



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM
GEOGRAFIA**

**O USO ADEQUADO DAS TERRAS EM ÁREA DE RELEVO
CUESTIFORME NA ALTA BACIA DO RIO CABEÇA (SP)
HIGOR LOURENZONI BONZANINI**

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS

RIO CLARO - SP

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

HIGOR LOURENZONI BONZANINI

O USO ADEQUADO DAS TERRAS EM ÁREA DE RELEVO CUESTIFORME NA ALTA BACIA DO RIO CABEÇA (SP)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci

Rio Claro - SP
2024

B723u Bonzanini, Higor Lourenzoni
O uso adequado das terras em área de relevo cuestiforme na alta
bacia do Rio Cabeça (SP) / Higor Lourenzoni Bonzanini. -- Rio Claro,
2024
129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientadora: Cenira Maria Lupinacci

1. Uso adequado das terras. 2. Relevo de cuevas. 3. Erosão linear.
4. Morfometria. 5. Mapeamento geomorfológico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

HIGOR LOURENZONI BONZANINI

O USO ADEQUADO DAS TERRAS EM ÁREA DE RELEVO CUESTIFORME NA ALTA BACIA DO RIO CABEÇA (SP)

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
do Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geografia.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci – Orientadora
IGCE/ UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. Melina Fushimi
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Felipe Augusto Scudeller Zanatta
Secretaria Municipal de Educação – São Paulo (SP)

Conceito: Aprovado

Rio Claro (SP), 16 de janeiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

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

À Cenira Maria Lupinacci, orientadora, por toda a contribuição na elaboração deste trabalho, pelas conversas e orientações ao longo de vários anos de pesquisa, a quais contribuíram e muito com a minha formação e que levarei para a vida.

À comissão examinadora, Melina Fushimi e Felipe Augusto Scudeller Zanatta, pelas contribuições e apontamentos realizados desde a fase de qualificação, que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família, meus tios e tias, e em especial aos meus pais, Irineu Bonzanini e Maria Helena Lourenzoni Bonzanini, pelo apoio prestado ao longo da minha vida, por acreditarem e confiarem em minha formação como geógrafo.

Aos amigos que fiz em Rio Claro, Bruno Riani, Pedro Crioni, Fernando Manocchio, Estevão Stefanuto, José Renato, José Vitor, Rafael Parra, Rafael Vilela de Andrade, Rafael Boaro, Rafael Fonseca Ferreira, Renan Yamazaki, Guilherme Prado, Luis Paulo Ourique, Stephanie Bortoletto, Leandro Barberio, Larissa Kimura, Ian Meireles, Pedro Fontão, Bruno Zucherato, Bruna Alboquerque, Guilherme Canassa, Edvaldo Guedes, Saul Riffel, Eduardo Piazzentim, Thais Medeiros, Pedro Refosco, João Rosalin, Robert Timmers, Romano, Nicolas de Freitas, Felipe Janeiro, João Neves, Gabriel Sobreira, aos amigos da república repingaiada e a tantos outros que me auxiliam nos momentos mais difíceis. Aos amigos de Taubaté e de outras cidades, Erick Kubota, Edson Carvalho, Vinicius Henrique, Fabricio Nardi, André Lemes, Lucas Antônio da Silva, Sofia Caciji e demais pela amizade longínqua e parceria ao longo da vida. E a todos que contribuíram em algum momento da minha vida e da pesquisa, que não foram citados, meus sinceros agradecimentos.

Aos funcionários da Biblioteca e do Departamento de Geografia, Bira, Gilberto, Marcia, Rita e tantos outros pela parceria prestada ao longo de anos. Aos professores de graduação e alocados no departamento, pelas contribuições em minha formação.

RESUMO

A problemática erosiva vinculada ao uso inadequado das terras é uma questão observada em todo o planeta. Em áreas declivosas e com solos arenosos, como o observado no interior do estado de São Paulo, o desenvolvimento de áreas degradadas a partir da geração de processos erosivos tem sido identificado por diversos autores. A área de estudo, localizada na alta bacia do Rio Cabeça, nos municípios de Corumbataí e Itirapina (SP), caracteriza-se pela presença do relevo de *cuestas* e de intenso processo de uso e ocupação da terra. Desta maneira, tem-se como objetivo desta pesquisa a identificação do uso adequado das terras em área rural, em ambiente de relevo *cuestiforme*, a fim de mitigar a origem e evolução de processos erosivos e diminuir a perda de material pedológico, podendo evitar a degradação ambiental estimulada pelo uso antrópico. Inicialmente, foi necessário o conhecimento das características naturais da área, sendo elaboradas cartas morfométricas e de compartimentos do relevo, além de coletados dados geológicos e pedológicos. Para a identificação do histórico de uso da terra, foram elaboradas cartas dos cenários de 1988, 2010 e 2022, o que permitiu constatar uma tendência ao uso econômico das terras para pastagens e de cultivo de cana-de-açúcar, desde o cenário de 1988. Para se adquirir os dados referentes a dinâmica erosiva na bacia de estudo, foram realizados mapeamentos geomorfológicos dos cenários de 1988, 2010 e 2022, permitindo a obtenção da distribuição de feições erosivas ao longo da área de estudo. Estes dados foram analisados de forma integrada com as características morfométricas do relevo, solos e de uso da terra. A partir desta análise, foi possível identificar as áreas que naturalmente apresentam potencial erosivo, assim como aquelas em que o uso da terra, principalmente por pastagem, permitem o desenvolvimento de feições lineares. Desta forma, terrenos com declividade variando entre 10 e 30%, e possuindo energia do relevo nas classes medianamente forte e forte, possuem concentrações de feições erosivas lineares, especialmente em áreas próximas a patamares estruturais e em média e baixa vertente. Para os solos, constatou-se que as áreas de contato entre os Neossolos Litólicos com os Argissolos Vermelho-Amarelos e dos Neossolos Litólicos com os Latossolos-Vermelhos/Nitossolos-Vermelhos possuem maior suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos. Os voçorocamentos ocorrem principalmente nos Argissolos, em contato com os Neossolos. As feições erosivas se concentram tanto nas áreas de concavidade como de convexidade. Desta maneira, com a análise destas variáveis, estabeleceu-se as duas propostas de capacidade de uso das terras adaptadas para a área de estudo. A proposta viável, de menor complexidade, se demonstrou eficaz em proteger terrenos com potencial de geração de processos erosivos. No entanto, constatou-se que a proposta ideal, de maior complexidade de elaboração, se sobressai a proposta viável por apresentar maior proteção as vertentes e diminuir significativamente as áreas indicadas para cultura anual, com acréscimo as áreas a serem ocupadas por cultura permanente, que confere maior proteção aos terrenos.

Palavras-chave: Uso adequado das terras; relevo de *cuestas*; processos erosivos lineares.

ABSTRACT

The erosion problem linked to inappropriate land use is an issue observed across the planet. In steep areas with sandy soils, such as that observed in the interior of the state of São Paulo, the development of degraded areas due to the generation of erosion processes has been identified by several authors. The study area, located in the upper catchment of the Cabeça River, in the cities of Corumbataí and Itirapina (SP), is characterized by the presence of *cuestas* relief and an intense process of land use and occupation. In this way, the objective of this work is to identify the appropriate use of land in rural areas, in an environment with *cuestiform* relief, in order to mitigate the origin and evolution of erosive processes and reduce the loss of soil material, being able to avoid degradation environment stimulated by anthropogenic use. Initially, it was necessary to know the natural characteristics of the area, with morphometric maps and relief compartment maps being drawn up, in addition to collecting geological and pedological data. To identify the history of land use, maps were prepared for the 1988, 2010 and 2022 scenarios, which made it possible to identify a trend towards the economic use of land for pastures and sugarcane cultivation, since the 1988. To acquire data regarding erosion dynamics in the study basin, geomorphological mappings of the 1988, 2010 and 2022 scenarios were carried out, allowing the distribution of erosion features throughout the study area to be obtained. These data were analyzed in an integrated way with the morphometric characteristics of the relief, soil and land use. From this analysis, it was possible to identify areas that naturally present erosion potential, as well as those in which land use, mainly pasture, allows the development of linear features. Thus, land with slopes varying between 10 and 30%, and with relief energy in the moderately strong and strong classes, have concentrations of linear erosive features, especially in areas close to structural levels and on medium and low slopes. For soils, it was found that the areas of contact between Litholic Neosols and Red-Yellow Argisols and Litholic Neosols with Red Oxisols/Red Nitisols are more susceptible to the occurrence of erosive processes. Gullies occur mainly in Argisols, in contact with Neosols. The erosive features are still concentrated in the areas of concavity and convexity. In this way, with the analysis of these variables, proposals for the use capacity of land adapted for the study area were established. It was found that the ideal proposal, which is more complex to prepare, stands out as a viable proposal as it offers greater protection to the concave slopes and significantly reduces the areas indicated for annual culture, with the addition of areas for permanent culture, which provides greater protection to the land.

Keywords: Appropriate use of land; *cuesta* relief; linear erosion processes.

SUMARIO

1. Introdução	9
2. Fundamentação teórica.....	12
2.1. Erosão dos solos: Processos e Formas	13
2.2. Influência antrópica em processos erosivos.....	16
2.3. Propostas metodológicas para uso adequado das terras	18
3. Caracterização da área de estudo	23
4. Materiais e métodos.....	27
4.1. Mapeamento morfométrico.....	28
4.1.1. Carta de declividade.....	28
4.1.2. Carta de dissecação horizontal	30
4.1.3. Carta de dissecação vertical.....	31
4.1.4. Carta de energia do relevo	32
4.2. Mapeamento dos dados geológicos.....	34
4.3. Mapeamento de dados pedológicos.....	34
4.4. Cartografia retrospectiva	35
4.4.1. Mapeamento geomorfológico.....	35
4.4.2. Mapeamento de uso e ocupação da terra	48
4.5. Mapeamento dos compartimentos do relevo.....	54
4.6. Mapeamento das Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal (Lei N° 12.651/12)	54
4.7 Mapeamento de Uso Adequado das Terras	55
5. Resultados.....	63
5.1. Características Naturais do Relevo e suas Relações com o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares.....	63
5.2. O Uso e ocupação da Terra e o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares.....	96
5.3 O Uso Adequado das Terras	110
6. Considerações Finais.....	118
Referências Bibliográficas.....	121

1. Introdução

De acordo com o relatório da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2021), 34% dos solos em área agricultável no mundo estão degradados de alguma forma. Para o Brasil, o relatório destaca que os principais problemas estão relacionados ao baixo conhecimento técnico e a falta de investimentos para a gestão de áreas agrícolas, acarretando grandes processos de erosão, perda de carbono orgânico e diminuição drástica da fertilidade do solo. Ainda, com mais de 153 milhões de hectares extremamente degradados no continente sul-americano, a região se destaca por ser uma das regiões mais degradadas do globo (FAO, 2021).

Desta forma, afetando a quantidade de perda e a qualidade do solo, a interferência humana em processos erosivos é discutida não apenas em estudos nacionais, mas também em estudos internacionais, espalhados ao longo do globo, em localidades com diferentes características naturais. (Kertzman *et al.*, 1995; Cabecauer; Hofierka, 2008; Descroix *et al.*, 2008; Pinton, 2016; Zanatta, 2018; Couto Junior *et al.*, 2019; Stefanuto, 2019; Vanacker *et al.*, 2019; Mathias; Nunes, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Silva; Lupinacci, 2021; Wen *et al.*, 2021).

Trabalhos internacionais como os de Noguerras *et al.*, (2000), Descroix; Gautier (2002), Grab; Deschamps (2004), Nyssen *et al.*, (2004), Cabecauer; Hofierka (2008), Descroix *et al.*, (2008), Zhang *et al.*, (2019), Wen *et al.*, (2021) evidenciam que, em pesquisas realizadas nos continentes europeu, asiático e africano, a conversão de áreas naturais sem o devido planejamento para com o seu uso e manejo, acarretam em inúmeros efeitos nocivos ao equilíbrio natural, principalmente intensificando processos erosivos em áreas naturalmente suscetíveis.

Para o Brasil, o mesmo efeito é observado em inúmeros trabalhos, demonstrando a correlação entre as atividades humanas e a intensificação dos processos erosivos, com destaque para: Kertzman *et al.*, (1995), Vanacker *et al.*, (2019), Couto Junior *et al.*, (2019), Mathias; Nunes (2019), Pinton; Cunha (2009), Pinton (2016), Stefanuto (2019), Silva; Lupinacci, (2021).

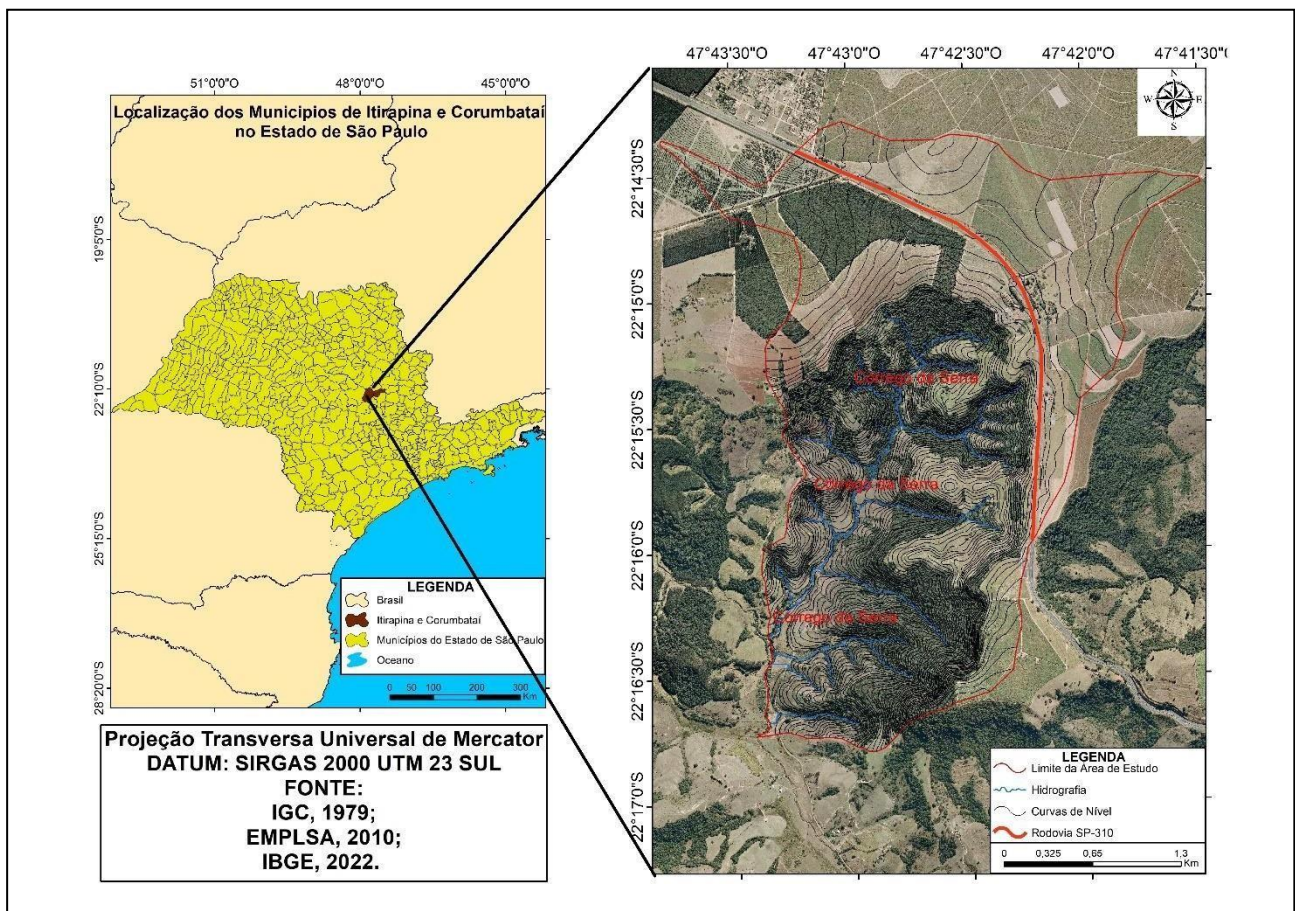
Focando na região do relevo de *cuestas* no estado de São Paulo, destaca-se o trabalho de Kertzman *et al.* (1995) que, ao realizarem o mapeamento da suscetibilidade a erosão no estado, classificaram a região de relevo *cuestiforme* nas categorias de “áreas extremamente suscetíveis a ravinas e voçorocas” ou em “áreas muito suscetíveis a ravinas e voçorocas”, evidenciando a fragilidade natural do relevo nestas regiões.

Desta maneira, destacam-se os trabalhos de Pinton (2016), Stefanuto (2019) e Silva; Lupinacci (2021), Andrade (2022), que ao estudarem as dinâmicas erosivas em localidades com a presença do relevo *cuestiforme*, constaram que estas regiões possuem alta fragilidade perante a ocorrência de processos erosivos lineares, principalmente quando o uso da terra é feito de forma

indiscriminada, transformando as áreas naturais em áreas de cultura de cana-de-açúcar e de pastagens.

Nesse contexto, a área selecionada para esse estudo abrange um setor da alta bacia do Rio Cabeça, localizada nos municípios de Itirapina e Corumbataí (SP), na região de contato das Cuestas Basálticas com a Depressão Periférica Paulista (Figura 1).

Figura 1 - Localização do setor estudado na alta bacia do Rio Cabeça (SP)



Com isso, tem-se como objetivo desta pesquisa a identificação do uso adequado das terras em área rural, em ambiente de relevo cuestiforme, a fim de mitigar a origem e evolução de processos erosivos e diminuir a perda de material pedológico, podendo evitar a degradação ambiental estimulada pelo uso antrópico. Ademais, a proposta do uso adequado das terras desenvolvida por Zanatta (2018), originalmente criada e aplicada no Planalto Ocidental paulista foi devidamente adaptada ao ambiente de relevo cuestiforme, que possui características naturais e morfométricas bem distintas da localidade da proposta original. Ao final, a adaptação pretende auxiliar proprietários rurais e o poder público a um planejamento adequado para estas localidades.

Ainda, os objetivos específicos são:

A) Avaliar o surgimento, evolução e desenvolvimento dos processos erosivos e as mudanças no padrão de uso da terra, nos anos de 1988, 2010 e 2020 do setor de relevo *cuestiforme* a ser estudado;

B) Analisar as características pedológicas, geológicas e morfométricas da bacia e sua correlação com a ocorrência de processos erosivos e com os aspectos geomorfológicos;

C) Avaliar os dados levantados sobre as características da bacia e seu histórico a fim de verificar se estes permitem propor padrões de uso da terra adequados ao ambiente de *cuesta*, utilizando a proposta de Zanatta (2018).

Desta maneira, de início o presente trabalho apresenta a fundamentação teórica a respeito dos processos erosivos, da influência antrópica em potencializar as erosões e das principais propostas metodológicas para a o uso adequado das terras. Posteriormente, são apresentadas as principais características da área de estudo. Em seguida, detalham-se os procedimentos metodológicos realizados para a elaboração das diversas cartas, assim como daquelas de uso adequado das terras. No tópico de resultados e discussões, são apresentados os dados obtidos neste trabalho. De início, são discutidas as características naturais da área de estudo, a partir da morfometria do relevo, evidenciando os setores de maior potencial natural a ocorrência de processos erosivos. Em seguida, são apresentados os mapeamentos geomorfológicos e os de uso da terra, desenvolvidos a partir da cartografia retrospectiva, dos cenários de 1988, 2010 e 2022, evidenciando os padrões de uso da terra com o maior número de feições erosivas lineares. Ainda, são apresentadas as Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal na área de estudo. Ao final do tópico de resultados e discussão, são apresentadas as cartas de Uso Adequado das Terras e discutidos os dados obtidos para a área, marcada pela presença do relevo *cuestiforme*. Por fim, nas considerações finais são destacados os principais resultados obtidos nesta pesquisa, principalmente aqueles referentes a adaptação da metodologia utilizada para ambiente de *cuesta*.

2. Fundamentação teórica

Neste capítulo, é apresentada a revisão teórica e metodológica desenvolvida neste trabalho. Em um primeiro momento, são discutidas as formas de erosão e suas feições derivadas. Em seguida, apresentam-se alguns estudos em todo o globo identificando áreas de maior potencial erosivo. Por fim, justifica-se a necessidade de aplicar a metodologia do uso adequado das terras em ambiente de relevo cuneiforme e degradado.

