaração do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural
DOP.	<i>Dilution of Precision</i>
FAO.	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GCP.	<i>Ground Control Points</i>
GNSS.	<i>Global Navigation</i>
GU.	Grau de Utilização
IBAMA.	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE.	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU.	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INCRA.	Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária
INS.	<i>Internal Navigation System</i>
ITR.	Imposto Territorial Rural
LiDAR.	<i>Light Detection and Ranging</i>
MAPA.	Ministério da Agricultura
MDE.	Modelo Digital de Elevação
NTRIP.	<i>Networked Transport of RTCM via Internet Protocol</i>
OACI.	Organização da Aviação Civil Internacional
PC.	Pontos de Controle
PV.	Pontos de Verificação
RPA.	<i>Remotely Piloted Aircrafts</i>
RTK.	<i>Real Time Kinematic</i>
SBCS.	Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
SIPT.	Sistema de Preços de Terras
SIRGAS.	Sistema de Referência Geocêntrico das Américas
SRF.	Secretaria da Receita Federal
SRTM.	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
UAS.	<i>Unmanned Aircraft System</i>
UAV.	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
USDA.	<i>Food and Agriculture Organization</i>
USGS.	<i>United States Geological Service</i>
UTM.	Universal Transversa de Mercator
VANT.	Veículo Aéreo Não Tripulado
VTN.	Valor da Terra Nua
ZEE.	Zonas Ecológico-econômicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS e plantio direto	15
3.2 SOLO, ERODIBILIDADE E DECLIVIDADE	18
3.3 APTIDÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS	25
3.4 MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA	28
3.5 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS E GEOPROCESSAMENTO	30
3.6 TERRA E TRIBUTAÇÃO	40
4 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.1 MATERIAL.....	47
4.2 METODOLOGIA.....	47
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	48
4.4 GEORREFERENCIAMENTO DA POLIGONAL DE BASE E DOS PONTOS DE CONTROLE.....	50
4.5 LEVANTAMENTO COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA.....	52
4.6 PROCESSAMENTO DAS FOTOS DO AEROLEVANTAMENTO.....	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A exploração profícua e durável da paisagem rural deve ser prioridade em qualquer sistema de produção, de modo que se possa aliar produtividade e preservação ambiental. O uso de terras agrícolas alienado de boas práticas conservacionistas provoca perda de solo, degradação e empobrecimento da microbiota, poluição das matas e corpos hídricos e, por conseguinte, esgotamento dos recursos naturais.

Nesse sentido, o Brasil, pioneiro em práticas conservacionistas tal como o sistema de plantio direto, tem difundido práticas conservacionistas de modo a melhorar a produtividade, diminuir a ocorrência de solos degradados e refrear o desmatamento florestal em busca de novas fronteiras agrícolas. O sistema de plantio direto preconiza a mínima mobilização dos solos, manutenção da cultura morta e rotação de culturas de forma planejada (WADT, 2003).

O desenvolvimento de geotecnologias voltadas para o manejo da agricultura ganha escala e aplicabilidade nas lavouras brasileiras, novas soluções baseadas em imagens orbitais, como a análise de índices de vegetação para monitoramento do vigor e desenvolvimento das culturas, a qualificação física e química do solo ou a utilização de imagens de radar para avaliação de atributos topográficos para avaliar a fragilidade do solo e a viabilidade de mecanização de áreas rurais se tornam acessíveis e modernizam o manejo agrícola.

O advento das Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircrafts* - RPA) impulsionou o desenvolvimento acelerado da aerofotogrametria a partir dos anos 90 e consolidou novas tecnologias nos anos 2000 (EISENBEISS, 2009). No Brasil, o uso de drones está ligado ao agronegócio sob a óptica do aumento da produtividade (MUNARETTO, 2017). A utilização de imagens suborbitais no sensoriamento remoto permite uma resolução espacial muito maior, muitas vezes chegando a nível de centímetros e milímetros, que permite o monitoramento ambiental e mapeamento detalhado. Não obstante, o seu emprego para o estudo do comportamento do solo e demais práticas conservacionistas tem avançado de forma significativa (JULIAN; NUNES, 2020) e devem ser estimulados.

A tributação de propriedades rurais no Brasil se baseia em alguns princípios fundamentais, que buscam garantir a justiça fiscal e o cumprimento da função social da terra, nesse contexto, a lei sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (ITR) apresenta dispositivos para inibir a concentração de terras, promover o uso

sustentável e otimizado da área e tributar a propriedade conforme o nível de manejo.

A tributação das terras agrícolas no Brasil possui caráter ambiental e social e está relacionada com a qualidade do solo e aptidão agrícola, de modo que solos mais mecanizáveis, melhores física e quimicamente estruturados são mais rentáveis e, portanto, passíveis de tributos maiores. Por outro lado, os drones podem servir como instrumento de avaliação morfométrica do relevo, uso do solo e aptidão agrícola, de modo que podem guiar um possível reenquadramento fiscal que pondere as limitações e particularidades das propriedades rurais no Brasil. Diante deste contexto, emerge a seguinte problemática: Qual a eficácia e aplicabilidade das técnicas de monitoramento e avaliação do solo, mediadas por RPA, como metodologia para o reenquadramento tributário de propriedades rurais?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um levantamento e análise morfométrica de imagens suborbitais para avaliação da aptidão agrícola e enquadramento tributário do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural de uma propriedade agrícola.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estudar o embasamento teórico sobre manejos agrícolas, RPAs e tributação de terras no Brasil;

Realizar um levantamento de imagens suborbitais de um talhão representativo da fazenda São Sebastião e analisar as formas do relevo a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE);

Comparar a classificação do relevo por meio de imagens SRTM e imagens suborbitais de RPA;

Avaliar o atual enquadramento tributário e a aptidão agrícola do solo da fazenda São Sebastião localizada no município de Apucarana;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A antropização da paisagem e a modificação dos sistemas naturais ocorrem pela necessidade humana de habitação e produção de alimentos. A agricultura e demais atividades rurais de exploração do solo, quando manejadas de forma incorreta, levam à degradação e insustentabilidade do sistema, e por conseguinte, a uma queda de produtividade. Para a manutenção da qualidade do solo a longo prazo, é fundamental a adoção de técnicas conservacionistas que visam a constante manutenção das características produtivas do solo.

3.1 PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS E PLANTIO DIRETO

Na agricultura, o sistema e plantio direto busca a mínima mobilização do solo, para isso o plantio ou semeadura ocorre sobre a área coberta de restos de cultura picada oriundos da colheita anterior (VERDUM et al., 2016). Outros pressupostos do sistema de plantio direto são o controle de plantas daninhas a partir de dessecantes e herbicidas, a formação de cultura morta, a rotação e sucessão planejada de culturas, com plantas com diferentes níveis de exigência nutricional e a produção de fitomassa (WADT, 2003). Reis et al. (2007) corroboram que a manutenção dos resíduos culturais somado ao mínimo revolvimento do solo levam à decomposição da matéria orgânica de forma gradual e durável, o que garante a fertilidade e constância na produtividade. Para que o plantio direto seja eficaz é necessário que o solo não esteja compactado, neste caso as técnicas propostas são a escarificação e a subsolagem.

A escarificação consiste na técnica de rompimento do solo por propagação de fissuras, diferente da aragem e gradagem, o solo não é revolvido, mas rompido entre as interfaces de agregados, isso permite que a mobilização do solo seja mais amena e ordenada quando comparado a aração com arados de discos ou aivecas. Além disso, demandam a mesma potência de outras técnicas como aração e gradagem, porém com um rendimento melhor, o que proporciona um custo de operação menor (SPERA et al., 2018). Já a subsolagem é uma técnica que rompe as camadas endurecidas que estão cerca de 15 a 80cm abaixo da superfície, as chamadas lajes, que prejudicam o sistema radicular e podem inviabilizar a cultura. Ressalta-se, porém, que o uso continuado do escarificador pode levar a formação de novas lajes e, logo, perpetuar o problema inicial (VERDUM et al., 2016).

Tratados os problemas de compactação do solo, o sistema de plantio direto tem melhor êxito diante de boas condições de fertilidade. Com tal intuito, técnicas de calagem, adubação química, orgânica ou verde podem ser empregadas. Em seus trabalhos, Bernadi et al. (2002) afirmam que a maioria dos solos brasileiros são intemperizados, ácidos, com baixa CTC e alto poder de fixação de fósforo, acidez trocável (Al^{+3}) e apresentam baixos teores de macronutrientes primários (N, P e K), secundários (Ca, Mg e S) e de micronutrientes (Zn e Cu). Os autores também relatam problemas físicos como a escassez hídrica e erosão.

Alvarez et al. (1999) afirmam que a partir das análises químicas é possível quantificar o balanço e a disponibilidades dos nutrientes no solo. Esta disponibilidade está diretamente conectada com as exigências do empreendimento agrícola, pecuário ou florestal a ser empregado, isto, pois, cada espécie apresenta diferentes capacidades de tolerância ou sensibilidade à acidez ativa, à acidez trocável, saturação por bases, saturação por alumínio e disponibilidade de nutrientes. Com base nisso, é possível ponderar a dinâmica dos elementos presentes no solo e prescrever, principalmente, as doses de nitrogênio, fósforo e potássio a serem aplicadas.

Para a correção da acidez do solo adota-se a calagem, técnica que incorpora ao solo determinados materiais capazes de alterar o pH como o calcário dolomítico, magnesiano e calcítico. O pH é um indicador da qualidade físico-química-biológica do solo, onde a maior acidez aponta para uma menor fertilidade, por outro lado, um solo alcalino demais propicia a lixiviação de nutrientes. A correção do pH permite a disponibilização dos diversos macro e micronutrientes presentes no solo para a planta (VERDUM et al., 2016).

Outra forma de adubação, com absorção mais lenta, porém mais duradoura é a adubação orgânica. Weinärtner et al. (2006) especificam que adubos orgânicos são aqueles que tem origem vegetal ou animal recomendados por aumentar a fertilidade de solos pobres e por elevar a atividade biológica do solo, exemplos são os esterco e o húmus.

Alvarez et al. (1999) distinguem as vantagens da adubação orgânica entre efeitos condicionadores, efeitos sobre os nutrientes e efeitos sobre os microrganismos do solo. Os efeitos condicionadores são a melhora da capacidade de troca de cátions nos solos altamente intemperizados ou arenosos, maior agregação das partículas de solo, que torna o solo mais estruturado e resistente à erosão, aumenta a capacidade de campo e diminui a oscilação e temperaturas no solo. Sobre os nutrientes denota-

se o aumento por meio dos processos de mineralização, aumento dos ácidos orgânicos que aceleram a solubilização de minerais para as plantas. Por fim, a adubação orgânica é fonte de nutricional e energética para a biodiversidade do solo.

Em diversos casos a adoção da adubação orgânica é impossibilitada ou de difícil aplicação em larga escala, como solução Alvarez et al. (1999) sugerem alternativas como a adubação verde, rotação de culturas com leguminosas e a incorporação de restos culturais. Weinärtner et al. (2006) ainda destacam que a adubação verde pode ser implantada por meio de uma pequena quantidade de sementes, o que facilitaria o processo. Outra vantagem seria o auxílio no combate a nematoides, plantas invasoras, doenças e pragas, além da diversificação de sistemas radiculares. Alvarez et al. (1999) complementam que o uso de espécies com raízes mais profundas permite a reciclagem de nutrientes para as camadas superficiais, como sugestão de espécies propõe-se a crotalária, macuna-preta, guandu e outras.

Outras formas de melhorar as condições do solo é a aplicação de cobertura morta com vegetais secos como folhas, ramos, raízes, cascas de frutas, serragem de madeira e outros. A cobertura protege contra o impacto da água, ajuda na retenção de umidade, controle de temperatura e emergência de plantas invasoras. Por fim, acaba impulsionando a matéria orgânica e o desenvolvimento de microrganismos (VERDUM, 2016).

Os quebra-ventos podem contribuir com a conservação do solo e bom desenvolvimento das culturas, uma vez que diminui a erosão eólica e ameniza a força do vento reduzindo a evapotranspiração. O plantio dos quebra-ventos deve ser planejado conforme os ventos predominantes da região, sempre no sentido transversal, a barreira deve vedar parcialmente os ventos a fim de evitar um efeito rebote de barlavento, dessarte, institui-se um microclima favorável às culturas. Os quebra-ventos também podem, por vezes, atuar como cordões de vegetação permanentes compostos de plantas perenes, que reduzem o escoamento superficial, servem de guia para o cultivo em faixas e reforçando a eficiência do terraço, observa-se, no entanto, a seleção das espécies utilizadas que não devem ser hospedeiras de pragas e doenças (VERDUM, 2016).

No sistema de plantio direto, a escolha das culturas deve ser estudada de modo a garantir a sustentabilidade e a produtividade. Para isso, ressalta-se que mesmo alternância de poucas culturas, no caso da sucessão, pode acarretar prejuízos. Desse modo, as espécies devem possuir sistemas radiculares distintos, como gramíneas e

leguminosas, de modo que uma auxilia o desenvolvimento da subsequente (GONÇALVES, 2007). O autor ainda lembra que as espécies podem ser utilizadas como adubo verde e sugere como exemplo a aveia, milheto, espécies de pastagens, tremoço, girassol entre outras. Para balizar a escolha pode-se analisar a capacidade de fixação de nitrogênio, o tremoço, por exemplo, possui tal capacidade, a aveia, no entanto, não, nesse caso pode ser semeada em consórcio com a ervilhaca.

Por fim, sugere-se como prática vegetativa de conservação do solo o reflorestamento. Está prática foca em melhorar e aumentar o plantel de árvores em locais desmatados ou florestas esgotadas, protegendo as encostas e, por vezes, gerando valor econômico (NOGUEIRA, 2012). Segundo Wadt (2003) a cobertura florestal deve ser empregada nas matas ciliares protegendo as margens de rios, lagos e nascentes contra o assoreamento, contaminação com agroquímicos e aporte de nutrientes que podem acarretar a eutrofização dos leitos. Nesse contexto, Back et al. (2019) sugerem a implementação de canais escoadouros e bacias de captação de águas pluviais como técnicas complementares de controle de erosão e conservação do solo e da água.

3.2 SOLO, ERODIBILIDADE E DECLIVIDADE

De acordo com Lepsch (2002) desde os primórdios da agricultura mais intensiva, o ser humano tem observado as consequências dessa atividade no meio ambiente, como a degradação do solo e a poluição dos recursos hídricos. Os impactos negativos da erosão têm forçado a expansão das fronteiras das atividades agrícolas para novas áreas, às vezes resultando na realocação total de antigas civilizações para regiões ainda não exploradas.

Ainda na visão de Lepsch (2002) o Brasil já enfrenta um preocupante cenário de erosão acelerada e degradação do solo e, apesar do deslocamento da agricultura brasileira para áreas virgens no centro-oeste e norte do país, denota-se uma rápida manifestação desses problemas nas terras recém-cultivadas, o que evidencia a fragilidade desses ecossistemas e a necessidade urgente de práticas agrícolas sustentáveis. Práticas rotineiras de exploração de solos, como o uso de arado para revolvimento, plantio sentido “morro-abaxo”, queimadas intensas e pisoteio excessivo de gado em pastagens, ainda são bastante comuns e contribuem significativamente para esse

cenário. O autor contrapõe afirmando que o objetivo da conservação de solos é promover o uso adequado de suas técnicas, especialmente quando a vegetação natural é substituída por lavouras, pastagens ou reflorestamento, visando mitigar os impactos negativos da atividade agrícola sobre o solo e o meio ambiente.

Para Ker et al. (2012) a declividade influencia a gênese do solo ao afetar a drenagem, a erosão e a deposição de sedimentos. Em áreas com maior declividade, a água escoar mais rapidamente, o que pode levar à remoção de partículas finas do solo e ao acúmulo de materiais mais grosseiros. Além disso, a declividade pode influenciar a distribuição da vegetação, que por sua vez, afeta a formação de matéria orgânica e a estrutura do solo. Os autores acrescentam que, em geral, áreas com maior declividade tendem a ter solos mais rasos devido à maior erosão e menor acúmulo de material. Por outro lado, áreas mais planas ou com menor declividade podem apresentar solos mais profundos devido ao maior acúmulo de sedimentos e menor perda por erosão. No entanto, essa relação não é linear e pode ser influenciada por outros fatores, como o tipo de rocha e a intensidade do intemperismo.

Lacerda et. al (2008) estudaram a relação pedomorfológica, especificamente sobre a distribuição de solos com horizonte B textural e B nítico e classes de relevo, o estudo faz associações entre a presença das classes de solos e a geomorfologia. Já Chiapin et al. (2013) observaram uma correlação entre a geomorfologia e a morfologia do solo, destacando que paleodiques mais dissecados exibem transições irregulares e descontínuas, maior porosidade e espessamento do horizonte eluvial (E).

Mafrá et. al (2001) apontam a ação conjunta da evolução do relevo com a ação da água para o desenvolvimento do gradiente textural e para o espessamento do horizonte alvíco, principalmente nas regiões mais altas da paisagem, segundo os autores há uma relação intrínseca entre o espessamento do horizonte eluvial com a superfície geomórfica, onde o horizonte era mais desenvolvido nas porções do relevo onde o nível do lençol freático era mais profundo. Dessa forma, em superfícies com maior infiltração de água, o perfil do solo é mais profundo, ao passo que onde há maior declividade, e por conseguinte, menor infiltração, o perfil do solo é mais raso. Vidal-Torrado e Lepsch (1999) corroboram ressaltando que as superfícies geomorficamente mais estáveis oferecem condições favoráveis para um maior desenvolvimento e estabilidade dos solos, sendo localizados em geral nas regiões de topo, enquanto as áreas menos estáveis tendem a ter solos menos desenvolvidos, com maior

variabilidade em suas propriedades, localizados nas posições de sopé das montanhas.

Cunha et. al (2005) em um estudo sobre superfícies geomórficas e atributos de latossolo, afirmam que a declividade e morfologia influenciam a variação espacial dos solos, afetando a infiltração e a drenagem da água, com solos mais argilosos e maior conteúdo de ferro localizados nas áreas de menor inclinação. Os autores acrescentam ainda que esses fatores, junto com a idade das superfícies geomórficas e a litologia (arenito e basalto), moldam o processo de pedogênese, controlando o desenvolvimento dos solos e sua distribuição ao longo da paisagem.

Para Rubira et al. (2019) em climas tropicais e subtropicais úmidos, o intemperismo exacerbado enfatiza uma interação intensa entre solo e relevo que por gerar mantos espessos. Há, portanto, uma correlação entre a pedologia e geomorfologia que regulam a evolução da paisagem, a pedogênese é mais atuante em solos com declive suave e mantos mais profundos, e a morfogênese, sobre os solos mais declivosos.

Em uma revisão de diversos estudos, Rubira et al. (2019), apontam o fluxo hidrológico como principal agente para modificações de cobertura pedológica e no modelado do relevo, uma vez que é responsável pela remobilização da matéria ao longo da paisagem. Observa-se que a heterogeneidade dos solos com diferentes declividades é influenciada pela distribuição distinta da infiltração da água pluvial, impulsionada pela força gravitacional. Correlacionam-se regiões planas com maiores taxas de infiltração hídrica (fluxo subsuperficial) que estimulam o aumento de processos geoquímicos de hidrólise e dissolução em profundidade, e reforçam o intemperismo químico. A partir disso, cria-se uma dinâmica que promove o espessamento do manto regolítico e com baixa CTC e saturação de bases (V%).

Em áreas onde a vegetação indica menor disponibilidade hídrica e/ou maior intermitência da água pluvial, as reações de hidrólise e dissolução ocorrem em condições menos propícias à sua manifestação. Em contrapartida, intensifica-se a ação dos ciclos de umedecimento e secagem dos colóides orgânicos, resultando em solos relativamente menos profundos e com menor desenvolvimento pedogenético (OLIVEIRA et al, 1992)

Há interdependência nos processos de intemperismo, pedogênese e morfogênese que culminam, por meio de transformações físicas, químicas e mineralógicas, na organização estrutural e de volume da dinâmica do relevo. A revisão

expõe pesquisas que indicam a alteração do relevo por atributos pedogenéticos e, também, o relevo como ator de mudanças pedogenética (RUBIRA et al. 2019).

Souza Junior e Demattê (2008) concluíram que solos apresentam comportamentos diferenciados para cada classes de declive. Em sua pesquisa, os autores verificaram a presença de Latossolo Amarelo em regiões mais altas e com relevo plano, contudo, solos pouco intemperizados, como, por exemplo, Neossolos Litólicos, estão presentes em diferentes classes de declividade. Com isso, conclui-se que a relação entre solos e declividade é dependente, porém, devem ser caracterizadas presencialmente.

Ghidin et. al (2006) exploram como diferentes posições no relevo, a dinâmica da água e o material de origem influenciam a mineralogia da fração argila dos Latossolos. As características dos solos são moldadas pela posição ao longo da topossequência, afetando a composição mineralógica. Em áreas mais baixas da paisagem, com maior umidade e drenagem limitada, predominam minerais como a caulinita, enquanto nas áreas mais altas, com melhor drenagem, há maior formação de gibbsita e hematita.

De acordo com Chaplot (2013), vários estudos concluíram que o início da formação de voçorocas depende da relação entre o gradiente médio de inclinação (S) e a área por unidade de comprimento de contorno (As), que é a área de inclinação ascendente a partir da qual a precipitação é drenada para a ravina. Em combinação, eles determinam o acúmulo de fluxo e a velocidade do fluxo em um determinado ponto. Se isso atingir um limite, a formação de ravinas começará a ocorrer. Várias tentativas foram feitas para determinar esse limiar, a fórmula usada é sempre uma relação entre a inclinação média e a bacia. Em seus estudos fica evidenciado que a relação entre declividade e voçorocamento é afetada pelo escoamento superficial, porém, o principal fator para a formação de voçorocas está associado com 'infiltração lateral', isto é, '*seepage-induced erosion, piping erosion and bank undercutting erosion*', em tradução livre: erosão induzida por infiltração, erosão de tubulação e erosão por cortes das margens dos bancos.

