

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

SIMONNÍ ELIAS FURTADO LEITE

DINÂMICAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E TRANSFORMAÇÃO AMBIENTAL  
DA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA, TOCANTINS - BRASIL

PONTA GROSSA  
2025

SIMONNÍ ELIAS FURTADO LEITE

DINÂMICAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E TRANSFORMAÇÃO AMBIENTAL  
DA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA, TOCANTINS - BRASIL

Tese apresentada para obtenção do título  
de doutora em Geografia na Universidade  
Estadual de Ponta Grossa. Área de  
concentração: Gestão do Território:  
Sociedade e Natureza.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Lígia  
Cassol Pinto

PONTA GROSSA

2025

F992 Furtado, Simonní Elias  
Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da  
Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil / Simonní Elias  
Furtado. Ponta Grossa, 2025.  
202 f.

Tese (Doutorado em Geografia - Área de Concentração: Gestão do  
Território: Sociedade e Natureza), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Lígia Cassol Pinto.

1. Curva de retenção. 2. Erosão laminar. 3. Geomorfometria. 4. Modelagem  
preditiva. 5. Geotecnologias. I. Pires, Luiz Fernando. II. Pinto, Maria Lígia Cassol.  
III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Gestão do Território: Sociedade e  
Natureza. IV.T.

CDD: 551



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA  
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - <https://uepg.br>

## TERMO

**SIMONNÍ ELIAS FURTADO LEITE**

### **DINÂMICAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E TRANSFORMAÇÃO AMBIENTAL DA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA, TOCANTINS - BRASIL**

Ponta Grossa, 10 de outubro de 2025

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do Título de Doutora em Geografia, no Curso de Pós-Graduação em Geografia, Doutorado em Geografia, Setor de Ciências Exatas e Naturais, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **LUIZ FERNANDO PIRES**  
Data: 11/12/2025 17:48:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires - UEPG - Orientador/ Presidente

Documento assinado digitalmente  
 **JULIO MANOEL FRANCA DA SILVA**  
Data: 13/12/2025 05:00:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Julio Manuel França da Silva - UNICENTRO

Documento assinado digitalmente  
 **SERGIO DA COSTA SAAB**  
Data: 11/12/2025 19:18:35-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sérgio da Costa Saab - UEPG

Documento assinado digitalmente  
 **SANDRO SIDNEI VARGAS DE CRISTO**  
Data: 15/12/2025 10:33:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Sidnei Vargas de Cristo - UFT

Documento assinado digitalmente  
 **VLADIA CORRECHEL**  
Data: 12/12/2025 10:27:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PProf<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Vladia Correchel - UFG

Dedico esta tese à minha mãe, cuja força silenciosa e amor incondicional foram o alicerce que me sustentou em cada passo desta caminhada. Sua coragem e generosidade nunca mediram esforços para me impulsionar, mesmo quando o caminho parecia longo demais.

Aos meus quatro filhos, que seguiram seus próprios caminhos enquanto eu trilhava o meu. As duas mais velhas já atuavam como profissionais e consolidaram suas vidas, meu filho concluiu sua formação ao longo desta jornada, e os três se casaram durante esse período — momentos que trouxeram alegria e renovação em meio aos desafios. E minha caçula, que iniciou sua trajetória acadêmica em outro estado, compartilha comigo, ainda que à distância, o entusiasmo por novos começos — um marco que, paralelamente à minha conquista, simboliza a continuidade dos sonhos que cultivamos em família.

À minha companheira, que esteve presente mesmo na ausência, ofereço minha gratidão profunda. Obrigada por compreender os silêncios, os cansaços e os momentos de distância, e por me lembrar, todos os dias, do sentido maior desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta tese é fruto de uma travessia coletiva, marcada por encontros, apoios e gestos de generosidade que me permitiram seguir, mesmo nos momentos mais difíceis.

À Professora Doutora Maria Lígia Cassol Pinto, minha primeira orientadora, por acreditar em mim desde o início e oferecer acolhimento nos momentos de dor. Sua presença foi luz em tempos sombrios. Ao Professor Doutor Luiz Fernando Pires, que assumiu a orientação com firmeza e generosidade, conduzindo-me com sensibilidade até aqui. Ao Professor Doutor Maurício Brinatti, pela partilha de conhecimentos e apoio nas pesquisas laboratoriais.

Ao amigo Édipo Rafael dos Santos, por sua dedicação incansável e parceria nos meses intensos de análises. À querida Nathália Augusta Rothmann Eschiletti, companheira de doutorado, cuja solidariedade e amizade foram abrigo. Ao genro Rafael Aires, pelo carinho constante e pela validação dos dados matemáticos com generosidade e comprometimento. À irmã Sammarina Elias Furtado Leite, pela leitura atenta e correção final desta tese, com olhos de águia e cuidado precioso.

Ao Sr. Oneildo Valadares, pela cessão da Fazenda Valadares como campo de pesquisa, apoio logístico e valiosos depoimentos sobre a ocupação do Tocantins desde a década de 1980. Sua contribuição foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Porto Nacional, pela concessão da licença que me permitiu dedicação integral ao doutorado. Ao colegiado de Geografia, nas pessoas das Professoras Doutoras Réuvia de Oliveira Ribeiro e Ordália Dias da Silva Guilherme, pela generosidade em somar minha carga horária às delas. À Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, pelo acolhimento institucional e apoio constante.

A todos os familiares e amigos que estiveram presentes ao longo desta jornada, meu profundo agradecimento. Cada gesto, palavra ou silêncio respeitoso contribuiu para que eu chegasse até aqui.

A expansão do agronegócio sobre o Cerrado representa uma crise ecológica e territorial sistêmica, onde o solo — camada viva que conecta biodiversidade, água, clima e cultura — é transformado em mercadoria. A Terra fornece o suficiente para satisfazer as necessidades de todos, mas não a ganância de alguns.

## RESUMO

FURTADO, Simonni Elias Leite. **Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil**. Orientador: Luiz Fernando Pires. 2025. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

Esta tese investigou, em abordagem multiescalar, os efeitos da expansão agropecuária sobre os solos plínticos na microrregião de Porto Nacional, inserida no MATOPIBA — uma das principais fronteiras agrícolas do Brasil. O objetivo geral consistiu em avaliar como o uso e cobertura da terra, as condições geomorfológicas e as propriedades físico-hidráulicas e mineralógicas influenciam a dinâmica ambiental e a suscetibilidade à erosão de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, articulando análises espaciais, temporais e experimentais de campo. A metodologia estruturou-se em três níveis: Escala regional (Capítulo 2), com análise geoespacial da paisagem, modelagem morfodinâmica e avaliação da evolução espaço-temporal do uso e cobertura do solo entre 1985 e 2022, incluindo projeções preditivas validadas até 2055. As geotecnologias – SIG, MDE de 30 m, imagens de satélite e métricas ambientais derivadas – permitiram caracterizar padrões de transformação e identificar áreas críticas de pressão agropecuária. Escala intermediária (Capítulo 3), dedicada à análise da reorganização territorial, da expansão das monoculturas e pastagens e da intensificação do uso agrícola, ressaltando a substituição de vegetação nativa por cultivos de alto impacto, especialmente soja. Escala local e experimental (Capítulo 4), com a caracterização morfológica, mineralógica (DRX), elementar (FRX) e físico-hidráulica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, além da aplicação da RUSLE — em escala regional — para estimar a perda de solo e avaliar a vulnerabilidade à erosão laminar em conformidade com os diferentes usos do solo, na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. Os resultados integrados da modelagem de uso e cobertura da terra revelaram substituição acelerada das formações savânicas e florestais por cultivos agrícolas e pastagens, com forte protagonismo da soja, cuja área expandiu de modo contínuo desde os anos 1990, apresentando tendência de crescimento nas próximas décadas. Na escala local, o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário avaliado demonstrou alta sensibilidade à mecanização, manifestada pela redução da funcionalidade hidrodinâmica e pelo aumento da suscetibilidade à erosão, especialmente em áreas com maior declividade. Esse comportamento resulta de um conjunto de atributos edáficos e mineralógicos, como a elevada proporção de microporos (59,5%), a textura argilosa (43,1%), e os altos teores de gibbsita e caulinita, que favorecem a formação de estruturas rígidas e compactadas. Tais condições promovem o desenvolvimento de plintitas e concreções ferruginosas, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial. O clima tropical sazonal, aliado ao Sistema Plantio Direto (SPD) em terrenos com 3–8% de declividade, intensifica esse processo. A aplicação da RUSLE indicou que a microrregião apresenta predominância de perdas muito baixas a moderadas ( $0,01\text{--}2,0\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ), compatíveis com áreas sob vegetação natural ou manejo conservacionista, mas com focos de maior vulnerabilidade, onde valores chegam a aproximadamente  $7\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  em setores de agricultura convencional e pastagens degradadas. A distribuição espacial da erosão demonstrou forte controle pelo relevo e pelo tipo de uso, evidenciando que a conversão de áreas nativas para agricultura intensiva altera significativamente a estabilidade do sistema pedológico. No Capítulo 5, a integração dos resultados multiescalares evidenciou que a dinâmica da paisagem regional, a reorganização produtiva e as propriedades intrínsecas

do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário convergem para um quadro de vulnerabilidade crescente, especialmente em cenários de intensificação agropecuária. A articulação entre os capítulos sugeriu que mudanças no uso da terra repercutem diretamente na hidrodinâmica do solo e na suscetibilidade à erosão, reforçando a necessidade de práticas conservacionistas e planejamento ambiental. Ao final, a tese contribui com subsídios técnicos e científicos essenciais para o ordenamento territorial, conservação dos solos e gestão ambiental no MATOPIBA, destacando a importância de abordagens integradas entre relevo, solo e uso da terra, bem como a relevância das geotecnologias como ferramentas de diagnóstico e apoio à tomada de decisão.

**Palavras-chave:** curva de retenção; erosão laminar; geomorfometria; modelagem preditiva; geotecnologias.

## ABSTRACT

FURTADO, Simonni Elias Leite. **Land use and land occupation dynamics and environmental transformation in the Porto Nacional Microregion/MATOPIBA, Tocantins - Brazil**. Advisor: Luiz Fernando Pires. 2025. Thesis (Ph.D. in Geography) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

This thesis investigated, through a multiscale analytical framework, the effects of agricultural expansion on plinthic soils in the microregion of Porto Nacional, located within MATOPIBA—one of Brazil's leading agricultural frontiers. The overarching objective was to evaluate how land use and land cover, geomorphological conditions, and the physical-hydraulic and mineralogical properties of a PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionary influence environmental dynamics and susceptibility to erosion, integrating spatial, temporal, and field-based experimental analyses. The methodological structure encompassed three analytical levels. At the regional scale (Chapter 2), geospatial landscape analysis, morphodynamic modeling, and the assessment of spatiotemporal land-use and land-cover change from 1985 to 2022 were conducted, including predictive modeling validated for projections up to 2055. Geotechnologies—GIS, 30-m DEMs, satellite imagery, and derived environmental metrics—enabled the identification of transformation patterns and critical areas under agro-environmental pressure. At the intermediate scale (Chapter 3), the focus was on territorial reorganization, the expansion of monocultures and pasturelands, and the intensification of agricultural use, highlighting the replacement of native vegetation by high-impact crops, especially soybean. At the local and experimental scale (Chapter 4), morphological, mineralogical (XRD), elemental (XRF), and physical-hydraulic properties of the PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionary were characterized, alongside the application of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) at the regional scale to estimate soil loss and evaluate laminar erosion vulnerability according to land-use patterns in the Porto Nacional/MATOPIBA microregion. Integrated results from the land-use/land-cover modeling revealed an accelerated replacement of savanna and forest formations by agricultural crops and pasturelands, with soybean cultivation showing continuous expansion since the 1990s and a strong tendency toward further growth in the coming decades. At the local scale, the PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionary exhibited marked sensitivity to mechanization, manifested by reductions in hydrodynamic functionality and increased erosion susceptibility, especially on steeper slopes. This behavior results from a set of edaphic and mineralogical attributes, including the high proportion of micropores (59.5%), clayey texture (43.1%), and elevated contents of gibbsite and kaolinite, which promote the formation of rigid and compacted structures. These conditions contribute to the development of plinthite and ferruginous concretions, reducing infiltration and increasing surface runoff. The seasonal tropical climate, combined with no-tillage systems (SPD) on terrain with 3–8% slopes, further intensifies these processes. The RUSLE results indicated that the microregion is largely characterized by very low to moderate soil-loss rates ( $0.01\text{--}2.0\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ), consistent with areas under native vegetation or conservation-oriented management. However, localized hotspots reached values of approximately  $7\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$  in areas dominated by conventional agriculture and degraded pastures. The spatial distribution of erosion demonstrated a strong control exerted by relief and land use, evidencing that the conversion of native environments into intensive agricultural systems significantly alters the stability of the

pedological system. In Chapter 5, the integration of multiscale findings revealed that regional landscape dynamics, productive reorganization, and the intrinsic properties of the PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionary converge to create a scenario of increasing environmental vulnerability, particularly under conditions of agricultural intensification. The articulation among chapters showed that land-use changes directly affect soil hydrodynamics and erosion susceptibility, reinforcing the need for conservation practices and environmental planning. Overall, this thesis provides essential scientific and technical contributions for territorial planning, soil conservation, and environmental management in the MATOPIBA region. It highlights the importance of integrated approaches linking relief, soil, and land use, as well as the central role of geotechnologies as diagnostic tools and support mechanisms for decision-making.

**Keywords:** water retention curve; sheet erosion; geomorphometry; predictive modeling; geospatial technologies.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Localização da área da pesquisa. ....                                                                                                                                                                                                                                                    | 23 |
| Figura 1.2 – Etapas dos procedimentos técnicos e metodológicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. ....                                                                                                                                                                                    | 27 |
| Figura 2.1 – Representação dos cursos d'água classificados segundo a hierarquia fluvial de Strahler (1964).....                                                                                                                                                                                       | 34 |
| Figura 2.2 – Espacialização da hipsometria da microrregião de Porto Nacional/ MATOPIBA. ....                                                                                                                                                                                                          | 47 |
| Figura 2.3 – Espacialização da declividade da microrregião de Porto Nacional/ MATOPIBA. ....                                                                                                                                                                                                          | 49 |
| Figura 2.4 – Curvas de nível com equidistância de 100 m na microrregião de Porto Nacional/ MATOPIBA. ....                                                                                                                                                                                             | 51 |
| Figura 2.5 – Perfis topográficos da bacia Ribeirão Lajeado. ....                                                                                                                                                                                                                                      | 52 |
| Figura 2.6 – Perfis topográficos e hipsometria da bacia Ribeirão Lajeado. ....                                                                                                                                                                                                                        | 53 |
| Figura 2.7 – Espacialização da declividade: Bacia Ribeirão Lajeado. ....                                                                                                                                                                                                                              | 55 |
| Figura 2.8 – Espacialização das curvas de nível da bacia Ribeirão Lajeado. ....                                                                                                                                                                                                                       | 57 |
| Figura 2.9 – Aproximação das curvas de nível, indicando maior declividade, sendo um dos fatores responsáveis pela instalação da PCH Lajeadozinho. ....                                                                                                                                                | 59 |
| Figura 2.10 – Perfil topográfico do vão do Ribeirão Lajeado/TO.....                                                                                                                                                                                                                                   | 60 |
| Figura 2.11 – Distribuição dos comprimentos e das ordens de canais na rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado (TO), segundo a metodologia hierárquica proposta por Strahler (1952, 1964).....                                                                                                      | 62 |
| Figura 2.12 – (A) Delimitação do canal principal do Ribeirão Lajeado conforme Shreve (1966); (B) Parâmetros para identificação de meandros; (C) Extensão do Ribeirão Lajeado da nascente à foz e eixo axial da bacia para cálculo do Índice de Sinuosidade (IS). ....                                 | 66 |
| Figura 2.13 – Análise da integral hipsométrica e a frequência de altitude da bacia Ribeirão Lajeado/TO.....                                                                                                                                                                                           | 70 |
| Figura 2.14 – Perfil longitudinal do Ribeirão Lajeado, com destaque para os trechos de ruptura de declive. O curso do rio está segmentado em alto curso (D), médio curso (C–B) e baixo curso (A). As rupturas de declive identificadas no médio e no baixo curso estão assinaladas por círculos. .... | 71 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 2.15 – Esquema taxonômico dos Domínios Morfoestruturais, Domínios Morfoesculturais e Unidades Geomorfológicas da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....        | 73  |
| Figura 2.16 – Compartimentação dos Domínios Morfoestruturais na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....                                                                | 74  |
| Figura 2.17 – Regiões Geomorfológicas da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....                                                                                       | 75  |
| Figura 2.18 – Contato entre as escarpas do Planalto Dissecado do Tocantins e a Depressão do Médio Tocantins. Trecho da Serra do Lajeado na descida para Palmas, TO-020. .... | 77  |
| Figura 2.19 – Compartimentação das Unidades Geomorfológicas presentes na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....                                                       | 79  |
| Figura 3.1 – Etapas metodológicas para a elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo (1985–2022). ....                                                                   | 101 |
| Figura 3.2 – Uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional / MATOPIBA em 1985. ....                                                                              | 105 |
| Figura 3.3 – Uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional / MATOPIBA em 1995. ....                                                                              | 107 |
| Figura 3.4 – Principais vias de acesso e escoamento na microrregião de Porto Nacional / MATOPIBA em 1995. ....                                                               | 108 |
| Figura 3.5 – Avanço da soja sobre áreas de pastagens entre o período de 1995 a 2005. ....                                                                                    | 112 |
| Figura 3.6 – Intensificação dos usos agropecuários na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....                                                                          | 115 |
| Figura 3.7 – Supressão da cobertura nativa (formação florestal, formação savânica e formação campestre) entre 1985 e 2015. ....                                              | 116 |
| Figura 3.8 – Previsão da supressão da cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA até 2055. ....                                                             | 117 |
| Figura 3.9 – Incremento dos usos agropecuários entre 1985 e 2015 na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. ....                                                            | 118 |
| Figura 3.10 – Comparativo da expansão da soja e da cana-de-açúcar entre 1985 e 2005. ....                                                                                    | 119 |

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.11 – Modelagem preditiva do uso do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, no período de 1985 a 2055. ....                                                                  | 120 |
| Figura 3.12 – Expansão da fronteira agropecuária sobre a APA Serra do Lajeado.....                                                                                                            | 121 |
| Figura 4.1 – Distribuição das classes de solo e localização do ponto de coleta das amostras na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.....                                                   | 138 |
| Figura 4.2 – Expansão agropecuária em platô (imagem A); perfil do solo para coleta das amostras (imagem B); e área com presença de erosão laminar (imagem C). ....                            | 139 |
| Figura 4.3 – Dados climáticos referentes ao ano de 2023 da área da pesquisa. ..                                                                                                               | 140 |
| Figura 4.4 – Proveta com marcação da altura (h); pipeta de 10 mL e pipetador manual. ....                                                                                                     | 147 |
| Figura 4.5 – Difratogramas obtidos pela técnica de difração de raios X (DRX) para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado, apresentados de acordo com a profundidade das amostras. .... | 160 |
| Figura 4.6 – Densidade de partículas do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado ao longo das diferentes profundidades. ....                                                               | 164 |
| Figura 4.7 – Distribuição granulométrica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado ao longo de diferentes profundidades.....                                                             | 165 |
| Figura 4.8 – Contribuição dos microporos, mesoporos e macroporos presentes nos solos. As barras de erro representam o desvio padrão da média. ....                                            | 167 |
| Figura 4.9 – Umidade na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT). As barras de erro representam o desvio padrão da média. ....                                                              | 168 |
| Figura 4.10 – Curva de retenção da água no solo para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado para a camada superficial. ....                                                            | 169 |
| Figura 4.11 – Curva da porosidade livre de água (TP- $\theta_i$ ) em função do diâmetro equivalente dos poros para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado.....                         | 170 |
| Figure 4.12 – Distribuição espacial da perda de solo estimada pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, integrada ao mapa de uso e cobertura do solo. ....                       | 174 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 – Organização dos parâmetros morfométricos utilizados na área da pesquisa.....                                                                                                                                                          | 41  |
| Tabela 2.2 – Distribuição das classes de declividade para Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.....                                                                                                                                             | 48  |
| Tabela 2.3 – Distribuição das classes de declividade para Bacia Ribeirão Lajeado..                                                                                                                                                                 | 54  |
| Tabela 2.4 – Distribuição dos comprimentos e ordens de canais na rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado (TO), segundo a metodologia de Strahler (1952, 1964).....                                                                              | 61  |
| Tabela 2.5 – Hierarquização fluvial e cálculo do índice de bifurcação (Rb) da bacia Ribeirão Lajeado/TO.....                                                                                                                                       | 64  |
| Tabela 2.6 – Classificação do Fator de Forma (Kf) e Coeficiente de Compacidade (Kc).....                                                                                                                                                           | 67  |
| Tabela 2.7 – Estruturação dos parâmetros altimétricos utilizados no cálculo da Integral Hipsométrica (IH) da bacia Ribeirão Lajeado–TO.....                                                                                                        | 69  |
| Tabela 3.1 – Redução da cobertura nativa e expansão agropecuária entre 1985 e 1995. ....                                                                                                                                                           | 109 |
| Tabela 3.2 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (1995–2005).....                                                                                                                            | 110 |
| Tabela 3.3 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (2005–2015).....                                                                                                                            | 113 |
| Tabela 4.1 – Fator C para o Bioma do Cerrado. ....                                                                                                                                                                                                 | 151 |
| Tabela 4.2 – Valores do fator P da RUSLE em função da declividade. ....                                                                                                                                                                            | 152 |
| Tabela 4.3 – Descrição dos fatores utilizados na estimativa da perda de solo pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.....                                                                                                            | 154 |
| Tabela 4.4 – Classes de perda anual de solo pela RUSLE. ....                                                                                                                                                                                       | 157 |
| Tabela 4.5 – Descrição do perfil do solo localizado no alto curso da bacia do Ribeirão Lajeado, microrregião de Porto Nacional/TO.....                                                                                                             | 158 |
| Tabela 4.6 – Parâmetros de difração de raios X correspondentes aos picos identificados para cada mineral, com valores de $2\theta$ , intensidade relativa (%), espaçamento interplanar médio experimental ( $d_{meo}$ ) e teórico ( $d_{teor}$ ).. | 161 |

|                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.7 – Distribuição dos elementos majoritários encontrados nas amostras por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado..... | 163 |
| Tabela 4.8 – Resultados da modelagem de retenção de água no solo e intervalo de valores típicos descritos na literatura para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário.....                                        | 171 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |                                                              |
|------------|--------------------------------------------------------------|
| AMCSD      | <i>American Mineralogist Crystal Structure Database</i>      |
| APA        | Área de Proteção Ambiental                                   |
| BDiA       | Banco de Dados da Biodiversidade                             |
| CC         | Capacidade de campo                                          |
| C-LabMu    | Complexo de Laboratório Multiusuários                        |
| Cm         | Coeficiente de manutenção                                    |
| Dd         | Densidade de drenagem                                        |
| Dm         | Declividade média                                            |
| Dp         | Densidade de partícula                                       |
| DRX        | Difração de Raio X                                           |
| Ds         | Densidade de solo                                            |
| Embrapa    | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária                  |
| FASCA      | Laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais |
| FRX        | Espectrometria de Fluorescência de Raio X                    |
| Fxw        | PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário                           |
| GITE       | Grupo de Inteligência Territorial Estratégica                |
| Hi         | Integral Hipsométrica                                        |
| Ir         | Índice de rugosidade                                         |
| IS         | Índice de sinuosidade                                        |
| Kc         | Coeficiente de compacidade                                   |
| Kf         | Coeficiente de forma (fator de forma)                        |
| MDE        | Modelo Digital de Elevação                                   |
| Naturatins | Instituto Natureza do Tocantins                              |
| PCH        | Pequena Central Hidrelétrica                                 |
| POPs       | Procedimento operacional padrão                              |
| PT         | Porosidade total                                             |
| QGIS       | Quantum Geographic Information System                        |
| Rb         | Relação de bifurcação                                        |
| RUSLE      | <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>                  |
| SAT        | Saturação                                                    |
| SiBCS      | Sistema Brasileiro de Classificação de Solos                 |
| SIG        | Sistema de Referências Geográficas                           |
| TFSA       | Terra Fina Seca ao Ar                                        |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL</b>                                                                                           | 19  |
| 1.1 Contextualização da pesquisa                                                                                               | 21  |
| 1.2 O que esse estudo propõe                                                                                                   | 24  |
| 1.3 Metodologia geral da tese                                                                                                  | 25  |
| <b>CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA E GEOMORFOLÓGICA DA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA</b>                 | 28  |
| 2.1 Introdução                                                                                                                 | 29  |
| 2.2 Fundamentação teórica                                                                                                      | 31  |
| 2.3 Material e Métodos                                                                                                         | 38  |
| 2.3.1 Análise geomorfométrica                                                                                                  | 38  |
| 2.3.2 Parâmetros geomorfométricos de bacias hidrográficas                                                                      | 40  |
| 2.3.3 Métodos e técnicas utilizados para análise geomorfológica                                                                | 45  |
| 2.4 Resultados                                                                                                                 | 46  |
| 2.4.1 Caracterização geomorfométrica                                                                                           | 46  |
| 2.4.2 Caracterização geomorfológica                                                                                            | 72  |
| 2.5 Discussão                                                                                                                  | 80  |
| 2.6 Conclusão                                                                                                                  | 85  |
| Referências                                                                                                                    | 87  |
| <b>CAPÍTULO 3 – DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E COBERTURA DO SOLO NA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA (1985-2055)</b> | 95  |
| 3.1 Introdução                                                                                                                 | 96  |
| 3.2 Fundamentos teóricos e abordagens conceituais                                                                              | 98  |
| 3.3 Metodologia e procedimentos técnicos                                                                                       | 100 |
| 3.4 Resultados                                                                                                                 | 103 |
| 3.4.1 Dinâmica espaço-temporal do uso e da cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional, MATOPIBA (1985-2005)           | 103 |
| 3.4.2 Perspectivas de uso e cobertura do solo até 2055                                                                         | 116 |
| 3.5 Discussão                                                                                                                  | 122 |
| 3.6 Conclusão                                                                                                                  | 124 |
| Referências                                                                                                                    | 126 |

## CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HIDRÁULICA DO PLINTOSSOLO PÉTRICO CONCRECIONÁRIO NA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA.....131

|            |                                                                                                                |            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.1</b> | <b>Introdução.....</b>                                                                                         | <b>134</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Aspectos teóricos .....</b>                                                                                 | <b>135</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Material e métodos.....</b>                                                                                 | <b>137</b> |
| 4.3.1      | Critério para seleção das áreas e coleta das amostras .....                                                    | 137        |
| 4.3.2      | Difração de raio X (DRX) .....                                                                                 | 141        |
| 4.3.3      | Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) .....                                                         | 142        |
| 4.3.4      | Propriedades físico-hidráulicas do solo .....                                                                  | 143        |
| 4.3.5      | Análise granulométrica.....                                                                                    | 145        |
| 4.3.6      | Densidade de partícula (Dp) .....                                                                              | 147        |
| 4.3.7      | Metodologia de Estimativa da Perda de Solo por Meio da RUSLE ...                                               | 148        |
| 4.3.7.1    | <i>Fator R – Erosividade da Chuva.....</i>                                                                     | <i>149</i> |
| 4.3.7.2    | <i>Fator K – Erodibilidade do Solo .....</i>                                                                   | <i>150</i> |
| 4.3.7.3    | <i>Fator LS – Comprimento e Declividade das Encostas .....</i>                                                 | <i>150</i> |
| 4.3.7.4    | <i>Fator C – Cobertura e Manejo .....</i>                                                                      | <i>151</i> |
| 4.3.7.5    | <i>Fator P – Práticas Conservacionistas .....</i>                                                              | <i>152</i> |
| 4.3.7.6    | <i>Cálculo da Equação RUSLE.....</i>                                                                           | <i>152</i> |
| 4.3.7.7    | <i>Classificação da Perda de Solo .....</i>                                                                    | <i>157</i> |
| <b>4.4</b> | <b>Resultados .....</b>                                                                                        | <b>157</b> |
| 4.4.1      | Análises morfopedológicas da microrregião de Porto Nacional /<br>MATOPIBA .....                                | 157        |
| 4.4.2      | Difração de raios X (DRX) .....                                                                                | 159        |
| 4.4.3      | Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX).....                                                          | 162        |
| 4.4.4      | Densidade de partícula, e textura, análise de cor e morfologia .....                                           | 164        |
| 4.4.5      | Porosidade total, microporosidade, mesoporosidade, macroporosi-<br>dade e densidade do solo .....              | 166        |
| 4.4.6      | Curva de retenção da água no solo.....                                                                         | 168        |
| 4.4.7      | Resultados da Estimativa da Perda de Solo por Meio da RUSLE na<br>Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA..... | 172        |
| <b>4.5</b> | <b>Discussão .....</b>                                                                                         | <b>175</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Conclusão .....</b>                                                                                         | <b>183</b> |
|            | <b>Referências .....</b>                                                                                       | <b>185</b> |

|                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                        | <b>195</b> |
| <b>5.1 Retomada dos objetivos e abordagem da pesquisa .....</b>       | <b>195</b> |
| <b>5.2 Síntese integrada dos resultados por capítulo.....</b>         | <b>195</b> |
| 5.2.1 Convergência de resultados .....                                | 196        |
| <b>5.3 Discussão crítica: hipótese, robustez dos resultados .....</b> | <b>201</b> |
| <b>5.4 Contribuições da tese.....</b>                                 | <b>201</b> |
| <b>5.5 Desdobramentos e perspectivas futuras .....</b>                | <b>202</b> |

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL

A tese intitulada “Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil” apresenta como foco central compreender como a intensificação das atividades agropecuárias influencia as propriedades físicas, hidráulicas e mineralógicas de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em uma região marcada por acelerada conversão de vegetação nativa em áreas agrícolas. Essa realidade tem se intensificado no Brasil nas últimas décadas, impulsionada, sobretudo, pela expansão da agropecuária em novas fronteiras agrícolas (IBGE, 2020; EMBRAPA, 2018; Brannstrom, 2020).

Um dos principais exemplos contemporâneos dessa transformação territorial é o MATOPIBA, acrônimo que designa porções dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Essa área, embora historicamente ocupada por populações rurais e comunidades tradicionais, passou a integrar o circuito do agronegócio de larga escala, promovendo profundas alterações nos padrões de uso e cobertura da terra e na funcionalidade ambiental dos solos tropicais (Pacheco; Barros, 2020; Almeida *et al.*, 2021). A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA constitui-se como um território emblemático dessas transformações, por reunir condições naturais e antrópicas que permitem investigar de forma integrada os efeitos do uso intensivo do solo sobre sua dinâmica físico-hidráulica (MapBiomass, 2023; Agroicone, 2024).

No bioma Cerrado — predominante no MATOPIBA e considerado um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade — as consequências dessa ocupação têm sido severas (IPAM, 2023; MapBiomass, 2023; CEPF, 2020; WORLDATLAS, 2021). A conversão da vegetação nativa em monoculturas e pastagens tem provocado fragmentação ecológica, compactação do solo, intensificação da erosão e alterações nos ciclos hidrológicos e climáticos (Teixeira *et al.*, 2017; Walter; Ribeiro, 2016). Além disso, estudos indicam que a expansão agropecuária recente tem ampliado a pressão sobre áreas de recarga hídrica e ambientes sensíveis, intensificando a vulnerabilidade socioambiental da região (MMA, 2022; Ferreira; Huete, 2014).

Neste contexto, a microrregião de Porto Nacional, localizada no estado do Tocantins, destaca-se como uma das 31 microrregiões geoeconômicas do MATOPIBA. Desde a década de 1990, com a implantação da capital Palmas/TO, a microrregião passou por um intenso processo de reestruturação produtiva, caracterizado pela perda de cobertura vegetal nativa, substituição dos sistemas

tradicionais de uso do solo e aumento da pressão sobre áreas ambientalmente sensíveis (SEPLAN-TO, 2021). Tais transformações são coerentes com processos observados em outras frentes agrícolas do Cerrado, onde políticas territoriais e investimentos logísticos atuam como indutores da mudança no uso do solo (Toledo; Barreto, 2017).

É nesta microrregião que se concentra o presente estudo, com ênfase nos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, classe de solo de ampla ocorrência regional, cujas propriedades físico-hidráulicas e mineralógicas são profundamente influenciadas pelas condições hidromórficas e pelo uso intensivo do solo. A presença de material plíntico, rico em ferro, associada a ciclos de umedecimento e secagem, confere a esse solo características que condicionam sua dinâmica hídrica, favorecendo a ocorrência de erosão laminar em áreas degradadas (Santos *et al.*, 2018; EMBRAPA, 2021). Adicionalmente, pesquisas recentes demonstram que PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em ambientes tropicais apresentam elevada suscetibilidade à compactação sob mecanização agrícola intensiva (Brady; Weil, 2017; EMBRAPA, 2019).

Diante desse cenário, o estudo parte dos seguintes problemas centrais: (1) Como a expansão agropecuária no MATOPIBA, especialmente na microrregião de Porto Nacional, tem afetado as propriedades físico-hidráulicas e mineralógicas de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários? e (2) Como essas alterações se relacionam com os condicionantes morfopedológicos e geomorfológicos da paisagem?

A hipótese principal estabelece que a conversão de vegetação nativa em uso agropecuário provoca alterações significativas nas propriedades físicas, hidráulicas e mineralógicas dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, tornando-os mais suscetíveis à degradação e à perda de funcionalidade ambiental. Além disso, pressupõe-se que tais alterações apresentam forte associação espacial com os condicionantes geomorfológicos, como declividade, formas de relevo e proximidade de drenagens (Miranda *et al.*, 2020; Hutchinson; Xu; Stein, 2011). Por fim, considera-se que a modelagem preditiva do uso do solo pode subsidiar cenários futuros de ocupação, permitindo avaliar impactos potenciais sobre a dinâmica dos solos (MapBioma, 2023).

O objetivo principal deste estudo é analisar os efeitos da expansão agropecuária sobre os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários da microrregião de

Porto Nacional/MATOPIBA, com foco nas mudanças físico-hidráulicas e mineralógicas, integradas aos aspectos geomorfológicos e ao uso da terra.

A abordagem metodológica está estruturada em três eixos: (1) análise geomorfológica e geoespacial, com uso de técnicas de geomorfometria, SIG e modelos digitais de elevação (Jenson; Domingue, 1988); (2) análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo, fundamentada em séries históricas do MapBioma e modelagem preditiva; e (3) caracterização dos atributos físicos, hidráulicos, químicos e mineralógicos dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, integrados às condições de relevo e aos processos erosivos, com ênfase na RUSLE (Renard *et al.*, 1997; Wischmeier; Smith, 1978).

Espera-se que esta tese contribua para o entendimento integrado entre relevo, uso da terra e comportamento de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em áreas de fronteira agrícola no Cerrado, fornecendo subsídios técnicos e científicos ao planejamento territorial, ao manejo sustentável do solo e à formulação de políticas públicas sensíveis às especificidades ambientais do MATOPIBA. Além disso, buscase fortalecer o uso de geotecnologias e abordagens interdisciplinares como ferramentas essenciais para a análise de paisagens em transformação.

## 1.1 Contextualização da pesquisa

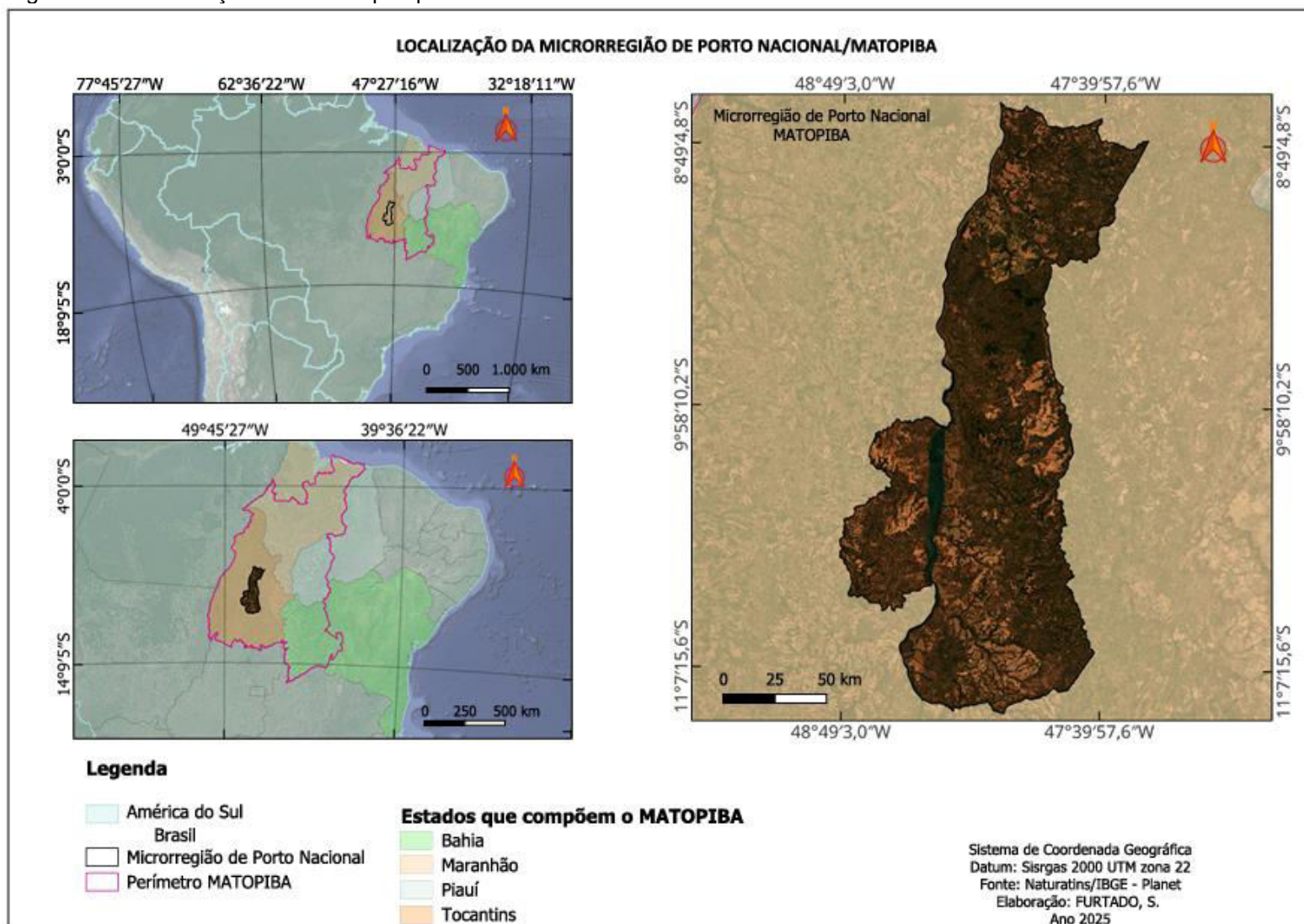
A pesquisa teve como área de estudo o MATOPIBA — acrônimo que reúne porções dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia — região reconhecida como a mais nova fronteira agropecuária do Brasil (Pacheco; Barros, 2020; EMBRAPA, 2015), destacando-se pela sua relevância estratégica na expansão da atividade agrícola e pela complexidade de suas dinâmicas socioeconômicas e ambientais (Brannstrom, 2020). O MATOPIBA situa-se entre as coordenadas geográficas 02°00' S a 13°30' S e 42°00' O a 47°30' O, abrangendo uma área de aproximadamente 730.000 km<sup>2</sup> (Miranda; Magalhães; Carvalho, 2014), correspondendo a cerca de 9% do território nacional (IBGE, 2023). Predominantemente inserido no bioma Cerrado, o MATOPIBA consolidou-se nas últimas décadas como uma das principais fronteiras de expansão da agricultura de larga escala, especialmente voltada à produção de grãos como soja e milho (Pereira *et al.*, 2018; MapBiomas, 2023). O Cerrado é reconhecido internacionalmente como um dos hotspots mundiais de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000; CEPF, 2020).

No entanto, essa intensificação produtiva tem resultado em profundas transformações na paisagem, na estrutura fundiária e nos processos ecológicos locais, com destaque para a degradação dos solos e a fragmentação de ecossistemas nativos (MMA, 2022; Ferreira; Huete, 2014).

Localizada na região central do estado do Tocantins, a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (Figura 1.1) — situada entre as coordenadas 09°30' S a 11°00' S e 47°00' O a 48°30' O — corresponde a uma das 31 microrregiões geoeconômicas que compõem o MATOPIBA (SEPLAN-TO, 2021). Com uma extensão de 21.197,73 km<sup>2</sup> (IBGE, 2023a) e composta por 11 municípios, essa microrregião tem vivenciado intensas transformações desde a década de 1990, impulsionadas, em especial, pela criação do estado do Tocantins e pela implantação da nova capital, Palmas (Souza; Lima, 2020; SEPLAN-TO, 2021). Essas mudanças estimularam a modernização da agricultura, a conversão de áreas de Cerrado em lavouras e pastagens e a crescente pressão sobre áreas ambientalmente sensíveis, como fundos de vale, encostas e zonas de recarga hídrica (MMA, 2022; MAPBIOMA, 2023).

A microrregião de Porto Nacional representa um recorte territorial ideal para o estudo das interações entre relevo, uso do solo e a dinâmica dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, classe de solo expressiva na região (EMBRAPA, 2018; Santos *et al.*, 2018) e particularmente sensível à intensificação do uso antrópico (EMBRAPA, 2021; Brady; Weil, 2017). Sua composição espacial, que integra áreas urbanas, agropecuárias e remanescentes naturais, possibilitou uma análise integrada dos efeitos da conversão da vegetação sobre seus aspectos geomorfológicos, assim como sobre as propriedades físico-hidráulicas e mineralógicas de solos tropicais (Lima *et al.*, 2023).

Figura 1.1 – Localização da área da pesquisa.



Fonte: A autora.

## 1.2 O que esse estudo propõe

Nas últimas décadas, o Brasil tem vivenciado um processo acelerado de reconfiguração territorial impulsionado pela expansão das atividades agropecuárias sobre áreas anteriormente ocupadas por vegetação nativa, especialmente no bioma Cerrado (MMA, 2022; MapBiomias, 2023). Esse avanço produtivo tem se concentrado com particular intensidade na região do MATOPIBA, reconhecida como uma das principais fronteiras agrícolas contemporâneas do país, marcada pela modernização tecnológica, pela ampliação das áreas cultivadas e pela crescente inserção no circuito global do agronegócio (Pacheco; Barros, 2020; Brannstrom, 2020).

Entretanto, a expansão agropecuária no MATOPIBA tem sido acompanhada por transformações ambientais expressivas, sobretudo no que diz respeito à alteração do uso do solo, à pressão sobre ecossistemas sensíveis e à intensificação de processos de degradação (Ferreira; Huete, 2014; MMA, 2022). No âmbito desses processos, o bioma Cerrado — reconhecido internacionalmente como *hotspot* de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000; CEPF, 2020) — tem se mostrado particularmente vulnerável, demandando estudos que articulem produção agropecuária, conservação ambiental e uso sustentável do território (Walter; Ribeiro, 2016).

A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, no estado do Tocantins, constitui um recorte territorial especialmente relevante para essa análise, pois passou por um processo acelerado de reestruturação socioeconômica a partir da década de 1990, impulsionado pela criação do estado do Tocantins e pela implantação da capital Palmas (SEPLAN-TO, 2021; Souza; Lima, 2020). Tais transformações intensificaram a conversão de áreas naturais em sistemas produtivos e ampliaram a pressão sobre solos e paisagens, com impactos diretos sobre sua funcionalidade e estabilidade (Sano *et al.*, 2019; MapBiomias, 2023).

Essa microrregião abriga extensas áreas de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, solos hidromórficos que apresentam alternância de ciclos de umedecimento e secamento e elevada sensibilidade a modificações no uso da terra (Santos *et al.*, 2018; EMBRAPA, 2021). A presença de horizonte plíntico, rico em ferro, condiciona propriedades particulares de retenção hídrica e suscetibilidade à erosão laminar, intensificadas sob uso agrícola mecanizado (Brady; Weil, 2017; Lima *et al.*, 2023).

Nesse sentido, a presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender, de forma científica e integrada, os efeitos da conversão de vegetação nativa em usos agropecuários sobre os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários da microrregião de Porto Nacional, especialmente no que se refere às suas propriedades físicas, hidráulicas e mineralógicas. Considerando o papel desses solos na regulação hídrica, na sustentação da vegetação e no armazenamento de nutrientes, torna-se fundamental avaliar como o uso intensivo altera sua funcionalidade, de modo a subsidiar estratégias de manejo, conservação e ordenamento territorial (EMBRAPA, 2018; Renard *et al.*, 1997).

Além disso, o uso de geotecnologias, modelagem preditiva e análises laboratoriais avançadas, como Difração de Raios X (DRX) e Espectrometria Fluorescência de Raios X (FRX), aprofundará a compreensão das interações entre solo, relevo e uso da terra, alinhando-se aos referenciais contemporâneos da pedologia, da geografia física e da ciência do solo (Teixeira *et al.*, 2017; Hutchinson; Xu; Stein, 2011).

Assim, a pesquisa se justifica tanto pela originalidade da abordagem integrada quanto pela relevância ambiental, científica e socioeconômica de seu objeto, contribuindo para o debate sobre sustentabilidade em regiões de fronteira agrícola e reforçando a urgência de estratégias que conciliem produção e conservação no contexto do MATOPIBA (Toledo; Barreto, 2017), além de incorporar uma perspectiva metodológica multiescalar que progride do nível macro ao micro, iniciando pelas análises de imagens de satélite, avançando para as observações de campo e investigações laboratoriais e culminando em técnicas analíticas de maior detalhamento, como DRX e FRX, o que fortalece a robustez das interpretações e amplia a consistência das conclusões apresentadas.

### **1.3 Metodologia geral da tese**

A presente pesquisa adota uma abordagem interdisciplinar, com base na integração de técnicas de geoprocessamento, análise morfométrica e caracterização físico-hidráulica de solos, voltadas à compreensão das interações entre relevo, uso da terra e funcionalidade hidrológica de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários. As etapas metodológicas estão distribuídas ao longo dos capítulos, conforme segue:

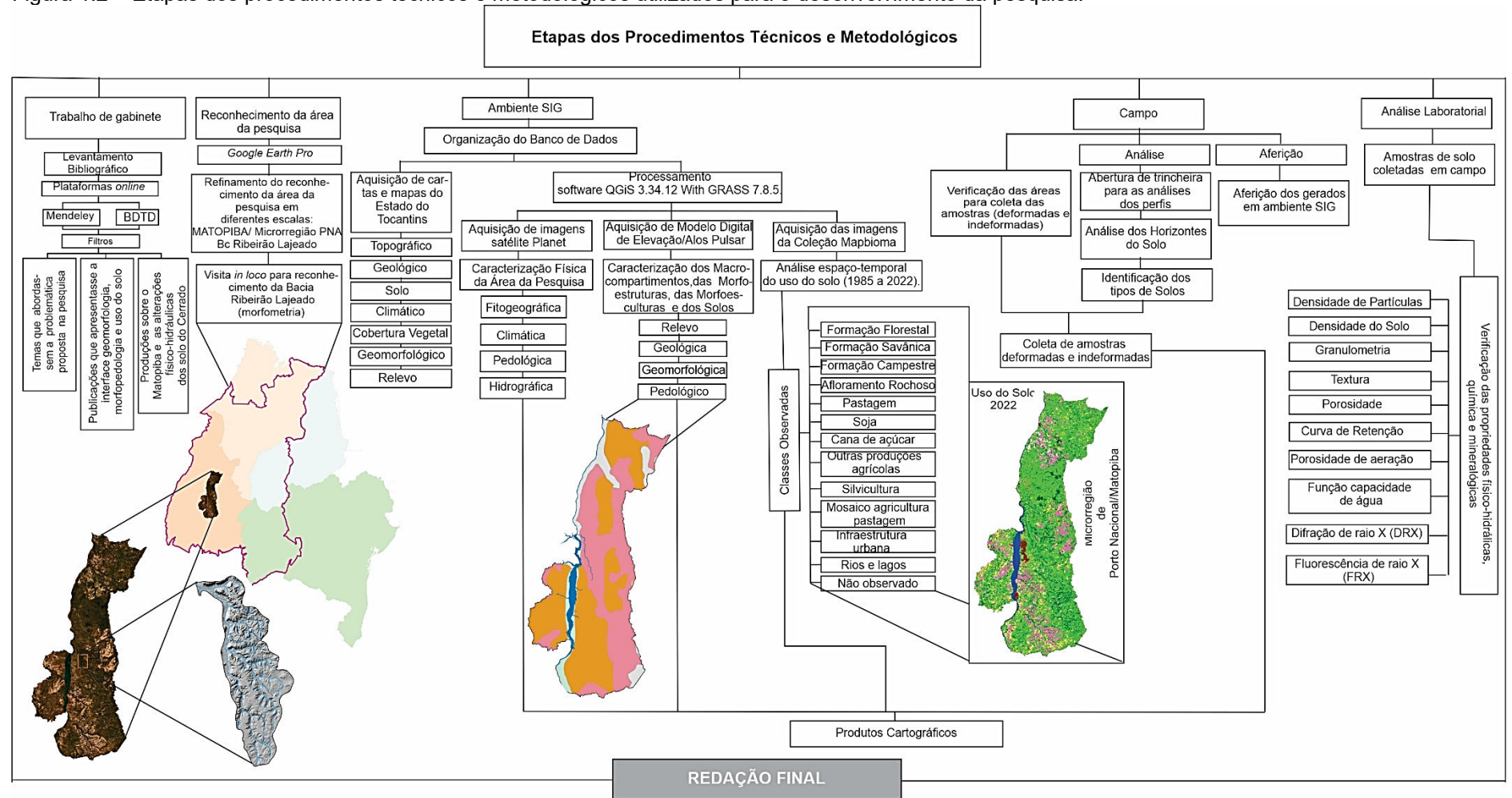
No Capítulo 2, realiza-se a análise geomorfométrica da Microrregião de Porto Nacional, a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) obtidos das plataformas *Copernicus* (30 m). As análises incluíram reclassificação hipsométrica, declividade, geração de curvas de nível e cálculo de parâmetros morfométricos em ambiente SIG (QGIS 3.40.11).

No Capítulo 3, é realizada a análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, com base nos dados do MapBioma – Coleção 8 (período de 1985 a 2022). A série histórica permite identificar padrões de conversão da vegetação nativa em áreas antrópicas, subsidiando a modelagem preditiva do uso e cobertura do solo até o ano de 2055.

O Capítulo 4 contempla a caracterização físico-hidráulica de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários sob Sistema de Plantio Direto (SPD), com base em coletas de campo e análises laboratoriais de textura, densidade e curva de retenção de água. Os resultados foram confrontados com os dados geomorfológicos e morfométricos, visando compreender a influência do relevo e do uso do solo sobre a funcionalidade hidrológica.

Diante do exposto, compreende-se que o conjunto metodológico adotado permite, uma leitura integrada da paisagem e das respostas do solo à ocupação antrópica, subsidiando a elaboração de inferências sobre vulnerabilidade ambiental e sustentabilidade do uso da terra na área de estudo. As etapas de cada procedimento técnico e metodológico encontram-se na figura que segue (Figura 1.2). Importa salientar que, além desta abordagem metodológica geral, cada capítulo apresenta um conjunto próprio de procedimentos analíticos e técnicas específicas, descritos de maneira minuciosa conforme as demandas e escalas de investigação de cada etapa.

Figura 1.2 – Etapas dos procedimentos técnicos e metodológicos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: A autora.

## **CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA E GEOMORFOLÓGICA DA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA**

### **RESUMO**

FURTADO, Simonní Elias Leite. **Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil**. Orientador: Luiz Fernando Pires. 2025. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

Este capítulo apresenta a caracterização geomorfométrica e geomorfológica da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, fundamentada na integração entre análises morfométricas e compartimentação geomorfológica multiescalar. Foram aplicados parâmetros lineares, areais e hipsométricos, além de estudos de declividade e curvas de nível, com dados processados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) no software QGIS. Os resultados geomorfométricos revelaram que a bacia Ribeirão Lajeado apresenta baixa densidade de drenagem, relevo predominantemente plano a suave ondulado e uma integral hipsométrica de 0,39, indicando estágio morfogenético maduro e forte rebaixamento erosivo. A predominância de canais de 1ª ordem, a baixa sinuosidade do rio principal e o elevado coeficiente de manutenção reforçam a influência da permeabilidade do substrato e da estrutura geológica na organização da drenagem. Adicionalmente, o coeficiente de bifurcação médio ( $R_b = 3,54$ ) indica uma rede de drenagem moderadamente ramificada, enquanto o índice de rugosidade ( $R_n \approx 0,75$ ) evidencia energia de relevo intermediária, compatível com dissecação moderada. O rio principal apresenta extensão de 76,70 km e sinuosidade igual a 1,27, reforçando seu caráter levemente sinuoso. A amplitude altimétrica de 537 m, combinada à área de 581,80 km², confirma a expressiva variação topográfica da bacia. Em escala regional, foram identificados quatro Domínios Morfoestruturais e seis Domínios Morfoesculturais, evidenciando a atuação conjunta de crátons, cinturões móveis e coberturas sedimentares na compartimentação do relevo. Foram delimitadas treze Unidades Geomorfológicas, expressando relevos planálticos dissecados, depressões interplanálticas e formas residuais. Os resultados demonstram que a geomorfologia da área é condicionada por controles estruturais profundos e por processos erosivos prolongados, reforçando o papel da análise geomorfológica e geomorfométrica na interpretação da evolução da paisagem e no suporte ao planejamento territorial e ambiental.

**Palavras-chave:** compartimentação geomorfológica; integral hipsométrica; geoprocessamento; morfodinâmica; planejamento ambiental.

### **ABSTRACT**

FURTADO, Simonní Elias Leite. **Land use and land cover dynamics and environmental transformation in the Porto Nacional/MATOPIBA Microregion, Tocantins - Brazil**. Advisor: Luiz Fernando Pires. 2025. Thesis (Ph.D. in Geography) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

This chapter presents the geomorphometric and geomorphological characterization of the Porto Nacional/MATOPIBA microregion, based on the integration of morphometric analyses and multiscale geomorphological compartmentalization. Linear, areal, and hypsometric parameters were applied, in addition to slope analysis and contour extraction, using data processed in a Geographic Information System (GIS) environment in QGIS software. The geomorphometric results revealed that the Ribeirão Lajeado basin exhibits low drainage density, predominantly flat to gently undulating relief, and a hypsometric integral of 0.39, indicating a mature morphogenetic stage and advanced erosional lowering. The predominance of first-order channels, the low sinuosity of the main river, and the high maintenance coefficient reinforce the influence of substrate permeability and geological structure on drainage organization. Additionally, the mean bifurcation ratio ( $R_b = 3.54$ ) indicates a moderately branched drainage network, while the ruggedness number ( $R_n \approx 0.75$ ) reflects intermediate relief energy consistent with moderate dissection. The main river reaches a length of 76.70 km and exhibits a sinuosity index of 1.27, confirming its slightly sinuous character. The altimetric amplitude of 537 m, combined with the basin area of 581.80 km<sup>2</sup>, further highlights the significant topographic variation within the system. At the regional scale, four Morpho-Structural Domains and six Morpho-Scutural Domains were identified, demonstrating the combined influence of cratonic areas, mobile belts, and sedimentary covers in shaping the relief. Thirteen Geomorphological Units were mapped, encompassing dissected plateau landscapes, interplateau depressions, and residual landforms. Overall, the results show that the region's geomorphology is controlled by deep structural frameworks and prolonged erosional processes, underscoring the importance of geomorphological and geomorphometric analysis in understanding landscape evolution and supporting territorial and environmental planning.

**Keywords:** geomorphological compartmentalization; hypsometric integral; geoprocessing; morphodynamics; environmental planning.

## 2.1 Introdução

A compreensão da dinâmica da paisagem e dos processos morfogenéticos que atuam sobre a superfície terrestre exige uma abordagem integrada entre a geomorfologia tradicional e as ferramentas analíticas proporcionadas pela geomorfometria. Esse tipo de abordagem tem se mostrado particularmente eficaz em regiões inseridas em contextos geográficos complexos, como o MATOPIBA – fronteira agrícola que abrange porções do Tocantins, Maranhão, Piauí e Bahia – onde as transformações antrópicas e os condicionantes naturais interagem de forma intensa.

Neste capítulo, concentra-se a análise da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, tratada como unidade territorial principal, e em uma escala geográfica mais detalhada destaca-se a bacia Ribeirão Lajeado, selecionada como recorte específico para a aplicação das técnicas geomorfométricas. Embora a

microrregião compreenda outras bacias hidrográficas, a escolha da bacia Ribeirão Lajeado decorre de sua representatividade físico-ambiental, coerência espacial e adequação aos objetivos da pesquisa, de modo que sua análise aprofunda — e não substitui — a compreensão do relevo regional (Ross, 1992; Christofolletti, 1980; Florenzano, 2011). A paisagem desse sistema hidrográfico expressa de maneira clara a interação entre fatores geológicos, climáticos, pedológicos e hidrológicos, justificando seu emprego como escala de detalhamento (Souza *et al.*, 2020; ANA, 2019).

O uso de geotecnologias, especialmente Sistemas de Informações Geográficas (SIG), imagens de satélite e Modelos Digitais de Elevação (MDEs), possibilita extrair com maior precisão os parâmetros geomorfométricos e realizar compartimentações geomorfológicas baseadas em critérios morfodinâmicos e estruturais (Hutchinson; Xu; Stein, 2011; Evans, 1972). A caracterização geomorfológica da bacia permite quantificar formas, padrões do relevo e propriedades métricas associadas à drenagem, enquanto a análise geomorfológica identifica domínios morfoestruturais e morfoesculturais predominantes, evidenciando as relações entre estrutura tectônica, litologia e processos superficiais (Ross, 2016; IBGE, 2023). Essa integração aprofunda o diagnóstico físico-territorial da microrregião e contribui para orientar estratégias de uso da terra mais compatíveis com suas potencialidades e fragilidades ambientais (EMBRAPA, 2018; Santos *et al.*, 2018).

Dessa forma, o presente capítulo objetiva analisar, sob uma perspectiva multiescalar e interdisciplinar, os aspectos geomorfométricos e geomorfológicos da bacia do Ribeirão Lajeado no contexto da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, reforçando que a escala da bacia constitui um aprofundamento da leitura regional, e não um recorte independente. Destaca-se, ainda, o potencial das geotecnologias no estudo do relevo e na gestão ambiental sustentável, apoiadas por avanços recentes em ferramentas de análise espacial (Jenson; Domingue, 1988; Tarboton, 1997). Para orientar essa análise, são consideradas cinco hipóteses principais: (i) a baixa sinuosidade dos canais fluviais reflete o controle estrutural exercido por lineamentos geológicos, que tendem a orientar a drenagem em segmentos mais retilíneos; (ii) a baixa densidade de drenagem está associada ao relevo suave e à dinâmica climática regional, mais do que à permeabilidade do solo ou à porosidade do substrato geológico; (iii) a bacia encontra-se em estágio geomorfológico maduro, com predominância de processos erosivos verticais e relativa estabilidade morfodinâmica;

(iv) a compartimentação do relevo da microrregião é fortemente condicionada pela estrutura geológica regional, refletindo a influência de crátons, cinturões móveis e coberturas sedimentares; e (v) a expansão agropecuária nas áreas de platô tem exercido pressão sobre a vegetação nativa, com potencial para alterar a dinâmica da drenagem superficial e intensificar processos erosivos.

## 2.2 Fundamentação teórica

A análise geomorfométrica permite a extração de dados quantitativos relativos às formas do relevo e, quando aliada à análise temporal e ao uso de geotecnologias, constitui uma metodologia eficaz para identificar, quantificar e prever os efeitos das pressões antrópicas sobre os sistemas ambientais. Nesse sentido, a caracterização geomorfométrica possibilita mensurar níveis de vulnerabilidade ambiental decorrentes das intervenções humanas, além de subsidiar diagnósticos físicos e avaliações de risco (Memon; Patel; Parangi, 2024; Mani *et al.*, 2024; Pike; Evans; Hengl, 2009).