2.1 Erosão dos solos: Processos e Formas

Os processos erosivos e suas formas ocorrem ao longo de todo o globo, originados de inúmeros fatores e de variadas intensidades, gerando uma vasta gama de definições ao longo dos cinco continentes (FAO, 2015).

A erosão do solo se constitui em um processo que pode ocorrer em duas ou três fases (Guerra, 1994). A primeira, se constitui na remoção de partículas e de agregados do solo; a segunda se constitui pelo transporte do material removido, desde que tenha energia suficiente para se executar os trabalhos pelos agentes erosivos. Quando ocorre a ausência de energia, ocorre a deposição deste material erodido, sendo esta a terceira fase (Guerra, 1994).

Conforme Guerra (2016), a erosão do solo pode ocorrer de forma natural, normalmente não possuindo efeitos catastróficos, por se tratar de um processo lento de alteração dos elementos naturais. No entanto, a erosão acelerada pelos mecanismos técnicos humanos prejudica as dinâmicas naturais, encurtando o tempo destes processos (Guerra, 2016). As ações humanas podem facilitar a ocorrência de processos erosivos, principalmente ao converterem regiões com vegetação nativa em áreas de pastagem e de cultivo agrícola (Cabecauer; Hofirka, 2008; Mokarram; Zarei, 2021).

Neste sentido, existem fatores naturais e induzidos que podem atuar como controladores e facilitadores da geração de processos erosivos. O desenvolvimento dos processos em superfície depende tanto da erosividade, causada pela pluviosidade (total pluviométrico, intensidade e energia cinética), quanto da erodibilidade, definida em função das características físicas do solo (Guerra, 1994; Goudie, 1993). Como fatores que podem contribuir de forma positiva ou negativa na geração de processos erosivos, tem-se as características das vertentes, a cobertura vegetal, influências geológicas e as atividades antrópicas (Galetti, 1982; Fendrich *et al.*, 1991; Guerra, 1994; Silva *et al.*, 2003; Nunes e Cassol, 2008; Sinoga; Murillo, 2009; Cabecauer; Hofirka, 2008; Embrapa, 2011; Stefanuto, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Mokarram; Zarei, 2021; Rajbanshi *et al.*, 2023).

Como fator importante para a ocorrência de processos erosivos, as propriedades do solo devem ser levadas em consideração (Guerra, 1994; EMBRAPA, 2011; Ma *et al.*, 2022; Six *et al.*, 2000, Barthes; Roose, 2002). As principais propriedades dos solos, são: estabilidade dos agregados e sua textura, pH do solo, porosidade e quantidade de matéria orgânica (Goldman *et al.*, 1986; Guerra, 1994; Aziz; Islam, 2023). O maior grau de resistência do solo pode, entre outros fatores, evitar que este seja removido ou transportado, demandando uma maior energia por parte dos processos erosivos para que seja afetado (Guerra, 1994; Embrapa, 2011). Autores como Wischmeier e Mannering (1969), Guerra (1994) e Wang *et al.*, (2023) evidenciam que a erodibilidade do solo deve ser considerada para o planejamento do uso da terra, evitando processos de degradação ambiental.

A cobertura vegetal pode afetar de inúmeras maneiras as características de uma localidade. A cobertura vegetal em abundância pode mitigar a ação das gotas de água ao diminuir a energia cinética desta, freando a capacidade da gota em movimentar as partículas na superfície do solo (Shin *et al.*; 2019). Ainda, a vegetação contribui com a disponibilidade de matéria orgânica no solo, que auxilia na coesão dos agregados e na estabilidade. Já as raízes, por vezes podem auxiliar na estabilidade do solo, aumentando a coesão dos agregados (Wang; Zhang, 2017; YAN *et al.*, 2023) e da porosidade, diminuindo os efeitos da erosão por escoamento superficial (Gyssels *et al.*, 2005; Yan *et al.*, 2023). A vegetação auxilia na formação de serrapilheira na superfície, que pode conferir uma maior proteção do solo a ação da pluviosidade ao interceptar as gotas de chuva e diminuir a energia cinética destas, se comportando como uma barreira entre as camadas superficiais do solo e a atmosfera, além de contribuir para a agregação de matéria orgânica (Sidle *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2023)

As características das vertentes podem afetar a capacidade de geração e de intensidade dos processos erosivos (Embrapa, 2011; Bonzanini *et al.*, 2022). A declividade, quando em grau elevado, confere maior energia e acentua o potencial para a geração de processos erosivos lineares, porém, desde que a inclinação não comprometa a efetividade da pedogênese, gerando solos rasos (Cunha, 1991; Magalhães, 1995). Ainda, o comprimento das vertentes também é um fator determinante para a geração de processos erosivos. Conforme apontam Bertoni *et al.*, (1972), Bigarella (2003) e Pinheiro; Cunha (2014), vertentes com inclinação média de até 30° e extensas, possuem maior capacidade de geração de processos erosivos lineares quando comparadas a vertentes curtas e com igual ou maior grau de inclinação.

Fatores geológicos podem gerar setores com maior fragilidade a ocorrência de processos erosivos. Algumas características litológicas como as mineralógicas e texturais do regolito, a presença de falhamentos, lineamentos, diáclases, juntas e de contato litológico podem viabilizar a

ocorrência de processos erosivos, principalmente na geração de ravinas e de voçorocas (Facincani, 2000; Silva *et al.*, 2003)

Desta maneira, as formas e os processos erosivos são classificados em vários tipos e possuem origem variada. Alguns trabalhos como de Guerra (1994), Rubira *et al.*, (2016) e EMBRAPA (2011), apontam que, para ambientes quentes e úmidos, os processos erosivos desencadeados pela ação pluvial e fluvial no modelado são os de maior relevância. Destaca-se a partir da ação das águas: erosão por salpicamento ou *splash* (Guerra, 1994; Rubira *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2022); erosão laminar, associada ao escoamento superficial de forma difusa pela vertente (Guerra, 1994; Guerra e Guerra, 2010; Rubira *et al.*, 2016); erosões por escoamento subsuperficial, com a geração de dutos em subsolo (*piping*) (Guerra, 1994); erosão linear, oriundas da concentração das águas pluviais em formas de canais com tamanhos variados ao longo das encostas (Rubira *et al.*, 2016).

O *splash*, ou erosão por salpicamento, é a erosão causada pelo impacto de uma gota de água da chuva no solo, quebrando as partículas superficiais e as transportando, sendo comumente associada ao primeiro estágio de erosão pluvial e hídrica (Guerra, 1994; Kinnell, 2005; RUBIRA *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2022). A intensidade e o efeito deste processo erosivo variam de acordo com a energia cinética da gota d'água, ou seja, variam principalmente de acordo com a força da chuva, ou mesmo pela cobertura vegetal, que pode interceptar uma parcela da chuva através da folhagem, podendo diminuir a energia da queda da gota d'água no solo (Wang *et al.*, 2014, Shin *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2023).

Ainda, o *splash* pode não apenas se limitar a remoção de partículas do solo, mas acarretar a formação de crostas em eventos chuvosos (Guerra, 1994; Ran *et al.*, 2012; Aziz; Islam, 2023). A energia oriunda do impacto da gota d'água no solo pode quebrar os agregados na camada superficial do solo, acumulando água e formando crostas em superfície, dificultando a infiltração da água (Ran *et al.*, 2012). A capacidade de infiltração do solo e a consequente geração de crostas varia de acordo com as características da encosta e da granulometria do solo (Cunha, 1991; Guerra, 1994).

Com a saturação da água no solo, ocorre a ação do escoamento superficial. Neste processo, a erosão se desenvolve inicialmente em forma de lençol, formando, a posteriori, fluxos de água em pequenos canais difusos pela superfície (Guerra, 1994). A energia e a velocidade com que estes fluxos se organizam pela vertente irá determinar a capacidade de transporte de material, que varia de intensidade de acordo com a inclinação da vertente, pela presença de vegetação e por blocos rochosos (Guerra, 1994; Magalhães, 1995; Lou *et al.*, 2023).

A infiltração da água a partir da superfície pode resultar no escoamento em subsuperfície, gerando macroporos no solo que concentram fluxos de água, expandindo os vazios, dando origem os dutos (*piping*) (Bernatek-Jakiel; Poesen, 2018; Pereyra *et al.*, 2020). Os dutos podem assumir diâmetros e extensões variadas, promovendo a dissolução e transporte de materiais nas camadas internas do solo (Guerra, 1994, Smart *et al.*, 2013; Kariminejad *et al.*, 2023). A maioria destas feições se concentram nas camadas mais próximas da superfície, não sendo notável a sua atuação até que ocorra o colapso da parte superior do duto (Kariminejad *et al.*, 2023).

De maior relevância no espectro erosivo, a erosão linear dá origem a três formas distintas, possuindo tamanhos e processos variados, resultando em feições do tipo sulco, ravina e voçoroca (Rubira *et al.*, 2016). Segundo Poesen *et al.*, (2003) e Ferreira (2007), a erosão linear é um problema sério, principalmente quando se trata de voçorocas, considerado um dos piores problemas ambientais em todo o globo, principalmente em regiões tropicais, pois indicam setores de grande degradação, necessitando de técnicas de grande envergadura para a estabilização e controle.

Os sulcos são feições que se formam a partir da concentração dos fluxos superficiais difusos de água na encosta, formando pequenos canais com poucos centímetros de profundidade, gerando caminhos preferenciais de escoamento de água pluviométrica, com baixa capacidade de transporte, sendo de mais fácil estabilização e remoção, tornando possível a retomada da atividade agrícola (Goudie, 2004; Guerra; Guerra, 2010; Salomão; Antunes, 1998; Conciani, 2008)

Também oriundo do trabalho das águas de escoamento, as ravinas possuem maiores profundidades quando comparadas aos sulcos erosivos, possuindo taludes laterais expostos, com pouca ou nenhuma vegetação (Guerra; Guerra, 2010; Poesen *et al.*, 2006; Peñhuela *et al.*, 2023). Possuem uma capacidade grande de transporte e remoção de materiais, a partir dos processos atuantes e de suas dimensões. Por inviabilizar a passagem de veículos em áreas de produção agrícola, faz-se necessária a aplicação de técnicas de contenção, visando tornar a localidade estável novamente (Han *et al.*, 2022; Cama *et al.*, 2020).

Já as voçorocas são definidas de forma distinta pela literatura científica. Alguns autores (Furlani, 1980; Goudie, 2004; Bigarella, 2003; USDA, 2010; Pes; Giacomini, 2017; Daley *et al.*, 2023) definem as voçorocas como feições erosivas que possuem profundidades maiores ou iguais a 50 centímetros, exibindo taludes íngremes, podendo conter fluxo de água intermitente, com a atuação de inúmeros processos de superfície e de subsuperfície, gerando feições como dutos, quedas de blocos na borda dos taludes, alcovas de regressão, entre outras feições, vinculadas a processos de solapamento, movimento de massa e *piping*.

Já outros autores (Lal, 1990; Salomão, 1999; Guerra; Guerra, 2010) definem as voçorocas a partir do afloramento do nível freático, como fator que potencializa os processos erosivos, ocorrendo em conjunto com o escoamento superficial e subsuperficial.

Para esta pesquisa, assumiu-se para definição de voçoroca a segunda concepção pois entende-se que, com o afloramento do nível freático, a intensidade da erosão e a capacidade de transporte de material é mais significativa.

2.2 Influência antrópica em processos erosivos

A erosão dos solos é um processo de comum ocorrência na natureza, porém, ações antrópicas podem atuar de forma a romper com o equilíbrio natural, aumentando as taxas de erosão e de degradação ao longo do globo (Lal, 1990; Valentin *et al.*, 2005; Peñuela *et al.*, 2023). A interferência humana em processos erosivos é discutida não apenas em estudos nacionais, mas também em estudos internacionais, espalhados ao longo do globo e em diferentes localidades, com características naturais variadas. (Kertzman *et al.*, 1995; Cabecauer; Hofierka, 2008; Descroix *et al.*, 2008; Pinton, 2016; Zanatta, 2018; Couto Junior *et al.*, 2019; Stefanuto, 2019; Vanacker *et al.*, 2019; Mathias; Nunes, 2019; Zhang *et al.*, 2019; Silva; Lupinacci, 2021; Wen *et al.*, 2021).

Partindo da literatura internacional, Cabecauer; Hofierka (2008), evidenciaram que na Eslováquia o desmatamento em áreas montanhosas para a exploração de madeira e conversão em áreas agricultáveis tem acelerado os processos erosivos. Houve também um acréscimo da erosão em áreas historicamente agricultáveis, com o advento da intensificação da produção agrícola. Já na região do *Loess Plateau*, localizado na China, Zhang *et al.*, (2019) identificaram que o uso da terra a partir do manejo inadequado e de instrumentalização de ferramentas em terras aráveis, especialmente em áreas declivosas, aceleraram os processos erosivos naturais. Ainda na China, na região conhecida pelos solos negros, no Nordeste do país, Wen *et al.*, (2021) encontraram, em áreas declivosas e historicamente exploradas e degradadas, a tentativa de contenção dos processos erosivos a partir da construção de terraços, os quais em inúmeros casos não foram bem planejados e instalados, gerando a aceleração indesejada dos processos erosivos nas encostas.

Descroix *et al.*, (2008), ao fazer uma revisão bibliográfica a respeito da ocorrência de erosão laminar, ravinas e de voçorocas em áreas declivosas ao longo do globo, evidenciaram que a prática e o manejo inadequado no uso e ocupação do solo estão totalmente ligadas a ocorrência destas feições, e em especial a prática do sobrepastoreio, sendo constatada como a principal causadora em diferentes partes do globo. Para o continente africano, Grab e Deschamps (2004) encontraram esta correlação no Lesoto, assim como Nyssen *et al.*, (2004) na Etiópia. Já na região

do mediterrâneo, o sobrepastoreio e o manejo inadequado dos solos como intensificadores das erosões foi identificado por Descroix e Gautier (2002) na França, por Nogueras *et al.*, (2000) na Espanha e por alguns outros trabalhos desenvolvidos em países como Itália, Portugal e em regiões no norte da África (Descroix *et al.*, 2008).

Para o Brasil, o semelhante é observado em inúmeros trabalhos, demonstrando a correlação entre as atividades humanas e a intensificação dos processos erosivos. Zanatta (2018), ao estudar uma bacia hidrográfica no oeste do estado de São Paulo, identificou grandes modificações nos padrões de uso da terra desde 1963, com extensas áreas de vegetação nativa perdendo espaço para áreas de plantio de cana-de-açúcar e de pastagens, acarretando no desenvolvimento de grandes feições erosivas lineares. Vanacker *et al.*, (2019), em um estudo realizado na região sul do Brasil, evidenciaram que mudanças no uso da terra, de mata atlântica para pastagens e cultivo agrícola, sem o devido planejamento e controle, impactaram positivamente para a contribuição nas taxas de erosão. Já Couto Junior *et al.*, (2019), a partir da análise da bacia do Rio Cachoeirinha, no estado de São Paulo, concluíram que o incremento da cana-de-açúcar nos últimos anos tem acelerado o processo natural de remoção das camadas superficiais do solo, resultando em sedimentos adicionais aos cursos fluviais, causando sérios impactos ambientais. Mathias e Nunes (2019), em estudo realizado na cidade de São Pedro, no estado de São Paulo, identificaram incremento na atividade erosiva em ambiente periurbano a partir de intervenções inadequadas para recuperação de uma área degradada, agravando ainda mais o problema ambiental na área.

Pinton (2016), constatou que as potencialidades naturais de ocorrência dos processos erosivos são intensificadas a partir da pressão exercida pelas atividades antrópicas, interferindo de forma positiva na evolução dos processos morfodinâmicos em área de relevo cuspiforme. Como potencialidades naturais a ocorrência de processos erosivos, Pinton e Cunha (2009) demonstram que as características do solo e de declividade podem facilitar o aparecimento de feições erosivas. Ainda, o uso da terra em pasto limpo foi identificado com o maior número de feições erosivas do tipo voçoroca (Pinton, 2016).

Stefanuto (2019), ao analisar a dinâmica erosiva linear em áreas agrícolas na bacia do córrego Santa Terezinha, em Analândia (SP), constatou que as feições erosivas em área de relevo cuspiforme são intensificadas quando o uso da terra se apresenta sem planejamento, com manejo inadequado e sem manutenção, em especial para áreas de pastagens, com grande ocorrência de feições erosivas lineares do tipo sulco erosivo, ravinas e voçorocas. O autor destaca ainda a potencialidade natural do relevo cuspiforme a se correlacionar com as feições lineares, cuja declividade agrega energia ao escoamento superficial e acelera as dinâmicas erosivas (Stefanuto,

2019).

Desta maneira, a região das Cuestas no estado de São Paulo se destaca pela alta potencialidade natural de ocorrência dos processos erosivos, potencialidade esta que nos casos analisados passa a ser intensificada pelo uso da terra sem o devido controle e manejo, principalmente por parte da pecuária, gerando processos erosivos e áreas degradadas (Kertzman *et al.*, 1995; Pinton, 2016; Stefanuto, 2019).

Ainda neste contexto, a área de estudo selecionada para esse estudo abrange um setor de contato das Cuestas Basálticas com a Depressão Periférica Paulista. Para esta região e em escala de menos detalhe, Silva e Lupinacci (2021) realizaram uma análise das alterações antropogeomorfológicas na bacia do Rio Cabeça, identificando as mudanças entre os cenários de 1988 e de 2010. Deste estudo, destaca-se o intenso uso da região para a atividade antrópica, com 36,7% da bacia sendo usada para pasto, 20% para o cultivo de cana-de-açúcar e 12,4% para silvicultura. Foi identificado expressivo aumento das feições erosivas lineares entre os cenários de 1988 e 2010, ocorrendo o aumento de 195 sulcos erosivos, passando de 423 em 1988 para 618 em 2010. As ravinas passaram de 97 para 107 feições no ano de 2010, e as voçorocas no mesmo período, do total de 3 feições, aumentou para 36 em 2010. Inclui-se ainda que boa parte das feições erosivas encontradas foram identificadas em áreas de pastagens, com pouco ou nenhum tipo de manejo conservacionista (Silva; Lupinacci, 2021).

2.3 Propostas metodológicas para uso adequado das terras

Diante de processos de degradação ambiental causados ou potencializados pela atividade antrópica, surge a necessidade de se planejar o uso do espaço a fim de minimizar os impactos ambientais e promover a conservação da natureza (Ross, 1995). Visando auxiliar o planejamento do uso da terra, várias metodologias surgiram ao longo da segunda metade do século XX e início do século XXI (Klingebiel; Montgomery, 1961; Lepsch, 1983; Ross, 1994; Ramalho-Filho; Beek, 1995; Crepani *et al.*, 2001; Rodriguez *et al.*, 2004; Zanatta, 2018). Estas metodologias buscam indicar limitações naturais ao uso da terra, tais como o relevo, solo e clima, garantindo a redução e o controle erosivo, a qualidade da produção agrícola e a proteção ambiental da fauna e da flora (Cunha; Pinton, 2012; Flauzino *et al.*, 2016).

Partindo do pioneirismo, o trabalho de Norton (1939) teve fundamental importância para a aplicação da capacidade de uso da terra em inúmeros países do mundo, incluindo o Brasil, a partir da tradução do trabalho para o português em 1945. Segundo Giboshi (1999), com o passar das décadas do século XX, algumas adaptações do trabalho de Norton (1939) foram feitas, como os trabalhos de Marques (1958) e Marques (1971).

Conforme explica Flauzino *et al.*, (2016), uma das metodologias para o uso adequado do solo em ambiente rural mais utilizada no Brasil é o sistema de capacidade de uso da terra, de Lepsch (1983). Esta metodologia foi originalmente elaborada nos Estados Unidos por Klingebiel e Montgomery (1961), sendo adaptada para as características brasileiras por Lepsch em 1983.

Assim, o sistema de capacidade de uso da terra de Lepsch (1983) consiste em uma forma de avaliação qualitativa da capacidade de uso, identificando a limitação dos terrenos, destacando setores com maior grau de risco aos processos erosivos. Desta forma, é um sistema baseado em combinações naturais de limitação ao uso rural, a partir da análise das características do relevo, do solo e do efeito climático, que podem implicar em riscos ao equilíbrio natural e afetar a própria produção agrícola (Giboshi, 1999). Por suas características, é considerado um sistema adequado a aplicação em escala de propriedades rurais (Lepsch, 1991).