Valentin, Poesen e Li (2005) trazem diversas conclusões sobre o processo erosivo e o uso do solo, para eles, alterações no uso do solo provocam mudanças nas taxas de escoamento e infiltração, importantes fatores na formação de ravinas. Os autores destacam que a vegetação exerce um papel fundamental na manutenção da coesão do solo, mitigando a erosão. Suas raízes aumentam a infiltração da água,

enquanto a copa intercepta a precipitação, reduzindo o escoamento superficial. A agricultura, por outro lado, pode levar ao esgotamento de nutrientes, comprometendo a estabilidade do solo. O cultivo também pode contribuir para a formação de crostas superficiais, intensificando a formação de ravinas. Portanto, a prática agrícola é considerada um dos principais desencadeadores da erosão em ravinas. O desmatamento, por sua vez, diminui significativamente a coesão do solo e aumenta a probabilidade de formação de crostas. Além disso, o sobrepastoreio em algumas áreas de pastagem desestabiliza a estrutura do solo, tornando-o suscetível à erosão e à formação de ravinas.

Poesen et al. (2003) concluíram que o horizonte B com ótima fertilidade química e rico em argilas age no confinamento e limitação do desenvolvimento de ravinas. Também afirmam que pouco é conhecido sobre as propriedades do material de origem (litologia) no que diz respeito à resistência à erosão. Já Chaplot (2013) concluiu que o tamanho do grão do material original não teve um grande efeito no recuo da ravina.

A erosão, ou perda de solo, é o principal processo de deterioração das condições do solo. De acordo com Wadt (2003) e Lepsch (2002), as perdas de solo provocadas pela erosão decorrem de dois processos principais: o primeiro devido ao impacto das gotas de chuva sobre o solo descoberto, e o segundo pela enxurrada. No primeiro caso, o impacto da gota de chuva leva à desagregação das partículas do solo, provocando sua desestruturação. Essas partículas são arrastadas por meio do escoamento superficial, caracterizando o fenômeno conhecido como erosão laminar. Como consequência desse processo, os poros do solo são obstruídos, impedindo a absorção da água e amplificando o arraste superficial e a enxurrada.

Dos Santos (2024) destaca o prejuízo social e econômico decorrente das milhares de voçorocas em todo território nacional que continuam a se alastrar em ritmo crescente em função da inação das administrações públicas. O autor reforça que os dois principais agentes protetores da formação de voçorocas e da mitigação da sua evolução são a cobertura vegetal e camada superficial dos solos vem sendo eliminados paulatinamente pela expansão das fronteiras agrícolas e urbanas. A implementação de um plano imediato e abrangente de estabilização é hoje impraticável financeiramente, no entanto, há uma série de medidas técnicas rurais e urbanas para se interromper o advento de novas voçorocas.

A energia cinética envolvida no processo de desagregação do solo é proporcional ao peso das partículas de solo e ao quadrado de sua velocidade. As

gotas de chuva atingem o solo com velocidades entre 5 e 15 km/h, enquanto a água das enxurradas tem velocidade bem menor, geralmente não superior a 1 km/h. Quando o solo está desprovido de vegetação, o impacto direto das gotas de chuva é o primeiro passo para a erosão, desagregando as partículas do solo. Se o solo está coberto por vegetação, a energia cinética das gotas de chuva é absorvida pela copa das árvores, e o restante do impacto é amortecido pelo manto de folhas sobre o solo. Partículas de solo desagregadas e suspensas na água das enxurradas podem ser facilmente transportadas, sendo que a facilidade de transporte depende do tamanho das partículas sendo argila, silte e matéria orgânica mais facilmente carregadas devido ao pequeno peso e dimensões (LEPSCH, 2002).

Lepsch (2002) reitera que desde os primeiros sinais de erosão, devem ser adotadas medidas mitigativas de conservação de solo. Como consequência do descuido a erosão laminar pode evoluir para em sulcos e por fim a formação de voçorocas atingindo o horizonte C, o que impossibilita a mecanização e impacta diretamente rentabilidade da lavoura e, por vezes, atinge até áreas urbanas.

Macedo et. al (1998) afirmam que voçorocas representam a forma mais severa de erosão hídrica, caracterizada pela formação de grandes sulcos em encostas. Elas se desenvolvem predominantemente em áreas onde há um horizonte C muito profundo e um solo de pequena espessura. A remoção completa do solo em determinadas partes da encosta, geralmente nas áreas mais baixas, expõe o horizonte C à intensa remoção de partículas. Esse processo, conhecido como solapamento, resulta no rápido crescimento da voçoroca no material pouco coeso do horizonte C, culminando na perda do solo. As dimensões e a extensão dos danos causados por voçorocas estão intimamente relacionadas com fatores como o clima, a topografia do terreno, a gênese do solo, as práticas de manejo e a classe de solo.

Wadt (2003) afirma que a enxurrada é acentuada em função da declividade do terreno e da extensão da rampa por onde a chuva escorre. Para conter o escoamento em função do declive, pode-se empregar o plantio em nível e o terraceamento, prática que orienta o escoamento da água da chuva em um canal e a contém em um camalhão.

Para a Embrapa (1979) a qualificação das classes de relevo (Tabela 1) é definida pela declividade, comprimentos das encostas e configuração superficial do terreno que juntas moldam as formas topográficas. Essas distinções são

importantes como condicionantes aplicabilidade de implementos agrícolas, em especial os mecanizados, e discriminar inferências sobre susceptibilidade dos solos à erosão.

Tabela 1 - Classes de relevo elaborada pela Embrapa (1979)

Classe de Relevo	Descrição	Declividade
Plano	Superfície de topografia esbatida ou horizontal onde os desnivelamentos são muito pequenos	0 a 3%
Suave Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros	3 a 8%
Ondulado	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros de declive moderado	8 a 20%
Forte Ondulado	Superfície de topografia movimentada, formada por outeiros ou morros com declives fortes e raramente colinas	20 a 45%
Montanhoso	Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituída por morros, montanhas e maciços com desníveis grandes e declives fortes ou muito fortes	45 a 75%
Escarpado	Áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes, como aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias e vertentes muito fortes.	Usualmente ultrapassando 75%

Fonte: Adaptado de Embrapa (1979)

O solo descoberto representa a vulnerabilidade do sistema produtivo, as práticas agrícolas e agropecuárias devem preconizar técnicas que permitam a exploração do solo coberto. No sistema de pastagens, deve-se empregar a rotação dos pastos, a fim de propiciar a rebrota da gramínea, e a interdição do uso de fogo (WADT, 2003). A boa formação e manutenção das pastagens permitem o desenvolvimento da microbiota, incremento da matéria orgânica e estruturação do solo. Dessa forma processos erosivos mais agudos que podem levar a formação de voçorocas são mitigados, isso, pois as raízes do pasto geram um efeito de travamento do solo (VERDUM et al., 2016).

De acordo com Ramalho Filho e Pereira (1999) áreas com maior declive devem ser preferencialmente utilizadas para culturas de ciclo longo e com um tipo de utilização menos intensiva, por exemplo, pastagem plantada.

A respeito dos graus de limitação por suscetibilidade à erosão, o MAPA (1981, p. 122) faz a seguinte classificação:

“Nulo (N) – Terras não suscetíveis à erosão. Geralmente ocorrem em relevo plano ou quase plano, com boa permeabilidade final quando cultivadas por 10 a 20 anos podem apresentar erosão ligeira que pode ser controlada com práticas simples de manejo.

Ligeiro (L) – Terras que apresentam pouca suscetibilidade à erosão. Normalmente possuem boas propriedades físicas, variando os declínios de 3 a 8%. Quando utilizadas com lavouras por um período de 10 a 20 anos mostram, normalmente, uma perda de 25% ou mais de horizonte superficial. Práticas conservacionistas simples podem prevenir contra esse tipo de erosão.

Moderado (M) – Terras que apresentam moderada suscetibilidade à erosão. Seu relevo é normalmente ondulado, com declive de 8 a 20%. Esses níveis podem variar para mais, quando as condições físicas forem muito favoráveis, ou para menos de 8%, quando muito desfavoráveis, se utilizadas sem adoção de princípios conservacionistas, essas terras podem apresentar sulcos e voçorocas requerendo, pois, práticas intensivas de controle a erosão, desde o início de sua utilização agrícola.

Forte (F) – Terras que apresentam grande susceptibilidade à erosão. Ocorrem em relevo forte ondulado, com declives normalmente de 20 a 45%, os quais podem ser maiores ou menores dependendo das suas condições físicas. Geralmente a prevenção a erosão é difícil e dispendiosa, podendo ser antieconômica.

Muito Forte (MF) – Terras que apresentam severa suscetibilidade à erosão final não são recomendáveis para o uso agrícola, sob pena de serem totalmente erodidas em poucos anos. Trata-se de terras ou paisagens com declives superiores a 45% nas quais deve ser estabelecida uma cobertura vegetal que evite o seu arrastamento.”

Dos Santos et. al (2018) na elaboração do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos apresenta a mesma correlação de declive para fornecer informações sobre a praticabilidade de implementos agrícolas, especialmente os mecanizados, e facilitar as inferências sobre suscetibilidade dos solos à erosão.

3.3 APTIDÃO AGRÍCOLA DAS TERRAS

Ramalho Filho e Pereira (1999) junto a unidade da Embrapa Solos reuniram em um único documento, as informações disponíveis sobre a aptidão agrícola e a disponibilidade das terras no Brasil, bem como apresentaram uma análise crítica dos

principais métodos de avaliação de terras adotados no país. Os autores resgatam que há duas categorias de avaliação, sob a primeira: “avaliação para fins generalizados” se situam o sistema de classificação da capacidade de uso descrito por Klingebiel e Montgomery (1961) (sistema americano) e no Brasil o sistema de Marques (1971) e de Lepsch et al. (1983), nestes métodos, variáveis socioeconômicas não são consideradas. O segundo: “avaliação para fins específicos” é considerado o ponto de vista físico, ambiental, social e econômico, e os diferentes tipos de terra são avaliados de acordo com sua aptidão para tipos de uso específico. Neste estão presentes a avaliação da aptidão das terras da FAO (*Food and Agriculture Organization*) (1977) e o sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras de Ramalho Filho e Beek (1995).

O sistema americano parte do pressuposto de uma homogeneidade de recursos disponíveis para aporte e melhoria das terras agrícolas, supõe um alto nível de tecnologia e equipamentos motorizados, valorizando aspectos como o declive e menosprezando aspectos como problemas de fertilidade. Nesse cenário vê-se que o sistema americano desconsidera as grandes diferenças de níveis socioeconômicos e culturais presentes no Brasil e em países tropicais em desenvolvimento. Por outro lado, este sistema possui uma metodologia generalizada e objetiva, se propondo a aspectos de conservação de solo como prevenção da erosão, classes de capacidade, e o uso de máquinas em larga escala (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995).

O sistema brasileiro de avaliação de terras é um trabalho desenvolvido por pesquisadores brasileiros em parceria com especialistas da FAO onde se buscou integrar uma metodologia que atenda às condições de um país onde convivem níveis de tecnologia muito diferentes. Busca-se considerar os tipos de utilização: lavouras, pastagem plantada, silvicultura e pastagem natural e fatores limitativos: deficiência de fertilidade, deficiência de água, excesso de água, susceptibilidade erosão e impedimentos à mecanização. Por fim, obteve-se uma avaliação física das terras que considera diferentes níveis de qualidade, de manejo e usos da terra (RAMALHO FILHO; BEEK, 1995).

De acordo com Ramalho Filho e Beek (1995) há 3 níveis de manejo para lavoura, seguido de pastagem plantada (nível B), silvicultura (nível B) e pastagem natural (nível A). O nível de manejo A se refere a um manejo primitivo, com baixo nível técnico-cultural, B a um manejo pouco desenvolvido, com nível tecnológico médio e modesta aplicação de capital, por fim, C um manejo desenvolvido de alto nível tecnológico, aplicação intensiva de capital, com mecanização em todas as fases das

operações agrícolas. A classe de aptidão é obtida em função do fator limitante mais forte que influencia a produção agropastoril: deficiência de fertilidade, deficiência de água, excesso de água, deficiência de oxigênio, susceptibilidade à erosão e impedimentos à mecanização.

O Estado do Paraná, através da Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola, obteve resultados de classificação de aptidão de terras agrícolas detalhadas ao nível de mesorregiões. A metodologia utilizada segue a interpretação do “*Survey Manual*” do USDA, e na metodologia da FAO definida no texto “*A Framework for Land Evaluation*” de 1976, que recomendam que a aptidão seja elaborada com base em atributos como solo, clima, vegetação, geomorfologia, etc. (MAPA, 1981).

De acordo com o Deral (2017) (Anexo 1), a ocupação das terras no Paraná é classificada pela possibilidade de plantio (Grupo A), seguido pelo pastejo e/ou reflorestamento (Grupo B) e, por fim, pela impossibilidade de uso econômico (Grupo C). Em seguida são classificadas pelo grau de conservação do solo e adaptabilidade. Bertoni e Lombardi (1990) detalham (Anexo 2) por meio de critérios técnicos, as limitações para o enquadramento das Classes de Capacidade de Uso elaboradas pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). Os autores destacam a profundidade efetiva do solo como fator preponderante na classificação, para eles solos rasos se enquadram como classe IV, apresentando produtividades médias e indicação para pastagem. Outro destaque ocorre em terras com declive de 8% a 20% que se enquadram como classe III, comumente com produtividades médias e problemas complexos de conservação. A partir de 20% de declividade não é mais apropriado para cultivo, sendo indicada para pastagem e florestamento.

Erosões laminares moderadas ou com sulco superficial (passíveis de correção com preparo de solo) já enquadram a terra como classe III, ou seja, representam importante limitação produtiva (BERTONI; LOMBARDI, 1990). Caso os sulcos sejam rasos (não passíveis de correção com preparo de solo) frequentemente ou profundos já podem enquadrar a terra como classe IV, ou seja, terras cultiváveis apenas ocasionalmente ou em extensão limitada, com sérios problemas de conservação e produtividade média para gado.

Dessa forma, essas classes são consideradas na Pesquisa de Preços de Terras Agrícolas, que é realizada pela Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná desde 1998, através do Departamento de Economia Rural (Deral – PR).

Por meio da Pesquisa de Preços de Terras Agrícolas, o Deral aponta os valores médios de referência das terras agrícolas no estado, que variam conforme o tamanho, localização, vias de acesso, topografia, hidrografia, tipo de solo, capacidade de uso, grau de mecanização e outros. Para isso o Deral utiliza o “Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso”, publicado pela SBCS em versões desde 1983.

3.4 MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA

A declividade, definida como o ângulo de inclinação do terreno em relação à horizontal, é um atributo topográfico fundamental que influencia a viabilidade do uso de máquinas agrícolas. Esse fator geomorfológico primário está diretamente relacionado às condições de tráfego, impactando a velocidade de deslocamento e a estabilidade dos equipamentos no terreno.

Para Santos Neto (2012) uma parcela considerável das áreas disponíveis no Brasil apresenta declividade acentuada em sua topografia. Essa característica dificulta ou até impede a utilização de equipamentos autopropelidos, uma vez que o eixo longitudinal do veículo não consegue acompanhar de forma estável as linhas de plantio que estão sendo processadas pelo equipamento. Como resultado, a mecanização nessas áreas é inviável, o que gera falta de competitividade para alguns agricultores.

Braunbeck e Oliveira (2006) explicam que apesar de a inclinação teórica lateral máxima das colhedoras modernas ser de aproximadamente 46%, fatores dinâmicos como as irregularidades do terreno e a elasticidade dos pneus diminuem esse limite de inclinação para cerca de 12% (para máquinas equipadas com pneus). Esta condição é a principal responsável por áreas de cultivo de cana-de-açúcar serem consideradas inadequadas para a colheita mecanizada.

Manzatto et al. (2009) em estudos sobre a cana-de-açúcar afirmam que é possível mecanizar a cultura com até 12% de declividade, tendo como fator limitante as colheitadeiras disponíveis no mercado. Já Silva (2016) em estudo a partir do MDE (Modelo Digital de Elevação) e de imagens de SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), distinguiu as seguintes classes para cultivo de cana-de-açúcar: áreas aptas para mecanização (com declividade menor que 12%) e áreas não aptas (com declividade maior que 12%).

De acordo com Ramalho Filho e Beek (1995) corrobora ao afirmar que a declividade a partir de 13% é altamente susceptível a erosão laminar, não sendo aptas para mecanização agrícola, sendo imprescindível a aplicação de práticas intensivas de controle.

Em consonância o Estado de São Paulo, através do decreto estadual n.º 47.700/2003, em São Paulo, regulamenta a Lei n.º 11.241/2002, que trata da eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. De acordo com esse decreto, foram estabelecidas duas classes de áreas com base na declividade do terreno, as áreas mecanizáveis: são as plantações em terrenos acima de 150 hectares, com declividade igual ou inferior a 12%. Essas áreas possuem solos com estruturas que permitem a adoção de técnicas usuais de mecanização na atividade de corte de cana. E as áreas não mecanizáveis: Referem-se às plantações em terrenos com declividade superior a 12%. Nessas áreas, a estrutura do solo inviabiliza a aplicação das técnicas usuais de mecanização no corte de cana (SÃO PAULO, 2003).

Conforme o Ministério da Agricultura (MAPA) (1981) capacidade produtiva do setor agrícola de um país depende principalmente da disponibilidade e qualidade do recurso natural terra. Conhecer as aptidões da terra é crucial para sua utilização racional na agricultura. Com esse objetivo, o Estado conduziu um estudo ao nível estadual e em mesorregiões, avaliando as aptidões específicas dos solos para diferentes usos, como lavouras, pastagens cultivadas e nativas, silvicultura, além de identificar terras sem aptidão agrícola. O estudo também considerou os níveis de fertilizantes e corretivos recomendados, a aplicação de técnicas conservacionistas e os níveis de mecanização possíveis.

Ainda de acordo com o MAPA (1981) o estado do Paraná possui 11.702.510 ha (82,3%) do total de suas terras propícias à utilização de lavouras com alto nível tecnológico. A respeito dos graus de limitação por impedimentos à mecanização, o Mapa (1981, p. 123) faz a seguinte classificação:

“Nulo (N) – terras que permitem, em qualquer época do ano, o emprego de todos os tipos de máquinas e implementos agrícolas ordinariamente utilizados final são geralmente de topografia plana e praticamente plana, com declividade inferior a 3%, não oferecendo impedimentos relevantes a mecanização. O rendimento do trator (número de horas de trabalho usadas efetivamente) é superior a 90%. Ligeiro (L) – Terras que permitem, durante quase todo ano, o emprego da maioria das máquinas agrícolas. São quase sempre de relevo suave ondulado, com

declive de 3 a 8%, profundas a moderadamente profundas, podendo ocorrer em áreas de relevo mais suaves, apresentando, no entanto, outras limitações, como textura muito arenoso ou muito argilosa, restrição de drenagem, pequena profundidade, pedregosidade, sulcos de erosão, etc. O rendimento do trator deve estar entre 75 a 90%.

Moderado (M) – Terras que não permitem o emprego de máquinas ordinariamente utilizadas durante todo o ano. Essas terras apresentam relevo ondulado com declividade de 8 a 20% ou topografia mais suave, no caso de ocorrência de outros impedimentos à mecanização (pedregosidade, rochosidade, profundidade exígua, textura muito arenoso ou muito argilosa do tipo 2:1, grandes sulcos de erosão, drenagem imperfeita, etc.). O rendimento do trator normalmente está entre 50 e 75%.

Forte (F) – Terras que permitem apenas, em quase sua totalidade, o uso de implementos de tração animal ou máquinas especiais. Caracterizam-se pelos declives acentuados (20 a 45%) em relevo forte ondulado. Sulcos e voçorocas podem constituir impedimento ao uso de máquinas bem como pedregosidade, rochosidade, pequena profundidade, má drenagem, etc. O rendimento do trator é inferior a 50%.

Muito Forte (MF) – Terras que não permitem o uso de maquinaria, sendo difícil até mesmo o uso de implementos de tração animal. Normalmente são de topografia montanhosa com declives superiores a 45% com impedimentos muito fortes devido à pedregosidade, rochosidade, profundidade ou problemas de drenagem. Convém enfatizar que uma determinada área do ponto de vista de mecanização, para ter importância agrícola deve possuir dimensões mínimas de utilização capazes de proporcionar um bom rendimento ao trator.”

Não só a declividade afeta a aptidão de mecanização, Chagas et al. (2013) concluíram que a declividade influencia a quantidade de radiação solar, que por consequência, influencia a cultura. Ramalho Filho e Beek (1995) adicionam que as condições de drenagem, textura, rochosidade, pedregosidade e profundidade efetiva do perfil do solo podem afetar diretamente a mecanização.

Wu et. al (2024) pesquisaram sobre instabilidade de cultivos em áreas íngremes e afirmam que o cultivo mesmo em declives acidentados possui valores históricos e culturais únicos, além de importância econômica e para a segurança alimentar, ainda assim, as áreas são suscetíveis com práticas agrícolas inadequadas. Os autores ainda reforçam que tecnologias de sensoriamento remoto, como LiDAR (*light detection and ranging*) e fotogrametria RPAs, são úteis para mapear esses processos e orientar pesquisas futuras para melhor gestão dessas paisagens.

3.5 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS E GEOPROCESSAMENTO

Eisenbeiss (2009) define as Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircrafts* - RPA) como uma aeronave não tripulada, motorizada, podendo ser

controlada remotamente, autônoma ou semiautônoma. O Termo RPA tem sido adotado como a terminologia mais comum em pesquisas acadêmicas, e é adotado como padrão da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), entretanto é comum encontrar outros termos como VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), termo traduzido do inglês UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), que costumava ser utilizado e previsto pelos órgãos reguladores brasileiros, porém agora é considerado obsoleto pela OACI em entendimento expresso no Doc 10019, *Manual On RPAS* (DECEA, 2023). Distingue-se, ainda, o termo “drone” que é considerado um termo informal advindo dos EUA, popularizado para diversos usos, profissionais e recreativos, e que não possui amparo científico, técnico ou legal (GALVÃO, 2024).