A geomorfometria pode ser definida como a ciência que relaciona atributos e parâmetros quantitativos destinados à descrição dos elementos morfológicos da paisagem. Segundo Pike (2000), trata-se de uma disciplina que sistematiza medidas e técnicas voltadas ao entendimento das formas do terreno. Wilson (2012) complementa que a geomorfometria constitui um campo dedicado à modelagem digital do relevo, apoiado em algoritmos, estatísticas espaciais e análises de superfície, enfatizando sua vinculação contemporânea com a Ciência da Computação e com o Sensoriamento Remoto. Essa natureza interdisciplinar é reforçada por estudos que destacam sua interface com as Ciências da Terra e com métodos quantitativos, permitindo a produção de dados relevantes para múltiplas áreas, como hidrologia, pedologia, planejamento territorial e ecologia da paisagem (Bortolini; Silveira; Silveira, 2022; Rasemann *et al.*, 2004; Silva; Oka-Fiori; Silveira, 2017; Evans, 1972; Hengl; Reuter, 2011).

Nesse contexto, o emprego de geotecnologias tem se consolidado como fundamento técnico-metodológico essencial, possibilitando análises geomorfométricas e geomorfológicas em diferentes escalas, com precisão crescente e maior eficiência na interpretação dos padrões espaciais (Florenzano, 2008; Li; Zhu; Gold, 2005). Ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG), imagens orbitais de média e alta resolução e Modelos Digitais de Elevação (MDE) ampliaram

a capacidade de representar, quantificar e simular processos do relevo, consolidando-se como recursos indispensáveis em estudos ambientais contemporâneos.

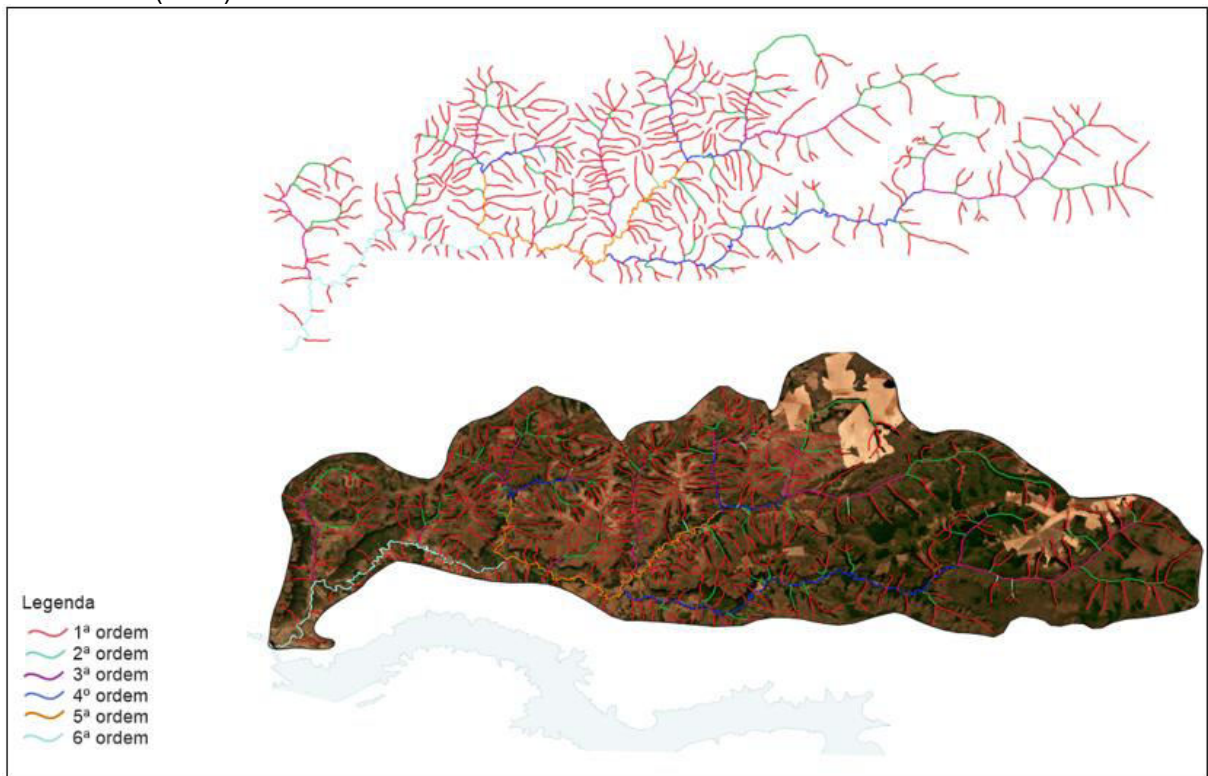
A hipsometria, por sua vez, constitui uma técnica fundamental para quantificar a variação altitudinal e compreender a distribuição vertical das superfícies, sendo amplamente utilizada para delimitar compartimentos altimétricos e inferir o estágio de evolução do relevo. Integrada a dados de sensoriamento remoto em ambiente SIG, possibilita a elaboração de mapas temáticos e curvas hipsométricas, indicadores importantes da maturidade da paisagem e de sua suscetibilidade a processos erosivos (Valeriano; Rossetti, 2012; Montgomery, 2001). Esses dados são particularmente relevantes em áreas com grande amplitude altitudinal, submetidas ao avanço da fronteira agrícola, onde práticas inadequadas de manejo intensificam a degradação do solo e fragmentam ecossistemas. Para o IBGE (2018), compreender a estrutura altimétrica do território é condição essencial para o planejamento territorial, enquanto Sena *et al.* (2012) destacam que a hipsometria integrada ao SIG é ferramenta diagnóstica estratégica para a identificação de áreas prioritárias à conservação.

A declividade representa outro parâmetro crucial para caracterizar fisicamente o relevo, permitindo avaliar aptidão agrícola, riscos erosivos e susceptibilidade a escorregamentos. Superfícies com declividades elevadas tendem a intensificar os fluxos de escoamento superficial, acelerando a perda de solo, sobretudo em regiões onde a pressão antrópica é intensa, como no Cerrado e na Amazônia (Borges; Moura; Monteiro, 2020; Bastos, 2022). A geração de mapas de declividade em ambiente SIG, com base em MDE processados por rotinas específicas, é essencial para subsidiar práticas de manejo e orientar políticas de conservação (Machado; Souza, 2005; Embrapa, 1979; Tarboton, 1997). As curvas de nível, embora representem uma técnica tradicional, continuam desempenhando papel central na representação cartográfica da topografia e na análise morfométrica. Com os avanços das geotecnologias, passaram a ser geradas automaticamente a partir de MDE de alta resolução, ampliando a acurácia das interpretações geomorfológicas (Valeriano; Rossetti, 2012). Estudos recentes demonstram que sua sobreposição a mapas de uso e cobertura do solo possibilita identificar incompatibilidades entre ocupação antrópica e topografia, especialmente em áreas de nascente, onde a supressão da vegetação promove assoreamento e perda de biodiversidade (Melo *et al.*, 2023; Fushimi; Oliveira; Nunes, 2023).

No âmbito das bacias hidrográficas, a geomorfometria inclui métricas classificadas em parâmetros lineares, zonais e hipsométricos, que permitem compreender a organização espacial e funcional da drenagem. Os parâmetros lineares incluem o índice de sinuosidade, a relação de bifurcação e a densidade de drenagem, elementos fundamentais para entender a dinâmica da rede hidrográfica. Os parâmetros zonais envolvem características como coeficiente de compacidade e coeficiente de forma, que descrevem geometricamente a bacia e influenciam sua resposta hidrológica. Já os parâmetros hipsométricos permitem analisar a variação altimétrica e inferir o estágio evolutivo do relevo por meio de métricas como a integral hipsométrica e o índice de rugosidade (Júnior; Barros, 2020; Strahler, 1952, 1964; Horton, 1945).

A hierarquia fluvial constitui um dos elementos mais difundidos na análise da drenagem, sendo fundamental para compreender a organização estrutural da bacia. Embora Horton (1945) tenha estabelecido importantes bases conceituais para esse campo, o método proposto por Strahler (1952, 1964) é amplamente adotado por sua simplicidade e consistência lógica. Nesse sistema, rios sem tributários recebem a classificação de primeira ordem, e à medida que confluências sucessivas ocorrem, novas ordens são atribuídas, até a obtenção da ordem mais elevada na bacia (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Representação dos cursos d'água classificados segundo a hierarquia fluvial de Strahler (1964).



Obs.: os rios de 1ª ordem correspondem às nascentes; os de 2ª e 3ª ordens formam-se pela confluência de canais de mesma ordem; e os de 4ª ordem representam o trecho principal da bacia avaliados neste estudo, constituindo a ordem mais elevada identificada na área.

Fonte: A autora.

A relação de bifurcação ( $R_b$ ) é um dos parâmetros fundamentais para avaliar o grau de dissecação da bacia, possibilitando a identificação de anomalias estruturais. Conforme Christofletti (1980), Horton (1945) definiu esse índice como a razão entre o número de canais de uma determinada ordem e o número de canais da ordem imediatamente superior. Quanto maior o índice de bifurcação, maior o grau de dissecação e menor a permeabilidade do solo, o que influencia diretamente o comportamento hidrológico da bacia (Strahler, 1964; Júnior; Barros, 2020).

Os parâmetros declividade, hipsometria e o índice de concentração de rugosidade (ICR) permitem identificar padrões de relevo e fornecem maior acurácia à análise dos aspectos físicos da área estudada (Bortolini; Silveira; Silveira, 2022).

A densidade de drenagem ( $D_d$ ), introduzida por Horton (1945), é uma métrica importante para avaliar a relação entre a rede de drenagem e fatores como cobertura vegetal, uso do solo, substrato rochoso e condições climáticas. Sua relevância é destacada por autores como Meliani (2006) e Christofletti (1980).

O índice de sinuosidade (IS), por sua vez, expressa o grau de curvatura do canal fluvial. Sinuosidades acentuadas podem indicar controle estrutural ou litológico da drenagem (Guerra; Cunha, 2001; Júnior; Barros, 2020). A literatura geomorfológica reconhece que os meandros podem se formar independentemente da altitude ou dimensão dos rios, desde que haja sedimentos coerentes, firmes e não soltos (Christofolletti, 1980). Já os canais retos são raros na natureza e geralmente associados a falhas tectônicas ou substratos rochosos homogêneos, podendo ser apenas aparentemente retos (Dury, 1976).

Para Júnior e Barros (2020), os principais parâmetros para a análise hipsométrica de bacias hidrográficas são a integral hipsométrica ( $H_i$ ), o índice de rugosidade ( $I_r$ ) e a declividade média ( $D_m$ ). A análise da integral hipsométrica, além de representar a distribuição altimétrica da área da bacia, permite inferir o estágio de dissecação do relevo e o grau de evolução da paisagem (Strahler, 1964). Essas informações são essenciais para o planejamento ambiental e a gestão de áreas sob vulnerabilidade ambiental, fornecendo subsídios para compreender a organização espacial e os processos morfodinâmicos atuantes na área de estudo.

A fundamentação teórica apresentada fornece uma base conceitual e metodológica sólida para a análise morfométrica de paisagens submetidas à expansão agropecuária na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. Os parâmetros geomorfométricos — hipsometria, declividade, curvas de nível, hierarquia fluvial, relação de bifurcação, densidade de drenagem, sinuosidade, rugosidade e integral hipsométrica — combinam técnicas de geotecnologia e SIG, permitindo identificar padrões, riscos e vulnerabilidades na dinâmica territorial. Essa abordagem integrada oferece subsídios valiosos para diagnósticos ambientais e orienta medidas de manejo sustentável, fundamentais para a conservação de ecossistemas em áreas sob pressão de uso intensivo agropecuário. Com isso, estabelece-se um referencial técnico-científico imprescindível ao prosseguimento desta pesquisa.

Para uma compreensão mais abrangente da dinâmica da paisagem, é imprescindível integrar à análise morfométrica a perspectiva da geomorfologia, que oferece subsídios interpretativos acerca das formas do relevo e dos processos responsáveis por sua gênese e transformação. Ross (1990, p. 9 -11) destaca que a geomorfologia constitui um dos alicerces dos arranjos espaciais produzidos e reproduzidos pelas ações antrópicas. Nesse sentido, evidencia-se a interdependência entre forma e processo, marcada pela atuação conjunta de sistemas naturais e

sociais. A esse respeito, Christofolletti (1980) afirma que “os sistemas geomorfológicos não atuam de modo isolado, mas funcionam dentro de um ambiente e fazem parte de um conjunto maior”. O autor enfatiza, assim, a integração entre o sistema climático, o sistema biogeográfico, o sistema geológico e o sistema antrópico, ressaltando a dinamicidade que caracteriza a evolução das paisagens. Considerando que as formas e os processos constituem o âmago da geomorfologia, é possível distinguir, no âmbito dos estudos geomorfológicos, os seguintes sistemas antecedentes, fundamentais para a compreensão das formas de relevo: o sistema climático, o sistema biogeográfico, o sistema geológico e o sistema antrópico (Christofolletti, 1980, p. 3–10).

Neste contexto, considerando-se as estruturas e formas presentes no território brasileiro, observar-se-á a existência de três tipos distintos: os crátons, as bacias sedimentares e os dobramentos antigos. De acordo com Ross (1990, p. 70), no que tange à idade geológica, os terrenos cristalinos, as áreas cratônicas e dobramentos antigos, datados da era Pré-Cambriana, são as formações mais antigas. Já as bacias sedimentares, em sua maioria, datam das eras Paleozoica e Mesozoica. As exceções são as bacias sedimentares da Amazônia e Pantanal, que pertencem ao Cenozoico e aos períodos Terciário e Quaternário respectivamente.

De acordo com Christofolletti (1980, p. 12-13), na segunda metade do século XX, já havia uma grande movimentação de diversos autores buscando uma classificação geomorfológica que pudesse retratar diferentes escalas cartográficas. Dentre eles, o referido autor destaca: Cailleux e Tricart (1956) e Chorley, Haggett e Stoddart (1965). O autor revela, ainda, que em 1946 o soviético Innokenti Petrovich Gerasimov propôs a divisão do relevo em três categorias genéticas:

Unidades Geotexturais, compreendendo as maiores unidades da superfície terrestre [...] Unidades Morfoestruturais, designando os elementos do relevo de ordem média que parecem copilar as unidades morfotecturais (referência a J. A. Mescerjakov), tais como: cadeias de montanha, maciços, planaltos e depressões dos continentes e oceanos; e, Unidades Morfoesculturais, relacionadas à ação dos sistemas morfogenéticos. (Christofolletti, 1980, p. 12-13, grifo nosso).

Neste contexto, compreende-se a importância da organização hierárquica da paisagem, em consonância com uma taxonomia, que por sua vez encontra-se em conformidade com a escala cartográfica a ser analisada e/ou representada em um mapeamento geomorfológico. Nesse sentido, Guerra e Cunha (2001) apresentam os

Domínios Morfoestruturais e as Regiões Geomorfológicas como grandes agrupamentos que são condizentes com uma análise cartográfica com escala entre 1:100.000 a 1:250.000, bem como as Unidades Geomorfológicas devem ser representadas em escala de até 1:50.000.

A caracterização dos Domínios Morfoestruturais está ligada à questão geradora, causal, dos fatos geomorfológicos derivados dos grandes aspectos geotectônicos, dos grandes arranjos geoestruturais e, eventualmente, da predominância de uma litologia bem definida. Esses fatores, em conjunto, geram arranjos regionais de relevo, com formas variadas, mas que guardam relação causal entre si. (Guerra; Cunha, 2001, p. 368).

Em que pese que o Projeto RadamBrasil (Brasil, 1981, SC.22 – Tocantins, fls. 200) não ter utilizado a terminologia Domínio Morfoestrutural, ele apresentou uma justificativa para a substituição da terminologia “Unidades Morfoestruturais” por “Unidades Geomorfológicas”, a qual informava que os dados relativos a morfoestruturas estariam dispostos com outras informações cujos conceitos se apresentavam mais amplos. Logo, depreende-se que a terminologia “Unidades Morfoestruturais” pertence ao rol das compartimentações mais amplas, de uma escala cartográfica menor, que Guerra e Cunha (2001) denominaram de Domínios Morfoestruturais. Assim, ratificam-se as terminologias e conceitos empregados ao longo desta pesquisa.

Em se tratando do ambiente geológico presente na área da pesquisa, os estudos realizados pelo consórcio responsável pela elaboração do Zoneamento Socioeconômico e Ecológico do Estado do Tocantins (Tocantins, 2005) revelaram a existência de um contexto litológico associado ao Embasamento em Estilos Complexos, correspondendo às rochas mais antigas, datadas do Pré-Cambriano, constituído por litotipos do Complexo Goiano (granitos e gnaisses); do Pré-Cambriano Médio, representado pela Suíte Intrusiva de Ipueiras (álcali-granitos e rochas vulcânicas ácidas); e do Siluriano–Devoniano, marcado pela Formação Serra Grande, composta por arenitos, conglomerados, argilitos e estruturas de estratificação cruzada (Brasil, 1981, SC.22 – Tocantins, fl. 200; Pettijohn, 1984; Boggs, 2011).

Ainda em conformidade com a descrição geológica apresentada por Brasil (1981, SC.22 – Tocantins, fl. 200), o Embasamento em Estilo Complexo encontra-se recoberto — salvo nas faixas orogênicas — pelas Bacias e Coberturas Sedimentares e pelos Depósitos Sedimentares Inconsolidados Quaternários. Nestes, observa-se a

ocorrência de unidades devonianas, como a Formação Pimenteiras, caracterizada pela presença de arenitos finos a grosseiros e conglomerados; de coberturas sedimentares terciárias e quaternárias, contendo depósitos areno-pelíticos, canga laterítica e outros materiais associados (Brasil, 1981; Tucker, 2001; Santos *et al.*, 2013); e, por fim, a presença de depósitos aluvionares holocênicos resultantes de eventos de inundação periódica, típicos dos sistemas fluviais tropicais (IBGE, 2018; Bridge; Demicco, 2008).

## 2.3 Material e Métodos

### 2.3.1 Análise geomorfométrica

A análise geomorfométrica da área de estudo fundamentou-se na utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), obtidos de duas fontes principais: o MDE *Copernicus*, com resolução espacial de 30 metros, disponibilizado pela Agência Espacial Europeia (ESA), e o MDE ALOS PALSAR, com resolução de 12,5 metros, fornecido pela NASA/*Alaska Satellite Facility*. O processamento e a análise dos dados foram realizados no ambiente do *software* QGIS, versão 3.40.11 “*Bratislava*” (QGIS Development Team, 2024), assegurando um fluxo de trabalho reprodutível em plataforma de código aberto amplamente reconhecida pela robustez de suas ferramentas de análise espacial (Li; Zhu; Gold, 2005; Hengl; Reuter, 2011).

Para a caracterização altimétrica da microrregião de Porto Nacional, utilizou-se o MDE *Copernicus* devido à sua adequação à amplitude territorial analisada e à escala dos produtos cartográficos pretendidos. Foi adotada uma classificação hipsométrica estruturada em intervalos regulares de 58 metros, a fim de evidenciar os principais patamares altitudinais da paisagem. No caso da bacia Ribeirão Lajeado — unidade espacial de menor extensão, que demanda maior refinamento geométrico — optou-se pelo MDE ALOS PALSAR, aplicando-se intervalos altimétricos de 45 metros, estratégia que aumenta a resolução interpretativa de suas feições topográficas.

Os mapas resultantes foram padronizados em conformidade com as orientações cartográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023b), com especial atenção à escala cromática utilizada na representação hipsométrica, garantindo legibilidade, coerência visual e alinhamento aos parâmetros técnicos oficiais (IBGE, 2019; Robinson *et al.*, 2013).

A elaboração dos produtos cartográficos seguiu etapas metodológicas rigorosas, envolvendo: (i) definição e localização dos MDEs conforme a área de estudo; (ii) mosaico das imagens e recorte com base no polígono *shapefile* da área delimitada; (iii) renderização em banda simples com falsa cor (*false color*); (iv) reclassificação altimétrica segundo os intervalos definidos; e (v) aplicação de paleta cromática em conformidade com os padrões cartográficos recomendados. Todas as etapas foram executadas no ambiente SIG do QGIS (QGIS Development Team, 2024).

A derivação das classes de declividade foi realizada por meio da ferramenta *Slope* do QGIS, a partir dos dados altimétricos dos MDEs. Na microrregião de Porto Nacional, empregou-se o MDE Copernicus (30 m), enquanto para a bacia Ribeirão Lajeado, optou-se pelo MDE ALOS PALSAR (12,5 m), assegurando maior precisão na representação da variabilidade topográfica local. As classes de declividade foram definidas conforme a classificação da Embrapa (1979), que categoriza os terrenos em cinco classes: plano (0–3%), suave ondulado (3–8%), ondulado (8–20%), fortemente ondulado (20–45%) e montanhoso (45–75%). Essa categorização, amplamente consolidada nos estudos pedogeomorfológicos (Ross, 1990; Santos *et al.*, 2013), permitiu uma análise compatível com as exigências de interpretação ambiental e espacial da área investigada.

A geração das curvas de nível teve como objetivo a representação precisa da morfologia do terreno. Para a microrregião de Porto Nacional, as curvas foram derivadas do MDE *Copernicus* (30 m), adotando-se equidistância vertical de 100 metros, em consonância com o IBGE (2011), que estabelece limites máximos de equidistância para diferentes escalas cartográficas. Para a bacia Ribeirão Lajeado — que requer maior refinamento altimétrico — utilizou-se equidistância de 20 metros, a partir do MDE ALOS PALSAR (12,5 m). As curvas foram geradas com a ferramenta *Raster Contour* do QGIS e convertidas para o formato vetorial *shapefile* (.shp), o que possibilitou maior flexibilidade na estilização e integração com outras camadas temáticas do SIG.

Segundo Júnior e Barros (2020), as curvas de nível constituem isolinas de cotas altimétricas que expressam não apenas a elevação, mas também a forma, os gradientes do terreno e suas feições morfométricas. Sua representação exige rigor técnico, especialmente no que se refere à equidistância vertical, proporcional à escala adotada nos mapas (Robinson *et al.*, 2013). Nesse contexto, a espacialização das

curvas de nível foi estruturada em carta temática com escala gráfica de 10 km, respeitando os limites técnicos recomendados pelo IBGE (2011) e assegurando, assim, fidedignidade cartográfica e acurácia analítica.

### 2.3.2 Parâmetros geomorfométricos de bacias hidrográficas

Os parâmetros geomorfométricos para análise da bacia Ribeirão Lajeado foram calculados a partir do MDE ALOS PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m (Tabela 2.1). A escolha desses indicadores se justifica por sua relevância na caracterização quantitativa do relevo, contribuindo diretamente para a interpretação integrada dos aspectos geomorfológicos e morfopedológicos da área de estudo.

Tabela 2.1 – Organização dos parâmetros morfométricos utilizados na área da pesquisa.

(continua)

| Variável                          | Fórmula                    | Autor/Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Escala de classificação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Índice de Sinuosidade (Is)</b> | $I_s = \frac{L}{L'}$       | Horton (1945) é evidenciado na vanguarda no que diz respeito à análise da sinuosidade de um rio principal. De acordo com o autor (1945), este parâmetro é representado por meio do Comprimento do Canal Principal (L), dividido pelo Eixo Axial da Bacia (L'). Neste contexto, temos a seguinte equação para obter o Índice de Sinuosidade (Is): verificar as áreas mais sujeitas a inundação e erosão.                                                                                                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rio Retilíneo (IS &lt;1,05)</li> <li>• Rio Pouco Sinuoso (&gt;1,05 &lt; 1,30)</li> <li>• Rio Moderadamente Sinuoso (&gt;1,30 &lt; 1,50)</li> <li>• Rio Altamente Sinuoso ou Meandrante (&gt;1,50)</li> </ul>                                                                                                                                               |
| <b>Relação de bifurcação (Rb)</b> | $Rb = \frac{N_u}{N_{u+1}}$ | A relação de bifurcação corresponde a mais um importante índice morfométrico utilizado na análise da bacia Ribeirão Lajeado, o qual possibilita a verificação do grau de dissecação de uma bacia hidrográfica. Este índice foi obtido por meio da metodologia adotada por Horton (1945), Horton (1945), Strahler (1952, 1964), Schumm (1956), Christofletti (1980), mas encontrou ressonância entre outros autores, dentre eles: França da Silva (2018) e Machado e Souza (2005). (Nu) corresponde aos números de canais de uma ordem. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rb &lt; 2 Inconsistente para sistemas naturais; indica anomalias na drenagem;</li> <li>• Rb 2 – 3 Limiar entre drenagem funcional e potencialmente alterada;</li> <li>• 3 – 5 Faixa natural, indicando rede com equilíbrio entre infiltração e escoamento;</li> <li>• Rb &gt; 5 Indica substratos pouco permeáveis e fluxo superficial intenso.</li> </ul> |

Tabela 2.1 – Organização dos parâmetros morfométricos utilizados na área da pesquisa.

(continuação)

| Variável                               | Fórmula                                | Autor/Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Escala de classificação                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Coeficiente de Compacidade (Kc)</b> | $K_c = \frac{0,282 \cdot P}{\sqrt{A}}$ | Para Christofletti (1980), a abordagem quantitativa da geometria da bacia hidrográfica é necessária para a compreensão da sua hidrodinâmica, pois sua geometria é um indicativo do escoamento da bacia. Este índice proporciona um melhor entendimento da forma da bacia e de como a forma afeta o escoamento superficial e a distribuição da água. (0,282 - Constante derivada da fórmula da circunferência para normalizar a relação entre perímetro ( $P$ ) e área com base na geometria de um círculo). Logo, estabelece uma comparação entre o formato de um círculo e a área da bacia ( $A$ ). | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kc 1 – 1,24 bacia com a forma redonda;</li> <li>• Kc 1,25 – 1,50 bacia com a forma ovalada;</li> <li>• Kc 1,50 – 1,70 bacia com a forma alongada;</li> <li>• Kc &gt; 1,70 bacia com a forma comprida;</li> </ul> |
| <b>Fator de Forma (Kf)</b>             | $Kf = \frac{A}{L'^2}$                  | Villela e Mattos (1975), seguindo os preceitos estabelecidos por Horton (1945), revelam que valores próximos ou maiores que 1, indicam áreas mais arredondadas e menores que 1 correspondem a bacias mais alongadas. Este fator influencia a distribuição espacial e temporal do escoamento superficial afetando a disponibilidade de água e a recarga dos aquíferos. Esse coeficiente estabelece a relação entre a área da bacia ( $A$ ) e seu Eixo Axial da Bacia ( $L'$ ).                                                                                                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kf 1 – 0,75 bacia com a forma redonda;</li> <li>• Kf 0,75– 0,50 bacia com a forma ovalada;</li> <li>• Kf 0,50 – 0,30 bacia com a forma alongada;</li> <li>• Kf &lt; 0,30 bacia com a forma comprida;</li> </ul>  |

Tabela 2.1 – Organização dos parâmetros morfométricos utilizados na área da pesquisa.

(continuação)

| Variável                              | Fórmula                        | Autor/Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Escala de classificação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Coeficiente de Manutenção (Cm)</b> | $Cm = \frac{1}{Dd} \cdot 1000$ | De grande relevância na tomada de decisões relacionadas ao uso e à ocupação das terras, indica áreas mais propensas aos processos erosivos. Este índice expressa a área mínima necessária para que haja a manutenção do fluxo d'água na bacia (Junior; Barros, 2020; Schumm, 1956). ( <i>Dd</i> ) refere-se à densidade de drenagem.                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Cm &lt; 1,0</math> (Baixa dissecação / drenagem pouco densa)</li> <li>• <math>1,0 \leq Cm &lt; 2,0</math> (Dissecação moderada)</li> <li>• <math>2,0 \leq Cm &lt; 3,0</math> (Dissecação média)</li> <li>• <math>3,0 \leq Cm &lt; 5,0</math> (Dissecação elevada)</li> <li>• <math>Cm \geq 5,0</math> (Dissecação muito elevada / relevo fortemente dissecado)</li> </ul> |
| <b>Índice de Rugosidade (Ir)</b>      | $Ir = H \cdot Dd$              | Os (Ir) elevados favorecem o escoamento superficial e, conseqüentemente, elevam o potencial de erosão; já o (Ir) baixo favorece a infiltração da água no solo (Christofolletti, 1980); Hobson, 1972; Karmann; Pereira; Ferrari, 1996). ( <i>Dd</i> ) refere-se à densidade de drenagem e ( <i>H</i> ) a amplitude altimétrica.                                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• O índice de rugosidade (Ir) varia de 0 a 1, logo, quanto mais próximo de 1 (um), mais acidentado é o relevo e quanto mais próximo de 0 (zero) mais suave ele é, indicando uma baixa variação altimétrica.</li> </ul>                                                                                                                                                            |
| <b>Densidade de drenagem (Dd)</b>     | $Dd = \frac{L_t}{A}$           | Relação entre os valores de densidade e sua qualificação (baixa, mediana, alta e muito alta). A densidade de drenagem ( <i>Dd</i> ) indica a eficiência com que a água é escoada, refletindo, assim, as características topográficas e geológicas da bacia (Horton, 1945; Villela; Mattos, 1975). Ressalta que ( <i>Lt</i> ) comprimento total dos canais e ( <i>A</i> ) área da bacia. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Dd &lt; 0,5</math> baixa;</li> <li>• <math>Dd 0,5</math> a <math>2</math> mediana;</li> <li>• <math>Dd 2,01</math> a <math>3,50</math> alta;</li> <li>• <math>Dd &gt; 3,50</math> muito alta.</li> </ul>                                                                                                                                                                  |

Tabela 2.1 – Organização dos parâmetros morfométricos utilizados na área da pesquisa.

(conclusão)

| Variável                          | Fórmula | Autor/Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                        | Escala de classificação                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hierarquia Fluvial</b>         | -       | A hierarquização fluvial classifica os rios segundo sua ordem ou nível de ramificação, a partir das nascentes até o exutório. O método mais utilizado é o de Strahler (1952, 1957), baseado em critérios objetivos e amplamente adotado em geoprocessamento e análises geomorfológicas | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1ª Ordem (Canais jovens; nascentes; drenagem inicial; forte controle estrutural);</li> <li>• 2ª Ordem (Integração inicial entre canais);</li> <li>• 3ª Ordem (Rede mais organizada; maior área de contribuição);</li> <li>• 4ª Ordem (Nesse estudo, representa o canal principal da bacia; maior estabilidade.</li> <li>• Obs. As ordens se sucedem (...4ª, 5ª, 6ª...) conforme a abrangência da bacia.</li> </ul> |
| <b>Integral Hipsométrica (IH)</b> |         | A integral hipsométrica é um método quantitativo usado para analisar o estágio de desenvolvimento do relevo de uma bacia hidrográfica, com base na relação entre altitudes e área acumulada (Guerra; Cunha, 2001; Strahler, 1952; Valeriano; Rossetti, 2012).                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>IH &gt; 0,6</math> estágio de relevo jovem;</li> <li>• <math>0,35 - 0,6</math> estágio de relevo com maturidade;</li> <li>• <math>&lt; 0,35</math> Estágio de relevo com senilidade (antigo).</li> </ul>                                                                                                                                                                                                     |

Fonte: A autora.

### 2.3.3 Métodos e técnicas utilizados para análise geomorfológica

A caracterização geomorfológica da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA baseou-se em uma abordagem integrada, articulando a proposta taxonômica de Ross (1985, 1990) aos critérios técnico-metodológicos do IBGE (2009). Ross (1985, 1990) propõe uma hierarquia de táxons geomorfológicos dividida em cinco níveis — unidade morfoestrutural, morfoescultural, morfoclimática, morfohidrográfica e morfofisiográfica — permitindo uma leitura multiescalar da paisagem, fundamentada na interação entre estrutura geológica, processos morfogenéticos e dinâmica climática.

Essa abordagem foi compatibilizada com a sistematização do IBGE, que organiza o relevo brasileiro a partir de três grandes níveis: unidade morfoestrutural, unidade de relevo e forma de relevo. A análise iniciou-se pela identificação das estruturas geológicas predominantes e de suas implicações na modelagem do relevo (nível morfoestrutural), avançando para a classificação dos compartimentos morfoesculturais e morfoclimáticos, que condicionam a configuração atual da paisagem.

Posteriormente, foram delimitadas as unidades morfohidrográficas com base no comportamento da drenagem e na organização da rede hidrográfica regional, utilizando Modelos Digitais de Elevação (MDEs) e imagens de satélite *Planet* (5 m), as quais possibilitaram maior detalhamento das feições geomorfológicas. Por fim, com base nos critérios morfofisiográficos e na interpretação em ambiente SIG, foram identificadas as formas de relevo, tais como colinas, interflúvios aplainados e escarpas, em conformidade com a nomenclatura e parâmetros definidos pelo IBGE (2009).

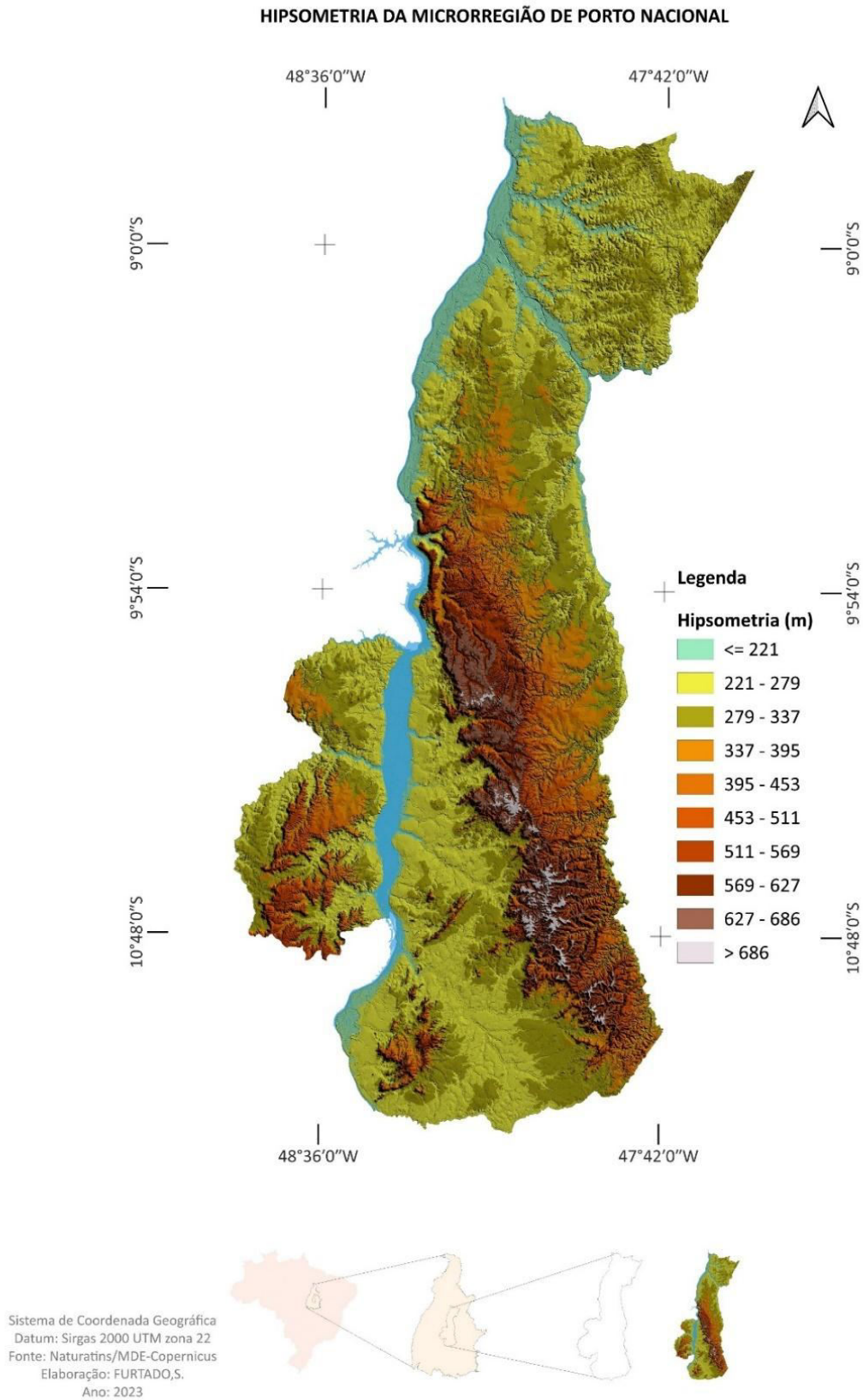
A aplicação conjunta dessas metodologias conferiu maior precisão, coerência e consistência interpretativa à compartimentação da paisagem, atendendo simultaneamente às necessidades de padronização cartográfica e à compreensão sistêmica do relevo regional, aspectos fundamentais nos estudos geomorfológicos contemporâneos.

## 2.4 Resultados

### 2.4.1 Caracterização geomorfométrica

A análise hipsométrica da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA evidenciou que as maiores altitudes concentram-se no eixo noroeste–sudeste, configurando uma faixa contínua de aproximadamente 170 km de extensão, com variação altimétrica entre 177,17 m e 769,66 m, e média altimétrica de aproximadamente 546 m. No eixo norte–sul, ao longo de 293 km, a média altimétrica registrada foi de 345 m, enquanto no eixo oeste–leste, ao longo de 98 km, observou-se altitude média de 378 m, conforme apresentado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Espacialização da hipsometria da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: A autora, a partir de dados do IBGE e Naturatins (2023).

A taxa de declividade obtida para a área da pesquisa revelou que aproximadamente 45% da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA encontra-se na classe de 0 a 3%, caracterizada como relevo plano, condição favorável à expansão da agricultura mecanizada. O segundo maior percentual — cerca de 32% — corresponde à classe de 45 a 75%, caracterizada como relevo montanhoso. Embora esse percentual possa sugerir uma limitação ao avanço da fronteira agrícola, é importante destacar que quase 63% da microrregião apresenta relevo classificado entre Plano e Suave Ondulado, totalizando aproximadamente 14 mil km<sup>2</sup>, o que reforça o elevado potencial para uso agropecuário (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Distribuição das classes de declividade para Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

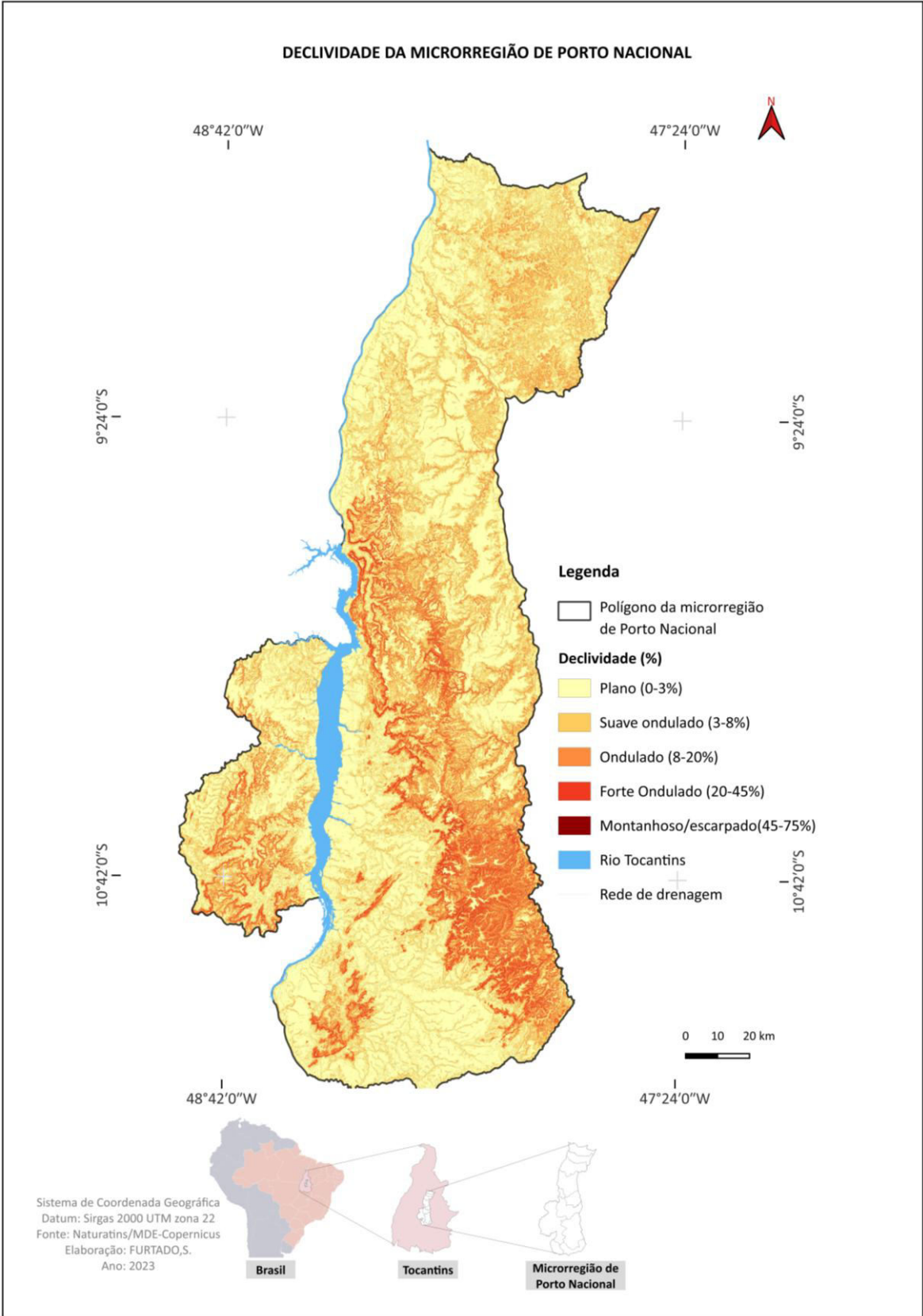
| <b>Declividade (%)</b> | <b>Relevo</b>  | <b>Área km<sup>2</sup></b> | <b>%</b> |
|------------------------|----------------|----------------------------|----------|
| <b>0-3</b>             | Plano          | 9.536,48                   | 44,99    |
| <b>3-8</b>             | Suave ondulado | 3.795,20                   | 17,90    |
| <b>8-20</b>            | Ondulado       | 1.109,03                   | 5,23     |
| <b>20-45</b>           | Forte ondulado | 45,70                      | 0,22     |
| <b>45-75</b>           | Montanhoso     | 6.711,69                   | 31,66    |
| <b>Total</b>           |                | 21.198,10                  | 100      |

Fonte: A autora, a partir de Embrapa (1979, p. 27).

De acordo com a espacialização das diferentes classes de declividades para a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, verificou-se que as áreas mais declivosas (montanhosas) que estão entre 45-75%, encontram-se ao longo do eixo oeste-leste com altitude de 569 a 686 metros, correspondendo à região geomorfológica dos Baixos Planaltos da Amazônia Oriental.

Por outro lado, o relevo plano com declividade de 0-3% está distribuído em 44,99% da área e ocupa as regiões geomorfológicas denominadas de Depressão dos rios Tocantins-Araguaia e a Depressão Interplanáltica da Bacia do alto Tocantins (Figura 2.3).

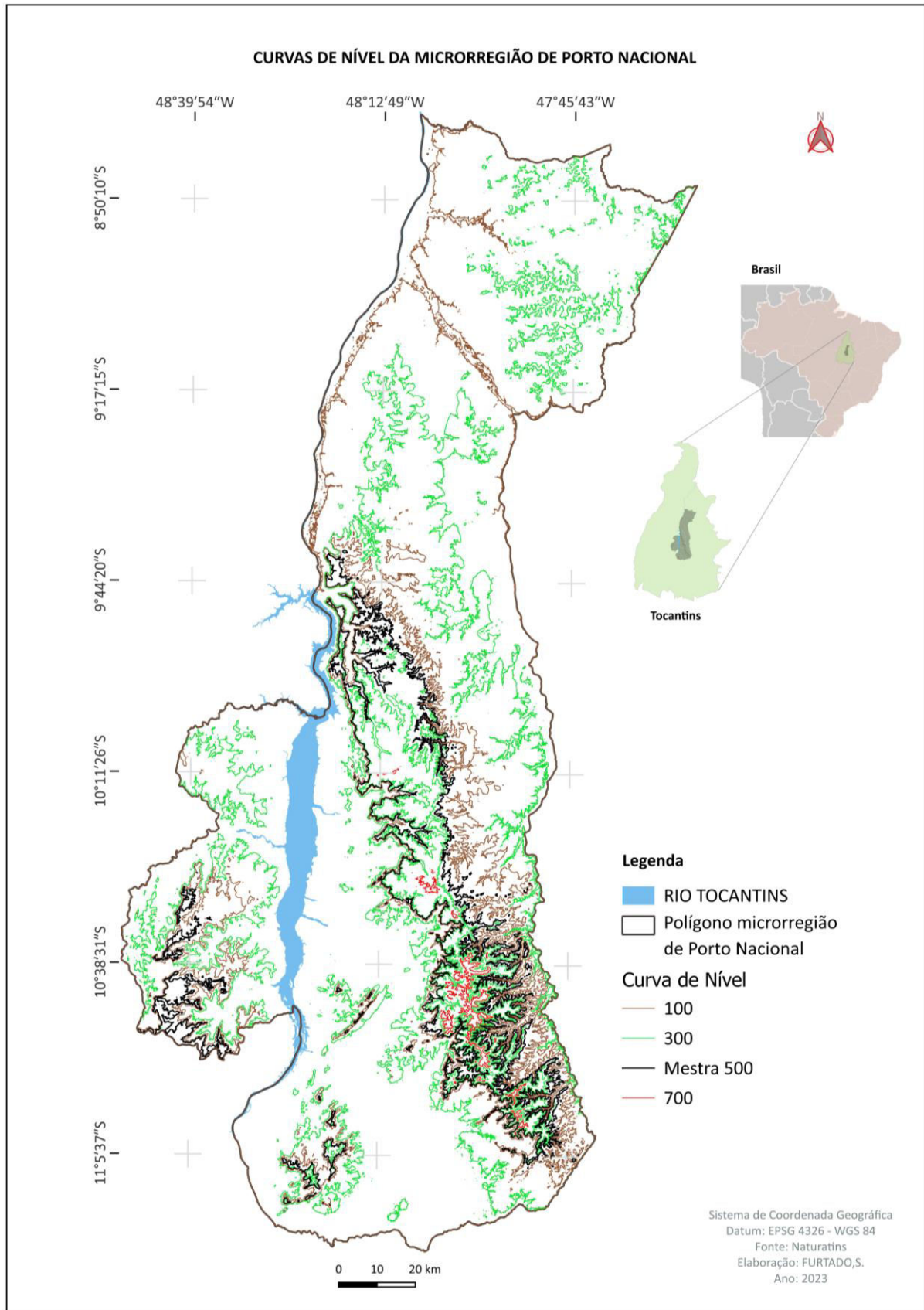
Figura 2.3 – Espacialização da declividade da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979) e Naturatins (2023).

Em relação às curvas de nível da área da pesquisa, observou-se que as altitudes de 500 m, estão dispostas ao longo de um segmento no sentido noroeste-sudeste delineando áreas escarpadas, assim denominadas por Guerra (1993, p. 162), como sendo “rampa ou aclave de terrenos que aparecem nas bordas dos planaltos, serras, testemunhos (*butte témoin*), etc.” (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Curvas de nível com equidistância de 100 m na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

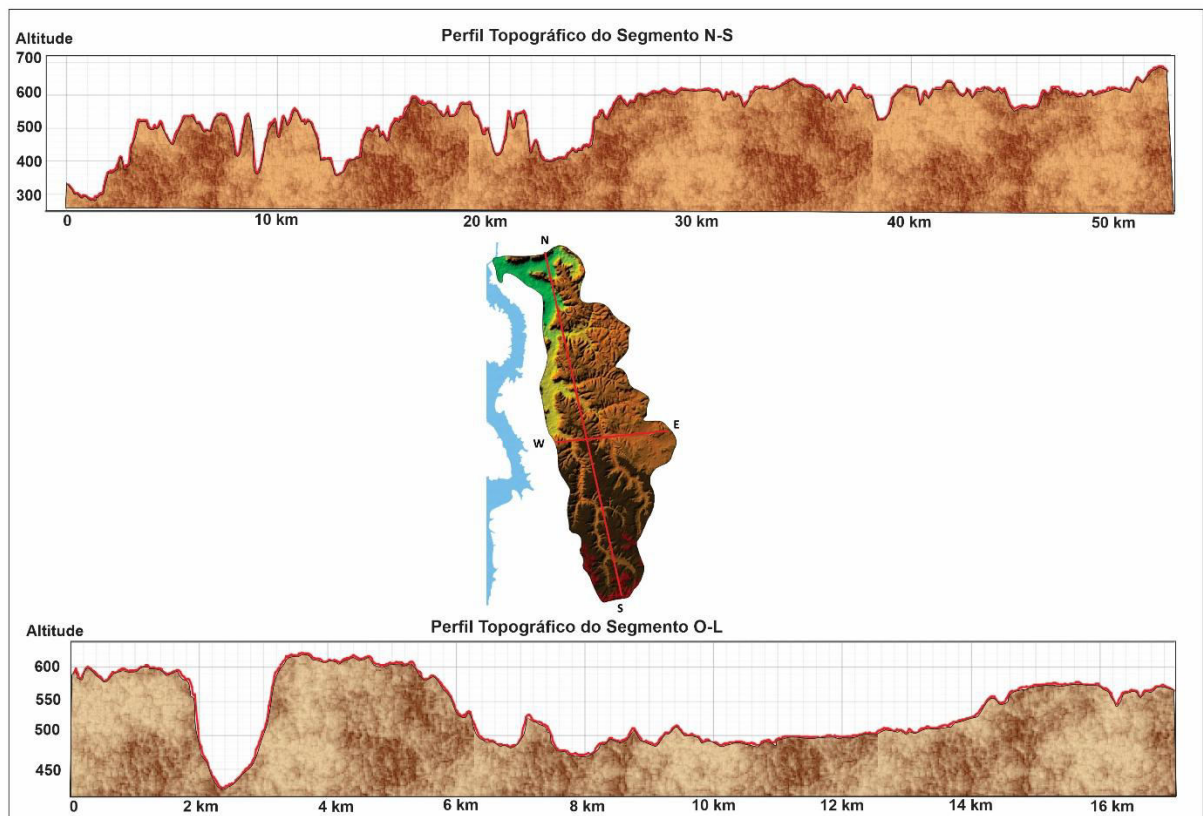


Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979) e Naturatins (2023).

Para a análise hipsométrica da bacia Ribeirão Lajeado, considerada no recorte multiescalar como a unidade de detalhamento dentro da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, foram elaborados perfis topográficos orientados nos sentidos N/S e L/O, a partir dos Modelos Digitais de Elevação processados. No eixo N/S, ao longo de um percurso de 52 km, a variação altimétrica registrada foi de 554 a 675 m, evidenciando feições suavemente onduladas em direção às cabeceiras. No eixo L/O, em um percurso de 17 km em linha reta, observou-se amplitude altimétrica entre 440 e 638 m, destacando-se a transição entre setores rebaixados e áreas de maior energia do relevo.

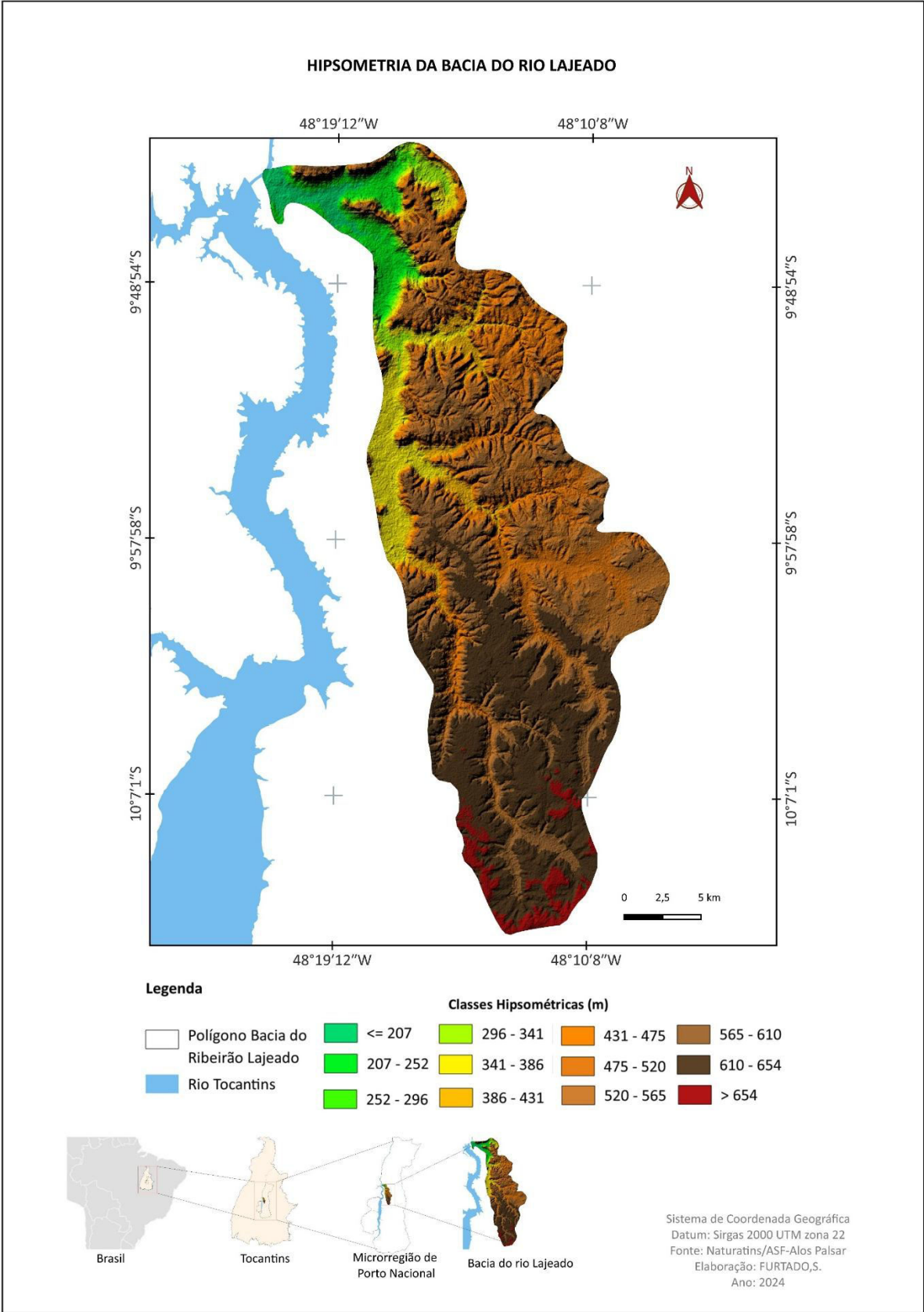
A espacialização da hipsometria da bacia Ribeirão Lajeado reforçou esses padrões altimétricos, indicando que as maiores altitudes se concentram na porção centro-sul da bacia, áreas que correspondem às cabeceiras do Ribeirão Lajeado, onde a altitude atinge 681 m (Figura 2.5). Esse comportamento altimétrico, quando analisado em conjunto com os resultados da microrregião, evidencia a coerência multiescalar da paisagem, na qual a bacia funciona como unidade de maior detalhamento geomorfológico dentro do contexto regional.

Figura 2.5 – Perfis topográficos da bacia Ribeirão Lajeado.



Fonte: A autora.

Figura 2.6 – Perfis topográficos e hipsometria da bacia Ribeirão Lajeado.



Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979) e Naturatins (2024).

A espacialização das classes de declividade para a bacia Ribeirão Lajeado/TO evidenciou que mais de 86% de sua área apresenta declividade entre 0 e 8%, correspondendo a um relevo classificado entre Plano e Suave Ondulado (Tabela 2.3). Esse resultado reforça a leitura multiescalar adotada, demonstrando que, assim como na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, a bacia se organiza predominantemente em superfícies suavemente inclinadas, compatíveis com atividades agropecuárias tecnificadas.

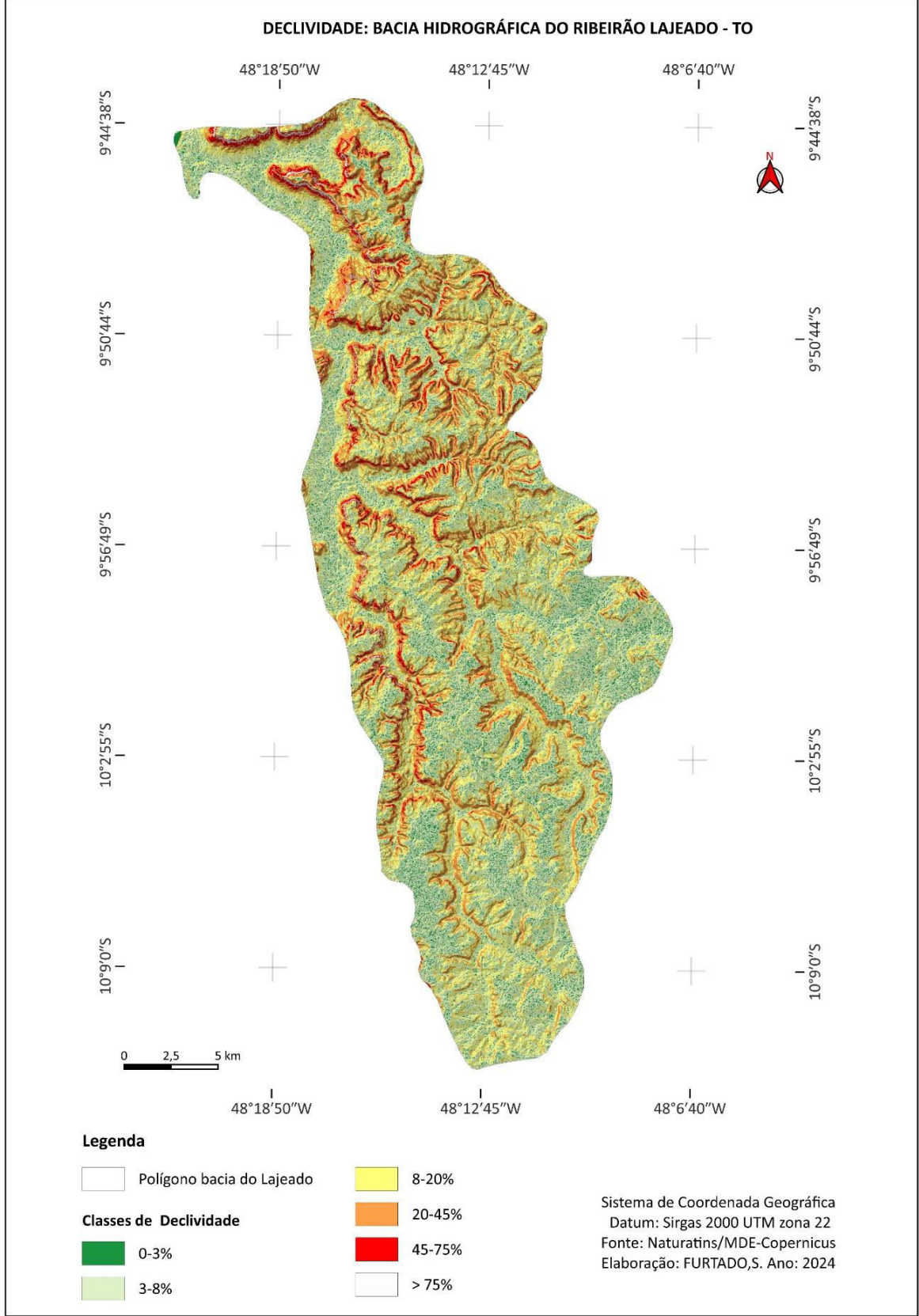
Tabela 2.3 – Distribuição das classes de declividade para Bacia Ribeirão Lajeado.

| <b>Declividade (%)</b> | <b>Relevo</b>  | <b>Área km<sup>2</sup></b> | <b>%</b> |
|------------------------|----------------|----------------------------|----------|
| <b>0-3</b>             | Plano          | 394,35                     | 67,78    |
| <b>3-8</b>             | Suave ondulado | 109,33                     | 18,79    |
| <b>8-20</b>            | Ondulado       | 59,31                      | 10,19    |
| <b>20-45</b>           | Forte ondulado | 17,86                      | 3,07     |
| <b>45-75</b>           | Montanhoso     | 0,95                       | 0,16     |
| <b>Total</b>           |                | 581,80                     | 100      |

Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979).