Já a proposta desenvolvida por Ross (1994) faz uma análise da fragilidade da natureza e de ambientes antropizados, com fundamentação teórica nas Unidades Ecodinâmicas de Tricart (1977), a partir da Teoria dos Sistemas. Esta abordagem é relacionada ao estudo da paisagem, tendo como base a gestão do território e a dinâmica do meio natural (Tricart, 1977).

A metodologia de Ross (1994), utiliza-se da Teoria de Tricart (1977), adicionando fatores humanos e econômicos aos procedimentos operacionais com base em estudos do relevo, do solo, do subsolo, do uso da terra e do clima, com uma análise integrada da paisagem (Ross, 1994). Para isso, Ross (1994) definiu categorias de Unidades Ecodinâmicas Estáveis e Unidades Ecodinâmicas Instáveis. As Unidades Ecodinâmicas Instáveis são assumidas como regiões de intervenção antrópica, como áreas desmatadas com finalidade econômica, possuindo graus de instabilidade de muito fraco a muito forte (Ross, 1994). Já as Unidades Ecodinâmicas Estáveis, que se encontram em equilíbrio dinâmico natural, possuem Instabilidade Potencial natural a ocorrência de processos erosivos, a partir de suas características de relevo, clima e solo, que quando superadas e não respeitadas a partir do uso antrópico, geram processos de degradação ambiental. Já as áreas classificadas como de Instabilidade Emergente, possuem algum nível de interferência antrópica, que variam em classes de muito fraca a muito forte (Ross, 1994).

Ross (1994) destaca que para um uso adequado do espaço, a fim de se evitar o desequilíbrio ambiental e os processos erosivos, deve-se considerar a fragilidade potencial dos ambientes, com a análise dos fatores naturais integrada ao índice de fragilidade emergente, chegando ao diagnóstico de categorias hierárquicas de fragilidade, auxiliando no uso adequado das terras e no planejamento ambiental (Ross, 1994).

Assim como a proposta de Ross (1994), a proposta de avaliação da vulnerabilidade natural à perda de solos de Crepani *et al.*, (2001) também foi pensada e desenvolvida a partir dos princípios da Ecodinâmica de Tricart (1977).

A proposta de Crepani *et al.*, (2001) foi principalmente pensada para a aplicação na região Amazônica, em vista a crescente preocupação da ocupação desenfreada e sem planejamento desta parte do território brasileiro; porém, esta metodologia já foi aplicada em muitas outras localidades, como por exemplo no trabalho de Matule; Macarringue (2020), no distrito de Boane, em Moçambique.

A vulnerabilidade à perda de solos é baseada no desequilíbrio da dinâmica natural do meio ambiente, analisando os componentes da paisagem, como a litologia, o relevo, os solos, a vegetação, o clima e as atividades antrópicas (Crepani *et al.*, 2001; Matule; Macarringue, 2020). Para a elaboração de uma carta de vulnerabilidade natural à perda de solo de uma localidade, faz-se necessário que se tenha uma imagem orbital, dados geológicos, geomorfológicos, solos e de vegetação, como por exemplos os desenvolvidos pelo projeto RADAM Brasil, além de carta topográfica em escala de no mínimo 1:100.000 e dados pluviométricos da área de estudo (Crepani *et al.*, 2001).

Crepani *et al.*, (2001) destaca que a análise das imagens e dos dados devem serem feitas considerando os padrões fotográficos a partir das cores, forma, textura, padrões de drenagem e de relevo. Assim, a vulnerabilidade de cada unidade da paisagem será organizada de acordo com a relação morfogênese/pedogênese, identificando-se as áreas de potencial natural a grandes perdas de solo (Crepani *et al.*, 2001).

Outra proposta para o uso ambientalmente consciente do espaço nasceu em 1978, através da Secretaria Nacional de Planejamento Agrícola (SUPLAN) em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), desenvolvendo o sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras (Ramalho-Filho; Beek, 1995). Em 1995, foi publicada a 3ª edição do sistema de avaliação de aptidão agrícola das terras, organizada por Ramalho-Filho; Beek (1995), visando modernizar as análises e atender as demandas do final do século XX (Ramalho-Filho; Beek, 1995).

A avaliação de aptidão agrícola das terras foi pensada para ter abrangência nacional, a ser aplicada em diferentes escalas de análise, permitindo a adequação de parâmetros, com a inclusão ou exclusão de variáveis, de acordo com as necessidades de cada pesquisa (Ramalho-Filho; Beek, 1995). De forma geral, a proposta abarca a análise das seguintes variáveis: fertilidade, disponibilidade de água, suscetibilidade a erosão e limitações para a mecanização agrícola (Ramalho-Filho; Beek, 1995).

Desta maneira, o resultado deste tipo de levantamento tem por objetivo ressaltar, em todo o território nacional, a aptidão das terras para diversas culturas e vocações, com diferentes manejos e viabilidades de melhoramentos, através da injeção de capital e de aparato técnico para a correção dos solos ou para a conversão de culturas quando necessário (Ramalho-Filho; Beek, 1995). Ainda, o levantamento auxilia na geotécnica, na engenharia sanitária, para a implementação de rodovias e ferrovias e demais ramos e atividades de engenharia de construção (Ramalho-Filho; Beek, 1995).

Ao final, a área de estudo é dividida em seis classes de aptidão agrícola, partindo desde terras com aptidão boa para lavouras; terras com aptidão regular para lavouras; terras com aptidão restrita para lavouras; terras com aptidão boa, regular ou restrita para pastagem; terras com aptidão boa, regular ou restrita para silvicultura; e para terras sem aptidão para o uso agrícola (Ramalho-Filho; Beek, 1995).

Outra metodologia interessante para avaliar a relação uso da terra – condições naturais, constitui-se na geoecologia das paisagens desenvolvida por Rodriguez *et al.*, (2004). Esta metodologia baseia-se na concepção de geossistemas de Sotchava (1977). Sotchava (1977) considera o geossistema como um método de análise sistêmica da natureza a partir de seus elementos físicos, ambientais e bióticos, cujo papel antrópico exerce interferência na natureza, integrando fatores sociais e econômicos.

A partir da concepção de geossistema, Rodriguez *et al.*, (2004) propõe a delimitação de unidades de paisagem, fundamentada na análise das dinâmicas naturais, da estrutura funcional da natureza e de suas conexões. Com isso, a identificação das unidades da paisagem passa pelo levantamento de dados da topografia, drenagem, hipsometria, declividade, litologia, cobertura natural, solo, relevo e de uso e ocupação da terra, integrando os dados naturais aos dados socioeconômicos, cuja síntese proporciona a delimitação das unidades de paisagem.

Desta maneira, a unidade da paisagem, ao integrar fatores naturais e antrópicos, auxilia diretamente no planejamento ambiental, permitindo a tomada de políticas públicas objetivas, estabelecendo as devidas restrições de uso e ocupação da terra, garantindo a proteção ambiental de áreas inocupadas e, para áreas já ocupadas, promovendo a mitigação de impactos ambientais negativos (Rodriguez *et al.*, 2004; Trombeta; Leal, 2016).

A proposta de uso adequado das terras em área rural degradada, elaborada por Zanatta (2018), utiliza como base elementos da geoecologia da paisagem de Rodrigues *et al.*, (2004) e do sistema de capacidade de uso da terra elaborado por Lepsch *et al.*, (1983), além do monitoramento das feições erosivas através da cartografia geomorfológica retrospectiva. Para Zanatta (2018), estas metodologias quando integradas, apresentam elementos complementares, permitindo a avaliação

das áreas rurais e degradadas sob a ótica do desenvolvimento de processos erosivos e da interferência antrópica, possibilitando a determinação do uso mais adequado para cada localidade (Zanatta, 2018).

A partir da aplicação e avaliação destas metodologias, Zanatta (2018) selecionou os aspectos considerados mais importantes de cada uma destas para a elaboração de duas propostas de uso adequado das terras em área rural degradada: a proposta ideal e a proposta viável. A proposta ideal abarca um conjunto maior de elementos, sendo esta mais complexa, já que considera os compartimentos de relevo, a energia do relevo, a textura, permeabilidade e profundidade do solo, as variações litológicas, as Áreas de Preservação Permanente, áreas de planície e de terraço fluvial, feições erosivas lineares e bacia de captação direcionada à voçoroca (Zanatta, 2018). Já a proposta viável, busca uma simplificação dos procedimentos metodológicos para viabilizar sua aplicação por não especialistas, sem perder a qualidade da proposta original. Para a proposta viável, Zanatta (2018) considerou: declividade, textura e profundidade do solo, Áreas de Preservação Permanente, feições erosivas lineares e bacia de captação direcionada à voçoroca.

O autor considera que a proposta viável, além de necessitar de menos elementos para a sua aplicação, facilitando a replicação da metodologia em outras localidades, apresenta uma distribuição espacial contínua e conjunta das classes sugeridas, facilitando sua aplicação na realidade (Zanatta, 2018). A proposta ideal, por abarcar um maior número de variáveis, gera como resultado uma fragmentação considerável de classes de uso sugerido, sendo, portanto, de difícil aplicação (Zanatta, 2018).

Desta maneira, esta pesquisa tem como proposta a aplicação e adaptação da metodologia desenvolvida por Zanatta (2018) para o Planalto Ocidental Paulista, em uma região rural de contato entre a Depressão Periférica Paulista e as Cuestas Basálticas. A opção por esta metodologia, dentre as muitas outras existentes, se deve a sua adequabilidade para áreas rurais degradadas pela erosão. Assim, a metodologia enfatiza, por exemplo, os efeitos de borda em setores de voçorocamento e as predisposições naturais a geração de processos erosivos, aspectos importantes para o entendimento dos processos erosivos no contato Depressão-Cuestas, marcado por feições erosivas de grande porte. Além disso, a proposta de Zanatta (2018) foi criada utilizando princípios importantes de outras metodologias, como as de Rodriguez *et al.*, (2004), Oliveira (2003) e Lepsch (1983), buscando selecionar aspectos relevantes para o estudo da erosão, o que se adapta a problemática principal da área de estudo.

3. Caracterização da área de estudo

Localizada no interior do estado de São Paulo, a área de estudo se posiciona nos municípios de Itirapina e Corumbataí, abarcando parte da rodovia SP-310. Caracteriza-se como uma área de nascentes, por estar localizada na alta bacia do Rio Cabeça e posiciona-se entre 22°14'20" S e 22°17'0" S de latitude e 47°43'40" O e 47°41'40" O de longitude.

No que se refere ao arcabouço geológico, a área de estudo se insere na Bacia Sedimentar do Paraná. Pela variação da composição mineral das formações rochosas, a erosão diferencial ocorrida ao longo de milhões de anos entre as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, proporcionou a geração de compartimentos geomorfológicos distintos ao longo de boa parte do estado de São Paulo. Na área de estudo, o contato se realiza entre as Cuestas Basálticas e a Depressão Periférica Paulista, zona do Médio Tiete (IPT, 1981; Dal Ré Carneiro, 2018).

A classificação do relevo do Estado de São Paulo desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 1981), tem por base a classificação de Almeida (1964), sendo organizada em províncias, zonas e unidades de relevo, conferindo ajustes importantes nos limites nas províncias do estado com base na análise dos sistemas de relevo a partir de imagens orbitais. Desta forma, a província da Depressão Periférica foi dividida em três zonas: zona do Médio Tiete, zona do Paranapanema e zona do Mogi-Guaçu, sendo diferenciadas a partir de características como a altura máxima entre topos e vales, a declividade média das encostas, extensão e formas de topos, densidade e padrão de drenagem, entre outros fatores (IPT, 1981). A província das Cuestas Basálticas não possui diferenciação por zonas de relevo na classificação (IPT, 1981).

Assim, na área de estudo, na Depressão Periférica, encontram-se duas unidades de relevo, a de relevos residuais suportados por maciços básicos, com mesas basálticas e a unidade de transição de encostas com cânions locais (IPT, 1981). Para a região, o IPT (1981) destaca a sustentação do relevo cuestiforme pelas formações Botucatu e Serra Geral, com a presença de morros testemunhos e de inúmeros patamares elaborados pela alternância entre arenitos e basaltos.

Desta forma, a área de estudo caracteriza-se pela presença de três formações geológicas, Formação Serra Geral, Formação Botucatu e Formação Pirambóia (Figura 2 B). A Formação Pirambóia é constituída por arenitos argilosos com intercalação de camadas de siltitos e de folhelhos, sendo comumente encontrada ao longo da Depressão Periférica Paulista, bem próxima aos relevos da Cuesta Basáltica (Soares, 1973; Perinotto; Lino, 2010). Esta formação apresenta arenitos de coloração avermelhadas ou rosadas, com granulação fina a média, com estratificação cruzada e acanalada e plano-paralela (Sousa, 2002). Possui origem de ambiente deposicional fluvial

e eólico, destacando um período de transição climática com um paleoambiente dinâmico, com fases de dunas, interdunas e de canais fluviais efêmeros (Caetano-Chang; Wu, 1995; Caetano-Chang, 2003). Sua idade remonta aos períodos Triássico e Jurássico (Sousa, 2002).

Comumente encontradas ao longo do relevo cuestiforme do interior do estado de São Paulo, e por vezes exposta no *front* da *cuesta* na área de estudo, a Formação Botucatu é formada por arenitos de origem eólica, avermelhados e de granulação fina a média, com estratificação cruzada (Soares, 1973). Esta formação evidencia um paleoambiente desértico ao longo dos períodos Jurássico e o Cretáceo pois sua origem remonta a um grande deserto existente na fase pré-abertura do Atlântico, destacando um grande ambiente intercontinental de dunas (Caetano-Chang; Wu, 1995). Sua idade de formação remonta aos períodos Jurássico e Cretáceo (Scheider *et al.*, 1974; IPT, 1981).

Ainda, a Formação Serra Geral, formada por basaltos, oriundos de derrames em vulcanismo fissural, ocorridos ao longo do Eocretáceo, ocasionado pela reativação tectônica derivada do processo de abertura do oceano Atlântico, apresenta coloração que pode variar de cinza-escuro a preta (Almeida, 1964; Sousa, 2002). Seu contato superior e inferior é considerado discordante, uma vez que os derrames perduraram concomitantemente a condições desérticas de sedimentação da Formação Botucatu (Schneider *et al.*, 1974; Sousa, 2002), por isto, é comum que ocorram intercalações destas formações ao longo do pacote.

Destaca-se que a Formação Serra Geral atualmente é reconhecida como Grupo Serra Geral, com subdivisões de formações ocorrendo ao longo de toda a Bacia Sedimentar do Paraná (Hartmann, 2014). Porém, para este trabalho admite-se como Formação Serra Geral, uma vez que os mapeamentos disponibilizados para a região ainda são antigos, anteriores a concepção de grupo estabelecida por especialistas (Hartmann, 2014).

Na área de estudo, de acordo com o mapeamento de Koffler *et al.* (1992), são encontradas cinco classes de solos, a saber: Latossolos Vermelho-Amarelos da Unidade Coqueiro – LV2, Nitossolos Vermelhos – TE1, Latossolos Vermelhos unidade Ribeirão Preto – LRe, Neossolos Litólicos Eutróficos – Li2 e Argissolos Vermelho-Amarelos da unidade Serrinha – PV2 (Koffler *et al.*, 1992) (Figura 2 A). Todas as classes de solos possuem grande relação com o material geológico local e com as características gerais do relevo.

No reverso do relevo cuestiforme, predominantemente sobre os arenitos da Formação Botucatu, ocorrem os Latossolos Vermelho-Amarelos da Unidade Coqueiro – LV2 (Figura 2A). Característicos de áreas com relevo suave ondulado, como no reverso cuestiforme, os solos dessa unidade são muito profundos (Oliveira; Prado, 1984). Possuem baixo teor de argila, e elevados teores de areia, que tornam sua consistência friável a muito friável, a depender do local (Oliveira;

Prado, 1984). Ainda, Oliveira e Prado (1984) destacam que a vegetação nativa associada a esses solos é de cerrados e cerradões, pois são solos limitados quanto a fertilidade e a retenção de umidade, porém, desde o trabalho realizado em 1984, observa-se um uso intenso para a pecuária, cana-de-açúcar, silvicultura, citricultura, soja e milho.

Generalizados pelo levantamento realizado por Koffler *et al.*, (1992), para a área do *front* cuestiforme, com declive acentuado sustentado pelos basaltos da Formação Serra Geral, registram-se três classes pedológicas com seus limites entrelaçados e não bem definidos devido a escala de análise, a saber: Nitossolos Vermelhos – TE1, Latossolo Vermelhos unidade Ribeirão Preto – LRe e os Neossolos Litólicos Eutróficos – Li2 (Oliveira; Prado, 1984).

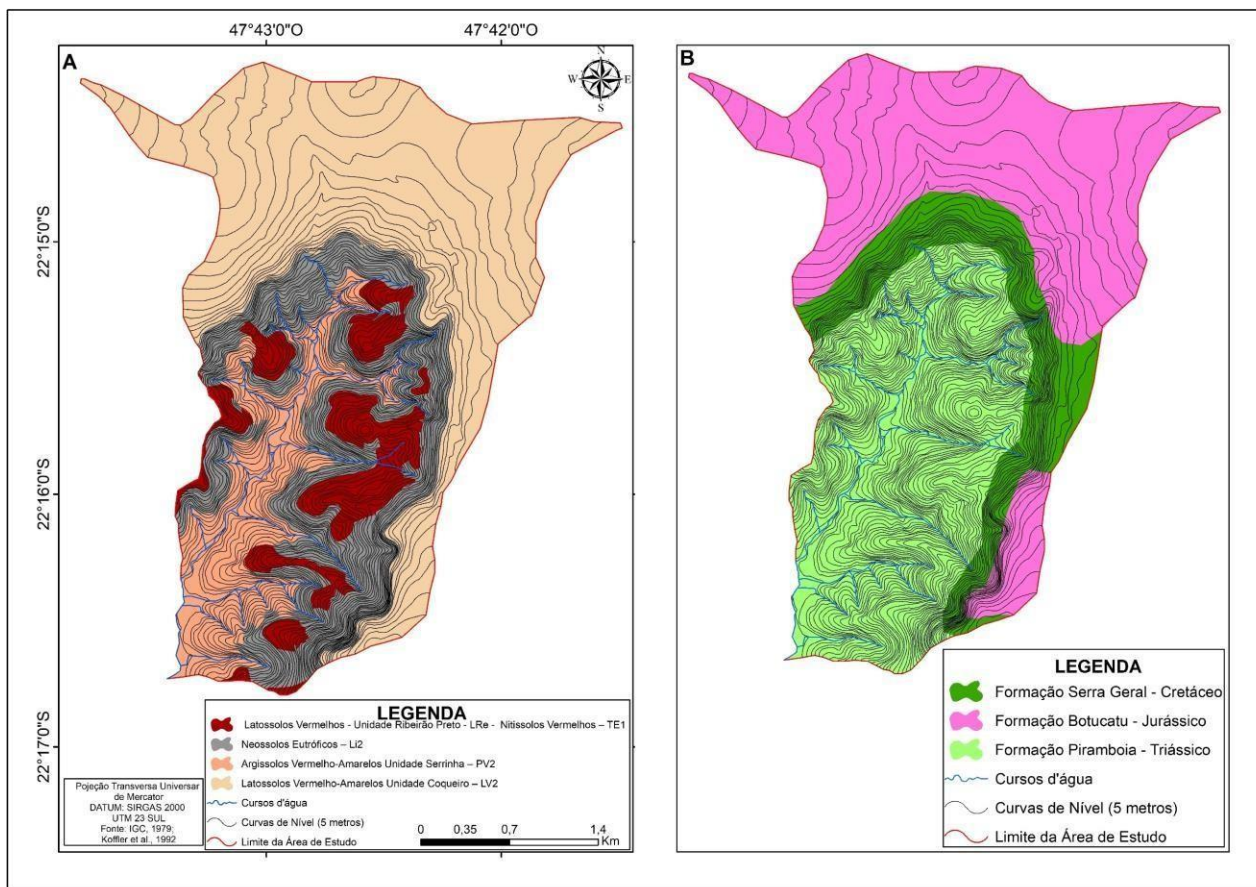
Segundo Oliveira e Prado (1984), os Nitossolos Vermelhos – TE1 são solos de textura argilosa ou muito argilosa e extensamente utilizados para pastagens e agricultura permanente ao longo do interior do estado de São Paulo, ocorrendo em relevos forte ondulados associados a Formação Serra Geral.