A Embraer Digital utiliza o termo "sensoriamento suborbital e remoto" para se referir ao uso de imagens capturadas por balões, aviões e, principalmente, drones (RPAs) (MASSHURÁ et al., 2020). Diferente das imagens orbitais, que são obtidas por satélites a centenas de quilômetros de altitude, as imagens suborbitais apresentam uma resolução espacial muito maior, muitas vezes chegando a centímetros ou milímetros. Isso as torna ideais para aplicações que exigem alta precisão, como mapeamento detalhado e monitoramento ambiental. Na literatura, o sensoriamento suborbital é frequentemente associado ao uso de drones, como mencionado por diversos autores (MENEGASSO et al., 2021; PINTO, ESQUERDO, COUTINHO, 2013; SPERANZA et al., 2023; HOTT, ANDRADE, MAGALHÃES JUNIOR, 2022; SANTOS et al., 2022).

É importante ressaltar que as RPAs se distinguem do termo Aeronave Não Tripulada, uma vez que este último se refere a qualquer aparelho que possa ser operado sem piloto a bordo e que se mantenha no ar, enquanto as RPA, necessariamente têm qualquer fim que o não-recreativo e são capazes de interagir com o Controle de Tráfego Aéreo e outras aeronaves em tempo real (DECEA, 2018). Mendes (2019) classifica os drones de acordo com sua arquitetura, no qual há tipos de drones, diferenciados pela forma que são sustentados no ar. Dessarte, os equipamentos podem ser dotados de rotor (helicóptero), multirrotores ou asa fixa. Cada arquitetura pode propiciar vantagens de acordo com a finalidade do projeto. Já Sarte (2017) destaca, além de asa fixa e rotativa, o tipo híbrido com a sustentação por asa fixa e rotativa simultânea.

A utilização de drones foi impulsionada a partir da década de 90, onde a tecnologia avançou na criação de materiais mais leves, baratos e eficientes para uma

diversidade de fins, com destaque para a aerofotogrametria tradicional alicerçada no desenvolvimento de tecnologias de sistemas, câmaras com maior definição e menor peso, e plataformas mais estáveis e com maior autonomia de voo (EISENBEISS, 2009). Munaretto (2017) ao analisar os trabalhos acadêmicos sobre drones no Brasil, afirma que há uma predominância no enfoque do agronegócio, visando avaliar os problemas e soluções das monoculturas e aumento da produtividade.

Moretto et al (2016) afirmam que diversos setores, como entrega de alimentos e medicamentos, produção audiovisual, segurança e agricultura, têm sido significativamente beneficiados pelo crescente uso de RPA. A agricultura, em particular, tem experimentado avanços consideráveis com a utilização de tais recursos, como na contagem de animais, identificação de formigueiros e monitoramento de áreas de cultivo, entre outras aplicações. Verdonk (2015) explica que a aplicação do RPA depende de seu tipo e de sua capacidade de carga, o RPA pode carregar uma diversidade de sensores eletro-ópticos de várias faixas de banda como: infravermelho próximo, visível e hiperespectral, também é possível a instalação de LiDAR ou dispositivos de amostragem atmosférica, ou dispositivos de detecção de radiação. Com isso seu uso pode ser empregado na agricultura de precisão, monitoramento de florestas, mapeamento arqueológico, pesquisas sobre vida selvagem, pesquisas de mineração, monitoramento de dutos, monitoramento de diques de precisão, monitoramento de poluição, reconstrução civil 3D, mensuração de radiação, mapeamento e suporte a desastres.

O aumento da relevância e empregabilidade de RPA ao longo dos anos é observado com um crescimento significativo do registro de patentes ligadas aos termos RPA, UAV, Drones, UAS (*Unmanned Aircraft System*) e VANT que por sua vez, estavam vinculados a termos como “*agriculture*”, “*geospatial*”, “*images*”. A maioria das patentes, quando verificadas, tratavam sobre aprimoramentos dos RPA, não possuindo correlação direta com agricultura de precisão, no entanto, os autores destacaram as patentes que buscam otimizar o processamento de imagens com pontos de amarração entre as imagens (MORETTO et al., 2016).

A utilização de RPA pode proporcionar vantagens como o acesso a regiões inóspitas, alta resolução de imagens, flexibilidade temporal, redução de custos, e ausência de nuvens. Por outro lado, suas desvantagens são a pequena distância operacional, baixa carga operacional que implica em sensores inferiores, necessidade de um piloto na estação de terreno, Sistemas de Navegação Interna (*Internal*

Navigation System – INS) menos precisos, oscilações de voos em função da baixa altura de voo e susceptibilidade a condições atmosféricas (VERDONK, 2015), vale ressaltar o significativo avanço dessas tecnologias nos últimos anos, e o incremento da precisão desses sensores, e o aumento da autonomia dos voos.

De acordo com Wolf e Dewitt (2000), a coleta de imagens aéreas pode ser realizada com diferentes ângulos em relação ao terreno. Em geral, a obtenção de imagens para fins cartográficos se dá na vertical, com o eixo focal orientado perpendicularmente ao horizonte. Em situações específicas, são obtidas imagens oblíquas, nas quais o eixo da imagem apresenta inclinação em relação ao horizonte.

O GNSS é um sistema de localização tridimensional que utiliza sinais de rádio emitidos por satélites para calcular a posição de um objeto na superfície terrestre. Engloba diversos sistemas, como GPS, GLONASS, GALILEO e COMPASS, e sua precisão depende do número de satélites rastreados.

Em geral, o método empregado pelo RPA é Posicionamento por Ponto Simples que permite obter uma precisão na ordem de metros (MONICO, 2008). Para que o método ganhe mais precisão, na ordem de centímetros, implantam-se Pontos de Controle no Terreno (*Ground Control Points – GCP*) (GALVÃO; ROSALEN, 2013). Estes pontos são previamente determinados, preferencialmente com posição geográfica conhecida, e são usados para o ajuste de possíveis distorções causadas pela locomoção dos drones ao captar as imagens (MENDES, 2019). Eisenbeiss (2009), em sua tese de doutorado sobre fotogrametria com UAVs, evidenciou a importância da utilização de pontos de controle em solo para aprimorar a acurácia do georreferenciamento e da geração de MDE.

A baixa altitude operacional dos RPAs possibilita a obtenção de imagens com alta resolução espacial. Contudo, a acurácia dos dados de orientação externa obtidos por estes veículos pode ser insuficiente para a geração de Modelos Digitais de Elevação com resolução e margem de erro adequadas para determinadas aplicações. A utilização de GCPs, medidos com DGPS (*Differential Global Positioning System*) e visíveis nas imagens, permite a redução significativa do erro do MDE e o aprimoramento da precisão do georreferenciamento (EISENBEISS, 2009).

Para Alves Junior (2019) pontos de apoio em aerofotogrametria são objetos ou detalhes do terreno identificáveis em imagens aéreas, cruciais para correlacionar as coordenadas da imagem com as do terreno. Podem ser classificados como pontos de controle (PC), utilizados no pós-processamento para aprimorar a precisão dos

produtos cartográficos, ou pontos de verificação (PV), que avaliam a qualidade e acurácia dos produtos gerados.

Esses pontos podem ser alvos naturais, como detalhes visíveis em áreas urbanas, ou artificiais, frequentemente empregados em áreas rurais homogêneas, onde a identificação de elementos naturais é dificultada. A escolha entre alvos naturais e artificiais depende das características do terreno e dos objetivos do projeto de mapeamento. Alves Junior (2019) complementa que na coleta de Pontos de Apoio para projetos com RPA, que exigem alta precisão (milímetros ou centímetros), receptores de navegação (GPS) convencionais não são recomendados devido à sua acurácia limitada (5 a 30 metros de erro). A utilização de receptores geodésicos ou receptores geodésicos com RTK é mais adequada para garantir a precisão necessária nesse tipo de projeto.

Para projetos que demandam alta precisão, como os realizados com RPA, o método RTK (*Real Time Kinematic*) é frequentemente utilizado. Esse método envolve o uso de um conjunto de receptores GNSS (base e rover), com a base transmitindo dados de correção em tempo real para o rover, que coleta as coordenadas dos pontos de interesse, e com isso, garante uma precisão milimétrica e prescinde o pós-processamento.

Harwin e Lucieer (2012) em um estudo onde mais de 300 imagens aéreas foram coletadas por RPA a altitudes de 30-50 metros, com sobreposições de 70-95%, em uma área de relevo suave. Os GCPs utilizados na transformação de Helmert, foram obtidos por meio de estação total e GPS RTK. Os resultados demonstraram que a quantidade de GCPs empregados na transformação de Helmert influenciou significativamente a precisão da nuvem de pontos 3D. Os erros residuais nos GCPs foram representados em ambiente SIG, utilizando o software Eonfusion, revelando erros horizontais maiores nas bordas da cena e erros verticais em áreas de relevo acentuado. Já em superfícies planas apresentaram erros muito pequenos. O estudo também destacou a importância de GCPs bem definidos e com centros facilmente identificáveis, recomendando sua distribuição uniforme a uma distância aproximada de um quinto da altitude de voo, com espaçamento menor em áreas íngremes.

Zanetti (2017) explora a distribuição espacial dos pontos de controle, especificando em 4 padrões: o aleatório, onde a coleta é livre e sem regras, e sistemáticos, que seguem critérios predefinidos, o disperso, com pontos mais afastados que o esperado aleatoriamente, e o agrupado, com pontos concentrados

em certas áreas. A autora conclui que a distribuição aleatória dos pontos de controle em toda a área de estudo, combinada com um número maior de pontos, comparada a distribuição agrupada, leva à melhor qualidade de ortorretificação. No estudo o uso de 15 pontos distribuídos aleatoriamente resultou na classificação "Classe A", a mais alta segundo os padrões do Decreto-lei 89.817/ET-CQDG. Por outro lado, a distribuição espacial agrupada em 15 pontos gerou resultados menos precisos, classificados como "Classe D".

A função K de Ripley é introduzida como um método estatístico para analisar esses padrões em diferentes escalas, comparando a distribuição observada com um padrão aleatório esperado, auxiliando na identificação de agrupamentos, dispersões ou aleatoriedades na distribuição dos pontos. A função K de Ripley é particularmente útil quando a distribuição espacial não é uniforme, permitindo uma análise mais completa. O cálculo envolve a média do número de pontos vizinhos em um raio definido ao redor de cada ponto da amostra. A comparação com um padrão aleatório esperado revela se os pontos estão agrupados (valor K maior que o esperado), dispersos (valor K menor) ou aleatoriamente distribuídos (valores próximos). Essa ferramenta estatística contribui para uma avaliação mais objetiva e rigorosa da distribuição espacial dos pontos de controle, auxiliando na escolha de métodos adequados para a avaliação da acurácia posicional e garantindo a qualidade dos produtos cartográficos gerados (ZANETTI, 2017).

Bernardi e Landim (2002) explicam que o posicionamento por ponto requer apenas um receptor, bastante utilizado em navegação de baixa precisão em tempo real, derivada da pseudodistância do código C/A presente na fase portadora L1. Para o processamento, é possível incluir, além da pseudodistância, a medida da fase da onda portadora, neste caso se adota a denominação posicionamento por ponto convencional. Ainda assim, tal posicionamento é preterido em levantamentos geodésicos, visto que, a precisão obtida ainda é baixa, por conta de erros advindos da qualidade da pseudodistância, da acurácia dos parâmetros transmitidos nas mensagens de navegação, da refração troposférica e ionosférica, e outros.

O conceito de DOP (*dilution of precision*) é utilizada em navegação e no planejamento de observações GPS para determinar a qualidade e a precisão dos resultados obtidos. Sempre que possível, busca-se um DOP reduzido, para isso é necessária uma boa configuração do posicionamento de satélites e um bom número de satélites rastreadores (BERNARDI; LANDIM, 2002).

O posicionamento por ponto preciso consegue mitigar os erros da refração ionosférica ao utilizar um modelo de correção para a ionosfera. O posicionamento de ponto de alta precisão adota dados de receptores de dupla frequência com pseudodistância e fase de onda nos dois portadores, isso garante 4 “observáveis” por satélite (BERNARDI; LANDIM, 2002).

Sobre o georreferenciamento Bernardi e Landim (2002) apontam que o posicionamento absoluto de pontos se baseia em efemérides transmitidas e o ponto é determinado em relação ao sistema de referência vinculado ao GPS. Sobre o posicionamento relativo, tem-se dois ou mais receptores ativos em conjunto com um grupo de ao menos 2 satélites comuns. Assim é determinada a posição de um ponto em relação a outro, onde um dos pontos (base) ajusta o outro, este pode ser em tempo real ou pós-processado. No primeiro caso, a posição é estimada no momento exato da coleta de dados, enquanto no segundo, a estimativa passa por um processamento posterior à coleta. A adoção de cada depende da finalidade de aplicação, para navegação é necessário que o posicionamento ocorra em tempo real, já no estabelecimento de uma rede geodésica os dados podem ser pós-processados e submetidos a um rigor maior.

A respeito do posicionamento relativo estático Bernardi e Landim (2002) afirmam que 2 ou mais receptores, utilizando uma dupla diferença de fase de batimento de onda portadora ou a dupla diferença da pseudodistância, por um período mínimo de 20 minutos até horas, propicia o método mais preciso e apropriado para levantamentos geodésicos e geodinâmicos. Para o posicionamento relativo estático rápido o tempo de duração de ocupação da estação não ultrapassa 20 minutos.

No posicionamento relativo semicinemático os receptores acompanham os mesmos satélites, num intervalo em torno de 30 minutos, onde a geometria entre os receptores e os satélites é alterada. Este posicionamento também é conhecido como *stop and go* ou pseudo-estático. O posicionamento relativo cinemático utiliza como observável a fase da onda portadora, os dados gerados aqui podem ser processados em tempo real ou pós-processados (BERNARDI; LANDIM, 2002).

O Posicionamento Cinemático em Tempo Real (RTK) é processado em tempo real com o suporte da transmissão via rádio da estação de referência para o receptor móvel, esta técnica utiliza a fase de onda portadora (BERNARDI; LANDIM, 2002). Posteriormente Osalen e Amazonas (2019) salientam que o RTK simplifica e barateia o aerolevanteamento com RPA, pois dispensa os pontos de controle no terreno, e em

seu lugar pode-se utilizar, além do sinal de rádio, a internet por protocolo NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). O NTRIP dispensa a base de rádio, porém, requer o sinal de internet disponibilizado pela RBMC-IP do IBGE.

Coelho e Brito (2007) esclarecem que as imagens obtidas por RPA não estão próprias para utilização e devem ser tratadas num processo de ortorretificação, isto, pois o sistema de projeção das câmeras fotográficas é radioconcêntrico, o que acarreta distorções na forma e tamanho dos objetos ao passo que se aumenta a distância do centro focal da imagem.

Câmeras de pequeno formato embarcadas em RPAs requerem calibração para mitigar os efeitos de distorção nas imagens. A distorção, ou erros sistemáticos inerentes à fotogrametria, surge devido à trajetória do feixe de luz até o sensor da câmera e sua relação com o ângulo de inclinação da câmera em relação ao solo. Para Ferreira (2014) os parâmetros de orientação interior, inerentes ao sistema óptico e sensor da câmera, compreendem a distância focal do conjunto de lentes, os parâmetros de distorção radial e descentrada, e a posição da coordenada no sistema de coordenadas da câmera. Já os parâmetros de orientação exterior estão relacionados com a trajetória e com a movimentação da aeronave no voo, ou seja, pela posição espacial da fotografia e pela orientação angular do centro de perspectiva relativa ao solo no momento da captura.

A maioria das lentes de câmera convencionais apresenta um efeito de distorção radial, conhecido como efeito de barril, que pode causar erros no posicionamento de pontos 3D. O efeito de borda, por sua vez, ocorre nas extremidades do mosaico de imagens e é resultado da insuficiência de dados nessas áreas (VERDONK, 2015). Marzloff e Poesen (2009) afirmam que áreas sombreadas que ocorrem pelo ângulo do sol em relação aos objetos, ou em função do ângulo e posição da câmera podem apresentar uma inclinação no MDE mais suave que a realidade, outro erro apontado, é a altura de queda de barrancos que tende a ser abrandecida por conta da falta de pontos 3D ao longo da beirada. A vegetação também pode ser uma fonte de erros, uma vez que o processo de correspondência de imagens não distingue plantas e superfície terrestre que como resultado gera uma malha 3D fragmentada, representando por vezes folhas, galhos e partes do solo.

No processamento de imagens, a identificação de GCPs pode ser realizada por meio de softwares com recursos de identificação manual ou assistida por computador. O avanço na precisão dos INS e o desenvolvimento de sensores mais leves podem

tornar a utilização de GCPs obsoleta em um futuro próximo. Para a validação da acurácia do MDE em relação a um sistema de coordenadas do mundo real, alguns GCPs podem ser utilizados como pontos de verificação real no solo, não sendo incluídos no cálculo inicial do modelo (VERDONK, 2015).

Estudos mais recentes buscam captar os dados espaciais a fim de gerar uma representação tridimensional da superfície terrestre. A técnica basicamente justapõe diversas imagens captadas no voo, com diferentes angulações e posições da câmera, processadas por softwares de processamento de dados onde são ligados os pontos de controle em comum e formam, assim, uma nuvem de pontos. A partir de então, as coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) são associadas à coloração do elemento imageado (em RGB) para criação de um modelo digital (MAGALHÃES, 2021).

A respeito da representação digital do relevo e da superfície terrestre distingue-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) que representa a superfície terrestre por meio de um modelo matemático do qual se derivam os dois próximos modelos, o Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT). No MDT o relevo é representado excluindo elementos artificiais e naturais como edificações e vegetação, enquanto no MDS são incluídos tais elementos.

Para geração destes modelos, Ramondino et al. (2011), reforça o emprego de drones como reforço para elaboração de imageamento mais complexo e estudos mais avançados sob um custo menor.

Verdonk (2015) concatena os passos para a extração de uma nuvem de pontos 3D gerada por diversos programas, que, em geral possuem o mesmo viés. O primeiro passo é a extração de pontos de correspondência em múltiplas imagens, principalmente em cantos e sombras, esse processo é chamado de SIFT que utiliza um algoritmo de correspondência que identifica regiões no lugar de pontos isolados. O segundo passo é a aplicação de um pacote de ajustes que calcula a orientação externa da câmera dentro do espaço da imagem e que, simultaneamente, descreve a estrutura 3D da cena. O passo seguinte é aumentar a densidade da nuvem de pontos onde se utiliza um filtro de correspondência e expansão para os pontos correspondentes da feição original. Por fim, é preciso alterar os dados da nuvem de pontos de um sistema de coordenadas de imagem interno para um sistema do mundo real, como o UTM. Este processo pode ser feito de maneira direta, utilizando os dados de navegação interna do RPA para transformação em UTM, ou de maneira indireta, utilizando GCPs adquiridos usando DGPS como um quadro de referência.

Souza Junior e Demattê (2008) verificaram correlação, por meio de MDE, entre o relevo e mapas de solos, de modo a inferir a tipificação do solo a partir da análise do MDE. Dessa forma, entende-se que o MDE pode ser uma ferramenta para facilitar o levantamento de solos, no entanto, ainda com o MDE não é possível dispensar as observações de campo.

Kaiser et al. (2014) afirmaram que por meio de análise científica e métodos tradicionais em erosões simuladas, é possível quantificar os processos erosivos lineares, ainda que de forma incipiente. Além disso, Poesen (2011) complementa que raramente fotos aéreas clássicas (oriundas de satélites) podem prover detalhamento suficiente para monitorar fenômeno da erosão de solo e voçorocas, por outro lado, sugere pesquisas a partir de fotos aéreas de baixa altitude. Segundo o autor, as técnicas com a adoção de LiDAR e sensores de indução eletromagnéticas permitiram um avanço na detecção e estudo de voçorocas, porém, é necessário o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias para entender melhor as possibilidades e limitações.

Verdonk (2015) revisa diferentes metodologias para mensuração da erosão em voçorocas, primeiro a partir de métodos não-topográficos, como a instalação de estações de monitoramento de sedimentos e descarga visando coletar o volume erodido em diferentes intervalos de tempo e, por fim, estimar a taxa de erosão. O autor também cita métodos topográficos com o uso de LiDAR e fotometria. Para o LiDAR tem-se a vantagem de poder detectar a superfície sob a vegetação, isso representa um grande problema para os métodos de fotometria, que por sua vez pode gerar modelos digitais com maior acurácia, facilidade e menor custo operacional.

Outra perspectiva, como mostra o trabalho de Verdonk (2015) é o uso integrado de VANTs e Geoprocessamento por meio de ArcGis, onde foi possível calcular erosões na Bacia Hidrográfica do rio Salagou na França. No Brasil, Julian e Nunes (2020) calcularam a ordem de grandeza de solo erodido em uma voçoroca durante seu processo de formação e evolução por meio de VANT e ferramentas de geoprocessamento.

Gomes, Gomes e Alves Junior (2023) realizaram o cálculo de volume de material erodido em processos de ravinamento a partir de imagens de RPA, e compararam diferentes rotinas de processamento e rigor, os autores concluíram que diferentes rotinas de processamento na geração da nuvem de pontos (*Dense Cloud*) influenciam na qualidade altimétrica dos resultados e no volume calculado, porém,

reforçaram que a adoção desta metodologia permite uma redução de tempo e custos que, do contrário, inviabilizariam o cálculo por meio das metodologias tradicionais, o que constitui os RPA, uma ferramenta imprescindível ao planejamento urbano, rural e ambiental em atividade que utilizam altimetria e volumetria.