A classe de declividade de 0–3%, correspondente ao relevo Plano, foi a de maior representatividade, ocupando 394,35 km<sup>2</sup> (67,78%) da área total da bacia. Segundo a classificação da Embrapa (1979), essa categoria caracteriza-se por topografia horizontal e baixo desnivelamento, revelando uma superfície geomorfológica amplamente favorável ao uso agrícola. No extremo oposto, a classe de 45–75%, associada ao relevo Montanhoso, apresentou a menor expressão espacial — 0,95 km<sup>2</sup> (0,16%) — representando superfícies de topografia vigorosa e formas acidentadas, típicas de morros e montanhas (Figura 2.7).

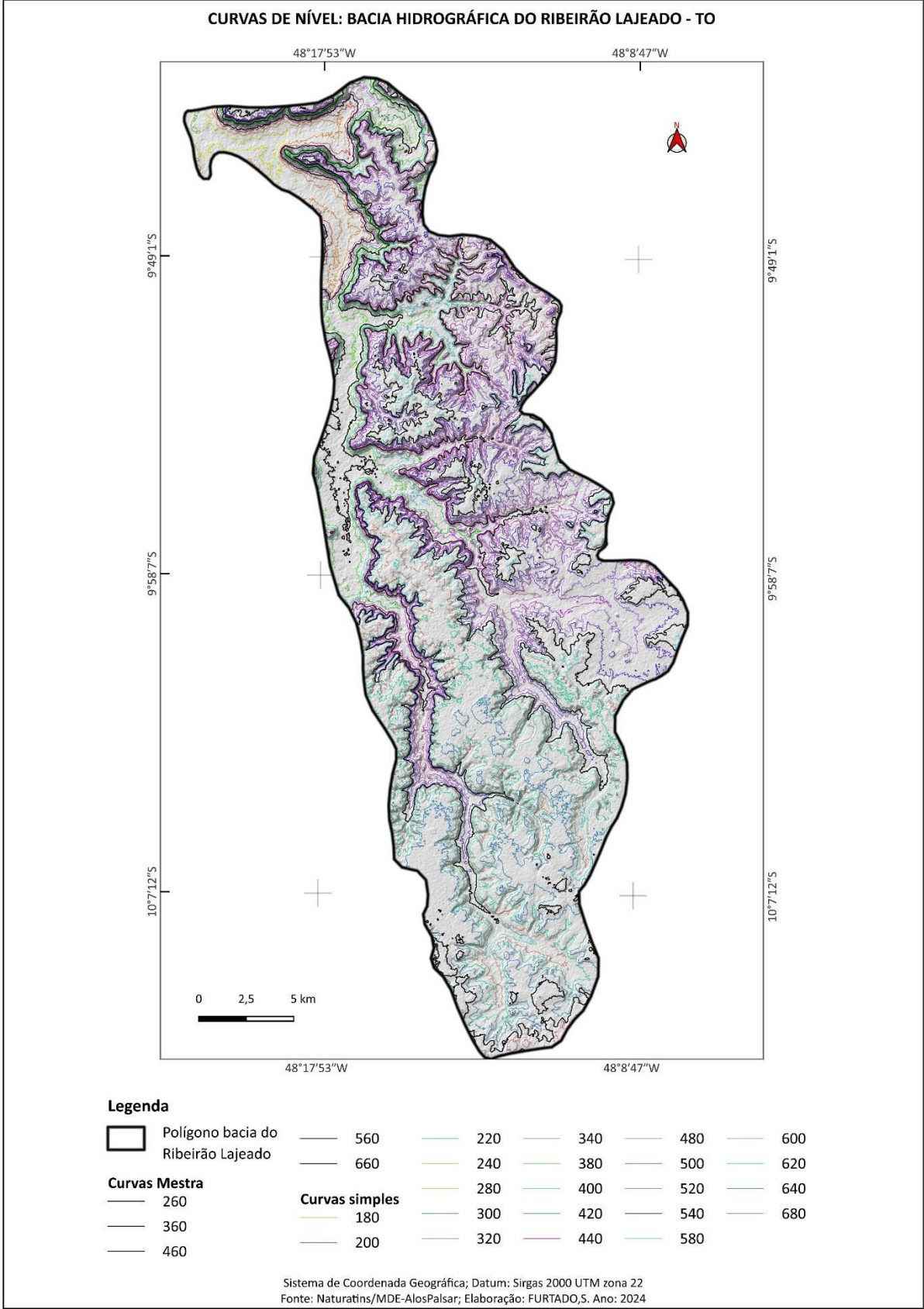
Figura 2.7 – Espacialização da declividade: Bacia Ribeirão Lajeado.



Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979) e Naturatins (2024).

No que se refere à espacialização das curvas de nível, verificou-se que o alto curso do Ribeirão Lajeado encontra-se encaixado entre curvas altimétricas progressivas de 600, 620, 640 e 660 m, situando sua nascente a 680 m de altitude. No médio curso, as curvas de nível distribuem-se entre 360 e 440 m, indicando um setor de transição altimétrica. No baixo curso, observou-se variação decrescente entre 320 e 200 m, caracterizando um gradiente suave em direção à foz (Figura 2.8).

Figura 2.8 – Espacialização das curvas de nível da bacia Ribeirão Lajeado.

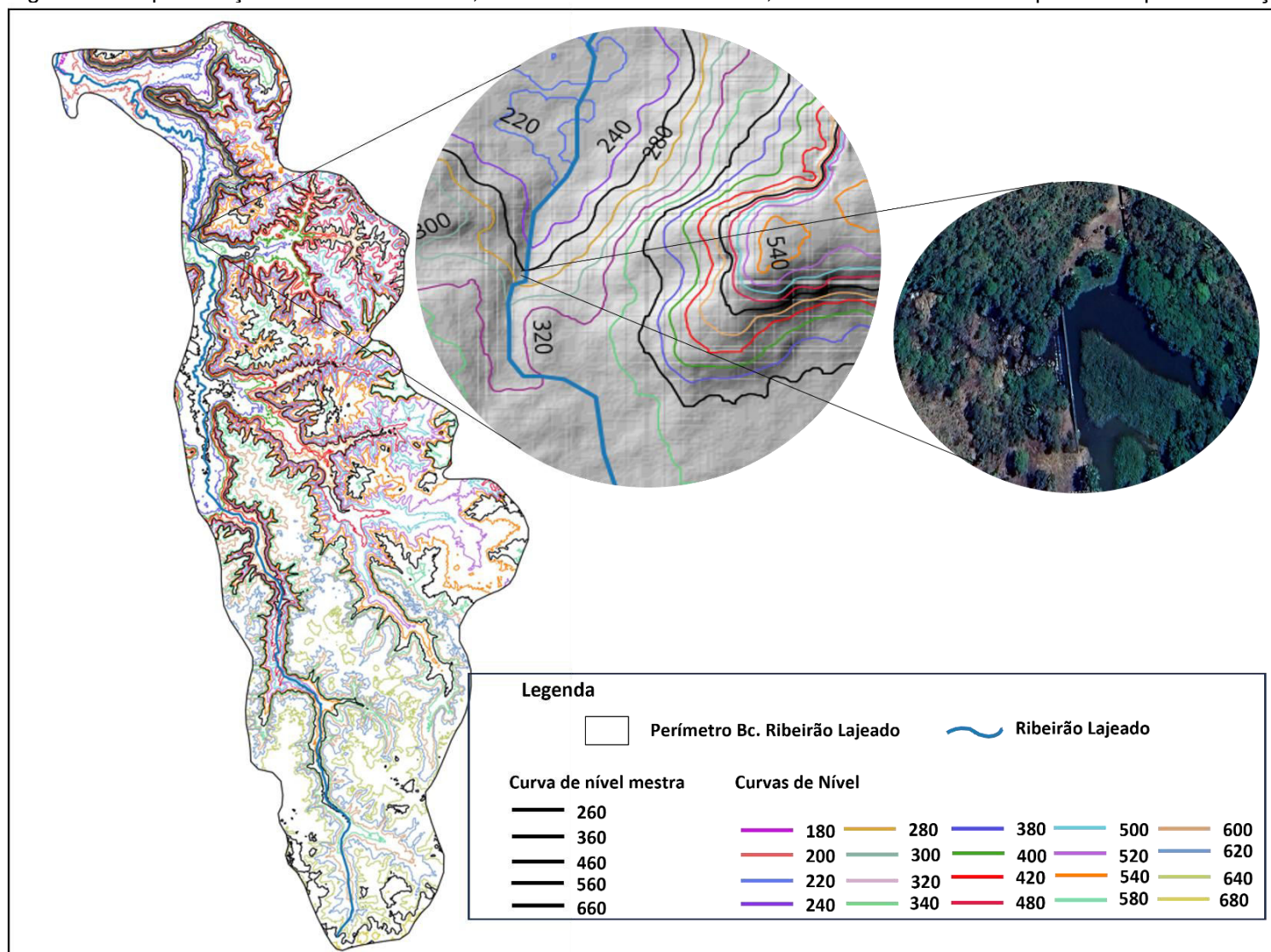


Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos/Naturatins.

A análise detalhada da distribuição dessas curvas revelou diversos trechos encachoeirados ao longo do Ribeirão Lajeado, condição que favoreceu a instalação da Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Lajeadozinho em seu baixo curso. Nessa área, a forte aproximação das curvas de nível indica a presença de desníveis abruptos, compatíveis com cachoeiras situadas entre 320 e 260 m de altitude. (Figura 2.9).

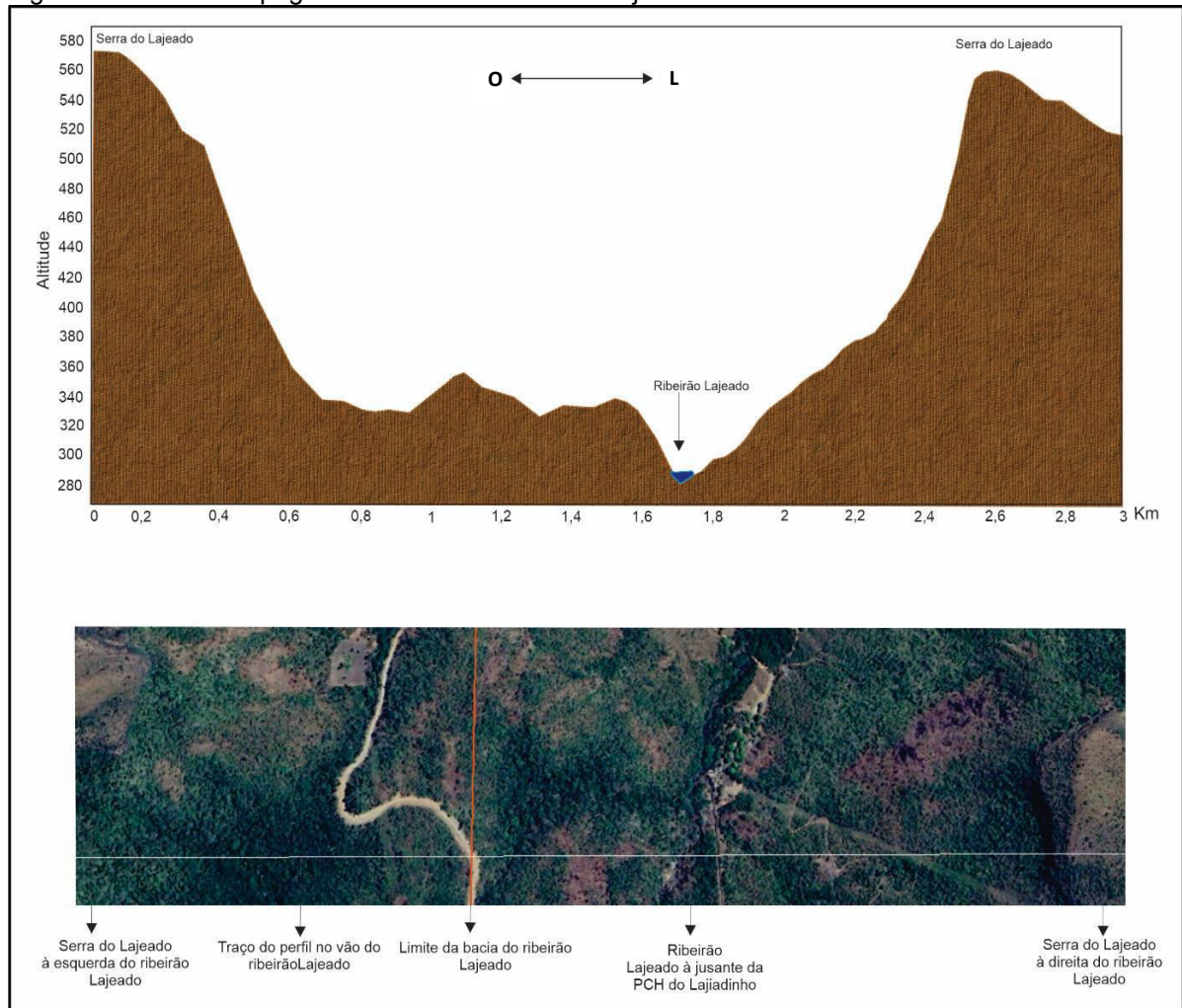
Destaca-se, ainda, que a área encachoeirada — onde se localiza a PCH Lajeadozinho — encontra-se encaixada em um vão de vale com aproximadamente 3,8 km de extensão (linha reta). Os extremos oeste e leste desse segmento apresentaram cotas altimétricas de 570 e 560 m, respectivamente, evidenciando um vale central rebaixado entre dois pontos elevados (Figura 2.10).

Figura 2.9 – Aproximação das curvas de nível, indicando maior declividade, sendo um dos fatores responsáveis pela instalação da PCH Lajeado.



Fonte: A autora, a partir de MDE Alos Palsar-Alaska Satellite Facility, Google Earth Pro e Naturatins (2024).

Figura 2.10 – Perfil topográfico do vão do Ribeirão Lajeado/TO.



Fonte: A autora, a partir de Alos Palsar-Alaska Satellite Facility, Google Earth Pro e Naturatins (2025).

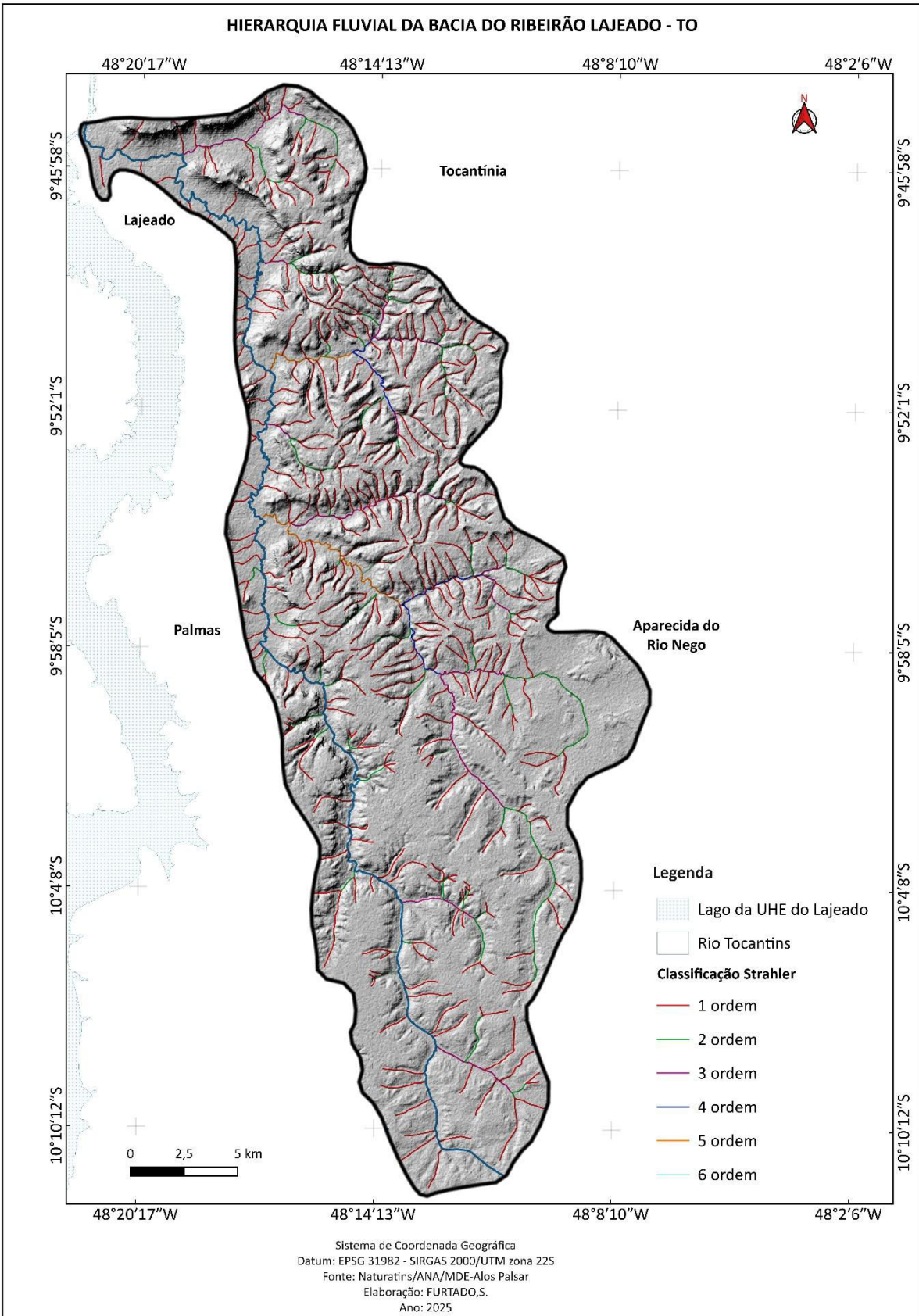
Em relação à hierarquização da rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado, de acordo com a proposta estabelecida por Strahler (1964), trata-se de uma bacia de sexta ordem (Figura 2.11), com uma rede hidrográfica que totaliza 806,02 km de extensão (Tabela 2.4). Ressalta-se que o número total de rios da bacia corresponde à soma de todos os canais, independentemente da ordem à qual pertencem (Strahler, 1964).

Tabela 2.4 – Distribuição dos comprimentos e ordens de canais na rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado (TO), segundo a metodologia de Strahler (1952, 1964).

| <b>Ordens</b> | <b>Nº de canais (<math>N_u</math>)</b> | <b>Somatório da rede de drenagem (<math>L_u</math>)<br/>(km)</b> |
|---------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 1ª Ordem      | 363                                    | 499,30                                                           |
| 2ª Ordem      | 63                                     | 101,79                                                           |
| 3ª Ordem      | 16                                     | 61,41                                                            |
| 4ª Ordem      | 4                                      | 39,35                                                            |
| 5ª Ordem      | 2                                      | 27,47                                                            |
| 6ª Ordem      | 1                                      | 76,70                                                            |
| <b>Total</b>  | <b>449</b>                             | <b>806,02</b>                                                    |

Fonte: A autora.

Figura 2.11 – Distribuição dos comprimentos e das ordens de canais na rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado (TO), segundo a metodologia hierárquica proposta por Strahler (1952, 1964).



Fonte: A autora, a partir de Embrapa Solos (1979) e Naturatins (2024).

A análise da hierarquia fluvial (Hf), fundamentada na classificação proposta por Strahler (1952, 1964), revelou que a maior extensão da rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado/TO se encontra concentrada nos cursos d'água de 1ª ordem, os quais totalizam aproximadamente 449,30 km (Tabela 2.4). Esses cursos representam os trechos mais numerosos e distribuídos da malha hidrográfica, caracterizando-se como canais iniciadores da rede, formados por nascentes e segmentos que não recebem afluentes, conforme preconizado pela hierarquização de Strahler.

O canal principal, o Ribeirão Lajeado, classificado como curso de maior ordem — 6ª ordem — dentro da bacia, possui uma extensão linear aproximada de 76,70 km, desde sua nascente até a foz. Esse comprimento expressivo, somado ao seu papel como eixo coletor dos fluxos hídricos, confere-lhe importância estruturante na organização da rede de drenagem e na modelagem do relevo, atuando como o principal condutor das águas e o elemento chave para a integração dos processos hidrológicos da bacia.

A análise revelou, ainda, que o índice médio de bifurcação (Rb) foi de 3,54, valor dentro do intervalo considerado por França da Silva (2018) e Machado e Souza (2005), que situam esse índice entre 3,0 e 5,0 (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Hierarquização fluvial e cálculo do índice de bifurcação (Rb) da bacia Ribeirão Lajeado/TO.

(continua)

| Ordens   | Nu (nº de canais) | Equação                       | Rb   | Presença de relevo                                                                                               |
|----------|-------------------|-------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1ª Ordem | 363               |                               |      |                                                                                                                  |
|          |                   | $R_b = \frac{363}{63} = 5,76$ | 5,76 | Escarpados / fortemente dissecados.                                                                              |
| 2ª Ordem | 63                |                               |      |                                                                                                                  |
|          |                   | $R_b = \frac{63}{16} = 3,94$  | 3,94 | Colinoso a dissecado, não tão suave.                                                                             |
| 3ª Ordem | 16                |                               |      |                                                                                                                  |
|          |                   | $R_b = \frac{16}{4} = 4$      | 4    | Grande captação de água das cabeceiras e presença de relevo dissecado formada pelo recuo paralelo das vertentes. |
| 4ª Ordem | 4                 |                               |      |                                                                                                                  |
|          |                   | $R_b = \frac{4}{2} = 2$       | 2    | Sugere menor dissecção, canais mais espaçados, relevo menos escarpado, vales um pouco mais abertos.              |

Tabela 2.5 – Hierarquização fluvial e cálculo do índice de bifurcação (Rb) da bacia Ribeirão Lajeado/TO.

| (conclusão) |                   |                         |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------|-------------------|-------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ordens      | Nu (nº de canais) | Equação                 | Rb            | Presença de relevo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 5ª Ordem    | 2                 |                         |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|             |                   | $R_b = \frac{2}{1} = 2$ | 2             | Sugere menor dissecação, canais mais espaçados, relevo menos escarpado, vales um pouco mais abertos.                                                                                                                                                                                                                                      |
| 6ª Ordem    | 1                 |                         |               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Total Geral |                   |                         | Média Rb 3,54 | Indica um padrão de drenagem moderadamente ramificado. Segundo Strahler (1952, 1964), valores de Rb entre 3 e 5 refletem bacias com influência estrutural moderada, maior dissecação do relevo e presença de encostas mais inclinadas, sugerindo um sistema de drenagem relativamente bem desenvolvido e eficiente na captação das águas. |

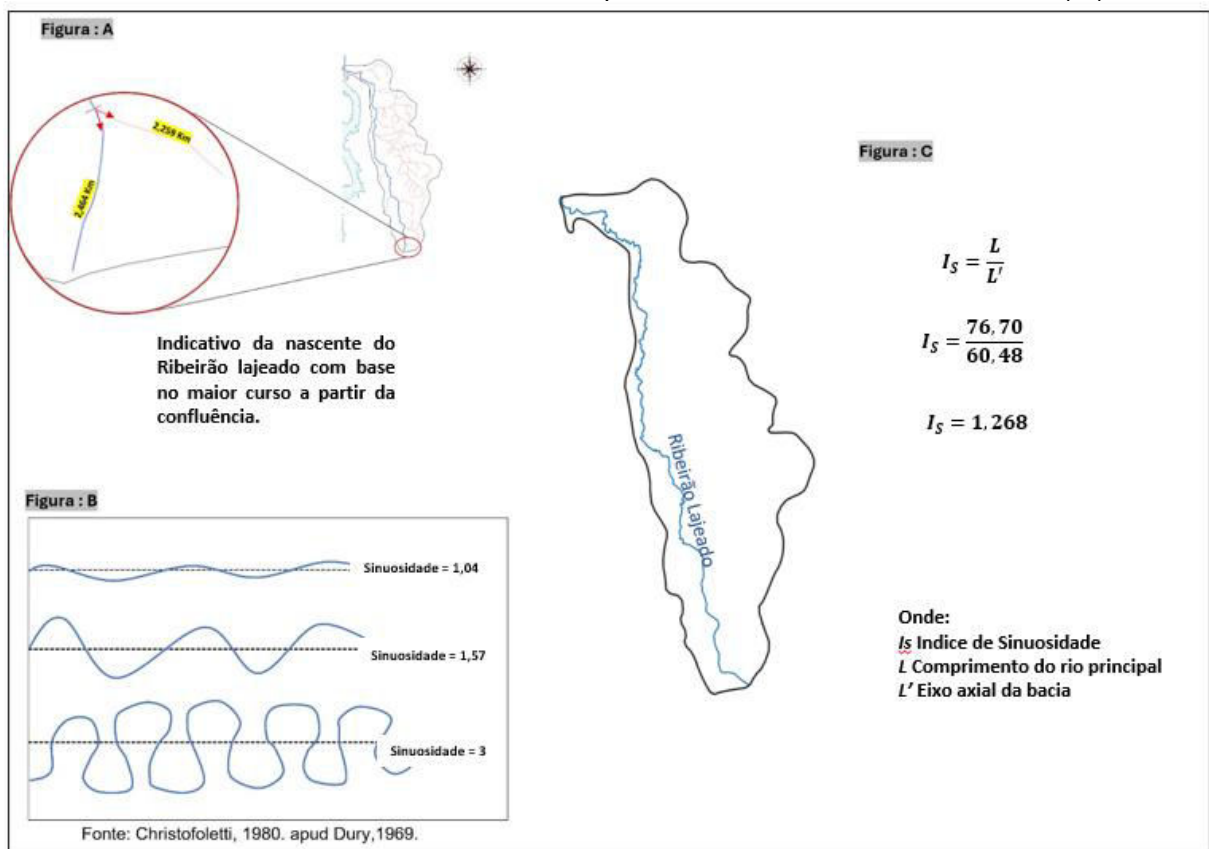
Fonte: A autora, a partir de Horton (1945) e Strahler (1964).

Com uma área (A) de 581,389 km<sup>2</sup>, a bacia Ribeirão Lajeado apresenta um comprimento total dos canais (L<sub>t</sub>) de 806,02 km. Com base nesses valores, a densidade de drenagem calculada foi de 1,39 km/km<sup>2</sup>, o que caracteriza a bacia como possuidora de baixa densidade de drenagem, segundo os critérios estabelecidos por Villela e Mattos (1975).

Dando prosseguimento à análise geomorfométrica da bacia, verificou-se que o seu rio principal apresenta um Índice de Sinuosidade (IS) igual a ≈1,26, valor que, em princípio, poderia sugerir um canal relativamente retilíneo.

Shreve (1966) estabelece que a definição do canal principal de um rio é definida pelo curso de água mais longo, medindo-se de sua nascente até a desembocadura. Assim, o canal principal da bacia Ribeirão Lajeado/TO, possui uma extensão — de sua nascente até sua foz, considerando os meandros — de 76,70 km, já o eixo axial — linha reta — da bacia é de 60,48 km (Figura 2.12).

Figura 2.12 – (A) Delimitação do canal principal do Ribeirão Lajeado conforme Shreve (1966); (B) Parâmetros para identificação de meandros; (C) Extensão do Ribeirão Lajeado da nascente à foz e eixo axial da bacia para cálculo do Índice de Sinuosidade (IS).



Fonte: A autora, a partir de Shreve (1966) e Cristofolletti (1980).

A análise areal da bacia apresentou um perímetro de 140,1 km e uma área total de 581,80 km<sup>2</sup>. A partir desses parâmetros, foi possível calcular o Coeficiente de Compacidade (Kc) e o Coeficiente de Forma (Kf), conforme proposto por Villela e Mattos (1975).

A bacia apresentou um Kc de 1,637 e um Kf de 0,167 (Tabela 2.6). Ressalta-se que ambos os índices são complementares, uma vez que o Kc compara o formato da bacia ao de um círculo de área equivalente, enquanto o Kf expressa a relação entre a área da bacia e seu comprimento, conforme demonstrado nas (Equações 2.1 e 2.2).

$$K_c = \frac{0,282 \cdot P}{\sqrt{A}} \quad K_c = \frac{0,282 \cdot 140,099}{\sqrt{581,803}} \quad K_c = \frac{39,507}{24,120} \quad K_c = 1,637 \quad (2.1)$$

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad K_f = \frac{581,803}{(59,099)^2} \quad K_f = \frac{581,803}{3492,70} \quad K_f = 0,167 \quad (2.2)$$

Tabela 2.6 – Classificação do Fator de Forma (Kf) e Coeficiente de Compacidade (Kc).

|                                       | <b>Intervalo<br/>Kf</b> | <b>Intervalo<br/>Kc</b> | <b>Formato da<br/>Bacia</b>   | <b>Interpretação<br/>hidrológica</b>                               |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Bacia de<br/>Referência</b>        | 1.00 - 0.75             | 1.00 - 1.24             | Redonda                       | Alta tendência a<br>enchentes                                      |
|                                       | 0.75 - 0.50             | 1.25 - 1.50             | Ovalada                       | Média tendência a<br>enchentes                                     |
|                                       | 0.50 - 0.30             | 1.50 - 1.70             | Alongada                      | Baixa tendência a<br>enchentes                                     |
|                                       | <0.30                   | >1.70                   | Comprida                      | Tendência a conservação                                            |
| <b>Bacia<br/>Ribeirão<br/>Lajeado</b> | <b>0.167</b>            | <b>1.637</b>            | <b>Comprida/<br/>Alongada</b> | <b>Baixa tendência a<br/>enchentes/Tendência a<br/>conservação</b> |

Fonte: Adaptado pela autora, a partir de Villela e Mattos (1975).

O Coeficiente de Manutenção (Cm) expressa a eficiência hidrológica de uma bacia, constituindo um indicador fundamental para compreender o equilíbrio entre aporte pluviométrico, escoamento superficial e conservação dos recursos hídricos. Esse parâmetro estabelece a relação entre a área da bacia e o volume de água necessário para assegurar sua perenidade, refletindo a capacidade do sistema em manter o fluxo hídrico ao longo do tempo (Christofolletti, 1980).

Com base nos parâmetros geomorfométricos obtidos para a bacia do Ribeirão Lajeado, estimou-se um coeficiente de manutenção ( $C_m$ ) igual a 719 m<sup>2</sup>/m. Esse valor representa a área mínima necessária da bacia para a manutenção de cada metro linear de canal de drenagem, conforme demonstrado na Equação 2.3. Assim, valores de  $C_m$  inferiores a 1.000 m<sup>2</sup>/m indicam uma bacia com elevada eficiência na geração de canais e maior grau de dissecação do relevo, características coerentes com os índices morfométricos previamente analisados. (Equação 2.3).

$$C_m = \frac{1}{1,39} = 0,719 \text{ km}^2 \text{ km} \quad (2.3)$$

Ressalta-se, ainda, que os dados analisados revelam que a bacia Ribeirão Lajeado, em razão de sua amplitude altimétrica de aproximadamente 537 m e de sua densidade de drenagem ( $D_d$ ) igual a 1,39 km/km<sup>2</sup>, apresenta um Índice de Rugosidade ( $I_r$ ) de  $\approx 0,75$ . Esse valor indica um relevo moderadamente dissecado, no qual a energia topográfica resulta da combinação entre a amplitude altimétrica expressiva e a densidade de drenagem relativamente elevada. Valores nessa faixa são característicos de áreas com encostas mais inclinadas, vales bem definidos e significativa compartimentação do terreno, refletindo a atuação ativa de processos erosivos lineares e difusos. Tal comportamento sugere que a bacia apresenta uma organização hidrogeomorfológica eficiente, com resposta hidrológica mais rápida e maior capacidade de geração de canais, aspectos coerentes com a distribuição altimétrica observada e com o padrão de drenagem identificado, conforme interpretação proposta por Júnior e Barros (2020) e Strahler (1958).

A análise por meio da Integral Hipsométrica (IH) da bacia Ribeirão Lajeado foi realizada a partir de sua espacialização altimétrica e da área acumulada por classe hipsométrica, permitindo identificar a distribuição relativa das superfícies altitudinais ao longo da bacia (Tabela 2.7).

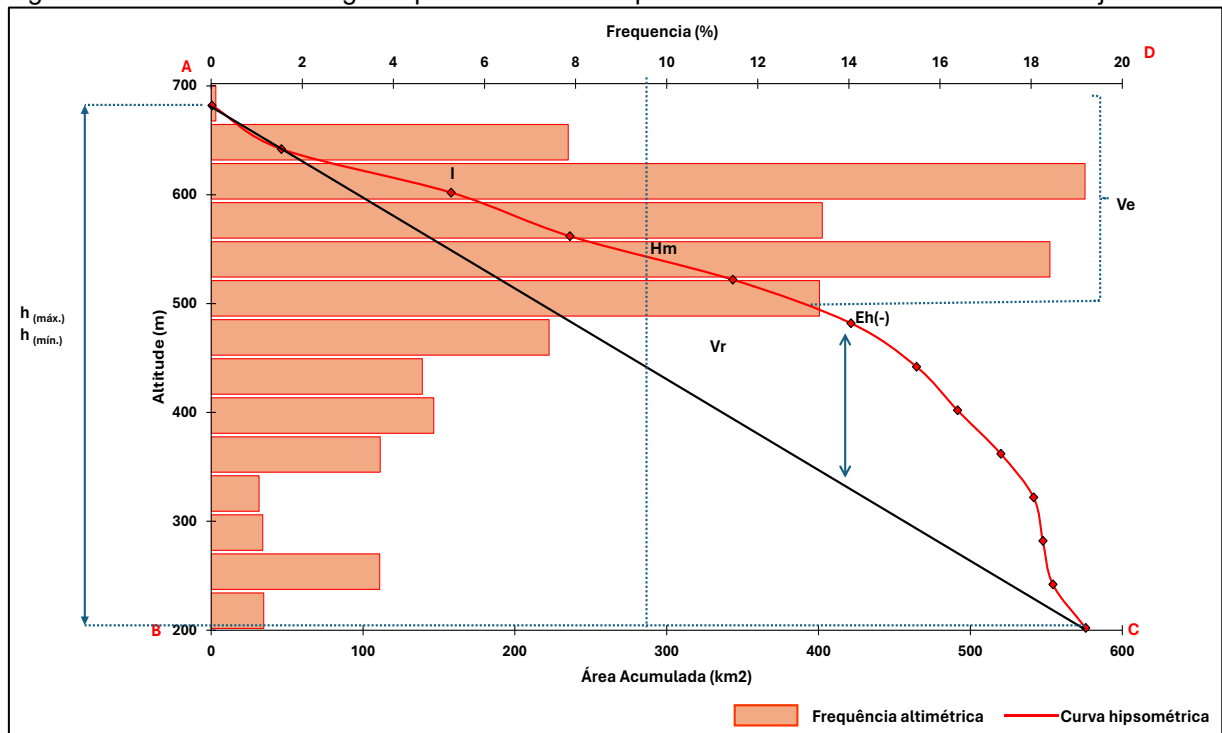
Tabela 2.7 – Estruturação dos parâmetros altimétricos utilizados no cálculo da Integral Hipsométrica (IH) da bacia Ribeirão Lajeado–TO.

| Classes altimétricas | Área (km <sup>2</sup> ) | Altitude (m) |        |        | Área acumulada (km <sup>2</sup> ) | % de Área Acumulada |
|----------------------|-------------------------|--------------|--------|--------|-----------------------------------|---------------------|
|                      |                         | Mínima       | Máxima | Média  |                                   |                     |
| ≤ 207                | 3,385                   | 162          | 207    | 184,50 | 581,803                           | 100                 |
| ≤ 252                | 14,059                  | 208          | 252    | 230    | 578,422                           | 99,42               |
| ≤ 296                | 10,584                  | 253          | 296    | 274,50 | 564,362                           | 97,00               |
| ≤ 341                | 12,184                  | 297          | 341    | 319    | 553,778                           | 95,18               |
| ≤ 386                | 26,867                  | 342          | 386    | 364    | 541,595                           | 93,09               |
| ≤ 431                | 37,302                  | 387          | 431    | 409    | 514,728                           | 88,47               |
| ≤ 475                | 65,063                  | 432          | 475    | 453,50 | 477,426                           | 82,06               |
| ≤ 520                | 108,819                 | 476          | 520    | 498    | 412,363                           | 70,88               |
| ≤ 565                | 126,186                 | 521          | 565    | 543    | 303,545                           | 52,17               |
| ≤ 610                | 95,215                  | 566          | 610    | 588    | 177,358                           | 30,48               |
| ≤ 654                | 74,308                  | 611          | 654    | 632,50 | 82,144                            | 14,12               |
| > 655                | 7,836                   | 655          | 699    | 677    | 7,836                             | 1,35                |
| <b>Total</b>         | <b>581,803</b>          |              |        |        |                                   |                     |

Fonte: Adaptado pela autora, a partir de Villela e Mattos (1975).

A partir da organização dos dados, obteve-se o gráfico da curva hipsométrica da bacia Ribeirão Lajeado. No gráfico, o segmento (ABCD) representa a área total da bacia; a reta (AC) corresponde ao modelo teórico de morfogênese, isto é, um perfil idealizado de rebaixamento linear do relevo ao longo do tempo; a linha vermelha representa a curva hipsométrica real; o volume erodido (Ve) e o volume remanescente (Vr) indicam, respectivamente, a porção do relevo já removida e aquela ainda preservada; o ponto de inflexão (I) marca a transição entre setores mais dissecados e áreas com maior integridade topográfica; e Hm corresponde à altitude média associada a 50% da área acumulada (Figura 2.13).

Figura 2.13 – Análise da integral hipsométrica e a frequência de altitude da bacia Ribeirão Lajeado/TO.



A análise da curva hipsométrica revelou uma Integral Hipsométrica (IH) igual a 0,39, indicando que aproximadamente 60,85% do volume original do relevo já foi erodido (Ve). O ponto de inflexão (I) ocorre quando a área acumulada atinge cerca de 175 km<sup>2</sup>, equivalente a aproximadamente 30% da área total da bacia, representando a passagem entre setores fortemente rebaixados e áreas que ainda conservam maior elevação.

A altitude média (Hm), correspondente a 50% da área acumulada, foi estimada em 581,4 m, o que indica que grande parte do relevo remanescente se concentra em altitudes intermediárias. A maior concavidade da curva ocorre próxima a 482 m, ponto em que se verifica o maior afastamento entre a curva hipsométrica e a reta (AC), evidenciando intenso rebaixamento altimétrico nessas cotas. Esse afastamento máximo foi calculado em 174 m, revelando a existência de um volume remanescente (Vr) de aproximadamente 39,15%, predominantemente localizado nas altitudes médias da bacia.

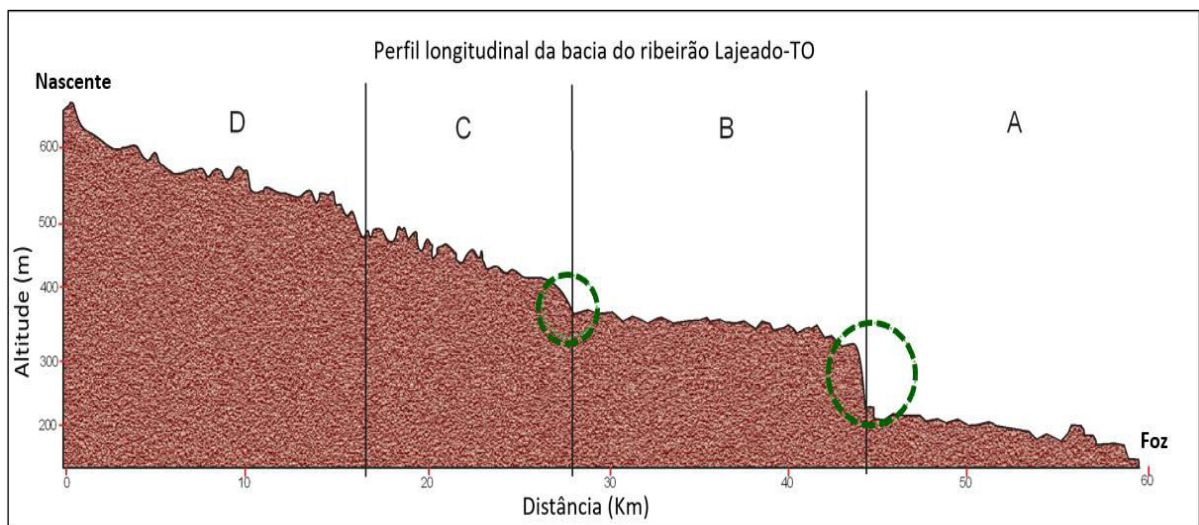
Esses resultados indicam que a bacia se encontra em estágio morfogenético maduro, caracterizado por expressiva dissecação fluvial, redução progressiva dos interflúvios e tendência ao rebaixamento generalizado do relevo. Uma IH de 0,389

reforça esse diagnóstico, sugerindo paisagens intensamente erodidas, próprias de um estágio maduro a senil da evolução do relevo (Christofolletti, 1980; Strahler, 1964).

O comportamento da curva hipsométrica confirma essa interpretação, ao indicar que a bacia evoluiu para um perfil geomorfológico dominado por superfícies rebaixadas, divisores suavizados e tendência à peneplanização. A análise da frequência altimétrica demonstra que a maior concentração de área se encontra entre 522 m e 602 m, revelando que esses setores constituem as porções que mais resistiram ao desgaste erosivo. Em conjunto, esses elementos demonstram que a bacia passou por intenso retrabalhamento morfogenético, apresentando atualmente um relevo ajustado à dinâmica de drenagem e erosão predominante na região.

A análise do perfil longitudinal, que expressa a relação entre a altimetria e o comprimento do canal desde a nascente até a foz, corrobora a interpretação das características estruturais e litológicas que condicionam as diferentes morfologias ao longo do rio. Nesse contexto, além dos parâmetros geomorfométricos, identificaram-se rupturas de declive localizadas principalmente nas proximidades do médio e baixo curso do Ribeirão Lajeado, possivelmente associadas a processos tectônicos, como soerguimentos locais ou rebaixamentos estruturais (*gráben*) em relação ao relevo adjacente (Figura 2.14).

Figura 2.14 – Perfil longitudinal do Ribeirão Lajeado, com destaque para os trechos de ruptura de declive. O curso do rio está segmentado em alto curso (D), médio curso (C–B) e baixo curso (A). As rupturas de declive identificadas no médio e no baixo curso estão assinaladas por círculos.



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de Christofolletti (1980).

O perfil longitudinal do Ribeirão Lajeado, delineado ao longo de seu curso principal, permitiu identificar variações altimétricas significativas ao longo do canal. No médio curso — aproximadamente 30 km a jusante da nascente — observa-se uma ruptura de declive de cerca de 40 m, indicando possível controle estrutural ou variação litológica nesse trecho. A segunda ruptura foi identificada a aproximadamente 25 km da foz, no baixo curso, sugerindo novamente a atuação de descontinuidades estruturais ou discrepâncias no substrato geológico.

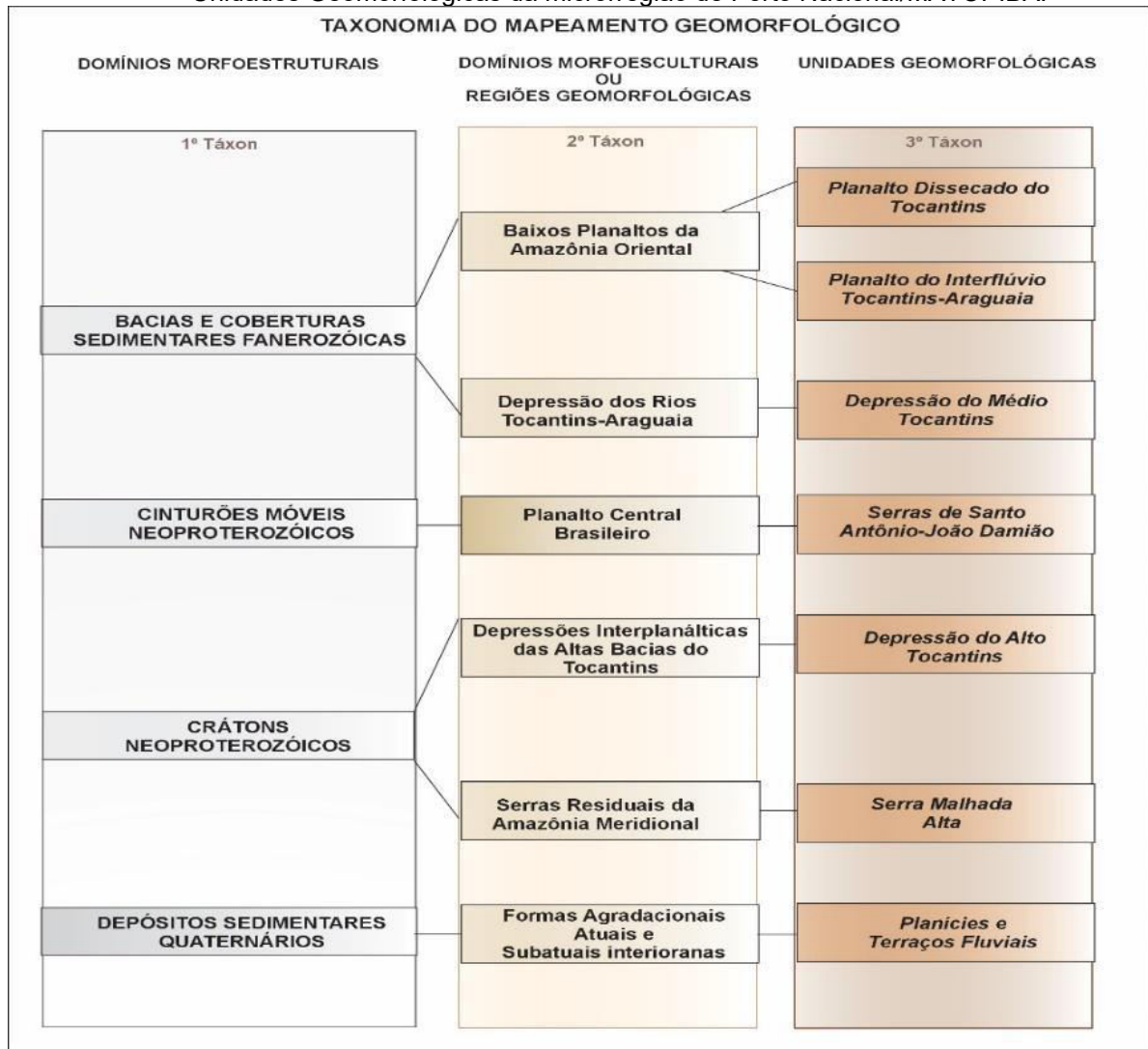
#### 2.4.2 Caracterização geomorfológica

Os resultados obtidos a partir da análise geomorfométrica fornecem a base para o aprofundamento dos aspectos geomorfológicos da área de estudo, considerando que ambos os enfoques estão interligados por sua relação direta com a configuração da paisagem. As informações geomorfométricas constituem, portanto, subsídio essencial para a identificação de padrões estruturais e morfodinâmicos do relevo, representando uma etapa preparatória indispensável para a compartimentação geomorfológica em escalas regional, intermediária e local.

Nesse contexto, a análise integrada do relevo da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA possibilitou a delimitação de quatro Domínios Morfoestruturais, cujas feições macroestruturais refletem os controles tectônicos e litológicos que condicionam a organização da paisagem. Foram igualmente identificados seis Domínios Morfoesculturais (ou Regiões Geomorfológicas) e, em uma escala cartográfica mais detalhada, treze Unidades Geomorfológicas, organizadas em conformidade com a hierarquização taxonômica proposta por Ross (1990) e pelo IBGE (2023b, BDIA), além das diretrizes estabelecidas no Zoneamento Ecológico-Econômico do Tocantins (Tocantins, 2010) (Figura 2.15).

Os compartimentos geomorfológicos foram definidos com base em critérios como forma, origem, processos de modelado e relações altimétricas (Ross, 1990), evidenciando a diversidade morfológica da região e suas implicações para o planejamento territorial, a conservação ambiental e a compreensão da evolução geomorfológica sob influência de fatores naturais e pressões antrópicas.

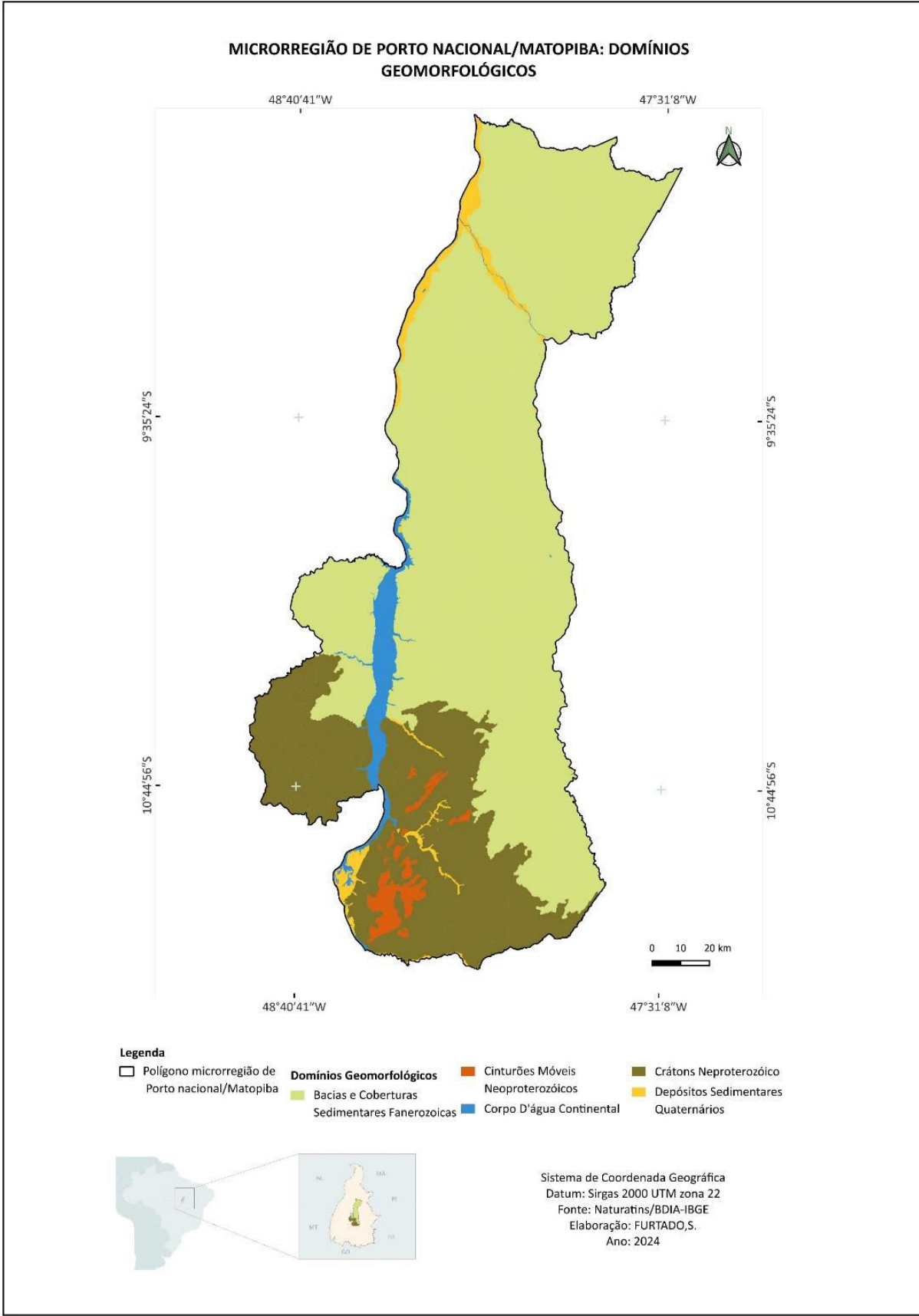
Figura 2.15 – Esquema taxonômico dos Domínios Morfoestruturais, Domínios Morfoesculturais e Unidades Geomorfológicas da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de Ross (1990) / IBGE (2023b, BDIA).

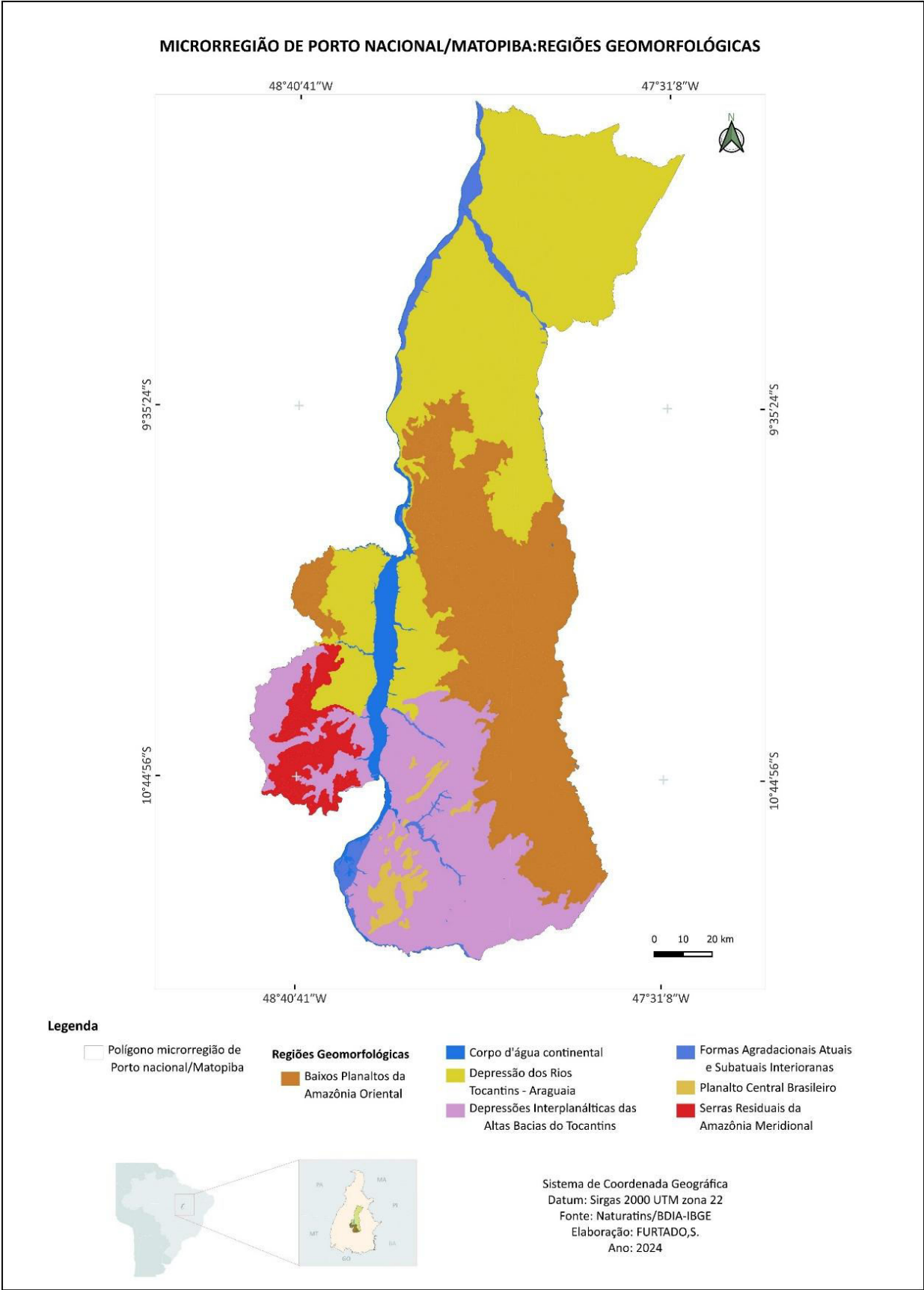
A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA encontra-se distribuída entre os seguintes Domínios Morfoestruturais: Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, que abrangem 14.424,23 km<sup>2</sup>; Cinturões Móveis Neoproterozóicos, com 338,69 km<sup>2</sup>; Crátons Neoproterozóicos, com 5.239,28 km<sup>2</sup>; e Depósitos Sedimentares Quaternários, que perfazem 515,77 km<sup>2</sup> (Figura 2.16). No âmbito dos Domínios Morfoesculturais (ou Regiões Geomorfológicas), identificaram-se: Baixos Planaltos da Amazônia Oriental; Depressão dos Rios Tocantins–Araguaia; Planalto Central Brasileiro; Depressões Interplanáltica das Altas Bacias do Tocantins; Serras Residuais da Amazônia Meridional; e Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interioranas, conforme descrito em Guerra e Cunha (2001), Ross (1990) e Villela e Nogueira (2011) (Figura 2.17).

Figura 2.16 – Compartimentação dos Domínios Morfoestruturais na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de Ross (1990), IBGE (2023b, BDIA) e Tocantins (2010).

Figura 2.17 – Regiões Geomorfológicas da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: Elaborado pela autora, a partir de Ross (1990), IBGE (2024, BDIA) e Tocantins (2010).

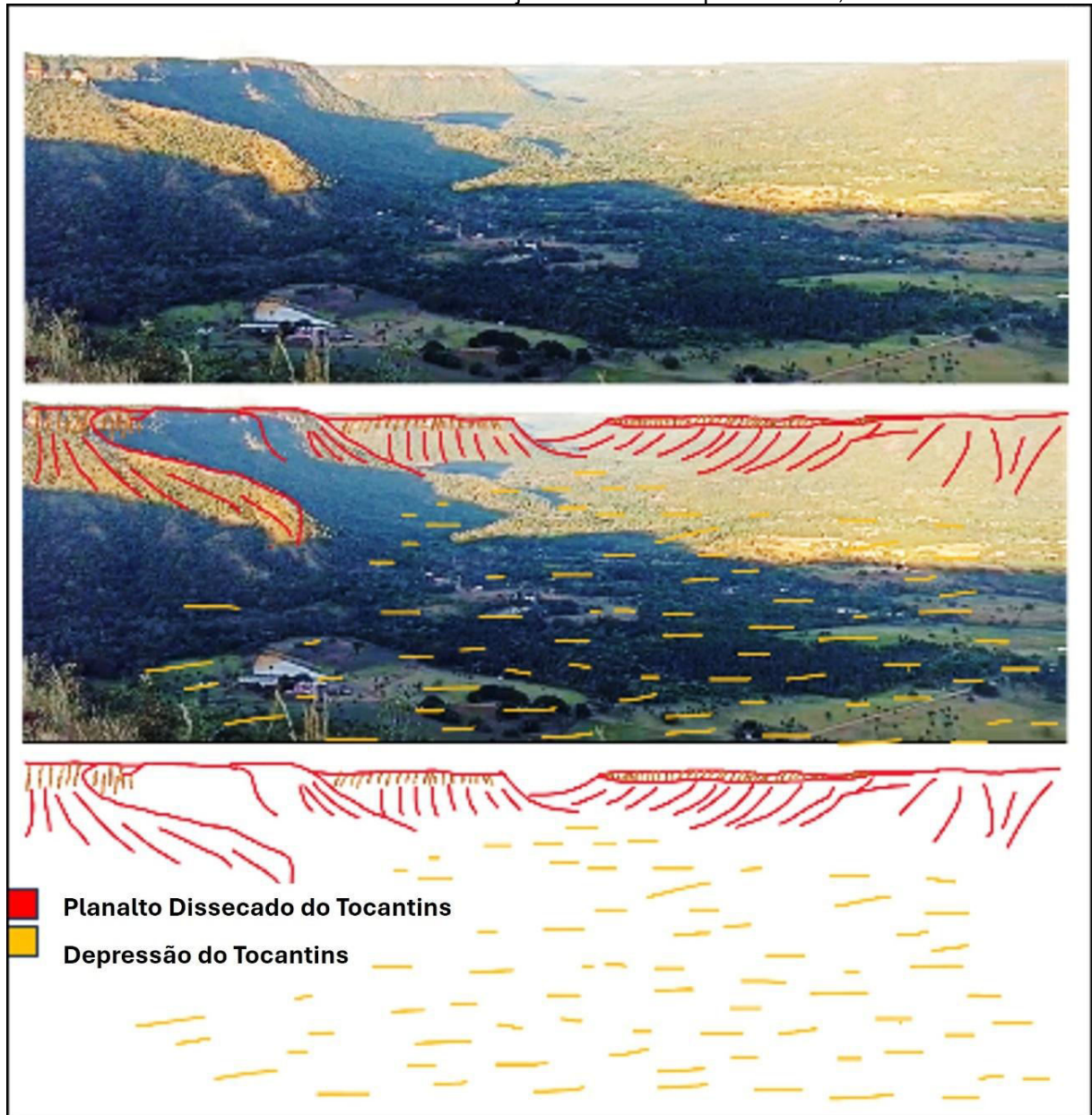
De acordo com o IBGE (2023b, BDIA), as Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas são compostas por planaltos e chapadas, sustentados por rochas sedimentares que podem apresentar dobras e/ou falhas. Nesse domínio, destacam-se as Unidades Morfoesculturais (2º Táxon): Baixos Planaltos da Amazônia Oriental, com 6.139,50 km<sup>2</sup>, e a Depressão dos Rios Tocantins–Araguaia, com 8.284,73 km<sup>2</sup>. Ambas se enquadram no 2º Táxon segundo a hierarquização proposta por Ross (1990).