Oriundos de materiais provenientes do intemperismo das rochas básicas, os Latossolos Vermelhos unidade Ribeirão Preto –LRe se constituem como solos muito profundos, atingindo vários metros de profundidade, com perfil homogêneo, de textura argilosa a muito argilosa com baixa presença de areia (Oliveira; Prado, 1984). Ocorrem com predominância em relevos suaves ondulados, próximos a áreas de relevo cuestiforme e em áreas da Depressão Periférica Paulista, sempre associados a rochas básicas intrusivas e extrusivas, e aliada a sua boa qualidade física e química, possuem uso intensivo para a agricultura (Oliveira; Prado, 1984).

Os Neossolos Litólicos Eutróficos – Li2 são descritos por Oliveira e Prado (1984) como solos pouco espessos, inferior a 40 cm de profundidade e referentes a áreas de declividade acentuada. A textura é bem variada e está relacionada a natureza do substrato, apresentando valores elevados de minerais primários, menos resistentes ao intemperismo (Oliveira; Prado, 1984).

Já para as áreas do setor da Depressão Periférica e muito associados aos arenitos da Formação Pirambóia, ocorrem os Argissolos Vermelho-Amarelos da unidade Serrinha – PV2 (Oliveira; Prado, 1984). Comumente encontrados na Depressão Periférica, estão associados a cotas acima dos 620 metros, em áreas bem dissecadas, com relevo ondulado de vertentes concavas e curtas, com declives entre 15 e 30% (Oliveira; Prado, 1984). São solos com textura no horizonte A fino-arenosa, com horizonte B fino-areno-barrenta (Oliveira; Prado, 1984). Segundo Oliveira e Prado (1984), são solos muito suscetíveis a erosão, pelo acentuado declive e textura contrastante, porém, sua vegetação nativa, associada a mata tropical subcaducifólia, existe em poucos pontos da região da Depressão Periférica, persistindo o uso agrícola.

Figura 2 – A: Classes de solos da área de estudo; em B: Formações litológicas da área de estudo



Ainda, a região está inserida, conforme classificação climática de Monteiro (1973), sob influência dominante de massas equatoriais e tropicais, se caracterizando como clima tropical, com períodos úmidos no verão e primavera e com período seco entre as estações de inverno e outono. A temperatura média anual gira em torno de 20,9°C, e a pluviosidade média anual em torno de 1.638mm. O mês de janeiro se caracteriza como o de maior pluviosidade, com médias de 300mm, enquanto o mês de julho com uma média de 32mm se constitui como o mês de menor pluviosidade (Clima-Data, 2023).

4. Materiais e métodos

Desta forma, com o propósito de atingir os objetivos propostos, inicialmente foram coletadas as bases cartográficas da área de estudo, contendo as informações de curvas de nível e hidrografia, obtidas através das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC), em escala 1:10.000, elaboradas no ano de 1979, disponíveis de forma online e gratuita pelo portal DataGeo, mantido pelo governo do estado de São Paulo. Posteriormente, foram coletados os dados litológicos e pedológicos da localidade. Os dados litológicos foram obtidos através do mapeamento realizado por Perinotto e Lino (2010), que realizaram o levantamento das formações geológicas da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, em escala de 1:50.000. Já os dados pedológicos foram obtidos através do trabalho desenvolvido por Koffler *et al.*, (1992), através do levantamento realizado das classes pedológicas da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, em escala de 1:50.000.

Ainda, foram coletadas imagens orbitais e de aerolevantamentos, dos cenários de 1988, 2010 e 2022. As imagens de 1988, coletadas pela empresa Terra Foto S.A, foram disponibilizadas pelo laboratório de cartografia GEOCARTO, do Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental da UNESP de Rio Claro. As ortofotos digitais do cenário de 2010/2011, desenvolvidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), foram coletadas de forma online e gratuita, através do portal DataGeo. Já as imagens do cenário de 2022 foram obtidas através do software Google Earth, de forma gratuita e online.

Neste capítulo são detalhados os procedimentos metodológicos utilizados para a elaboração dos variados mapeamentos realizados ao longo desta pesquisa, assim como as ferramentas usadas. De início, foram mapeadas as características morfométricas do relevo, com a elaboração das cartas de declividade, dissecação vertical, dissecação horizontal e de energia do relevo. Em seguida, foram organizados os dados geológicos e pedológicos. Posteriormente, foram realizados os mapeamentos de uso e ocupação da terra, assim como os mapeamentos geomorfológicos de detalhe, ambos para os cenários de 1988, 2010 e 2022. Logo depois, foram realizados os mapeamentos das Áreas de Preservação Permanente (APP) e de Reserva Legal, incluindo ainda o mapeamento dos compartimentos do relevo. Por fim, no último item deste capítulo, é detalhada a maneira como os dados foram analisados e correlacionados, contribuindo para a elaboração das cartas de uso adequado das terras.

Para esta pesquisa, os mapeamentos foram elaborados através do *software* ArcGis 10.5, em escala de análise de 1:10.000, utilizando o sistema de coordenadas Universal Transverso de Mercator, Fuso 23 Sul, em *datum* SIRGAS 2000.

4.1 Mapeamento morfométrico

Neste tópico são apresentados os procedimentos técnicos para a elaboração das cartas de declividade, dissecação vertical, dissecação horizontal e de energia do relevo. Para a elaboração destas cartas, foram coletadas informações referentes a curvas de nível, com equidistância de 5 metros, e canais fluviais através das cartas topográficas desenvolvidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC, 1979), disponibilizadas de forma online e gratuita através do portal DATAGEO.

4.1.1 Carta de declividade

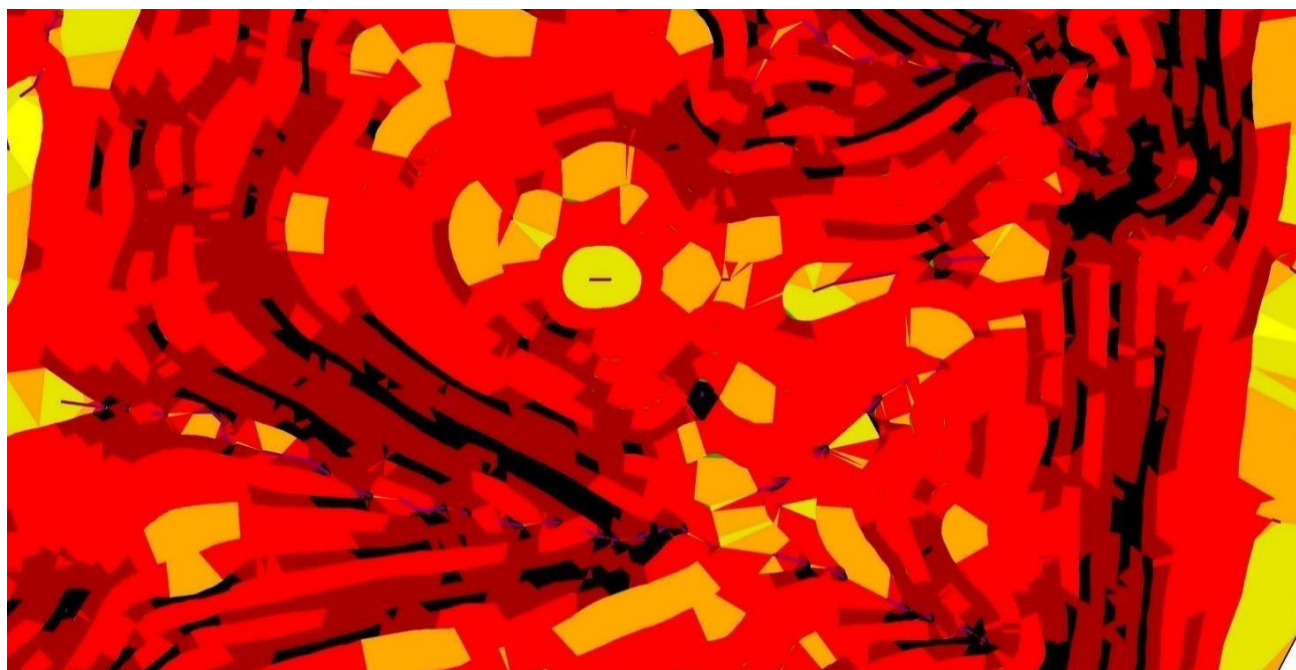
Conforme destaca De Biasi (1970), a carta de declividade evidencia a inclinação real dos terrenos. Por este motivo, se constitui como um documento de grande relevância para o planejamento ambiental, podendo indicar limites a manejos em áreas rurais e estabelecer limitações a ocupação de áreas urbanas, pois denota localidades de potencial fragilidade do relevo, a fim de se evitar processos erosivos e de movimentos de massa (De Biasi, 1992; Brasil, 2012; Zanatta, 2018).

Para o processo de elaboração desta carta, foram tomados por base os procedimentos propostos por De Biasi (1970; 1992). De Biasi (1970) destaca que o cálculo da declividade para um terreno se dá através do espaçamento entre as curvas de nível, da equidistância das curvas e da escala de trabalho.

Desta maneira, no ArcGis através da ferramenta *Slope – 3D Analyst tool*, adicionou-se um arquivo TIN, contendo a elevação do terreno criado a partir das curvas de nível com equidistância de 5 metros. Porém, com a realização do procedimento de forma automática, foram observados alguns erros estabelecidos pelo próprio ArcGis, pois o *software* em alguns casos calcula a declividade entre uma mesma curva, não considerando o valor da curva vizinha, criando setores demasiadamente planos, não representando a real declividade destes terrenos. As principais localidades onde o ArcGis possui dificuldades se encontram em áreas de grandes convexidades, em áreas de topos, em setores côncavos e próximas de cursos d'água.

Buscando corrigir estes erros, foi criado um *shapefile* do tipo linha para a correção destes pontos. Para os setores identificados com erros, foram adicionados pequenos pontos do *shapefile* de correção contendo valor em metros de altitude assim como os utilizados para as curvas de nível, estabelecendo um procedimento de comparação automática do *software* entre a curva de nível e do valor presente no ponto de correção (Figura 3).

Figura 3 – Trecho da carta de declividade, apresentando os setores com correções em roxo



Fonte: Autores

Desta maneira, após a realização dos procedimentos de correção, a carta foi processada novamente de forma automática através da ferramenta *Slope – 3D Analyst tool*, sendo adicionados os valores referentes as curvas de nível e do *shapefile* de correção, gerando um arquivo em formato TIN, contendo a elevação do terreno. Posteriormente, foram adicionadas as classes de declividade estabelecidas para o trabalho. As classes para a área de estudo foram definidas considerando as indicações de De Biasi (1970; 1992), Brasil (1979; 2012), Lepsch (1983) e Zanatta (2018), assim como as características físicas do terreno e a escala de análise. Desta forma, as classes utilizadas foram:

Quadro 1: Classes de declividade

Limite das classes de declividade em porcentagem (%) e em graus (°)	Caracterização e adaptações para a área de estudo
$\leq 2\%$ $\leq 1,14^\circ$	Área com grande possibilidade de inundação (Lepsch, 1983).
2 I-5% 1,14° I- 2,86°	Área com tendência de inundação (Lepsch, 1983).
5I- 10% 2,86° I- 5,7°	Áreas de intenso uso agrícola devido a facilidade de mecanização da agricultura (Stefanuto, 2019).
10I-15% 5,7° I- 8,53°	15% é o limite para a mecanização da agricultura (De Biasi, 1992; Zanatta, 2018).
15 I-30% 8,53° I- 16,69°	Terrenos que apresentam limitações ao uso agrícola devido ao declive, não aptos ao uso de maquinários

	agrícolas (Lepsch, 1983; Zanatta, 2018).
30%-47% 16,69° - 25,17°	Segundo a Lei 6.766/79, áreas com 30% ou mais de declividade são consideradas inapropriadas ao parcelamento do solo para fins de moradia em regiões urbanas (Brasil, 1979).
≥ 47% ≥25,17°	Segundo a Lei 12.651/12, áreas com inclinação entre 25° - 45° é permitido o manejo florestal sustentável e atividades agropastoris, em conjunto a manutenção da infraestrutura física para o desenvolvimento destas atividades, não sendo permitida a conversão de novas áreas, sendo aplicadas apenas em caso de utilidade pública (Brasil, 2012).

Desta forma, a declividade foi mapeada em graus e em porcentagem através do procedimento automático. Ainda, para a elaboração da legenda da carta de declividade, as cores foram selecionadas respeitando a sequência da rosa cromática, iniciando com cores frias para terrenos mais planos e transacionado progressivamente para cores mais intensas em terrenos mais declivosos.

4.1.2 Carta de dissecação horizontal

A carta de dissecação horizontal se apresenta como uma importante ferramenta para a identificação de localidades com concentração de cursos d'água e de nascentes, ao medir a distância em linha reta entre a linha de cumeada e o fundo de vale de cada sub-bacia, indicando setores com maior potencial natural a atuação da dinâmica erosiva fluvial, auxiliando também para a preservação de áreas de nascentes e próximas a cursos d'água (Zanatta, 2018, Bonzanini; Lupinacci; Stefanuto, 2022).

Para a elaboração desta carta, foi utilizada como base a proposta metodológica desenvolvida por Spiridonov (1981), que foi adaptada ao meio digital. Através do ArcGis, foram inseridos os dados de curvas de nível, de cursos d'água e dos limites de cada sub-bacia da área de estudo, traçados a partir dos cursos d'água e das curvas de nível. Posteriormente, foram criados *shapefile* em formato de polígono para cada classe a ser mapeada. Com estes *shapefile* criados, utilizou-se da ferramenta de medição de distância disponível no ArcGis, sendo a distância entre o fundo de vale e o divisor da bacia traçada de forma manual. Quando a distância medida atingiu o valor limite da

respectiva classe, traçou-se o limite da mesma, com o procedimento sendo replicado ao longo de toda a bacia.

As classes foram elaboradas conforme a proposta de Spiridonov (1981), iniciando-se do mínimo mapeável de acordo com a escala (1mm = 10 metros) e dobrando-se os valores para cada classe seguinte, conforme pode ser observado no quadro 2.

Quadro 2: Classes de dissecação horizontal

Classes	Divisão em metros
1	$\leq 10\text{m}$
2	11 -20m
3	21-40m
4	41-80m
5	81-160m
6	161-320m
7	>321m

Ainda, assim como para a carta de declividade, as cores de cada classe foram selecionadas respeitando a rosa cromática, iniciando com cores frias e transacionado progressivamente para cores mais intensas.

4.1.3 Carta de dissecação vertical

A carta de dissecação vertical denota a diferença altimétrica entre o fundo de vale e as linhas de cumeada de cada sub-bacia, considerando os valores das curvas de nível, permitindo a identificação dos setores com maior grau de entalhamento dos vales e, por consequência, as bacias com maior grau de desnível altimétrico, identificando áreas de potencial risco a ocorrência de processos gravitacionais (Cunha, 2001; Gomes *et al.*, 2016; Zanatta, 2018).

Para a elaboração desta carta, foi utilizada como base a proposta de Spiridonov (1981), sendo adaptada ao meio digital. Desta forma, no ArcGis foram inseridas de forma inicial os *shapefiles* contendo as curvas de nível, os cursos d'água e os limites das sub-bacias. Com esses dados inseridos, foram criados 6 *shapefiles* em formato de polígono, cada um representando uma das 6 classes de dissecação vertical. Desta forma, cada classe representa 10 metros de desnível altimétrico em relação ao fundo de vale, assim, partindo do rio com 0m de desnível até a segunda curva de nível, obtém-se 10 metros de desnível, que estará abarcada pela classe 1, e assim sucessivamente para as demais classes, sempre com intervalos de 10 metros. As classes foram

definidas conforme os apontamentos de Spiridonov (1981), através da equidistância entre as curvas de nível (Quadro 3), e suas cores foram estabelecidas seguindo a rosa cromática.

Quadro 3: Classes de dissecação vertical

Classes	Divisão em metros
1	$\leq 10\text{m}$
2	10-20m
3	20-30m
4	30-40m
5	40-50m
6	$\geq 50\text{m}$

4.1.4 Carta de energia do relevo

Partindo da proposta original desenvolvida por Mendes (1993), a carta de energia do relevo foi elaborada a partir dos dados morfométricos, com a junção dos dados coletados pelas cartas de declividade, de dissecação vertical e de dissecação horizontal. Conforme Mendes (1993) estabelece, a carta de energia do relevo visa destacar o potencial do terreno para a geração de processos geomórficos, possuindo graus de intensidade que variam de muito fraco a muito forte.

Para a elaboração desta carta em meio digital foi considerada a adaptação proposta por Zanatta e Ferreira (2015). Desta maneira, no ArcGis, foram inseridos os dados das cartas de declividade, dissecação vertical e de dissecação horizontal. Assim, com a programação via *Python* dentro do próprio ArcGis, definiu-se as classes de energia do relevo, a partir da combinação das classes das cartas morfométricas.

Os dados de declividade, dissecação vertical e de dissecação horizontal foram unidos através da ferramenta *intersect*. Posteriormente, no shapefile gerado pela junção dos dados, criou-se uma coluna de texto com o título “Energia” na tabela de atributos. Com isso, na coluna “Energia” da tabela de atributos, utilizou-se a ferramenta *Field Calculator*, onde se selecionou a opção *Paisir Python*, adicionando os dados em formato de linguagem *Phyton* contidos na Tabela 4, incluindo as informações de dissecação horizontal, vertical e de declividade, e os combinando. Desta forma, gerou-se como resultado da combinação classes de energia do relevo.

Seguindo as propostas de Mendes (1993), Zanatta (2018) e de Bonzanini, Lupinacci e Stefanuto, (2022), a combinação das classes (quadro 4) foi considerada a partir das características geomorfológicas da área de estudo, a saber:

Muito fraca: Contempla os setores de menor declividade, com as menores dissecações verticais e horizontais;

Fraca: Demarca as localidades com pouco declive, baixa dissecação vertical e horizontal;

Média: Destaca os terrenos com intensidades intermediárias de dissecação vertical e dissecação horizontal;

Medianamente Forte: Indica áreas limites para a mecanização da agricultura, com potencial de intensificação dos processos morfogenéticos, pela intensificação da declividade, dissecação vertical e dissecação horizontal.

Forte: Localidades de declividade elevada, com a dissecação vertical em sua classe mais alta e de dissecação horizontal em sua penúltima classe de intensidade. Ainda, constitui-se em setores além do limite para a mecanização agrícola.

Muito Forte: Constitui-se em setores além do limite para o loteamento urbano. Possui declividades muito intensas, algumas com mais de 47% de inclinação do terreno, encontradas principalmente no *front* cuestiforme ou em áreas com a dissecação horizontal em sua classe mais elevada, próximas a confluências de rios da bacia.

Quadro 4: Definição das classes de energia do relevo para a programação via *Phyton*

Classes de energia do relevo	Declividade (%)	Combinação	Dissecação Horizontal (m)	Combinação	Dissecação Vertical (m)
Muito Forte	30 – 47% ≥47%	Ou	≤10 m	-	-
Forte	15 - 30%	Ou	11 – 20m	Ou	≥50 m
Medianamente Forte	10 – 15%	Ou	21 – 40m	Ou	40 – 50m
Média	5 – 10%	Ou	41 – 80m 81 – 160m	Ou	30 – 40m 20 – 30m
Fraca	2 – 5%	Ou	161 – 320m	Ou	10 – 20m
Muito Fraca	≤2%	Ou	≥321 m	Ou	≤10 m

Utilizando do mesmo critério estabelecido por Cunha (2001), Zanatta (2018) e Bonzanini, Lupinacci e Stefanuto, (2022), a classe muito forte fica estabelecida pela declividade e dissecação horizontal em suas classes mais intensas, com a dissecação vertical sendo desconsiderada na

definição da classe muito forte de energia, pois, em áreas de topos suaves e planos ocorre uma generalização da classe mais forte da dissecação vertical, principalmente no reverso do relevo cuestasiforme.

Por fim, assim como as demais cartas morfométricas, as cores de cada classe de energia do relevo foram estabelecidas a partir da rosa cromática.

4.2 Mapeamento dos dados geológicos

Para a elaboração do mapeamento das formações geológicas na área de estudo, foi utilizado como base o mapa geológico desenvolvido por Perinotto e Lino (2010), em escala de análise de 1:50.000. Na área de estudo, de acordo com o mapeamento realizado por Perinotto e Lino (2010), são encontradas as Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

Como maneira de calibrar os limites das formações para a escala de trabalho (1:10.000), foram realizados trabalhos de campo, onde buscou-se identificar as litologias em afloramentos, próximos a rios, de solos muito rasos e em rupturas de relevo. Nos locais com identificação dos afloramentos, houve o registro fotográfico e a coleta das coordenadas de cada ponto com o uso de um *Global Position System* (GPS), modelo Garmin Etrex 10. Posteriormente, as informações coletadas foram adicionadas ao ArcGis, junto as curvas de nível com espaçamento de 5 m, por onde os limites das formações geológicas foram retrabalhadas. As cores atribuídas para cada formação seguiram a proposta de Sousa (2002).