3.6 TERRA E TRIBUTAÇÃO

A tributação de propriedades rurais no Brasil se baseia em alguns princípios fundamentais de teor jurídico tributário e econômico que buscam garantir a justiça fiscal e o cumprimento da função social da terra. Os princípios econômicos são os da equidade, da neutralidade, da progressividade e da simplicidade, já os de ordem tributária são da redução das desigualdades sociais, ligado a função social da terra, da indisponibilidade do interesse público, da isonomia, da vedação de confisco e da uniformidade geográfica (LIMA; BACHA, 2022).

A função social da terra é um instrumento fundamental para a promoção da justiça social no campo, pois busca garantir que a terra seja utilizada para beneficiar a coletividade, e não apenas um pequeno grupo de proprietários. A aplicação desse princípio é essencial para a redução da desigualdade social, o combate à fome e a promoção do desenvolvimento sustentável no meio rural (BRASIL, 1964).

A propriedade da terra deve ser utilizada para promover o bem-estar coletivo, e não apenas o interesse individual do proprietário. O não cumprimento da função social da terra pode levar à desapropriação do imóvel pelo Estado, para fins de reforma agrária. O artigo 186 da Constituição Federal estabelece os requisitos para que a propriedade rural cumpra sua função social, assim a propriedade deve primar pelo aproveitamento racional e adequado, sendo utilizada de forma eficiente e produtiva, levando em consideração as características do solo, o clima e a vocação da região. A exploração da terra deve ser feita de forma sustentável, garantindo a conservação dos recursos naturais e a proteção do meio ambiente, e o proprietário deve respeitar os direitos trabalhistas e bem-estar dos empregados rurais, garantindo condições dignas de trabalho, remuneração justa e qualidade de vida (BRASIL, 1988).

A Lei n.º 9.393/96 dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Rural (ITR) se aplica dentro da lógica de justiça fiscal e social e apresenta dispositivos para inibir a concentração de terras, promover o uso sustentável e otimizado da área e tributar a

propriedade de acordo com o nível de manejo.

Em suas especificidades, o ITR prevê apuração anual cujo fato gerador é a propriedade, o domínio útil ou a posse do imóvel rural. O princípio da territorialidade do ITR é tratado no artigo 4º, parágrafo único, que define o domicílio tributário do contribuinte do ITR como sendo o município de localização do imóvel rural, sendo vedada a eleição de qualquer outro domicílio (BRASIL, 1996). A lei discorre que a União estabelece as regras gerais, como alíquotas, base de cálculo e formas de pagamento, porém, o recolhimento do município é feito pela municipalidade que pode legislar sobre regras complementares, tais como isenções, descontos e prazos de pagamento. De acordo com o artigo 14º a fiscalização é de competência da Secretaria da Receita Federal que poderá firmar parcerias com outros órgãos como INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária), IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), Secretarias Estaduais de Agricultura, Confederação Nacional da Agricultura (CNA) e a Confederação Nacional dos Trabalhadores na Agricultura (CONTAG) (BRASIL, 1996).

Lima e Bacha (2022) afirmam que o ITR tem sua arrecadação e fiscalização de competência da Secretaria da Receita Federal (SRF), com fiscalização paralela do Incra). A receita proveniente do ITR é dividida em partes iguais entre o estado e o município de localização do imóvel, embora seja um tributo federal. No entanto, a legislação vigente, a partir de 2008, permite que o município receba a totalidade da arrecadação do ITR, desde que estabeleça um convênio com a Secretaria da Receita Federal, comprometendo-se a fornecer informações sobre o Valor da Terra Nua por hectare (VTN/ha) e colaborar na fiscalização da cobrança do imposto.

O contribuinte ou o seu sucessor deve comunicar anualmente ao órgão local da SRF, a Declaração do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (DITR) que contém dois documentos: o Documento de Informação e Atualização Cadastral do ITR - DIAC que contém as informações cadastrais correspondentes a cada imóvel, bem como qualquer alteração ocorrida e o Documento de Informação e Apuração do ITR – DIAT, onde está contido o Valor da Terra Nua (VTN) que refletirá, por autoavaliação do proprietário, o preço de mercado de terras (BRASIL, 1996). O cadastro da propriedade rural é fundamental para a tributação do ITR, é através dele que a Receita Federal identifica os imóveis rurais e seus proprietários, obtendo as informações necessárias para calcular o imposto devido.

O imposto deve atribuir um Grau de Utilização (GU) que é calculada a relação

percentual da área efetivamente utilizada e a área aproveitável. A área aproveitável é aquela passível de exploração agrícola, pecuária, granjeira, aquícola ou florestal, exceto áreas ocupadas por benfeitorias úteis e necessárias, e áreas de preservação permanente, reserva legal, interesse ecológico, imprestáveis para exploração, sob servidão ambiental, cobertas por florestas nativas ou alagadas para usinas hidrelétricas. Enquanto a área efetivamente utilizada é a porção do imóvel que foi, no ano anterior, utilizada como plantio de produtos vegetais, pastagem, nativa ou plantada, exploração extrativa, atividades grangeiras e aquícolas ou de implantação de projeto técnico (BRASIL, 1996). Por fim, tem-se que o cálculo do ITR representado na Equação 1.

Equação 1

$$\text{ITR} = \text{VTN/ha} \times \text{Área Sujeita a Tributação} \times \text{Alíquota}$$

Fonte: Brasil (1996)

Tabela 2 - Alíquotas do ITR conforme grau de utilização e tamanho do imóvel rural.

Área Total do Imóvel (ha)	Grau de Utilização (%) e alíquotas				
	Maior que 80	65 até 80	50 até 65	30 até 50	Até 30
Até 50	0,03	0,2	0,4	0,7	1
Maior que 50 até 200	0,07	0,4	0,8	1,4	2
Maior que 200 até 500	0,1	0,6	1,3	2,3	3,3
Maior que 500 até 1.000	0,15	0,85	1,9	3,3	4,7
Maior que 1.000 até 5.000	0,3	1,6	3,4	6	8,6
Acima de 5.000	0,45	3	6,4	12	20

Fonte: Adaptado de Brasil (1996).

A lógica da aplicação das alíquotas (Tabela 2) do ITR é baseada em dois fatores principais: a área total do imóvel e o grau de utilização. A alíquota aumenta proporcionalmente ao tamanho da propriedade e inversamente ao seu grau de utilização. Para ilustrar, um imóvel de até 50 hectares com alta utilização (acima de

80%) terá uma alíquota mínima de 0,03%. Em contrapartida, um imóvel com mais de 5.000 hectares e baixa utilização (até 30%) estará sujeito à alíquota máxima de 20%.

O Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural assume um caráter predominantemente declaratório, sendo apurado e declarado pelo proprietário, com pagamento efetuado sem necessidade de notificação pela Receita Federal. O VTN, declarado pelo proprietário, será considerado como autoavaliação da propriedade a preço de mercado, após homologação pela Receita Federal. Esse mecanismo faz do imposto um instrumento para desestimular a manutenção de terras improdutivas, pois o proprietário é obrigado a declarar o valor da terra e o imposto será calculado com base na sua produtividade (CAMARGOS, 1998). Conforme destaca o autor, o artigo 153, §4º, da Constituição Federal, determina que as alíquotas do ITR sejam fixadas para desestimular a manutenção de propriedades improdutivas. Essa progressividade das alíquotas, em conjunto com a obrigatoriedade de declaração do valor da terra, incentiva o uso produtivo da terra, cumprindo a função social da propriedade. Em consonância, Ramos (2023) afirma que o objetivo do imposto é promover a função social da propriedade e combater a concentração improdutiva de terras.

Silva (2021) destaca o princípio da progressividade do ITR que está alicerçada ao caráter extrafiscal. Essa progressividade se manifesta via alíquotas que aumentam conforme a propriedade não cumpre sua função social, como o uso racional dos recursos naturais e a observância das leis trabalhistas. A intenção é que a progressividade do ITR sirva como instrumento de política agrária, incentivando o uso produtivo da terra e combatendo o desmatamento. No entanto, o autor também aponta a ineficiência do imposto nesse sentido, principalmente devido ao seu baixo custo para os proprietários rurais, mesmo com a progressividade das alíquotas.

Payão e Ribeiro (2016) explanam sobre o princípio da extrafiscalidade do ITR e afirmam que o caráter extrafiscal do imposto extrapola o repasse de recursos do contribuinte ao Estado, pois interfere em ordem econômica e social, balizando comportamentos dos entes privados. Para as autoras o ITR visa desestimular latifúndios improdutivos e apresenta mecanismos que favorecem a preservação do meio ambiente, isso através do artigo 104 da Lei n.º 8.171/91 que prevê isenção fiscal a áreas de APP, reserva legal (RL) e de interesse ecológico para a proteção de ecossistemas.

De acordo com a Lei n.º 9.393, no caso de subavaliação ou prestação de informações inexatas, incorretas ou fraudulentas, a Secretaria da Receita Federal deve considerar as informações sobre preços de terras “constantes em sistemas por ela instituído” (BRASIL, 1996). A mesma lei, inciso 1º atribui à Lei n.º 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, que os levantamentos sobre os preços de terra considerados são realizados pelas Secretarias de Agricultura das Unidades Federadas ou dos Municípios, e no Paraná, pelo DERAL na Divisão de Estatísticas Básicas (DEB) (DERAL, 2017).

Para determinação do preço o art. 12, da Lei n.º 8.629 estabelece que deve ser observado o valor de mercado do imóvel em sua totalidade, considerando as terras e acessões naturais, matas e florestas e as benfeitorias indenizáveis, e observando os aspectos: localização do imóvel, aptidão agrícola, dimensão do imóvel, área ocupada e anciandade de posses e funcionalidade, tempo de uso e estado de conservação das benfeitorias (BRASIL, 1993).

Quanto a fiscalização e cobrança executada pelos municípios a Instrução Normativa RFB n.º 1877, de 14 de março de 2019 (IN 1877/2019) estabelece as regras e procedimentos para que os municípios forneçam à RFB informações sobre o VTN das áreas rurais em seus territórios. Essas informações são utilizadas pela Receita Federal para arbitrar o valor da terra nua nos casos em que o contribuinte não declarar o VTN na Declaração do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (DITR) ou quando a declaração for considerada inconsistente. A IN 1877/2019 define o Valor da Terra Nua como o preço de mercado do imóvel rural, excluindo benfeitorias, culturas e florestas plantadas, por outro lado, considera-se a localização do imóvel, a aptidão agrícola e a dimensão do imóvel (BRASIL, 2019).

Segundo a IN 1877/2019 a aptidão agrícola deve ser enquadrada sob as seguintes condições (BRASIL, 2019):

I - lavoura - aptidão boa: terra apta à cultura temporária ou permanente, sem limitações significativas para a produção sustentável e com um nível mínimo de restrições, que não reduzem a produtividade ou os benefícios expressivamente e não aumentam os insumos acima de um nível aceitável;

II - lavoura - aptidão regular: terra apta à cultura temporária ou permanente, que apresenta limitações moderadas para a produção sustentável, que reduzem a produtividade ou os benefícios e elevam a necessidade de insumos para garantir as vantagens globais a serem obtidas com o uso;

III - lavoura - aptidão restrita: terra apta à cultura temporária ou permanente, que apresenta limitações fortes para a

produção sustentável, que reduzem a produtividade ou os benefícios ou aumentam os insumos necessários, de tal maneira que os custos só seriam justificados marginalmente;

IV - pastagem plantada: terra inapta à exploração de lavouras temporárias ou permanentes por possuir limitações fortes à produção vegetal sustentável, mas que é apta a formas menos intensivas de uso, inclusive sob a forma de uso de pastagens plantadas;

V - silvicultura ou pastagem natural: terra inapta aos usos indicados nos incisos I a IV, mas que é apta a usos menos intensivos; ou

VI - preservação da fauna ou flora: terra inapta para os usos indicados nos incisos I a V, em decorrência de restrições ambientais, físicas, sociais ou jurídicas que impossibilitam o uso sustentável, e que, por isso, é indicada para a preservação da flora e da fauna ou para outros usos não agrários.

A partir de 2008, por meio da Instrução Normativa n.º 884, de 5 de novembro de 2008, é possibilitada a instituição de um convênio entre a Secretaria da Receita Federal do Brasil, em nome da União, o Distrito Federal e os Municípios para delegação das atribuições de fiscalização para cobrança do ITR (BRASIL, 2008).

Heck, Nishimura e Araújo (2021) ao analisarem o impacto da municipalização da fiscalização do ITR sobre a arrecadação dos municípios brasileiros indicam um aumento de 8,8% da arrecadação, e que, portanto, comprovam a importância da fiscalização ao nível municipal para aumento da receita e diminuição da sonegação. No entanto, os autores também afirmam que a capacidade técnica dos municípios é um entrave para fiscalização.

O Deral (2017), que elabora a Pesquisa de Preços de Terras Agrícolas, informa que os valores são gerados com base em informações do setor agropecuário (público e privado) de forma randômica, sendo deduzidos os valores referentes a benfeitorias reprodutivas e não reprodutivas. Para geração do valor final são consideradas primeiramente as informações levantadas em cada município e depois equiparadas às informações contidas nas Zonas Ecológico-econômicas (ZEE) e Regiões Intermediárias (IBGE, 2017) para corrigir possíveis erros amostrais.

É importante ressaltar que os dados finais da Pesquisa de Preços de Terras Agrícolas devem ser utilizados apenas como uma referência de preço, pois são o resultado de uma média de preços de mercado, incluindo negócios realizados e/ou intenções de compra. Portanto, eles não devem ser considerados como valores absolutos, máximos ou mínimos, devido à natureza dinâmica do mercado. É essencial levar em consideração as diferenças entre as propriedades, como localização, topografia, tipo de solo, fertilidade e uso, entre outras variáveis, ao interpretar esses

dados.

De acordo com o Deral (2017) as classes identificadas na pesquisa podem não corresponder diretamente às classes disponíveis para a declaração do ITR. No entanto, fazem-se adaptações considerando os usos mais comuns para cada classe no Paraná. É fundamental ter em mente que os preços representam médias de valores que podem variar significativamente. A Tabela 3 ilustra as referências pelas quais o Deral se baseia em sua classificação comparando o Sistema de Capacidade e Uso do Solo elaborado pela SBCS e Sistema de Preços de Terras (SIPT) instituído pela Portaria da SRF nº 447/2002.

Tabela 3 - Tabela de aproximações de classes entre o Sistema de Capacidade e Uso do Solo e o Sistema de Preços de Terras

Sistema de Capacidade e Uso do solo	SIPT
Classe I	I - lavoura - aptidão boa *
Classe II	I - lavoura - aptidão boa
Classe III	II - lavoura - aptidão regular *
Classe IV	III - lavoura - aptidão restrita *
Classe V	IV - pastagem plantada *
Classe VI	IV - pastagem plantada
Classe VII	V - silvicultura ou pastagem natural *
Classe VIII	VI - preservação da fauna ou flora *

Fonte: Deral (2017), em destaque *, as classes empregadas pela Receita Federal para valores de VTN.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Equipamentos:

- Receptor GNSS Ashtech ProMark 500 L1/L2 – base e rover e acessórios;
- Gabarito para alvos fotovisíveis
- RPA Mavic Air 2S;
- Smartphone Iphone14;
- Notebook Samsung Galaxy Book3 Ultra, Core I7, 32GB de Ram e SSD 1 TB.

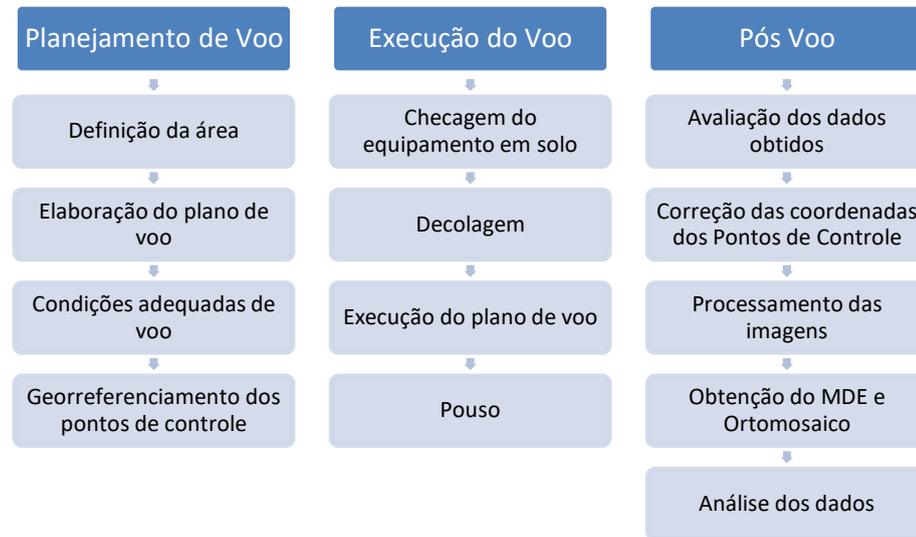
Softwares:

- GNSS Solutions (Licença profissional);
- RINEX Converter 4.7.2;
- DroneDeploy (Gratuito);
- Qgis 3.28.12 Firenze;
- Agisoft Metashape (Licença profissional).

4.2 METODOLOGIA

A partir da escolha do local, foi realizado levantamento georreferenciado da área concomitantemente com o levantamento da área utilizando RPA, as imagens foram inseridas em arquivo de Agisoft e passaram por processamento, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das Etapas



Fonte: O autor (2024).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

O Município de Apucarana está situado no Estado do Paraná, a 863 metros de altitude, a 23° 33' 5" de latitude sul, 51° 27' 41" de longitude oeste, onde possui 556,990 km² de área territorial (IBGE, 2022). É um município que está localizado na Mesorregião Norte Central Paranaense, com população de aproximadamente 130.134 habitantes, segundo o Censo de 2022 (IBGE, 2022).

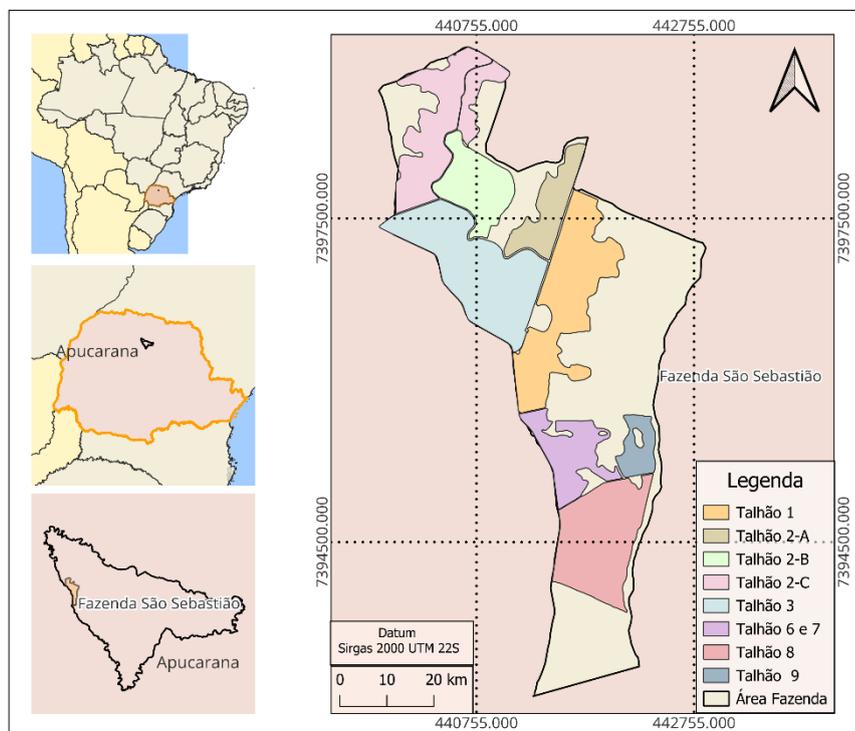
Em Apucarana o clima é classificado predominantemente como Cfb (úmido em todas as estações com verão moderadamente quente) e em algumas faixas Cfa (Úmido em todas as estações com verão quente) de acordo com a classificação de Köppen. Os índices pluviométricos variam de 1.200 mm à 1.700 mm, sendo o período mais chuvoso concentrado nos meses de janeiro e fevereiro e a estação mais seca de junho a setembro (IDR, 2024).

Manosso (2005) descreve o relevo sendo caracterizado por colinas de porte médio, com formas suavemente arredondadas e declividades que variam de suaves a moderadas, especialmente ao longo do interflúvio principal. Nas áreas onde os vales se ampliam, sobretudo nas proximidades das fozes dos córregos e ribeirões que seccionam o interflúvio principal, o relevo torna-se mais rebaixado, com altitudes entre 500 e 650 metros. A distribuição dos solos acompanha essa compartimentação geomorfológica: os Latossolos Vermelhos, tanto distróficos quanto eutróficos, ocorrem

sobre o interflúvio principal; os Nitossolos Vermelhos, com variação entre eutróféricos e distroféricos, estão presentes nas cabeceiras das pequenas bacias hidrográficas e nas vertentes médias e inferiores, em áreas de declividades suaves a moderadas, especialmente onde estas vertentes se alongam; já os Neossolos Neolíticos eutróficos, frequentemente associados aos Chernossolos Argilúvicos ou Rêndzicos Líticos, distribuem-se nas partes superiores das bacias de drenagem, caracterizadas por vertentes curtas e declividades mais acentuadas.

Para o desenvolvimento da pesquisa foi escolhido talhão 1 da Fazenda São Sebastião (Figura 2), localizada no município de Apucarana-PR que apresenta área produtiva de 426,17 hectares, subdivididos em 8 Talhões de manejo. Após análise físico-química constatou-se que se trata de um solo argiloso com 69,44% de argila, 16,46% de silte e 14,10% de areia, matéria orgânica de 2,73% e V% de 77,61%. Os talhões apresentam indícios de perda de material erodido, que acarreta poluição, com alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas da água, além do assoreamento por aporte de sedimentos, efeito comum na região.

Figura 2 - Localização dos talhões da fazenda São Sebastião em Apucarana



Fonte: O autor (2024).