Dentro das Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas foram mapeadas também as Unidades Geomorfológicas (3º Táxon): Planalto Dissecado do Tocantins, com 5.866,08 km<sup>2</sup>, e os Planaltos do Interflúvio Tocantins–Araguaia, com 273,41 km<sup>2</sup>.

A Unidade Geomorfológica Planalto Dissecado do Tocantins (Figura 2.18) representa 95,55% da área pertencente aos Baixos Planaltos da Amazônia Oriental dentro da microrregião. Essa unidade apresenta 32,86% de formas homogêneas convexas, com topos planos ou levemente arredondados, resultantes de processos erosivos que geram dissecação homogênea.

As formas homogêneas tabulares correspondem a 31,32% do Planalto Dissecado, caracterizando superfícies relativamente planas e uniformes. Também ocorrem os tipos pediplano retocado inumado (16%) e pediplano degradado inumado (7,47%), ambos associados a antigas inundações e a diferentes estágios evolutivos de superfícies aplainadas, sendo que o pediplano degradado inumado indica maior grau de erosão (Dutra *et al.*, 2016).

Figura 2.18 – Contato entre as escarpas do Planalto Dissecado do Tocantins e a Depressão do Médio Tocantins. Trecho da Serra do Lajeado na descida para Palmas, TO-020.



Fonte: SILVA, Maria Elias. Fotografia, 2024. Adaptada pela autora.

O restante da unidade (19,99%) contempla formas de menor extensão, como: Encosta Íngreme de Erosão, marcada pela presença de sulcos e ravinas; Estrutural Convexa, caracterizada por curvaturas associadas a controles tectônicos; Pediplano Degradado Desnudo, resultante de intemperismo e erosão com superfície exposta; e Pediplano Retocado Desnudo, que corresponde ao retrabalhamento superficial por agentes erosivos, resultando em superfície mais nivelada (Vilella; Nogueira, 2011).

O Planalto do Interflúvio Tocantins–Araguaia (3º Táxon), igualmente vinculado aos Baixos Planaltos da Amazônia Oriental (2º Táxon), apresenta 95,39% de formas

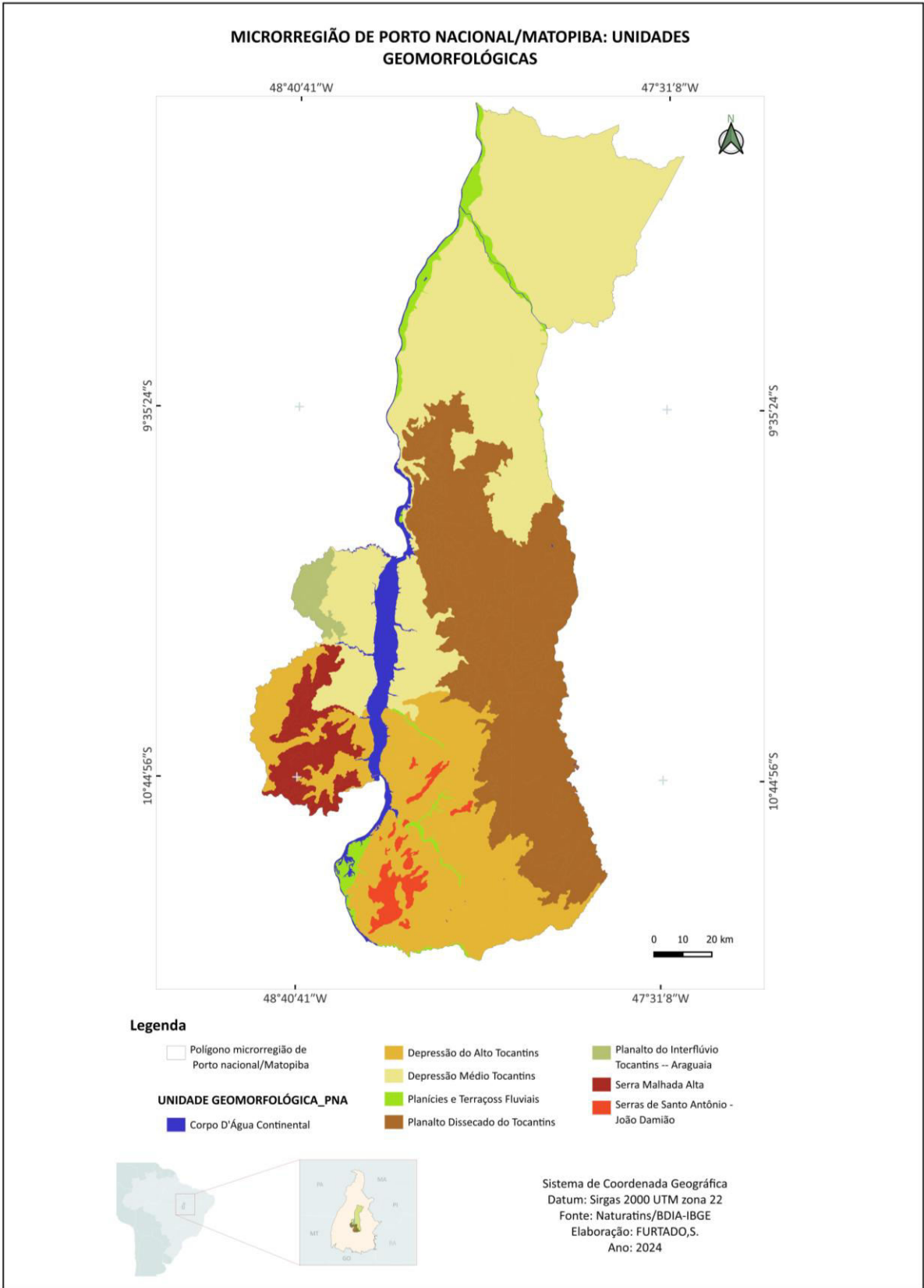
homogêneas tabulares ou suavemente onduladas, com altitudes entre 350 e 550 m, configurando superfícies elevadas entre vales paralelos. Conforme Vilella e Nogueira (2011), interflúvio refere-se a uma superfície plana e elevada entre dois vales adjacentes, cujos rios escoam paralelamente.

A Unidade Morfoescultural Depressão dos Rios Tocantins–Araguaia (2º Táxon), abrangendo 8.284,73 km², é dominada pela Unidade Geomorfológica Depressão do Médio Tocantins (3º Táxon). Esta apresenta 49,55% de formas homogêneas tabulares, 33,56% de pediplano retocado inumado, 16,05% de formas homogêneas convexas, e 0,83% de ocorrências do tipo homogênea aguçada e pediplano degradado inumado.

O Domínio Morfoestrutural Cinturões Móveis Neoproterozóicos (1º Táxon), que ocupa 338,69 km² da microrregião, corresponde a terrenos caracterizados por dobras e falhas, originando planaltos, serras alinhadas e depressões interplanálticas. Esse domínio abriga a Unidade Morfoescultural Planalto Central Brasileiro (2º Táxon) e, dentro dela, a Unidade Geomorfológica Serras de Santo Antônio–João Damião (3º Táxon) (IBGE, 2009, 2023b).

As Serras de Santo Antônio–João Damião apresentam alinhamento NE–SO; a Serra de Santo Antônio contém cristas separadas por depressões, enquanto a Serra João Damião é composta por relevos residuais dissecados com topos aguçados e setores convexos ou tabulares (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Compartimentação das Unidades Geomorfológicas presentes na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: A autora, a partir de Ross (1990), IBGE (2023b, BDIA) e SEPLAN (2010).

O Domínio Morfoestrutural Crátons Neoproterozóicos é constituído por rochas pré-cambrianas e abriga Planaltos Residuais, Chapadas e Depressões Interplanálticas (IBGE, 2023b, BDIA). Na microrregião, 84,09% da área corresponde às Depressões Interplanálticas das Altas Bacias do Tocantins, e 15,91% às Serras Residuais da Amazônia Meridional.

A Depressão do Alto Tocantins (3º Táxon) apresenta variação altimétrica entre 370 e 550 m, com predomínio de topos tabulares pouco dissecados (76,49%) e pediplano retocado inumado (20,64%) (IBGE, 2023b; Vilella; Nogueira, 2011).

As Serras Residuais da Amazônia Meridional, com altitudes entre 350 e 400 m, são marcadas pela Serra Malhada (3º Táxon), composta por 93,33% de formas homogêneas tabulares e 6,67% de encostas íngremes de erosão. Essa unidade margeia a margem esquerda do rio Tocantins, configurando um bloco tabular parcialmente seccionado por vales.

Por fim, o Domínio Morfoestrutural Depósitos Sedimentares Quaternários representa 2,43% da microrregião, sendo formado por áreas de acumulação com planícies e terraços fluviais de baixa declividade. A Unidade Geomorfológica Planícies e Terraços Fluviais (3º Táxon) ocorre de maneira descontínua ao longo do rio Tocantins e de seus afluentes — rio Sono, rio Água Suja, rio Areias, ribeirão Conceição e rio Formiga —, constituindo superfícies planas, frequentemente alagáveis, com cordões arenosos, meandros abandonados e patamares elevados associados, com ou sem rupturas de declive (Tocantins, 2005).

## **2.5 Discussão**

A análise dos parâmetros geomorfométricos da bacia Ribeirão Lajeado evidencia uma configuração hidrológica e morfológica que reflete intensamente os condicionantes geológicos, estruturais e climáticos da região. O Índice de Sinuosidade ( $IS \approx 1,26$ ) indica um curso fluvial levemente sinuoso, mas não meândrico. Segundo Leopold e Wolman (1957), a sinuosidade fluvial está diretamente relacionada à declividade, ao regime hidrológico e à granulometria do material transportado. Assim, em áreas com menor energia fluvial, é comum que os canais apresentem baixa sinuosidade, o que parece se confirmar nesta bacia. No entanto, Tooth (2000) chama atenção para a influência da estrutura geológica no condicionamento do traçado dos canais, ressaltando que a presença de lineamentos, fraturas e zonas de fraqueza

pode impor trajetórias retilíneas, mesmo em regiões onde a dinâmica fluvial favoreceria maior sinuosidade.

Nesse sentido, os baixos valores de IS observados devem ser interpretados com cautela, pois podem refletir mais o controle estrutural do substrato — conforme argumentam Gregory e Walling (1973) — do que, necessariamente, uma morfodinâmica fluvial simples. A presença de falhas inativas, fraturas e dobras, como destacado por Celarino e Ladeira (2014), pode mascarar os padrões de escoamento, desviando os canais e restringindo sua evolução natural, sobretudo em contextos tectonicamente estáveis, como os do Brasil Central.

A densidade de drenagem ( $Dd = 1,39 \text{ km/km}^2$ ) é coerente com ambientes com alta permeabilidade dos solos, presença de cobertura vegetal preservada e relevo suave, conforme apontado por Chorley, Schumm e Sugden (1984). Bacias com esse padrão geralmente apresentam menor propensão a enchentes e maior capacidade de infiltração. Esse comportamento é reforçado pela natureza do substrato, predominantemente sedimentar, cuja porosidade e permeabilidade favorecem a infiltração e reduzem o escoamento superficial, conforme discutido por Tucci (2007), Freeze e Cherry (1979), Bear (1972) e McGuinness (1963).

O coeficiente de bifurcação médio ( $Rb = 3,54$ ) situa-se dentro do intervalo estabelecido por Horton (1945) para bacias de drenagem naturais (entre 2 e 5), indicando um grau de ramificação moderado e uma rede hidrográfica relativamente organizada, com padrões estruturais consistentes ao longo da bacia. Esse valor sugere que o sistema apresenta heterogeneidade morfológica limitada, com baixa a moderada resistência litológica e reduzida influência de tectonismo recente. Entretanto, conforme discutem Castro e Carvalho (2009), valores mais elevados de  $Rb$  tendem a refletir maior dissecação do relevo, presença de vertentes mais inclinadas e ocorrência de recuo paralelo das encostas, características típicas de compartimentos intensamente entalhados. Assim, embora o valor médio de  $Rb$  denote relativa homogeneidade, a existência de ordens específicas com  $Rb$  superiores indica a presença de setores morfológicamente mais dissecados dentro da bacia do Ribeirão Lajeado, revelando variações internas no controle estrutural e na dinâmica erosiva.

A forma alongada da bacia, evidenciada pelos coeficientes  $Kc$  e  $Kf$ , contribui para a atenuação dos picos de cheia, pois o fluxo demanda maior tempo para atingir a saída da bacia, conforme discutido por Christofolletti (1980). Essa morfologia é típica de áreas mais evoluídas do ponto de vista geomorfológico, onde os divisores são

suavizados e o escoamento superficial ocorre de maneira difusa. Esse padrão também se relaciona com o alto valor do coeficiente de manutenção ( $2.016,13 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ), que indica a necessidade de extensa área de contribuição para sustentar a perenidade dos cursos d'água, sendo característico — como observam Christofolletti (1980) e Barros e Júnior (2020) — de ambientes com solos profundos, boa cobertura vegetal e elevada infiltração.

A análise hipsométrica fornece um panorama revelador da evolução do relevo. A Integral Hipsométrica ( $IH = 0,39$ ) posiciona a bacia Ribeirão Lajeado em um estágio morfogenético maduro, conforme parâmetros definidos por Strahler (1952). Bacias com  $IH$  entre 0,35 e 0,50 tendem a apresentar relevo moderadamente dissecado, mantendo parte significativa da massa altimétrica original. Essa tendência está alinhada ao modelo de Ab'Sáber (1969) para o Brasil Central, caracterizado por extensas superfícies aplainadas submetidas a longos períodos de erosão.

A acentuada concavidade da curva hipsométrica e a localização precoce do ponto de inflexão reforçam a atuação de erosão vertical difusa, marcada por vales encaixados e topos rebaixados, como discutido por Young (1972) e Panizza (1990). A predominância de altitudes médias também confirma essa tendência de peneplanização avançada, embora alguns topos residuais permaneçam preservados, indicando heterogeneidade nas taxas de denudação, influenciadas por variações litológicas e microestruturais.

Nesse contexto, embora a  $IH$  indique maturidade, os indícios de concavidade acentuada e a atuação ativa da erosão vertical demonstram que os processos de rebaixamento continuam atuantes, ainda que de forma setorial e com menor energia, o que está de acordo com as interpretações de Young (1972) e Panizza (1990). Assim, a bacia apresenta características compatíveis com regiões em maturidade avançada, mas ainda não senil, permanecendo um sistema geomorfológico dinâmico, apesar da tendência de estabilidade.

Em síntese, a morfometria da bacia Ribeirão Lajeado revela uma paisagem fortemente condicionada pelo substrato geológico e pela estrutura regional, na qual os processos fluviais são mediados por condicionantes litológicos e estruturais que moldam a organização espacial da drenagem. A integração entre as métricas morfométricas e a interpretação hipsométrica evidencia um sistema estável, porém ainda ativo, em fase de maturidade avançada, com hidrologia fortemente modulada pela forma da bacia e por seu controle estrutural.

Os resultados geomorfológicos obtidos para a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA revelam que a diversidade morfoestrutural observada é expressão direta da complexa história geológica do Tocantins, caracterizada pela coexistência de Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, Crátons Neoproterozóicos e Cinturões Móveis Neoproterozóicos. Essa heterogeneidade litoestrutural reforça a interpretação de Almeida (1964) e, posteriormente, de Azevedo (2001), para quem a evolução do embasamento cristalino brasileiro resultou em compartimentos geomorfológicos contrastantes, variando desde superfícies aplainadas até relevos residuais estruturados.

As áreas sob domínio das Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, por exemplo, apresentam um relevo predominantemente dissecado e tabular, com ocorrência de planaltos amplos e depressões suaves. Esse padrão morfoescultural está de acordo com o modelo de Ross (1990), que destaca o papel das estruturas sedimentares horizontais ou suavemente inclinadas na formação de chapadas e planaltos tabulares, frequentemente marcados por dissecação paralela e desenvolvimento de topos planos.

A forte correspondência entre litologia, estrutura e processo é igualmente observada quando se analisam os domínios morfoesculturais presentes na região. Os Baixos Planaltos da Amazônia Oriental e a Depressão dos Rios Tocantins-Araguaia, por exemplo, exibem um arranjo espacial compatível com a abordagem de Ab'Sáber (1969), que enfatiza a leitura integrada dos componentes físico-naturais na interpretação da organização territorial. Nessas áreas, predominam planaltos dissecados, pediplanos retocados e superfícies suavemente onduladas, o que demonstra estágios evolutivos intermediários, resultantes de longos períodos de erosão, como também discutido por Dutra *et al.* (2016).

A presença de formas residuais marcantes, como as Serras de Santo Antônio e João Damião, inseridas no domínio dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos, reforça o papel da estrutura tectônica antiga na evolução da paisagem. Esses relevos constituem testemunhos erosivos alinhados segundo direções estruturais, apresentando topos aguçados, cristas alongadas e dissecação seletiva, o que se alinha às interpretações de King (1953) e de estudos mais recentes, como Morais *et al.* (2013), que associam tais feições à combinação entre resistência litológica e estruturamento tectônico pré-cambriano.

No domínio dos Crátons Neoproterozóicos, predominam as Depressões Interplanálticas, que representam superfícies amplamente aplainadas por longos períodos de intemperismo químico sob condições tropicais, característica também enfatizada por Guerra e Cunha (2001) e Villela e Nogueira (2011). A baixa dissecação, a convexidade homogênea dos topos e a presença de pediplanos degradados indicam um relevo em maturidade avançada, tendendo à regularização e suavização.

As Serras Residuais da Amazônia Meridional, compostas por blocos tabulares recortados por vales estreitos, reforçam a ideia de que a região conserva marcadores geomorfológicos pretéritos, preservados por resistência litológica diferenciada. A posição dessas serras, margeando o rio Tocantins, destaca seu papel como frentes estruturais dissociadas dos grandes compartimentos sedimentares.

A presença de Depósitos Sedimentares Quaternários, distribuídos em planícies e terraços fluviais, representa o componente mais recente da evolução geomorfológica local. Essas feições são produto direto da dinâmica hidrológica atual, envolvendo episódios de inundação, transporte e deposição, conforme descrito por Tricart e Cailleux (1972). A ocorrência de cordões arenosos, meandros abandonados e superfícies levemente onduladas indica a atuação de processos fluviais ativos e reativados ao longo do Holoceno, conferindo ao sistema uma dinâmica contemporânea relevante para o planejamento territorial e a prevenção de riscos ambientais.

De forma geral, a análise integrada evidencia que a compartimentação geomorfológica da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA reflete tanto a complexidade estrutural da paisagem brasileira quanto a eficácia da metodologia multiescalar adotada. A combinação entre as propostas taxonômicas de Ross (1990) e a sistematização geomorfológica do IBGE (2009, 2023b) permitiu uma leitura coerente e hierarquizada da paisagem, alinhada às diretrizes de mapeamento geomorfológico de referência no Brasil. Essa abordagem reforça que o relevo da região é resultado da interação contínua entre estrutura, processo e tempo geológico, compondo um mosaico morfogenético que sintetiza a evolução do Planalto Central e suas áreas adjacentes.

## 2.6 Conclusão

Os resultados geomorfométricos e geomorfológicos da bacia Ribeirão Lajeado revelam uma paisagem em estágio morfogenético maduro, caracterizada por um relevo moderadamente dissecado, vales encaixados e predomínio de cotas médias, condição corroborada pela integral hipsométrica de 0,39. A concavidade acentuada da curva hipsométrica e o ponto de inflexão precoce reforçam a predominância de processos erosivos verticais, consistentes com a morfodinâmica típica de bacias com energia potencial gravitacional reduzida. Esses achados confirmam a terceira hipótese, ao indicar que a bacia se encontra em estágio geomorfológico avançado, com predominância de erosão vertical e relativa estabilidade morfodinâmica.

Essa dinâmica está diretamente relacionada à configuração morfométrica da bacia. A baixa densidade de drenagem ( $1,39 \text{ km/km}^2$ ) e o alto coeficiente de manutenção apontam para um substrato de alta permeabilidade, favorecendo infiltração e reduzindo o escoamento superficial — o que limita a intensidade dos processos laterais. Tais resultados refutam parcialmente a segunda hipótese, ao evidenciar que, embora o relevo suave e a dinâmica climática contribuam para a baixa densidade de drenagem, a permeabilidade dos solos e a porosidade do substrato geológico desempenham papel decisivo. O índice médio de bifurcação (3,54) reforça a homogeneidade litológica e a baixa resistência à dissecação, indicando uma rede ajustada a terrenos pouco contrastantes.

Além disso, o índice de sinuosidade (1,26) e a forma alongada da bacia sugerem menor concentração de fluxo no exutório, favorecendo uma resposta hidrológica mais lenta e compatível com a estabilidade geomorfológica identificada. A predominância de canais de 1ª ordem, associada a declividades suaves, indica uma rede eficiente na coleta do escoamento difuso, porém com baixa capacidade de gerar processos fluviais intensos — cenário que confirma a quinta hipótese, ao indicar que a expansão agropecuária em áreas de platô, embora ainda limitada, pode alterar a dinâmica da drenagem superficial, caso práticas conservacionistas não sejam adotadas.

Dessa forma, observa-se uma relação direta entre os parâmetros morfométricos, que apontam para baixa energia do sistema fluvial e alta capacidade de infiltração, e os aspectos geomorfológicos, que indicam uma paisagem amplamente rebaixada por processos erosivos prolongados. A integração dessas

variáveis confirma que a morfogênese da bacia resulta do equilíbrio entre estrutura geológica, permeabilidade dos solos e dinâmica hídrica local. A baixa sinuosidade, associada ao traçado retilíneo de trechos da drenagem, corrobora a primeira hipótese, ao evidenciar forte influência de lineamentos estruturais no condicionamento dos canais.

A análise da geomorfologia da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA possibilitou a identificação e organização de compartimentos geomorfológicos em diferentes escalas, revelando forte interdependência entre morfodinâmica e estrutura tectônica. A delimitação dos Domínios Morfoestruturais, Morfoesculturais e Unidades Geomorfológicas forneceu o suporte necessário para compreender a organização espacial do relevo, confirmando a quarta hipótese, ao demonstrar a influência de crátons, cinturões móveis e coberturas sedimentares na configuração da paisagem.

Os resultados mostram elevada heterogeneidade morfológica, derivada de processos erosivos, deposicionais e estruturais que condicionam diferentes graus de dissecação e variabilidade altimétrica. O reconhecimento da distribuição espacial de planaltos, depressões, interflúvios e serras residuais reafirma a importância dos controles estruturais e litológicos, destacando a hierarquização taxonômica como ferramenta essencial para análises geomorfológicas em escalas amplas.

Por fim, a delimitação dos domínios morfogenéticos e das unidades geomorfológicas fornece base científica consolidada para estudos em geologia, geografia física, planejamento ambiental e gestão territorial. Entretanto, é necessário reconhecer algumas limitações: embora tenham sido realizadas validações de campo em pontos estratégicos, a extensão territorial da bacia impossibilitou a verificação integral das feições mapeadas. Para mitigar essa limitação, utilizaram-se MDEs de 12,5 m de resolução, além de inspeções por simulação de sobrevoo no Google Earth Pro, que contribuíram significativamente para a análise morfológica.

Ainda assim, a dependência de dados secundários pode restringir a precisão na identificação de feições sedimentares recentes ou modificações antrópicas sutis em áreas de transição. Tais fragilidades ressaltam a necessidade de estudos complementares, com maior cobertura de campo e integração de dados geológicos e pedológicos primários, visando aprofundar a compreensão da dinâmica geomorfológica local.

## Referências

- AB'SÁBER, A. N. Domínios morfoclimáticos e a regionalização do Brasil. **Geografia**, São Paulo, n. 33, p. 1–41, 1969.
- ALMEIDA, F. F. M. Origem e evolução da plataforma brasileira. **Boletim IG-USP**, São Paulo, v. 21, p. 37–53, 1964.
- AZEVEDO, A. A. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Edusp, 2001.
- BASTOS, T. X. *et al.* Uso e ocupação do solo no MATOPIBA: expansão agrícola e implicações socioambientais. **Cadernos do CEAM**, Brasília, v. 13, n. 26, p. 75–98, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/emtempo/article/view/41909>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York: Elsevier, 1972. 764 p.
- BIGARELLA, J. J.; PASSOS, E.; HERRMANN, M. L. de P. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Vol. 4: Ambiente costeiro e dinâmicas marinhas. Florianópolis: Editora da UFSC, 2022. 422 p. ISBN: 978-65-5805-080-3.
- BOGGS, S. **Principles of sedimentology and stratigraphy**. 5. ed. Boston: Pearson, 2011.
- BORGES, J. C. M.; MOURA, G. S.; MONTEIRO, R. C. Avaliação da suscetibilidade à erosão por meio de variáveis geomorfométricas e ambientais na bacia hidrográfica do médio rio Araguaia (TO). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 13, n. 5, p. 1869–1887, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/245598>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- BORTOLINI, W.; SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P. Emprego de técnicas geomorfométricas na identificação de padrões de relevo na bacia do Rio Preto, no Planalto Ocidental Paulista. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 34, e64869, p. 1–16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.14393/SNv34n2022.64869>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Folha SC.22 Tocantins**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1981. (Projeto RADAMBRASIL). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=219603>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- BRIDGE, J. S.; DEMICCO, R. V. **Earth surface processes, landforms and sediment deposits**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- CAILLEUX, A.; TRICART, J. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. **Annales de Géographie**, Paris, v. 65, n. 349, p. 162–186,

maio/jun. 1956. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/23443435>. Acesso em: 18 jan. 2025.

CASTRO, M. C.; CARVALHO, J. C. Relação de bifurcação como indicador de dissecação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 2, p. 115–128, 2009.

CELEARINO, E.; LADEIRA, A. Estrutura e controle geológico em redes fluviais. **Revista Brasileira de Geologia**, v. 44, n. 1, p. 75–86, 2014.

CHORLEY, R. J.; SCHUMM, S. A.; SUGDEN, D. E. **Introduction to Physical Hydrology**. London: Methuen, 1984.

CHRISTOFOLETTI, A. J. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. (14 reimp. 2015).

DURY, G. H. Discharge prediction, present and former, from channel dimensions. **Journal of Hydrology**, v. 30, p. 219–245, 1976. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/766414143/00023-Dury-Discharge-prediction-present-and-former-from-channel-dimen>. Acesso em: 15 jun. 2024.

DUTRA, A. C. *et al.* Superfícies aplainadas e pediplanação no Planalto Central. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, p. 133–146, 2016.

EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. **Zoneamento agroecológico do Estado de Goiás**: incluindo o Distrito Federal: escala 1:1.000.000. 2. ed. rev. e ampl. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001. 88 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 28).

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: SNLCS, 1979. 83 p. (Embrapa SNLCS. Série Miscelânea, 1).

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *In*: CHORLEY, R. J. (ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. New York: Harper e Row, 1972. p. 17-90.

FLORENZANO, T. G. (org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318 p.

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

FRANÇA DA SILVA, J. M. Técnicas geomorfométricas para a identificação de padrões de relevo: aplicação nas cartas Curitiba e Cerro Azul, Estado do Paraná. **Revista do Departamento de Geografia**, [s. l.], v. 36, p. 15-32, 2018. DOI: 10.11606/rdg.v36i0.144285. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/144285>. Acesso em: 26 abr. 2023.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979. 604 p.

FUSHIMI, M.; OLIVEIRA, R. C. de; NUNES, J. O. R. Atribuição de pesos aplicada à vulnerabilidade ambiental à erosão linear: estudo de caso nas bacias hidrográficas do rio dos Cachorros (São Luís-MA) e córrego Timburi (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 4, p. 1710–1726, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/262063>. Acesso em: 15 jun. 2024.

GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. **Drainage basin form and process: a geomorphological approach**. London: Arnold, 1973.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

GUERRA, A. T. **Dicionário geológico-geomorfológico**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 446 p. ISBN: 85-240-0458-4.

HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J.; STODDART, D. R. Scale standards in geographical research: a new measure of area magnitude. **Nature**, Londres, v. 205, p. 844–847, 1965.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (org.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2011.

HOBSON, R. D. Surface roughness in topography: quantitative approach. *In*: CHORLEY, R. J. (ed.). **Spatial Analysis in Geomorphology**. London: Methuen & Co., 1972. p. 221–245.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, p. 275–370, 1945. DOI 10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/56/3/275-370/4075>. Acesso em: 18 jul. 2025.

HUTCHINSON, M.; XU, T.; STEIN, J. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. **Geomorphology**, Redlands, USA, p. 19–22, 2011. Disponível em: <https://www.geomorphometry.org/uploads/pdf/pdf2011/HutchinsonXu2011geomorphometry.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2025.

IBGE. **Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023b. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IBGE. **Bases cartográficas contínuas - Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023a.

IBGE. **Manual técnico de cartografia**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 141 p.

IBGE. **Manual técnico de Geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE. **Relatório PronaSolos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IBGE. **Relatório: reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais**: REALT-2018. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101594>. Acesso em: 18 jul. 2025.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

JÚNIOR, A. P. M.; BARROS, L. F. P. **Hidrogeomorfologia**: formas, processos e registros sedimentares fluviais. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2020. 352 p. ISBN: 9788528624540.

KARMANN, I.; PEREIRA, R. F.; FERRARI, J. A. **Índice de rugosidade**: parâmetro morfométrico da intensidade de relevo. São Paulo: Instituto Geológico, 1996. (Memórias do Instituto Geológico).

KING, L. C. Canons of landscape evolution. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 64, n. 7, p. 721–752, 1953. DOI 10.1130/0016-7606(1953)64[721:COLE]2.0.CO;2. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/gsabulletin/article/64/7/721-752/4571>. Acesso em: 18 jul. 2025.

LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G. River channel patterns: braided, meandering, and straight. **U.S. Government Printing Office**, Washington, DC, n. 282-B, p. 39–85, 1957. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/pp/0282b/report.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling**: principles and methodology. Boca Raton: CRC Press, 2005.

LIMA, A. C. de S. Determinantes da emigração para Palmas (TO). **Revista Hegemonia**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 1–20, 2018. Disponível em: <https://revistahegemonia.emnuvens.com.br/hegemonia/article/download/231/182/362>. Acesso em: 20 jul. 2025.

MACHADO, G.; SOUZA, J. L. P. de. Análise morfométrica da bacia do rio Chôco – PR. In: ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 10., 2005, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2005. p. 8366-8382. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/681399906/03-1>. Acesso em: 17 jul. 2025.

MAHALA, P. Anomalias no índice de bifurcação em bacias tropicais. **Revista de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 25–38, 2019.

MANI, A. et al. Morphometric analysis and LULC change dynamics of Nayar watershed for the sustainable watershed management. **Discover Geoscience**, [s. l.],

v. 2, n. 1, p. 63, 1 out. 2024. DOI: 10.1007/s44288-024-00064-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s44288-024-00064-8>. Acesso em: 18 jul. 2025.

McGUINNESS, C. L. **The Role of Ground Water in the National Water Situation**. Washington, D.C.: United States Government Printing Office, 1963. (U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1800).

MELIANI, P. F. Mapeamento da rede hidrográfica e análise dos parâmetros da densidade de drenagem aplicados ao estudo ambiental: o caso da bacia do rio Jeribucassu, Itacaré, Bahia. **Geografia**, Rio Claro, v. 31, n. 1, p. 119-136, 2006. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1360>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MELO, A. C. A. *et al.* Susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade natural na bacia do Médio Rio Araguaia – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 6, p. 2301–2322, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/263012>. Acesso em: 15 jun. 2024.

MEMON, A. V.; PATEL, Y. S.; PARANGI, T. Exploring watershed dynamics: a comprehensive review on morphometric analysis and geospatial techniques. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, v. 30, n. 5, p. 744–757, 19 out. 2024. DOI 10.1080/09715010.2024.2383184. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09715010.2024.2383184>. Acesso em: 18 jul. 2025.

MIRANDA, E. E. de; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Campinas, SP: Embrapa, maio 2014. 18 p. (Nota técnica GITE, n. 1). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1037313/1/NT1DelimitacaoMATOPIBA.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MONTGOMERY, D. R. Slope distributions, threshold hillslopes, and steady-state topography. **American Journal of Science**, New Haven, v. 301, n. 4–5, p. 432–454, 2001.

MORAIS, R. P. *et al.* Compartimentação do relevo e unidades geomorfológicas no Centro-Oeste brasileiro. **Revista Geonorte**, v. 4, n. 14, p. 1–20, 2013.

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853–858, 2000.

PANIZZA, M. **Quantitative geomorphology in water resources**. Boston: Allen e Unwin, 1990.

PETTIJOHN, F. J. **Sedimentary rocks**. 3. ed. New York: Harper & Row, 1984.

PIKE, R. J. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1, p. 1–20, 2000. Disponível em:

<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1914&context=usgsstaffpub>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. *In*: HENGL, T.; REUTER, H. I. (org.). **Geomorphometry**: concepts, software, applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 3–30.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Version 3.34. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 18 dez. 2025.

RASEMANN, S. *et al.* Geomorphometry in mountain terrain. *In*: BISHOP, M. P.; SHRODER, J. F. (ed.). **GIS eMountain Geomorphology**. Berlin: Springer, 2004. p. 101-145.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia**: ambiente e planejamento. São Paulo: Contexto, 1990. 85 p. ISBN: 978 85 8513 482 2.

ROSS, J. L. S. Relevo brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 4, p. 25–39, 1985. DOI: 10.7154/RDG.1985.0004.0004. Acesso em: 18 jul. 2025.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 8, p. 63–74, 1992.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para planejamento ambiental. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

SANO, E. E. *et al.* Land cover dynamics in the Brazilian Cerrado in the 2000s: Assessing the effectiveness of protected areas. **Regional Environmental Change**, v. 19, p. 2239–2253, 2019.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597–646, maio 1956. DOI: 10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2. Acesso em: 18 jul. 2025.

SENA, F. T. N. S.; SANTIAGO NETO, B. J.; LEITE, A. C. de S. Uso do geoprocessamento como subsídio à análise ambiental: imagem SRTM na geração dos mapas hipsométrico e de declividade das bacias difusas da Barragem Boa Esperança no estado do Piauí. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 4., 2012, Recife. **Anais [...]**. Recife: UFPE, 2012. p. 1–5.

SHREVE, R. L. Statistical law of stream numbers. **The Journal of Geology**, [s. l.], v. 74, n. 1, p. 17–37, jan. 1966. DOI:10.1086/627137. Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/627137>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SILVA, J. M. F. da; OKA-FIORI, C; SILVEIRA, C. T. da. **Geomorfometria**: uma análise de conceitos, métodos e aplicações em geografia física. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 2, p. 558–583, 2017. Disponível em: <https://www.ufpe.br/rbgfe>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SOLIDARIDAD. **Potencial regional de expansão da soja no MATOPIBA**. Brasília: Fundación Solidaridad, 2023. Disponível em: <https://solidaridadlatam.org/brasil/publications/potencial-regional-de-expansao-da-soja-no-MATOPIBA>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 248, p. 112–123, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117–1142, 1952. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/369060358/Strahler-1952-hypsometry-pdf>. Acesso em: 16 jun. 2024.

STRAHLER, A. N. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. *In*: CHOW, V. T. (ed.). **Handbook of applied hydrology**. Nova York: McGraw Hill, 1964. p. 4-11.

STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, v. 69, n. 3, p. 279–300, 1958.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 2, p. 309–319, fev. 1997. DOI: 10.1029/96WR03137. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/96WR03137>. Acesso em: 21 dez. 2025.

TOCANTINS. Secretaria de Recursos Hídricos e Meio Ambiente – SMARH. **Relatório final do contrato 156/99** – Tomo I. Palmas: SMARH, out. 2010. Disponível em: <https://zee.seplan.to.gov.br/produtos-zee-to/relatorios-tecnicos/zoneamento-ecologico-economico-do-tocantins---produtos-tecnicos/>. Acesso em: 18 jul. 2025.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Meio Ambiente – SEPLAN. Diretoria de Zoneamento Ecológico-Econômico. **Atlas do Tocantins**: subsídios ao planejamento

da gestão territorial. Palmas: SEPLAN, 2005. Disponível em: <https://www.to.gov.br/seplan/zoneamento/3u51w3u0xkdh>. Acesso em: 18 jul. 2025.

TOOTH, S. **Process studies in fluvial geomorphology**. Chichester: Wiley, 2000.

TRICART, J.; CAILLEUX, A. **O relevo**: forma, estrutura e função. São Paulo: Hucitec, 1972.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicações. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300–309, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.05.004>. Acesso em: 18 jun. 2024.

VILLELA, F. N. J.; NOGUEIRA, C. de C. Geologia e geomorfologia da Estação Ecológica Serra Geral do Tocantins. **Biota Neotropica**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 217–229, 2011. DOI: 10.1590/S1676-06032011000100023. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/bn/a/Xrtv6rYfHg8B9BygMh65YyF/?lang=pt>. Acesso em: 18 jul. 2025.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, [s. l.], v. 137, n. 1, p. 107–121, jan. 2012. DOI 10.1016/j.geomorph.2011.03.012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X11001449>. Acesso em: 18 jul. 2025.

YOUNG, A. **Aerial geomorphology**. London: Methuen, 1972.

### **CAPÍTULO 3 – DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E COBERTURA DO SOLO NA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA (1985-2055)**

#### **RESUMO**

FURTADO, Simonni Elias Leite. **Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil**. Orientador: Luiz Fernando Pires. 2025. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

Esta pesquisa investiga a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional, inserida na fronteira agrícola do MATOPIBA, no período de 1985 a 2055. Parte-se da problemática da intensificação das pressões antrópicas sobre os ecossistemas do Cerrado, em um contexto marcado pela expansão acelerada da agropecuária, pela crescente urbanização e pela fragilidade da governança territorial. O objetivo central é analisar as transformações históricas no uso e cobertura da terra, bem como projetar cenários futuros com base em modelagem estatística, identificando padrões, tendências e potenciais impactos ambientais. A metodologia integra análise multitemporal, técnicas de geoprocessamento, dados do MapBioma, sensoriamento remoto e regressão linear, com resultados de alta confiabilidade ( $R^2 = 0,98$ ). Foram avaliadas sete classes de uso e cobertura, incluindo formações florestais, savânicas, campestres, áreas agropecuárias e áreas urbanizadas. Os resultados indicam uma supressão de aproximadamente 3.792,6 km<sup>2</sup> de cobertura nativa entre 1985 e 2015, sobretudo de formações savânicas, paralelamente ao crescimento expressivo das áreas agropecuárias, que passaram de cerca de 1.374 km<sup>2</sup> para mais de 7.044 km<sup>2</sup> nesse período. O estudo também identificou transformações estruturantes ocorridas após 1990, impulsionadas pela criação do Estado do Tocantins, pela instalação da capital Palmas e pela expansão da infraestrutura viária. Destaca-se, ainda, o impacto territorial da implantação da UHE Luís Eduardo Magalhães, responsável por ampliar a classe “Rios e Lagos” em mais de 437 km<sup>2</sup> entre 1995 e 2005. A análise revelou ocupação irregular de 1.002 ha no interior da APA Serra do Lajeado, evidenciando conflitos entre preservação ambiental e expansão produtiva. As projeções indicam tendência de intensificação do uso antrópico: até 2055, a área ocupada por atividades agropecuárias poderá atingir aproximadamente 12.114 km<sup>2</sup>, equivalendo a cerca de 57% da área total da microrregião, caso mantidas as condições históricas observadas. Ao integrar evidências empíricas, análises geoespaciais e modelagem preditiva, esta pesquisa contribui para o entendimento aprofundado das transformações territoriais no Cerrado, oferecendo subsídios técnicos para o ordenamento territorial, monitoramento ambiental e formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade regional.

**Palavras-chave:** governança territorial; sustentabilidade ambiental; conversão da cobertura nativa; fronteira agrícola; modelagem preditiva.

## ABSTRACT

FURTADO, Simonni Elias Leite. **Dynamics of land use and occupation and environmental transformation in the Microregion of Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brazil**. Advisor: Luiz Fernando Pires. 2025. Thesis (Doctorate in Geography) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

This research analyzes the spatiotemporal dynamics of land use and land cover in the microregion of Porto Nacional, located within the agricultural frontier of MATOPIBA, between 1985 and 2055. The study departs from the problem of increasing anthropogenic pressure on the native Cerrado ecosystems in a context of accelerated territorial expansion and insufficient environmental planning. The main objective is to examine historical transformations in land use and land cover and to project future scenarios, with emphasis on the territorial and environmental impacts resulting from agro-livestock expansion, urban growth, and unregulated occupation. The methodological approach combines temporal analysis with geoprocessing techniques, employing data from the MapBioma platform, remote sensing imagery, and long-term time series. Seven land-use and land-cover classes were analyzed, especially forest formations, savanna formations, agricultural areas, and pasture systems. Quantitative analysis was supported by descriptive statistics, temporal evolution graphs, and linear regression modeling for projections up to 2055. The model presented a high level of reliability (average  $R^2 = 0.98$ ), confirming the robustness of the projected scenarios. The results reveal an intense process of native vegetation suppression—particularly savanna formations—alongside a marked expansion of agricultural, agro-livestock, and urban areas. From the 1990s onward, with the creation of the State of Tocantins and the establishment of Palmas as the new capital, the microregion underwent substantial territorial restructuring driven by public and private investments, modernization of agro-livestock activities, and rapid advancement of the agricultural frontier over previously underused lands. The construction of the Lajeado Hydroelectric Power Plant and the occupation of the Serra do Lajeado Environmental Protection Area highlight the persistent conflicts between economic development and environmental conservation. Projections for 2055 indicate the continuation of current trends, with further reductions in native vegetation and expansion of anthropized areas, especially agricultural and urban surfaces. By revealing historical patterns and future tendencies with high precision, this research advances scientific understanding of territorial transformations within the Cerrado agricultural frontier and provides technical support for territorial governance and the formulation of public policies oriented toward regional socio-environmental sustainability.

**Keywords:** territorial governance; environmental sustainability; native cover conversion; agricultural frontier; predictive modeling.

### 3.1 Introdução

A análise da dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura do solo tem assumido crescente relevância no contexto das transformações territoriais induzidas pela intensificação das atividades antrópicas, especialmente nas regiões fronteiriças

do agronegócio brasileiro. A microrregião de Porto Nacional, situada no estado do Tocantins e inserida no recorte geoeconômico como uma das 31 microrregiões do MATOPIBA — fronteira agrícola contemporânea formada pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia — constitui um território emblemático para a compreensão das dinâmicas recentes de expansão agropecuária e de suas implicações sobre os ecossistemas do Cerrado.

Em 1985, a área correspondente à atual microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA ainda integrava o Norte Goiano, caracterizado por uma estrutura fundiária predominantemente pecuarista, de baixa densidade populacional e pouca expressividade econômica no contexto do estado de Goiás (Oliveira, 2019). Com a criação do estado do Tocantins, em 1988, e a subsequente instalação de sua capital — Palmas — em 1990, iniciou-se um ciclo de reestruturação territorial e atração de fluxos migratórios e investimentos, alterando profundamente o uso e a cobertura do solo na região.

A formação savânica, típica do bioma Cerrado, predominava no cenário paisagístico da microrregião em 1985, representando mais de dois terços da cobertura vegetal. Entretanto, ao longo das quatro décadas subsequentes, o território foi submetido a uma expressiva conversão de áreas nativas em usos antrópicos, especialmente voltados à agropecuária, silvicultura e expansão urbana. Esse processo foi impulsionado por vetores estruturantes, como a consolidação da infraestrutura rodoviária (BR-153 e BR-010), a instalação da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães (UHE Lajeado), e o fortalecimento institucional do MATOPIBA enquanto fronteira agrícola, conforme apontado em estudos regionais (Miranda; Magalhães; Carvalho, 2014; Sano *et al.*, 2019; Agroicone; Solidaridad, 2024).

Parte-se da hipótese de que a expansão agropecuária na microrregião de Porto Nacional, especialmente após a década de 1990, tem provocado uma redução significativa das formações vegetais nativas, com destaque para os ecossistemas savânicos, comprometendo a integridade ecológica do Cerrado. Adicionalmente, considera-se que a ausência de políticas públicas integradas de ordenamento territorial contribuiu para a ocupação desordenada da microrregião, intensificando conflitos entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental, sobretudo em áreas de proteção como a APA Serra do Lajeado. Por fim, parte-se da hipótese de que, na ausência de intervenções regulatórias, as tendências observadas entre 1985

e 2022 — de avanço contínuo das áreas antropizadas — tenderão a persistir até 2055, ampliando os impactos ambientais e territoriais na região.

O presente capítulo, portanto, objetiva analisar a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA entre 1985 e 2055, articulando dados empíricos, análises geoespaciais e modelagem preditiva por machine learning. Busca-se compreender, com base em uma abordagem multitemporal e multiescalar, os processos de ocupação, transformação e degradação ambiental associados à expansão da fronteira agrícola, bem como seus desdobramentos sobre a sustentabilidade dos ecossistemas e os desafios para a gestão territorial. Ao estabelecer um panorama histórico e prospectivo das mudanças ocorridas, esta análise fornece subsídios técnicos e científicos essenciais para políticas públicas, planejamento ambiental, monitoramento territorial e estratégias de conservação compatíveis com a complexidade e vulnerabilidade da região.

### **3.2 Fundamentos teóricos e abordagens conceituais**

A análise parte da compreensão do espaço geográfico como uma construção histórica e social, resultado das interações entre sociedade e natureza (Santos, 2023). A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, anteriormente inserida no “Norte Goiano”, apresentava, até meados da década de 1980, características de um espaço marginalizado do ponto de vista socioeconômico (Oliveira, 2019). A criação do estado do Tocantins (1988) e a implantação da capital Palmas (1990) constituíram marcos decisivos de reordenamento territorial, desencadeando fluxos migratórios, investimentos e transformações espaciais vinculadas às políticas públicas de ocupação da nova fronteira agrícola.

Essa reestruturação territorial está diretamente relacionada ao conceito de “território usado” (Santos, 2023), que envolve o uso seletivo, político e funcional do espaço por diferentes agentes — Estado, agronegócio, empresas de infraestrutura e fluxos migratórios. Nesse processo, a microrregião passa de uma economia extensiva, dispersa e com baixa densidade técnica para uma dinâmica intensiva, articulada às redes nacionais e globais de commodities, inserindo-se progressivamente no projeto do MATOPIBA.

A pesquisa se insere no debate sobre a expansão da fronteira agropecuária no Cerrado brasileiro, especialmente no contexto da região do MATOPIBA,

considerada a última grande fronteira agrícola do país. A trajetória da ocupação da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA reflete a substituição de pastagens extensivas por agricultura mecanizada em larga escala — sobretudo soja e milho — e a consequente remoção acelerada da vegetação nativa, fenômeno amplamente discutido por Klink e Machado (2005) e Sano *et al.* (2019).

A transformação do uso do solo também pode ser compreendida à luz da teoria da substituição de uso da terra, segundo a qual atividades de menor rentabilidade econômica (como pecuária extensiva) cedem espaço para usos mais intensivos e altamente capitalizados (como a agricultura mecanizada), sobretudo em regiões de valorização fundiária crescente (Chiodi, 2024). Esse processo produz reconfigurações socioambientais profundas, marcadas pela concentração fundiária, deslocamento de atividades tradicionais e homogeneização da paisagem.

A intensificação do uso da terra na microrregião está ancorada em um modelo agroexportador, centrado na lógica do agronegócio, que produz transformações ambientais significativas, como perda de biodiversidade, compactação e degradação dos solos, redução da cobertura vegetal nativa e impactos nos recursos hídricos. A crítica a esse modelo é sustentada por autores como Porto-Gonçalves (2005) e Gorz (1975), que destacam os limites ecológicos e sociais da expansão produtiva desregulada, especialmente em biomas sensíveis como o Cerrado.

O caso da Usina Hidrelétrica de Lajeado (UHE Lajeado) e o avanço da ocupação sobre a APA Serra do Lajeado ilustram tensões estruturais entre conservação e produção, sobretudo em áreas legalmente protegidas, mas vulneráveis à pressão do capital agrário e imobiliário (Acseirad, 2004). Esse conflito evidencia a ausência histórica de políticas integradas de ordenamento territorial, contribuindo para dinâmicas espaciais fragmentadas e ambientalmente frágeis.

A fundamentação metodológica da pesquisa ancora-se no uso de geotecnologias e de modelos estatísticos preditivos, incluindo regressão linear aplicada a séries históricas (1985–2015) com alto grau de confiabilidade ( $R^2 = 0,98$ ). Essa abordagem se insere no campo da modelagem preditiva de cenários (Verburg *et al.*, 2006; Lambin *et al.*, 2003), permitindo simular tendências futuras de uso e cobertura do solo até 2055. Tais modelos contribuem para identificar padrões de expansão agrícola, riscos de continuidade da supressão da vegetação nativa e possíveis trajetórias de transformação ambiental.

Esse enfoque dialoga com os conceitos de dinâmica de paisagens, resiliência socioecológica (Folke *et al.*, 2002) e planejamento territorial sustentável, reforçando a importância do monitoramento contínuo e da análise multitemporal para a gestão ambiental.

Assim, os fundamentos teóricos da pesquisa integram Geografia, Ecologia, Economia agrária e Planejamento Ambiental, compondo uma abordagem interdisciplinar que permite uma leitura crítica e prospectiva da transformação territorial na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. Ao articular a compreensão histórica dos processos de ocupação com as tendências contemporâneas de uso da terra, evidencia-se a necessidade de conciliar desenvolvimento econômico, conservação ambiental e ordenamento territorial, especialmente diante da vulnerabilidade ecológica do Cerrado.

### **3.3 Metodologia e procedimentos técnicos**

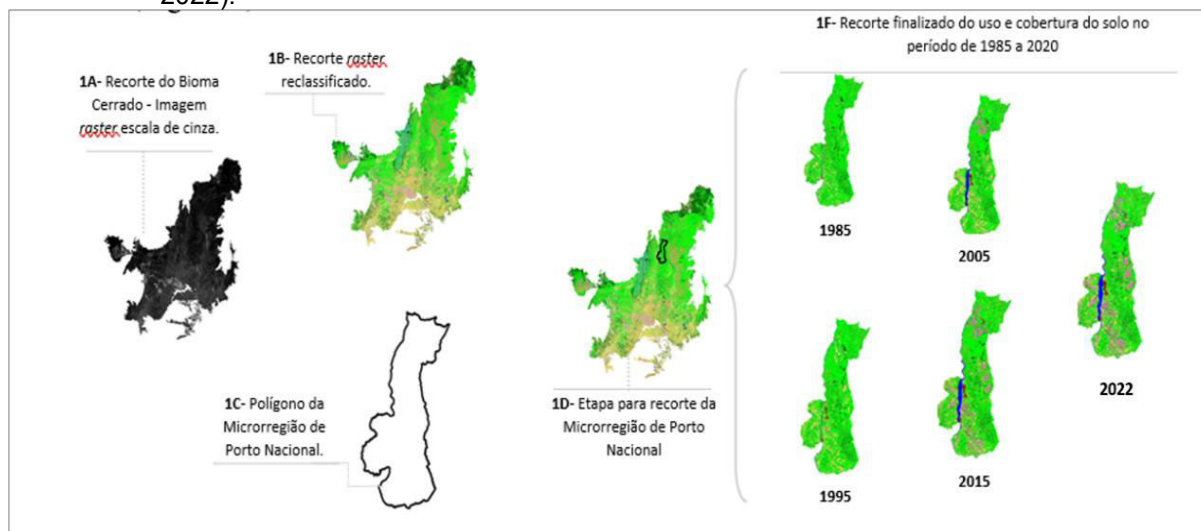
A análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA foi realizada a partir de dados anuais da Coleção 8.0 do Projeto MapBioma – Série Histórica de Uso e Cobertura da Terra do Brasil, disponibilizados e processados na plataforma *Google Earth Engine* (GEE). As imagens foram produzidas a partir de composições dos sensores *Landsat* 5, 7 e 8, com resolução espacial de 30 metros, abrangendo o período de 1985 a 2022. O uso dessas séries históricas é amplamente reconhecido na literatura para estudos de mudanças ambientais em larga escala, dado seu rigor metodológico e padronização (Souza *et al.*, 2020; MapBioma, 2023).

A área de estudo encontra-se integralmente inserida no Domínio Morfoclimático do Cerrado, razão pela qual foram consideradas exclusivamente as classes de uso e cobertura pertencentes a esse domínio, totalizando 14 categorias: formações florestais; formação savânica; silvicultura; veredas alagáveis; formação campestre; pastagem; cana-de-açúcar; mosaico de usos; área urbanizada; outras áreas não vegetadas; mineração; rios e lagos; soja; e outras lavouras temporárias. Essa estrutura segue rigorosamente a legenda oficial adotada pelo MapBioma na Coleção 8.0, cuja classificação se baseia em algoritmos de *machine learning* validados nacionalmente (Souza *et al.*, 2020).

O processamento inicial dos dados foi realizado em ambiente *Google Earth Engine*, utilizando mosaicos anuais *Landsat* e o *script* oficial *mapbioma-user-toolkit-lulc.js*, fornecido pela equipe técnica do projeto. As imagens foram geradas na escala 1:250.000 e extraídas por meio dos seguintes parâmetros: *Collection*: 08; *Table*: *biome*; *Properties*: *name*; *Feature*: *Cerrado*; *Data Type*: *coverage*; *Layers*: 1985–2022. A seleção dessas camadas segue as recomendações metodológicas globais para estudos de detecção de mudanças em ambientes tropicais, conforme defendido por Hansen *et al.* (2013) e Pekel *et al.* (2016).

As imagens *raster* foram posteriormente integradas a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), juntamente com dados vetoriais auxiliares. Para o processamento e estruturação cartográfica, utilizou-se o *software open-source* QGIS, versão 3.40.11 *Bratislava* (QGIS Development Team, 2024). As classes foram reclassificadas a partir dos códigos hexadecimais oficiais da Coleção 8.0 e, em seguida, realizou-se o recorte espacial da microrregião utilizando seu *shapefile* oficial. A partir dessa etapa, foram organizados cinco períodos de análise: 1985, 1995, 2005, 2015 e 2022, respeitando intervalos de 10 anos para as quatro etapas iniciais e de 7 anos para o último período, conforme a disponibilidade da série histórica (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Etapas metodológicas para a elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo (1985–2022).



Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2023) e Naturatins (2024).

A análise quantitativa das mudanças no uso e cobertura do solo — incrementos e supressões — foi realizada a partir do cálculo da variação percentual entre períodos consecutivos, utilizando-se a relação entre a área atual e a área imediatamente anterior, conforme demonstrado na (Equação 3.1). Tal procedimento

segue abordagens amplamente utilizadas na literatura de análise temporal de mudanças ambientais, como indicam Lambin *et al.* (2003), Pontius e Chen (2006) e Verburg *et al.* (2006).

$$X = \frac{X1+X2+X3+X4}{\eta} \quad (3.1)$$

Onde:

X = média geral

X1 = área 1985 – área de 1995

X2= área 1995 – área de 2005

X3 = área 2005 – área de 2015

X4 = área 2015 – área de 2022

$\eta$  = número de elementos analisados

A verificação da acurácia dos resultados seguiu dois procedimentos complementares. O primeiro consistiu na análise do intervalo de confiança, representado por duas linhas paralelas à linha de tendência da regressão. Conforme Chein (2019), quanto menor a dispersão entre essas linhas, maior a confiabilidade do modelo, uma vez que representam a margem de erro (positiva ou negativa), conforme também discutido por Moura e Lamounier (2007).

O segundo método utilizou o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), indicador amplamente consolidado na literatura de modelagem estatística. O modelo apresentou um  $R^2 = 0,9867$ , indicando que 98,67% da variação observada é explicada pelos valores previstos, revelando forte correlação e elevada confiabilidade dos resultados (Chein, 2019; Moura; Lamounier, 2007). Estudos recentes reforçam que valores de  $R^2$  superiores a 0,90 são considerados excelentes para modelagens de tendências de uso da terra, especialmente em análises de regressão linear aplicadas a séries históricas ambientais (Huang *et al.*, 2021; Li; Wu; Wu, 2022).

### 3.4 Resultados

#### 3.4.1 Dinâmica espaço-temporal do uso e da cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional, MATOPIBA (1985-2005)

A área atualmente correspondente à microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, em 1985, ainda integrava o estado de Goiás, especificamente a região conhecida como Norte Goiano — território historicamente marginalizado do ponto de vista socioeconômico, sobretudo quando comparado ao Sul do estado, então mais dinâmico economicamente (Oliveira, 2019). Nesse contexto, predominava um modelo produtivo baseado na pecuária extensiva, favorecida pelo relevo relativamente plano, pela disponibilidade de terras e pela presença de formações savânicas típicas do Cerrado.

A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA possui uma área de 2.197,73 km<sup>2</sup>, correspondendo a 7,63% do território estadual tocantinense e 3,02% da área total do MATOPIBA. Em 1985, sua cobertura nativa era dominada pela formação savânica, que abrangia 66,36% da área e se distribuía de forma contínua em todas as direções do território.

As categorias Rio e lago e veredas alagáveis somavam, juntas, 1,4% da área total analisada. A primeira correspondia a 0,68%, destacando-se o rio Tocantins — que corta a região no sentido sul-norte pela porção oeste da microrregião —, enquanto a segunda representava 0,79%, distribuída em áreas isoladas sujeitas à hidromorfia.

As classes formação florestal e formação campestre também apresentavam relevância na configuração ambiental de 1985. A formação florestal ocupava 16,42%, especialmente associada a vales, topos de encostas e margens de rios. Já a formação campestre cobria 0,41%, distribuída em pequenos núcleos descontínuos — condição que favoreceu a expansão da pecuária extensiva em praticamente todo o território.