4.3 Mapeamento de dados pedológicos

Para a elaboração do mapeamento das classes pedológicas foi utilizado como base o mapa de solos elaborado por Koffler *et al.*, (1992), em escala de análise de 1:50.000.

Desta forma, os dados foram reunidos no ArcGis, no qual os limites das classes de solos foram retrabalhados de acordo com a declividade da área de estudos. Entende-se que as classes de Latossolos Vermelhos, Nitossolos Vermelhos e Neossolos Litólicos Eutróficos estão associadas a Formação Serra Geral, com suas áreas de ocorrência variando de acordo com a declividade. As áreas de maior declive e com a ocorrência da Formação Serra Geral, foram mapeadas como de abrangência dos Neossolos Litólicos Eutróficos, enquanto as localidades de topos, foram mapeadas como localidades de ocorrência dos Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos.

A classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos foi reconhecida como de ocorrência sobre os arenitos da Formação Piramboa, contemplando declives de no máximo 30%, como explicam Oliveira e Prado (1984). Já a classe Latossolos Vermelho-Amarelos são associadas a relevos suaves e aos arenitos da Formação Botucatu, por isso, foram mapeados apenas no reverso do relevo

cuestiforme. Ainda, a realização de trabalhos de campo ao longo do andamento da pesquisa auxiliou na identificação dos limites das classes.

As cores para a representação das classes pedológicas foram obtidas através da classificação brasileira de solos, elaborada pela EMBRAPA (2018), por meio das informações em RGB para cada uma das classes encontradas na área de estudo.

4.4 Cartografia retrospectiva

Foram realizados mapeamentos de uso e ocupação da terra e geomorfológicos dos cenários de 1988, 2010 e 2022. Para o cenário de 1988, foram utilizadas fotografias aéreas elaboradas pela empresa Terra Foto S.A, em escala de 1:40.000, fornecidas pelo Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental da UNESP de Rio Claro. Para o cenário de 2010, foram utilizadas as ortofotos digitais elaboradas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), em escala 1:25.000, obtidas de forma online e gratuita através do portal DATAGEO, mantido pelo Governo do Estado de São Paulo. Por fim, para os mapeamentos do cenário de 2022, foram utilizadas imagens orbitais disponibilizadas pela Google, através do software Google Earth, trabalhadas no ArcGis através da extensão *Portable Base map Server* 3.1.

Ainda, para o mapeamento geomorfológico, foram elaborados anáglifos para os cenários de 1988 e de 2022. A geração de anáglifos permite a visualização do relevo em três dimensões através da tela do computador, permitindo a identificação de elementos sobressalentes na superfície, como rupturas de relevo, afloramento rochosos e grandes feições erosivas. O procedimento de elaboração dos anáglifos foi feito através do software *Stereo PhotoMaker*, seguindo as orientações de Souza e Oliveira (2012) e de Miyazaki e Oliveira (2020). O procedimento não foi realizado para o cenário de 2010 por limitações das imagens coletadas pela EMPLASA, uma vez que estas não possuem sobreposição de terreno suficiente para gerar um anáglifo de boa qualidade.

4.4.1 Mapeamento geomorfológico

Para o mapeamento geomorfológico, foram utilizadas como base as propostas de Tricart (1965) e de Verstappen e Zuidam (1975). Conforme destaca Tricart (1965), a elaboração da carta geomorfológica proporciona a obtenção de dados que permitem a observação da relação entre a morfoestrutura e os agentes esculturadores do relevo. Verstappen e Zuidam (1975) destacam que a carta geomorfológica é um importante instrumento para o planejamento ambiental, ao se coletar informações importantes da superfície, como de feições erosivas e de áreas de potencial fragilidade do terreno.

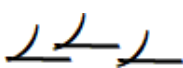
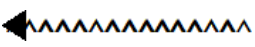
Desta forma, conforme Tricart (1965), a elaboração das cartas geomorfológicas passa por inúmeras etapas de elaboração e o material deve apresentar os seguintes dados: Morfometria, representada pelas curvas de nível e cursos d'água; Morfografia, destacada pelo mapeamento das formas de relevo, como as rupturas topográficas, formas de vertentes, formas de fundo de vales e de feições erosivas; Morfogênese, evidenciada pelo mapeamento através de símbolos que representam os processos originários das formas, como os processos denudativos, feições resultantes da ação das águas e do modelado antrópico. Ainda, foram inseridos os dados litológicos, a fim de apresentar a cronologia das formações geológicas que sustentam as formas de relevo.

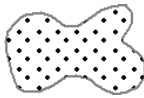
Para os mapeamentos dos cenários de 1988, 2010 e 2020, buscou-se destacar feições denudativas, principalmente as que possuem origem através do escoamento superficial da água, incluindo ainda feições de origem estrutural e de interferência antrópica sob o modelado.

Para a elaboração do mapeamento geomorfológico no ArcGis, para cada uma das feições mapeadas, criou-se um *shapefile*. A partir do *shapefile* criado, editou-se o símbolo (Quadro 5) individualmente dentro das opções disponíveis no software, utilizando como base as orientações de Paschoal *et al.*, (2010). Ainda, a simbologia utilizada no mapeamento foi organizada com base nas propostas elaboradas por Tricart (1965), Verstappen e Zuidam (1975) e Boin *et al.*, (2014), cabendo ainda algumas adaptações de acordo com as características da área de estudo e pela escala de análise, assim como por algumas limitações do sistema de criação de símbolos do ArcGis.

Quadro 5: Simbologia do mapeamento geomorfológico

Grupos	Elementos/Formas	Símbolo	Fonte
Litologias e Formas de Origem Estrutural	Cretáceo – Formação Serra Geral		Sousa (2002)
	Jurássico – Formação Botucatu		Sousa (2002)
	Triássico – Formação Pirambóia		Sousa (2002)
	<i>Front de Cuesta</i>		Verstappen e Zuidam (1975)
	Patamar Estrutural		Verstappen e Zuidam (1975)
	Crista Estrutural		Verstappen

				e Zuidam (1975)
Formas de Vertente e Interflúvio	Vertente e interflúvio	Côncava		Verstappen e Zuidam (1975)
		Convexa		Verstappen e Zuidam (1975)
		Retilínea		Verstappen e Zuidam (1975)
		Colo Topográfico		Tricart (1965)
	Feições de Origem Denudativa	Terracetes		Verstappen e Zuidam (1975)
		Cicatriz de Deslizamentos		Adaptado de Tricart (1965)
		Marca de Erosão Laminar		Verstappen e Zuidam (1975)
		Sulcos Erosivos		Verstappen e Zuidam (1975)
		Ravinas		Tricart (1965)
		Talude de Voçoroca		Tricart (1965)

	Ruptura Topográfica	Suave		Tricart (1965)
		Abrupta		Tricart (1965)
Ações das Águas Correntes	Fundos de Vale e Águas Pluviais	Fundo Plano		Verstappen e Zuidam (1975)
		Fundo Encaixado		Verstappen e Zuidam (1975)
		Canal Pluvial		Tricart (1965)
	Formas de Acumulação	Área de Acumulação de Planície e de Terraço Fluvial		Tricart (1965)
		Leque Aluvial		Tricart (1965)
Modelados Antrópicos	Terraço Agrícola			Verstappen e Zuidam (1975)
	Cava de Mineração Desativada			Verstappen e Zuidam (1975)
	Ruptura de Relevo Antrópica			Adaptado de Tricart (1965)
	Lagos			Convenção Cartográfica

	Bacia de Contenção		Boin <i>et al.</i> ; (2014)
Morfometria	Curva de Nível		Convenção Cartográfica
	Linha de Cumeada Suave		Tricart (1965)

Ainda, optou-se por destacar os símbolos de origem antrópica em vermelho, visando diferenciá-los dos demais símbolos mapeados. O critério de coloração foi pensado a partir das orientações de Paschoal *et al.*, (2010).

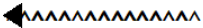
Para o exercício do mapeamento, as imagens dos cenários de 1988 e de 2022 foram avaliadas com o auxílio da estereoscopia, que permitiu a obtenção de dados estruturais e a identificação de feições erosivas. Para o cenário de 2022, o mapeamento de feições realizadas por interpretação das imagens foi complementado através de atividades de campo.

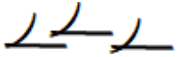
A partir da base cartográfica, foram identificadas as formas de vertentes, os canais pluviais, cursos d'água permanentes, linha de cumeada e colo topográfico, sendo passível de identificação através do contorno das curvas de nível. As rupturas de relevo foram identificadas a partir da interpretação das imagens, das curvas de nível e do uso da estereoscopia, assim como para a identificação do *front* cuestiforme, dos patamares estruturais e das cristas estruturais.

Para a representação das formações geológicas foram utilizadas as cores originais apresentadas por Sousa (2002), referentes as Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral.

Já para as feições de origem denudativa, como as marcas de erosão laminar, sulcos, ravinas, voçorocas, assim como feições de origem a partir de processos gravitacionais, como terracetes e cicatrizes de deslizamentos, foram observados aspectos das imagens os quais são apresentados no quadro 6.

Quadro 6: Identificação de feições denudativas

Símbolo	Feição no relevo	1988	2010	2022
	Marcas de erosão laminar			
	Sulco			
	Ravina			

	Voçoroca			
	Terracetes			
	Cicatriz de deslizamento		Não existe neste cenário	Não existe neste cenário

Para a identificação das marcas de erosão laminar foram analisadas, seguindo as imagens de cada cenário, a presença de manchas de solo exposto; na fotografia área de 1988, por ser preto e branco, se apresenta em tons de branco; nos cenários de 2010 e de 2022 se apresentam em tons de vermelho e de branco, a depender da composição do material superficial.

Os sulcos foram identificados por pequenos canais preferenciais de escoamento da água em superfície, semelhantes a um risco, sem a presença de formação de taludes laterais, por serem de pequenas dimensões verticais. Algumas vezes podem possuir solo exposto.

As ravinas possuem um aprofundamento vertical maior em relação aos sulcos erosivos, porém, sem o afloramento do nível freático, e podem ser identificadas através das fotografias aéreas e das imagens orbitais pela presença de talude vertical, em tons de branco e de vermelho, incluindo a presença de sombreamento gerado pela profundidade da feição erosiva. O uso da estereoscopia também auxiliou na identificação destas feições.

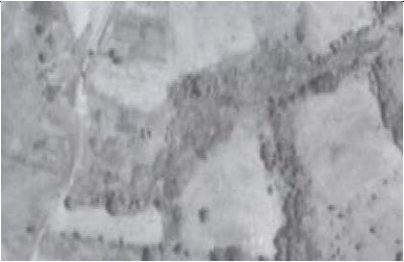
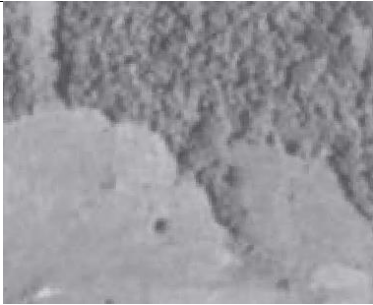
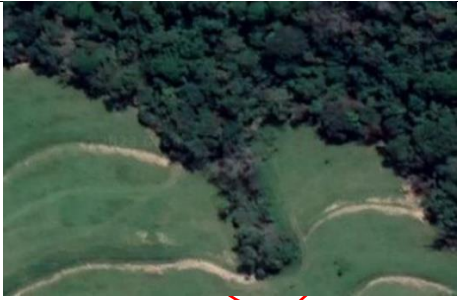
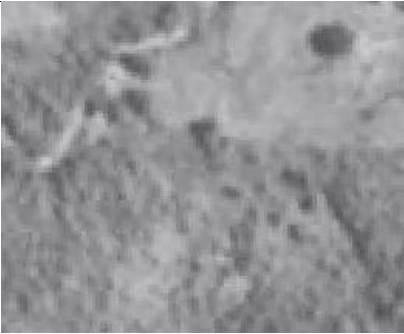
As voçorocas possuem identificação muito semelhante à das ravinas, com aprofundamento vertical significativo da feição erosiva, contendo talude lateral exposto e com a presença de sombreamento na imagem gerado pela profundidade em terreno. Porém, sua diferenciação perante a ravina se dá pela presença de um curso d'água em seu interior, a partir do afloramento do nível freático. A interpretação das imagens em estereoscopia também auxiliaram na identificação destas feições.

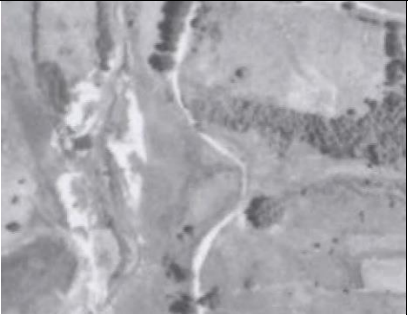
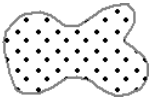
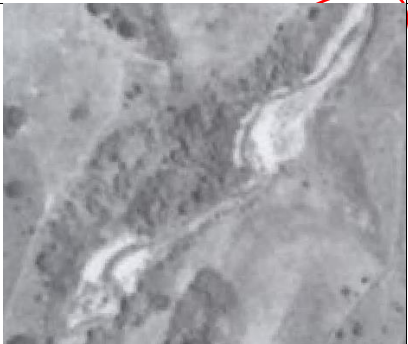
Os terracetes foram identificados a partir das imagens pela textura que estes promovem em superfície, gerando pequenos degraus, geralmente em vertentes bem inclinadas, e passível de identificação apenas quando não há a presença de vegetação de grande porte, sendo de fácil visualização em áreas de pastagem.

Já as cicatrizes de deslizamento foram identificadas apenas no cenário de 1988. Estas puderam ser obtidas através da identificação de grandes áreas de solo exposto em vertente inclinada, com a cabeceira da feição em formato circular, indicando um movimento de massa com origem gravitacional.

As feições identificadas como ações das águas correntes mapeadas constituem os fundos de vale plano, fundo de vale encaixado e as áreas de terraço e de planície fluvial - APTF (Quadro 7). Ainda, pela escala de trabalho, as áreas de terraço e de planície fluvial foram mapeadas em conjunto.

Quadro 7: Ações das águas correntes

Símbolo	Feição no relevo	1988	2010	2022
	Fundo de vale plano			
	Fundo de vale encaixado			
	Canal pluvial			

	Leque Aluvial			
	APTF			

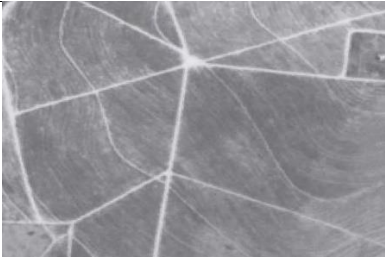
Primeiramente, para o mapeamento das feições de fundo de vale plano e de fundo de vale encaixado, identificaram-se os setores com a presença de curso d'água permanente através da interpretação das imagens. Posteriormente, para diferenciar os tipos de fundo de vale, além da interpretação das imagens, para os cenários que possuem anáglifos, utilizaram-se destes para a identificação de canais mais profundos (em forma de V) e de canais menos profundos e mais planos, típicos de áreas de planície. Ainda, os canais pluviais foram identificados a partir das imagens e da interpretação das curvas de nível, com a presença de concavidades contínuas indicando a presença de um curso d'água pluvial.

As localidades com a presença de leques aluviais foram mapeadas a partir da interpretação das imagens, ao serem identificados em setores de confluência de cursos d'água, originários a partir de sedimentos de transporte fluvial depositados, formando áreas de deposição que são chamadas de leques aluviais.

Para as áreas de planície e terraço fluvial (APTF) foram observados os terrenos no entorno dos rios que apresentam aspecto plano e que eram passíveis de serem individualizados como polígonos na escala de trabalho. As áreas de terraço se constituem por localidades de antigas áreas de deposição fluvial. Possuem limite superior na base da vertente, e limite inferior nas planícies fluviais. As áreas de planície fluvial se caracterizam por serem áreas com inundações periódicas em períodos chuvosos, possuindo delimitação entre o leito menor dos rios e a base das vertentes ou o talude do terraço fluvial, quando este existe.

Como feições de modelado antrópico, foram mapeados os terraços agrícolas, as cavas de mineração desativadas, rupturas de relevo antrópicas, lagos e bacias de contenção (quadro 8).

Quadro 8: Modelado antrópico

Símbolo	Feição no relevo	1988	2010	2022
	Terraços agrícolas			
	Cava de mineração desativada			

	Ruptura de relevo antrópica			
	Lagos	Não existe neste cenário		Não existe neste cenário
	Bacias de contenção			

Os terraços agrícolas se constituem por estruturas antrópicas, construídas ao longo de vertentes para viabilizar e melhorar a condição do terreno para o plantio, na região comumente associado ao cultivo de cana-de-açúcar. Os lagos são oriundos de trabalhos de represamento, executados por ação antrópica. As bacias de contenção são feições no relevo criadas artificialmente, visando a contenção e barramento de águas pluviais em áreas próximas a lavouras e em bordas de estradas rurais. Já as feições de cava de mineração desativada e ruptura de relevo antrópica foram identificadas a partir da interpretação das imagens e com o auxílio da estereoscopia. A cava de mineração desativada está presente na área de estudo desde o cenário de 1988, bem próxima a rodovia Washington Luiz, indicando uma atividade de mineração abandonada desde este período. Já as rupturas de relevo antrópica, se trata de degraus de amplitude significativa no relevo, de origem antrópica, e estão em sua maioria associadas ao aterramento da rodovia Washington Luiz e bem próximas a esta.

4.4.2 Mapeamento de uso e ocupação da terra

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, o mapeamento do uso e ocupação da terra é uma importante ferramenta para o planejamento ambiental e para o monitoramento do ambiente, uma vez que permite a identificação da variação dos padrões de uso em diferentes cenários históricos, como a expansão de áreas urbanas e de áreas de cultivo em direção a áreas de preservação (IBGE, 2013).

Para o IBGE (2013), a realização de um bom mapeamento de uso passa pela definição de quatro elementos fundamentais: a escala de mapeamento, a natureza da informação básica a ser representada, a unidade de mapeamento e a nomenclatura de cada elemento representado. Desta forma, para a elaboração dos mapeamentos de uso e ocupação da terra nos cenários de 1988, 2010 e 2022, foi tomada por base a proposta do IBGE (2013), junto aos critérios de fotointerpretação de Ceron e Diniz (1966).

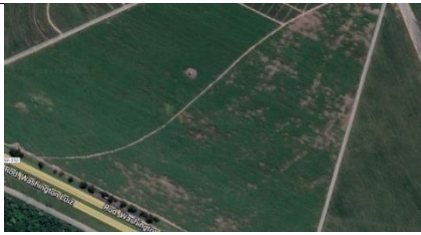
Para a elaboração dos mapeamentos, a partir da interpretação das imagens, criaram-se *shapefiles* em formato de polígono para cada uma das classes identificadas para o respectivo cenário a ser mapeado. A organização da legenda foi elaborada seguindo a proposta do IBGE (2013), assim como a definição das cores para cada classe de uso. Em alguns casos, foi necessária a adaptação de cores de representação das classes, uma vez que na escala de trabalho 1:10.000, foram identificados maiores detalhes, contemplando um maior número de classes (Quadro 9)

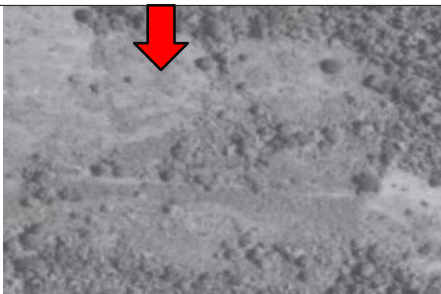
As classes foram caracterizadas da seguinte maneira: Área construída, demarca localidades com a presença de construções rurais, como casas e barracões; cana-de-açúcar que delimita a área de cultivo desta planta; cultura anual, destaca os setores de cultivo de plantas de ciclo de duração

com tempo de um ano; citricultura, demarca as áreas com a presença do cultivo de laranja na região; lagos, delimita as localidades onde houve o barramento das águas pela ação antrópica; pasto limpo, são os setores cujo o manejo da pastagem se dá por mecanização ou pelo corte manual de árvores, deixando o local com pouca presença de árvores, predominando as gramíneas na paisagem; pasto sujo, destaca as localidades de pastagem com a presença de árvores e arbustos, evidenciando um manejo de menor cuidado com a pastagem quando comparado ao pasto limpo; silvicultura, são as áreas de plantio de eucalipto; solo exposto, destaca as áreas sem cobertura vegetal, deixando o solo aparente na paisagem; vegetação arbustiva, evidencia as áreas com a predominância de arbustos ou de pequenas árvores; vegetação de porte florestal, demarca as áreas com a presença de vegetação arbórea e por fim a classe de vegetação rasteira, demarcada pela vegetação de baixo porte, não ocorrendo a atividade econômica de criação de animais nestas localidades. O quadro 9 demonstra como cada classe pode ser identificada através das imagens.