A pesquisa focou e se restringiu na análise e processamento do talhão 1 que possui cerca de 84 hectares. A escolha desse talhão ocorreu, pois, apesar do produtor

rural sempre praticar o plantio de culturas anuais de grãos nesta área, o talhão possui um declive mais acidentado, com maior incidência de processos erosivos graves de difícil controle ao longo dos anos. A área passou por estudos e pela implantação de terraços de base larga, média e estreita a fim de controlar a erosão e permitir a mecanização. Além disso, para análise da metodologia do estudo, se trata de uma área grande, de onde é possível, por meio das imagens aéreas, analisar o relevo e suas implicações agronômicas e tributárias.

4.4 GEORREFERENCIAMENTO DA POLIGONAL DE BASE E DOS PONTOS DE CONTROLE

Foi realizado georreferenciamento de 9 pontos de controle fotovisíveis, demonstrado na figura 3, pelo método de levantamento por posicionamento relativo estático rápido, com 7 minutos de ocupação nos pontos do equipamento com o receptor GNSS Ashtech ProMark 500, possibilitando assim linhas de base com excelente qualidade. A base foi ocupada por 2 horas e 20 minutos, os dados de campo foram submetidos ao software RINEX Converter 4.7.2 e em seguida enviados à homepage do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE para o sistema online de processamento por Posicionamento por Ponto Preciso, conforme Tabela 4.

Figura 3 - Base estacionária e ponto de controle fotovisível alocados no talhão 1 da fazenda São Sebastião



Fonte: O autor (2024).

Tabela 4 - Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE

Sumário do Processamento do marco: 0000	
Início	2024/02/24 16:49:15
Fim	2024/02/24 19:09:40
Modo de Operação do Usuário	ESTÁTICO
Observação processada	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena	NÃO DISPONÍVEL

Fonte: Adaptado de IBGE (2024)

Pelo tempo de ocupação do ponto, o relatório do IBGE aponta uma precisão de georreferenciamento na ordem de 1,7 e 1,8 centímetros de precisão planimétrica e altimétrica respectivamente, conforme a Tabela 5, considerando que o receptor

utilizado apresenta dupla frequência.

Tabela 5 - Relatório do IBGE sobre a precisão esperada para um levantamento estático em metros.

TIPO DE RECEPTOR TEMPO DE OBSERVAÇÃO	UMA FREQUÊNCIA		DUAS FREQUÊNCIAS	
	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)	Planimétrico (m)	Altimétrico (m)
APÓS 1 HORA	0,700	0,600	0,040	0,040
APÓS 2 HORAS	0,330	0,330	0,017	0,018
APÓS 4 HORAS	0,170	0,220	0,090	0,010
APÓS 6 HORAS	0,120	0,180	0,050	0,008

Fonte: Adaptado de IBGE (2024)

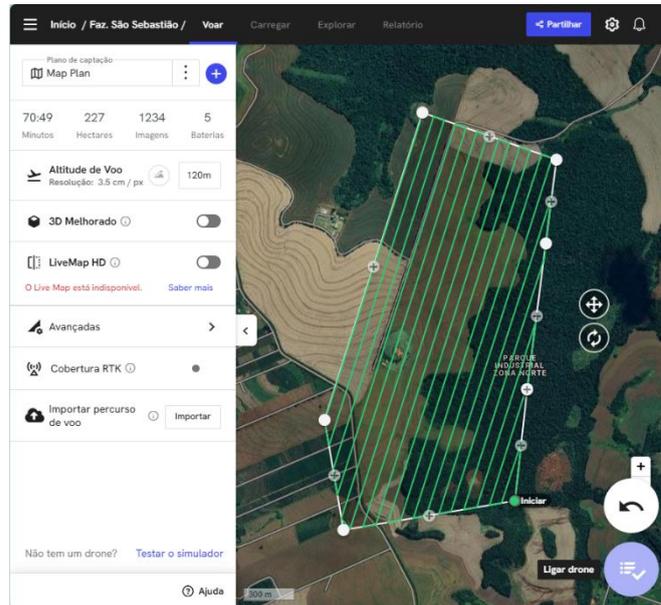
Após a coleta de dados em campo, os dados corrigidos do receptor base e os dados brutos do receptor rover foram processados no software GNSS Solutions. Esse processamento permitiu o cruzamento das informações e a correção das coordenadas dos pontos de controle fotovisíveis, garantindo a alta precisão necessária para o projeto.

4.5 LEVANTAMENTO COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

O RPA escolhido foi um Mavic Air 2S, considerado equipamento de entrada, possui sensor CMOS com 20 megapixels e de sistema de posicionamento por satélites GPS e GLONASS. O Drone também possui um sistema de estabilização da câmera (Gimbal), que auxilia na qualidade das imagens obtidos da plataforma durante o voo. O aparelho já está devidamente homologado pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) e cadastrado na Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC.

Foram capturadas 1.234 fotos aéreas a partir da missão de voo elaborada pelo site DroneDeploy (Figura 4). Ao total, foram sobrevoados cerca de 227 hectares, com o voo realizado a uma altura de 120m, as fotos foram tiradas com sobreposição de 75% no sentido dianteiro e 65% no sentido lateral, é necessário que o voo além de cobrir a totalidade da área analisada se sobreponha às suas adjacências a fim de gerar produtos digitais que garantam maior precisão e acurácia. O tempo de voo foi de 70 minutos utilizando 5 baterias.

Figura 4 - Plano de Voo para o talhão 1 da Fazenda São Sebastião Gerado pelo Drone Deploy



Fonte: O autor (2024).

4.6 PROCESSAMENTO DAS FOTOS DO AEROLEVANTAMENTO

Para o processamento foi utilizado o software Agisoft Metashape com o objetivo de realizar as seguintes etapas em sequência: alinhamento de fotos, georreferenciamento dos pontos de controle, nuvem de pontos esparsa, geração da malha, modelo 3D, Modelo Digital de Elevação (MDE) e, por fim, o ortomosaico.

O próximo passo foi o geoprocessamento no software Qgis para cálculo do declive, classificação do relevo e elaboração de mapas ilustrativos. As etapas foram sintetizadas na Tabela 4:

Tabela 6 – Etapas do Geoprocessamento utilizando os softwares Agisoft Matashape e Qgis

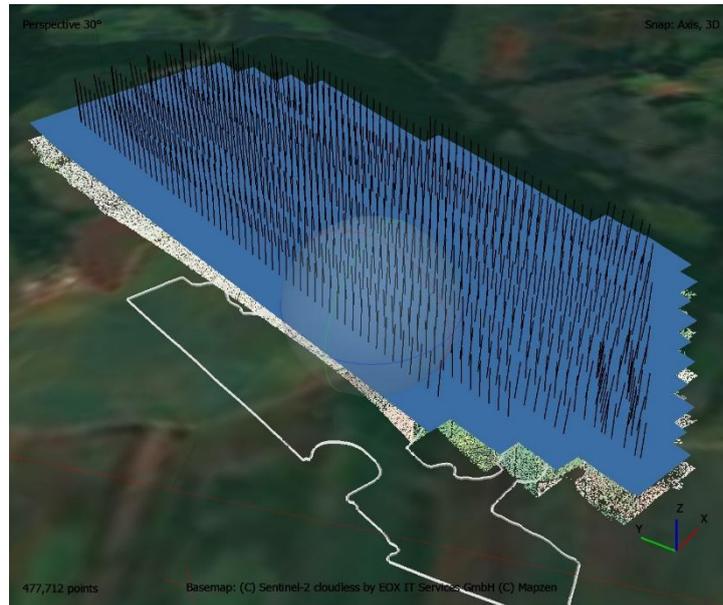
Etapa	Software	Processo	Rigor	Descrição	Produto
1	Agisoft Metashape	Alinhamento de fotos	"Highest" - indicado para trazer mais fidedignidade ao processamento	Correlação entre imagens por meio de pontos de amarração que associam a coloração dos pixels com as coordenadas.	Base para o modelo 3D
2	Agisoft Metashape	Georreferenciamento	-	Associação de coordenadas geográficas	Base 3D georreferenciado

				aos pontos de controle	
3	Agisoft Metashape	Nuvem de Pontos	"Medium" - indicado para zonas extensas e rurais.	Criação de uma representação inicial do terreno através dos pontos georreferenciados	Visualização preliminar do terreno
4	Agisoft Metashape	Geração da Malha	"Low" – buscou-se reduzir a quantidade de triangulações e, com isso, proporcionar linhas altimétricas mais suavizadas	Refinamento da nuvem e triangulação de pontos em uma superfície 3D	Modelo 3D detalhado do terreno
5	Agisoft Metashape	Suavização da Malha	-	Visualização tridimensional do terreno suavizada.	Modelo 3D texturizado
6	Agisoft Metashape	Modelo Digital de Elevação (MDE)	Realizado a partir da malha, o que é indicado para curvas de nível e áreas rurais	Representação da elevação do terreno	Raster com valores de altitude
7	Agisoft Metashape	Ortomosaico	-	Imagem aérea corrigida geometricamente	Mosaico de imagens aéreas ortorretificadas
8	QGIS	Cálculo do declive	-	Determinação da inclinação do terreno	Raster com valores de declividade
9	QGIS	Classificação do relevo	-	Categorização do terreno em classes de declividade	Mapa de classes de relevo
10	QGIS	Elaboração de mapas ilustrativos	-	Criação de mapas temáticos	Mapas de declividade, relevo sombreado, hipsométrico, etc.

Fonte: O autor (2024).

Com a inserção das fotos no software foi feito o alinhamento (Figura 5) com rigor máximo (*"highest"*) onde o Metashape encontrou a posição e a orientação da câmera para cada foto obtida e criou um modelo de nuvem de pontos esparsa (*sparse cloud*) com rigor médio a fim de obter a maior acurácia possível. Também foi inserido o polígono referente ao talhão 1, a fim de melhor identificar a área.

Figura 5 - Alinhamento das fotos do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape



Fonte: O autor (2024).

Com as imagens alinhadas foi realizado o georreferenciamento dos pontos de controle. O primeiro passo foi converter o projeto para o sistema de coordenadas de interesse. Para a metodologia foi utilizado o Sistema de Referência Geocêntrico das Américas - SIRGAS 2000 – UTM 22S oficializado como referencial para o Sistema Geodésico Brasileiro. Posteriormente adicionado os pontos de controle através da ferramenta *'references'* e *'import references'*. Por meio da análise visual do alvo georreferenciado nas fotos as coordenadas foram retificadas.

Em seguida foi adotada a ferramenta *'Build Point Cloud'* para geração da nuvem de pontos (Figura 6), esta serve de base para gerar modelos 3D de alta qualidade e para análises mais detalhadas, como medições de áreas, volumes e outras análises topográficas. O rigor adotado foi o *'Medium'* recomendado para geração de produtos extensos como áreas rurais e que não precisam do mesmo rigor comparado ao nível urbano, porém garantem precisão e acurácia.

Figura 6 - Nuvem de Pontos do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape



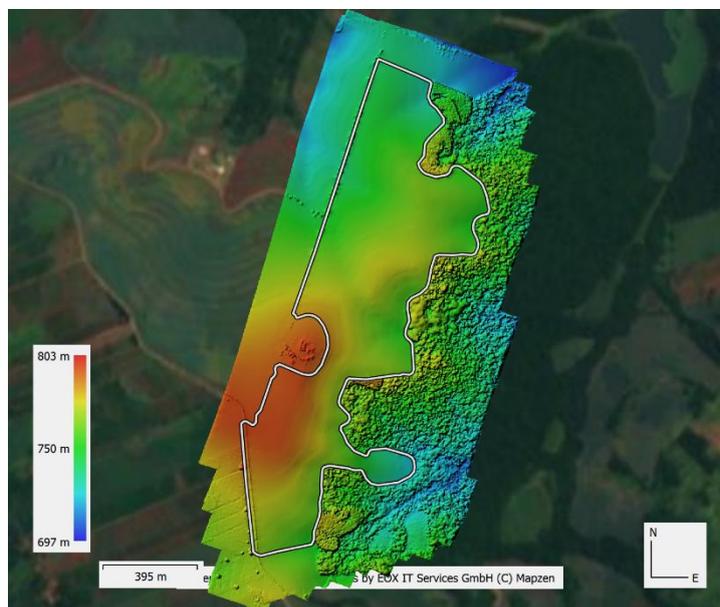
Fonte: O autor (2024).

Com base nas informações da nuvem densa de pontos, a próxima etapa foi a geração da malha (*Mesh*) e o modelo 3D. A contagem de faces (*Face count*) que define o número de polígonos da malha foi gerado na opção '*Low*', para reduzir a quantidade de triangulações a fim de suavizar as curvas de nível, essa etapa foi seguida da ferramenta '*Smooth Mesh*' que possui o mesmo propósito.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os produtos gerados na ordem são o MDE e o Ortomosaico, apresentados a seguir. O MDE representa um modelo de superfície como uma grade regular de valores de altimetria e sua geração pode ser elaborada a partir de uma nuvem de pontos densa, uma nuvem de pontos esparsos ou uma malha, aqui foi optado pela malha visando um traçado das isolinhas altimétricas mais suavizado de acordo com as curvas de nível, cujo resultado foi um píxel de 19,6cm (Figura 7).

Figura 7 - MDE do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft

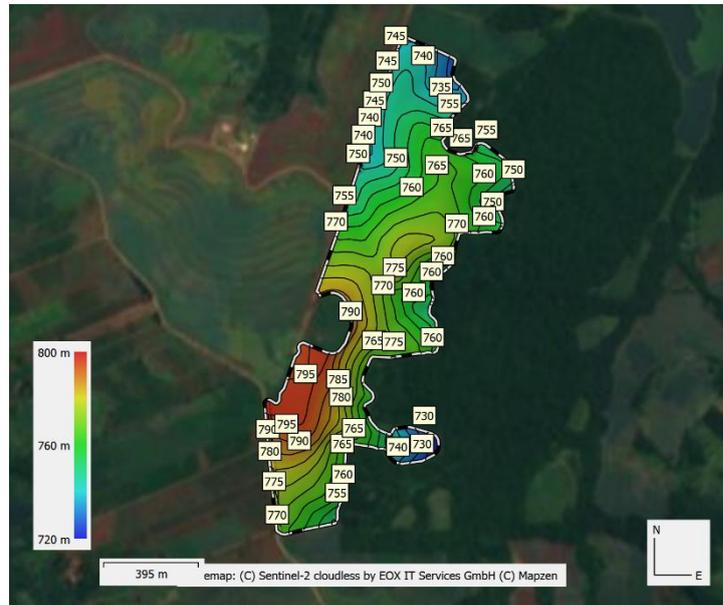


Metashape

Fonte: O autor (2024).

Sobre o MDE foram geradas as curvas de nível de 5 em 5 metros com a ferramenta '*Generate Countours*' e recortada a região de interesse do talhão 1 (Figura 8).

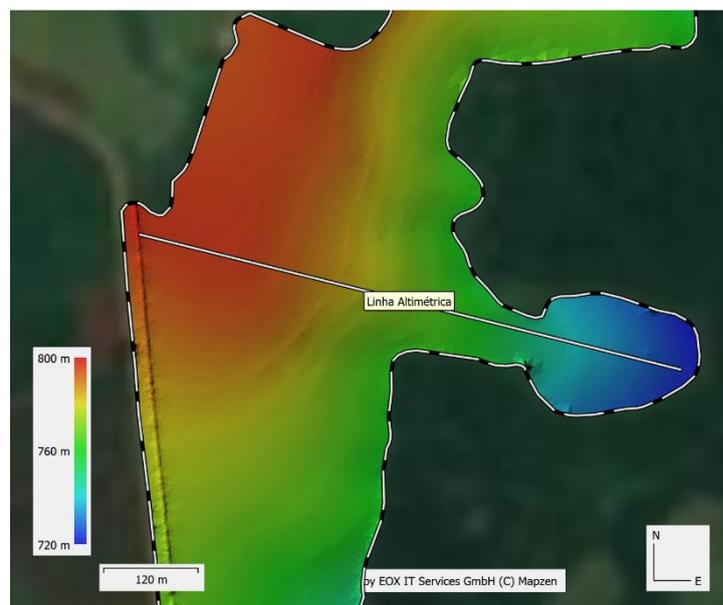
Figura 8 - MDE com curvas de nível a cada 5 metros do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape



Fonte: O autor (2024).

Uma linha altimétrica foi inserida sobre o talhão 1, região com maior variação altimétrica a fim de representar o relevo (Figura 9).

Figura 9 - Linha altimétrica do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape

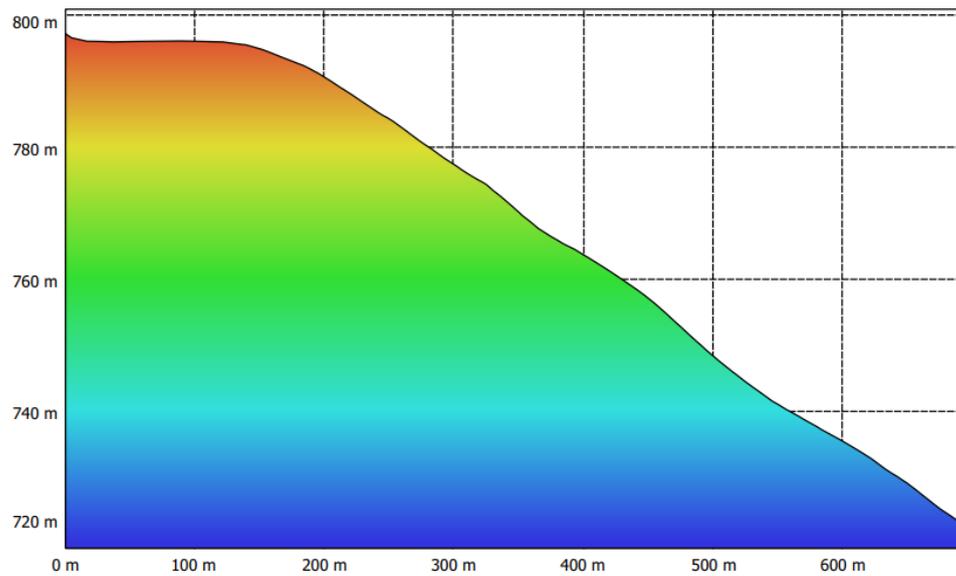


Fonte: O autor (2024).

A representação gráfica da Linha Altimétrica (Figura 10) evidencia o declive

acentuado do terreno. O perfil topográfico demonstra que ao longo dos 697 metros da linha fictícia, a altitude decresce de 797,2 metros no primeiro ponto para 723,2 metros no segundo, configurando um desnível de 74 metros. Por fim, foi gerado o Ortomosaico para fins de visualização da topografia do relevo (Figura 11), cujo pixel foi de 4,91cm.

Figura 10 - Perfil topográfico da linha altimétrica do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape



Fonte: O autor (2024).

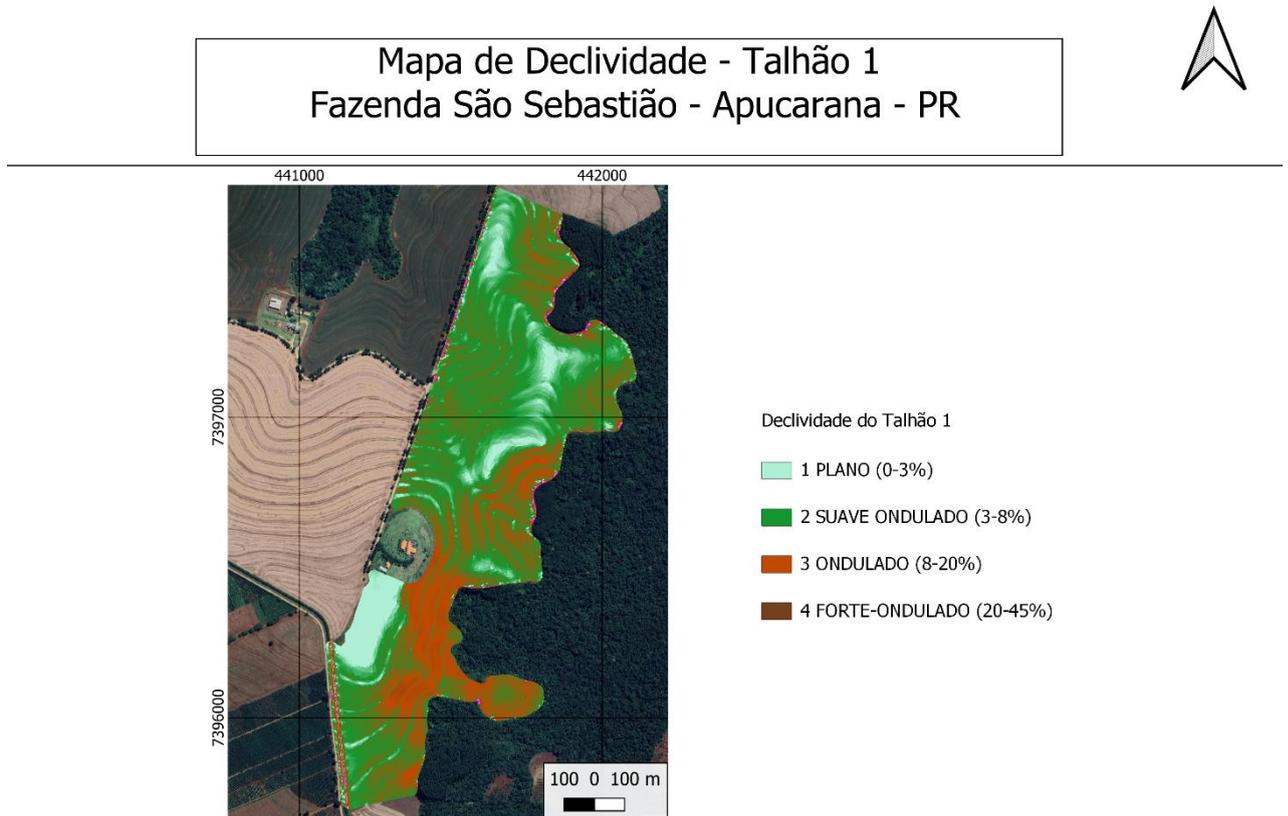
Figura 11 – Ortomosaico do talhão 1 da fazenda São Sebastião gerado pelo programa Agisoft Metashape utilizando 726 fotos.