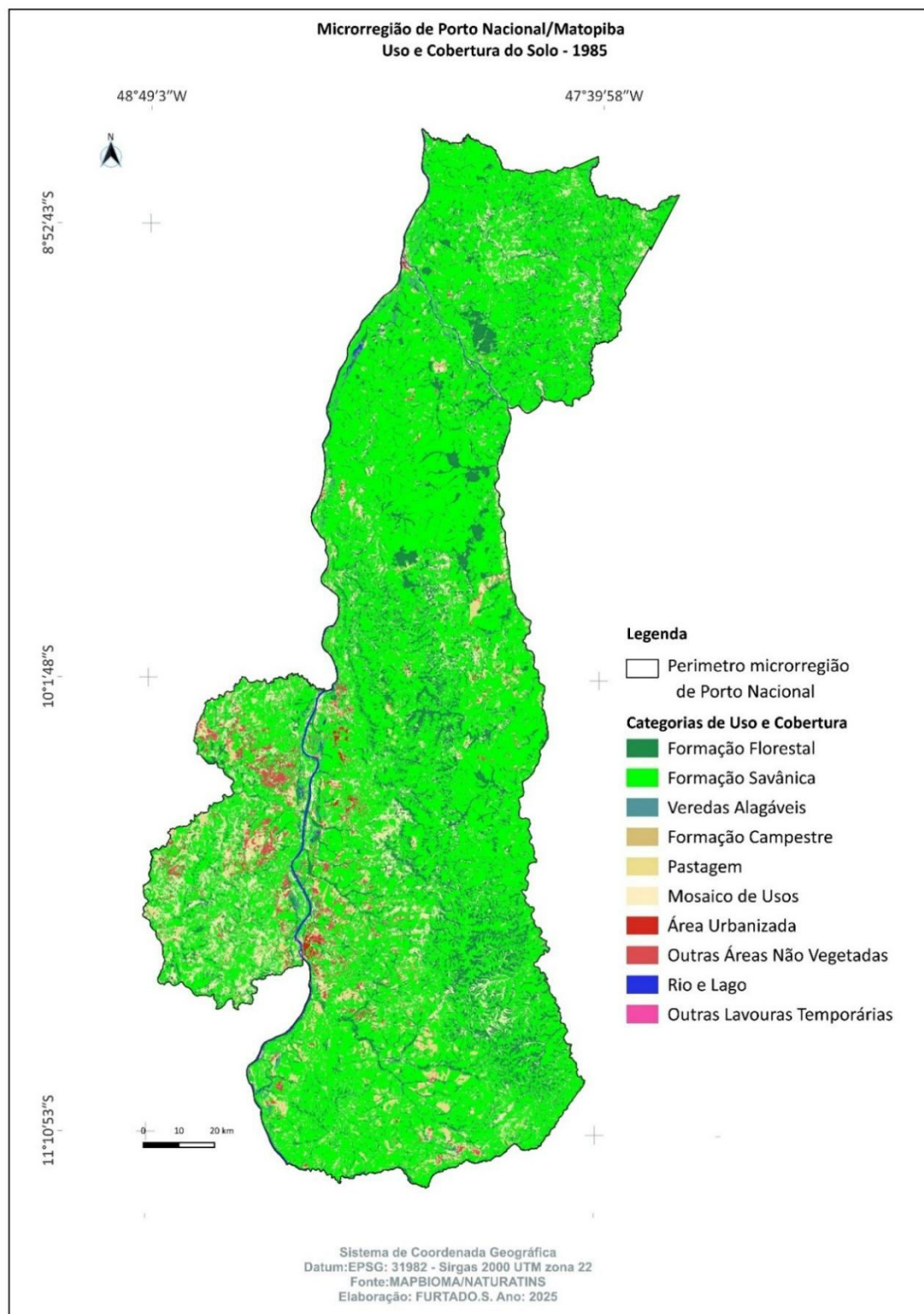
No que se refere aos usos antrópicos, observou-se que, em 1985, as pastagens ocupavam 3,23%, concentradas principalmente nas porções oeste, sudoeste e sul da microrregião. O mosaico de usos, que integra pequenas áreas agrícolas, pastagens e vegetação secundária, representava 9,46%, distribuído de maneira difusa.

A classe áreas não vegetadas, correspondente a superfícies expostas — resultantes da supressão da cobertura vegetal nativa ou de outras formas de remoção de cobertura — representava 2,48% da área estudada. A classe área

urbanizada, ainda incipiente, abrangia 0,17%, refletindo o estágio inicial de consolidação urbana regional.

Considerando-se as categorias de uso do solo em 1985 (pastagem, mosaico de usos, outras áreas não vegetadas e área urbanizada), constata-se que aproximadamente 15,34% do território já apresentava algum tipo de transformação antrópica. Destaca-se que a classe outras áreas não vegetadas — um indicador sensível dos primeiros movimentos de avanço da fronteira agrícola — já totalizava 526,20 km<sup>2</sup>, enquanto as áreas urbanizadas ocupavam apenas 35,10 km<sup>2</sup>. Assim, a extensão de áreas desmatadas era cerca de 15 vezes maior do que aquela destinada à ocupação urbana no período inicial da série temporal analisada (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA em 1985.



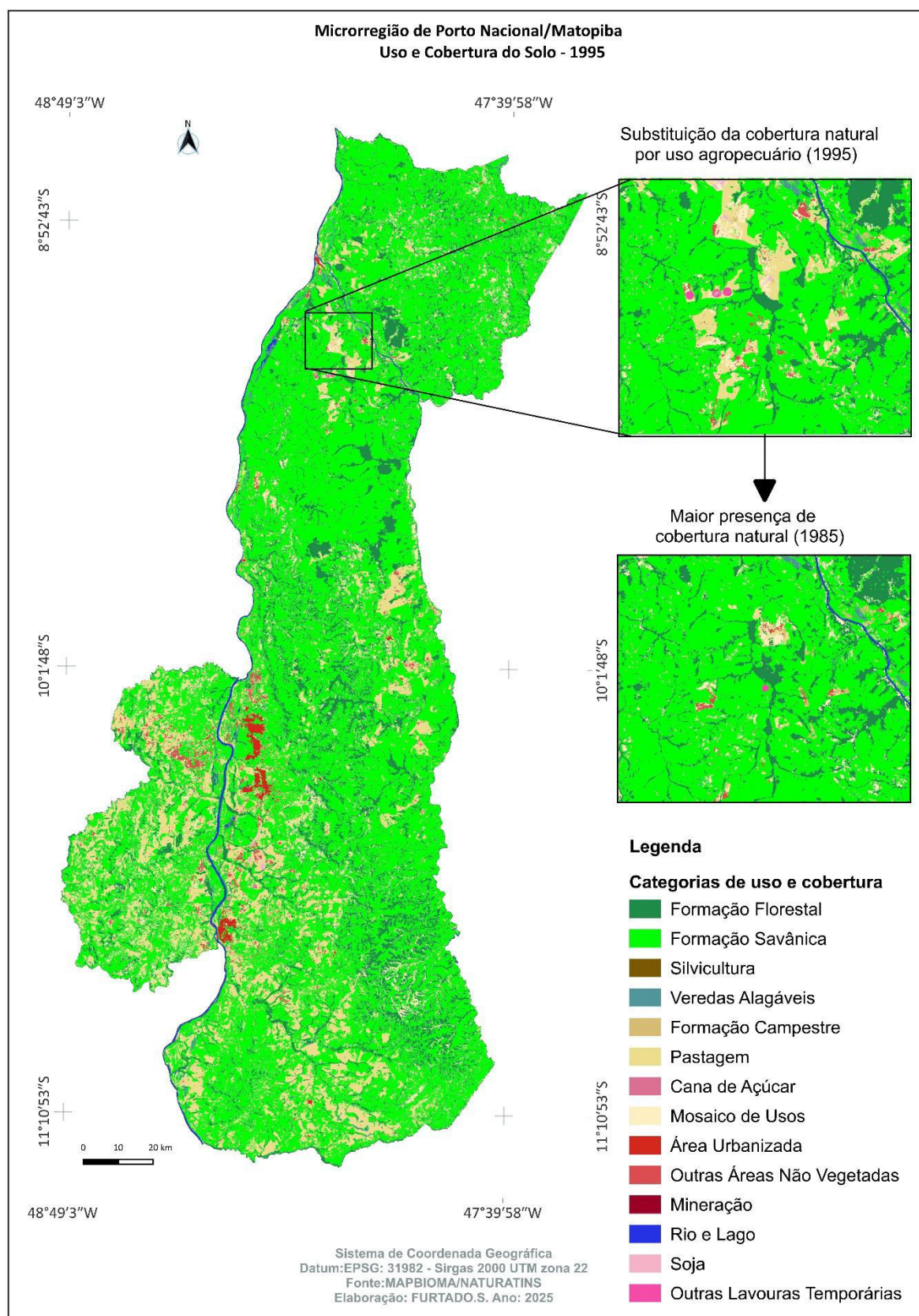
Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2023) e Naturatins (2024).

As décadas de 1980 a 1990 marcaram grandes transformações no estado do Tocantins, tendo em vista que foi nesse período que ocorreu a criação do Estado, em 5 de outubro de 1988, sua instalação em 1º de janeiro de 1989 e, por fim, a instalação

da capital Palmas, em 1º de janeiro de 1990. Todos esses acontecimentos otimizaram as frentes migratórias para a região e atraíram novos investidores nas mais diferentes áreas, dentre elas a agropecuária (Brasil, 1988).

Assim, foi possível observar que a cobertura nativa do solo — formação savânica, formação florestal, formação campestre, rios e lagos, veredas alagáveis— representava aproximadamente 17.086,42 km<sup>2</sup> no período de 1995, o que correspondeu a uma redução de 859,38 km<sup>2</sup> em relação a 1985 (Figura 3.3). Essa redução quase equivalente ao incremento das áreas antrópicas indica um processo direto de substituição da cobertura nativa pelos usos agropecuários ao longo da década.

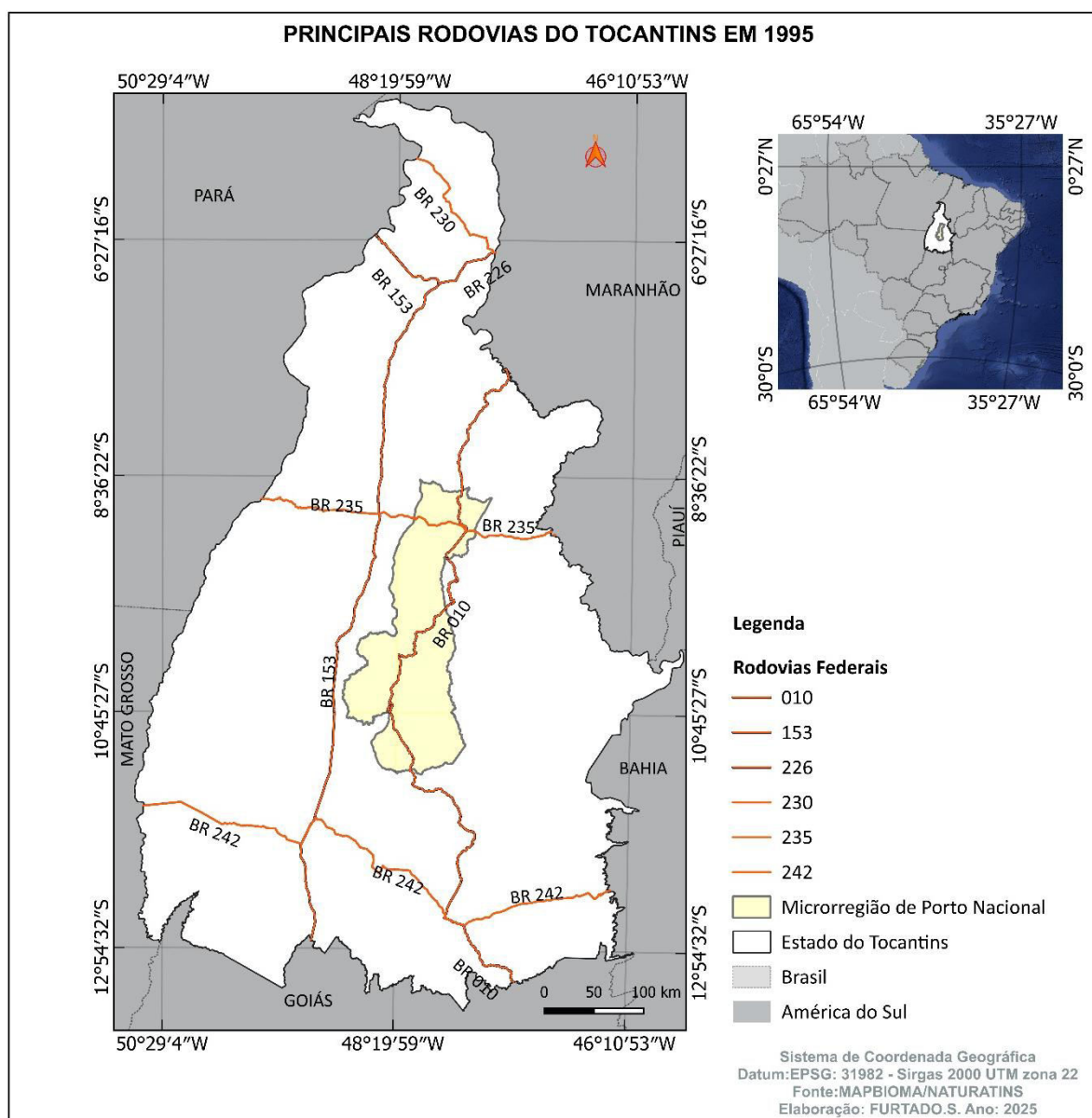
Figura 3.3 – Uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA em 1995.



Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2023) e Naturatins (2024).

No ano de 1995, a espacialização do uso do solo na área analisada já evidenciava maior concentração dos diferentes usos antrópicos nas porções sul e sudoeste da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. Essa distribuição espacial esteve fortemente condicionada à proximidade dos principais centros urbanos, bem como à facilidade de acesso e escoamento pela BR-153 e TO-050 (atual BR-010) (Figura 3.4)

Figura 3.4 – Principais vias de acesso e escoamento na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA em 1995.



Fonte: A autora, a partir de DNIT e Naturatins.

Nesse contexto, as categorias pastagem, silvicultura, mosaico de usos, área urbanizada, outras áreas não vegetadas, mineração, cana-de-açúcar e outras

lavouras temporárias totalizavam aproximadamente 4.111 km<sup>2</sup> em 1995. Ressalta-se, ainda, que a categoria área urbanizada apresentou crescimento de cerca de 183%, passando de aproximadamente 35 km<sup>2</sup>, em 1985, para 99 km<sup>2</sup> em 1995 (Tabela 3.1). (Tabela 3.1.).

Tabela 3.1 – Redução da cobertura nativa e expansão agropecuária entre 1985 e 1995.

| <b>Cobertura/Uso</b>        | <b>1985</b>             | <b>1995</b>             | <b>Variação ref. ao período anterior</b> |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------------|
|                             | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (km <sup>2</sup> ) |                                          |
| Formação Florestal          | 3.481.2                 | 3.249.7                 | -231.4                                   |
| Formação Savânica           | 14.065.8                | 13.488.7                | -577.1                                   |
| Veredas Alagáveis           | 166.6                   | 136.2                   | -30.4                                    |
| Formação Campestre          | 87.9                    | 68.6                    | -19.4                                    |
| Rio, Lago e Oceano          | 144.4                   | 143.2                   | -1.2                                     |
| <b>Total</b>                | <b>17.945.8</b>         | <b>17.086.4</b>         | <b>-859.4</b>                            |
| Silvicultura                | 0.0                     | 1.8                     | 1.8                                      |
| Pastagem                    | 684.4                   | 2.685.2                 | 2000.8                                   |
| Cana                        | 0.0                     | 0.3                     | 0.3                                      |
| Mosaico de Usos             | 2.005.4                 | 1.025.3                 | -980.1                                   |
| Área Urbanizada             | 35.1                    | 99.5                    | 64.4                                     |
| Outras Áreas não Vegetadas  | 526.20                  | 282.72                  | -243.48                                  |
| Mineração                   | 0.0                     | 0.4                     | 0.4                                      |
| Soja                        | 0.0                     | 11.5                    | 11.5                                     |
| Outras Lavouras Temporárias | 0.8                     | 4.5                     | 3.7                                      |
| <b>Total</b>                | <b>3.251.9</b>          | <b>4.111.3</b>          | <b>859.3</b>                             |

Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

O uso do solo para o período de 2005 apresentou novas categorias de uso, como a soja, e evidenciou uma mudança drástica na categoria Rios, Lago e Oceano. Enquanto, em 1995, essa categoria ocupava aproximadamente 143,2 km<sup>2</sup>, em 2005 passou a ocupar cerca de 626,3 km<sup>2</sup>. Esse acréscimo de 337,3 km<sup>2</sup> decorre da instalação da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães (UHE Lajeado), cuja operação iniciou-se entre 2001 e 2002, provocando o represamento do rio Tocantins e o inundamento do baixo curso de seus afluentes, situados a montante da barragem (Tundisi, 2003).

No ano de 2005, a cobertura nativa — representada pelas categorias formação savânica, formação florestal, formação campestre, veredas alagáveis, e rios e lagos — ocupava 15.711,9 km<sup>2</sup>, equivalendo a aproximadamente 74,1% da área

total da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. É importante ressaltar que o aumento dessa porcentagem está diretamente relacionado ao incremento artificial da categoria rios e lagos, em função da operação da UHE Lajeado.

No que se refere ao uso do solo, a categoria área urbanizada manteve seu ritmo de expansão, passando de 99,5 km<sup>2</sup> em 1995 para 126,3 km<sup>2</sup> em 2005, um crescimento de 26,9%, influenciado pelo contínuo fluxo migratório direcionado à região após a criação da capital Palmas.

A categoria soja apresentou o crescimento mais expressivo no período. Entre 1995 e 2005, sua área expandiu de 11,5 km<sup>2</sup> para 782,8 km<sup>2</sup>, o que representa um aumento de 6.702%, ou seja, sessenta e oito vezes maior do que no período anterior. Em termos relativos, a soja passou a representar 3,7% da área total da microrregião em 2005. Essa expansão reflete a consolidação da agricultura mecanizada como atividade dominante na região central do Tocantins, impulsionada pela melhoria da infraestrutura logística e pela valorização econômica das commodities agrícolas (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (1995–2005).

(continua)

| <b>Cobertura/Uso</b>       | <b>1995<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>2005<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Varição ref. ao<br/>período anterior</b> |
|----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Formação Florestal         | 3.249.7                                   | 3.232.3                                   | -0.5                                        |
| Formação Savânica          | 13.488.7                                  | 11.646.2                                  | -13.7                                       |
| Veredas Alagáveis          | 136.2                                     | 136.4                                     | 0.9                                         |
| Formação Campestre         | 68.6                                      | 70.6                                      | 2.9                                         |
| Rio, Lago e Oceano         | 143.2                                     | 626.3                                     | 483,1                                       |
| <b>Total</b>               | <b>17.086.42</b>                          | <b>15.711.90</b>                          | <b>-8.04</b>                                |
| Silvicultura               | 1.8                                       | 5.3                                       | 188.9                                       |
| Pastagem                   | 2.685.2                                   | 3.636.6                                   | 35.4                                        |
| Cana                       | 0.32                                      | 0.16                                      | -47.9                                       |
| Mosaico de Usos            | 1.025.3                                   | 683.3                                     | -33.4                                       |
| Área Urbanizada            | 99.5                                      | 126.3                                     | 26.9                                        |
| Outras Áreas não vegetadas | 282.7                                     | 223.5                                     | -20.9                                       |

Tabela 3.2 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (1995–2005).

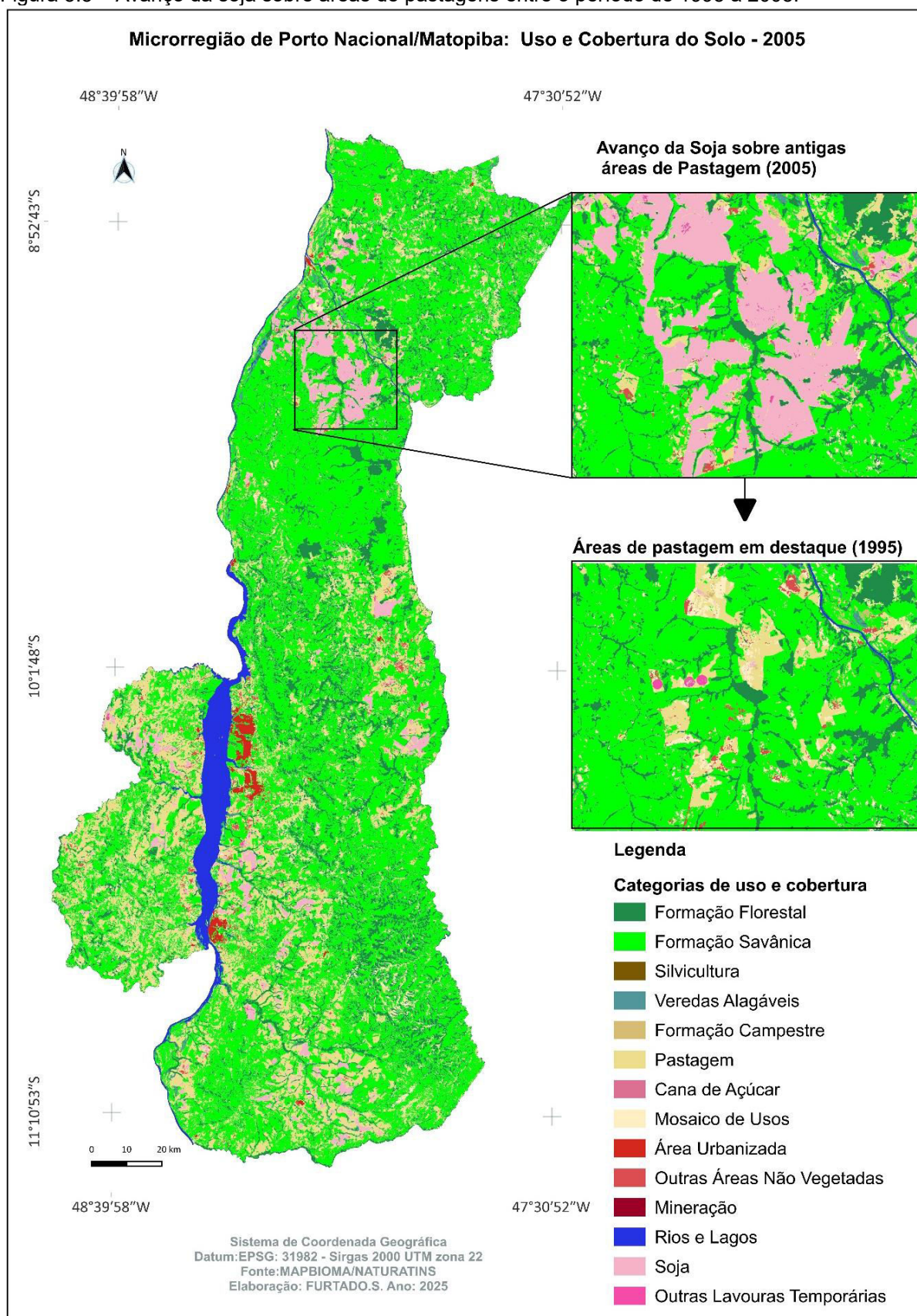
(conclusão)

| <b>Cobertura/Uso</b>        | <b>1995<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>2005<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Varição ref. ao<br/>período anterior</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Mineração                   | 0.44                                      | 0.54                                      | 22.3                                        |
| Soja                        | 11.5                                      | 782.8                                     | 6702.2                                      |
| Outras Lavouras Temporárias | 4.5                                       | 27.3                                      | 503.2                                       |
| <b>Total</b>                | <b>4.111.3</b>                            | <b>5.485.8</b>                            | <b>33.4</b>                                 |

Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8) e Naturatins.

De um modo geral, o uso do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA apresentou um significativo incremento das categorias antrópicas, que passaram a ocupar aproximadamente 5.485,8 km<sup>2</sup> em 2005, impulsionadas pela expansão da fronteira agrícola da região do MATOPIBA, especialmente a partir do início dos anos 2000. Nesse contexto, influenciada pelo avanço agropecuário regional, já demonstrava, em 2005, os primeiros indícios de conversão de antigas áreas de pastagem em áreas de cultivo de soja (Figura 3.5).

Figura 3.5 – Avanço da soja sobre áreas de pastagens entre o período de 1995 a 2005.



Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

A cobertura nativa do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA continuava a ceder espaço aos diferentes usos antrópicos, especialmente nas áreas com maior facilidade de escoamento da produção agrícola, conectadas aos principais eixos logísticos regionais. Assim, em 2015, as categorias de formação florestal, formação savânica, formação campestre, veredas alagáveis e rio, lago e oceano apresentaram uma redução acumulada de aproximadamente 1.558,7 km<sup>2</sup> em relação ao período anterior — valor que corresponde exatamente ao registrado na (Tabela 3.3)

Por outro lado, em 2015, a expansão agropecuária alcançou uma área de aproximadamente 7.044,5 km<sup>2</sup>, resultado da expressiva ampliação de categorias como soja, pastagem, outras lavouras temporárias, silvicultura e cana-de-açúcar, além do crescimento da área urbanizada e das outras áreas não vegetadas. Considerando a área total da microrregião (aproximadamente 21.197 km<sup>2</sup>), observou-se que mais de 33,2% do território estava ocupado por categorias diretamente relacionadas ao uso antrópico do solo: silvicultura, pastagem, cana-de-açúcar, mosaico de usos, área urbanizada, outras áreas não vegetadas, mineração, soja e outras lavouras temporárias (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (2005–2015).

(continua)

| <b>Cobertura/Uso</b> | <b>2005<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>2015<br/>Área<br/>(km<sup>2</sup>)</b> | <b>Variação ref. ao<br/>período anterior</b> |
|----------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Formação Florestal   | 3.232.4                                   | 3.041.9                                   | -190.4                                       |
| Formação Savânica    | 11.646.2                                  | 10.280.9                                  | -1365.4                                      |
| Veredas Alagáveis    | 136.4                                     | 140.0                                     | 3.6                                          |
| Formação Campestre   | 70.6                                      | 65.6                                      | -5.2                                         |
| Rio, Lago e Oceano   | 626.3                                     | 625.0                                     | -1.3                                         |
| <b>Total</b>         | <b>15.711.9</b>                           | <b>14.153.2</b>                           | <b>-1558.7</b>                               |
| Silvicultura         | 5.3                                       | 14.5                                      | 9.2                                          |
| Pastagem             | 3.636.6                                   | 4.308.9                                   | 672.2                                        |
| Cana                 | 0.16                                      | 76.0                                      | 75.9                                         |

Tabela 3.3 – Expansão agropecuária sobre a cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (2005–2015).

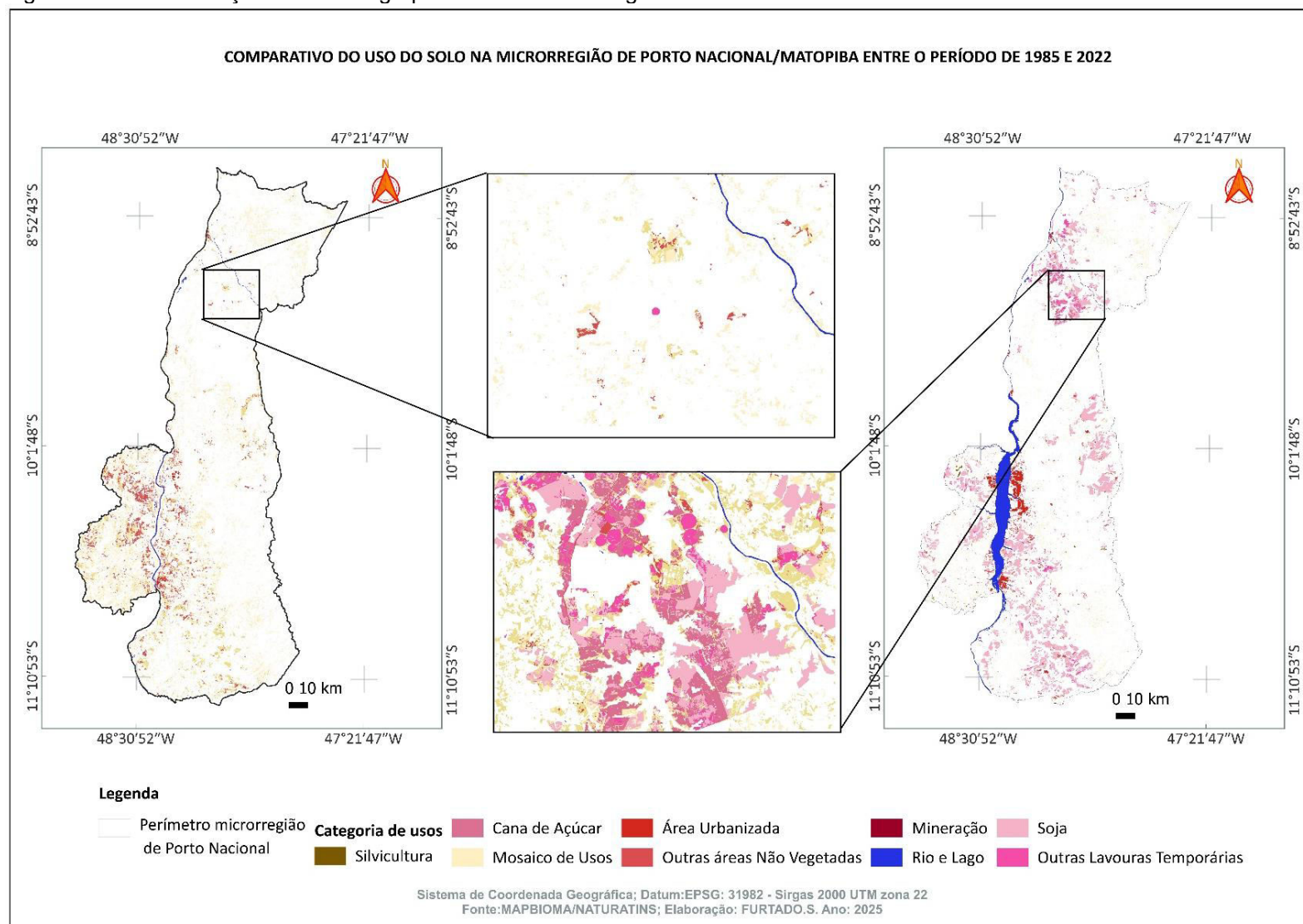
(conclusão)

| <b>Cobertura/Uso</b>        | <b>2005<br/>Área km<sup>2</sup></b> | <b>2015<br/>Área km<sup>2</sup></b> | <b>Variação ref. ao<br/>período anterior</b> |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|
| Mosaico de Usos             | 683.3                               | 584.7                               | -98.7                                        |
| Área Urbanizada             | 126.3                               | 165.8                               | 39.5                                         |
| Outras Áreas não Vegetadas  | 223.5                               | 260.8                               | 37.4                                         |
| Mineração                   | 0.54                                | 0.63                                | 0.08                                         |
| Soja                        | 782.8                               | 1.403.66                            | 620.87                                       |
| Outras Lavouras Temporárias | 27.33                               | 229.5                               | 202.1                                        |
| <b>Total</b>                | <b>5.485.8</b>                      | <b>7.044.5</b>                      | <b>1558.7</b>                                |

Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

No período de 2022, a expansão agropecuária ocupava uma área de aproximadamente 7.955,9 km<sup>2</sup>, o que representou um incremento de cerca de 6.581,4 km<sup>2</sup> em relação ao ano de 1985, correspondendo a um aumento de quase 500% (Figura 3.6).

Figura 3.6 – Intensificação dos usos agropecuários na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



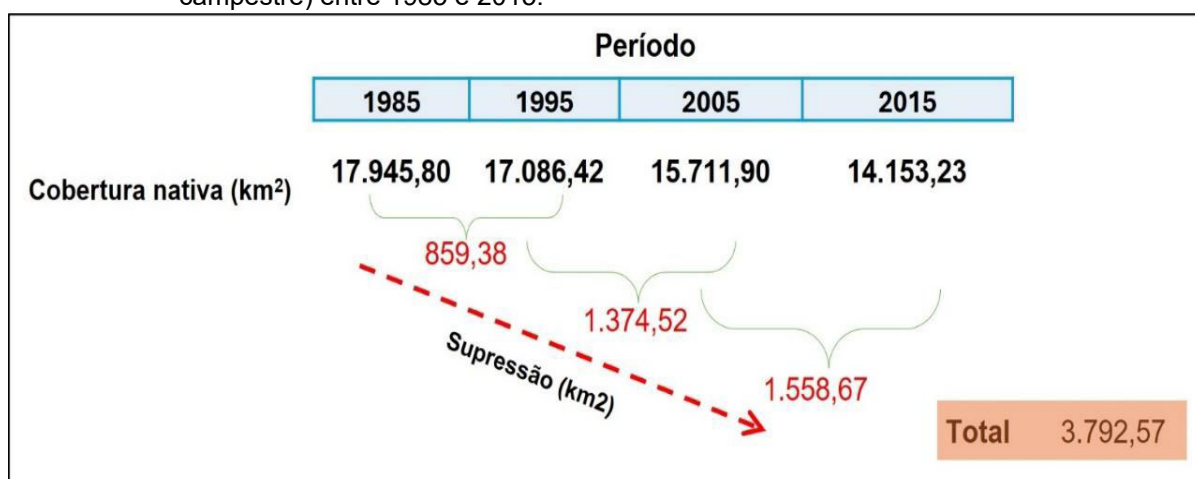
Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

### 3.4.2 Perspectivas de uso e cobertura do solo até 2055

Com o desenvolvimento da análise temporal do uso e cobertura do solo no período de 1985 a 2015, foi possível estabelecer uma previsão para a dinâmica territorial até o ano de 2055. Para a construção do modelo preditivo, considerou-se a continuidade das mesmas condições históricas, socioeconômicas, tecnológicas e ambientais que determinaram as transformações observadas até 2015, assumindo, portanto, um cenário de tendência linear. Nesse contexto, o marco inicial do modelo ( $t_0$ ) corresponde ao ano de 2015, e não a 2022, uma vez que o intervalo utilizado para a regressão foi estruturado em períodos decenais.

A análise da supressão da cobertura vegetal nativa demonstra que, entre 1985 — ano base da avaliação — e 2015, ocorreu uma redução acumulada de 3.792,6 km<sup>2</sup>, considerando o conjunto das classes de formação florestal, formação savânica e formação campestre. Esse valor corresponde à soma das perdas sucessivas registradas entre os períodos 1985–1995, 1995–2005 e 2005–2015, conforme representado na (Figura 3.7), evidenciando a progressiva conversão das áreas naturais para usos agropecuários e antrópicos.

Figura 3.7 – Supressão da cobertura nativa (formação florestal, formação savânica e formação campestre) entre 1985 e 2015.

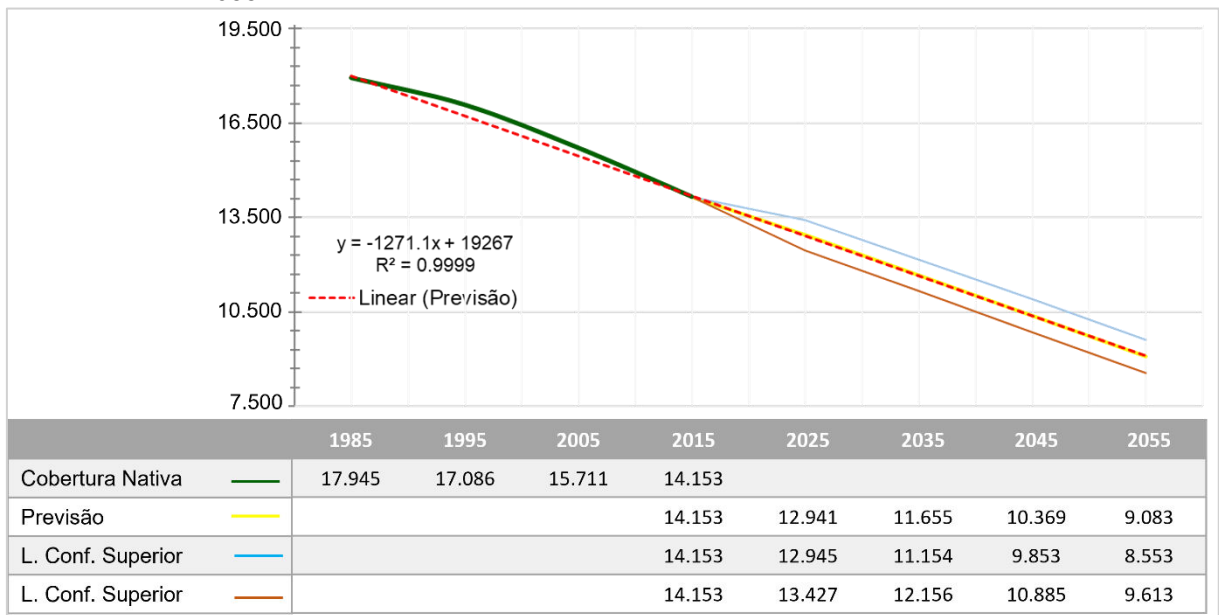


Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

A partir dos dados consolidados para os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015, foi possível elaborar a previsão aproximada da supressão da cobertura nativa até 2055 (Figura 3.8). A dinâmica estimada demonstra que, até o final de 2025, restarão apenas aproximadamente 12.941,3 km<sup>2</sup> de cobertura remanescente. Considerando o intervalo

entre 2015 e 2025, a projeção aponta para uma redução de cerca de 8,6%, equivalente a uma perda absoluta de aproximadamente 1.211,8 km<sup>2</sup>. Esse valor corresponde a uma taxa média de supressão de 0,34 km<sup>2</sup> por dia, o que equivale, em termos ilustrativos, à eliminação diária de uma área semelhante a quase dois campos de futebol com as dimensões do Estádio do Maracanã. (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Previsão da supressão da cobertura nativa na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA até 2055.

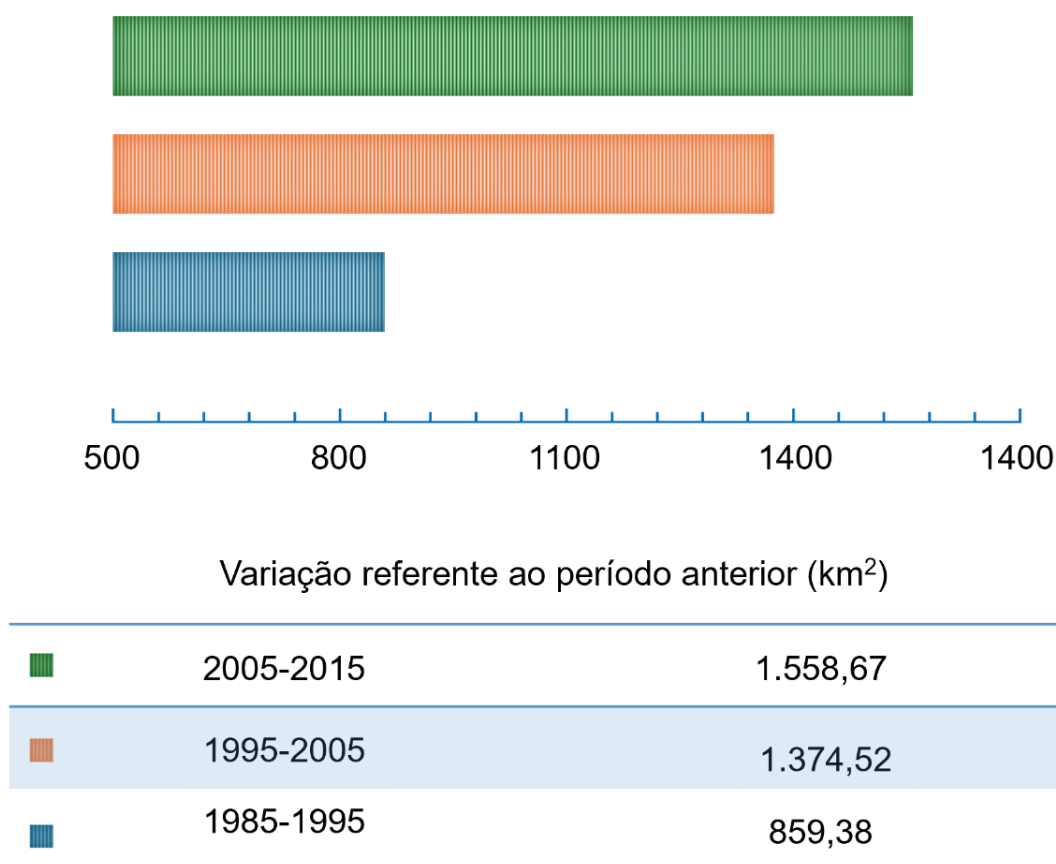


Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022).

A projeção para o intervalo entre 2015 e 2055 indica uma tendência de aceleração contínua na supressão, totalizando uma perda adicional estimada de 5.069,74 km<sup>2</sup>, o que corresponde a cerca de 35,8% da cobertura originalmente existente em 2015.

O modelo preditivo utilizado apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,98$ ), valor que denota elevado grau de ajuste entre os dados observados e estimados. Segundo Graça Martins (2019), modelos com  $R^2$  superiores a 0,95 apresentam robustez e forte capacidade explicativa, conferindo alta confiabilidade às projeções. A tendência observada evidenciou que o incremento do uso do solo avança paulatinamente sobre a cobertura nativa, fato corroborado pela variação antrópica acumulada entre 1985 e 2015, período no qual ocorreu um incremento de aproximadamente 3.792,6 km<sup>2</sup> (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Incremento dos usos agropecuários entre 1985 e 2015 na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

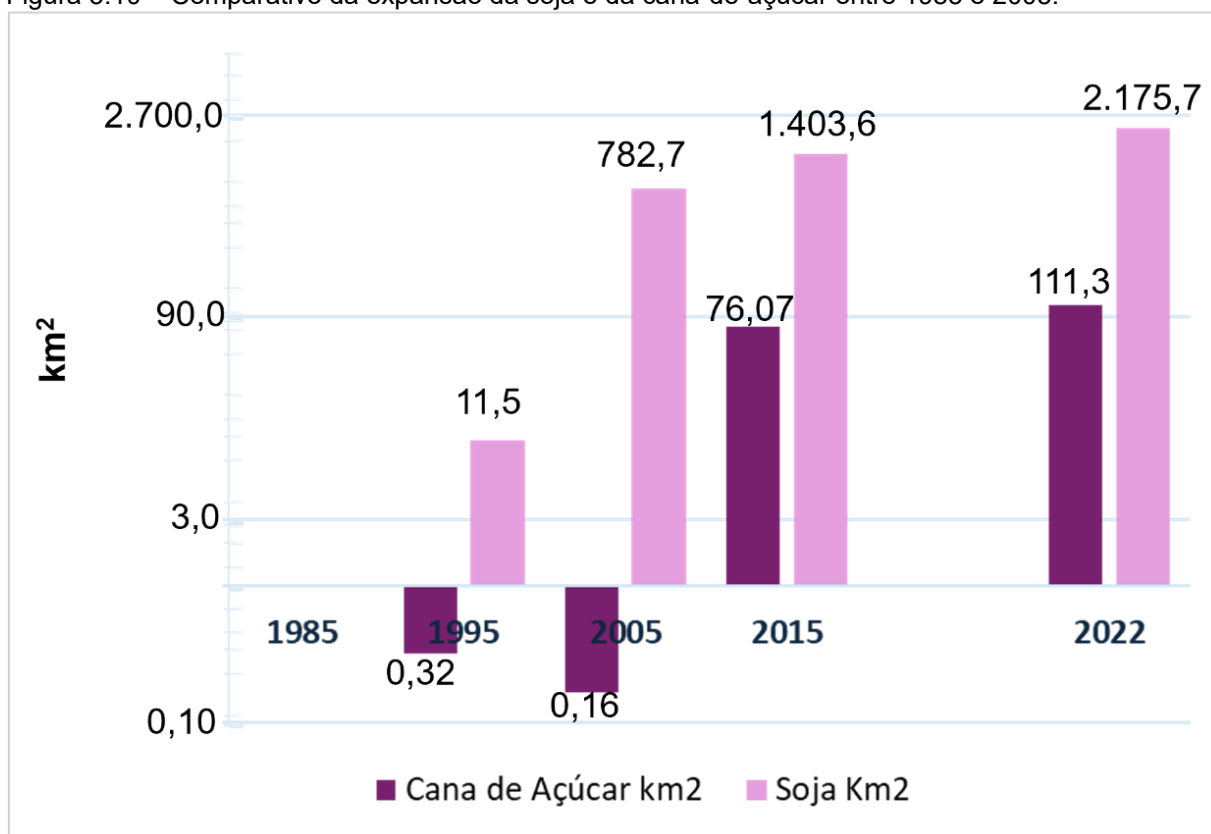


Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022).

O uso do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA apresentou maior aceleração a partir de 2005, coincidindo com a intensificação do agronegócio no MATOPIBA. No período de 1985 a 1995, a categoria Outras Lavouras Temporárias foi a que apresentou o maior percentual de aumento: passou de 0,82 km² para 4,53 km², representando um crescimento aproximado de 452%.

Em 2005, a categoria Soja avançou significativamente sobre áreas anteriormente ocupadas por lavouras temporárias diversas, bem como sobre novas áreas, promovendo expressiva supressão da cobertura nativa. A cultura da cana-de-açúcar, por sua vez, apresentou um declínio de 50% em relação a 1995, reduzindo-se de 0,32 km² para 0,16 km², em função do avanço da soja e de sua maior rentabilidade econômica (Figura 3.10).

Figura 3.10 – Comparativo da expansão da soja e da cana-de-açúcar entre 1985 e 2005.

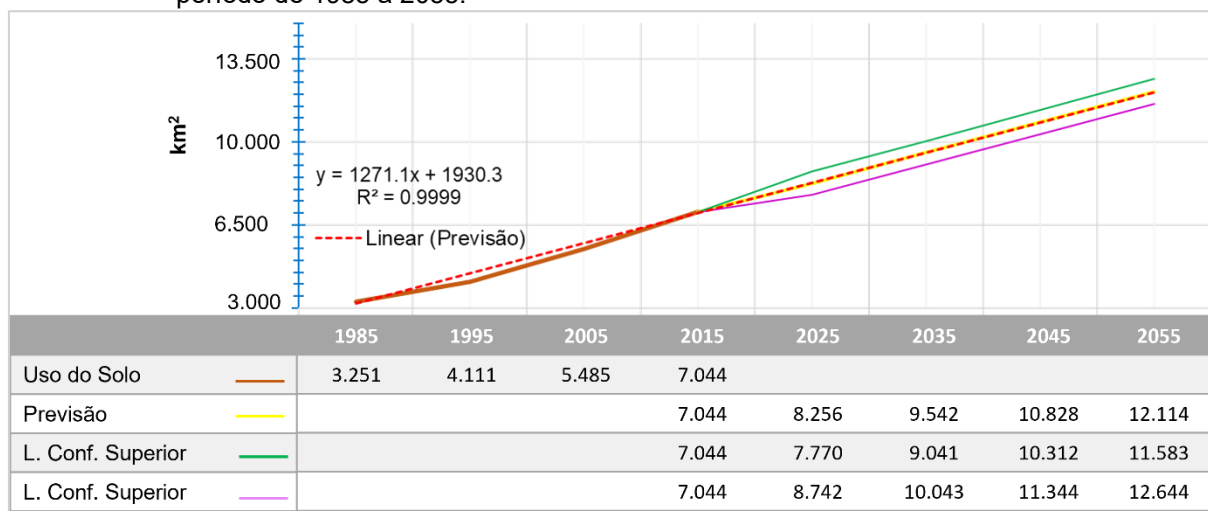


Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

Com base na modelagem preditiva do uso e ocupação do solo, estimou-se que, entre 2015 e 2025, ocorrerá um aumento da área antropizada, passando de 7.044 km² para 8.256 km². Esse acréscimo corresponde a 1.211 km², representando uma taxa de crescimento aproximada de 17% em relação à área inicial.

Para o ano de 2055, as projeções indicam que a área destinada às atividades agropecuárias poderá atingir aproximadamente 12.114 km², o que representa cerca de 57% da área total da microrregião. O modelo de regressão utilizado apresentou  $R^2 = 0,99$ , indicando altíssimo ajuste entre os valores observados e estimados, além de forte coerência visual entre os pontos amostrais e a linha de regressão (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Modelagem preditiva do uso do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, no período de 1985 a 2055.

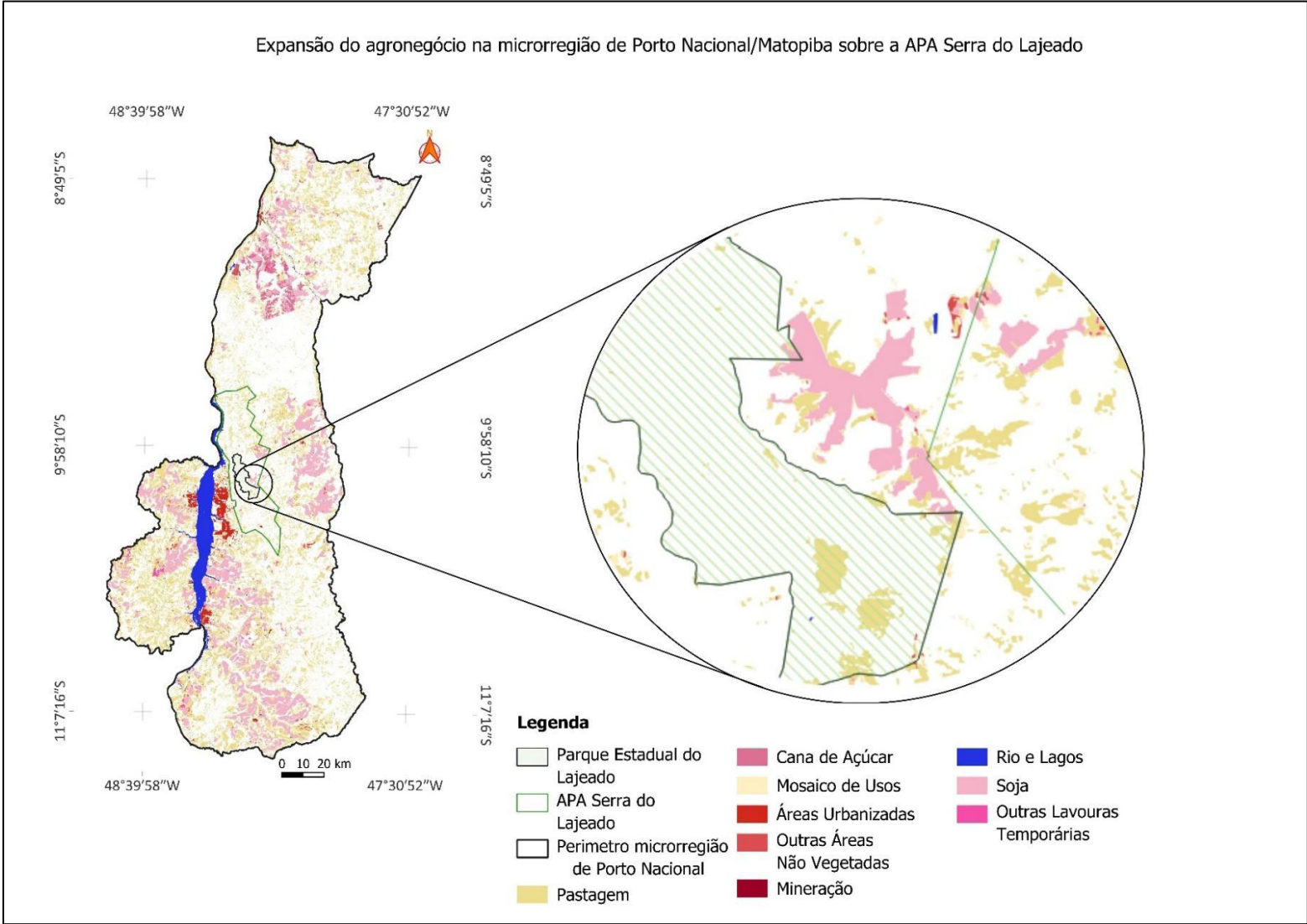


Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022).

Considerando que a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA possui aproximadamente 21.197 km<sup>2</sup>, identificou-se que cerca de 3.697 km<sup>2</sup> correspondem a Unidades de Conservação e Terras Indígenas. Diante das atuais tendências climáticas, socioeconômicas e tecnológicas, a projeção indica que, até 2055, a expansão do agronegócio poderá abranger aproximadamente 69% de toda a microrregião, caso não sejam implementadas políticas efetivas de controle, regulação e ordenamento territorial.

Por fim, os dados apontam que, nos últimos anos, houve avanço significativo da fronteira agropecuária sobre áreas legalmente protegidas (Figura 3.12), fenômeno que coincide com a redução do efetivo e do orçamento destinado aos órgãos de fiscalização ambiental. Essa redução comprometeu a capacidade operacional dessas instituições, contribuindo para o enfraquecimento da proteção ambiental (Associated Press, 2022).

Figura 3.12 – Expansão da fronteira agropecuária sobre a APA Serra do Lajeado.



Fonte: A autora, a partir de MapBioma (Coleção 8, 2022) e Naturatins (2024).

A Área de Proteção Ambiental (APA) Serra do Lajeado, regulamentada por legislação federal como unidade de conservação de uso sustentável, apresenta evidências consistentes de expansão da fronteira agropecuária em seu interior. Dados obtidos em pesquisa de campo indicam que a ocupação agropecuária em áreas classificadas como Uso Sustentável e Uso Consolidado, conforme as diretrizes estabelecidas no Plano de Manejo da APA (2018), totaliza 1.002 hectares. Esse quantitativo é aproximadamente quinze vezes superior ao limite máximo permitido pela legislação, que estabelece para tais áreas o valor de um módulo fiscal de 80 hectares (Landau *et al.*, 2012).

### 3.5 Discussão

Os resultados obtidos demonstram que, entre 1985 e 2015, a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA experimentou uma profunda reconfiguração territorial, caracterizada pela supressão de aproximadamente 3.792,6 km<sup>2</sup> de cobertura nativa e pela intensificação contínua do uso agropecuário. Essa transformação não se restringe a mudanças quantitativas na paisagem; ela revela a transição estrutural de um território historicamente marginalizado para um polo dinâmico da fronteira agrícola nacional.

A redução das formações florestais, savânicas e campestres segue o padrão já identificado em estudos de larga escala, como Beuchle *et al.* (2015) e Oliveira Júnior *et al.* (2023), reforçando que o MATOPIBA constitui, nas últimas décadas, um dos epicentros do desmatamento no Cerrado. Entretanto, os dados da microrregião revelam um ritmo de supressão que se aproxima dos valores mais elevados encontrados no bioma, sugerindo que a área analisada atua como um vetor ativo, e não periférico, da dinâmica de conversão territorial.

A aptidão agrícola associada ao relevo suavemente ondulado — conforme indicado por Farah *et al.* (2020) — explica parte da atratividade da região para o agronegócio, porém não esgota o fenômeno. A análise temporal mostra que a substituição da vegetação nativa obedece a uma lógica espacial conectada às vias de circulação e aos centros urbanos, evidenciando que fatores logísticos e de infraestrutura foram igualmente determinantes, alinhados ao conceito de “território usado” de Santos (2023).

A fragmentação da paisagem, apontada por Mendes (2018), manifesta-se de forma estruturante: a continuidade das formações nativas rompe-se em mosaicos isolados, comprometendo rotas ecológicas, habitat de espécies-chave e a resiliência do sistema socioecológico local. Esse padrão fragmentário tende a intensificar processos como erosão, queimadas e alterações microclimáticas.

No caso da APA Serra do Lajeado, os 1.002 hectares de ocupação irregular — cerca de 15 vezes acima do limite permitido — não apenas evidenciam falhas de governança ambiental (Landau *et al.*, 2012), mas sugerem um processo de avanço silencioso e contínuo, onde o uso agropecuário penetra áreas de proteção via permissividades institucionais, lacunas normativas e baixa fiscalização. Essa constatação é reforçada por estudos nacionais que denunciam o enfraquecimento dos órgãos ambientais e a expansão de atividades ilegais em áreas protegidas (Associated Press, 2022; Costa *et al.*, 2021).

O avanço da categoria soja — de cerca de 11,5 km<sup>2</sup> em 1995 para aproximadamente 782,7 km<sup>2</sup> em 2005 — evidencia um marco de inflexão territorial. A soja não apenas substitui pastagens e coberturas degradadas; ela reorganiza o espaço, intensifica fluxos econômicos, atrai capital externo e reorienta o papel regional na cadeia global de produção agrícola. Isso confirma a análise de Rausch *et al.* (2019) e Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda. (2021), que demonstram a soja como vetor primário da expansão agrícola no Cerrado.

Além disso, a sobreposição progressiva entre áreas de pastagem e de soja na bacia do Ribeirão Lajeado sugere um possível deslocamento da fronteira agrícola em direção às áreas de cabeceira e divisores hidrográficos, onde a sensibilidade ambiental é maior. Como apontam Rausch *et al.* (2019), esse processo tende a alterar ciclos hidrológicos, aumentar voçorocas e comprometer a estabilidade geomorfológica.

Outro aspecto estrutural refere-se às políticas públicas e às reconfigurações territoriais. A moratória da soja, conforme Veiga (2019), deslocou a produção da Amazônia para o Cerrado, o que coincidiu com a expansão na microrregião. Os resultados demonstram que tal deslocamento não apenas aumentou a pressão sobre áreas anteriormente pouco exploradas, mas acelerou o ritmo da conversão territorial, intensificando a perda de vegetação nativa.

Por meio da modelagem preditiva com alto ajuste estatístico ( $R^2$  entre 0,98 e 0,99), estimou-se que, até 2055, cerca de 57% da área da microrregião poderá estar

ocupada pela agropecuária. Essa tendência aproxima-se dos cenários prospectivos de Soares-Filho *et al.* (2014), que indicam continuidade da expansão agropecuária no Cerrado caso as condições institucionais e econômicas permaneçam inalteradas. Assim, os dados sugerem que a microrregião poderá experimentar uma transição para um estado de quase irreversibilidade ecológica, caso não haja intervenções regulatórias.

O aumento das queimadas na região (Silva *et al.*, 2020) adiciona outra camada de vulnerabilidade: a combinação entre fragmentação, pressão agrícola, clima mais seco e uso do fogo cria um ciclo de retroalimentação que amplia ainda mais o risco de perda de vegetação nativa, alterando o balanço ecológico e reduzindo a capacidade de regeneração.

Diante desse cenário, torna-se evidente que a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA expressa de forma emblemática as contradições da fronteira agrícola contemporânea brasileira: crescimento econômico acelerado versus erosão ecológica estrutural; aumento da produtividade versus perda de resiliência ambiental.

Portanto, são fundamentais estratégias integradas que articulem produção e conservação, tais como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), a Agricultura de Baixo Carbono (ABC), a criação de corredores ecológicos, a implementação de Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA) e o fortalecimento institucional dos órgãos de fiscalização. Tais medidas, quando incorporadas a políticas de ordenamento territorial, podem mitigar o avanço descontrolado da fronteira agrícola e preservar os serviços ecossistêmicos essenciais à microrregião, conforme defendido por autores como Folke *et al.* (2002) e Verburg *et al.* (2006).

### 3.6 Conclusão

A análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, desenvolvida a partir de dados da Coleção 8 do MapBioma, evidenciou transformações profundas na paisagem entre 1985 e 2022, fortemente associadas à consolidação da fronteira agrícola na porção central do Cerrado. O uso de geotecnologias de alta precisão, como *Google Earth Engine*, QGIS e modelos estatísticos de regressão linear, permitiu a identificação e quantificação de mudanças espaciais com elevada acurácia, confirmada pelo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,9867$ ). A aplicação integrada dessas ferramentas proporcionou

não apenas uma visão detalhada da dinâmica territorial, mas também a capacidade de projetar cenários futuros com confiabilidade.

A primeira hipótese formulada — referente ao avanço significativo da fronteira agropecuária sobre a vegetação nativa — foi plenamente corroborada, uma vez que a supressão acumulada das formações florestais, savânicas e campestres ultrapassou 3.792 km<sup>2</sup> no período analisado. Esse processo, conduzido principalmente pela expansão da soja e das pastagens, mostrou-se espacialmente concentrado em áreas de maior aptidão agrícola e melhor acessibilidade, replicando padrões já identificados na literatura recente sobre o MATOPIBA.