Para o processo de elaboração das cartas de uso e ocupação a partir das classes definidas, através do uso dos *shapefile* em formato polígono, ocorreu a delimitação para cada setor a partir do uso da ferramenta *Straight Segment Trace*. Posteriormente, para cada cenário, visando a comparação entre os usos, foi quantificada a área ocupada por cada classe por meio da ferramenta *Calculate Geometry* disponível no ArcGis, através da tabela de atributos.

Quadro 9. Chave de identificação do Uso e Ocupação da Terra na área de estudo

Classes/Cores	1988	2010	2022
Área Construída RGB: 245, 122, 122.			
Área da Rodovia SP-310 RGB: 255, 0, 0.			
Cana-de-açúcar RGB: 255, 255, 0.			
Cultura Anual RGB: 230, 152, 0.			

Citricultura (1988 e 2010)/Abacate (2022) RGB: 230, 191, 0.			
Lagos RGB: 0, 92, 230.	Não existe neste cenário		Não existe neste cenário
Pasto Limpo RGB: 255, 85, 0.			
Pasto Sujo RGB: 168, 56, 0.			

Silvicultura RGB: 115, 76, 0.	Não existe neste cenário		
Solo Exposto RGB: 130, 130, 130.			
Vegetação Arbustiva RGB: 76, 230, 0.			
Vegetação de Porte Florestal RGB: 56, 168, 0.			

Vegetação Rasteira RGB: 251, 251. 158.			
---	---	---	---

Ainda, para todos os cenários, foram mapeadas as estradas rurais não pavimentadas, e foi incluído para cada cenário o *shapefile* dos cursos d'água identificados através do mapeamento geomorfológico, sem as formas de fundo de vale.

4.5 Mapeamento dos compartimentos do relevo

Para a elaboração desta carta, utilizou-se como base a proposta de Rodriguez *et al.*, (1995). Conforme destaca Rodriguez *et al.*, (1995), o mapeamento dos compartimentos do relevo permite o levantamento de informações referentes a natureza dos terrenos, a partir de suas características como de áreas de emissão, transmissão ou de coleta de fluxos de energia, matéria e de informação (EMI).

Para Rodriguez *et al.*, (1995), as áreas emissoras se caracterizam por setores localizados em níveis topográficos mais elevados, possuindo responsabilidade por garantir fluxos de EMI para o restante da área. Os setores descritos como transmissores possuem a característica de fornecer o traslado dos fluxos de EMI, normalmente encontradas em vertentes e patamares (Rodriguez *et al.*, 1995). Ainda, as áreas coletoras são normalmente correlacionadas a setores de planícies aluviais e de terraços fluviais, concentrando, acumulando e coletando os fluxos de EMI. Por estarem próximas aos cursos hídricos, podem ainda possuir a função de transmissão de energia e matéria através das correntes hídricas, garantindo a comunicação das áreas inferiores e médias da bacia (Rodriguez *et al.*, 1995).

Para a elaboração desta carta em meio digital, foram consideradas as adaptações propostas para o software ArcGis desenvolvidas por Zanatta (2018). De início, adicionou-se os *shapefiles* das curvas de nível e dos cursos fluviais. A partir destas informações, foram criados *shapefile* em formato de polígono para cada uma das áreas de compartimentos do relevo, a saber: Áreas transmissoras – vertente concava, vertente irregular, vertente convexa e vertente retilínea, Áreas emissoras – topos e Áreas coletoras – planície e terraço fluvial. Com os *shapes* criados, foram analisadas as características das curvas de nível e dos cursos d'água da bacia, delimitando os setores de cada um dos compartimentos do relevo. Ainda, o *shapefile* referente a área coletora de planície e de terraço fluvial foi utilizado da área mapeada como APTF no mapeamento geomorfológico do cenário de 2022.

4.6 Mapeamento das Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal (Lei N° 12.651/12)

No ano de 2012, foi estabelecida a Lei N° 12.651 que dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, conhecida como novo código florestal. Entre outras providencias, estabelece a delimitação de áreas de preservação permanente, incluindo faixas marginais de cursos d'água, nascentes, áreas

de restinga e de manguezais, vertentes com mais de 45° de inclinação, borda de tabuleiros, entre outras localidades (Brasil, 2012). Ainda, estabelece áreas de Reserva Legal dentro das propriedades particulares, variando de 80% de Reserva Legal para propriedades localizadas na Amazônia Legal, 35% no cerrado e 20% em demais áreas, incluindo áreas de mata atlântica (Brasil, 2012).

Desta forma, para o mapeamento das Áreas de Preservação Permanente (APP) foram utilizadas as diretrizes estabelecidas pela Lei N° 12.651 de 2012. Seguindo a lei, foram mapeadas usando *shapefile* em formato de polígonos: 30 metros de preservação para faixas marginais dos cursos d'água com até 10 metros de largura; 50 metros de raio de área no entorno das nascentes; 100 metros de área a partir da linha de ruptura do relevo em áreas de borda de tabuleiro ou chapada; e áreas cuja declividade é igual ou superior a 45° (100%) de inclinação (Brasil, 2012).

Para a delimitação por meio de *shapefile* das APPs de 30 metros de preservação para faixas marginais de cursos d'água, foi utilizada a ferramenta Buffer, disponibilizada na aba toolboxes do ArcMap, que permitiu a criação de um polígono constante de 30 metros para a faixa marginal de todos os cursos d'água da bacia. O mesmo procedimento foi realizado para a delimitação das APPs de 50 metros de raio no entorno das nascentes e de 100 metros para a borda de tabuleiro ou de chapada.

Já para o mapeamento das áreas que possuem declividade igual ou superior a 45° (100%), o *shapefile* desta classe foi obtido a partir da carta de declividade da área de estudo, que foi elaborada de forma automática através do ArcMap, utilizando a ferramenta *Slope -> 3D Analyst tool*.

Já os dados referentes a áreas de Reserva Legal, foram obtidas através do Cadastro Ambiental Rural (CAR), disponível de forma online através da plataforma federal SICAR – Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural. Através da plataforma, foi feito o download dos *shapefile* em formato de polígono referente a área de Reserva Legal declarada por cada proprietário rural.

Por fim, foram quantificadas as áreas de APP e de Reserva Legal que não apresentam vegetação nativa, a partir do cenário de 2022. Foi calculada também a área de sobreposição indevida de Reserva Legal declarada, sobre as áreas de APP.

4.7 Cartas de Uso Adequado das Terras

Para a elaboração das cartas de uso adequado das terras, foram consideradas todas as informações obtidas através do material elaborado ao longo do presente trabalho. A começar, os dados das feições erosivas lineares (sulco, ravinas e voçoroca), obtidos ao longo dos três cenários mapeados nas cartas geomorfológicas (1988, 2010 e 2022), foram quantificados a partir das classes

de energia do relevo, declividade, compartimentos do relevo, classes de solo e de uso da terra, a fim de identificar as classes mais problemáticas frente aos processos erosivos lineares.

Para isso, as feições erosivas lineares foram transformadas em polígonos. Seguindo a proposta original de Zanatta (2018), aos sulcos erosivos, que são mapeados nas cartas geomorfológicas através de *shapefile* em formato de linha, foi adicionado um *buffer* de 5cm de entorno, obtendo-se assim a área desta forma. O *buffer* no entorno dos sulcos erosivos com 5cm se justifica pela escala de mapeamento realizada, uma vez que em escala de 1:10.000, não seria possível o mapeamento das áreas reais ocupadas por um sulco erosivo.

Já as ravinas, mapeadas através de *shapefile* em formato de ponto, foram mapeadas novamente através de um *shapefile* em polígono, considerando o limite da forma erosiva destacado pelos taludes. O mesmo procedimento foi realizado para os taludes de voçoroca. Originalmente, os taludes foram mapeados através de um *shapefile* de formato linha, sendo necessário portanto mapear tais feições novamente através de um *shapefile* em formato de polígono, considerando tais taludes como limites deste polígono.

Após esses procedimentos, através da ferramenta *clip*, disponível de forma gratuita no *ArcMap*, os polígonos das classes de solos, declividade, energia do relevo, compartimentos do relevo e de uso da terra foram recortadas a partir da área das formas erosivas. O procedimento foi realizado para cada cenário mapeado através da cartografia geomorfológica (1988, 2010 e 2022), visando obter a área de cada feição erosiva inserida em cada classe, de cada uma das variáveis.

Assim, os dados foram calculados seguindo os procedimentos a seguir:

Primeiro, foram contabilizadas as áreas totais em m² de cada feição erosiva em cada classe das variáveis, conforme pode ser observado na tabela 1.

Tabela 1: Área total das feições erosivas lineares em cada compartimento de relevo ao longo dos cenários monitorados

Compartimentos do relevo	Área (m ²)	Sulco (m ²)			Ravina (m ²)			Voçoroca (m ²)		
		1988	2010	2022	1988	2010	2022	1988	2010	2022
Vertente Retilínea	774378	225	195	71	4017	532	1993	772	3	0
Vertente Irregular	1447206	197	309	197	1142	530	2060	0	0	0
Vertente Concava	2619882	482	669	252	19421	8959	11235	16391	1090	5221
Vertente Convexa	4142935	977	1396	959	11947	5438	4619	8911	1023	1462
Área de Topo	356569	59	135	52	146	0	387	0	0	0
Área de APTF	73466	11	19	0	0	10	0	118	313	68

Posteriormente, foi gerada uma porcentagem referente a área ocupada pelas feições erosivas em cada classe, em cada um dos três cenários monitorados. Para atingir esse resultado, foi levado em consideração a área total ocupada pela feição ao longo da bacia, sendo possível de se calcular a porcentagem de área ocupada por feição em cada classe, conforme pode ser observado pela tabela 2, onde é ilustrado como exemplo a ocorrência de ravinas sobre os compartimentos de relevo.

Tabela 2: Porcentagem de área ocupada pelas ravinas em cada compartimento de relevo

Compartimentos do relevo	Área (%)	Área ocupada pelas ravinas (%)		
		1988	2010	2022
Vertente Retilínea	8,2%	11%	3,4%	9,3%
Vertente Irregular	15,3%	3,1%	3,4%	10,2%
Vertente Concava	27,8%	53%	58%	55,6%
Vertente Convexa	44%	32,5%	35,1%	22,8%
Área de Topo	3,7%	0,3%	0%	2%
Área de APTF	0,78%	0%	0,06%	0%

Em seguida, para cada uma das classes, foram somados os valores obtidos nos três cenários, sendo estes divididos por três, gerando assim uma média dos três cenários em porcentagem. Com a média calculada, os valores foram divididos pela área total ocupada pela classe da variável, também em porcentagem. Os valores obtidos na divisão para cada classe temática foram divididos pelo maior valor encontrado, obtendo-se assim a relação de proporcionalidade, variando entre zero e um, sendo o um o valor que indica maior intensidade (Tabela 3).

Tabela 3: Relação de proporcionalidade entre as feições erosivas e os compartimentos de relevo para os três cenários mapeados

Compartimentos do relevo	Sulcos	Ravinas	Voçorocas
Vertente Retilínea	0,75	0,48	0,01
Vertente Irregular	0,6	0,17	0
Vertente Concava	0,63	1	0,35
Vertente Convexa	1	0,3	0,11
Área de Topo	0,82	0,09	0
Área de APTF	0,45	0,01	1

Todos esses procedimentos foram realizados para as cartas de compartimento de relevo, energia do relevo, declividade e de solos. Para as cartas de uso da terra, o procedimento foi realizado de forma similar, porém, não foi gerado uma média geral para todos os três cenários para se calcular a relação de proporção, mas sim para o cenário mais recente, uma vez que as classes de uso da terra se modificam ao longo dos anos monitorados.

A partir da análise dos dados obtidos ao longo da pesquisa, adquiridos através das cartas morfométricas, das classes de solos, da cartografia geomorfológica e dos dados das áreas de APP, elaborou-se as cartas de Uso Adequado das Terras em ambiente de relevo cuestiforme.

De início, para obter o uso adequado das terras em área de relevo cuestiforme, objetivo principal deste trabalho, destaca-se a cartografia geomorfológica retrospectiva como um importante pilar para a análise da área de estudo junto das demais variáveis. Importante ressaltar as feições erosivas lineares mapeadas nos três cenários considerados (1988, 2010 e 2022), que foram mapeadas por área ocupada em m². Para alguns processos de voçorocamento, foi identificado efeito de borda entre as voçorocas localizadas nos fundos de vale com as ravinas e sulcos em média e baixa vertente, assim como constatado por Zanatta (2018), em sua área de estudo. Com isso, evidencia-se a complexidade entre as feições erosivas, denotando um sistema erosivo em algumas localidades, conectando as áreas mais elevadas das vertentes, com a presença de sulcos e de ravinas, com as áreas mais baixas, onde se localizam as voçorocas.

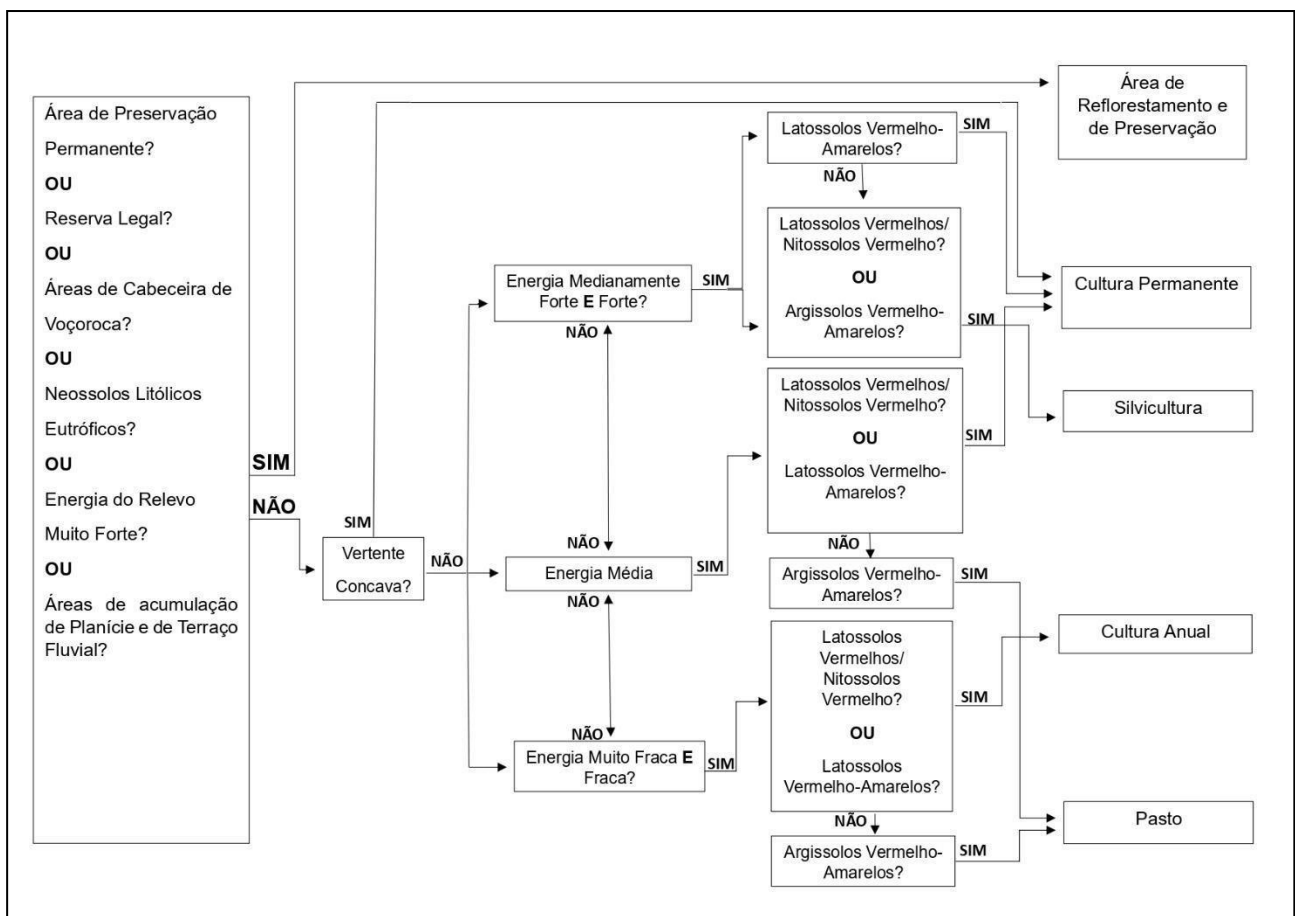
A morfometria do relevo se demonstrou essencial. Como definidores da capacidade de uso, as cartas de energia do relevo e de declividade evidenciam os setores da bacia com os maiores potenciais de geração de processos erosivos lineares, quando observadas as feições ao longo dos três cenários mapeados na cartografia geomorfológica retrospectiva. A análise das declividades e da energia do relevo junto das feições erosivas lineares auxiliou na constatação do efeito de vizinhança, conforme será discutido nos resultados.

O mesmo pode ser dito perante as classes de solo mapeadas na área de estudo. A partir da correlação entre as feições erosivas lineares mapeadas, identificou-se as classes pedológicas mais vulneráveis ao longo dos anos de 1988, 2010 e 2022. Já os compartimentos do relevo correlacionados com as feições erosivas, indicaram quais destes setores são os mais vulneráveis a erosão acelerada, havendo variação significativa para cada tipo de feição linear. Ainda, a correlação entre as feições erosivas lineares mapeadas foi feita junto das classes de uso da terra mapeadas para os cenários de 1988, 2010 e de 2022, tornando possível a identificação dos usos da terra de maior potencial para a geração de processos erosivos.

Desta maneira, a comparação entre as classes das variáveis e as feições erosivas lineares serviram de base para a elaboração das propostas metodológicas. Desta forma, foram elaboradas duas propostas de capacidade de uso, a ideal e a viável, com a primeira se caracterizando como de maior complexidade perante as variáveis de definição das classes, com a viável se apresentando como uma proposta de menor complexidade de elaboração. Para ambas as propostas, foram definidas as classes de uso: Cultura anual; Cultura Permanente; Silvicultura; Pasto e Reflorestamento. Para cada uma das classes, as definições de uso foram variadas para cada proposta, com exceção das áreas de reflorestamento, que seguiram critérios similares para ambas as cartas.

A partir destas variáveis, a árvore de decisão da carta ideal de uso adequado das terras se configurou conforme exposto na figura 4.