Fonte: O autor (2024).

O MDE foi exportado em formato .tif e processado no software Qgis 3.28.12 Firenze, onde a partir da imagem raster do MDE foi processada a declividade em porcentagem e adotada uma simbologia para distinguir a classificação de acordo com a Embrapa (1979) (Figura 12).

Figura 12 – Classificação do Declive do talhão 1 da fazenda São Sebastião de acordo com a Embrapa (1979)

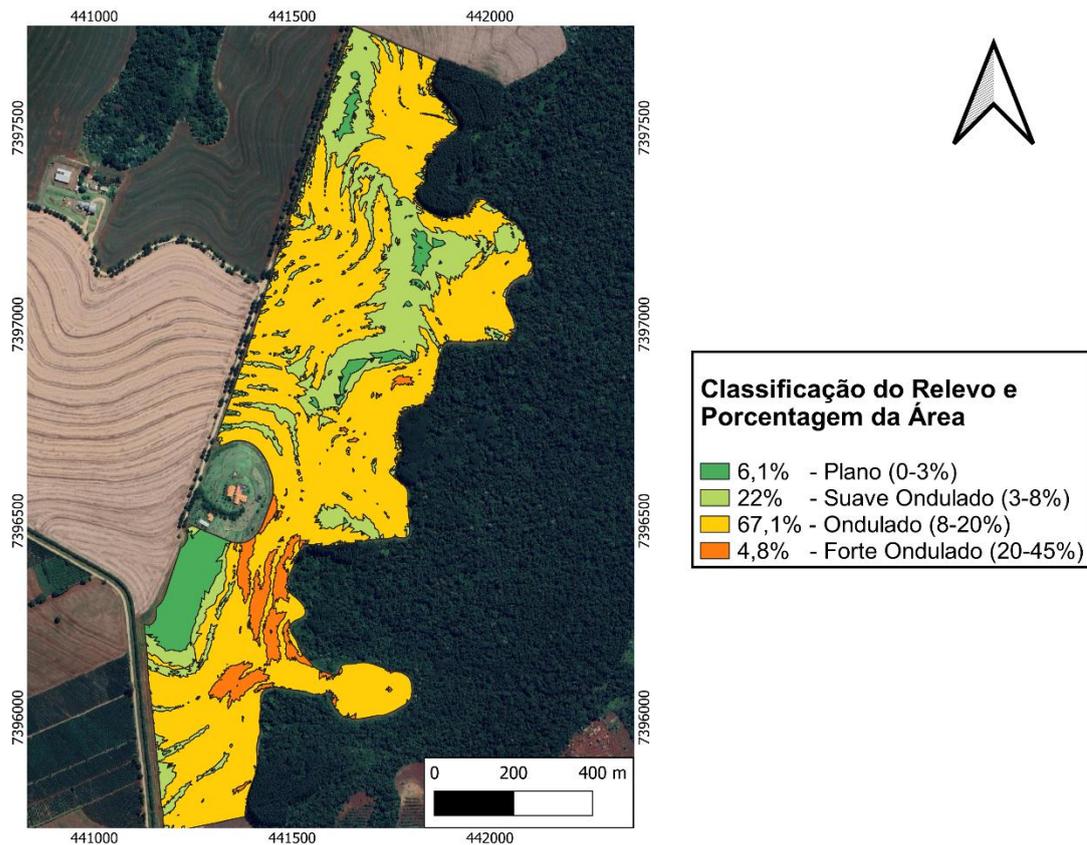


Fonte: O autor (2024).

Em seguida, visando quantificar os atributos de declividade e relevo do talhão, foi aplicada a ferramenta "Raster para vetor (poligonizar)" tomando como referência o atributo de porcentagem do declive. O próximo passo foi emprego da ferramenta "Dissolver" pela qual todos os polígonos com o declive de cada classificação foram unidos. Adiante, os polígonos de cada classificação do relevo foram mesclados, formando um grande polígono com todas as categorias. Por fim, foi quantificada a área em hectares e porcentagem de área de cada uma das classificações (Figura 13). A classificação do relevo obteve o seguinte resultado: 6,1% da área com relevo plano (0-3%), 22% da área com relevo suave ondulado (3-8%), 67,1% da área

com relevo ondulado (8-20%) e 4,8% da área com relevo forte ondulado (20-45%). Ressalta-se que a declividade máxima encontrada no talhão 1 foi de 30% em pequenas áreas.

Figura 13 - Classificação do relevo e porcentagem da área do talhão 1 da fazenda São Sebastião



Fonte: O autor (2024).

Conforme a análise dos resultados do geoprocessamento é possível atestar as razões pela qual a produtividade da área é limitada, que por sua vez justifica o enquadramento da propriedade rural numa situação distinta para o cálculo do valor da terra nua.

É correto afirmar que áreas agrícolas com topografia plana e suave-ondulada, por serem ótimas para mecanização e por possuírem alto potencial produtivo, têm seu valor por hectare valorizado, ao passo que propriedades com topografia mais acidentada, isto é, há um predomínio do relevo ondulado e forte ondulado perdem consideravelmente o valor de mercado, sendo, muitas vezes, indicadas para outros tipos de uso de solo como pecuária e silvicultura, atividades muito menos rentáveis.

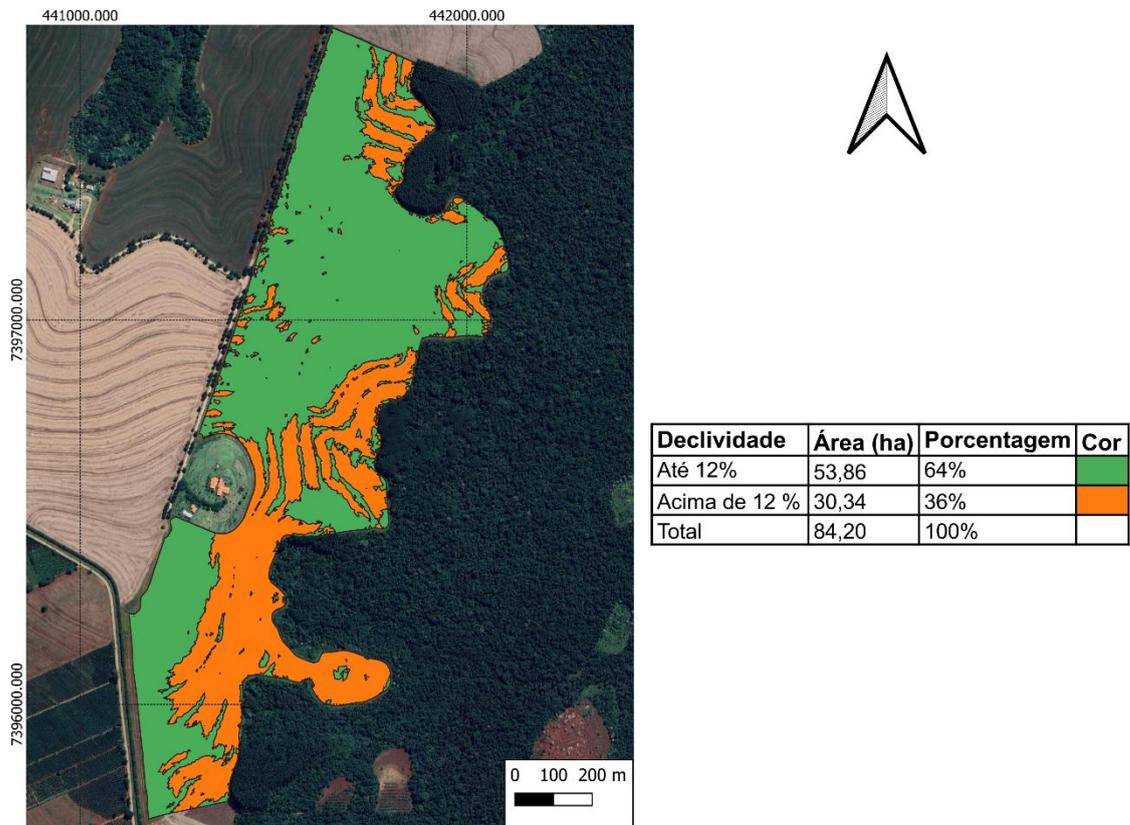
O aumento da inclinação do terreno impacta o desenvolvimento do solo, tornando-o mais raso e menos produtivo naturalmente. Isso requer investimentos maiores nos sistemas de produção, com menor potencial de retorno, para garantir a proteção adequada dos recursos naturais. A declividade também está correlacionada com a profundidade dos solos, onde solos mais rasos são mais facilmente encontrados em regiões mais acidentadas e, com isso, há um aumento do afloramento de rochas que acometem o desenvolvimento radicular das plantas e a qualidade do solo (MAFRA et al., 2001; VIDAL-TORRADO; LEPSCH, 1999), fato que foi confirmado em visitas à campo e podem ser observados na figura 17.

Para conter a erosão, bastante presente nessa propriedade, é necessária a adoção de práticas mecânicas de conservação de solo, implantando barreiras físicas que mitiguem o escoamento superficial, tais como canais e camalhões. Essas práticas, ainda que benéficas, exigem um alto investimento para implementação e requerem grande mobilização e revolvimento de solo, que por sua vez, reduzem a qualidade do mesmo, e com isso, reduzem a produtividade, pois os horizontes O e A, mais ricos em nutrientes e bem estruturados, são aterrados, enquanto os horizontes inferiores são trazidos à superfície.

Para declividades superiores a 12%, é aconselhável empregar terraços embutidos ou de base estreita. Esses tipos de terraços oferecem barreiras físicas mais robustas em comparação com os terraços de base larga ou média. No entanto, é importante observar que a construção desses terraços resulta na redução da área agrícola utilizável no terreno. Áreas que utilizam terraços do tipo embutido ou de base estreita impõem restrições às características operacionais dos equipamentos agrícolas em todas as fases produtivas. Esses terraços resultam em maior deslocamento dos equipamentos, aumento no consumo de combustível e compactação do solo. Como consequência, a eficiência operacional é reduzida, os custos de produção aumentam e a rentabilidade diminui. Do ponto de vista gerencial, é necessário monitorar essas áreas com maior atenção para implementar medidas que minimizem os riscos ambientais.

Sob essa ótica, o talhão 1 possui cerca de 64% da área com relevo de até 12% declividade, enquanto, cerca de 36% do talhão possui relevo acima de 12% de declividade (Figura 14).

Figura 14 – Mapa de declividade de 12% do talhão 1 da fazenda São Sebastião



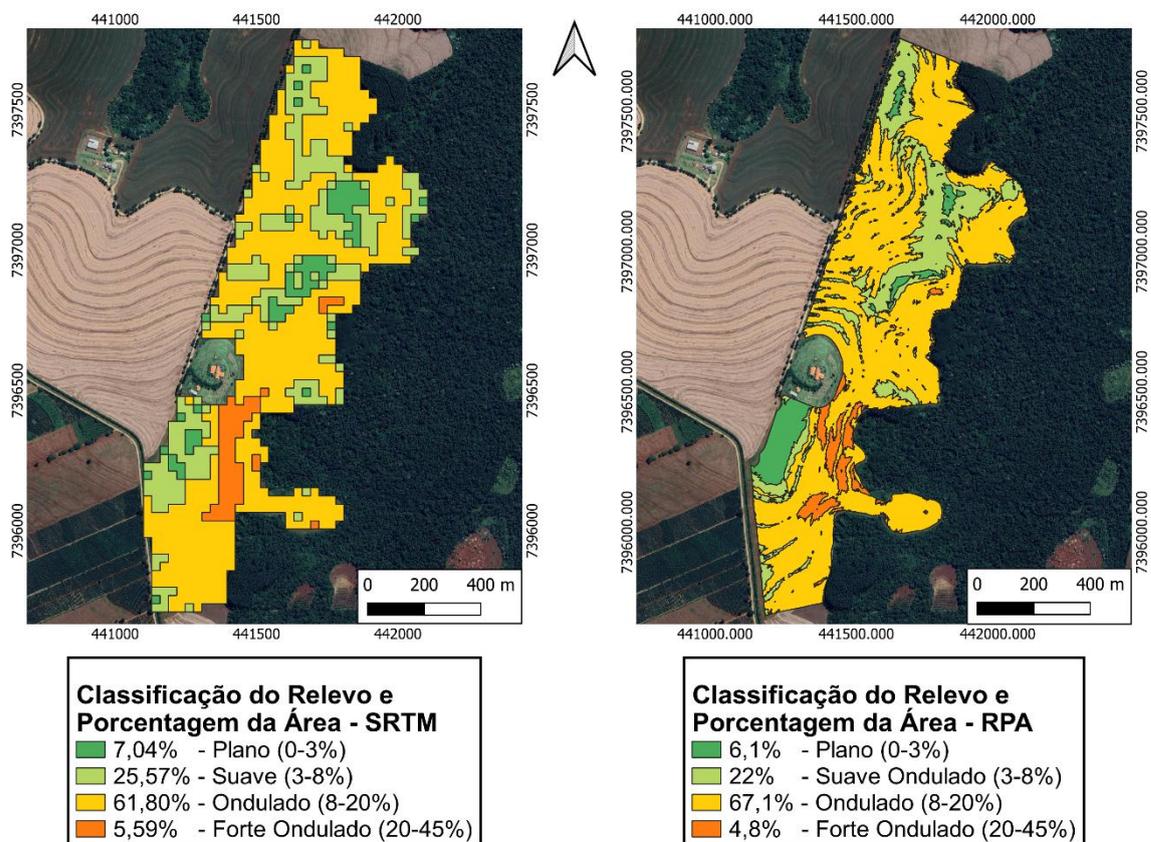
Fonte: O autor (2024).

A classificação do relevo também foi aferida por meio de dados SRTM com resolução espacial de 30 metros por pixel, provenientes do portal do *United States Geological Service* (USGS) utilizando os seguintes critérios de busca: "Data Sets", "Digital Elevation" e "SRTM 1 Arc-Second Global" para região de Apucarana.

A partir dos dados de altitude fornecidos em formato raster Geotiff foi possível realizar o processamento no software Qgis para cálculo da declividade e classificação do relevo de acordo com a Embrapa (Figura 15). A classe 'Ondulado' que possui a maior faixa de relevo correspondente à área de 67,1% pelas imagens suborbitais foi estimada com 61,8% pelas imagens orbitais, um desvio subestimado de 5,3%. Enquanto a classe 'Forte Ondulado' que possui a menor faixa de relevo correspondente à 4,8% pelas imagens suborbitais foi estimada com 5,59%, um desvio superestimado de 0,79%. Dessarte, a comparação permite inferir que as imagens de satélite são capazes classificar o relevo com relativa precisão, visto que quando comparado ao método de avaliação a partir de imagens de RPA, onde a resolução espacial do pixel chega à casa de centímetros, não houve discrepâncias importantes quanto a quantificação em área medida. No entanto, apesar das imagens de satélite

forneçerem um panorama da propriedade, por possuírem um pixel de 30 metros não permitem uma análise detalhada com acurácia georreferenciada para se realizar intervenções na implantação de terraços buscando a conservação de solo e sustentabilidade do sistema produtivo.

Figura 15 - Comparação da Classificação de Relevo de acordo com a Embrapa de dados provenientes de RPA e de dados orbitais SRTM com resolução espacial de 30 metros sobre o talhão 1 da fazenda São Sebastião

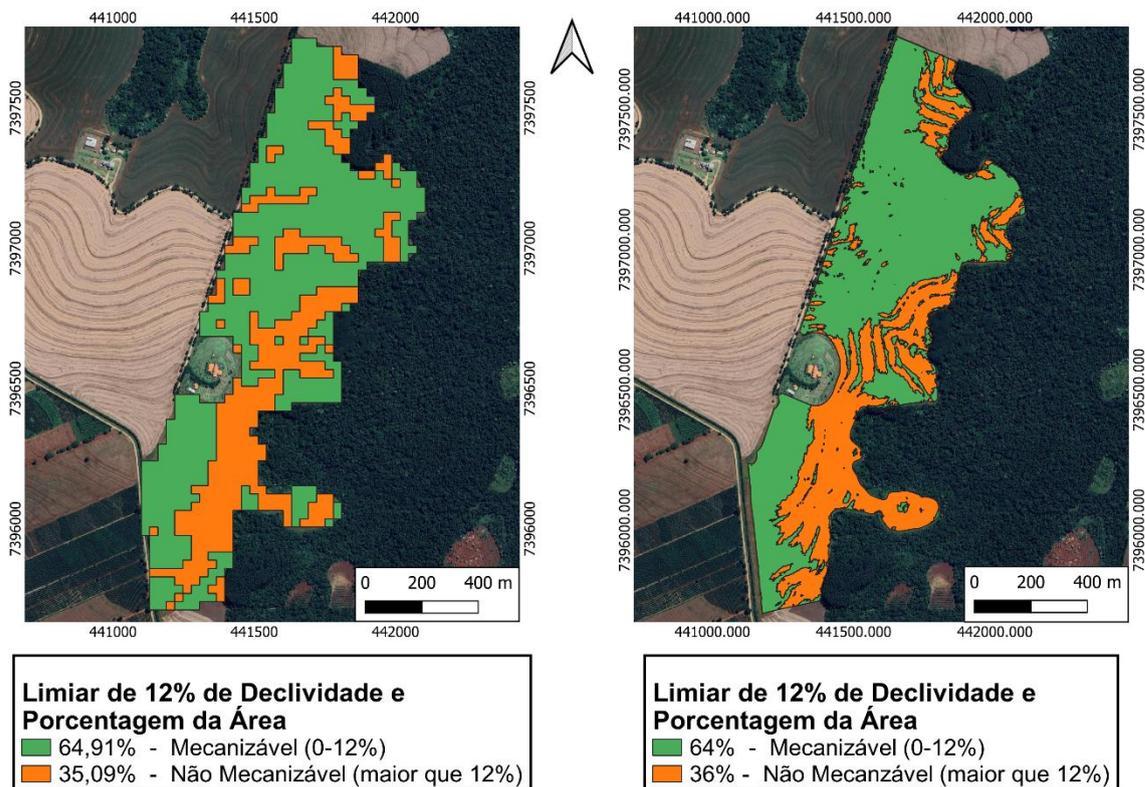


Fonte: O autor (2024).

A mesma comparação foi realizada quanto ao limiar de 12% (Figura 16), a área 'Mecanizável' que possui a maior faixa correspondente à área de 64% pelas imagens suborbitais foi estimada com 64,91% pelas imagens orbitais, um desvio superestimado de 0,91%. Enquanto a área 'Não Mecanizável' que possui a menor faixa correspondente à 36% pelas imagens suborbitais foi estimada com 35,09%, um desvio subestimado de 0,91%. Novamente, conclui-se que é possível aferir com relativa precisão a quantificação da área e a estratificação do relevo apto e não apto para operações agrícolas com grandes maquinários a partir de imagens de satélite. Ainda que as imagens de satélite sejam capazes de realizar a classificação do relevo,

somente as imagens suborbitais fornecem dados detalhados e georreferenciados para realizar intervenções com a precisão e acurácia a partir de implementos agrícolas na agricultura de precisão.

Figura 16 - Comparativo do limiar de declividade de 12% a partir de dados provenientes de RPA e de dados orbitais SRTM com resolução espacial de 30 metros sobre o talhão 1 da fazenda São Sebastião



Fonte: O autor (2024).

Apesar das diferentes metodologias de análise da classificação do relevo, utilizando imagens de RPA e SRTM, apresentarem resultados similares na Fazenda São Sebastião, deve-se reforçar que o resultado pode ser distinto em outras propriedades agrícolas, em outras regiões com perfis de relevos heterogêneos e diferentes. Como sugestão, cabe a investigação se esse resultado se replica sob outros ambientes.

Após analisada e aferida sob diferentes metodologias entende-se que a atividade agrícola na área enfrenta desafios de ordem econômica, operacional e de planejamento, pois, em função da declividade, facilmente pode desenvolver processos erosivos como sulcos e até voçorocas, e que, por consequência, exige um manejo do solo constante, implementação de terraços embutidos e de base estreita e correção da fertilidade do solo, e, portanto, acarreta diminuição da eficiência energética e

rendimento do maquinário agrícola, assim como preconiza o MAPA (1981).

A análise dos locais com maior declividade foi verificada *in loco* posteriormente à adoção de práticas conservacionistas com terraços embutidos, de base larga, média e estreita, onde ainda assim, foram encontradas a presença de sulcos decorrentes de processos erosivos, assim como, pedregosidade aflorada dentro da área agrícola (Figura 17).