A segunda hipótese — relativa à intensificação da ocupação desordenada — foi parcialmente confirmada. Embora a pesquisa não tenha se detido na análise direta dos instrumentos de planejamento territorial, os resultados revelaram a presença de ocupações agropecuárias avançando sobre zonas legalmente protegidas, como observado na APA Serra do Lajeado, onde se registraram 1.002 hectares de uso agropecuário em áreas cuja legislação permite apenas um módulo fiscal de 80 hectares. Tais evidências demonstram fragilidade no cumprimento e fiscalização das políticas ambientais, reforçando a hipótese de que a expansão agrícola ocorreu, em parte, de forma desestruturada.

A terceira hipótese — que postulava a continuidade da expansão antropizada até 2055 na ausência de intervenções regulatórias — foi integralmente validada. As projeções estatísticas indicam que até 2055 a área destinada ao agronegócio poderá alcançar aproximadamente 12.114 km<sup>2</sup>, equivalente a 57% da área total da microrregião. Esse cenário de avanço contínuo é sustentado pelo comportamento linear das séries históricas e pela forte correlação obtida no modelo preditivo ( $R^2 = 0,9867$ ). A tendência reforça a urgência de políticas públicas que conciliem conservação ambiental e desenvolvimento produtivo.

Do ponto de vista metodológico, a pesquisa demonstrou a eficácia da integração entre sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas e modelagem estatística na análise de mudanças ambientais de longa duração. A opção pelo recorte temporal decenal — com exceção do intervalo 2015–2022 — mostrou-se adequada à natureza dos dados disponibilizados pelo MapBioma, mantendo a consistência analítica e possibilitando comparações robustas entre períodos. A lacuna 2022–2025 não compromete a integridade da série histórica, uma vez que foi suprida pela manutenção dos mesmos parâmetros estatísticos na etapa preditiva.

Os resultados obtidos reforçam a importância do monitoramento contínuo e de metodologias geoespaciais como instrumentos fundamentais para a compreensão dos processos de transformação territorial no Cerrado, especialmente em regiões sob forte pressão econômica, como o MATOPIBA. Além disso, a identificação de áreas críticas de conversão e de conflitos territoriais fornece subsídios estratégicos para gestores públicos, órgãos ambientais e instituições de planejamento, contribuindo para ações de mitigação, conservação e ordenamento territorial.

Dessa forma, esta pesquisa não apenas confirma as hipóteses formuladas, mas também amplia a compreensão sobre os impactos da expansão agropecuária em uma das regiões mais dinâmicas e vulneráveis do país, oferecendo uma base científica sólida para estudos futuros e para a formulação de políticas sustentáveis que aliem produção agrícola e conservação ambiental.

## Referências

ACSELRAD, H. (org.). **Conflitos ambientais no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará; Fundação Heinrich Böll, 2004. ISBN: 978-85-7316-358-2.

AGROICONE; SOLIDARIDAD. **Estudo econômico sobre a mudança do uso da terra em regiões produtoras de soja no MATOPIBA**. São Paulo: Agroicone, 2024. Disponível em: <https://agroicone.com.br/portfolio/estudo-economico-sobre-a-mudanca-do-uso-da-terra-em-regioes-produtoras-de-soja-no-MATOPIBA>. Acesso em: 18 jul. 2025.

AGROSATÉLITE GEOTECNOLOGIA APLICADA LTDA. **Análise geoespacial da expansão da soja no bioma Cerrado: 2001 a 2021**. Florianópolis: ABIOVE, 2021. 25 p. Disponível em: [https://abiove.org.br/abiove\\_content/Abiove/relat\\_cerrado\\_21.pdf](https://abiove.org.br/abiove_content/Abiove/relat_cerrado_21.pdf). Acesso em: 18 jul. 2025.

ASSOCIATED PRESS. COP27: o que ficou de dentro e o que ficou de fora do acordo. **G1**, Rio de Janeiro, 20 nov. 2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/cop-27/noticia/2022/11/20/cop-27-o-que-ficou-de-dentro-e-o-que-ficou-de-fora-do-acordo.ghtml>. Acesso em: 05 fev. 2023.

BEUCHLE, R. *et al.* Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v.58, p.116-127, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00138>. Acesso em: 18 jul. 2025.

BRASIL. **Constituição (1988)**. Constituição da República Federativa do Brasil. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 out. 1988.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear**: um passo inicial para compreensão da econometria como uma ferramenta de avaliação de políticas públicas. Brasília: Enap, 2019.

CHIODI, L. *et al.* **Estudo econômico sobre a mudança do uso da terra em regiões produtoras de soja no MATOPIBA**. Brasil: Fundação Solidaridad, 2024. Disponível em: <https://solidaridadlatam.org/brasil/wp-content/uploads/2024/07/Estudo-economico-sobre-a-mudanca-do-uso-da-terra-em-regioes-produtoras-de-soja-no-MATOPIBA.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2025.

COSTA, V. S. da *et al.* Vulnerabilidades em unidades de conservação: um estudo comparativo entre duas áreas de proteção ambiental na cidade de Rio Branco, Acre. In: FRANCO, A. O.; BENTO, V. R. S. (org.). **Áreas naturais protegidas brasileiras: gestão, desafios, conceitos e reflexões**. Campo Grande: Editora Inovar, 2021. p. 74–84. ISBN: 978-65-80476-57-2. Disponível em: <https://editorainovar.com.br/omp/index.php/inovar/catalog/book/78>. Acesso em: 18 jul. 2025.

FARAH, F. T. *et al.* **Alternativas para o fortalecimento da cadeia da restauração no MATOPIBA** - Caderno de Notas Técnicas do Programa Parceria para o Bom Desenvolvimento (GGP/ PNUD). Rio de Janeiro: Conservação Internacional Brasil, 2020. Disponível em: [https://www.conservation.org/docs/default-source/brasil/nota\\_tecnica\\_bioflora.pdf?Status=Master&sfvrsn=e431a526\\_3](https://www.conservation.org/docs/default-source/brasil/nota_tecnica_bioflora.pdf?Status=Master&sfvrsn=e431a526_3). Acesso em: 18 jul. 2025.

FOLKE, C. *et al.* Resiliência e desenvolvimento sustentável: construindo capacidade adaptativa em um mundo de transformações. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, [s. l.], v. 31, n. 5, p. 437–440, ago. 2002. DOI 10.1579/0044-7447-31.5.437. Disponível em: <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1579/0044-7447-31.5.437>. Acesso em: 18 jul. 2025.

GORZ, A. **Écologie et Politique**. Paris: Éditions Galilée: Éditions du Seuil, 1975. Pseudônimo de Michel Bosquet. Edição ampliada em 1978. Disponível em: <https://www.fondationecolo.org/wp-content/uploads/b258d94e63f53172592db45952a8ce71-4.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GRAÇA MARTINS, M. E. Regressão linear simples. **Revista de Ciência Elementar**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 45, 2019. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/static/docs/artigos/2019-045.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

HANSEN, M. C. *et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, Washington, v. 342, n. 6160, p. 850–853, 2013. DOI: 10.1126/science.1244693.

HUANG, J. *et al.* Spatiotemporal variations and driving forces of land use change based on linear regression and spatial analysis. **Remote Sensing**, Basel, v. 13, n. 5, p. 1–21, 2021. DOI: 10.3390/rs13050891.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro.

**Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147–155, 2005. Disponível em:

[https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/17973/material/Cerrado\\_conservacao.pdf](https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/17973/material/Cerrado_conservacao.pdf). Acesso em: 18 jul. 2025.

LAMBIN, E. F. *et al.* Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, p. 205–241, 2003.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/228597446\\_Dynamics\\_of\\_Land-use\\_and\\_land-cover\\_change\\_in\\_tropical\\_regions](https://www.researchgate.net/publication/228597446_Dynamics_of_Land-use_and_land-cover_change_in_tropical_regions). Acesso em: 6 jan. 2023.

LANDAU, E. C. *et al.* **Variação geográfica do tamanho dos módulos fiscais no Brasil**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 199 p. (Série Documentos, 146). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/949260>. Acesso em: 27 jun. 2025.

LI, C.; WU, K.; WU, J. Land use change and its driving forces in large river basins based on regression analysis and long-term remote sensing data. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 3, p. 1–18, 2022. DOI: 10.3390/su14031765.

MENDES, T. J. **Fragmentação e viabilidade de corredores ecológicos na região do MATOPIBA**. 2018. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) –

Universidade de Brasília. Disponível em:

<https://repositorio.unb.br/handle/10482/33927>. Acesso em: 2 jun. 2022.

MIRANDA, E. E. de; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA**. Campinas, SP: Embrapa, maio 2014. 18 p. (Nota técnica GITE, n. 1). Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1037313/1/NT1DelimitacaoMATOPIBA.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

MOURA, W.; LAMOUNIER, W. Tendência, ciclos e sazonalidade nos preços spot do café brasileiro na NYBOT. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 13–23, abr. 2007. DOI 10.1590/S0104-530X2007000100003. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-530X2007000100003&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2007000100003&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 18 jul. 2025.

NATURATINS. **Plano de manejo revisado da Área de Proteção Ambiental Serra do Lajeado**. Palmas: Naturatins, 2019. Disponível em:

[https://gesto.to.gov.br/site\\_media/upload/plano\\_manejo/ENCARTE\\_4.pdf](https://gesto.to.gov.br/site_media/upload/plano_manejo/ENCARTE_4.pdf). Acesso em: 8 set. 2022.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. G. de *et al.* Correlação espaço-temporal entre o avanço da atividade agropecuária e as alterações ambientais no MATOPIBA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 52., 2023, Ribeirão Preto. **Anais [...]**. Ribeirão Preto: SBEA, 2023. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/391216677>. Acesso em: 2 jul. 2024.

OLIVEIRA, N. M. de. **Desenvolvimento regional e territorial do Tocantins**. Palmas: Universidade Federal do Tocantins: EDUFT, 2019. 214 p. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/handle/11612/1295>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PEKEL, J.-F. *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. **Nature**, London, v. 540, n. 7633, p. 418–422, 2016. DOI: 10.1038/nature20584.

PONTIUS JR., R. G.; CHEN, H. Cross-tabulation of historical land-cover change and comparison with a land-change model. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 27, n. 8, p. 1763–1773, 2006. DOI: 10.1080/01431160500486699.

PORTO-GONÇALVES, C. W. Apresentação da edição em português. *In*: LANDER, E. (org.). **A colonialidade do saber: eurocentrismo e ciências sociais – perspectivas latino-americanas**. Buenos Aires: CLACSO, 2005. p. 9–15. Disponível em: <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/ar/libros/lander/pt/ApreemPort.rtf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. Version 3.34. Open Source Geospatial Foundation, 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em: 18 dez. 2025.

RAUSCH, L. L. *et al.* Soy expansion in Brazil's Cerrado. **Conservation Letters**, v. 12, n. 6, e12671, 2019. DOI: 10.1111/conl.12671. Disponível em: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/conl.12671>. Acesso em: 5 mai. 2022.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 12. ed. rev. São Paulo: EDUSP, 2023. 85-98.

SILVA, P. S. S. *et al.* Drivers of burned area patterns in Cerrado: the case of MATOPIBA region. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-3/W12, p. 135-140, 2020. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-135-2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-135-2020>. Acesso em: 6 mar. 2023.

SOARES-FILHO, B. *et al.* Cracking Brazil's forest code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363–364, 2014. DOI 10.1126/science.1246663. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1246663>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SOUZA, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 248, p. 112–123, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.

SOUZA, M. M. de; OLIVEIRA, A. L. R. de; SOUZA, M. F. de. Localização de armazéns agrícolas baseada em análise multicritério espacial. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 1, e268622, 2024. DOI: 10.1590/1806-9479.2022.268622. Acesso em: 7 jan. 2022.

STRASSBURG, B. B. N. *et al.* Momento da verdade para o hotspot do Cerrado. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 4, p. 1–3, mar. 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0099. Acesso em: 18 jul. 2025.

TUNDISI, J. G. (coord.). **Plano de conservação e usos múltiplos do reservatório da UHE Luís Eduardo Magalhães – Lajeado – Estado do Tocantins e seu entorno**. São Carlos: Instituto Internacional de Ecologia, 2003. Disponível em: <https://central.to.gov.br/download/245468>. Acesso em: 2 jan. 2022.

VEIGA, E. 'Moratória da soja' no Cerrado evitaria desmatamento de área maior que a Bélgica, diz estudo. **BBC News Brasil**, [s. /], 18 jul. 2019. Disponível em: [www.bbc.com/portuguese/brasil-49014494](http://www.bbc.com/portuguese/brasil-49014494). Acesso em: 18 jul. 2025.

VERBURG, P. H. *et al.* Modeling land-use and land-cover change. *In*: LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J. (org.). **Land-use and land-cover change: local processes and global impacts**. Dordrecht: Springer, 2006. p. 117–135. (Global Change - The IGBP Series). Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/226269916\\_Modeling\\_Land-Use\\_and\\_Land-Cover\\_Change](https://www.researchgate.net/publication/226269916_Modeling_Land-Use_and_Land-Cover_Change). Acesso em: 2 jun. 2022.

## **CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HIDRÁULICA DO PLINTOSSOLO PÉTRICO CONCRECIONÁRIO NA MICRORREGIÃO DE PORTO NACIONAL/MATOPIBA**

### **RESUMO**

FURTADO, Simonni Elias Leite. **Dinâmicas de uso e ocupação do solo e transformação ambiental da Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brasil**. Orientador: Luiz Fernando Pires. 2025. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

Este estudo apresenta a caracterização físico-hidráulica e mineralógica de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário localizado na microrregião de Porto Nacional, área pertencente à fronteira agrícola do MATOPIBA, com o objetivo de compreender sua funcionalidade hidrológica e sua vulnerabilidade a processos erosivos em diferentes condições de uso e manejo do solo. A metodologia adotada integrou análises de campo, laboratório e modelagem espacial, permitindo uma avaliação multiescalar do comportamento físico, hídrico e estrutural deste solo. A etapa de campo envolveu a abertura, descrição morfológica e amostragem de um perfil representativo, seguindo os critérios do SiBCS (2018, 2025). Foram coletadas amostras indeformadas e deformadas para determinação da granulometria, densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total e classes de poros (macro, meso e micro), além da condução de análises mineralógicas e geoquímicas. A granulometria foi determinada pelo método da pipeta, enquanto a densidade e a porosidade foram obtidas pelo método do anel volumétrico. A estrutura porosa do solo foi avaliada por meio da curva de retenção de água, ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980), utilizando o software SWRC Fit (Seki, 2007). A caracterização mineralógica foi realizada por Difração de Raios X (DRX), complementada por Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX), permitindo identificar os constituintes cristalinos predominantes e a distribuição de elementos maiores ao longo do perfil. Paralelamente, aplicou-se a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE) para estimar a perda média anual de solo na microrregião, integrando os fatores R, K, LS, C e P em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). O fator R, calculado com base no regime de chuvas da região e validado por equações regionais para o Cerrado, apresentou valor médio de  $3.864,85 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ , refletindo a elevada energia cinética das precipitações características do clima tropical sazonal. O fator K foi estabelecido em  $0,03 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ , valor compatível com solos plínticos de textura média a argilosa no Cerrado. O fator LS foi obtido a partir de um Modelo Digital de Elevação (30 m), permitindo captar com precisão as variações de declividade e comprimento de rampa que influenciam o potencial erosivo da área. Os fatores C e P foram derivados de dados do MapBiomass e literatura específica para o Cerrado, sendo ajustados conforme o tipo de uso e manejo predominante. Todas as imagens e camadas vetoriais foram reprojetadas para o sistema SIRGAS 2000 / UTM Zona 22S, assegurando consistência espacial. Os resultados físicos apontaram um horizonte superficial de textura argilosa, com valores médios de 28,5% de areia, 28,4% de silte e 43,1% de argila, revelando condições favoráveis à formação de agregados estáveis. A densidade do solo apresentou média de  $1,14 \text{ g/cm}^3$ , enquanto a densidade de partículas se manteve constante em torno de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , sinalizando perfil pouco compactado, consistente com áreas sob plantio direto. A porosidade total

aproximou-se de  $0,52 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , com predominância de microporos (59,5%), seguidos por macroporos (30,4%) e mesoporos (10,2%), distribuição típica de solos tropicais estruturados, porém com limitação moderada para drenagem rápida em condições de saturação. A curva de retenção de água revelou umidade na capacidade de campo de  $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e umidade residual de  $0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , indicando que parte considerável da água permanece fortemente adsorvida, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. O parâmetro  $\alpha$  da equação de van Genuchten sugeriu baixa facilidade de drenagem, enquanto os parâmetros  $n$  e  $m$  apontaram alta concentração de poros finos, coerente com a presença de argilominerais 1:1 e óxidos de Fe/Al. Os resultados mineralógicos confirmaram a predominância de caulinita, gibbsita, goethita e hematita, com presença secundária de quartzo, ilmenita, rutilo, magnetita e feldspatos. Essa mineralogia evidencia um solo fortemente intemperizado, mesmo sendo um PLINTOSSOLO, o que se expressa no alto conteúdo de Fe e Al detectado por FRX: alumínio chegando a 46%, silício entre 33% e 42%, ferro entre 12% e 19% e titânio em torno de 2%, corroborando a evolução pedogenética dominada por processos de ferralitização e plintização. A aplicação da RUSLE revelou que a microrregião apresenta predominância de baixas perdas de solo, variando entre  $0,01$  e  $2,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , especialmente nas áreas de vegetação nativa e pastagens manejadas. Entretanto, áreas sob manejo convencional e pastagens degradadas registraram perdas pontuais de até  $7,0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , especialmente nas porções central e sudeste, onde a declividade é mais acentuada. Essas áreas foram classificadas como de suscetibilidade moderada à erosão, reforçando o papel determinante do manejo e da cobertura do solo na mitigação dos processos erosivos. Do ponto de vista integrativo, conclui-se que o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado apresenta limitações físicas e hidrológicas intrínsecas, derivadas da presença do horizonte Cx concrecionário, que reduz a profundidade efetiva e favorece o escoamento lateral. Contudo, quando manejado em sistema plantio direto, o solo mantém boa qualidade físico-hídrica, devido à preservação da porosidade e da estabilidade estrutural. Em contrapartida, práticas convencionais promovem degradação rápida, aumento do risco erosivo e perda de funcionalidade pedológica. Assim, os resultados reforçam a necessidade de planejamento territorial, monitoramento contínuo e adoção de práticas conservacionistas, sobretudo considerando a expansão agrícola acelerada no MATOPIBA.

**Palavras-chave:** mineralogia do solo; propriedades físico-hídricas; erosão hídrica; RUSLE; Cerrado.

## ABSTRACT

FURTADO, Simonní Elias Leite. **Dynamics of land use and occupation and environmental transformation in the Microregion of Porto Nacional/MATOPIBA, Tocantins - Brazil**. Advisor: Luiz Fernando Pires. 2025. Thesis (Doctorate in Geography) – State University of Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, 2025.

This study presents the physical–hydraulic and mineralogical characterization of a Petric Plinthosol (Concretionary) located in the microregion of Porto Nacional, within the agricultural frontier of MATOPIBA, aiming to understand its hydrological functioning and vulnerability to erosive processes under different land-use conditions. The methodological approach integrated fieldwork, laboratory analyses and spatial

modeling, enabling a multiscale assessment of the physical, hydraulic and structural behavior of this soil class. Field procedures involved opening, morphological description and sampling of a representative soil profile following SiBCS (2018, 2025) guidelines. Undisturbed and disturbed samples were collected to determine particle-size distribution, bulk density, particle density, total porosity, pore-size distribution (macro-, meso- and micropores), mineralogical composition and major-element chemistry. Particle-size analysis was performed using the pipette method, while bulk density and porosity were obtained using volumetric rings. The soil pore system was evaluated through the soil water retention curve, fitted using the van Genuchten (1980) model in the SWRC Fit software (Seki, 2007). Mineralogical composition was determined by X-ray diffraction (XRD), and chemical composition by X-ray fluorescence spectrometry (XRF). Additionally, the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) was applied to estimate the average annual soil loss in the study area, integrating the factors R, K, LS, C and P in a Geographic Information System (GIS). The rainfall erosivity factor (R) was computed based on the regional precipitation pattern and validated using models calibrated for the Cerrado biome, yielding a mean value of  $3,864.85 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ . The erodibility factor (K) was defined as  $0.03 \text{ t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ , consistent with plinthic soils of medium to clayey texture in the region. The LS factor was derived from a 30-m Digital Elevation Model, capturing variations in slope and slope length that control runoff generation. The C and P factors were derived from MapBiomass land-use data and parameterized with literature values specific to the Cerrado. All datasets were standardized to the SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S reference system. Physical characterization indicated a clayey surface horizon, with mean values of 28.5% sand, 28.4% silt and 43.1% clay, conditions that favor aggregate stability. Bulk density averaged  $1.14 \text{ g/cm}^3$ , whereas particle density remained close to  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , reflecting a non-compacted profile in areas under no-tillage. Total porosity was approximately  $0.52 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , dominated by micropores (59.5%), followed by macropores (30.4%) and mesopores (10.2%), a distribution typical of tropical soils with well-developed microstructure but limited rapid drainage under saturation. The water retention curve showed field capacity near  $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  and residual water content of  $0.16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , indicating that a substantial fraction of soil water remains strongly adsorbed and thus unavailable to plants. The  $\alpha$  parameter of the van Genuchten model indicated restricted drainage, while the  $n$  and  $m$  parameters confirmed a high proportion of fine pores, consistent with the presence of 1:1 clay minerals and Fe/Al oxides. Mineralogical results revealed a predominance of kaolinite, gibbsite, goethite and hematite, with secondary occurrence of quartz, ilmenite, rutile, magnetite and feldspars. This mineral assemblage indicates a strongly weathered soil, despite being a Plinthosol, which is corroborated by XRF results showing high contents of aluminum (up to 46%), silicon (33–42%) and iron (12–19%), and stable titanium values around 2%. These features reflect advanced pedogenic processes involving ferrallitization and plinthization. RUSLE results indicated that the microregion presents predominantly low soil-loss rates, ranging from  $0.01$  to  $2.0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , especially in areas of native vegetation and managed pastures. However, higher losses (up to  $7.0 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ ) occurred in croplands under conventional tillage and degraded pastures, primarily in the central and southeastern sectors, where slope gradients are greater. These areas were classified as having moderate susceptibility to erosion, demonstrating the critical influence of land management and vegetation cover in mitigating soil degradation. Overall, the Petric Plinthosol studied exhibits inherent physical and hydrological limitations, largely associated with the concretionary Cx horizon, which reduces effective rooting depth and promotes lateral flow. Nonetheless,

when managed under no-tillage, the soil maintains favorable physical–hydraulic conditions due to preserved porosity and structural stability. Conversely, conventional management rapidly increases degradation, elevating the erosive risk. These findings emphasize the urgency of territorial planning, continuous monitoring and adoption of conservation practices, especially given the accelerated agricultural expansion across MATOPIBA.

**Keywords:** soil mineralogy; hydro-physical properties; water erosion; RUSLE; Cerrado.

#### 4.1 Introdução

Os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários constituem uma classe de solos amplamente distribuída em regiões tropicais e subtropicais, caracterizando-se pela presença marcante de material plíntico, rico em ferro, resultante da alternância entre condições de saturação hídrica e secagem, processo que afeta diretamente a dinâmica hídrica, térmica e erosiva das paisagens (Santos *et al.*, 2018, conforme SiBCS 2018). Na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, especialmente na bacia do Ribeirão Lajeado/TO, esses solos representam um elemento-chave para compreender o comportamento físico-hidrológico local, dada sua influência sobre infiltração, retenção hídrica, condutividade hidráulica e suscetibilidade à erosão laminar.

A caracterização físico-hidráulica dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em escalas local e regional é essencial para subsidiar práticas de manejo conservacionista e instrumentos de gestão pública voltados à proteção dos recursos hídricos e do solo, conforme apontam Vidaletti *et al.* (2021). Nesse contexto, este capítulo apresenta uma abordagem integrada que contempla granulometria, densidade de partículas, atributos físico-hídricos, caracterização química e mineralógica, além da avaliação dos processos erosivos por meio do monitoramento em parcelas de pinos, consolidando informações fundamentais para modelagem hidrológica e planejamento ambiental.

A investigação foi desenvolvida a partir da escolha de uma área representativa, seguida pela execução de análises laboratoriais, caracterização mineralógica via Difração de Raios X (DRX) e determinação da composição elementar por Fluorescência de Raios X (FRX). A seleção do local de amostragem considerou atributos topográficos, cobertura vegetal e histórico de uso da terra, garantindo

representatividade dos principais contextos geomorfológicos e pedológicos da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

Por fim, a abordagem proposta busca não apenas identificar as propriedades intrínsecas do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário local, mas também compreender sua relação com os processos erosivos, sobretudo a erosão laminar, mediante a quantificação das perdas de solo em parcelas experimentais. Esse conjunto de análises contribui para o avanço científico em ciência do solo, hidrologia e manejo ambiental. Nesse sentido, foram formuladas as seguintes hipóteses que orientaram a investigação: (i) a conversão de vegetação nativa em pastagem degradada altera significativamente o balanço hídrico local, reduzindo a evapotranspiração e aumentando o escoamento superficial; (ii) a pastagem degradada contribui para aumentar a contribuição hídrica subterrânea e modificar o regime de drenagem da bacia; (iii) a mudança no uso do solo influencia diretamente a recarga hídrica, podendo comprometer a disponibilidade de água em períodos críticos; e (iv) a conversão de áreas de vegetação nativa em usos agropecuários eleva de forma significativa a suscetibilidade à erosão hídrica na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

## 4.2 Aspectos teóricos

Os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários são solos fortemente condicionados por processos pedogenéticos associados à hidromorfia, caracterizando-se pela presença de plintita ou materiais plínticos, resultantes da concentração e segregação de ferro e manganês sob condições periódicas de saturação hídrica (Santos *et al.*, 2018, conforme SiBCS 2018). Esses processos são amplamente descritos na literatura pedológica internacional, especialmente nos trabalhos de Schwertmann e Taylor (1989) e Buol *et al.* (2011), que destacam a gênese de plintita sob regimes tropicais marcados por oscilação hídrica.

Esse material, quando endurecido, reduz drasticamente a permeabilidade do solo, impactando a dinâmica da água e os fluxos subsuperficiais (Reatto *et al.*, 2008), fenômeno também discutido por van Breemen e Buurman (2002) ao abordarem a evolução de horizontes ferruginosos em ambientes tropicais úmidos.

A relevância dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em ambientes tropicais, como o Cerrado, está diretamente vinculada ao seu papel na modulação dos

processos hidrológicos, especialmente no controle da infiltração e da retenção de água (Leite *et al.*, 2024). Trabalhos de Bronick e Lal (2005) reforçam que solos tropicais com altas concentrações de microporos respondem por padrões de infiltração restritiva, favorecendo a gênese de escoamento superficial. No MATOPIBA, esses solos ocorrem em ambientes ecologicamente sensíveis, pressionados pela expansão agrícola, conforme observam Vidaletti *et al.* (2021).

A matriz estrutural desses solos inclui argilas de baixa atividade e microporosidade elevada (Dane; Topp, 2002), refletindo padrões hidrofísicos que limitam a disponibilidade hídrica para as plantas. Estudos clássicos de Hillel (1998, 2004) elucidam que solos com esse arranjo poroso frequentemente apresentam comportamento dual: alta retenção e baixa transmissão de água. Assim, em eventos de chuva intensa, a infiltração é reduzida, gerando zonas de saturação temporária (Klein; Libardi, 2002) e favorecendo escoamento superficial e lateral, aumentando a suscetibilidade à erosão laminar (Merten; Minella; Ciceri, 2016). Situação semelhante foi reportada por Zimmermann, Elsenbeer e Moraes (2006) em solos tropicais usados para agropecuária intensiva.

Do ponto de vista hidrológico, os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários desempenham papel crítico na regulação do balanço hídrico das bacias onde ocorrem, atuando como zonas de retenção e desconexão hidrológica (Lal, 2001). A baixa condutividade saturada, associada à presença de horizontes plínticos endurecidos, propicia acúmulo superficial de água, intensificando a erosão, especialmente a laminar. Esse processo é amplamente discutido por Morgan (2005) e aprofundado por Bryan (2000), que destaca a erosão laminar como um dos principais mecanismos de degradação em solos tropicais frágeis. Trabalhos de Renard *et al.* (1997) atualizam esse entendimento no contexto das equações RUSLE.

O manejo inadequado — como o pastejo intensivo — intensifica a compactação superficial, agravando a degradação física (Beutler *et al.*, 2003; Cogo; Levien; Schmidt, 2003). Cerdà (1997) identificou padrões semelhantes em solos compactados do Mediterrâneo, reforçando que o uso inadequado tende a aumentar a resistência do solo e modular negativamente a infiltração.

A abordagem integrada adotada neste estudo — combinando análises texturais, densidade de partículas, condutividade hidráulica, caracterização mineralógica por DRX e análise química por FRX — permite estabelecer relações sólidas entre atributos físicos, químicos e hidrológicos. Técnicas análogas são

recomendadas pela literatura clássica de Wischmeier e Smith (1978) e por estudos mais recentes que integram monitoramento direto da erosão (Silva *et al.*, 2020).

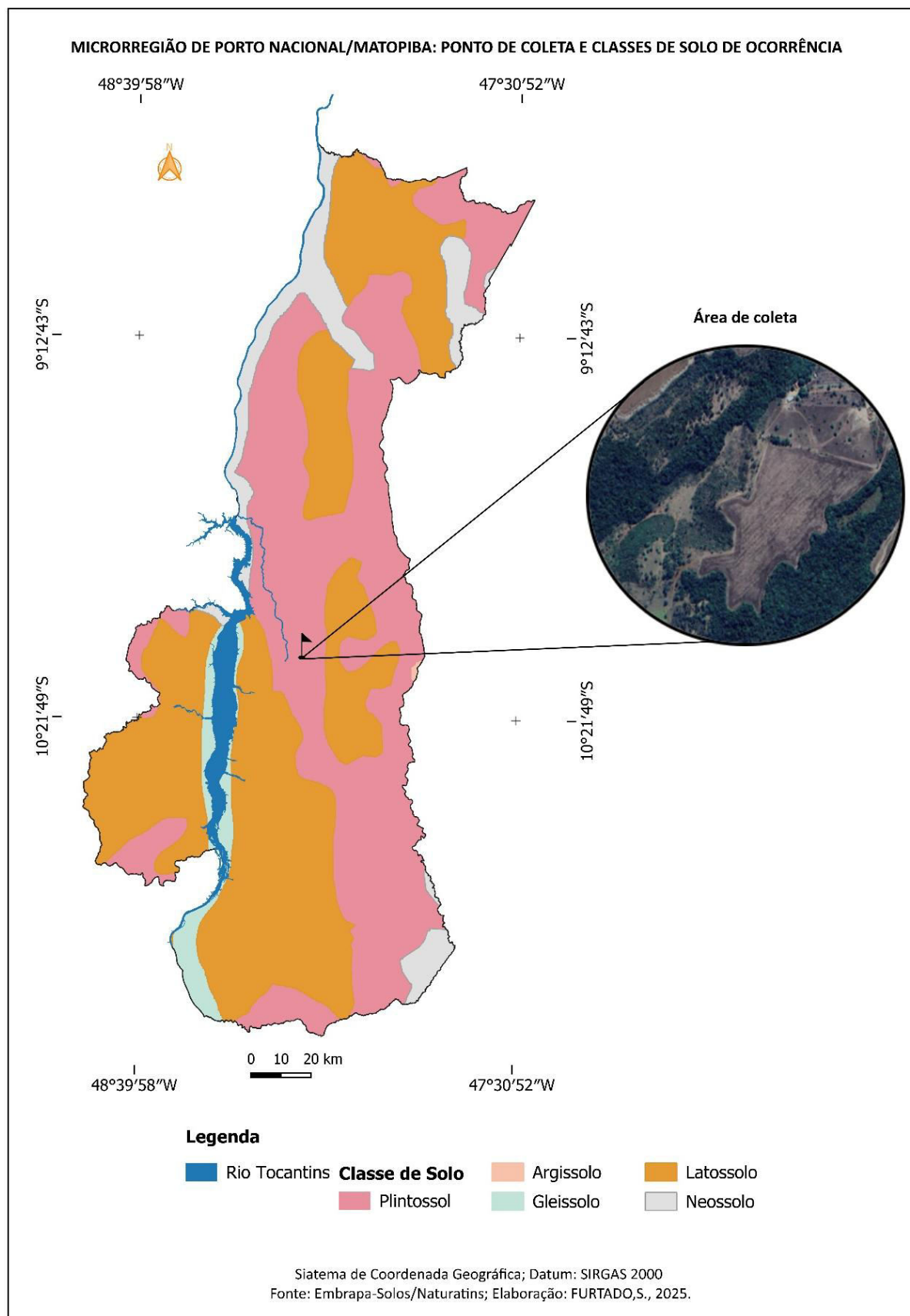
Dessa forma, a caracterização físico-hidráulica dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA constitui etapa fundamental para compreender sua funcionalidade hidrológica e orientar estratégias de manejo e conservação em uma região marcada por intensa pressão agropecuária.

### **4.3 Material e métodos**

#### **4.3.1 Critério para seleção das áreas e coleta das amostras**

O primeiro critério para a escolha das áreas de coleta foi a representatividade dos solos existentes na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, assegurando a presença do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, classe predominante em trechos significativos da paisagem local. Para a localização desses solos na área da pesquisa, utilizaram-se mapas de solo em escala 1:250.000 disponibilizados pelo IBGE (2023c). Após a delimitação da microrregião e da área da bacia do Ribeirão Lajeado, definiu-se o setor de coleta, localizado no alto curso do Ribeirão Lajeado (Figura 4.1).

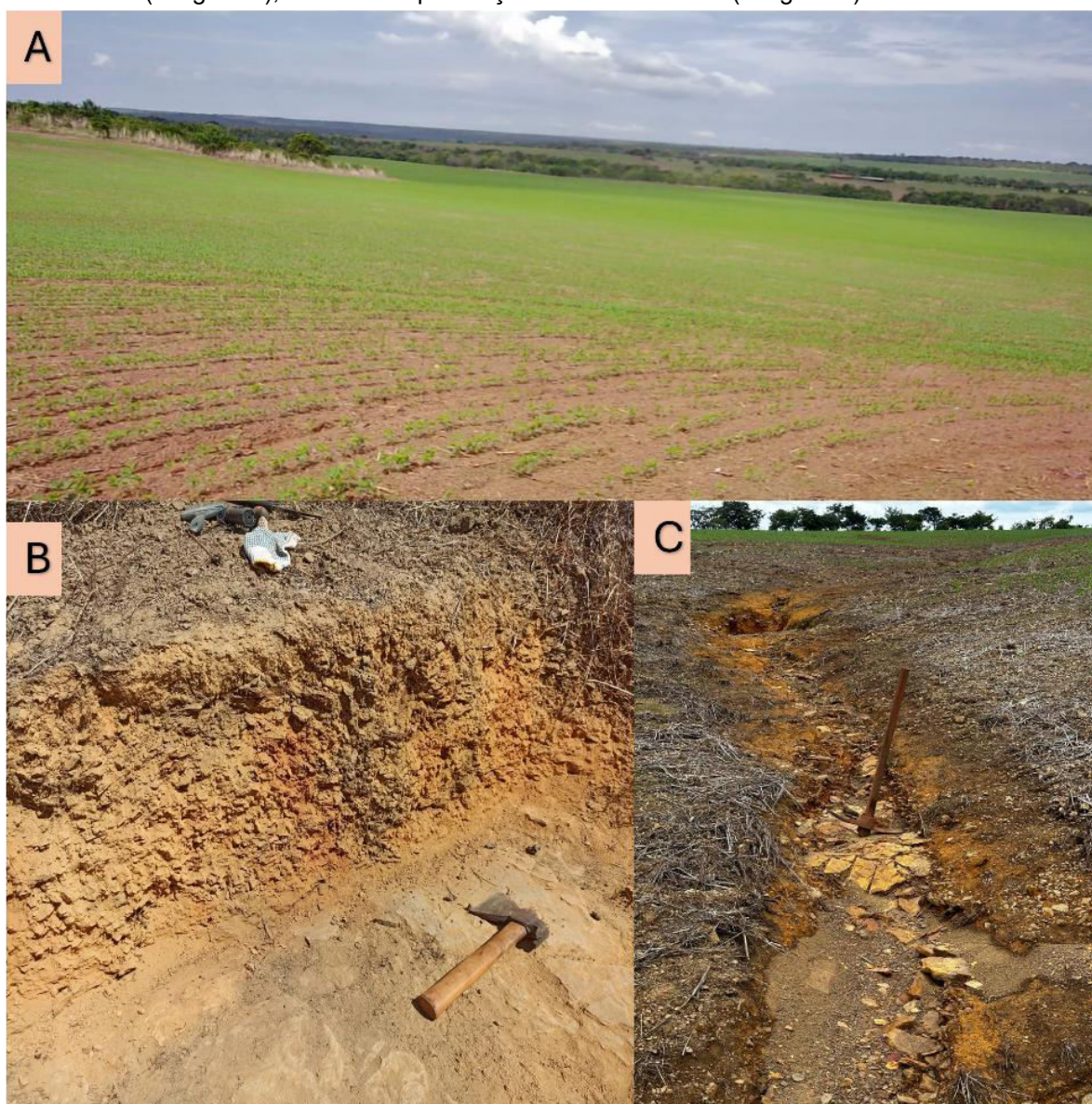
Figura 4.1 – Distribuição das classes de solo e localização do ponto de coleta das amostras na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.



Fonte: A autora.

O segundo critério considerou áreas em transição entre pecuária de longa duração (aproximadamente 20 anos) e agricultura recente (cerca de dois anos), caracterizando uma zona de expansão agropecuária ativa. A área é manejada sob Sistema de Plantio Direto (SPD), com rotação de culturas (soja e milho), localizando-se em um platô com declividade variando entre 3% e 8%, condição típica das superfícies aplainadas da microrregião (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Expansão agropecuária em platô (imagem A); perfil do solo para coleta das amostras (imagem B); e área com presença de erosão laminar (imagem C).

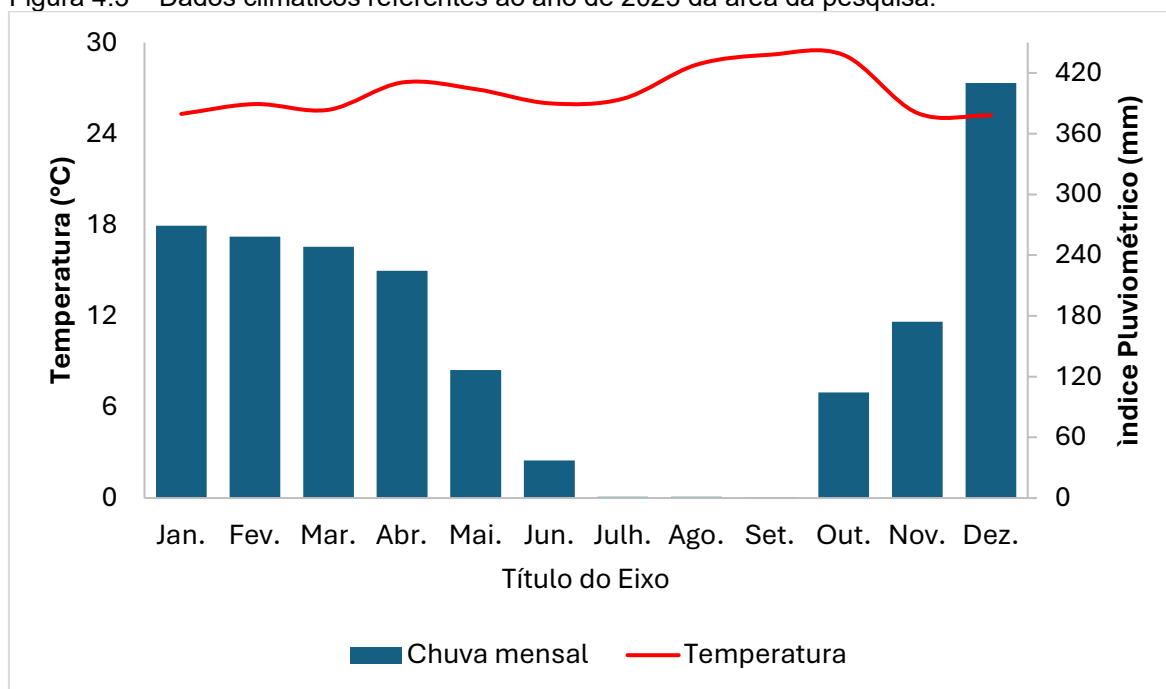


Fonte: Queiroz (2024).

Para este estudo, foram coletadas amostras de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário (Fwx), seguindo Santos *et al.* (2018, conforme SiBCS 2018) e Teixeira

*et al.* (2017). A coleta ocorreu no mês de junho, durante o período de estiagem (Figura 4.3), abrangendo o horizonte cultural até 40 cm de profundidade, escavado aleatoriamente em uma parcela de 100 m<sup>2</sup>. Como esses solos apresentam elevada resistência mecânica quando secos, foi necessário umedecê-los previamente, alguns dias antes da coleta. Para a classificação pedológica, utilizou-se a metodologia de Teixeira *et al.* (2017), e, para a análise de gênese e evolução do solo, a abordagem de Castro e Cooper (2019).

Figura 4.3 – Dados climáticos referentes ao ano de 2023 da área da pesquisa.



Fonte: A autora.

Na área selecionada, foram coletadas amostras indeformadas pelo método do anel volumétrico (volume aproximado de 100 cm<sup>3</sup>; diâmetro interno de 5 cm), por meio de trado específico (Siqueira, 2008). Essas amostras foram utilizadas para determinar: densidade do solo, macroporosidade, mesoporosidade, microporosidade, porosidade total e curva de retenção de água (Batey; McKenzie, 2006). Foram coletadas quinze amostras na camada de 0–10 cm. Após a coleta, foram protegidas com filme plástico, armazenadas em caixas isotérmicas e refrigeradas até o preparo laboratorial, que envolveu “toalete” das amostras para ajuste ao volume interno dos anéis.

Adicionalmente, foram coletados aproximadamente 4 kg de amostras deformadas, distribuídas a cada 10 cm de profundidade (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm). Essas amostras foram empregadas nas análises granulométrica (textura),

densidade de partículas, difração de raios X (DRX) e espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), conforme procedimentos padronizados por Teixeira *et al.* (2017). Após a coleta, foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração até as análises.

#### 4.3.2 Difração de raio X (DRX)

Para as análises de Difração de Raios X (DRX), foram separadas alíquotas de 20 g das amostras deformadas, de acordo com a profundidade de coleta. O material foi primeiramente seco em estufa a 40 °C por 24 horas, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA).

A TFSA foi então passada em peneiras com malha de 45 µm, separando-se aproximadamente 10 g de material peneirado para cada camada de solo analisada (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm).

As quatro amostras preparadas foram encaminhadas ao Complexo de Laboratórios Multiusuários (C-LabMu) da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), para análise por DRX, seguindo-se os procedimentos padrões descritos em Teixeira *et al.* (2017) e adotados pela equipe técnica do laboratório.

O equipamento utilizado foi um difratômetro Rigaku, modelo Ultima IV, operando com radiação CuKα ( $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ), em geometria Bragg–Brentano ( $\theta$ – $2\theta$ ). Os difratogramas foram obtidos no intervalo de 30° a 85°, em modo contínuo, a uma velocidade de 1° min<sup>-1</sup>.

Nos difratogramas, foram identificados e marcados os picos de maior intensidade ao longo do eixo  $2\theta$ , representativo do ângulo de difração. Com base na Equação de Bragg (Equação 4.1), calcularam-se os espaçamentos interplanares ( $d$ ) associados a cada pico, permitindo a determinação preliminar dos planos cristalinos característicos dos minerais presentes nas amostras.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (4.1)$$

Onde:

$n$ : número inteiro da difração, normalmente assume o valor de 1;

$\lambda$ : comprimento da onda de raios X. No laboratório das análises tem como base o (Cu) que é de 1,54 Å (ångström);  
 $d$ : espaçamento interplanar;  
 $2\theta$ : ângulo de difração;  
 $\theta$ : metade do ângulo da difração;  
seno  $\theta$ : 2 (dois) multiplicado pelo seno da metade do ângulo da difração.

Para a identificação mineralógica, os valores de  $d$  obtidos pela Equação 4.1 foram comparados com parâmetros de referência das reflexões típicas dos minerais presentes em frações argilosas. Esses valores, organizados em ordem decrescente de espaçamento, foram extraídos da base apresentada por Rezende *et al.* (2011).

A comparação permitiu correlacionar os picos identificados com os planos cristalográficos característicos de cada mineral. Como etapa complementar, realizou-se também a verificação dos picos no banco de dados da *American Mineralogist Crystal Structure Database* (AMCSD), ampliando a precisão da identificação das fases minerais presentes.

#### 4.3.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

Para a análise por FRX, foram utilizados aproximadamente 2 g da TFSA previamente macerada em almofariz de ágata e peneirada em malha de 45  $\mu\text{m}$ , conforme o protocolo adotado pelo laboratório. As amostras foram analisadas em triplicata ( $n = 3$ ) para cada camada do solo (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm), garantindo reprodutibilidade estatística. Para as medições, as amostras foram acondicionadas em porta-amostras com 25 mm de diâmetro interno, fornecidos pelo fabricante, sendo a base vedada com filme plástico de baixa interferência (Mylar®) para evitar perdas durante o procedimento analítico.

As análises foram realizadas em espectrômetro de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF), modelo Shimadzu EDX-720, em atmosfera ambiente. As medições abrangeram dois intervalos de energia: Na–Sc e Ti–U, com tempo de leitura de 100 s por faixa, seguindo rigorosamente os Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) do Laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (FASCA) da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

A FRX permitiu a obtenção de uma análise semiquantitativa dos elementos químicos presentes nas amostras para cada profundidade. Os resultados foram expressos na forma de óxidos e normalizados para que a soma total correspondesse a 100%, garantindo comparabilidade entre amostras.

É oportuno salientar que, enquanto a DRX possibilita a identificação das fases minerais, a FRX é uma técnica voltada à identificação e quantificação dos elementos químicos, conforme destacado por Pevear (1999).

#### 4.3.4 Propriedades físico-hidráulicas do solo

Os procedimentos técnicos e metodológicos adotados para a determinação das propriedades físico-hidráulicas do solo seguiram as diretrizes do Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017), bem como os POPs do grupo FASCA.

Para as medições da curva de retenção de água, as amostras contidas nos anéis volumétricos foram saturadas por capilaridade durante 24 h, adicionando-se 0,5 cm de lâmina de água a cada 1 h até atingir metade da altura do anel (2,5 cm). Em seguida, completou-se o volume até aproximadamente 1 cm da borda superior.

Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em mesa de tensão (Eijkelkamp), aplicando-se tensões entre 1 e 10 kPa, em intervalos de 1 kPa, assegurando o estabelecimento do contato hidráulico. O equilíbrio hidráulico foi determinado pela estabilização da drenagem.

Após a obtenção de todos os pontos da curva, as amostras foram secadas em estufa a 105 °C por 24 h, para determinação da umidade gravimétrica e, posteriormente, da umidade volumétrica. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980) com restrição de Mualem, e a qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

A partir da curva de retenção, foram obtidas a umidade na capacidade de campo (CC) (Equação 4.2), a umidade de saturação (SAT) (Equação 4.3) e a capacidade de aeração, esta última estimada pela diferença entre a porosidade total e a umidade em diferentes tensões. A derivação da curva permitiu também a obtenção da função capacidade de água, fundamental para a interpretação hidrodinâmica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário da microrregião.

$$CC = \frac{M_{cc} - M_{seca}}{V \cdot \rho_{\text{água}}} \quad (4.2)$$

$$SAT = \frac{M_{saturada} - M}{V \cdot \rho_{\text{água}}} \quad (4.3)$$

Onde:

$\rho$  = densidade do líquido (g cm<sup>3</sup>)

$M_{cc}$  = massa do solo úmido na condição de capacidade de campo (g)

$M_{seca}$  = massa do solo seco (g)

$V$  = volume da amostra de solo (cm<sup>3</sup>)

A densidade do solo ( $D_s$ ) foi obtida pelo método do anel volumétrico, por meio da razão entre a massa de solo seco ( $M_{seca}$ ) e o volume de solo ( $V$ ) (Equação 4.4). A porosidade total (PT) foi determinada relacionando a densidade do solo à densidade de partículas ( $D_p$ ) (Equação 4.5).

$$D_s = M_{seca} / V \quad (4.4)$$

$$PT = 1 - (D_s / D_p) \quad (4.5)$$

A macroporosidade (mac) (poros de diâmetro equivalente maior que 100  $\mu\text{m}$ ), a mesoporosidade (meso) (poros com diâmetro equivalente entre 30 e 100  $\mu\text{m}$ ) e a microporosidade (mic) (poros com diâmetro equivalente menor que 30  $\mu\text{m}$ ) foram determinadas com base na umidade do solo nas tensões correspondentes aos limites de cada classe de poros: 3 kPa para macroporos, 10 kPa para microporos e entre 3 e 10 kPa para mesoporos, aplicando-se a equação de capilaridade (Lei de Jurin), que relaciona a tensão ( $h$ ) com o diâmetro equivalente dos poros ( $d$ ) que retêm ou liberam água sob essa tensão (Equação 4.6).

$$d = \frac{4 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot h} \quad (4.6)$$

Onde:

$d$  = diâmetro do poro (m)

$\gamma$  = tensão superficial da água (N/m)

$\theta$  = ângulo de contato (graus, assume-se geralmente  $0^\circ$ , então  $\cos \theta = 1$ )

$\rho$  = densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$h$  = altura da coluna de água ou tensão (m)

#### 4.3.5 Análise granulométrica

Os procedimentos metodológicos utilizados para a realização da análise granulométrica tiveram como base os procedimentos apresentados em Teixeira *et al.* (2017) e nos Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) do FASCA. Assim, foram selecionados 20 g de TFSA, previamente secada em estufa a  $40^\circ\text{C}$  por 24 horas, para cada uma das quatro camadas de solo analisadas. As amostras foram analisadas em triplicata ( $n = 3$ ) para cada camada.

A solução dispersante foi preparada por meio da dissolução de 23,25 g de hexametáfosfato de sódio e 4,00 g de hidróxido de sódio em 1 L de água destilada, utilizando balão volumétrico para assegurar precisão na diluição. Em seguida, adicionaram-se 100 mL dessa solução dispersante a cada béquer contendo 20 g de TFSA, deixando-se em repouso por 12 horas, com o objetivo de promover a dispersão das partículas para posterior análise granulométrica.

Após o período de repouso, foram adicionados mais 100 mL da solução dispersante a cada béquer. As amostras foram então colocadas em banho de gelo, a fim de controlar a temperatura durante o processo de dispersão por ultrassom. Em seguida, procedeu-se à dispersão utilizando aparelho de ultrassom, programado com amplitude de  $25^\circ$ , com a ponteira completamente submersa na suspensão (solo + solução dispersante) durante 5 minutos.

O material resultante do processo de dispersão foi peneirado em malha de 0,053 mm, separando-se a fração retida (areia) da fração fina (silte + argila). A fração areia foi cuidadosamente lavada com até 800 mL de água destilada, visando à completa remoção das partículas finas aderidas. O material passante (silte e argila) foi coletado e armazenado em recipiente separado para posterior análise.

A fração areia retida na peneira foi transferida para papel filtro previamente identificado e com massa conhecida, sendo posteriormente submetida à secagem em estufa a  $40^\circ\text{C}$  por 24 horas, para determinação gravimétrica.

O material passante (frações silte e argila) foi transferido para uma proveta de 1 L. Ressalta-se que esse material foi completado com água destilada até atingir 1 L e, posteriormente, submetido à agitação manual por 3 minutos para homogeneização da suspensão, sendo então colocado sob uma superfície plana em repouso para iniciar a decantação das partículas. A separação das frações granulométricas foi realizada pelo método da pipeta, com base na taxa de sedimentação das partículas, conforme os princípios da Lei de Stokes (Equação 4.7).

$$\tau = \frac{18 \cdot h \cdot \eta}{g \cdot D^2 \cdot (D\rho - D_l)} \quad (4.7)$$

Onde:

$\tau$  – tempo para pipetar a fração argila (s);

$h$  – altura para inserir a pipeta (cm);

$\eta$  – viscosidade em conformidade com a temperatura (P);

$g$  – aceleração da gravidade ( $980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ );

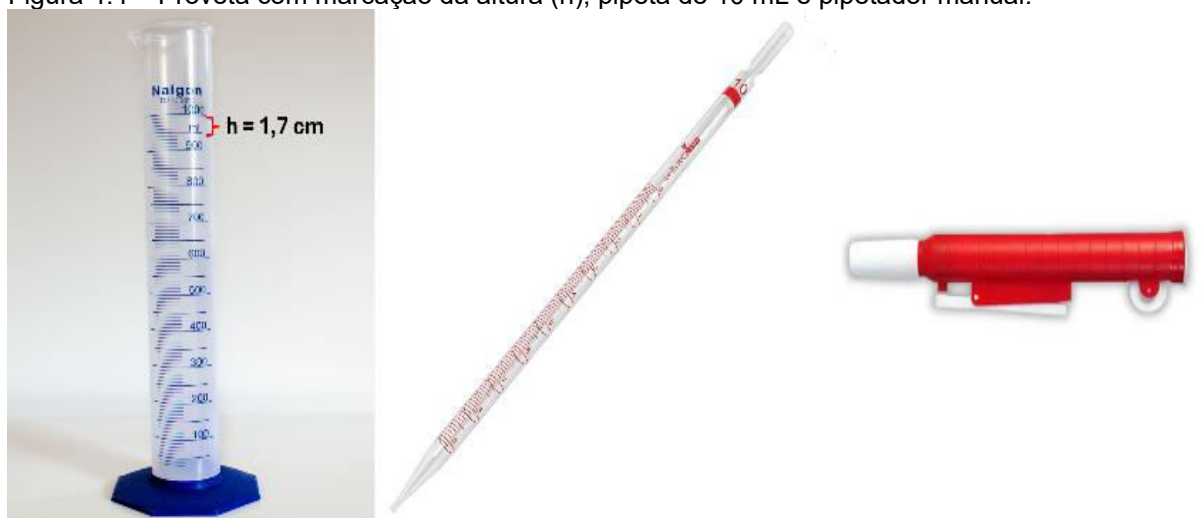
$D$  – diâmetro da partícula (cm);

$D_p$  – densidade da partícula ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ );

$D_l$  – densidade do líquido ( $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ).

A proveta de 1 L foi convencionalmente subdividida em 20 partes iguais de 50 mL, o que possibilitou estimar com precisão a altura correspondente a 1/20 do volume total. Essa subdivisão permitiu a definição exata da profundidade ( $h$ ), em centímetros, na qual a pipeta deve ser inserida para a coleta da fração argila (Figura 4.4). A marcação da altura é fundamentada na distância percorrida pelas partículas em suspensão ao longo do tempo, de acordo com os princípios da Lei de Stokes. Essa lei descreve a relação entre a velocidade de sedimentação e características físicas das partículas, como o diâmetro e a densidade, permitindo estimar com precisão o momento e a profundidade ideais para a amostragem das frações texturais mais finas. Esse procedimento foi realizado individualmente em cada uma das provetas utilizadas, totalizando 12 unidades, garantindo a padronização e a precisão da coleta em todas as amostras analisadas.

Figura 4.4 – Proveta com marcação da altura (h); pipeta de 10 mL e pipetador manual.



Fonte: A autora.

A profundidade (h) corresponde ao ponto da suspensão predominantemente composto por partículas da fração argila, visto que as partículas da fração silte, por apresentarem maior diâmetro e densidade, apresentam velocidade de sedimentação mais elevada e, portanto, já se depositaram. Importante salientar que o volume coletado não é de 50 mL — usado apenas para referência da altura de coleta —, mas sim de 10 mL, correspondente à capacidade da pipeta utilizada.

Assim, tanto a marcação precisa da profundidade de coleta quanto o rigor no controle do tempo de sedimentação são fatores essenciais para garantir a acurácia na separação e quantificação da fração argila, assegurando consistência na caracterização textural do solo estudado.

#### 4.3.6 Densidade de partícula ( $D_p$ )

A determinação da densidade de partículas ( $D_p$ ) foi realizada conforme os Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) do FASCA e as recomendações metodológicas descritas no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017), empregando-se o método do picnômetro. As amostras foram organizadas em triplicata ( $n = 3$ ) para cada camada do solo, sendo separadas 10 g de TFSA para cada profundidade analisada. A determinação da  $D_p$  foi obtida por meio da (Equação 4.8).

$$D_p = \frac{M_s}{V_s} \quad (4.8)$$

Onde:

Ms: massa de sólidos (g)

Vs: volume ocupado pelos sólidos (cm<sup>3</sup>)

#### 4.3.7 Metodologia de Estimativa da Perda de Solo por Meio da RUSLE

A estimativa da perda média anual de solo foi realizada por meio da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), amplamente utilizada em estudos de erosão hídrica e planejamento conservacionista (Wischmeier; Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997). O método baseia-se na integração de cinco fatores principais que representam os processos climáticos, edáficos, topográficos e antrópicos que controlam a suscetibilidade do solo à erosão.

Nesta etapa, cada fator foi determinado e espacializado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), assegurando coerência cartográfica e compatibilidade entre as resoluções dos dados utilizados. Assim, foram considerados: o fator R (erosividade da chuva), que expressa a energia cinética e a intensidade das precipitações (Avanzi *et al.*, 2019); o fator K (erodibilidade do solo), que reflete a resistência do solo à desagregação, conforme parâmetros definidos pela EMBRAPA (2025); o fator LS (comprimento e declividade das encostas), que representa o efeito do relevo sobre o escoamento superficial, segundo o modelo proposto por Desmet e Govers (1996); o fator C (cobertura e manejo do solo), que indica o grau de proteção proporcionado pela vegetação e pelo uso agrícola (Merten; Minella, 2002; Donzelli *et al.*, 2019; EMBRAPA Solos, 2025); e o fator P (práticas conservacionistas), que avalia a eficiência de técnicas de manejo na redução da erosão, conforme adaptações propostas por Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019).

Nos subitens seguintes, são detalhados os procedimentos adotados para a obtenção, parametrização e integração de cada fator, culminando na geração do mapa de perda de solo potencial para a microrregião de Porto Nacional, inserida no contexto do MATOPIBA.

#### 4.3.7.1 Fator R – Erosividade da Chuva

O fator R representa o potencial erosivo das chuvas, expresso pela energia cinética e pela intensidade máxima da precipitação. Para este estudo, utilizou-se um modelo regional calibrado especificamente para o estado do Tocantins, conforme recomendado por Avanzi *et al.* (2019) e Mello *et al.* (2019), com base em dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). De acordo com esses autores, a erosividade média anual da chuva (R) pode ser estimada pela seguinte equação empírica ajustada para o bioma Cerrado (Equação 4.9):

$$R = a \cdot P^b \quad (4.9)$$

Onde:

R = fator de erosividade da chuva;

P = precipitação média anual;

a e b = coeficientes de ajuste determinados regionalmente.

Para o Tocantins, Avanzi *et al.* (2019) identificaram os parâmetros  $a = 0,548$  e  $b = 1,224$ , resultando na seguinte forma específica da equação:

$$R = 0,548 \cdot P^{1,224}$$

Essa parametrização é considerada a mais adequada para o município de Palmas e demais áreas do Cerrado tocantinense, pois reflete as condições climáticas locais, calibradas a partir de dados pluviométricos do INMET.

O cálculo do fator R foi realizado a partir das precipitações médias anuais registradas nos anos de 2022 (1.350 mm), 2023 (1.410 mm) e 2024 (1.420 mm), aplicando-se o modelo empírico regional proposto por Avanzi *et al.* (2019), ajustado para o bioma Cerrado no estado do Tocantins.

Os valores de R foram estimados em ambiente SIG a partir da equação ( $R = 0,548 \cdot P^{1,224}$ ), na qual P representa a precipitação média anual (mm).