Figura 4: Arvore de decisão para identificar o uso adequado das terras, proposta ideal

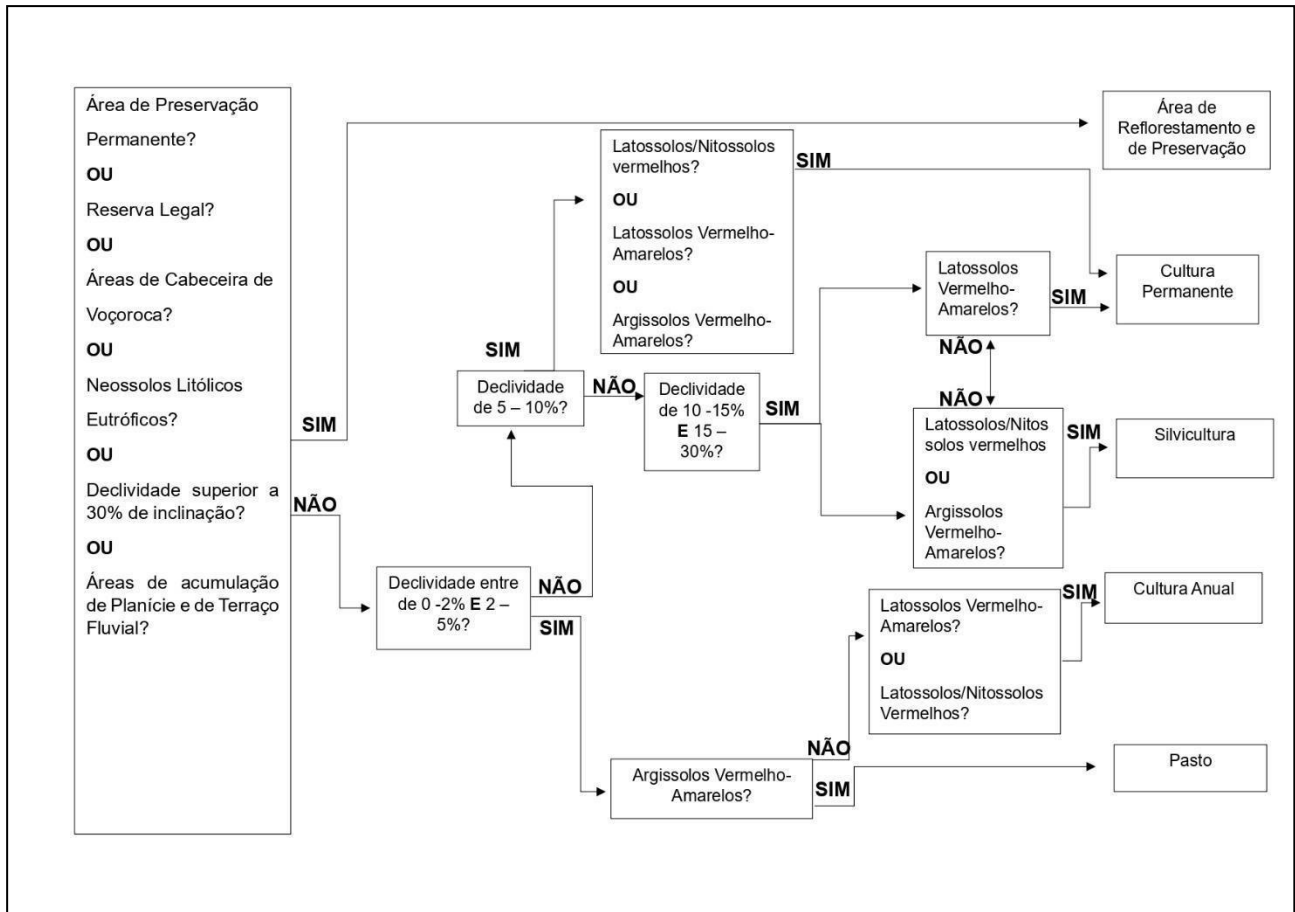


Fonte: Autores

Já a proposta viável, que busca uma simplificação em sua elaboração ao substituir a carta de energia do relevo pela declividade e desconsiderar os compartimentos do relevo, foi elaborada levando em consideração os critérios de: Declividade; Classes de Solo; áreas de APP; Reserva legal,

Áreas de Acumulação de Planície e de Terraço Fluvial (APTF) e de áreas de cabeceira de voçoroca. A partir destas variáveis, a árvore de decisão da carta viável de uso adequado das terras se configurou conforme exposto na figura 5.

Figura 5: Arvore de decisão para identificar o uso adequado das terras, proposta viável



Fonte: Autores

Para ambas as cartas, a classe de Áreas de Reflorestamento e de Preservação se caracterizam por terrenos de maior fragilidade, representados primeiramente pelas Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal, seguindo a Lei N° 12.651 de 2012, restringindo o uso da terra nestas localidades. Ainda, para ambos os cenários, foram consideradas as áreas de cabeceira de voçoroca, sendo estas localidades demarcadas a partir das voçorocas identificadas para o cenário de 2022, com todo o setor que drena para estas erosões sendo considerados de preservação.

A classe de Neossolos Litólicos Eutróficos foi considerada como de Áreas de Reflorestamento e de Preservação por se constituem como solos de textura muito variada e de baixa coesão, o que facilita a ocorrência de processos erosivos mesmo com a baixa profundidade, além de se misturarem com os setores de tálus do relevo cuestasiforme. Ainda, são solos formados em áreas de grande declividade, o que confere a área em que estes solos se localizam como de grande energia

de escoamento, que com a presença de vegetação de porte florestal, pode diminuir esta potencialidade. A inclusão da classe de Neossolos Litólicos Eutróficos contribui ainda para a criação de uma faixa contínua de proteção próxima ao relevo de cuestas, o que impede a aplicação de outros usos no interior da faixa verde, evitando a entrada de usos econômicos nestes setores já fragilizados. Não obstante, não é indicado o uso econômico da terra em áreas com a presença de Neossolos e com relevo declivoso, conforme expõe a EMBRAPA (2023): “Já em ambientes de relevos mais declivosos, os Neossolos mais rasos apresentam fortes limitações para o uso agrícola relacionadas à restrição a mecanização e à forte suscetibilidade aos processos erosivos”, p. 1.

Também, as Áreas de Acumulação de Planície de Terraço Fluvial foram alocadas para a classe de maior proteção, uma vez que estes terrenos são essenciais para a preservação dos recursos hídricos, evitando o assoreamento.

Ainda se tratando dos terrenos mais suscetíveis aos processos erosivos, para a proposta ideal, foi considerada a classe muito forte de energia do relevo, uma vez que estas áreas possuem elevado potencial de escoamento cuja energia pode impactar as demais áreas da bacia, fato evidenciado pela relação de vizinhança observado nas análises dos resultados. Para a proposta viável, os terrenos com mais de 30% de declividade foram considerados como inapropriados a aplicações econômicas de uso da terra, uma vez que a alta declividade torna estas áreas um grande risco ao se retirar a vegetação de porte florestal local.

Se tratando da cultura permanente, foram considerados os terrenos que apresentam ainda certa suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos. Com uma série de restrições, o uso destes terrenos para culturas permanente deve ser feito de maneira cuidadosa e muito planejada por parte dos proprietários. Ainda, para a proposta ideal, as áreas de concavidades da área de estudo que não estejam sob as áreas de reflorestamento, devem possuir no máximo o uso da terra para a cultura permanente, pois, compreende-se que estes usos conferem uma boa proteção do solo quando bem estabelecidos, e pelo ciclo de duração do cultivo ser extenso, o que diminui as chances de expor as camadas superficiais do solo.

As áreas destinadas ao cultivo da silvicultura se constituem como aquelas que ainda se apresentam suscetíveis aos processos erosivos. É indicado o uso da silvicultura nestas localidades por apresentar grande proteção do solo, por se constituírem como vegetações de grande porte e pelo ciclo de plantio e de colheita ser longo. As áreas indicadas como ideais para esse cultivo se constituem onde a energia do relevo é medianamente forte e forte para a proposta ideal, ou declividades variando entre 10 e 30% na proposta viável, sobre os Latossolos/Nitossolos Vermelhos e os Argissolos-Vermelho-Amarelos para ambas as propostas.

No entanto, não se recomenda o plantio da silvicultura em áreas côncavas, devido ao tempo mais curto de replantio em relação as culturas permanentes observadas na área de estudo. Embora a silvicultura forneça uma boa proteção ao solo, o tempo de replantio varia entre 6 e 8 anos para a indústria de celulose e 12 a 13 anos para a madeira cerrada, conforme apontado pela EMBRAPA (2000). Este fato torna este tipo de cultivo menos interessante do ponto de vista da permanência da proteção do solo em relação a outras culturas, como a laranja e o abacate, que possuem o ciclo de produção superior a 20 anos (Mergulhão, 2018).

Processos erosivos foram observados em áreas com características similares e com o cultivo de silvicultura. Bonzanini e Lupinacci (2022) identificaram ravinas ativas em áreas deste cultivo na região de Botucatu (SP), devido ao manejo incorreto destas áreas, justamente no período de intervalo de produção, quando as mudas estão em sua maioria muito jovens, conferindo baixa proteção ao solo na localidade. Como as áreas côncavas se apresentam como áreas de intenso escoamento superficial e com grande incidência de voçorocamentos na área de estudo, indica-se na proposta ideal que estas áreas, quando não inseridas na classe de reflorestamento e preservação, devam apresentar cultura permanente.

As localidades indicadas como de cultura anual se caracterizam como um dos terrenos mais estáveis da área de estudo, o que pode ser indicado para este tipo de atividade econômica, desde que o manejo seja feito de forma cuidadosa e com a presença de bacias de contenção, visando a diminuição do transporte de material em superfície transportado para o sistema hídrico. Constituem-se como setores de relevos planos, de declividade variando entre 0 e 5% na proposta viável, com energia do relevo entre muito fraca e fraca, na proposta ideal. Para ambas as propostas, os solos indicados são as classes de Latossolos/Nitossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho -Amarelos. Estas combinações indicam áreas de baixa ocorrência de processos erosivos, com solos bem desenvolvidos, passível de uso para o cultivo anual.

Por fim, as áreas indicadas como de uso destinado ao pasto se caracterizam como as áreas mais estáveis da área de estudo, por apresentarem declividade muito baixa (0-5%) e energia do relevo de baixo potencial erosivo (muito fraca, fraca e média). Embora estejam sobre a classe de solo Argissolos-Vermelho-Amarelos, considerados de grande potencial erosivo, em ambas as propostas, as áreas indicadas para a atividade de pastagem possuem baixa ocorrência destas feições, justamente pela pouca declividade e energia muito fraca, fraca e média. Porém, a atividade de pastagem nestas localidades deve ser feita com o correto manejo, sem o uso excessivo do terreno, evitando o sobrepastoreio, o que pode desencadear em processos erosivos futuros. Desta forma, a partir destas variáveis foi possível estabelecer as duas propostas de capacidade de uso da terra para áreas degradadas e com a presença do relevo de *cuestas*, a partir da adaptação realizada da proposta

original desenvolvida por Zanatta (2018), utilizada como base para a realização destes procedimentos.

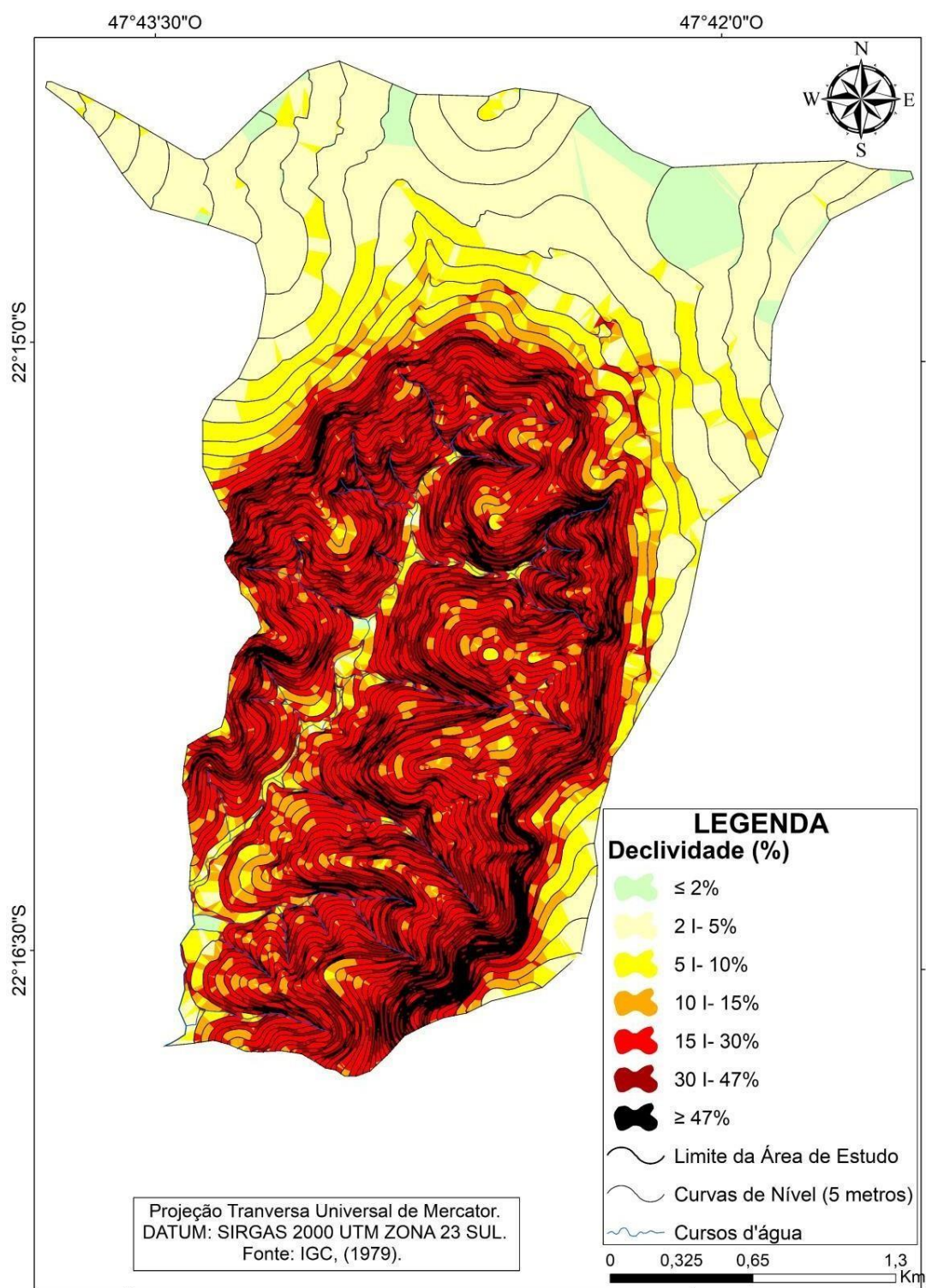
5. Resultados

Os resultados foram organizados em três tópicos. O primeiro tópico intitulado “Características Naturais do Relevo e suas Relações com o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares”, busca compreender as características morfométricas do relevo e os setores naturalmente frágeis, estabelecendo relação entre as características naturais dos terrenos e dos solos com a formação das feições erosivas lineares. O segundo tópico intitulado “O Uso e a Ocupação da Terra e o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares” busca analisar as mudanças no padrão de uso da terra na área de estudo, além de identificar quais padrões possuem maior relação com a geração das feições erosivas lineares. O terceiro tópico “O Uso Adequado das Terras” discute os resultados obtidos através das propostas metodológicas estabelecidas, indicando as principais diferenças entre as propostas viável e ideal.

5.1. Características Naturais do Relevo e suas Relações com o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares

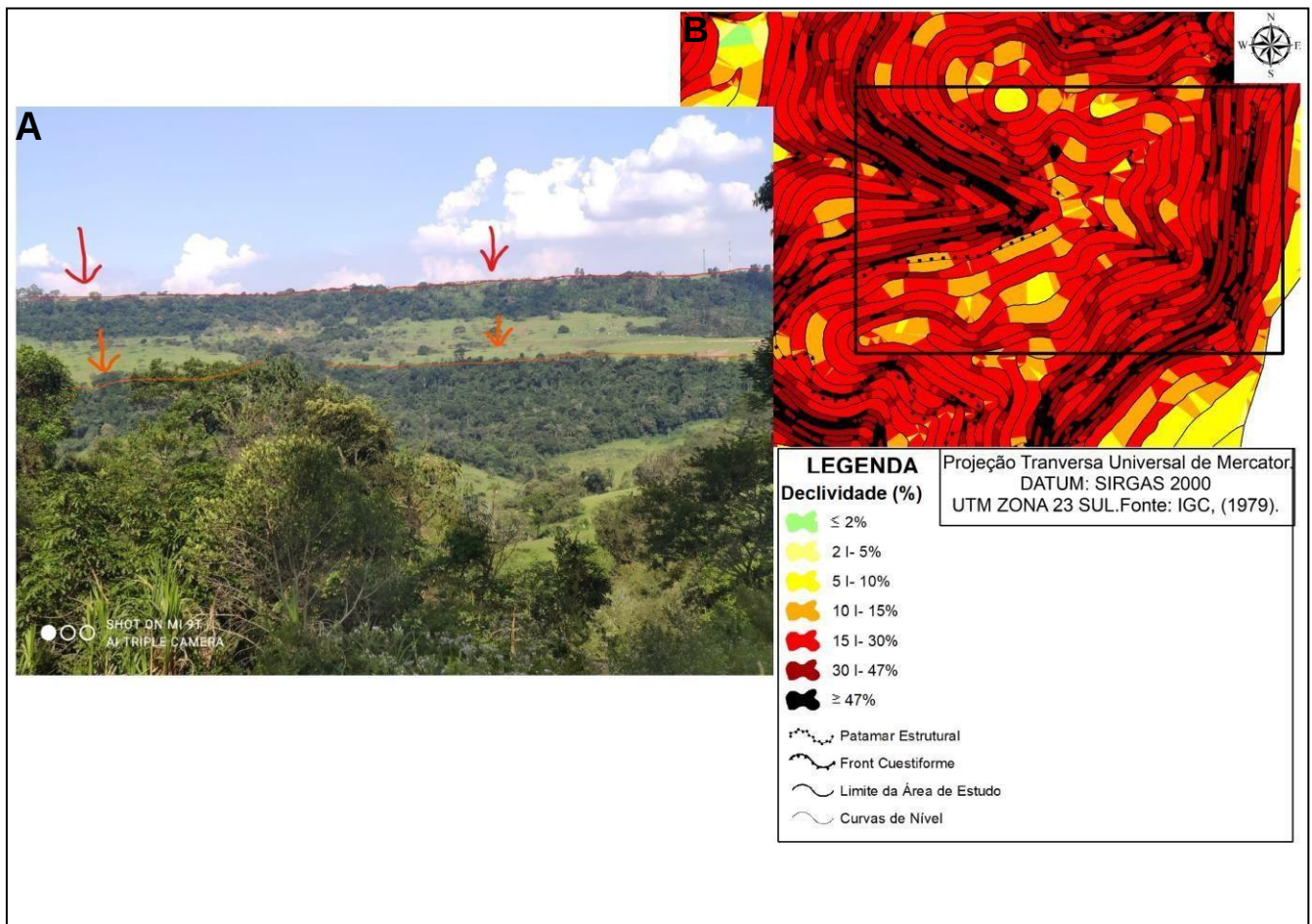
A declividade da bacia (Figura 6) destaca a presença do *front* cuestiforme, marcado pelas cores em tons de vermelho e de preto, denotando uma declividade variando de 15% a áreas com mais de 47%.

Figura 6 – Declividade da alta bacia do Rio Cabeça.