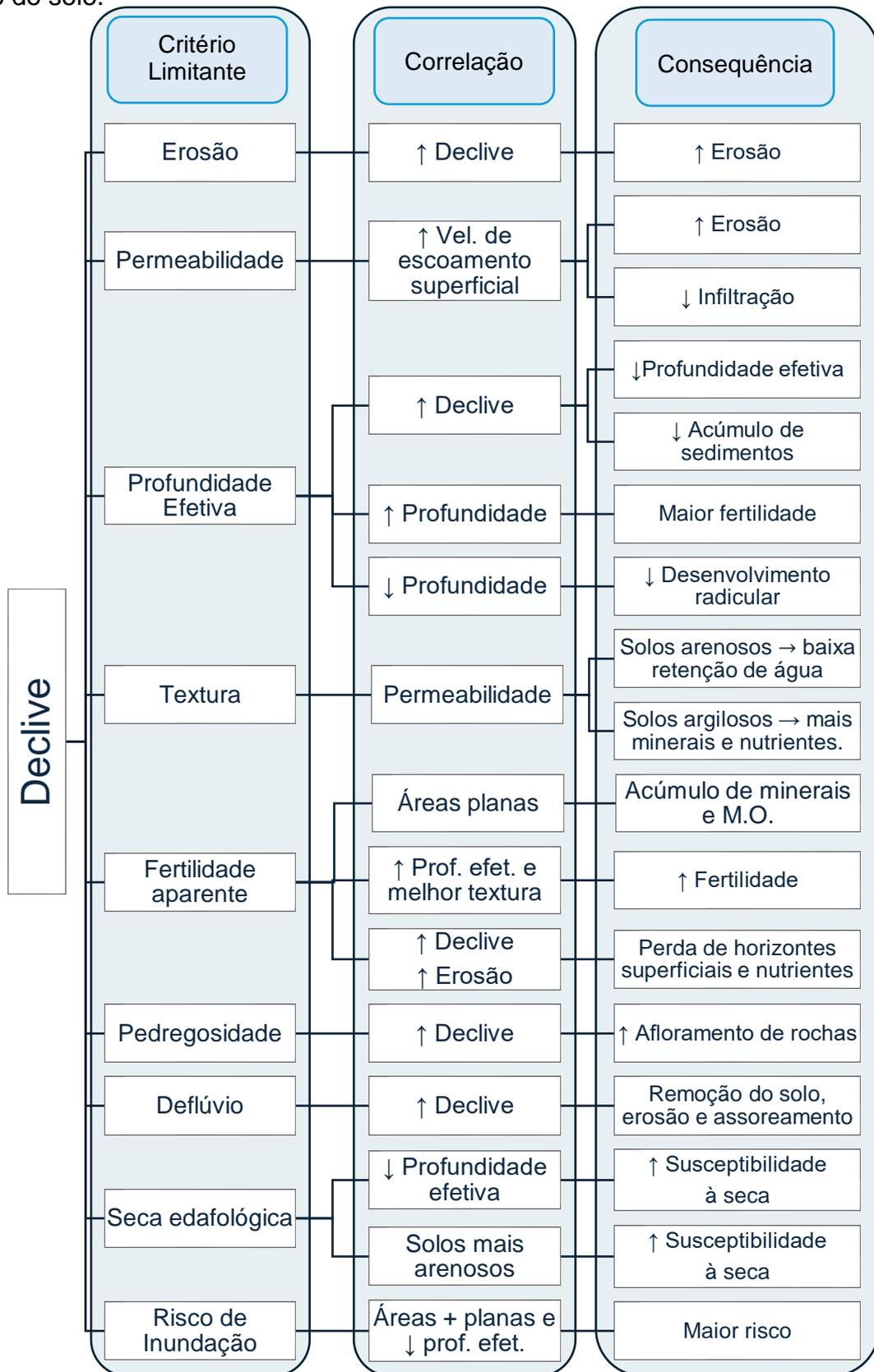
Figura 17 - Processos erosivos incidentes sobre região de alta declividade e presença de afloramento rochoso no talhão 1 da fazenda São Sebastião



Fonte: O autor (2024).

Considera-se que o Deral (2017) ao realizar a Pesquisa de Preços de Terras Agrícolas valora as terras com base em atributos técnico-científicos amparados no “Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso”, publicado pela Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos (SBCS). Nesta metodologia se correlaciona o valor monetário à grupos (modo de produção e uso do solo) e classes (capacidade do uso do solo). Esses grupos e classes se concatenam de modo que um fator influencia o seguinte ou é causa do mesmo, há então, uma interdependência onde é possível inferir o potencial produtivo e aptidão agrícola pelos atributos físicos da terra. Esta relação é representada no organograma a seguir (Figura 18) onde a partir do principal fator limitante, o declive, se organizou a interrelação com os demais fatores limitantes elencados pela “Tabela de enquadramento nas classes” (Anexo 2).

Figura 18 - Organograma da relação entre o Declive e demais fatores limitantes do uso do solo.



Fonte: O autor (2024).

O declive é um fator crítico na determinação da aptidão agrícola, influenciando diretamente a erosão e o deflúvio superficial. Em áreas com maior declividade, a água escoar rapidamente, intensificando a remoção de partículas finas do solo e, com isso, desencadeando processos erosivos que levam à formação de sulcos (LEPSCH, 2002; VALENTIN, POESEN e LI, 2005). Esse fenômeno é agravado pelo deflúvio, que ocorre quando a capacidade de infiltração do solo é superada pelo escoamento superficial, transportando sedimentos para longe das áreas cultiváveis (KER et al., 2012; CHAPLOT, 2013), o arraste das partículas desagregadas acaba se realocando nos poros causando entupimento e comprometendo a absorção da água e o equilíbrio hídrico do solo, fatores essenciais para a sustentabilidade agrícola e que afetam diretamente a permeabilidade (WADT, 2003; LEPSCH, 2002). Como resultado, solos com declive acentuado tendem a perder periodicamente finas camadas de solo, e, desse modo, serem mais rasos e vulneráveis, apresentando menor profundidade efetiva (KER et al., 2012; VIDAL-TORRADO, LEPSCH (1999); MAFRA et al., 2001).

A erosão não só remove a camada superficial do solo, como também resulta na perda de solo fértil e nutrientes essenciais, afetando diretamente a fertilidade aparente (RAMALHO FILHO, BEEK, 1995). Solos que perdem sua camada superior (horizonte O e A) rica em matéria orgânica e minerais tornam-se, então, menos produtivos, limitando o crescimento das plantas, raízes e sua capacidade de absorver nutrientes. Essa perda de fertilidade aparente é acentuada em áreas declivosas, onde a erosão é mais intensa. A textura do solo também está intimamente ligada a esses fenômenos, solos argilosos, por exemplo, são mais bem estruturados com blocos melhores agregados, retêm mais água e são menos suscetíveis à erosão em terrenos íngremes, comparados a solos arenosos, que embora drenem melhor, têm menor capacidade de retenção hídrica, são mais frágeis e passíveis de processos erosivos, o que agrava a falta de nutrientes após a perda de solos (KER et al., 2012; CHIAPIN et al., 2013; OLIVEIRA et al., 1992). A permeabilidade do solo e capacidade hídrica, fortemente influenciada por sua textura, é outro fator determinante, solos com baixa permeabilidade detêm mais a água na superfície, intensificando o escoamento superficial e, por consequência, acelerando a erosão. Por outro lado, a água percola rapidamente em solos com alta permeabilidade, comuns em áreas arenosas, lixiviando nutrientes, agravando os efeitos da seca edafológica (RUBIRA et al., 2019; MAFRA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 1992), e comprometendo a fertilidade a longo prazo.

A pedregosidade, a seca edafológica e o risco de inundação estão ligados ao declive, moldando ainda mais a aptidão agrícola. Solos em áreas mais íngremes tendem a ter maior afloramento de rochas e pedregosidade, fato que foi observado em áreas íngremes do talhão conforme a Figura 18, o que dificulta o uso de maquinário e o desenvolvimento radicular (CUNHA et al., 2005; GHIDIN et al., 2006). Além disso, a erosão contínua em terrenos declivosos expõe o material rochoso subjacente, tornando o solo ainda mais raso e improdutivo (LEPSCH, 2002; SOUZA JUNIOR, DEMATTÊ, 2008). A seca do solo, por sua vez, é exacerbada em áreas declivosas com solos arenosos ou de baixa profundidade, onde a capacidade de retenção de água é mínima, afetando severamente o desenvolvimento das plantas (RUBIRA et al., 2019; MAFRA et al., 2001). Por outro lado, o risco de inundação é mais comum em áreas planas ou de baixa declividade, especialmente quando o solo tem baixa permeabilidade, o que impede a drenagem adequada da água. Nessas áreas, a combinação de declive suave e plano com solo mal drenado pode resultar em um acúmulo de água na superfície, reduzindo a oxigenação do solo, tolhendo o tráfego de maquinários e afetando a produção agrícola (RAMALHO FILHO, BEEK, 1995). Assim, a interação entre declive e esses fatores reflete como o relevo influencia a estrutura, a capacidade hídrica e a produtividade do solo, exigindo abordagens diferenciadas de manejo.

Dessarte a literatura discutida baseia a correlação entre os diferentes fatores limitantes para enquadramento das classes definidas pelo Deral. Tal análise é pertinente sobre a propriedade estudada que apresentou o declive como o fator limitante preponderante, onde cerca de 36% da área possui relevo acima de 12% de declividade, e por conseguinte, expõe sinais de erosão, deflúvio e pedregosidade, ainda que sua textura seja argilosa e mais bem estruturada quando comparada a solos arenosos.

Com isso, é explicitado que a fazenda São Sebastião apresenta limitações intransponíveis que acabam por restringir seu potencial produtivo, apesar do alto nível de manejo agrícola adotado, e compromete a aptidão agrícola, assim como o seu VTN.

No ano de 2023 a propriedade Fazenda São Sebastião foi avaliada pela municipalidade como A1 (grupo A que indica se tratar terras agricultáveis e classe 1 que indica a aptidão agrícola) (em destaque na Tabela 5) tendo o preço médio do hectare R\$ 73.430,00, considerado como “aptidão boa: terra apta à cultura temporária

ou permanente, sem limitações significativas para a produção sustentável e com um nível mínimo de restrições, que não reduzem a produtividade ou os benefícios expressivamente e não aumentam os insumos acima de um nível aceitável” (BRASIL, 2019).

Tabela 7 – Valores de Terra Nua – Exercício 2023

PARANÁ - PR							
Nome Município	Lavoura Aptidão Boa	Lavoura Aptidão Regular	Lavoura Aptidão Restrita	Pastagem Plantada	Silvicultura ou Pastagem Natural	Preservação da Fauna e da Flora	Fonte
ABATIA	R\$ 103.200,00	R\$ 76.200,00	R\$ 61.700,00	R\$ 50.300,00	R\$ 37.300,00	R\$ 12.600,00	2
ADRIANOPOLIS	R\$ 27.000,00	R\$ 23.500,00	R\$ 20.000,00	R\$ 16.000,00	R\$ 8.800,00	R\$ 6.700,00	1
AGUDOS DO SUL	R\$ 72.600,00	R\$ 53.500,00	R\$ 40.600,00	R\$ 28.600,00	R\$ 16.400,00	R\$ 7.600,00	2
ALMIRANTE TAMANDARE	R\$ 69.900,00	R\$ 50.600,00	R\$ 38.900,00	R\$ 26.700,00	R\$ 15.100,00	R\$ 6.300,00	2
ALTAMIRA DO PARANA	R\$ 107.598,00	R\$ 90.915,00	R\$ 68.800,00	R\$ 52.507,00	R\$ 37.048,00	R\$ 15.380,00	1
ALTO PARAISO	R\$ 53.100,00	R\$ 53.100,00	R\$ 47.000,00	R\$ 41.100,00	R\$ 35.300,00	R\$ 15.800,00	2
ALTO PARANA	s/informação	R\$ 50.100,00	R\$ 41.000,00	R\$ 29.200,00	R\$ 27.000,00	R\$ 10.300,00	1
ALTO PIQUIRI	R\$ 78.574,17	R\$ 49.743,30	R\$ 33.613,15	R\$ 32.283,95	R\$ 23.414,73	R\$ 12.260,80	1
ALTONIA	R\$ 66.789,25	R\$ 58.075,00	R\$ 41.860,00	R\$ 38.180,00	R\$ 27.140,00	R\$ 14.145,00	1
ALVORADA DO SUL	R\$ 132.800,00	R\$ 110.500,00	R\$ 88.000,00	R\$ 66.000,00	R\$ 66.000,00	R\$ 66.000,00	1
AMAPORA	R\$ 59.819,00	R\$ 59.819,00	R\$ 46.698,00	R\$ 33.947,00	R\$ 25.200,00	R\$ 9.030,00	1
AMPERE	R\$ 140.000,00	R\$ 114.600,00	R\$ 89.500,00	R\$ 54.300,00	R\$ 36.300,00	R\$ 14.200,00	2
ANAHY	R\$ 104.500,00	R\$ 79.000,00	R\$ 59.600,00	R\$ 48.400,00	R\$ 30.200,00	R\$ 13.000,00	1
ANDIRA	R\$ 103.200,00	R\$ 76.200,00	R\$ 61.700,00	R\$ 50.300,00	R\$ 37.300,00	R\$ 12.600,00	1
ANGULO	R\$ 126.900,00	R\$ 98.100,00	R\$ 80.000,00	R\$ 56.100,00	R\$ 40.000,00	R\$ 18.100,00	2
ANTONINA	R\$ 52.200,00	R\$ 52.200,00	R\$ 38.400,00	R\$ 28.000,00	R\$ 17.800,00	R\$ 4.500,00	2
ANTONIO OLINTO	R\$ 74.800,00	R\$ 57.000,00	R\$ 32.000,00	R\$ 20.000,00	R\$ 11.500,00	R\$ 5.600,00	2
APUCARANA	R\$ 73.430,00	R\$ 55.440,00	R\$ 43.890,00	R\$ 29.260,00	R\$ 19.950,00	R\$ 10.430,00	1
ARAPONGAS	R\$ 123.100,00	R\$ 89.800,00	R\$ 70.400,00	R\$ 48.000,00	R\$ 33.600,00	R\$ 17.500,00	1

Fonte: Receita Federal (2023).

A classificação infere um potencial produtivo máximo, com praticamente nenhuma restrição, sem necessidade de intervenções quanto à adubação, práticas mecânicas conservacionistas, ou risco de erosão. Entretanto, esta não é a realidade encontrada na propriedade e, sobretudo, por meio da análise representativa do talhão 1, onde 67,1% da área é classificada como relevo ondulado (8 a 20%).

A literatura apresentada aqui explana quanto às condições de potencial de mecanização da propriedade que pode ser classificada sob o atributo “Moderado”, ou seja, terras com declividade de 8 a 20%, e rendimento do maquinário agrícola entre 50 e 75%. Quanto à suscetibilidade de erosão, também deve ser classificada como “Moderado”, onde o relevo tem declive entre 8 e 20% e práticas intensivas de controle de erosão devem ser empregadas desde antes das operações agrícolas, sob alto risco de desenvolvimento de sulcos e voçorocas (MAPA, 1981).

Dessarte, o enquadramento desta propriedade representada pelo talhão 1 junto a Receita Federal deve ser “Lavoura – Aptidão Regular”, que indica

recomendações de manejos intensivos conservacionistas a fim de evitar a incidência e desenvolvimento de sulcos e voçorocas. Esta classificação se justifica também por conta da dificuldade de manejo agrícola, uma vez que o maquinário sob estas condições pode perder até cerca de 50% de seu rendimento (MAPA, 1981).

Não só o valor de VTN é impactado, mas também o preço médio da terra agrícola que é mensurado também pelo Deral de acordo com a tabela 8. A propriedade fazenda São Sebastião, possui o valor real de mercado afetado pela sua topografia acidentada, e apesar de ser utilizada para lavouras anuais rentáveis, como soja e milho, possui um deságio em seu valor de mercado provocado pelas áreas íngremes dispostas em seus talhões.

Tabela 8 – Preço médio de terras agrícolas elaborado pelo Deral em 2023 com destaque para o município de Apucarana e a classe III referente a lavoura de aptidão regular



SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO - SEAB
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL – DERAL
DIVISÃO DE ESTATÍSTICAS BÁSICAS

PREÇOS MÉDIOS DE TERRAS AGRÍCOLAS – valores referentes a 2023 em Reais por hectare detalhados por classe de capacidade uso e por município

Município	A- I	A- II	A- III	A- IV	B- VI	B- VII	C- VIII
Abatiá		103.200	76.200	61.700	50.300	37.300	12.600
Adrianópolis			35.600	27.000	19.500	11.800	4.900
Agudos do Sul		72.600	53.500	40.600	28.600	16.400	7.600
Almirante Tamandaré		69.900	50.600	38.900	26.700	15.100	6.300
Altamira do Paraná	127.100	106.200	85.700	67.100	48.700	34.300	14.600
Alto Paraíso			53.100	47.000	41.100	35.300	15.800
Alto Paraná			63.400	52.600	41.200	32.100	10.400
Alto Piquiri	149.600	118.800	70.400	55.700	49.700	39.600	15.800
Altônia			61.700	51.400	45.400	35.300	15.800
Alvorada do Sul	137.200	111.000	90.100	74.700	57.700	41.900	17.000
Amaporã			67.800	56.200	44.500	35.000	11.200
Ampére		140.000	114.600	89.500	54.300	36.300	14.200
Anahy	173.700	138.600	108.300	81.700	59.000	36.100	19.400
Andirá		103.200	76.200	61.700	50.300	37.300	12.600
Ângulo	156.300	126.900	98.100	80.000	56.100	40.000	18.100
Antonina			52.200	38.400	28.000	17.800	4.500
Antônio Olinto		74.800	57.000	32.000	20.000	11.500	5.600
Apucarana	150.400	120.100	94.100	75.100	48.500	32.100	16.400

Fonte: Deral (2023).

A área em questão, apesar de apresentar desafios topográficos e suscetibilidade à degradação em decorrência das práticas agrícolas, detém

importância econômica e contribui para a segurança alimentar. Essa realidade não se restringe à propriedade em estudo, mas se estende a inúmeras outras áreas na região e no país, evidenciando a necessidade de soluções tecnológicas acessíveis para avaliação da aptidão agrícola e reenquadramento tributário convergente.

Além disso, é imperativo que a tributação considere as limitações físicas intrínsecas ao uso da terra, como a declividade e a suscetibilidade à erosão, que podem restringir a produtividade e demandar investimentos adicionais em práticas conservacionistas. Consonante à IN 1877/2019 que distingue diferentes níveis de aptidão agrícola por manejo, necessidade de emprego de insumos e restrições físicas, condições estas, presentes no talhão 1.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de RPAs demonstrou-se eficaz na identificação da qualidade e uso da terra, fornecendo dados detalhados sobre características topográficas, como declividade e suscetibilidade à erosão. A associação do uso de RPAs com técnicas de geoprocessamento possibilitou o monitoramento do relevo, a identificação de áreas degradadas e a necessidade de intervenções, como a formação de ravinas, com maior acurácia, menor custo e maior agilidade na coleta de dados.

Os dados SRTM, com resolução espacial de 30 metros por pixel, demonstraram-se válidos para a classificação do relevo, permitindo uma estratificação eficiente das classes topográficas. A análise comparativa entre as imagens SRTM e os dados suborbitais indicou uma leve variação das classes, validando a precisão relativa da metodologia adotada. No entanto, a resolução espacial das imagens SRTM impõe limitações à análise detalhada do relevo, especialmente para intervenções precisas, como a implantação de terraços para conservação do solo. Assim, a aplicação das imagens orbitais é recomendada para diagnósticos gerais do relevo e planejamento territorial, mas requer complementação com dados de maior resolução para ações de manejo agrícola mais detalhadas.

A análise do organograma evidencia a influência direta da declividade na aptidão agrícola, destacando sua relação com a suscetibilidade à erosão e a mecanização agrícola. A interdependência entre declive e outros fatores limitantes, como pedregosidade, permeabilidade, erosão, deflúvio e outros, reforça a necessidade de um planejamento agrícola estratégico, que considere a implementação de terraços e uso de culturas adaptadas a diferentes níveis de restrição. A estruturação desse organograma possibilita uma abordagem sistemática para a compreensão da correlação entre declividade e demais fatores limitantes, facilitando o enquadramento tributário da terra conforme os critérios técnicos estabelecidos pela literatura e por órgãos reguladores.

Os resultados obtidos evidenciaram uma relação intrínseca entre as características topográficas, o uso da terra, o valor da terra nua e a tributação. A declividade influencia diretamente a capacidade produtiva da terra e a necessidade de práticas conservacionistas, impactando o valor da terra nua e, conseqüentemente, o valor venal da propriedade. Diante disso, torna-se fundamental considerar as limitações físicas do terreno na avaliação da propriedade rural para fins de tributação.

A aplicação de impostos municipais, frequentemente baseada em técnicas

subjetivas e não pontuais, pode, por vezes, ser incondizente com as características físicas da propriedade e incompatível com seu potencial produtivo. Nesse sentido, o uso de RPAs, associado a técnicas de geoprocessamento, permite reavaliar a real aptidão agrícola da propriedade, embasando um reenquadramento tributário mais justo e equitativo.

A metodologia de avaliação da propriedade rural a partir de RPAs, além de viável para avaliar a aptidão agrícola e o uso do solo, vai ao encontro dos princípios que fundamentam a função social da terra, associando os princípios da extrafiscalidade de aproveitamento racional e adequado, de preservação do meio ambiente e do manejo otimizado e sustentável das áreas rurais.

Por fim, uso de RPAs e técnicas de geoprocessamento não apenas permitem aos produtores rurais reavaliar o enquadramento fiscal de suas propriedades, mas também possibilita à municipalidade e demais órgãos envolvidos na fiscalização e cobrança do imposto a modernização de seu aparato público em tecnologia e conhecimento técnico. Dessarte, a fazenda São Sebastião deveria ser enquadrada sob o regime tributário para uma propriedade rural de aptidão regular. Essa modernização contribui para a implementação de políticas públicas mais eficientes e eficazes, promovendo a justiça fiscal e o desenvolvimento sustentável da agricultura.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, H. V.; RIBEIRO, A. C. Calagem. *In*: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., H. V. (Eds). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 43-61.

ALVES JUNIOR, A. P. **Qualidade de modelos de representação altimétricos e planimétricos em imagens obtidas com aeronave remotamente pilotadas (RPA)**, 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

BERNARDI, A.C. de C.; MACHADO, P.L.O. de A.; SILVA, C.A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. *In*: MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J.R.R. (Ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p.61-77.

BERNARDI, J.V.E.; LANDIM, P.M.B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático 10, 31 pp. 2002. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>. Acesso em: 12 jul. 2024.

BERTONI, J.; LOMBARDI, F. N. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 345p.

BRASIL. **Constituição** (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília–DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. **Lei n.º 4.504, de 30 de novembro de 1964**. Dispõe sobre o Estatuto da Terra, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília–DF, 30 nov. 1964.