#### 4.3.7.2 Fator K – Erodibilidade do Solo

O fator K representa a suscetibilidade intrínseca do solo à erosão, dependendo de sua textura, estrutura, teor de matéria orgânica e permeabilidade. Conforme a EMBRAPA (*Manual de Métodos de Análise de Solo; Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS*), existem intervalos típicos de K para os principais grupos de solos brasileiros, aplicáveis em estudos nos quais não há dados locais experimentais.

Nessas condições, adotou-se o valor médio  $K = 0,030$ , correspondente à faixa de 0,025 a 0,035, recomendada para solos de textura média a argilosa do Cerrado (EMBRAPA Solos, 2023). Essa decisão metodologicamente é consistente, pois: a) mantém a coerência entre áreas de mesmo tipo de solo, variando apenas conforme uso e cobertura; b) assegura simplicidade e reprodutibilidade nos cálculos; e, c) segue a referência nacional da EMBRAPA (1997, 2018) para calibração do fator K.

#### 4.3.7.3 Fator LS – Comprimento e Declividade das Encostas

O fator LS foi obtido a partir do *raster LS2\_link\_tiled*, derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE). Este fator integra o comprimento e a inclinação das vertentes, refletindo a influência do relevo sobre a concentração do escoamento superficial e o potencial erosivo.

Os dados foram processados no QGIS, com a função *r.slope.aspect* para cálculo da declividade, assegurando a correspondência espacial com as demais camadas. As operações de mosaico e recorte espacial foram aplicadas de modo a delimitar precisamente a área de estudo.

No ambiente SIG, inicialmente, foi criada uma estrutura de diretórios padronizada para armazenamento dos arquivos geográficos. O mapa de uso e cobertura do solo foi reprojetoado para o sistema EPSG:31982, utilizando o comando *gdalwarp*, com o método de interpolação “vizinho mais próximo” a fim de preservar os valores categóricos do *raster*.

Posteriormente, os dados foram importados para o ambiente GRASS GIS, definindo a região de processamento com base no *raster* LS, assegurando mesma resolução espacial e extensão geográfica entre as camadas.

#### 4.3.7.4 Fator C – Cobertura e Manejo

O fator C (Tabela 4.1) foi elaborado a partir do mapa de uso e cobertura do solo disponibilizado pelo projeto MapBioma, considerando as principais classes identificadas na área de estudo. Entre elas destacam-se as áreas de agricultura em plantio direto, áreas agrícolas convencionais, pastagens moderadamente manejadas, pastagens degradadas, além das formações de vegetação primária e secundária. Essa categorização permitiu representar de forma realista a variabilidade espacial do manejo e da cobertura vegetal, refletindo as condições atuais de uso do solo.

Os valores atribuídos foram obtidos de fontes consolidadas, incluindo Embrapa Cerrados (2023), Embrapa Solos (Comunicado Técnico 87/2025), Merten e Minella (2002), Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019).

Tabela 4.1 – Fator C para o Bioma do Cerrado.

| <b>Uso e Cobertura do Solo</b>                                        | <b>Descrição local</b>                                     | <b>Valor C</b> |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------|
| Vegetação nativa primária<br>(Cerrado sensu stricto, mata de galeria) | Dossel fechado, alta biomassa, mínima perturbação          | 0,005 – 0,010  |
| Vegetação secundária / regeneração natural                            | Cerrado em regeneração, capoeira, estágio médio            | 0,02 – 0,05    |
| Pastagem bem manejada                                                 | Cobertura contínua, manejo rotacionado, adubação periódica | 0,02 – 0,05    |
| Pastagem degradada / rala                                             | Solo exposto entre touceiras, compactação, erosão visível  | 0,15 – 0,30    |
| Agricultura em plantio direto                                         | Cobertura permanente de palhada, mínimo revolvimento       | 0,05 – 0,12    |
| Agricultura convencional (aração/gradagem)                            | Solo exposto por longos períodos                           | 0,20 – 0,30    |
| Solo exposto / urbano / infraestrutura                                | Ausência de cobertura vegetal                              | 1,00           |
| Corpos d'água / represas / rios                                       | Normalmente excluídos do cálculo                           | 0,00 – 0,05    |

Fonte: EMBRAPA (2023, 2025), Merten e Minella (2002), Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019).

#### 4.3.7.5 Fator P – Práticas Conservacionistas

O fator P foi definido com base nas classes de declividade derivadas do MDE, aplicando metodologia adaptada de Merten e Minella (2002), Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019). A declividade (%) foi obtida por meio do comando *r.slope.aspect*, e os valores de P foram atribuídos conforme a classe de relevo (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Valores do fator P da RUSLE em função da declividade.

| Faixa de valor | Classe de relevo        | P (atribuído) |
|----------------|-------------------------|---------------|
| 0-3%           | Plano (0–3%)            | 0,60          |
| >3-8%          | Suave ondulado (3–8%)   | 0,70          |
| >8-20%         | Ondulado (8–20%)        | 0,80          |
| >20-45%        | Forte ondulado (20–45%) | 0,90          |
| >45%           | Montanhoso (>45%)       | 1,00          |

Fonte: Adaptado de Merten e Minella (2002), Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019)

Essa parametrização busca representar o aumento do potencial erosivo com a inclinação do terreno, considerando que áreas mais íngremes tendem a reduzir a eficiência das práticas conservacionistas, em função do maior escoamento superficial e da dificuldade de implementação de técnicas de manejo do solo.

#### 4.3.7.6 Cálculo da Equação RUSLE

A taxa de erosão do solo foi estimada com base na metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1978), posteriormente aprimorada por Renard *et al.* (1997), por meio da aplicação da *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE), também conhecida como Equação Universal de Perda de Solo Revisada (Equação 4.10).

$$A = R.K.LS.C.P \quad (4.10)$$

Onde:

A - perda média anual de solo (t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)

R - fator de Erosividade da chuva (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>)

K - fator de erodibilidade do solo (t ha h ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>)

LS - fator topográfico (declividade e comprimento da encosta) (adimensional)

C - fator de cobertura e manejo do solo (adimensional)

P - fator de práticas conservacionistas (adimensional)

A operação foi implementada no GRASS GIS por meio do comando: `r.mapcalc "RUSLE = R_factor * K_factor * LS2_link_tiled * C_factor_final * P_factor"`. O resultado foi exportado em formato Float32, representando toneladas por hectare por ano ( $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ), e armazenado para posterior análise e classificação.

Cada fator foi previamente derivado e espacializado em ambiente SIG, garantindo coerência cartográfica e compatibilidade entre resoluções e sistemas de referência. Os fatores **R**, **K**, **LS** e **C** foram ajustados às condições edafoclimáticas regionais, adotando coeficientes específicos conforme recomendações técnicas e literatura para o Cerrado (Corrêa; Dedeczek, 2009; Kishi, 2025). (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Descrição dos fatores utilizados na estimativa da perda de solo pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

(continua)

| Fator | Descrição            | Origem / Método de obtenção                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Unidade                                                                                    | Faixa de valores adotada / Reclassificação | Observações                                                                                                                                                                                                       |
|-------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R     | Erosividade da chuva | Derivado do índice de erosividade (R_factor), calculado a partir das precipitações médias anuais observadas nos anos de 2022 (1.350 mm), 2023 (1.410 mm) e 2024 (1.420 mm), obtidas junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), por meio da Estação Meteorológica Automática de Palmas – TO (Código OMM 82993; Lat. 10°12'45" S; Long. 48°21'01" W; Alt. 280 m). Aplicou-se o modelo empírico regional ajustado para o estado do Tocantins, conforme Avanzi <i>et al.</i> (2019): $R = 0,548 \times P^{1,224}$ . O valor médio resultante ( $R = 3.864,85 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ ) foi atribuído uniformemente à área de estudo, representando a erosividade média anual característica do bioma Cerrado na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA. | $\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ | Valor constante: 3.864,85                  | <i>Raster</i> homogêneo com 100% de pixels válidos e desvio-padrão nulo. Representa a erosividade média anual regional das chuvas no bioma Cerrado, baseada em dados observacionais da estação de Palmas (INMET). |

Tabela 4.3 – Descrição dos fatores utilizados na estimativa da perda de solo pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

(continuação)

| Fator | Descrição                            | Origem / Método de obtenção                                                                                                                                                                                                                       | Unidade                                                 | Faixa de valores adotada / Reclassificação                            | Observações                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K     | Erodibilidade do solo                | Valor fixo estabelecido conforme referência da EMBRAPA Cerrados (2025) para PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários do bioma Cerrado, utilizando $K = 0,03 \text{ t} \cdot \text{h} \cdot \text{MJ}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$ . | $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ | Constante: 0,030                                                      | Fator uniforme aplicado a solos de textura média a argilosa. Adoção metodologicamente consistente com recomendações da EMBRAPA para o Cerrado.                                                                                                                                                              |
| LS    | Comprimento e declividade das rampas | Derivado do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 m, processado no QGIS (módulo <i>r.slope.aspect</i> ) e reclassificado conforme faixas de declividade da área, com base no método de Desmet e Govers (1996).                     | Adimensional                                            | 0–3% → 0,2    3–8% → 0,5    8–20% → 1,0    20–45% → 2,0    >45% → 3,0 | Os valores reclassificados refletem o aumento progressivo do efeito topográfico sobre a erosão, variando de condições planas (baixo potencial erosivo) a montanhosas (alto potencial). A reclassificação foi adotada para garantir compatibilidade com o fator P e melhor interpretação espacial do relevo. |
| C     | Fator de cobertura e manejo          | Obtido pela reclassificação do mapa de uso e cobertura do solo do projeto MapBioma (Coleção 8, ano base 2022), considerando valores típicos do bioma Cerrado com base em Donzelli <i>et al.</i> (2019) e EMBRAPA Solos (2025).                    | Adimensional                                            | 0,005– 1                                                              | Valores menores correspondem a vegetação natural e áreas de manejo conservacionista; valores mais elevados refletem áreas agrícolas e solo exposto                                                                                                                                                          |

Tabela 4.3 – Descrição dos fatores utilizados na estimativa da perda de solo pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

(conclusão)

| Fator | Descrição                           | Origem / Método de obtenção                                                                                                                                                                                                                                                               | Unidade      | Faixa de valores adotada / Reclassificação                                    | Observações                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P     | Fator de práticas conservacionistas | Derivado das classes de declividade (%) obtidas do MDE, reclassificadas conforme faixas adaptadas de Merten e Minella (2002), Panachuki <i>et al.</i> (2011) e recomendações da EMBRAPA para o Cerrado. O raster P foi gerado em ambiente SIG (r.mapcalc) a partir dessa reclassificação. | Adimensional | 0–3% → 0,60<br>>3–8% → 0,70<br>>8–20% → 0,80<br>>20–45% → 0,90<br>>45% → 1,00 | Valores mais baixos representam maior efeito de práticas conservacionistas ou menor susceptibilidade do terreno ao escoamento superficial. A vinculação do fator P à declividade foi adotada por inexistirem dados espaciais de manejo, utilizando-se a declividade como variável substituta (proxy) para a eficiência das práticas. |

Fonte: Adaptado de Wischmeier e Smith (1978); Desmet e Govers (1996); Lombardi Neto e Moldenhauer (1992); Donzelli *et al.* (2019); Ministério da Agricultura (2020); EMBRAPA (2025).

### 4.3.7.7 Classificação da Perda de Solo

A partir do *raster* final da RUSLE, procedeu-se à classificação das perdas de solo em cinco classes de vulnerabilidade à erosão, conforme intervalos de perda anual adaptados de Merten & Minella (2002) e Silva *et al.* (2019). Essa categorização visa facilitar a interpretação espacial dos resultados e subsidiar ações de manejo conservacionista. Os intervalos estão apresentados na (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Classes de perda anual de solo pela RUSLE.

| Classe | Intervalo ( $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ ) | Descrição   |
|--------|--------------------------------------|-------------|
| 1      | $\leq 0,6$                           | Muito baixa |
| 2      | 0,6 – 2,0                            | Baixa       |
| 3      | 2,0 – 7,0                            | Média       |
| 4      | 7,0 – 24,0                           | Alta        |
| 5      | $> 24,0$                             | Muito alta  |

Fonte: Adaptado de Merten e Minella (2002) e Silva *et al.* (2019).

A adoção desses intervalos permite identificar de forma consistente as áreas mais suscetíveis à erosão hídrica, orientando ações de manejo e conservação do solo, tais como práticas de cobertura permanente, terraceamento, adequação do sistema de cultivo e implementação de estruturas de controle de escoamento superficial. A classificação fornece, portanto, uma base técnica sólida para a tomada de decisão no contexto da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

## 4.4 Resultados

### 4.4.1 Análises morfopedológicas da microrregião de Porto Nacional/ MATOPIBA

A microrregião de Porto Nacional, situada no contexto territorial do MATOPIBA, apresenta uma distribuição pedológica marcada pela ocorrência predominante de LATOSSOLOS, PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários e NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, conforme mapeamentos recentes realizados para o estado do Tocantins (Santos *et al.*, 2025). Essas classes também se destacam

ao longo da bacia Ribeirão Lajeado/TO, indicando um arranjo pedológico coerente com as condições geomorfológicas e hidrológicas regionais.

A caracterização morfopedológica realizada em campo adotou metodologia descritiva em escala detalhada, incluindo análises bidimensionais do perfil e identificação direta dos atributos morfológicos essenciais para a compreensão da morfogênese dos solos, conforme orientações de Teixeira et al. (2017). Esse procedimento permitiu reconhecer feições estruturais, variações texturais, padrões de coloração, presença de concreções, mudanças no grau de cimentação e a ocorrência de horizontes diagnósticos.

Na área amostrada, foi identificado um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, apresentando um horizonte concrecionário expressivo já nos primeiros 40 cm de profundidade. As características morfológicas observadas refletem processos pedogenéticos associados à alternância entre condições de saturação hídrica e drenagem limitada, que promovem ciclos sucessivos de redução e oxidação, mobilização e reprecipitação de ferro. Esses mecanismos favorecem a formação de massas plínticas, concreções ferruginosas e horizontes endurecidos, restringindo a permeabilidade e alterando a dinâmica hídrica local (Lepsch, 2021; Santos *et al.*, 2025).

Tais atributos contribuem para a compreensão da gênese desse solo na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA (Tabela 4.5), evidenciando um sistema pedoambiental fortemente influenciado por flutuações hídrico-redox e por condições de drenagem imperfeita, com implicações diretas para sua funcionalidade físico-hidráulica, vulnerabilidade à erosão e limitações ao uso agrícola.

Tabela 4.5 – Descrição do perfil do solo localizado no alto curso da bacia do Ribeirão Lajeado, microrregião de Porto Nacional/TO.

(continua)

|                      |                                                                                                                      |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Perfil:</b> 40 cm |                                                                                                                      |
| <b>Data</b>          | 03/08/2024                                                                                                           |
| <b>Classificação</b> | PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário (Fwx).                                                                            |
| <b>Localização</b>   | Fazenda Valadares: 600 m a sudoeste da rodovia TO-020, na altura do km 30. Município de Palmas, estado do Tocantins. |

Tabela 4.5 – Descrição do perfil do solo localizado no alto curso da bacia do Ribeirão Lajeado, microrregião de Porto Nacional/TO.

(conclusão)

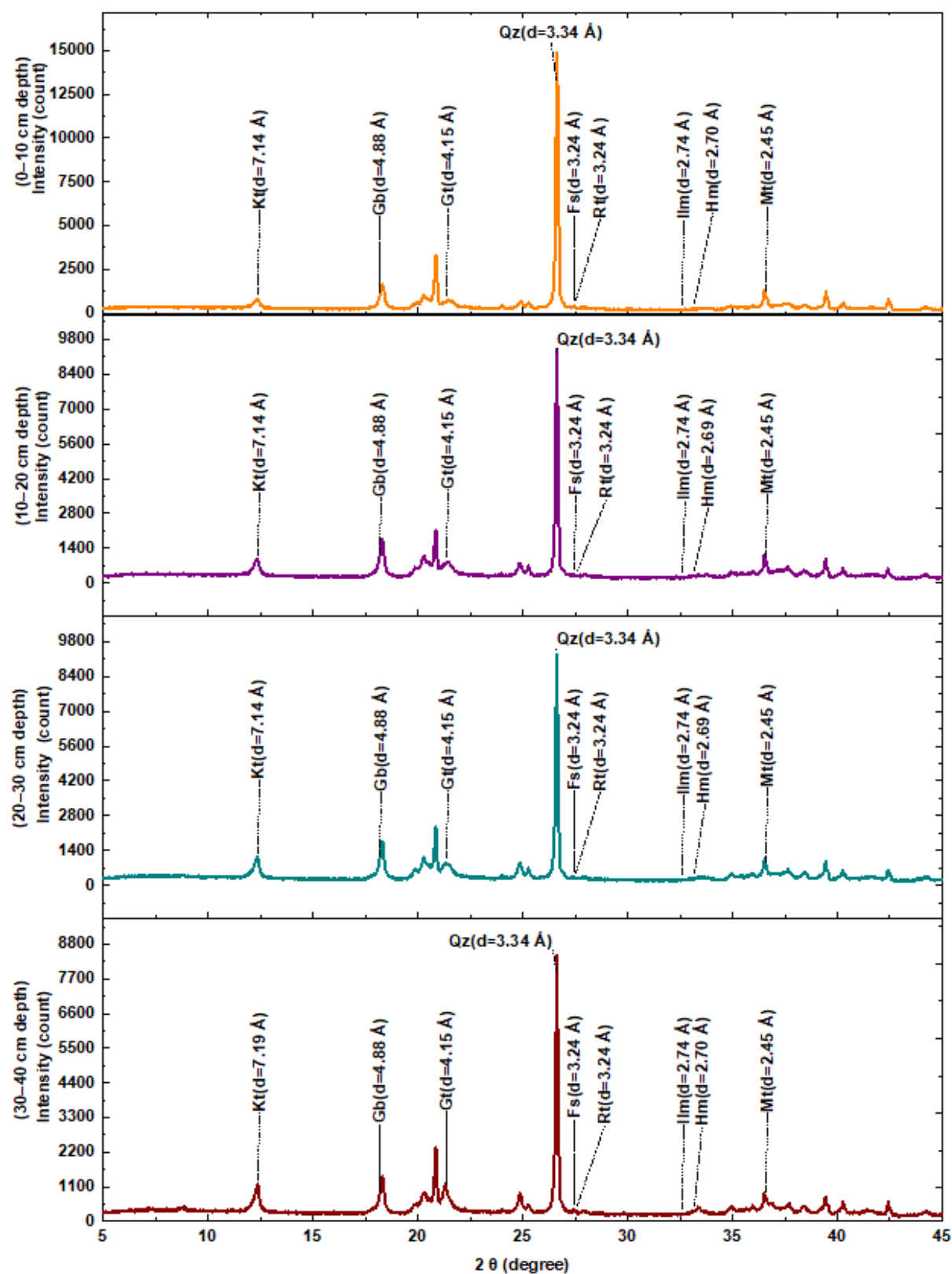
|                                                             |                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil</b> | Terço inferior de elevação com 3 a 8% de declividade sendo área de expansão agropecuária. Coleta das amostras ocorreu na entressafra.                                                            |
| <b>Altitude</b>                                             | 560 metros                                                                                                                                                                                       |
| <b>Litologia</b>                                            | Rochas sedimentares (predominância litológica de folhelhos intercalados por arenitos)                                                                                                            |
| <b>Geologia</b>                                             | Unidade Estratigráfica: Formação Pimenteiras; Grupo Geológico: Canindé                                                                                                                           |
| <b>Material originário</b>                                  | Presença de quartzo, além de caulinita, gibbsita, goethita e magnetita.                                                                                                                          |
| <b>Pedregosidade</b>                                        | Bastante pedregoso, com presença de plintitas.                                                                                                                                                   |
| <b>Relevo local</b>                                         | Suave ondulado                                                                                                                                                                                   |
| <b>Relevo regional</b>                                      | Plano a suave ondulado                                                                                                                                                                           |
| <b>Erosão</b>                                               | Do ponto de vista geomorfológico, caracterizam-se como superfície de erosão (Platôs entre 300 e 500 m de altitude)                                                                               |
| <b>Vegetação primária</b>                                   | Cerrado Sentido Restrito                                                                                                                                                                         |
| <b>Uso atual</b>                                            | Plantio Direto (SPD) com rotação de cultura: Soja entre outubro e novembro; milho, após a colheita da soja, entre janeiro e fevereiro; e, Sorgo entressafra, após a colheita da soja e do milho. |
| <b>Descrito e coletado por</b>                              | Furtado, S. e Queiroz, M.M.C.                                                                                                                                                                    |

Fonte: Organizado pela autora a partir de Tocantins (2025); IBGE (2023b) e Grupo Soberano Agronegócios Ltda (2024).

#### 4.4.2 Difração de raios X (DRX)

A difração de raios X permitiu identificar, a partir dos picos de maior intensidade apresentados nos difratogramas, a presença dos minerais caulinita, gibbsita, goethita, magnetita, quartzo, hematita, rutilo, ilmenita e feldspato, os quais compõem a mineralogia característica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Difratogramas obtidos pela técnica de difração de raios X (DRX) para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado, apresentados de acordo com a profundidade das amostras.



Fonte: A autora.

Nos difratogramas foram evidenciados apenas os picos de maior intensidade, a fim de destacar os minerais predominantes e facilitar a interpretação visual das fases cristalinas presentes no solo. Entretanto, todos os picos detectados — inclusive aqueles de baixa intensidade e não representados graficamente — foram analisados e estão detalhados na (Tabela 4.6), que apresenta os valores de  $2\theta$ , intensidade relativa, espaçamento interplanar experimental médio ( $d_{m\text{eo}}$ ) e espaçamento interplanar teórico ( $d_{t\text{eor}}$ ), permitindo uma comparação direta entre os dados observados e os padrões cristalográficos de referência.

Tabela 4.6 – Parâmetros de difração de raios X correspondentes aos picos identificados para cada mineral, com valores de  $2\theta$ , intensidade relativa (%), espaçamento interplanar médio experimental ( $d_{m\text{eo}}$ ) e teórico ( $d_{t\text{eor}}$ ).

| Mineral   | Pico | $2\theta$ | Intensidade | d (médio) | d (teórico) |
|-----------|------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Kaolinita | 1°   | 12,37     | 100         | 7.156     | 7.151       |
| Kaolinita | 2°   | 24,89     | 61,53       | 3.575     | 3.575       |
| Kaolinita | 3°   | 20,36     | 51,82       | 4.359     | 4.359       |
| Gibbsita  | 1°   | 18,16     | 100         | 4.882     | 4.882       |
| Gibbsita  | 2°   | 20,14     | 34,76       | 4.406     | 4.406       |
| Gibbsita  | 3°   | 37,39     | 20,14       | 2.403     | 2.403       |
| Goethita  | 1°   | 21,37     | 100         | 4.153     | 4.155       |
| Goethita  | 2°   | 36,86     | 64,03       | 2.437     | 2.437       |
| Goethita  | 3°   | 33,42     | 39,97       | 2.679     | 2.679       |
| Magnetita | 1°   | 36,62     | 100         | 2.452     | 2.452       |
| Magnetita | 2°   | 64,81     | 38,48       | 1.438     | 1.437       |
| Magnetita | 3°   | 31,08     | 28,26       | 2.876     | 2.876       |
| Quartzo   | 1°   | 26,62     | 70,07       | 3.346     | 3.346       |
| Quartzo   | 2°   | 26,62     | 29,93       | 3.346     | 3.346       |
| Quartzo   | 3°   | 20,84     | 19,9        | 4.260     | 4.260       |
| Hematita  | 1°   | 33,17     | 100         | 2.699     | 2.699       |
| Hematita  | 2°   | 35,67     | 72,59       | 2.516     | 2.515       |
| Hematita  | 3°   | 54,09     | 45,8        | 1.694     | 1.694       |
| Rutilo    | 1°   | 27,5      | 100         | 3.241     | 3.241       |
| Rutilo    | 2°   | 54,46     | 57,99       | 1.684     | 1.684       |
| Rutilo    | 3°   | 36,17     | 46,72       | 2.481     | 2.482       |
| Ilmenita  | 1°   | 32,65     | 100         | 2.741     | 2.741       |
| Ilmenita  | 2°   | 35,31     | 64,73       | 2.540     | 2.540       |
| Ilmenita  | 3°   | 63,39     | 27,02       | 1.466     | 1.466       |
| Feldspato | 1°   | 27,44     | 100         | 3.248     | 3.248       |
| Feldspato | 2°   | 25,88     | 64,34       | 3.353     | 3.440       |
| Feldspato | 3°   | 29,99     | 54,63       | 2.978     | 2.977       |

Fonte: A autora.

Nota: A tabela contempla todos os picos detectados, incluindo aqueles não evidenciados graficamente nos difratogramas da Figura 4.5.

A presença expressiva de gibbsita e caulinita confirma uma mineralogia típica de regiões tropicais altamente intemperizadas, composta predominantemente por

óxidos de alumínio e filossilicatos 1:1. Essa tipologia mineralógica, caracterizada por uma estrutura cristalina formada por uma camada tetraédrica de sílica associada a uma camada octaédrica de alumínio, resulta em minerais não expansíveis, com baixa capacidade de variação volumétrica, baixa atividade e reduzida plasticidade (Kumari; Mohan, 2021).

Em condições edafoclimáticas marcadas por alternância entre saturação hídrica e períodos de oxidação — características fundamentais do ambiente de formação dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários — esses minerais favorecem a formação de plintitas e concreções ferruginosas. Tais estruturas desenvolvem-se a partir da segregação e posterior endurecimento de  $\text{Fe}^{3+}$ , formando horizontes densos, rígidos e de baixa porosidade, o que confere ao solo alta susceptibilidade à compactação quando submetido a manejo inadequado ou tráfego de máquinas agrícolas (Kämpf; Curi, 2012a).

Assim, os resultados obtidos pela DRX demonstram que a composição mineralógica do solo exerce papel central na sua funcionalidade físico-hidráulica, influenciando diretamente atributos como a infiltração, retenção de água, resistência mecânica e vulnerabilidade a processos erosivos. Esses achados reforçam a importância de compreender a mineralogia em estudos aplicados ao manejo conservacionista na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

#### 4.4.3 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise por espectrometria de fluorescência de raios X revelou a presença de dezoito elementos químicos, com predomínio absoluto de alumínio (Al), silício (Si), ferro (Fe) e titânio (Ti), que juntos representam mais de 90% da composição química do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado (Tabela 4.7). Esses quatro elementos constituem a base da mineralogia dos solos altamente intemperizados do Cerrado, refletindo avançado estágio de lixiviação e acumulação relativa de sesquióxidos.

Tabela 4.7 – Distribuição dos elementos majoritários encontrados nas amostras por meio da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado.

| Profundidade (cm)                    | Média dos elementos |             |             |             |
|--------------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|
|                                      | Al (wt. %)          | Si (wt. %)  | Fe (wt. %)  | Ti (wt. %)  |
| 0 – 10 cm                            | 41,19               | 41,74       | 12,63       | 2,20        |
| <i>DesvPad (<math>\sigma</math>)</i> | <i>0,35</i>         | <i>0,21</i> | <i>0,21</i> | <i>0,04</i> |
| 10 – 20 cm                           | 45,42               | 33,22       | 16,88       | 2,07        |
| <i>DesvPad (<math>\sigma</math>)</i> | <i>0,42</i>         | <i>0,43</i> | <i>0,02</i> | <i>0,05</i> |
| 20 – 30 cm                           | 45,77               | 34,05       | 15,46       | 2,10        |
| <i>DesvPad (<math>\sigma</math>)</i> | <i>0,71</i>         | <i>0,29</i> | <i>0,36</i> | <i>0,04</i> |
| 30 – 40 cm                           | 43,20               | 33,32       | 19,29       | 1,85        |
| <i>DesvPad (<math>\sigma</math>)</i> | <i>0,91</i>         | <i>0,40</i> | <i>0,88</i> | <i>0,25</i> |

Fonte: A autora.

Os resultados obtidos pela técnica de FRX revelam um padrão químico bem definido ao longo do perfil do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, evidenciando variações consistentes com os processos pedogenéticos característicos desses solos. O alumínio (Al) apresentou as maiores concentrações em todas as profundidades analisadas, variando de 41,19% na camada superficial (0–10 cm) a 45,77% na faixa de 20–30 cm. Esse comportamento confirma o forte caráter gibbsítico e caulinítico identificado previamente pela DRX, típico de solos altamente intemperizados do Cerrado. O silício (Si), por sua vez, mostrou maior abundância na camada superficial, atingindo 41,59%, com redução gradual nas camadas subsuperficiais, onde os valores oscilaram entre 33,22% e 34,05%. Essa diminuição acompanha o aumento relativo de ferro (Fe) em profundidade, fenômeno recorrente em horizontes com maior mobilização e reprecipitação de óxidos de ferro.

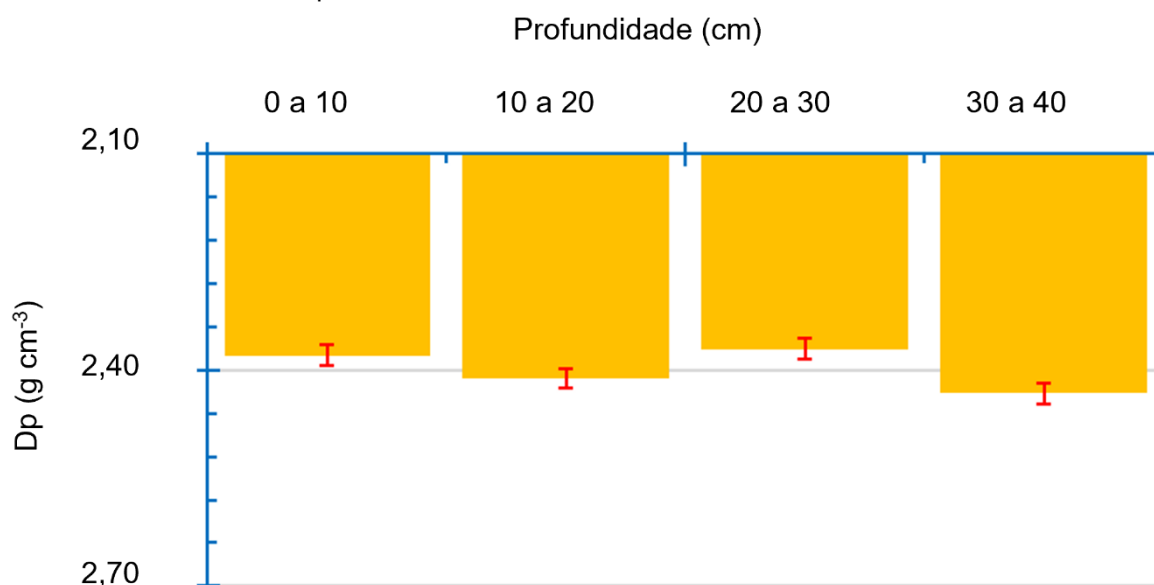
O ferro demonstrou incremento progressivo ao longo do perfil, variando de 12,63% (0–10 cm) para 19,29% (30–40 cm), padrão que indica intensificação dos processos de ferruginização, formação de plintitas e desenvolvimento de concreções ferruginosas — características marcantes da gênese desses solos em ambientes sujeitos a alternância entre hidromorfia e drenagem limitada. Já o titânio (Ti) manteve concentrações relativamente estáveis em todas as profundidades avaliadas (1,85%–2,20%), comportamento esperado em solos muito intemperizados, uma vez que

minerais titaníferos, como rutilo e ilmenita, tendem a permanecer imobilizados ao longo do processo pedogenético.

#### 4.4.4 Densidade de partícula, e textura, análise de cor e morfologia

A densidade de partículas apresentou valores estatisticamente semelhantes ao longo das quatro profundidades avaliadas (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm), não sendo observadas diferenças significativas entre as médias ( $p > 0,05$ ). Ainda que os resultados de FRX tenham revelado variações químicas — como o aumento progressivo de Fe em profundidade, a redução de Si e o incremento de Al no horizonte subsuperficial — tais alterações não foram suficientes para modificar a Dp do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Densidade de partículas do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado ao longo das diferentes profundidades.



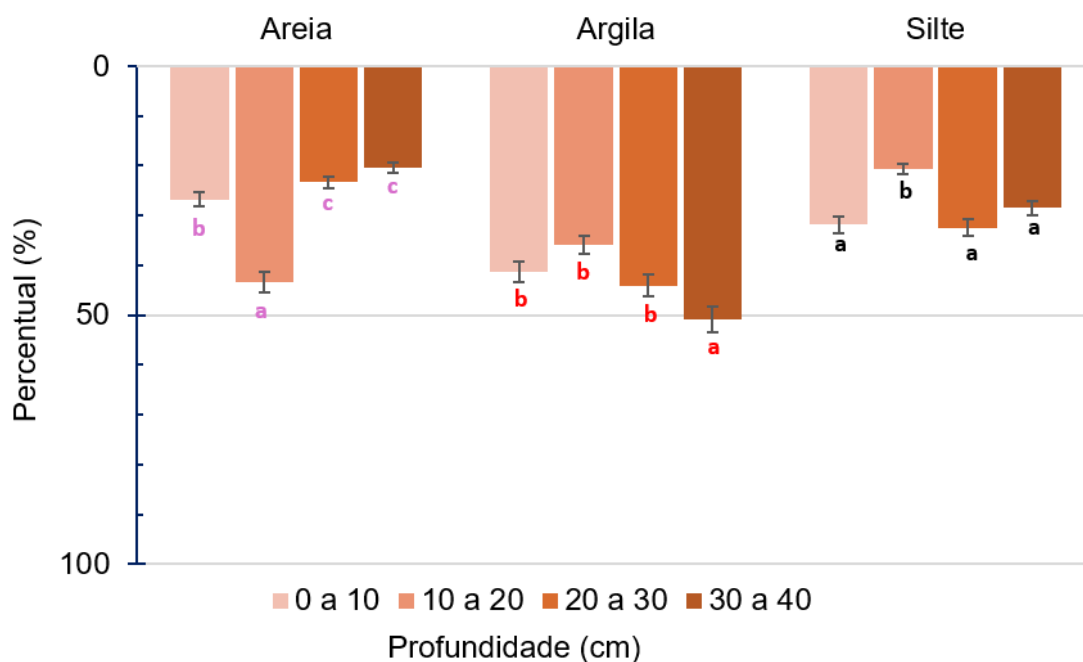
Fonte: A autora.

Nota: A barra de erro representa o desvio padrão da média. (ns) significa que não existem diferenças estatísticas significativas entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A análise granulométrica confirmou que o solo apresenta textura argilosa, caracterizada pelo predomínio da fração fina, com médias de 28,5% de areia, 28,4% de silte e 43,1% de argila (Figura 4.7). As diferenças observadas entre profundidades foram estatisticamente discretas, indicando um horizonte pedogenético relativamente homogêneo, típico de ambientes submetidos a intensa lixiviação e mobilização de

bases. O padrão textural apresenta coerência com a mineralogia identificada pela DRX, dominada por filossilicatos 1:1 e óxidos de Al e Fe.

Figura 4.7 – Distribuição granulométrica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado ao longo de diferentes profundidades.



Fonte: A autora.

Nota: A barra de erro representa o desvio padrão da média. Letras iguais indicam a não existência de diferenças estatísticas entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

A variação de cor dos horizontes diagnósticos ao longo do perfil do solo, conforme a notação Munsell, reflete as condições pedogenéticas e a distribuição dos constituintes minerais e orgânicos do solo (Demattê, 2011; Botelho, 2006). Na profundidade de 0 a 10 cm, observa-se a cor 10YR 4/4, correspondente a um marrom amarelado moderadamente escuro, típico de horizontes A sob SPD, influenciado pelo acúmulo de matéria orgânica.

Na profundidade entre 10 e 20 cm, a coloração passa a 7.5YR 4/6, indicando um tom mais intenso, amarelo avermelhado, associado à presença de concreções ferruginosas e à diminuição do teor de material orgânico. Já na profundidade de 20 a 40 cm, predomina a cor 5YR 5/6, de tonalidade marrom-avermelhada mais clara, sugerindo a transição para horizontes subsuperficiais enriquecidos em óxidos de ferro.

Destaca-se ainda a presença de plintita, uma feição diagnóstica típica desse tipo de solo, caracterizada por uma mistura de argila e óxidos de ferro e alumínio. Essa materialização pedogenética, quando submetida à secagem ou exposição

prolongada ao ar, pode sofrer laterização, levando à formação de uma massa endurecida irreversível, denominada petroplintita (Moreira; Oliveira, 2001).

As análises morfológicas conduzidas em campo, aliadas aos resultados laboratoriais, permitiram a identificação de três horizontes superficiais distintos no perfil do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário (F<sub>xw</sub>).

O horizonte A foi identificado entre 0 e 10 cm de profundidade. Apresenta coloração marrom-amarelada moderadamente escura (10YR 4/4), estrutura granular e textura argilosa. Há presença esparsa de nódulos ferruginosos.

O horizonte AC ocorre entre 10 e 20 cm de profundidade. Possui coloração 7.5YR 4/6, textura argilosa e estrutura fraca, com leve variação na agregação em relação ao horizonte superior. A distribuição dos elementos químicos, segundo a análise por FRX, indicaram aumento nos teores de Fe e Al e redução dos teores de Si em relação ao horizonte A.

Entre 20 e 40 cm de profundidade, foi identificado o horizonte C<sub>x</sub>, o sufixo “x” indica concrecionamento e endurecimento progressivo, típico do solo em estudo. Esse horizonte apresenta coloração marrom-avermelhada (5YR 5/6), elevada resistência à escavação manual, aspecto de placas sobrepostas e presença de concreções ferruginosas. O teor de Fe é marcadamente elevado, conforme confirmado pela análise FRX.

O conjunto das análises (granulométrica, mineralógica, química e morfológica) demonstra que o solo estudado apresenta forte controle pedogenético por processos de ferruginização e plintização, o que resulta em propriedades físicas restritivas, como baixa permeabilidade, risco elevado de compactação e suscetibilidade à erosão quando submetido a manejos inadequados.

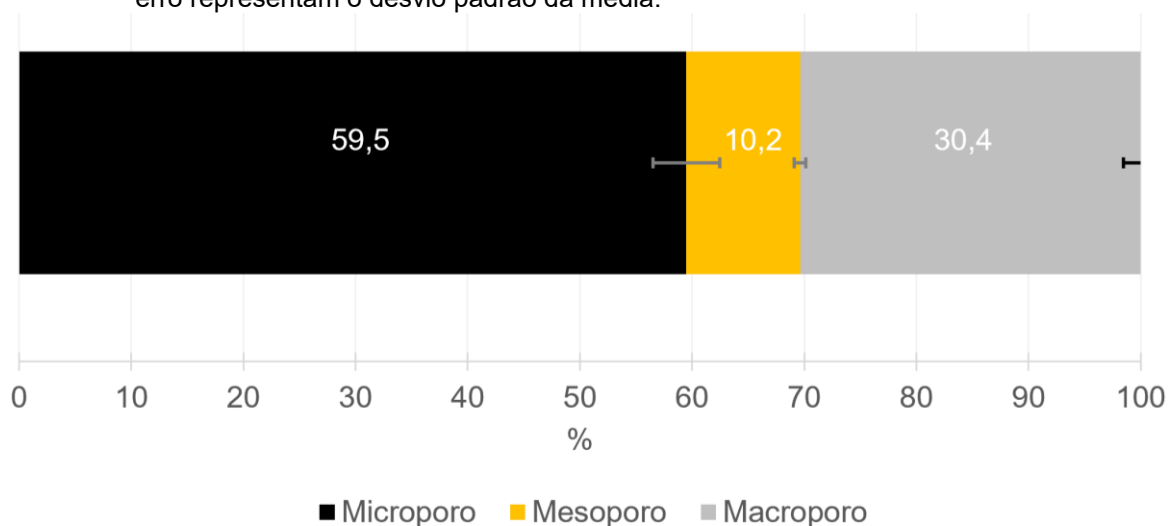
#### 4.4.5 Porosidade total, microporosidade, mesoporosidade, macroporosidade e densidade do solo

A porosidade total para camada superficial foi em média de 0,52 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> ( $\sigma$  = 0,04), apresentando um valor compatível com a faixa ideal para solos bem estruturados em ambientes tropicais, especialmente sob SPD. A densidade do solo foi de 1,14 g cm<sup>-3</sup> ( $\sigma$  = 0,09), indicando condições adequadas para o crescimento radicular e movimentação de água e ar na camada superficial (Tormena *et al.*, 2002).

Quanto à distribuição do tamanho dos poros, observou-se predominância de microporos 59,50% ( $\sigma = 7,2$ ), seguida de macroporos 30,40% ( $\sigma = 8,1$ ) e mesoporos 10,20% ( $\sigma = 1,8$ ) (Figura 4.8). Esses valores refletem a compartimentação dos espaços porosos no solo, com maior proporção voltada à retenção de água (microporos), mantendo também quantidade significativa de macroporos, fundamentais para a drenagem e aeração do solo (Teixeira *et al.*, 2017).

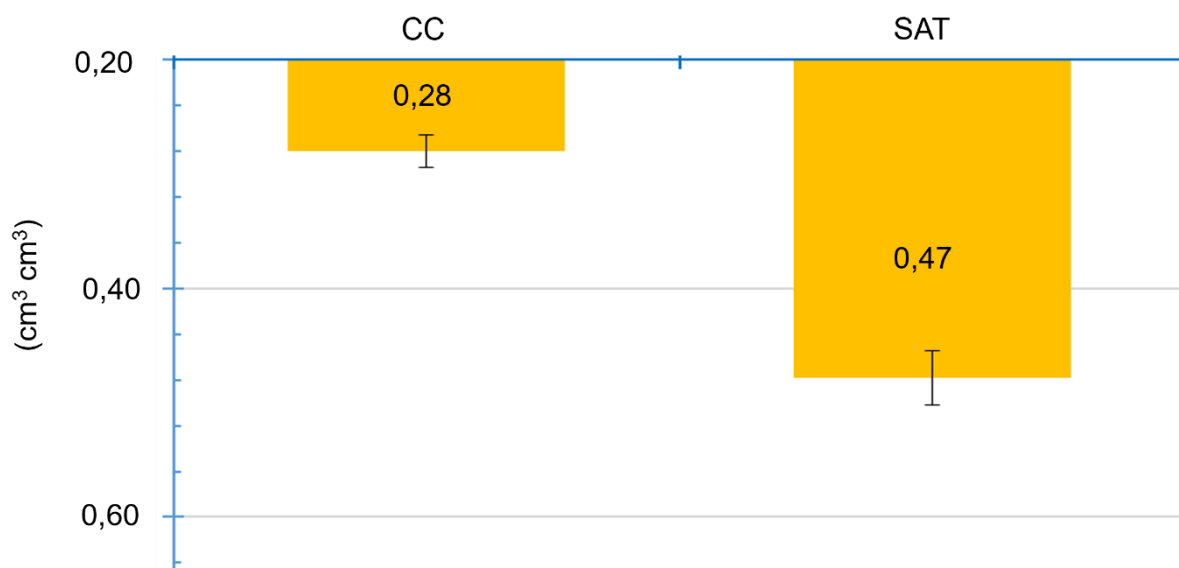
A umidade volumétrica do solo na capacidade de campo foi de  $0,280 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma = 0,02$ ), enquanto a saturação (SAT) atingiu  $0,478 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma = 0,07$ ) (Figura 4.9), ambos em níveis considerados adequados para solos com boa funcionalidade hídrica e suporte à atividade biológica sob manejo conservacionista (Tormena *et al.*, 2002; Embrapa, 2011).

Figura 4.8 – Contribuição dos microporos, mesoporos e macroporos presentes nos solos. As barras de erro representam o desvio padrão da média.



Fonte: A autora.

Figura 4.9 – Umidade na capacidade de campo (CC) e saturação (SAT). As barras de erro representam o desvio padrão da média.



Fonte: A autora.

#### 4.4.6 Curva de retenção da água no solo

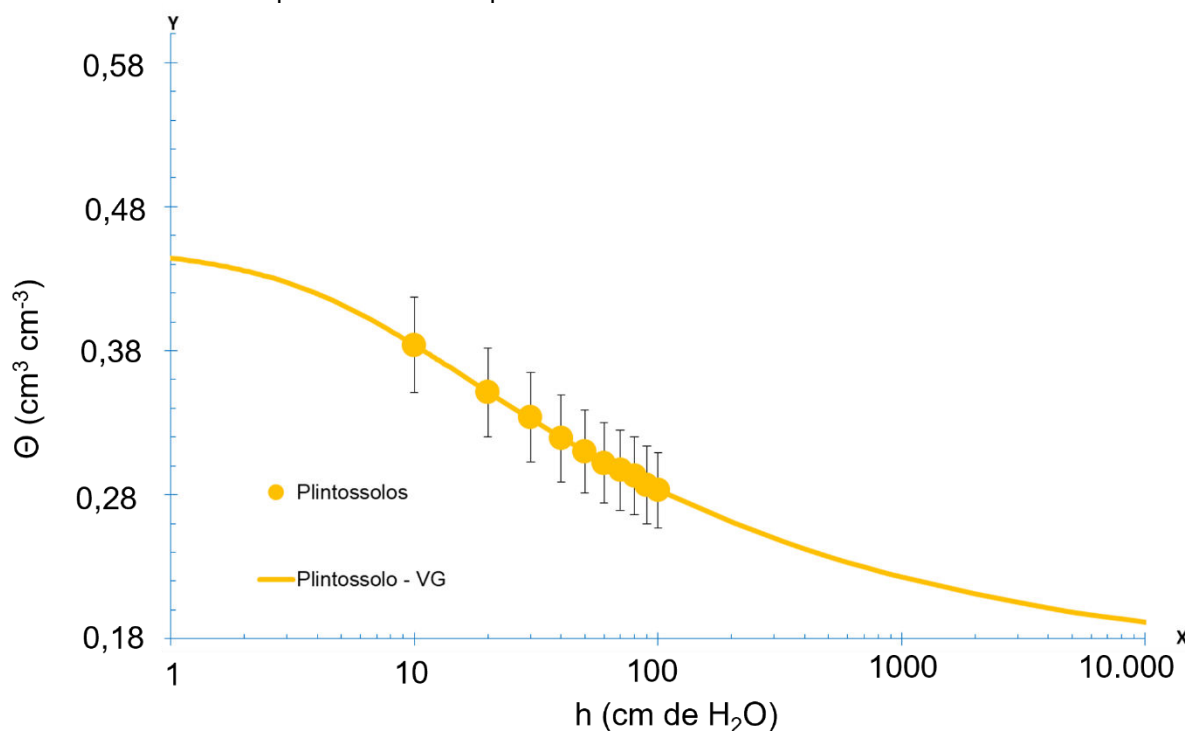
A curva de retenção de água no solo expressa a relação existente entre a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) e a tensão de água no solo ( $h$ ). Basicamente, a curva fornece uma medida da energia com que a água se encontra retida nos poros do solo. Quanto menor o tamanho do poro, maior a energia com que a água se encontra retida. Isso significa que é necessário para as plantas disporem mais energia para ter acesso a essa água.

A partir da saturação, o solo começa a drenar água principalmente por gravidade. À medida que a umidade diminui, a tensão matricial aumenta, retraindo a água nos poros menores. Isso ocorre porque a tensão é uma medida da energia com que a água está retida no solo. Aumentos de tensão, portanto, representam maiores energias, e, acesso a poros cada vez menores. Para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado as maiores variações na umidade ocorreram entre 1 e 1000 cm de H<sub>2</sub>O. A umidade na capacidade de campo situa-se próxima de 0,28 cm³ cm<sup>-3</sup> ( $\sigma = 0,02$ ), enquanto o teor de água residual se aproxima de 0,10 cm³ cm<sup>-3</sup> considerando a tensão de 10.000 cm de H<sub>2</sub>O.

O ajuste matemático do modelo de van Genuchten apresentou desempenho estatístico satisfatório, com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,99$ , indicando

excelente aderência entre os dados experimentais e os valores estimados. A umidade residual ( $\theta_r = 0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) indica que o solo ainda retém cerca de 1% a partir do limite para o qual as raízes das plantas não têm mais acesso a essa água. Esse comportamento é característico de solos com alta proporção de microporos, nos quais a água é liberada gradualmente à medida que a tensão aumenta, favorecendo a retenção hídrica em condições de menor disponibilidade. Tal padrão é coerente com a estrutura física observada no PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário avaliado (Figura 4.10).

Figura 4.10 – Curva de retenção da água no solo para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado para a camada superficial.



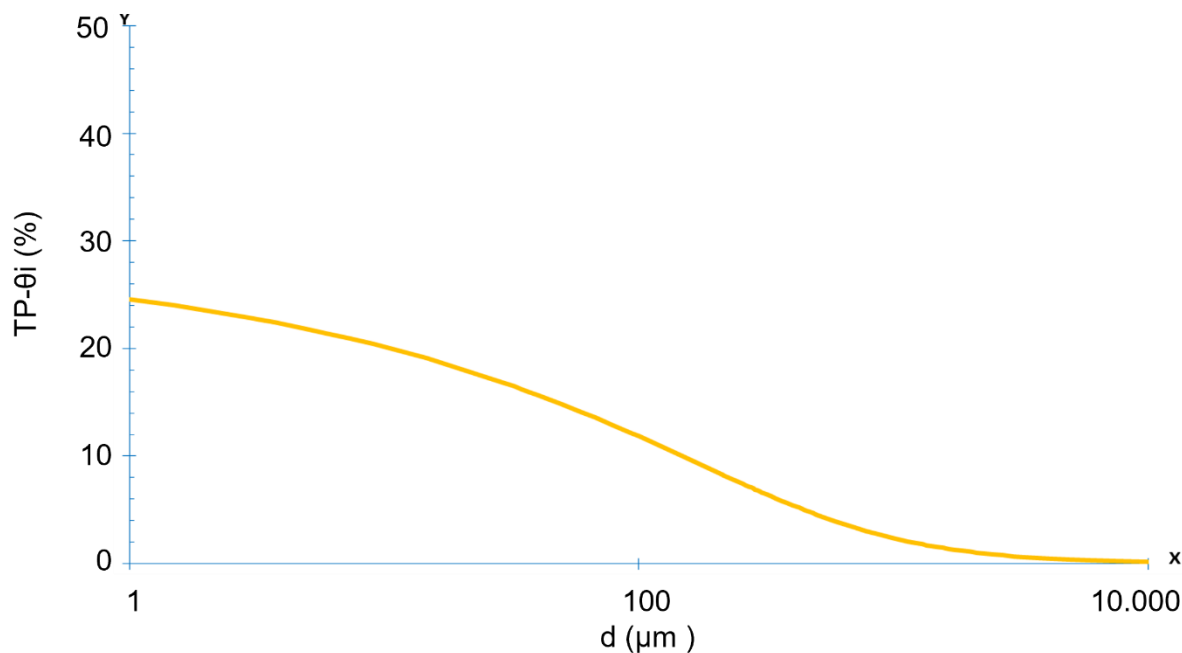
Fonte: A autora.

Nota: As barras de erro representam o desvio padrão da média. As linhas contínuas foram obtidas com base na simulação dos dados de retenção de água.

A distribuição da porosidade livre de água em função do tamanho poros (Figura 4.11) revela uma maior concentração de microporos ( $< 30 \mu\text{m}$ ) e mesoporos ( $30 - 100 \mu\text{m}$ ). A presença de macroporos ( $> 100 \mu\text{m}$ ) foi observada em menor proporção, apresentando um decréscimo acentuado a partir de  $100 \mu\text{m}$ . Os microporos retêm água contra a gravidade (disponível ou indisponível para as plantas) ao passo que os mesoporos atuam na redistribuição e armazenamento de água disponível às plantas. A maior declividade da curva na região dos mesoporos reflete

boa retenção de água na faixa importante para o desenvolvimento radicular das plantas. Já os macroporos, responsáveis pela drenagem e aeração do solo, possuem uma variação mais tênue na porosidade de aeração

Figura 4.11 – Curva da porosidade livre de água ( $TP-\theta_i$ ) em função do diâmetro equivalente dos poros para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado.



Fonte: A autora.

A curva de retenção forneceu subsídios para avaliar a capacidade do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário em reter água. Os parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) apresentaram valores coerentes com os encontrados na literatura para solos de características semelhantes (Tabela 4.8). Destaca-se que os valores dos parâmetros utilizados foram obtidos, utilizando o programa SWRC Fit (Seki, 2007).

Tabela 4.8 – Resultados da modelagem de retenção de água no solo e intervalo de valores típicos descritos na literatura para o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário.

| Parâmetro                                                                    | Resultado (≈) | Intervalo típico (literatura (≈)) | Referência                                              |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <b>θ<sub>s</sub></b> (Umidade na saturação cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> ) | 0,441 (±0,02) | 0,40 a 0,50                       | Tomasella e Hodnett (2004)                              |
| <b>θ<sub>r</sub></b> (Umidade residual cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> )     | 0,161 (±0,04) | 0,12 a 0,18                       | Leite <i>et al.</i> (2024); Reatto <i>et al.</i> (2008) |
| <b>α</b> (cm <sup>-1</sup> )                                                 | 1,635 (±0,80) | 0,10 a 0,25                       | Dane e Topp (2002)                                      |
| <b>n</b> (adimensional)                                                      | 1,488 (±0,19) | 1,1 a 1,4                         | Reatto <i>et al.</i> (2008); van Genuchten (1980)       |
| <b>R<sup>2</sup></b> (adimensional)                                          | 0,99          | ≥ 0,98 (excelente)                | van Genuchten (1980); Leite <i>et al.</i> (2024)        |

Fonte: A autora.

Os valores encontrados demonstram características consistentes com a estrutura típica do solo em estudo. A umidade residual, apresentou valor médio de  $\approx 0,16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma = \pm 0,04$ ), valor considerado plausível para PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário em áreas tropicais, conforme observado por Leite *et al.* (2024) e Reatto *et al.* (2008), que relataram valores variando entre 0,10 e 0,20  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  em solos com características texturais e mineralógicas semelhantes. Esses resultados refletem a elevada proporção de microporos e a presença de óxidos de ferro e alumínio, típicos desses solos, que favorecem a retenção de água em potenciais baixos. A consistência dos valores obtidos reforça a confiabilidade do ajuste do modelo de van Genuchten adotado na simulação da curva de retenção de água.

O valor médio relacionado à umidade de saturação de  $\approx 0,441 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  ( $\sigma = \pm 0,02$ ), estando dentro da faixa típica reportada na literatura para solos tropicais argilosos, que varia de 0,40 a 0,50  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Tomasella; Hodnett, 2004). Esse valor indica uma boa capacidade de armazenamento de água na condição de saturação, coerente com solos de textura média a fina, e reflete a estrutura porosa característica do horizonte superficial do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário.

O parâmetro de entrada de ar ( $\alpha$ ), indica o momento em que o solo começa a drenar. O valor médio obtido de  $\alpha$  foi de  $\approx 1,63 \text{ cm}^{-1}$  ( $\sigma = \pm 0,02$ ), o que sugere maior facilidade de drenagem e menor retenção inicial (Tomasella; Hodnett, 2004). No

presente caso, esse parâmetro indica que a água começa a ser drenada em potenciais relativamente baixos, embora de forma gradual, devido à estrutura predominantemente microporosa.

O parâmetro  $n$  está relacionado com a forma da curva de retenção de água, indicando se o solo drena mais rapidamente ou lentamente com a variação da tensão. Esse parâmetro é influenciado pela textura e estrutura do solo.

Valores mais altos de  $n$  ( $> 2,5$ ) indicam uma transição mais abrupta, típica de solos com distribuição de poros mais uniforme e maiores. Por outro lado, valores mais baixos, como o obtido neste estudo ( $1,48 \sigma = \pm 0,19$ ) refletem uma transição mais suave entre a região de poros estruturais e texturais, sendo um indicativo de uma distribuição de poros mais heterogênea (Ghanbarian-Alavijeh *et al.*, 2010).

#### 4.4.7 Resultados da Estimativa da Perda de Solo por Meio da RUSLE na Microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA

A estimativa da perda de solo obtida por meio da RUSLE foi espacializada e integrada ao mapa de uso e cobertura do solo, possibilitando a visualização conjunta do potencial erosivo e das principais classes de ocupação da terra na microrregião de Porto Nacional, inserida na região do MATOPIBA.

O resultado demonstra uma variação espacial significativa da erosão potencial, com predominância das classes baixa a moderada, abrangendo extensas áreas do território. As classes de erosão baixa ( $0-5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) ocorrem majoritariamente nas áreas cobertas por formações florestais e savânicas, bem como em regiões de pastagens moderadamente manejadas, distribuídas principalmente nas porções norte e sudoeste da microrregião.

As classes moderadas de perda de solo ( $5-20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) estão associadas a áreas de uso agropecuário intensivo, incluindo soja e outras lavouras temporárias, além de trechos de formações campestres e mosaicos de uso com fragmentos de vegetação remanescente. Nessas áreas, o relevo é suavemente ondulado, e o uso contínuo do solo contribui para valores intermediários do fator  $C$ .

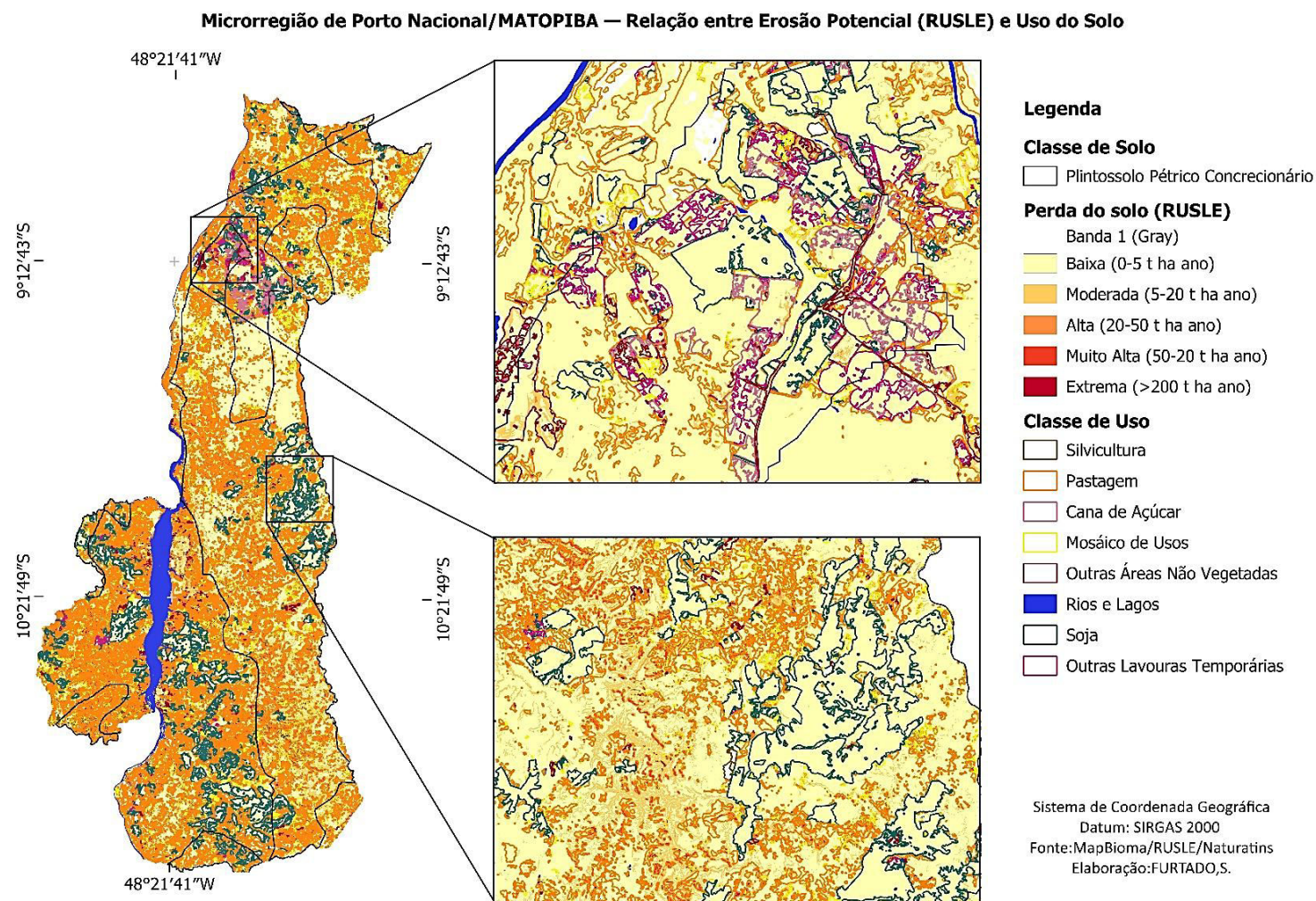
As classes de erosão alta ( $20-50 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e muito alta ( $50-200 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) ocorrem de forma pontual, principalmente nas margens de cursos d'água, áreas agrícolas em declividades mais acentuadas e em pastagens degradadas, localizadas nas porções central e sudeste da microrregião. As áreas de erosão extrema ( $> 200 \text{ t}$

ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>) são restritas e aparecem associadas a feições topográficas mais dissecadas, coincidindo com encostas íngremes e solos expostos.