BRASIL. **Lei n.º 8.629, de 25 de fevereiro de 1993**. Dispõe sobre a regulamentação dos dispositivos constitucionais relativos à reforma agrária. Diário Oficial da União, Brasília–DF, 26 fev. 1993

BRASIL. **Lei n.º 9.393, de 19 de dezembro de 1996**. Dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (ITR). Diário Oficial da União, Brasília–DF, 20 dez. 1996.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa n.º 884**, de 5 de novembro de 2008. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília–DF, 6 nov. 2008.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Secretaria Especial da Receita Federal do Brasil. **Instrução Normativa RFB n.º 1877, de 14 de março de 2019**. Dispõe sobre a prestação de informações sobre o Valor da Terra Nua (VTN) à Secretaria Especial da Receita Federal do Brasil (RFB) para fins de arbitramento da base de cálculo do Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (ITR), na hipótese prevista no art. 14, §3º, da Lei n.º 9.393, de 19 de dezembro de 1996. Diário Oficial da União, Brasília–DF, 15 mar. 2019. Seção 1, p. 23.

BRAUNBECK, O.A.; OLIVEIRA, J.T.A. **Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.26, n.1, p. 300-308, 2006.

CAMARGOS, L. D. B. O imposto territorial rural e a função social da propriedade rural. **Revista do CAAP**, v.2. 1998.

CARVALHO, B. T. B. **Utilização de aeronave remotamente pilotada na aferição de prática mecânica de conservação de solo**. 2023. 81 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina–PR. 2023.

CHAGAS, C. da S. et al. Atributos topográficos na diferenciação de Argissolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1441-1453, dez. 2013.

CHAPLOT V., 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. **Geomorphology**, v. 186, n.15, p. 1-11, mar. 2013.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Ed. UERJ, 2007. p. 196.

CHIAPIN, M., OLIVEIRA JUNIOR, J. D. O., do NASCIMENTO, A. F., FURQUIM, S., BEIRIGO, R., VIDAL-TORRADO, P. (2013). Caracterização morfológica de solos sódicos em diferentes paleodiques no pantanal norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 34., 2013. Florianópolis. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.81-90, 2005.

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. Portaria DECEA n. 224/DGCEA, de 20 de novembro de 2018. Aprova a edição da ICA-400, Instrução sobre “**Aeronaves não tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro**”. Boletim do Comando da Aeronáutica n.º 002, de 03 de janeiro de 2019. Disponível em: <http://docplayer.com.br/139693973-Ministerio-da-defesa-comando-da-aeronautica.html>. Acesso em: 4 nov. 2022.

DECEA. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Qual a diferença entre drone, VANT e RPAS?** 31 mar. 2023. Disponível em: <https://ajuda.decea.mil.br/base-de-conhecimento/qual-a-diferenca-entre-drone-vant-e-rpas/>. Acesso em: 26 jul. 2024.

DERAL. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento - Departamento de Economia Rural. **Pesquisa de preços de terras agrícolas**. 2017. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-06/Metodologia_atual.pdf. Acesso em: 20 mar. 2024.

DOS SANTOS, H, G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília–DF: Embrapa, 2018.

DOS SANTOS, A, R. **Há um arsenal de medidas para interromper a produção de novas voçorocas**. Jornal GGN. 2024. Disponível em: <https://jornalggm.com.br/desenvolvimento/ou-o-brasil-acaba-com-as-bossorocas-ou-por-alvaro-santos/>. Acesso em: 28 mar. 2024.

EISENBEISS, H. **UAV Photogrammetry**. Zurich: ETH, 2009. Disponível em: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/20976>. Acesso em: 4 nov. 2022.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1979. 83p. (Série Miscelânea, 1).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Geotecnologias e Geoinformação: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília-DF, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/107363/1/500P-Geotecnologias-e-geoinformacao-ed01-2014.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2022.

FERREIRA, A.M.R. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado-vant, para uso em aerolevanteamento**. 2014 93 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

GALVÃO, M. R. **Qual a Diferença entre Drone, VANT e RPAS?** Dronedrones, 25 abr 2024. Disponível em: <https://reidosdrones.com.br/qual-a-diferenca-entre-drone-vant-e-rpas/>. Acesso em 26 jul. 2024.

GALVAO, G. M. ; ROSALEN, D.L. Acurácia da mosaicagem gerada por veículo aéreo não tripulado utilizado na agricultura de precisão. *In: FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; ROSALEN, D.L. (Org.). Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola* (42., 2013, Fortaleza): Os desafios para o desenvolvimento sustentável. 1ed.Jaboticabal: SBEA, 2013, p. 3-12.

GOMES, L. N.; GOMES, E. N.; ALVES JUNIOR, A. P. Determinação do volume de material erodido em processos de ravinamento com base no uso de fotografias obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada (ARP). **Cadernos de Geografia**, ed. 47. p. 55-69, 2023.

GONÇALVES, S. L.; GALERANI, P. R.; GARCIA, A.; GAUDENCIO, C. de A.; FRANCHINI, J. C. **Rotação de culturas**. Londrina: EMBRAPA, 2007. 10 p. (Série Circular técnica, 45). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/470323/1/circtec45.pdf>. Acesso em: 05 de nov. de 2022.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; LIMA, J.M.J.C. Topossequência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I- mineralogia da fração argila. **R. Bras. Ci. Solo**. v. 30. p.293-306, 2006.

HARWIN S., LUCIEER A., 2012. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. **Remote Sensing**, 4, p. 1573- 1599.

HECK, C., NISHIMURA, F., ARAÚJO, B. S. Efeito da municipalização do Imposto Territorial Rural sobre a arrecadação tributária dos municípios brasileiros. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 51, n.3, 2001. p. 163-185. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/ppe51n3art5>. Acesso em: 21 jul. 2024.

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; DE MAGALHAES JUNIOR, W. C. P. **Geotecnologias: aplicações na cadeia produtiva do leite**. Editora Atena, 2022.

IBGE. **Divisão Regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias**, Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/regioes_geograficas,. Acesso em: 21 mar. 2024.

ITCG – Instituto de Terras, Cartografia e Geociências. **Solos – Estado do Paraná**. Curitiba. 2008. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mapa_solos.pdf. Acesso em: 30 jan. 2025

JULIAN, C., NUNES, J. O. R. Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Marília–SP. v.21, n.4, p.1-11, out. dez. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1818>. Acesso em: 7 nov. 2022.

KAISER, A., NEUGIRG, F., ROCK, G., MÜLLER, C., HAAS, F., RIES, J., SCHMIDT, J. Small-scale surface reconstruction and volume calculation of soil erosion in complex Moroccan gully morphology using structure from motion. **Remote Sensing**. v. 6, p. 7050-7080, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs6087050>. Acesso em: 6 nov. 2022.

KER, J.C.; CURI, N.; SCHAEFER, C.E.G.R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa–MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. 343 p.

LACERDA, P. C.; QUEMÉNÉUR, J. J. G; ALVES, H. M. R.; VIEIRA, T. G. C. Estudo da relação pedomorfogeológica na distribuição de solos com horizontes B textural e B nítico na paisagem de Lavras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 271-284, 2008. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/880538>. Acesso em: 15 set. 2024.

LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; VISCHI FILHO, O. J.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa–MG: Sociedade Brasileira de Ciência da terra, 2015. p. 170.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LIMA, L., BACHA, C. Evolução do ITR no Brasil. **Revista de Política Agrícola**. v. 31. n. 4. p. 39-56. out. nov.dez. 2022. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1766>. Acesso em: 11 jul. 2024.

MACEDO, J. R; CAPECHE, C. L.; MANEGUELLI. N. do A.; MELO, A. da S.; FRANCO, A. A. **Revegetação da área de contribuição e estabilização de voçorocas através de praticas mecânicas e vegetativas**. Rio de Janeiro–RJ, Embrapa Solos, 1998. p.1-6. (Pesquisa em Andamento). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/335497/1/CNPSPESQ.AND.998.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MAFRA, A.L.; SILVA, E.F.; COOPER, M.; DEMATTÊ, J.L.I. Pedogênese de uma seqüência de solos desenvolvidos de arenito na região de Piracicaba (SP). **R. Bras. Ci. Solo**. v. 25, p.355-369, 2001.

MAGALHÃES, D.M. **Uso de drones como suporte ao planejamento territorial: Da coleta de dados à geovisualização**. 2021. 258 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte–MG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36455>. Acesso em: 4 nov. 2022.

MANZATTO, C.V. et al. **Zoneamento agroecológico da cana- de-açúcar**. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2009. 55p.

MARZOLFF I., POESEN J., 2008. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system.

Geomorphology, v. 111, n. 1–2, out. 2009, p. 48-60.

MASSHURÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; OLIVEIRA, S. R. M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JÚNIOR, A.; BOLFE, É. L. **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF. Embrapa, 2020.

MENDES, F. L. **Emprego de drones por órgãos públicos**: proposta de adoção de sistema integrado para gestão e operações com aeronaves não tripuladas. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação e Comunicação), Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá. 2019.

MENEGASSO, P., SPERANZA, E., YANO, I., ANTUNES, J., da CRUZ, S. A. B. Adaptação e automação de processos relacionados ao uso da plataforma OpenDroneMap Web. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2021, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: Instituto de Zootecnia, 2021..

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA – SECRETÁRIA NACIONAL DE PLANEJAMENTO AGRÍCOLA. **Aptidão agrícola das terras do Paraná**. Brasília, 1981. v.21, 141p.

MONICO, J.F.G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS**: descrição, fundamentos e aplicações. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008.

MORETTO, M. A.; LAJÚS, C. R.; DA LUZ, G. L.; PEDRUZZI, D. R. Prospecção de Patentes Relacionadas ao Uso de Aeronave Remotamente Pilotada como Inserção Tecnológica Aplicada em Agricultura de Precisão. **Revista Sodebras** [on-line]. v.11, n. 129, set./2016, p. 97-103. ISSN 1809-3957. Disponível em: <http://www.sodebras.com.br/edicoes/N129.pdf>. Acesso em 26 jul. 2024.

MUNARETTO, L. **VANT e Drones**. São Paulo: Edição independente. 2017. 176 p

NOGUEIRA, Natiéli; OLIVEIRA, Onair; MARTINS, Camila; BERNARDES, Carolina. Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 14, 2012. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3969>. Acesso em: 4 nov. 2022.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal, FUNEP, 1992. p. 201.

OSALEN, D. L.; AMAZONAS, D. M. Mapeamento com aeronave remotamente pilotada de navegação precisa em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 27., 2019, Santos. **Anais...** Santos: INPE. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.31.15.06/doc/98040.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2022.

PAYÃO, J. V.; RIBEIRO, Maria de Fátima. A extrafiscalidade tributária como instrumento de proteção ambiental. **Revista do Direito Público**, [S. l.], v. 11, n. 3, p. 276–310, 2016. DOI: 10.5433/1980-511X.2016v11n3p276. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/direitopub/article/view/27735>. Acesso em: 10 jul. 2024.

PINTO, D. X., ESQUERDO, J., COUTINHO, A. Mapeamento da expansão agrícola no estado do Mato Grosso em 11 anos a partir de técnica baseada em séries temporais de imagens de NDVI. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013..

POESEN, J. Challenges in gully erosion research. **Landform Analysis**, v. 17, 2011, p. 5–9. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BUJ5-0051-0046>. Acesso em: 30 nov. 2022.

POESEN J., NACHTERGAELE J., VERSTRAETEN G., VALENTIN C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, v. 50, n. 2–4, jan. 2003, p. 91- 133

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995. 65 p.

RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, L. C. **Aptidão agrícola das terras do Brasil**: potencial de terras e análise dos principais métodos de avaliação. Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/336394/aptidao-agricola-das-terras-do-brasil-potencial-de-terras-e-analise-dos-principais-metodos-de-avaliacao>. Acesso em: 18 jun. 2024.

RAMOS, V. **Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural (ITR)**: Uma Análise da Função Social da Propriedade e Seus Efeitos Extrafiscais. Jusbrasil, 21 set. 2023. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/imposto-sobre-a-propriedade-territorial-rural-itr-uma-analise-da-funcao-social-da-propriedade-e-seus-efeitos-extrafiscais/1975098558>. Acesso em: 09 de jul 2024.

REIS, G. N. dos; SILVA, R. P. da; FURLANI, C. E. A.; CAVALIN NETO, J.; GROTTA, D. C. C.; CORTEZ, J. W. Manejo do consórcio com culturas de adubação verde em sistema de plantio direto. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 29, supl., p. 677-681, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v29i5.816>. Acesso em: 05 de nov. de 2022.

REMONDINO, F.; BARAZZETTI, L.; NEX, F.; SCAIONI, M., SARAZZI, D. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling: current status and future perspectives. *In*: International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 38, n. 1, 2011, Zurich. **Annals of ISPRS**, Zurich, set. 2011. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2022.

RUBIRA, F. G.; BARREIROS, A. M.; VILLELA, F. N. J.; PEREZ FILHO, A. **Sistemas pedogeomorfológicos na interpretação da evolução de paisagens quaternárias em climas tropicais úmidos**. Mercator, [S. l.], v. 18, n. e18020, 2019, p. 1–17.

SANTOS, L.M.D.; FERRAZ, G.A.E.S.; MARIN, D.B.; CARVALHO, M.A.D.F.; DIAS, J.E.L.; ALECRIM, A.D.O.; SILVA, M.D.L.O.E. **Vegetation Indices Applied to Suborbital Multispectral Images of Healthy Coffee and Coffee Infested with Coffee Leaf Miner**. AgriEngineering, 2022, 4, 311–319.

SANTOS NETO, C. R. dos. **Análise experiemntal da estabilidade direcional de veículos agrícolas de rodas em terrenos declivosos**. 2012. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Estadual de Campinas, Campinas–SP. 2012.

SÃO PAULO (Estado). Decreto n.º 47.700, de 11 de março de 2003. Regulamenta a Lei n.º 11.241, de 19 de setembro de 2002, que dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial do estado de São Paulo**, São Paulo, 11 de março de 2003. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2003/decreto-47700-11.03.2003.html>.

Acesso em: 04 jul 2024

SARTE, A. M. **Possibilidades de aplicações das aeronaves remotamente pilotadas nas atividades do bombeiro e da defesa civil**. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, 2017. Disponível em: <https://www.pilotopolicial.com.br/wp-content/uploads/2017/09/sarte.pdf>. Acesso em: 7 nov 2022.

SILVA, C. O. **Geoprocessamento aplicado ao zoneamento agrícola para cana-de-açúcar irrigada do estado do Piauí**. 2016, 72f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016.

SILVA, P. B. R.; da. **O caráter extrafiscal do ITR e o estímulo à adoção de boas práticas ambientais**. São Paulo. Editora SAM. Ano 3, nº 26, 2021. Disponível em: <https://apesp.org.br/wp-content/uploads/2015/07/Anexo-Revista-Completa.pdf#page=114> . Acesso em: 10 jul. 2024.

SNAVELY, K. N. **Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections**. 2008, 192 f. Dissertação (PhD em *Computer Science & Engineering*). University of Washington, Seattle, 2008.

SOUSA JUNIOR, J. G. D. A., DEMATTÊ, J. A. M. Modelo digital de elevação na caracterização de solos desenvolvidos de basalto e material arenítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, 2008, p. 449-456. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100043>. Acesso em: 25 jul. 2024.

SPERA, S.T.; MAGALHÃES, C.A.S.; CHITARRA, L.G.; GALBIERI, R. **Escarificação em áreas de lavouras e pastagens em Mato Grosso**: quando e como efetuar. Sinop: Embrapa Agrossilvipastoril, 2018. 24p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1100526/1/2018cpamt-silviosperaescarificacaolavourapastagemmatogrosso.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2022.

SPERANZA, E. A.; ANTUNES, J. F. G.; BARBOSA, L. A. F.; CANÇADO, G. D. A.; VANSCONCELOS, J. C. Importância de índices de vegetação para modelos de estimativa de produtividade em cana-de-açúcar. - **Anais** simpósio brasileiro do sensoriamento remoto. 2 a 5 abril de 2023 – Florianópolis. INPE, 2023.

VALENTIN C., POESEN J., Li Y. Gully erosion: impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, n. 2–3, 31 out. 2005, p. 132-153.

VERDONK, S. C. Gully. **Volume estimates using UAV Photometry in the Salagou area**. 13 abr. 2015. Dissertação (*Master of Science*) - University of Utrecht, Utrecht 2015.

VERDUM, R.; VIEIRA, C. L.; CANEPPELE, J. C. G. **Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016. 50p. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/189684/001007309.pdf?sequence>. Acesso em: 05 de nov. de 2022.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F. Relações material de origem/solo e pedogênese em uma sequência de solos predominantemente argilosos e latossólicos sobre psamitos na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.357-369, 1999.

WADT, P. G. S. **Práticas de conservação do solo e recuperação de áreas degradadas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2003. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/498802/1/doc90.pdf>. Acesso em:

05 de nov. de 2022.

WEINÄRTNER, M. A.; ALDRIGHI, C. F. S.; MEDEIROS, C. A. B. **Práticas Agroecológicas**: Adubação Orgânica. Embrapa, Pelotas: SC, 2006. 10p.

WOLF, P.; DEWITT, B. **Elements of Photogrammetry**: with applications in GIS. v. 3. New York. 2000.

WU, P.; LI, S.; WEI, Y.; ZHANG, B.; XIAO, L. **The impact of vegetation restoration on soil erosion and ecosystem services**: A meta-analysis. Land Degradation & Development, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ldr.3798>. Acesso em: 18 jun. 2024

ZANETTI, J. **Influência do Número e Distribuição de Pontos de Controle em Ortofotos Geradas a Partir de um Levantamento por Vant**. 2017. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Viçosa–MG. 2017

ANEXO 1 – Classificação Capacidade de uso de Terra (Deral – adaptado de Lepsch et al., 2015)

Grupo A- Classe I: terras cultiváveis, aparentemente sem problemas especiais de conservação. Ocupação mais comum no Paraná: Grãos, com altas produtividades.

Grupo A- Classe II: terras cultiváveis com problemas simples de conservação. Ocupação mais comum no Paraná: Grãos, com produtividades ainda acima da média.

Grupo A- Classe III: terras cultiváveis com problemas complexos de conservação. Ocupação mais comum no Paraná: Grãos, com produtividades médias.

Grupo A- Classe IV: terras cultiváveis apenas ocasionalmente ou em extensão limitada, com sérios problemas de conservação. Ocupação mais comum no Paraná: Grãos, com produtividades médias e pastagens para a criação de gado de leite.

Grupo B- Classe V: terras adaptadas em geral para pastagens e/ou reflorestamento sem necessidade de prática especial de conservação, cultiváveis apenas em casos muito especiais. Ocupação mais comum no Paraná: Áreas alagáveis não sistematizadas.

Grupo B- Classe VI: terras adaptadas em geral para pastagens e/ou reflorestamento com problemas simples de conservação, cultiváveis apenas em casos especiais de algumas culturas permanentes protetoras do solo. Ocupação mais comum: Pastagens para bovino de corte, especialmente em áreas planas a suave onduladas, porém frágeis devido a textura arenosa ou a baixa fertilidade.

Grupo B - Classe VII: terras adaptadas em geral somente para pastagens ou reflorestamento, com problemas complexos de conservação. Ocupação mais comum no Paraná: Pastagens degradadas, Pastagens em áreas declivosas e reflorestamentos.

Grupo C - Classe VIII: terras impróprias para cultura, pastagem ou/e florestamento, podendo servir apenas como abrigo e proteção da fauna e flora silvestre, como ambiente para recreação, ou para fins de armazenamento de água. Ocupação mais comum no Paraná: Vegetação natural.

ANEXO 2 – TABELA DE CRITÉRIOS PARA ENQUADRAMENTO NAS CLASSES

Limitações			Classes de Capacidade de Uso								
			I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Profundidade Efetiva	1	Muito profundo (> 2m)	X								
	2	Profundo (1 - 2m)	X								
	3	Moderada (0,5 - 1m)		X							
	4	Raso (0,25 - 0,5m)				X					
	5	Muito raso (< 0,25m)						X			
Textura	1	Muito argiloso			X						
	2	Argiloso		X							
	3	Média	X								
	4	Siltosa						X			
	5	Arenosa							X		
	6	Solos orgânicos					X				
Erosão	Laminar	0	Não aparente	X				X			
		1	Ligeira		X						
		2	Moderada			X					
		3	Severa						X		
		4	Muito Severa							X	
		5	Extremamente severa								X
	Sulcos	Superficiais desfeitos c/ prep. do solo)	7	Ocasionais		X					
			8	Frequentes			X				
			9	Muito frequentes				X			
		Rasos (não são desfeitos c/ prep. do solo)		Ocasionais			X				
				Frequentes				X			
				Muito frequentes					X		
		Profundos (não podem ser cruzados c/ máq.)	7	Ocasionais				X			
			8	Frequentes					X		
			9	Muito frequentes						X	
9 V	Voçorocas								X		
Permeabilidade	1	Excessiva		X							
	2	Boa	X								
	3	Moderada		X							
	4	Pobre			X						
	5	Muito pobre					X				
Declive	A	0 - 3%	X				X				
	B	3 - 8%		X							
	C	8 - 20%			X						
	D	20 - 45%				X					
	E	45 - 75%							X		
	F	> 75%								X	
Fertilidade aparente	1	Muito alta	X								
	2	Alta	X								
	3	Média		X							
	4	Baixa			X						
	5	Muito baixa						X			
Pedregosidade	p1	Sem pedra	X								
	p2	< 1%		X							
	p3	1 - 10%			X						
	p4	10 - 30%				X					
	p5	30 - 50%						X			
	p6	> 50%							X		
Risco de inundação	r1	Ocasional			X						
	r2	Frequente					X				
	r3	Muito frequente								X	
Deflúvio superficial	ds1	Muito rápido				X					
	ds2	Rápido			X						
	ds3	Moderado		X							
	ds4	Lento	X								
	ds5	Muito lento		X			X				
Seca edafológica	se1	Muito longa					X				
	se2	Longa				X					
	se3	Média			X						
	se4	Curta		X							
	se5	Muito curta	X								