De modo geral, o cruzamento entre o mapa de erosão potencial e o de uso e cobertura do solo permitiu identificar padrões espaciais coerentes entre o tipo de uso e a intensidade de perda de solo. As áreas de vegetação natural apresentam predominância de baixa suscetibilidade erosiva, enquanto as áreas cultivadas e degradadas exibem maiores valores de erosão estimada.

O mapa final (Figura 4.12) foi elaborado em sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000, projeção UTM Zona 22S, utilizando dados do MapBioma (Coleção 8, 2022), RUSLE e Naturatins. Os parâmetros da equação foram definidos considerando as características médias dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, predominantes na área de estudo, para os quais foi adotado o valor médio de  $K = 0,03 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , conforme EMBRAPA (2025). O produto resultante representa a base de análise espacial dos resultados para a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA.

Figure 4.12 – Distribuição espacial da perda de solo estimada pela RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, integrada ao mapa de uso e cobertura do solo.



Fonte: A autora.

## 4.5 Discussão

A mineralogia do solo exerce papel determinante na pedogênese, morfogênese e no comportamento físico-hídrico dos PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários. A análise por difração de raios X revelou a predominância de minerais como caulinita, gibbsita, goethita, quartzo, hematita, rutilo, ilmenita e feldspato, mineralogia típica de solos altamente intemperizados e submetidos a flutuações hídricas, característica fundamental para a gênese de horizontes concrecionários. Essa composição confirma a atuação de processos de ferralização, dessilificação e formação de plintita, tal como descrito por Kämpf e Curi (2012a; 2012b) e por Resende *et al.* (2014).

Segundo Jenny (1994), a mineralogia do solo reflete processos de intemperismo e alterações químicas ao longo do tempo, onde minerais como caulinita se formam a partir da alteração de feldspatos e minerais ferromagnesianos, contribuindo para a formação do solo. A presença de gibbsita e goethita, minerais contendo ferro, está associada a processos de laterização e ferralização, que promovem a formação de solos mais resistentes e com maior teor de material residual de origem mineral (Kaiser *et al.*, [2010]). Esses minerais, por sua vez, influenciam a coloração, a estabilidade estrutural e a porosidade do solo, fatores essenciais na morfogênese e na sua capacidade de suporte às atividades biológicas e agrícolas.

Além disso, Sposito (2008) destaca que minerais 1:1, como a caulinita, apresentam baixa expansibilidade e conferem elevada estabilidade estrutural, enquanto os óxidos de Fe e Al — principalmente gibbsita, goethita e hematita — atuam como agentes cimentantes. Assim, os resultados mineralógicos reforçam o potencial para formação de plintitas e concreções ferruginosas, elementos diagnósticos essenciais em PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários (SiBCS, Santos *et al.*, 2018).

O quartzo, um mineral primário encontrado em quantidades significativas, desempenha um papel importante na estrutura do solo devido à sua alta resistência mecânica. Segundo Sposito (2008), minerais desse tipo contribuem para a estabilidade da estrutura do solo, assim como os minerais constituídos de ferro. Jenny (1994), destaca que o quartzo, por ser resistente ao intemperismo, tende a permanecer no solo por longos períodos, contribuindo para a formação de uma matriz sólida que influencia suas propriedades.

A influência dos minerais encontrados na análise por DRX na morfogênese do solo é corroborada por trabalhos como Durham, Hopkins e Weindorf (2015), que relacionam a mineralogia à formação de horizontes e à evolução do perfil pedológico. A formação de concreções e plintitas, por exemplo, está intimamente ligada à mineralogia ferruginosa, que promove processos de cimentação e compactação, dificultando a penetração de raízes e a infiltração de água (Kämpf; Curi, 2012a). Assim, a composição mineralógica observada nas amostras do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário reforça a ideia de que processos pedogenéticos de ferralização e concrecionamento são influenciados por minerais de óxido de ferro e filossilicatos, moldando a morfologia do solo (Teixeira *et al.*, 2017).

Os altos teores de ferro Fe e alumínio Al identificados por meio da FRX indicam a presença de agregados mais estáveis no PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário, geralmente mais resistentes à desagregação mecânica e à entrada de água, conforme também reportado por Resende *et al.* (2014). Essa estabilidade é característica de solos fortemente influenciados por processos de laterização, nos quais a concentração de oxihidróxidos de ferro e alumínio promove a cimentação parcial dos constituintes do solo, dificultando processos como infiltração e intemperismo físico (Kämpf; Curi, 2012b).

A tendência de redução dos teores de silício (Si) com o aumento da profundidade, ao contrário do que se observa em solos menos intemperizados, é compatível com o comportamento típico dos PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários, solos altamente intemperizados e submetidos à alternância de hidromorfismo. Em ambientes com saturação intermitente, como descrito por Rodrigues *et al.* (2018), ocorre lixiviação seletiva da sílica, enquanto os óxidos de Fe e Al tendem a se concentrar e precipitar nas porções subsuperficiais do perfil. Assim, a redução de Si não indica baixo intemperismo, mas sim intenso processo de dessilificação, característico de solos tropicais avançados. Neste estudo, essa interpretação é reforçada pelo aumento progressivo de Fe em profundidade, o que evidencia o avanço de processos de ferralização e concrecionamento nas camadas subsuperficiais.

A maior concentração de Fe em profundidade não invalida a ocorrência de ferralização superficial — pois esta depende da remoção de sílica e não do teor absoluto de Fe. Assim, mesmo com maior Fe total nas camadas subsuperficiais, os

horizontes A e AC podem apresentar maior grau de dessilificação relativa, explicando a coloração mais escura e o aparecimento de nódulos ferruginosos.

No horizonte A (0 — 10 cm), foram observados nódulos ferruginosos esparsos, associados a acúmulo de matéria orgânica promovido pelo uso do sistema de plantio direto sobre palhada. Tais feições morfológicas e químicas são indicativas de estabilidade estrutural e de atividade biológica nas camadas mais superficiais do solo, o que está de acordo com os critérios morfogenéticos descritos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Santos *et al.*, 2018) e reforçado por Melo *et al.* (2021), que destacam o papel do SPD na melhoria das condições físicas e biológicas dos horizontes superficiais em solos tropicais (Silva *et al.*, 2021; Bartz *et al.*, 2025).

O horizonte AC (10 — 20 cm), representa uma zona de transição entre os horizontes superficiais mais desenvolvidos e o material de origem menos alterado. Neste horizonte, observa-se uma coloração ainda escura, relativa agregação estrutural e aumento nos teores de Fe e Al, em paralelo à diminuição do Si. Segundo Kämpf e Curi (2012b), essa configuração é típica de ambientes com mobilidade incipiente de materiais, onde já ocorrem transformações pedogenéticas, mas ainda insuficientes para configurar um horizonte B diagnóstico. Assim, sua classificação como horizonte AC é justificada, conforme estabelecido pelo SiBCS (Santos *et al.*, 2018).

Por fim, o horizonte Cx (20 — 40 cm) é caracterizado por feições que indicam forte cimentação por óxidos de ferro, como a estrutura em placas, elevada resistência à escavação e coloração marrom-avermelhada intensa (5YR 5/6). Esse horizonte evidencia a presença de material endurecido — condição típica dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários. De acordo com Schwertmann e Taylor (1989), a formação de concreções e crostas ferruginosas está associada à alternância de períodos secos e úmidos, comum em ambientes de cerrado. A presença do horizonte Cx representa uma barreira física que interrompe verticalmente os processos de evolução pedogenética, dificultando o crescimento radicular, a percolação de água e a evolução para horizontes mais desenvolvidos. Tais características cumprem os requisitos diagnósticos para PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, nos quais a presença de camada contínua ou quase contínua de material cimentado define a classe diagnóstica (Santos *et al.*, 2018, conforme SiBCS 2018).

Em relação a porosidade total o valor de ( $0,52 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), está de acordo com as literaturas de referência. Para Reichardt e Timm (2016), a porosidade total em solos dessa natureza costuma variar entre 0,45 e  $0,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , o que indica uma boa estrutura física, especialmente quando há equilíbrio entre os diferentes tamanhos de poros. Segundo Dexter (2004), valores adequados de porosidade garantem condições favoráveis ao desenvolvimento das raízes, contribuindo para a produtividade das culturas.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram os achados da literatura, indicando que, embora os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários apresentem limitações como reduzida profundidade efetiva e drenagem deficiente, o manejo adequado pode viabilizar o uso agrícola. Medidas de conservação e práticas sustentáveis contribuem para a manutenção da estrutura física do solo e favorecem o crescimento das plantas (Carvalho *et al.*, 2006; Benício *et al.*, 2021).

A predominância de microporos (59,50%) observada na análise da distribuição do tamanho dos poros é coerente com as características típicas de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, especialmente aqueles com textura argilosa e enriquecidos com óxidos de ferro e alumínio. Essa elevada proporção de microporos está associada à presença desses óxidos, que promovem forte agregação das partículas do solo, favorecendo a formação de estruturas compactas e estáveis. Estudos demonstram que os óxidos de Fe e Al atuam como agentes cimentantes naturais, contribuindo para a estabilidade de agregados e, conseqüentemente, para uma maior proporção de microporos (Alleoni; Camargo, 1995; Vendrame *et al.*, 2011).

Ressalta-se, ainda, que esse comportamento está completamente coerente com a mineralogia identificada por DRX. Além disso, Tomasella e Hodnett (2004) destacam que, em solos tropicais intemperizados, como os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, a estrutura e o regime de porosidade são fortemente influenciados pela mineralogia da fração argila. Tais evidências reforçam a adequação dos resultados observados neste estudo ao comportamento físico-hídrico esperado para solos com essas características no Cerrado. Evidencia-se que um excesso desses poros pode prejudicar a aeração do solo, comprometendo o desenvolvimento radicular e a atividade microbiana (Reichardt; Timm, 2016).

Em sistemas sob plantio direto, os volumes de poros por classe de tamanho desempenham papel essencial para compreender a funcionalidade do solo quanto ao armazenamento e à movimentação de água e ar. No presente estudo, observou-se

que os macroporos (30,4%) estão presentes em proporção compatível com a faixa considerada adequada para solos do Cerrado, favorecendo a drenagem e a aeração (Ferreira; Andrade; Silva, 2019). Os mesoporos (10,2%) se situam em uma faixa geralmente associada à retenção de água disponível para as plantas (Dexter, 2004), o que explica a capacidade de campo de  $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  — valor característico de solos argilosos estruturados (Reichardt; Timm, 2016). Já os microporos apresentam maior predominância, o que está em consonância com a natureza de solos tropicais argilosos, especialmente os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, cuja mineralogia rica em óxidos de ferro e alumínio favorece maior agregação e formação de poros menores. Esses resultados indicam uma boa capacidade de retenção hídrica e um comportamento físico compatível com o tipo pedológico e o uso atual do solo (Ferreira; Andrade; Silva, 2019).

A densidade do solo observada ( $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ ) nas camadas superficiais, está dentro dos limites esperados para PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários em ambientes tropicais e pode ser considerada adequada do ponto de vista da estrutura física do solo. Este valor sugere uma condição física que favorece o crescimento radicular, a infiltração de água e a atividade biológica.

Estudos anteriores corroboram esse achado, Figueredo Benício *et al.* (2021), ao avaliarem um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Háptico sob diferentes usos no Tocantins, observaram densidades variando de  $1,40$  a  $1,60 \text{ g cm}^{-3}$  nas camadas mais superficiais, especialmente sob plantio direto. Tais valores, embora mais elevados que o registrado nesse estudo, ainda se mantêm dentro de uma faixa considerada não limitante para o desenvolvimento de culturas agrícolas. Por sua vez, Oliveira *et al.* (2022) analisaram PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários na Amazônia ocidental e encontraram densidades entre  $1,20$  e  $1,30 \text{ g cm}^{-3}$ , tanto em áreas de floresta nativa quanto em sistemas agroflorestais, confirmando que solos com teores argilosos elevados podem manter estrutura estável mesmo sob diferentes usos.

Outro exemplo relevante é o trabalho de Santos *et al.* (2014), que verificaram densidades superiores a  $1,35 \text{ g cm}^{-3}$  em PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários sob manejo conservacionista, indicando maior compactação, embora sem ultrapassar os limites críticos de restrição radicular.

A baixa densidade do solo também é influenciada pela manutenção da palhada no SPD, contribuindo com maior aporte de material orgânico na camada mais superficial, reduzindo a densidade do solo por (Ferreira; Andrade; Silva, 2019).

A umidade na capacidade de campo situa-se dentro do intervalo considerado ideal para solos com boa capacidade retenção de água, (Reichardt; Timm, 2016). A CC é um parâmetro crucial para o manejo racional da irrigação, pois indica a quantidade máxima de água que o solo pode reter após a drenagem gravitacional, garantindo disponibilidade hídrica para as plantas em períodos secos (Kiehl, 1979).

Quanto a umidade na saturação, o PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário possui uma boa capacidade de armazenamento de água quando o solo se encontra completamente saturado, Segundo Ferreira, Andrade e Silva (2019), solos com estrutura adequada apresentam umidades de saturação entre 0,40 e 0,50 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Contudo, níveis elevados de saturação podem comprometer a aeração do solo, especialmente em ambientes com má drenagem, em função de grandes quantidades de microporos (Dexter, 2004).

A análise da curva de retenção e da distribuição porosa do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário em estudo, revela um solo marcadamente condicionado pela predominância de microporos, em relação a porosidade total, os quais representam (59,50%) da porosidade (Hillel, 2003; Libardi, 2005). A curva de distribuição porosa evidencia que aproximadamente 16% da porosidade está concentrada abaixo de 0,2 µm, o que confere coerência parcial com o valor obtido para a umidade residual, estimada em 0,158 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. Esse valor, entretanto, encontra-se inferior aos intervalos reportados na literatura para solos com alta proporção de microporos, como os apresentados por Leite *et al.* (2024) e Reatto *et al.* (2008), com valores de 0,30 e 0,35 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, respectivamente. Essa diferença pode ser atribuída à presença de macroporos estruturais sob SPD, que reduzem a água fortemente retida.

Os mesoporos, representando 10,2% da porosidade total, se expressa na declividade da curva entre 30 e 100 µm, indicando que essa faixa é a principal responsável pela redistribuição da água. Esse resultado corrobora com a capacidade de campo observada (0,28 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), valor compatível com os limites superiores para solos argilosos ou com textura média fina, como os descritos por Reichardt e Timm (2012). Os mesoporos presentes no solo em estudo não apenas são eficientes no armazenamento de água, mas também adequados em proporção para manter o

equilíbrio entre retenção e disponibilidade hídrica — um fator essencial em áreas com sistema de plantio direto (Dexter, 2004).

A participação dos macroporos ( $> 100 \mu\text{m}$ ), representando 30,4% da porosidade total no PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário estudado, contribui diretamente para a melhoria da infiltração de água, aeração e eficiência da drenagem do solo. Essa proporção é especialmente relevante em PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, que apresentam naturalmente limitações de drenagem devido à sua condição hidromórfica. No contexto do sistema plantio direto, a presença expressiva de macroporos indica uma boa condição estrutural, favorecendo o desenvolvimento radicular, a atividade microbiológica e a sustentabilidade física do solo ao longo do tempo (Dexter, 2004; Tormena *et al.*, 2002).

O parâmetro ( $\alpha$ ) do modelo de van Genuchten (1980) com valor de  $1,64 \text{ cm}^{-1}$  reflete o momento em que a água começa a ser drenada em potenciais relativamente baixos, embora de forma gradual, devido à estrutura predominantemente microporosa. Essa resposta está em conformidade com o comportamento físico de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, que tendem a apresentar alta retenção hídrica inicial seguida de perda abrupta de água em tensões baixas, como discutido por Silva *et al.* (2014).

A aplicação da RUSLE na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, possibilitou compreender a distribuição espacial da suscetibilidade à erosão hídrica em função das condições edafoclimáticas, topográficas e do uso e cobertura do solo. De modo geral, observou-se predomínio das classes de perda de solo muito baixa a moderada, o que reflete a prevalência de relevo plano a suavemente ondulado, associado à presença significativa de áreas com vegetação natural e sistemas agrícolas sob manejo conservacionista.

O fator de erosividade da chuva ( $R$ ) ( $3.864,85 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ), calculado a partir de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), obtidos na estação meteorológica de Palmas (TO), utilizando o modelo empírico ajustado para o estado do Tocantins proposto por Avanzi *et al.* (2019). Esse valor encontra-se dentro do intervalo descrito para o bioma Cerrado, particularmente nas regiões centro-norte, caracterizadas por precipitações médias anuais entre 1.300 e 1.500 mm e elevada concentração das chuvas durante o período úmido. Trabalhos anteriores, como os de Oliveira *et al.* (2012) e Mello *et al.* (2021), registram valores de  $R$  variando entre 3.000

e  $6.000 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  para condições pluviométricas semelhantes, confirmando a adequação do modelo aplicado.

O fator de erodibilidade do solo (K), adotado ( $0,03 \text{ t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ ), foi definido com base nas propriedades dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, que predominam na área de estudo, conforme EMBRAPA Solos (2025). O valor situa-se dentro da faixa de 0,009 a 0,035 estabelecida para solos do Cerrado, apresentando textura média a arenosa e baixa coesão estrutural. A adoção de um valor médio fixo é justificada pela homogeneidade pedológica regional e pelo caráter representativo dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, embora a presença de LATOSSOLO e NEOSSOLO em áreas pontuais possa introduzir variações locais na erodibilidade, sem comprometer a coerência geral do modelo.

O fator topográfico (LS), calculado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), variou entre 0,065 e 69,45, refletindo a heterogeneidade do relevo. As áreas planas e suavemente onduladas apresentaram baixos valores de LS, indicando baixo potencial de contribuição topográfica à erosão, enquanto os valores mais elevados se concentraram em encostas e cabeceiras de drenagem, correspondendo a zonas de maior risco erosivo. Esse comportamento confirma o papel determinante do relevo no controle da erosão, como apontado por Panachuki *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2019).

O fator de cobertura e manejo do solo (C), obtido a partir do mapa de uso e cobertura do solo do MapBioma (Coleção 8, 2022), apresentou variação entre 0 e 0,5, com média de 0,10. As menores perdas de solo ocorreram em áreas de vegetação natural e florestal ( $C \leq 0,02$ ), enquanto valores mais altos foram observados em áreas agrícolas sob manejo convencional e em pastagens degradadas ( $C \geq 0,20$ ). Esses resultados confirmam as observações de Donzelli *et al.* (2019) e Merten e Minella (2002), que evidenciam o papel fundamental da cobertura vegetal na proteção do solo contra o impacto das chuvas e na redução do escoamento superficial.

O fator de práticas conservacionistas (P) variou entre 0,2 e 1,0, definido em função das classes de declividade derivadas do MDE, conforme metodologia adaptada de Merten e Minella (2002) e Panachuki *et al.* (2011). As menores declividades (0–8%) foram associadas a valores de P reduzidos, refletindo maior eficiência das práticas conservacionistas, enquanto áreas com relevo mais acidentado (declividades >20%) apresentaram valores próximos de 1,0, indicando baixa eficiência no controle do escoamento e maior suscetibilidade à erosão. Essa parametrização está de acordo com Silva *et al.* (2019), que destacam que à medida que a declividade

aumenta, a eficiência das práticas conservacionistas tende a diminuir, resultando em valores mais elevados de P e maior suscetibilidade à erosão.

A análise integrada dos fatores demonstra que a perda potencial de solo na microrregião de Porto Nacional é fortemente condicionada pelo uso e cobertura do solo e pelo relevo. As áreas de vegetação natural apresentaram baixas taxas de perda, enquanto as áreas agrícolas e de pastagens degradadas concentraram os maiores valores, especialmente nas porções central e sudeste da microrregião, onde predominam relevos ondulados a forte ondulados, caracterizados por maiores declividades e variação altimétrica, que favorecem o aumento da suscetibilidade à erosão. Os resultados obtidos são consistentes com estudos similares realizados no Cerrado, como os de Avanzi *et al.* (2019) e Lima *et al.* (2020), que identificaram perdas médias anuais entre 2 e 10 t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup> em áreas de uso agropecuário.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram a consistência e a aplicabilidade da RUSLE como ferramenta de diagnóstico da vulnerabilidade erosiva regional. A integração de dados empíricos regionais para os fatores R e K assegurou valores compatíveis com as condições climáticas e pedológicas do Cerrado tocantinense. A metodologia adotada permitiu quantificar e espacializar a perda de solo, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento do uso sustentável da terra, o zoneamento agroambiental e a gestão de práticas conservacionistas voltadas à mitigação dos processos erosivos.

#### 4.6 Conclusão

A caracterização físico-hidráulica do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário localizado na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA evidenciou a complexa interação entre mineralogia, estrutura porosa e processos hidrológicos, elementos que influenciam diretamente a retenção de água, a infiltração e a suscetibilidade à erosão laminar. A baixa densidade do solo observada foi coerente com a elevada porosidade total, enquanto a predominância de microporos — comprovada pela análise granulométrica e pela curva de retenção — indica um solo com alta capacidade de retenção hídrica, porém com drenagem mais lenta, típica de ambientes onde processos de concrecionamento atuam intensamente.

Embora este estudo não tenha realizado comparação direta entre diferentes usos da terra, os resultados obtidos sob sistema plantio direto sugerem que práticas

conservacionistas favorecem a infiltração e a retenção hídrica, apoiando parcialmente a hipótese de que manejos sustentáveis podem contribuir para a recarga de aquíferos rasos em áreas com PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários.

A caracterização mineralógica por DRX e FRX confirmou a predominância de minerais de baixa atividade, como caulinita e gibbsita, além de goethita e hematita, que favorecem a formação de horizontes plínticos e petroplínticos. Esses horizontes atuam como barreiras à percolação vertical, aumentando o escoamento lateral e a concentração de água nas camadas superficiais. Essa condição, ao mesmo tempo que regula a dinâmica hídrica local, também aumenta a vulnerabilidade do solo a processos erosivos, especialmente quando manejado sem cobertura vegetal adequada. A presença de elevados teores de ferro e alumínio reforça a baixa fertilidade natural e a alta susceptibilidade à degradação física, particularmente sob sistemas agrícolas intensivos.

Os resultados obtidos com a aplicação da RUSLE indicaram que a microrregião de Porto Nacional apresenta, de forma geral, baixa a moderada suscetibilidade à erosão hídrica, reflexo da predominância de relevos planos a suavemente ondulados, da presença de vegetação natural e da adoção parcial de práticas conservacionistas. Entretanto, foram identificados focos críticos de erosão, principalmente em áreas de pastagens degradadas e agricultura convencional, localizadas nas porções central e sudeste da microrregião, onde o relevo se torna mais inclinado. Esse padrão confirma a hipótese de que a conversão de áreas nativas em uso agropecuário sem técnicas adequadas de manejo aumenta significativamente as taxas de erosão.

Apesar de a maior parte da área apresentar baixa perda potencial de solo, o avanço da fronteira agrícola no MATOPIBA demanda monitoramento contínuo, uma vez que o uso intensivo sem conservação do solo pode intensificar rapidamente a degradação, afetando a estabilidade física, a produtividade agrícola e os serviços ecossistêmicos.

A análise integrada realizada neste estudo confirmou que a compreensão aprofundada das propriedades físico-hidráulicas e mineralógicas do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário é essencial para orientar práticas de manejo que mitiguem a degradação e preservem os serviços ecossistêmicos associados ao solo e à água. Essa compreensão é especialmente relevante em uma região estratégica como o

MATOPIBA, marcada por rápida expansão agrícola e forte pressão sobre os recursos naturais.

A hipótese de que pastagens degradadas poderiam aumentar a contribuição hídrica subterrânea, modificando o regime de drenagem da bacia, foi apenas parcialmente confirmada. Embora se tenham observado alterações na dinâmica de infiltração e na distribuição dos poros, não foi possível demonstrar aumento efetivo da vazão de base, devido às limitações metodológicas e à ausência de monitoramento hidrológico contínuo.

Este estudo constitui uma contribuição relevante para o avanço da ciência do solo e do manejo ambiental na região, ao integrar análises morfológicas, mineralógicas e físico-hidráulicas em um tipo de solo ainda pouco estudado no MATOPIBA. Os resultados permitem compreender como a mineralogia, a estrutura porosa e os horizontes plúnticos influenciam diretamente o comportamento hídrico e a resistência à erosão, fornecendo base científica para políticas de uso sustentável da terra.

Apesar dos avanços, algumas limitações devem ser reconhecidas. O número reduzido de parcelas experimentais, a ausência de medições diretas da vazão de base, e a utilização de dados meteorológicos de resolução limitada podem restringir a extrapolação dos resultados. Assim, recomenda-se a realização de estudos futuros com maior densidade amostral, monitoramento contínuo da umidade e fluxo subterrâneo, investigação da influência da matéria orgânica e da biota do solo, além do desenvolvimento de modelos preditivos que integrem mineralogia, morfologia e estrutura física.

Esses avanços são essenciais para garantir a sustentabilidade dos sistemas produtivos e a conservação dos serviços ecossistêmicos em uma das regiões agrícolas mais dinâmicas e sensíveis do Brasil.

## Referências

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Influência dos óxidos de ferro na agregação de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 1, p. 101–106, 1995.

AMERICAN MINERALOGIST CRYSTAL STRUCTURE DATABASE (AMCSD). Disponível em: <https://rruff.info/>. Acesso em: 19 maio 2025.

AVANZI, J. C. *et al.* (2019). Modeling of the Rainfall and R-Factor for Tocantins State, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.l.], v. 43, p. e0190047, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbcS20190047. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832019000100524&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832019000100524&tlng=en). Acesso em: 21 dez. 2025.

BARTZ, M. L. C. *et al.* No-Tillage System: A genuine Brazilian technology that meets current global demands. **Advances in Agronomy**, v. 178, p. 1–35, 2025. Disponível em: <https://plantiodireto.org.br/spd-praticado-no-brasil-e-destaque-em-conceituada-revista-cientifica-internacional>. Acesso em: 10 ago. 2025.

BATEY, T.; MCKENZIE, D. C. Soil compaction: identification directly in the field. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 22, n. 2, p. 123–131, 2006. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=927501>. Acesso em: 21 jul. 2025.

BENÍCIO, L. P. F.; NASCIMENTO, D. S.; MELO, J. P. P. de. Densidade e porosidade de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Háplico submetido a diferentes tipos de uso. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas, v. 7, e021002, 2021. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/download/4589/2597/>. Acesso em: 31 jul. 2025.

BEUTLER, A. N. *et al.* Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular do feijoeiro em função da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 617-622, 2003.

BOTELHO, E. L. *et al.* Cor do solo e sua relação com os óxidos de ferro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 512-517, 2006.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005. DOI: 10.1016/j.geoderma.2004.03.005.

BRYAN, R. B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 32, n. 3–4, p. 385–415, 2000.

CARVALHO, A. P. de *et al.* PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários. In: EMBRAPA. **Classificação de Solos Tropicais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. Disponível em: Portal Embrapa – PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais>. Acesso em: 31 jul. 2025.

CASTRO, S. S. de; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 240 p. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002958248>. Acesso em: 21 jul. 2025.

CEPF. **Cerrado Biodiversity Hotspot** – Annual Portfolio Overview 2020. Washington D.C.: CEPF, 2020.

CERDÀ, A. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on run-off and erosion. **Journal of Arid Environments**, v. 36, p. 37–51, 1997.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHMIDT, F. A. Erosão hídrica no Brasil: impacto de usos e manejos. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 60-67, 2003.

CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, R. A. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas de uso florestais, em condições de relevo plano a suave ondulado.

**Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 327-336, 2009. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/floresta/>. Acesso em: 19 maio 2025.

DANE, J. H.; TOPP, G. C. (org.). **Methods of soil analysis**: Part 4: Physical methods. Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, 2002. 1692 p. ISBN 0-89118-841-X. (Soil Science Society of America Book Series, v. 5).

DAVID, W. P. Soil and Water Conservation Planning: Policy Issues and Recommendations. **Journal of Philippine Development**, v. 15, p. 47–84, 1988.

Disponível em: <https://pidswebs.pids.gov.ph/CDN/PUBLICATIONS/pidsjpd88-1conserve.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

DEMATTE, J. A. M. *et al.* Color of tropical soils as an indicator of their properties: a multivariate analysis. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 1-9, 2011.

DEMEK, J.; DALLAGNOL, C. **Determinação do fator C da EUPS para diferentes culturas no ecótono Cerrado Amazônia**. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1138956/>. Acesso em: 19 maio 2025.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s.l.], v. 51, n. 5, p. 427–433, set. 1996. DOI:

10.1080/00224561.1996.12457102. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00224561.1996.12457102>. Acesso em: 21 dez. 2025.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004. DOI 10.1016/j.geoderma.2003.09.004. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706103002891>. Acesso em: 18 jul. 2025.

DONZELLI, J. L. *et al.* **Estimativa do fator C da RUSLE para diferentes usos do solo no bioma Cerrado**. [S.l.]: [s.n.], 2019.

DURHAM, A.; HOPKINS, M.; WEINDORF, D. C. The evolution of soil mineralogy. **Soil Horizons**, v. 56, n. 5, p. 1–11, 2015. Disponível em:

<https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sh15-03-0009>. Acesso em: 21 jul. 2025.

EMBRAPA CERRADOS. **Solos do Bioma Cerrado**: características, propriedades e manejo sustentável. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2018.

EMBRAPA CERRADOS. **Variação espaço-temporal do fator C no bioma Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2023.

EMBRAPA SOLOS. **Comunicado Técnico 87/2025** – Fator C em áreas de manejo conservacionista no Planalto Central. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2025.

EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. **Zoneamento agroecológico do Estado de Goiás**: incluindo o Distrito Federal: escala 1:1.000.000. 2. ed. rev. e ampl. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2001. 88 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 28).

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997.

FERREIRA, M. M.; ANDRADE, R. S.; SILVA, A. P. Atributos físicos do solo e crescimento de raízes. *In*: ALVAREZ, V. H. *et al.* (org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. v. 10, p. 259-300.

FIGUEREDO BENÍCIO, L. P. *et al.* Densidade e porosidade de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Háplico submetido a diferentes tipos de uso. **Agri-Environmental Sciences**, v. 7, n. 1, p. 10, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.36725/agries.v7i1.4589>. Acesso em: 10 ago. 2025.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B. *et al.* Estimation of the van Genuchten Soil Water Retention Properties from Soil Textural Data. **Pedosphere**, v. 20, n. 4, p. 456–465, 2010. Disponível em: [https://www.pc-progress.com/Documents/RVGenugten/2010\\_Ghanbarian\\_Water\\_retention\\_PS.pdf](https://www.pc-progress.com/Documents/RVGenugten/2010_Ghanbarian_Water_retention_PS.pdf). Acesso em: 29 jul. 2025.

GRUPO SOBERANO AGRONEGÓCIOS LTDA. Votuporanga, SP: Grupo Soberano Agronegócios Ltda, 2024. Disponível em: <https://gruposoberana.com/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 2003. 494 p.

HUDSON, N. W. **Soil Conservation**. Ithaca: Cornell University Press, 1981. 320 p.

IBGE. **Banco de Dados e Informações Ambientais (BDiA)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023b. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IBGE. **Relatório PronaSolos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023c. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html>. Acesso em: 16 jul. 2025.

IPAM. **Cerrado – Biome profile**. Brasília: IPAM, 2023.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: a system of quantitative pedology. 2. ed. New York: Dover Publications, 1994.

KAISER, K. *et al.* **Iron oxides and soil development in tropical environments**. [S. l.: s. n.], [2010].

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). *In*: KER, J. C. *et al.* (org.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: SBCS, 2012b. p. 207-254.

KÄMPF, N.; CURI, N. Mineralogy and pedogenic processes in ferruginous soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 191, p. 1-12, 2012a.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KISHI, R. T. **Estimativa de perda de solo pelo método de RUSLE/USLE**. Curitiba: UFPR, 2025. Disponível em: <https://www.ufpr.br/>. Acesso em: 19 maio 2025.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, nov./dez. 2002. DOI: 10.1590/S0103-84782002000600006.

KUMARI, N.; MOHAN, C. Basics of clay minerals and their characteristic properties. *In*: MORARI DO NASCIMENTO, G. (org.). **Clay and clay minerals**. [S. l.]: IntechOpen, 2021. DOI 10.5772/intechopen.97672. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/76780>. Acesso em: 18 jul. 2025.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001.

LEITE, O. da C. *et al.* Mapeamento dos solos plínticos e latossolos no estado do Tocantins e seus potenciais agricultáveis. **Sítio Novo**, Palmas, v. 8, n. 1, p. 34-43, jan.-mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.47236/2594-7036.2024.v8.i1.34-43p>. Disponível em: <https://sitionovo.iftto.edu.br/index.php/sitionovo/article/view/1394>. Acesso em: 21 jul. 2025.

LENSE, G. H. E. *et al.* Assessment of Soil loss Tolerance limit to Latosol, Argisol and Cambisol in the southern Minas Gerais state. **Caderno de Ciências Agrárias**, Available in: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2019.15893>. Accessed: 19 nov. 2022.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. 2. ed. rev. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 312 p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. T. **Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico, 1975. 12 p. (Boletim Técnico, n. 28).

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). **Bragantia**, v. 51, n. 2, p. 189-196, 1992. DOI: 10.1590/S0006-87051992000200009. Disponível em:

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87051992000200009&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051992000200009&lng=pt&tlng=pt). Acesso em: 21 dez. 2025.

MAPBIOMAS. **Uso e cobertura da terra no Brasil (1985–2022)**. São Paulo: MapBiomass, 2023. (Coleção 8).

MARQUES, J. J. *et al.* Mineralogia de solos tropicais e sua relação com a erodibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 8, p. 603-610, 2018.

MELO, L. C. A. *et al.* Sistemas conservacionistas e estabilidade de agregados em solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 45, e0210015, 2021.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Modelagem da erosão hídrica em bacias hidrográficas utilizando a RUSLE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 653-664, 2002.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; CICERI, D. Flutuações nas taxas de erosão e produção de sedimentos: uma revisão dos processos e métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, e0150153, 2016.

MOREIRA, H. L.; OLIVEIRA, V. A. Evolução e gênese de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário pétrico concrecionário êutrico argissólico no município de Ouro Verde de Goiás. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 28., 2001, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2001. CD-ROM.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. 304 p.

NUNES, J. G. *et al.* Tolerância de perda de solo por erosão na região sul do Amazonas. **Ambiência**, v. 17, n. 3, 2024. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/1536>. Acesso em: 30 jul. 2025.

OLIVEIRA, G. B. da S. *et al.* Densidade do solo por pedotransferência em diferentes classes de solo incluindo PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Argilúdo Distrófico plintossólico. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0002>. Acesso em: 10 ago. 2025.

OLIVEIRA, J. B. de *et al.* **Tolerância de perda de solo por erosão em diferentes ordens de solos do estado da Paraíba**. Campina Grande: Embrapa Semiárido, 2008. (Documentos, n. 216).

OLIVEIRA, P. T. S. *et al.* Spatial variability of the rainfall erosive potential in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 69–79, 2012. DOI: 10.1590/S0100-69162012000100008.

PANACHUKI, E. *et al.* Avaliação de fatores da RUSLE em diferentes condições de uso e manejo no Cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1010–1016, 2011.

PEVEAR, D. R. Illite and hydrocarbon exploration. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 96, n. 7, p. 3440–3446, 1999. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/96/7/3440>. Acesso em: 21 jul. 2025.

PIMENTEL, D. *et al.* Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, Washington, v. 267, n. 5201, p. 1117–1123, 1995. DOI 10.1126/science.267.5201.1117. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.267.5201.1117>. Acesso em: 18 jul. 2025.

PINTO, G. S. *et al.* Estimativa das perdas de solo por erosão hídrica utilizando a USLE em baciado Sul de Minas Gerais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 40, p. 1-19, 2020. [s. l.], v. 11, p. 1–6, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/15893>. Acesso em: 11 ago. 2025.

REATTO, A. *et al.* Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. **Comptes Rendus. Géoscience**, [s. l.], v. 340, n. 11, p. 741–748, nov. 2008. DOI: 10.1016/j.crte.2008.07.006. Disponível em: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/en/10.1016/j.crte.2008.07.006/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Água na agricultura**. 2. ed. Piracicaba: Nobel, 2016. 306 p.

REICHERT, J. M. *et al.* Classes de poros e sua relação com os processos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 601-612, 2009.

RENARD, K. G. *et al.* **Predicting soil erosion by water**: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington D.C.: USDA, 1997. (U.S. Department of Agriculture, Agriculture, Handbook n. 703). Disponível em: <https://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/717.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 6. ed. Lavras: UFLA, 2014.

REZENDE, A. S. *et al.* Mineralogy and geochemistry of ferruginous soils in Brazil. **Brazilian Journal of Soil Science**, Brasília, v. 35, n. 2, p. 123-134, 2011.

RODRIGUES, M. *et al.* Distribuição de elementos majoritários em horizontes de solos com plintita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170350, 2018.

SANTO, T. S. D.; SANTOS, D. M. A.; RAMOS, M. R. Produtividade da soja em latossolo vermelho e PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário pétrico concrecionário no Cerrado. **Revista Agri-Environmental Sciences**, Palmas, v. 10, e024006, 2024. DOI: 10.36725/agries.v10i1.9928. Disponível em: <https://revista.unitins.br/index.php/agri-environmental-sciences/article/view/9928>. Acesso em: 18 jul. 2025.

SANTOS, A. *et al.* **Solo exposto sem manejo no Cerrado**: impactos na erosão e conservação. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 20 maio 2025.

SANTOS, F. C. V. *et al.* Qualidade física de um PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Argilúvico sob diferentes sistemas de gestão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 37, n. 2, 2014. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/handle/ri/15152>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2025. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176834/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. *In*: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (ed.). **Minerals in soil environments**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SEKI, K. SWRC Fit: A nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 4, 407–437, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hessd-4-407-2007>. Acesso em: 10 jul. 2025.

SILVA, A. M. da *et al.* Estimativa do fator P da RUSLE para diferentes usos do solo no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 7, p. 2598-2612, 2019.

SILVA, A. M.; PRUSKI, F. F.; LIMA, D. C. Influência dos óxidos de ferro e alumínio na estabilidade estrutural dos solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 3, p. 591-601, 2009.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimation of the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 3, p. 877-883, 1997.

SILVA, C. R. *et al.* Rain erosivity in Brazil: a review. **Catena**, Amsterdam, v. 194, p. 104759, 2020.

SILVA, F. A. M.; SANTOS, R. D.; PEREIRA, L. M. Plantas de cobertura isoladas e em mix para a melhoria da qualidade do solo e das culturas comerciais no Cerrado.

**Revista de Solos e Desenvolvimento**, v. 20, n. 4, p. 1221–1235, 2021. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1136914/1/rsd-2021.pdf>

SILVA, J. R. C. Erosividade da chuva e perdas de solo no Cerrado. *In*: EMBRAPA. Erosão hídrica e conservação do solo. Brasília, DF: Embrapa Cerrados, 2024. p. 45-63. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 20 maio 2025.

SILVA, V. C. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 3, p. 147-159, 2004.

SIQUEIRA, G. M. *et al.* Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 67, n. 1, p. 215–223, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/K7QDfSqtMMPQMpxGBgmCYKd>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2. ed. Oxford: Oxford University Press, 2008. 344 p. ISBN 978-0198042785. Disponível em: [https://books.google.com/books/about/The\\_Chemistry\\_of\\_Soils.html?id=89dkysi6mis](https://books.google.com/books/about/The_Chemistry_of_Soils.html?id=89dkysi6mis). Acesso em: 21 jul. 2025.

STEIN, D. P. *et al.* Potencial de erosão laminar, natural e antrópica, na Bacia do Peixe Paranapanema. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 4., 1987, Marília, SP. **Anais [...]**. Marília, SP: ABGE/DAEE, 1987. p. 105-135.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 21 jul. 2025.

TEIXEIRA, R. *et al.* Application of X-ray diffraction in soil mineralogy studies. **Journal of Mineralogical and Petrological Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 245-259, 2017.

TOCANTINS. Secretaria do Planejamento e Orçamento, **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Tocantins**: Plano da Paisagem, Plano de Ação e Síntese Técnica. Palmas: SEPLAN, 2025. Disponível em: <https://www.to.gov.br/seplan/zoneamento-ecologico-economico-do-estado-do-tocantins/5n96nvzropdp>. Acesso em: 21 jul. 2025.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Pedotransfer functions for tropical soils. *In*: PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. (org.). **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2004. p. 359–380. DOI: 10.1016/S0166-2481(04)30021-8. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/251455080\\_Pedotransfer\\_functions\\_for\\_tropical\\_soils](https://www.researchgate.net/publication/251455080_Pedotransfer_functions_for_tropical_soils). Acesso em: 21 jul. 2025.

TORMENA, C. A. *et al.* Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 4, p. 795–801, out./dez. 2002. DOI: 10.1590/S0103-90162002000400026. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/ZxpYXqGgigrYJbKyg3cJNrv/?lang=pt>. Acesso em: 21 jul. 2025.

TORMENA, C. A. *et al.* Qualidade física do solo em sistemas de manejo avaliada por meio da S index. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 591-597, 2007.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acesso em: 9 maio 2025.

VENDRAME, P. R. S. *et al.* Mineralogia da fração argila e estrutura de solos cultivados sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 353–362, 2011.

VIDALETTI, V. F. *et al.* Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 17, e193101724562, 2021. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/24562>. Acesso em: 21 jul. 2025.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington D.C.: USDA, 1978. (U.S. Department of Agriculture, Agricultural, Handbook n. 537). Disponível em: [https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/60600505/RUSLE/AH\\_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf](https://www.ars.usda.gov/ARSTUserFiles/60600505/RUSLE/AH_537%20Predicting%20Rainfall%20Soil%20Losses.pdf). Acesso em: 20 maio 2025.

ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H.; DE MORAES, J. M. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. **Hydrological Processes**, v. 20, n. 18, p. 3941–3954, 2006. DOI: 10.1002/hyp.6162.

## **CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **5.1 Retomada dos objetivos e abordagem da pesquisa**

A presente tese teve como objetivo geral analisar, de forma multiescalar e integrada, os componentes físicos e dinâmicos da paisagem na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, com foco nos aspectos geomorfométricos, no uso e cobertura da terra e nos atributos físico-hidráulicos do solo, com ênfase especial no PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário. Os objetivos específicos incluíram: (1) caracterizar geomorfométrica e morfologicamente a região; (2) analisar a evolução e projeção da cobertura e uso da terra; e (3) investigar os atributos físico-hidráulicos do solo, especialmente em áreas de maior suscetibilidade à degradação.

A abordagem metodológica adotada permitiu o cruzamento de dados morfométricos, pedológicos e de uso da terra, fundamentando a construção de uma análise integrada do território com base em diferentes escalas espaciais e temporais. A microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA foi analisada desde sua estrutura morfológica até seus condicionantes edafoclimáticos, passando pela dinâmica ambiental, fortemente condicionada pela ocupação antrópica do solo.

### **5.2 Síntese integrada dos resultados por capítulo**

A análise geomorfométrica da microrregião evidenciou um relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, com declividades médias entre 3% e 8%. Essa configuração está associada a compartimentos morfológicos como planícies e tabuleiros dissecados, influenciados diretamente pela litologia regional, sobretudo pelas formações areníticas e argilo-arenosas da Formação Pimenteiras. As análises de hipsometria, declividade, curvatura e perfil topográfico permitiram identificar áreas mais propensas à concentração de fluxos e processos erosivos, especialmente nas transições entre vertentes convexas e côncavas. A delimitação das unidades fisiográficas demonstrou a influência direta do relevo e da geologia sobre a movimentação hídrica e a dinâmica do solo na paisagem.

A investigação histórica do uso e cobertura da terra entre 1985 e 2055 revelou uma transformação significativa da paisagem regional, com substituição progressiva das formações nativas por áreas agrícolas, notadamente destinadas à monocultura

da soja. Entre 1985 e 2022, observou-se um aumento expressivo da área antropizada, com destaque para o período entre 1995 e 2005, quando as lavouras de soja cresceram 6.702%. A modelagem preditiva indicou, para o período de 2015 a 2055, a possível perda de 5.069,74 km<sup>2</sup> de cobertura vegetal nativa — aproximadamente 35,82% da vegetação existente em 2015. Nesse cenário, a região do MATOPIBA é marcada por dinâmicas de ocupação e produção que têm intensificado o uso dos recursos naturais, em um contexto em que os instrumentos de controle ambiental e de ordenamento territorial ainda enfrentam desafios quanto à sua implementação e efetividade.

Na escala mais detalhada da pesquisa – Bacia Ribeirão Lajeado – a análise dos atributos físico-hidráulicos do PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário revelou a complexidade pedológica e hidrológica deste tipo de solo, cujas propriedades influenciaram de forma direta os processos de retenção de água, infiltração e suscetibilidade à erosão laminar na área de estudo. A expressiva presença de microporos, identificada por meio das análises da curva de retenção, conferiu elevada capacidade de retenção hídrica ao solo. Contudo, a disponibilidade efetiva de água para as plantas mostrou-se limitada — condição corroborada pelos parâmetros de retenção hídrica e pelo comportamento observado na curva de retenção característica do solo. A combinação desses fatores compromete a sustentabilidade de práticas agrícolas convencionais e exige planejamento diferenciado para o uso da terra.

### 5.2.1 Convergência de resultados

A convergência dos resultados obtidos ao longo dos capítulos desta pesquisa evidencia que a microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA se configura como uma área de expressivo interesse geoambiental. Sua complexa estrutura morfoestrutural, aliada à intensa dinâmica antrópica registrada nas últimas décadas, revela a urgência de abordagens integradas que contemple os aspectos geomorfológicos, pedológicos e de uso e cobertura da terra, permitindo compreender a dinâmica das interações entre os processos naturais e as ações humanas.

O substrato morfoestrutural da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA exerce forte controle sobre a compartimentação do relevo e a organização hidrográfica. Situada sobre terrenos sedimentares pertencentes à Formação Pimenteiras, de idade devoniana, caracterizados por arenitos consolidados, com

estabilidade estrutural relativa e baixa incidência de atividade tectônica, a área apresenta compartimentos geomorfológicos bem delimitados. Destacam-se as superfícies aplainadas, vinculadas ao Planalto Dissecado Tocantinense, e as depressões periféricas, resultantes da evolução pós-tectônica do embasamento cristalino, que exercem influência significativa na compartimentação do relevo e no arranjo da rede de drenagem. Essa configuração estrutural condiciona diretamente a morfogênese regional, afetando a distribuição dos solos, os padrões hidrográficos e os processos superficiais predominantes.

A configuração dendrítica (tronco formado pelo rio principal) da rede de drenagem da bacia Ribeirão Lajeado, combinada com a estabilidade litológica e estrutural dos arenitos da Formação Pimenteiras, reforça o amadurecimento topográfico da bacia, evidenciado também pela forma sigmoide a côncavo da curva hipsométrica. Tal padrão expressa a longa atuação dos processos de denudação sobre um substrato relativamente homogêneo, resultando em uma compartimentação geomorfológica equilibrada.

A bacia Ribeirão Lajeado, um recorte representativo dessa dinâmica, revela indicadores morfométricos que apontam para uma rede de drenagem ajustada ao substrato geológico e ao relevo. Com um índice de compacidade ( $K_c$ ) elevado e fator de forma ( $F_f$ ) baixo, a bacia apresenta tendência alongada, o que implica maior tempo de concentração das águas pluviais e, conseqüentemente, menor suscetibilidade a eventos de pico de cheias. O coeficiente de manutenção da drenagem ( $C_m$ ) e a densidade de drenagem ( $D_d$ ) indicam um sistema moderadamente eficiente, influenciado pelas características pedológicas e pela cobertura vegetal.

Do ponto de vista pedológico, predominam os PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, cujas propriedades refletem condições hidromórficas e variações no regime de umidade, evidenciadas pela presença de concreções ferruginosas em distintos estágios de endurecimento. Embora apresentem sinais de intemperismo químico, sobretudo nas frações argilosas, não atingem os níveis de intemperismo profundo típicos dos LATOSSOLO. A análise mineralógica desses solos revela predominância de caulinita, gibbsita, hematita e goethita, minerais que expressam um estágio de intemperismo intermediário e estão diretamente relacionados à dinâmica físico-hídrica. A caulinita e a gibbsita contribuem para a alta microporosidade e retenção hídrica, enquanto hematita e goethita participam da formação das

concreções ferruginosas que conferem baixa disponibilidade de água para as plantas e afetam a estrutura radicular.

A conjugação entre a geomorfometria suavemente dissecada, a estabilidade estrutural relativa conferida pelos arenitos consolidados da Formação Pimenteiras (Devoniano) e a ocorrência dominante de PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários constitui uma base de sustentação geomorfológica e hidrológica para a bacia. Essa configuração favorece uma infiltração superficial moderada e condiciona o escoamento lateral e superficial, em consonância com o padrão de drenagem dendrítica bem hierarquizado e com o grau de maturidade topográfica observado na área.

As análises físico-hidráulicas indicam solos com densidade média de 1,14 g/cm<sup>3</sup>, elevada microporosidade e relação a porosidade total, o que contribui com a capacidade de retenção hídrica do solo, embora com limitada disponibilidade efetiva de água para as plantas. Esses atributos favorecem o armazenamento hídrico em profundidade, embora possam impor limitações ao desenvolvimento radicular e à produtividade em sistemas agrícolas convencionais, essas restrições podem ser atenuadas por meio de práticas de manejo adequadas, que favoreçam a estrutura do solo e ampliem sua capacidade de suporte frente a usos mais intensivos.

Do ponto de vista temporal, a dinâmica de uso e cobertura da terra entre 1985 e 2015 demonstra uma profunda alteração na paisagem. A vegetação nativa, que originalmente cobria mais de 80% da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, foi progressivamente substituída por pastagens plantadas e lavouras temporárias, com destaque para a soja, cuja expansão ganhou ritmo mais acentuado a partir da década de 2005. A fragmentação da cobertura vegetal nativa está diretamente associada à implantação de infraestruturas, como a BR-153, e à adoção de políticas públicas voltadas à expansão agropecuária na região central do Brasil. Esses fatores atuaram de forma sinérgica, contribuindo para a supressão dos remanescentes naturais e acelerando o processo de ocupação territorial. Em 2015, estimativas indicam que mais de 45% da superfície da microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA já se encontrava antropizada, com previsões de superação da marca de 50% até 2055, caso o ritmo de conversão se mantenha constante.

Essa conversão da paisagem tem implicações significativas sobre os processos erosivos e a funcionalidade dos solos. Na microrregião de Porto Nacional/MATOPIBA, a aplicação da Equação Universal de Perda de Solo Revisada

(RUSLE) evidenciou predominância de classes de perda de solo de muito baixa a moderada, em consonância com o relevo plano a suavemente ondulado e com a presença expressiva de áreas de vegetação natural e sistemas agrícolas sob manejo conservacionista. As taxas de perda de solo sob pastagens e cultivos mecanizados concentraram-se nas porções central e sudeste, associadas a relevos ondulados a forte ondulados, e situaram-se, de modo geral, dentro de faixas anuais de 2 a 10  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , compatíveis com condições agropecuárias em áreas do Cerrado.

Esse comportamento contrasta com estimativas extremas previamente adotadas, exigindo sua substituição por valores espacialmente explícitos e metodologicamente parametrizados via RUSLE, ajustados às condições edafoclimáticas e topográficas locais. O fator de erosividade da chuva (R) foi estimado em 3.864,85  $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ , a partir de dados do INMET da estação de Palmas (TO), empregando modelo empírico calibrado para o Tocantins, consistente com o intervalo reportado para o Cerrado centro-norte (3.000–6.000  $\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ ) em contextos de elevada concentração de precipitação no período úmido e médias anuais entre 1.300 e 1.500 mm. O fator de erodibilidade do solo (K), adotado como 0,03  $\text{t}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$ , reflete as propriedades dos PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários dominantes na área, dentro da faixa típica de 0,009 a 0,035 registrada para solos do Cerrado, reconhecendo variações locais em LATOSSOLOS e NEOSSOLOS sem comprometer a coerência do modelo.

O fator topográfico (LS), derivado do Modelo Digital de Elevação, variou entre 0,065 e 69,45, evidenciando baixos valores em áreas planas e suavemente onduladas e concentrações elevadas em encostas e cabeceiras de drenagem, onde o risco erosivo é maior. O fator de cobertura e manejo (C) variou entre 0 e 0,5 (média 0,10), indicando menores perdas em vegetação natural e florestal ( $C \leq 0,02$ ) e maiores em áreas agrícolas sob manejo convencional e em pastagens degradadas ( $C \geq 0,20$ ). O fator de práticas conservacionistas (P) variou entre 0,2 e 1,0, parametrizado por classes de declividade: menores inclinações (0–8%) associaram-se a P reduzidos e maior eficiência de controle do escoamento, enquanto declividades superiores a 20% apresentaram P próximo de 1,0, refletindo baixa eficiência e maior suscetibilidade à erosão.

A estimativa média de perda anual de solo em áreas de pastagem (situada dentro do intervalo de 2 a 10  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$  nas condições locais mapeadas) não excede o limite de tolerância estabelecido para muitos solos tropicais (entre 4 e 12

t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>) quando sob manejo conservacionista eficaz; todavia, em áreas com manejo convencional e declividades mais acentuadas, a suscetibilidade aumenta e exige intervenções específicas. Já as áreas de vegetação natural apresentaram perdas substancialmente menores, compatíveis com classes de muito baixa suscetibilidade, reforçando o papel protetivo da cobertura vegetal na dissipação da energia cinética das chuvas e na redução do escoamento superficial. A discrepância entre áreas conservadas e áreas antrópicas, embora relevante, deve ser expressa por gradientes espacializados e por faixas de perda compatíveis com os parâmetros RUSLE calibrados para a região, em lugar de razões fixas ou ordens de grandeza descoladas do comportamento observado. Tal diferenciação evidencia os efeitos do uso antrópico na intensificação dos processos erosivos em setores específicos da paisagem e sinaliza cenários de degradação progressiva caso práticas inadequadas persistam, com comprometimento dos equilíbrios pedogênicos e geomorfológicos ao longo do tempo.

Ainda que os solos apresentem relativa resistência à erosão em função de sua estrutura agregada e coesão, sua vulnerabilidade aumenta substancialmente sob pressão antrópica, especialmente em áreas declivosas ou com supressão total da cobertura vegetal. No recorte de Porto Nacional, a interação entre fatores R, K, LS, C e P demonstrou que o relevo e o uso/cobertura do solo são os condicionantes primários da perda potencial, com heterogeneidade espacial capturada pela modelagem e coerente com estudos regionais no Cerrado.

Diante do exposto, os atuais padrões de uso do solo na microrregião não têm incorporado adequadamente as restrições edáficas e as dinâmicas hidrológicas locais, o que poderá comprometer a sustentabilidade da área. Para garantir a conservação da funcionalidade ambiental e produtiva da região, torna-se imprescindível a adoção de estratégias de manejo adaptadas às particularidades geopedológicas e morfoestruturais da área de estudo em Porto Nacional/MATOPIBA, incluindo práticas conservacionistas de solo e água, otimização de arranjos produtivos em função das classes de declividade (redução de P), manutenção e expansão de cobertura vegetal de baixo C, recomposição florestal, zoneamento agroecológico com base em mapas de suscetibilidade RUSLE e monitoramento contínuo do uso da terra com atualização periódica dos fatores R e K a partir de dados empíricos regionais, visando mitigar os processos erosivos e compatibilizar produtividade e conservação.

### **5.3 Discussão crítica: hipótese, robustez dos resultados**

A hipótese de que o uso antrópico, especialmente sob o sistema plantio direto, influencia significativamente os atributos físico-hidráulicos do solo foi confirmada com base nas análises realizadas, embora com ressalvas metodológicas. Destacam-se limitações quanto à profundidade dos perfis analisados, à ausência de áreas de vegetação nativa para controle e à representatividade espacial.

A análise temporal da fragilidade ambiental, embora sem modelagem preditiva formal, mostrou uma intensificação da vulnerabilidade edafoclimática, sobretudo nas áreas de uso intensivo. Em contraste, a modelagem do uso e cobertura da terra se mostrou robusta, oferecendo cenários coerentes diante das premissas estabelecidas.

### **5.4 Contribuições da tese**

Os resultados desta pesquisa oferecem importantes subsídios técnicos e científicos para o planejamento territorial, a gestão ambiental e a conservação dos solos no MATOPIBA. As principais contribuições incluem:

- Integração metodológica entre geomorfologia, uso da terra e atributos físico-hidráulicos do solo;
- Mapeamento detalhado de unidades fisiográficas com potencial para uso sustentável;
- Identificação de áreas com maior suscetibilidade à alteração ambiental;
- Fundamentação técnica para delimitação de zonas de manejo diferenciado e aplicação em zoneamentos ecológico-econômicos.

Além disso, a pesquisa contribui para políticas públicas ambientais, ao evidenciar a necessidade de diagnóstico técnico-local por meio de instrumentos como o Código Florestal, Cadastro Rural (CAR) e Política de Sustentabilidade Ambiental (PSA). Ressalta-se que a conservação dos PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários e o ordenamento do uso agrícola em áreas frágeis devem ser priorizadas em políticas regionais.

## 5.5 Desdobramentos e perspectivas futuras

Com base nos limites e potencialidades identificados, esta tese abre caminhos para futuras investigações, como:

- Ampliação da análise pedológica para áreas com vegetação nativa remanescente e sob diferentes formas de uso do solo;
- Inclusão de perfis mais profundos em áreas com PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionários, visando a compreender melhor sua interação com a dinâmica hidrológica;
- Replicação metodológica em outras bacias do MATOPIBA, testando a robustez dos modelos e subsidiando políticas regionais;
- Fortalecimento de abordagens interdisciplinares, integrando geociências, estatística espacial e geotecnologias;
- Desenvolvimento de novos índices de fragilidade ambiental, incorporando variáveis como erosividade, compactação, capacidade de suporte e proximidade de Áreas de Preservação Permanente (APPs).

Esses desdobramentos permitirão diagnósticos mais sensíveis e ações mais eficazes para o ordenamento territorial em contextos de expansão agrícola acelerada, como ocorre no MATOPIBA.

Diante do exposto, espera-se que os caminhos abertos por este trabalho de tese contribuam para uma abordagem mais integrada e territorialmente ancorada na dinâmica de ocupação do MATOPIBA. Deve-se colocar em relevo que, ao integrar os dados morfométricos, de uso e cobertura da terra e os atributos físico-hidráulicos do solo, a pesquisa identificou zonas com diferentes graus de susceptibilidade ambiental e aptidão para uso agrícola, o que fundamenta tecnicamente a delimitação de zonas de manejo diferenciado. Esses resultados fornecem subsídios concretos para sua aplicação em estratégias de zoneamento ecológico-econômico (ZEE), especialmente em regiões com pressão antrópica intensa e variabilidade edáfica elevada, como o MATOPIBA, ao mesmo tempo em que inspirem novos estudos voltados à conservação dos recursos edáficos e à gestão sustentável da paisagem.