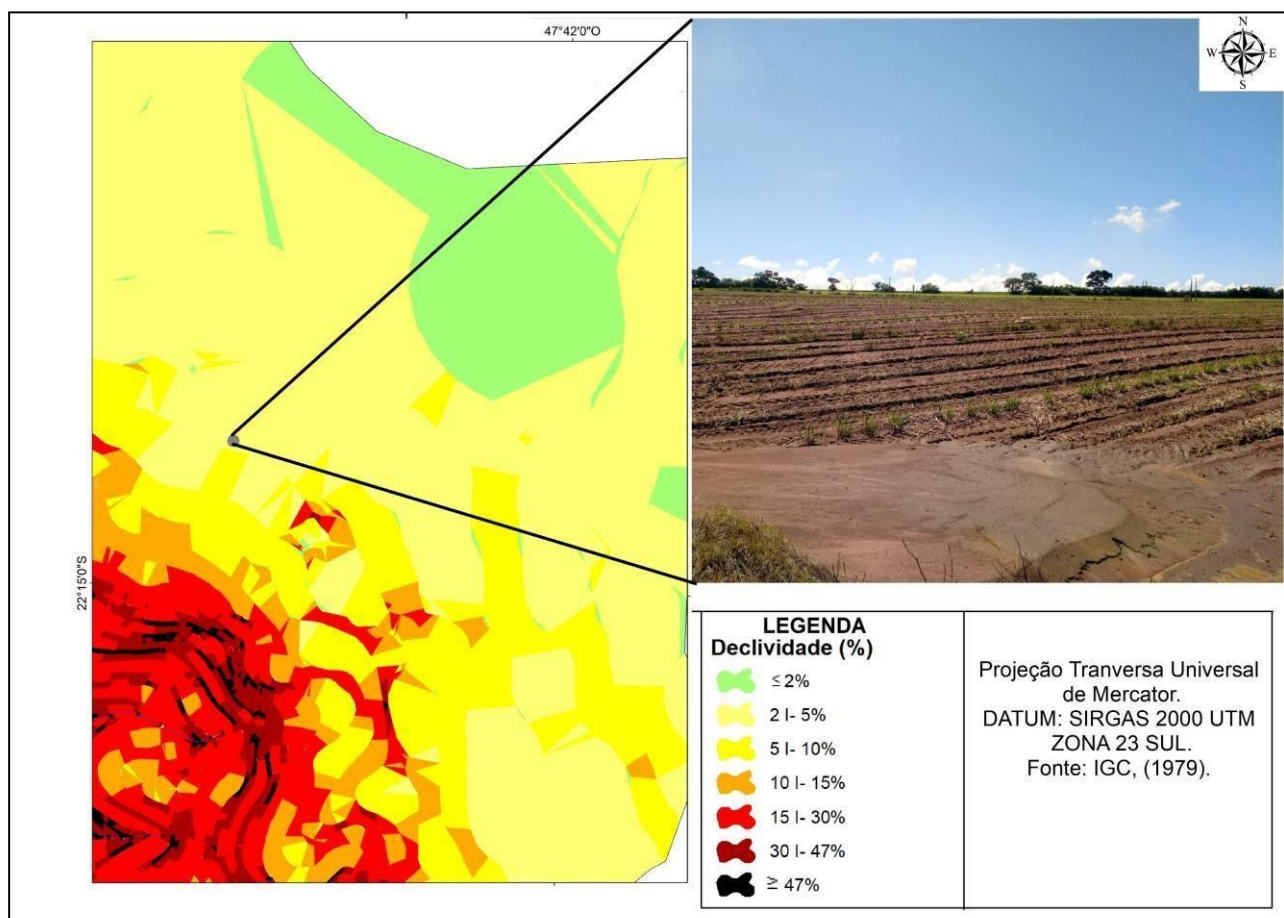
Destaca-se ainda que no setor cuestiforme, a declividade evidencia a existência contínua de um *front* bem demarcado, com a presença de patamares estruturais destacados, em cotas de menor altitude do que o *front*, com descontinuidades ao longo da bacia e com áreas de topos suaves, formando uma conjuntura de degraus na paisagem (Figura 7).

Figura 7 – Em A: Fotografia de campo com um patamar estrutural em primeiro plano destacado pela seta em laranja, e em segundo plano o front cuestiforme destacado em vermelho. Em B: Setor fotografado em campo recortado na carta de declividade.



As menores declividades da bacia, evidenciadas pelas cores em tons de amarelo e de verde (figura 6), estão majoritariamente concentradas no reverso do relevo cuestiforme e no fundo de vale do rio principal da bacia. Para a área de reverso, observa-se extenso setor com declividade muito suave (Figura 8), variando entre 0 e 10%.

Figura 8 -Fotografia do reverso do relevo de cuesta, destacando a baixa declividade da região.



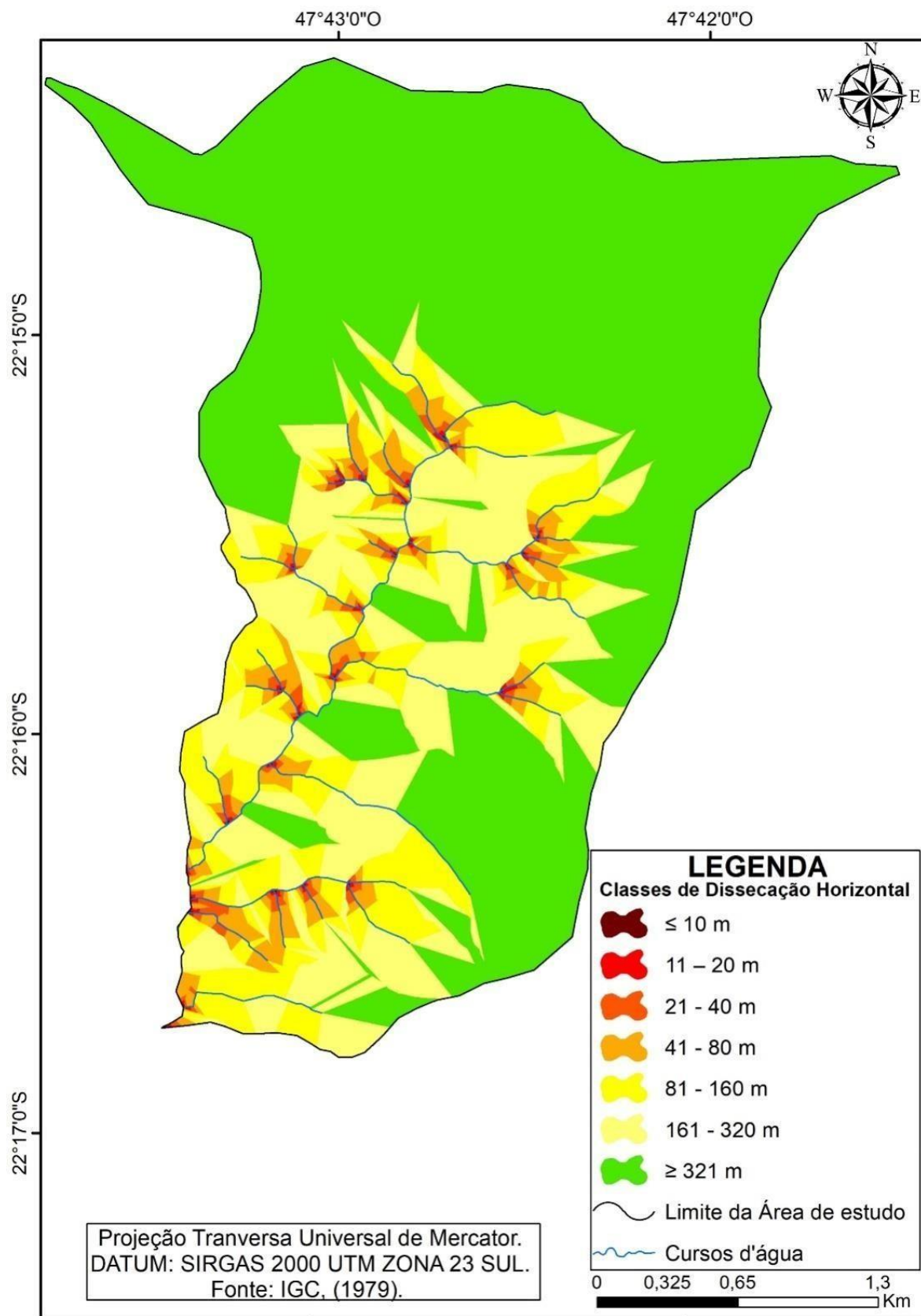
Ainda se tratando da declividade na área de estudo, as classes que mais se destacam são as de 2 a 5%, 15 a 30% e de 30 a 47%, como pode ser observado pela Tabela 4. Conforme apontado, as classes de 15-30% e de 30 a 47% se concentram principalmente nas áreas do *front* cuestiforme e nos patamares estruturais, enquanto a classe de 2 a 5% de declividade se encontra principalmente no reverso cuestiforme, pouco inclinado.

Tabela 4: Área ocupada pelas classes de declividade na área de estudo

Classes de declividade	Área ocupada pelas classes de declividade em m ²	Área ocupada pelas classes de declividade em porcentagem
Até 2%	320401 m ²	3,3%
2 – 5%	2528047 m ²	26,7%
5 – 10%	1219527 m ²	13%
10 – 15%	837870 m ²	8,8%
15 – 30%	2719758 m ²	28,7%
30 – 47%	1452887 m ²	15,3%
Maior ou igual a 47%	374017 m ²	3,9%

A carta de dissecação horizontal permite observar a presença de áreas de concentração de nascentes de cursos d'água ao longo da bacia (Figura 9), assim como as confluências entre tais cursos. As áreas de entorno do *front* cuestiforme e dos patamares estruturais concentram os setores de nascentes, marcados pelo contato da região da Depressão Periférica com o setor do relevo de *cuestas*.

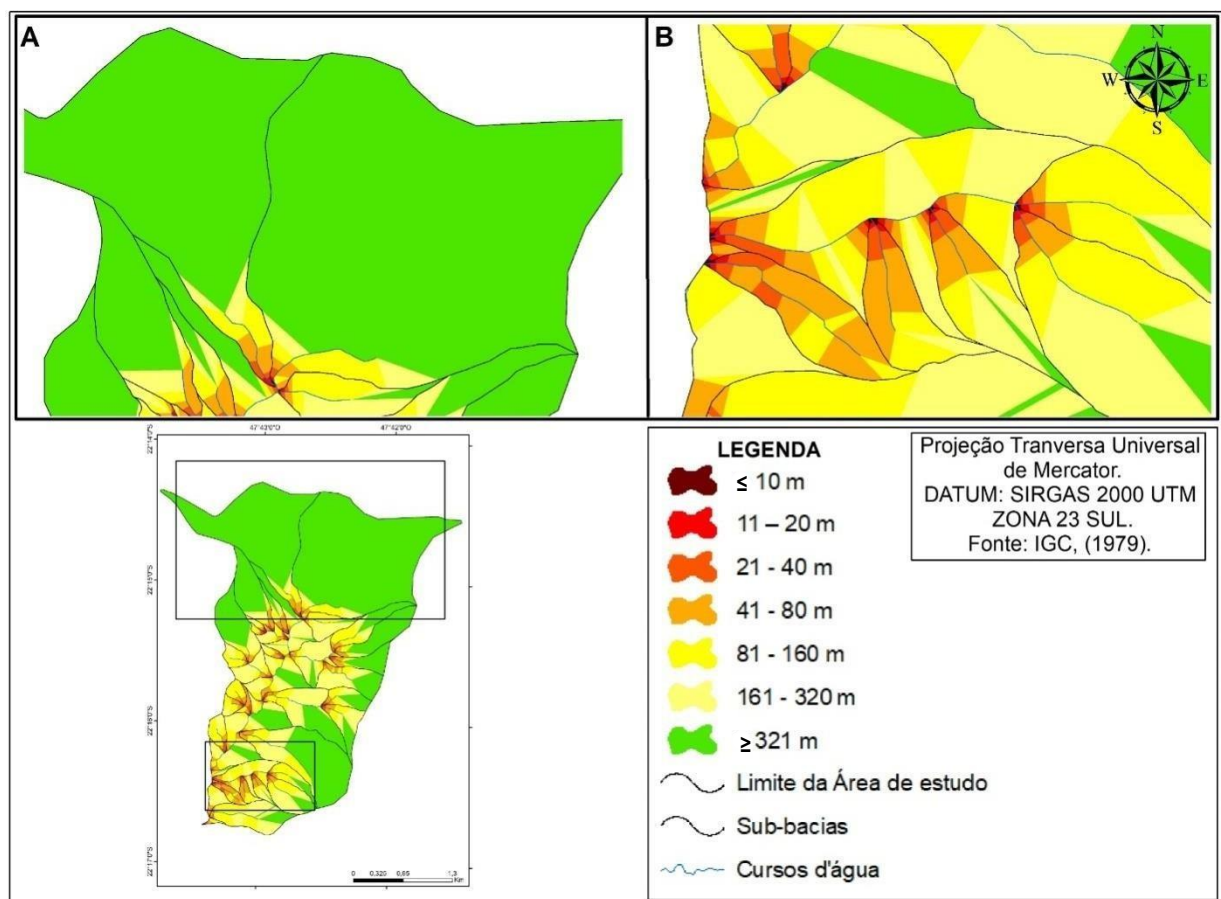
Figura 9 – Dissecação Horizontal da alta bacia do Rio Cabeça.



Desta maneira, as áreas de maior concentração de nascentes possuem coloração em tons de vermelho, laranja e amarelo na carta de dissecação horizontal, enquanto os setores de menor concentração de nascentes, principalmente no reverso do relevo de *cuestas*, estão marcados pela cor verde. Ainda, para as áreas do reverso, evidencia-se a presença de grandes sub-bacias, pois os tons de verde marcam setores drenados por interflúvios amplos, com áreas distantes do curso d'água, o que demonstra a baixa densidade de drenagem (Figura 10A) do setor norte.

A partir do *front* cuestiforme em direção a Depressão Periférica, o afloramento de água nas áreas de maiores declives proporciona a geração de nascentes, sendo demarcada a concentração fluvial por tons de vermelho, laranja e amarelo (Figura 10B). Este setor possui um maior número de cursos fluviais, com menor distância entre estes, evidenciando uma interferência fluvial mais intensa na denudação do relevo e da paisagem quando comparado ao setor de reverso do relevo cuestiforme.

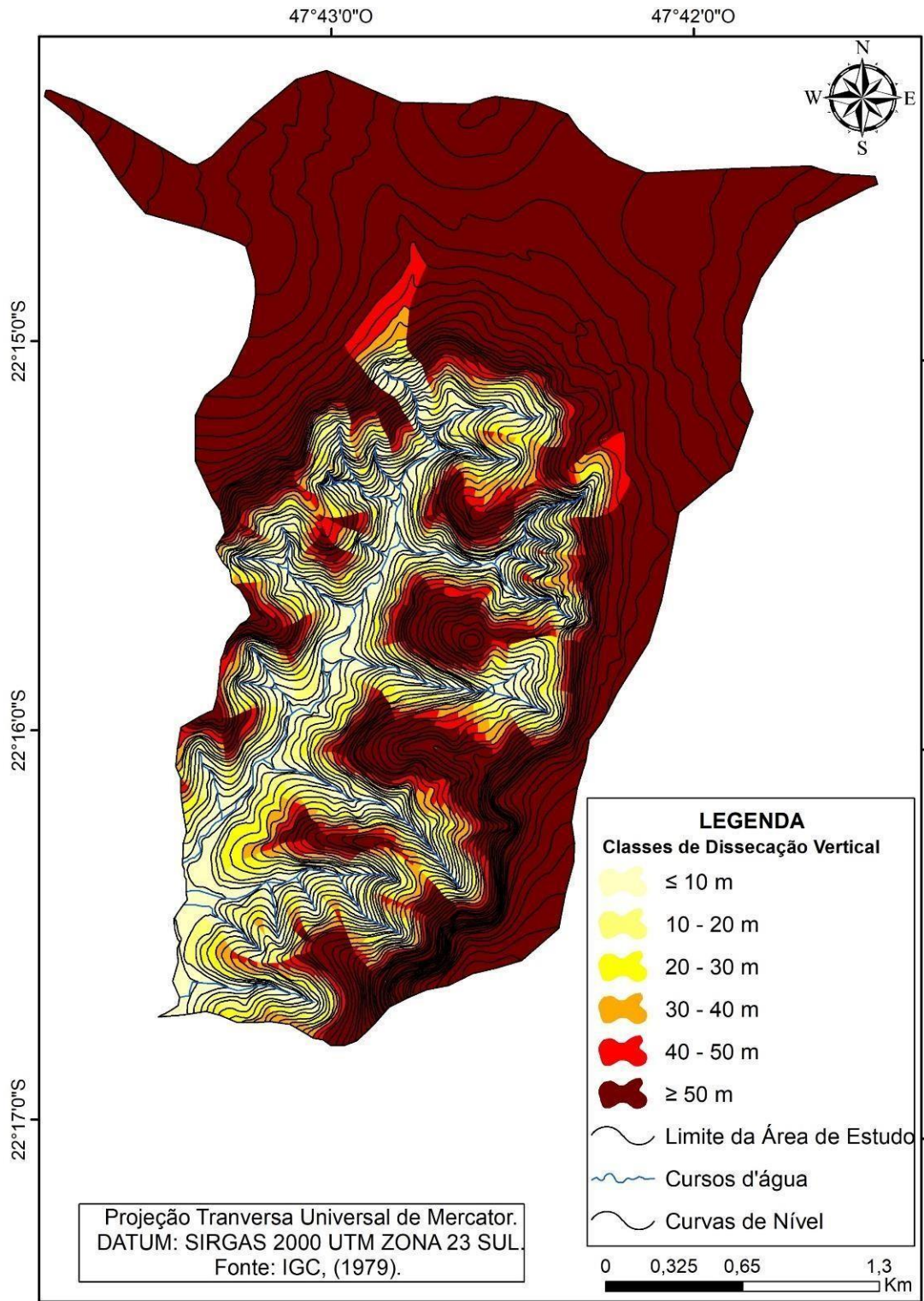
Figura 10– (A) Setor de baixa dissecação horizontal no reverso cuestiforme; (B) Setor de dissecação horizontal mais intensa em área de depressão periférica.



Quanto a dissecação vertical, a bacia caracteriza-se pela predominância de tons de vermelho e marrom (Figura 11). Destaca-se que a carta de dissecação vertical, ao quantificar a diferença

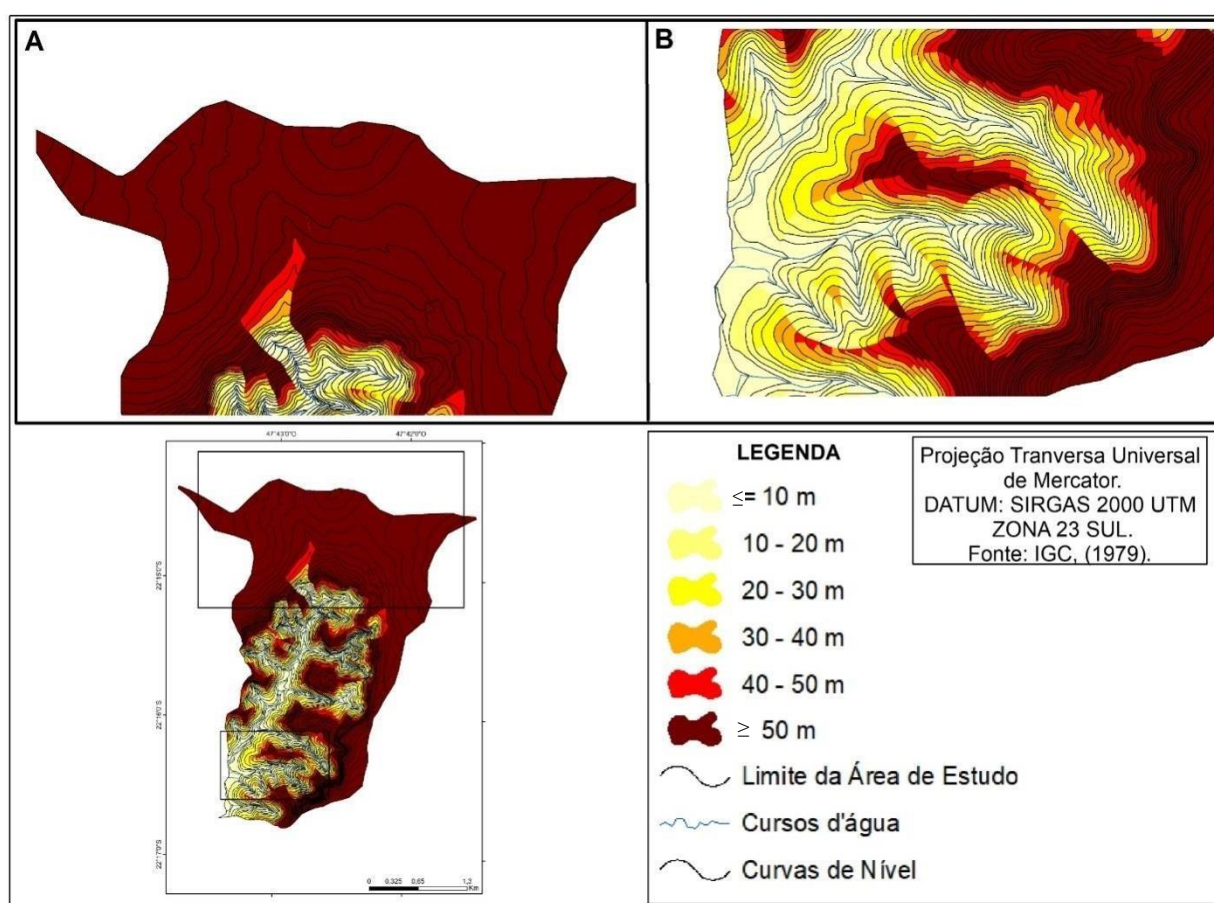
altimétrica entre os fundos de vale e a linha de cumeada de cada sub-bacia, considerando a equidistância das curvas de nível, apresenta setores de maior dissecação em posição topográfica bastante diversa da carta de dissecação horizontal, avaliando as localidades de topo e do reverso do relevo cuestiforme como as áreas de maior intensidade de dissecação.

Figura 11 – Dissecação Vertical da alta bacia do Rio Cabeça.



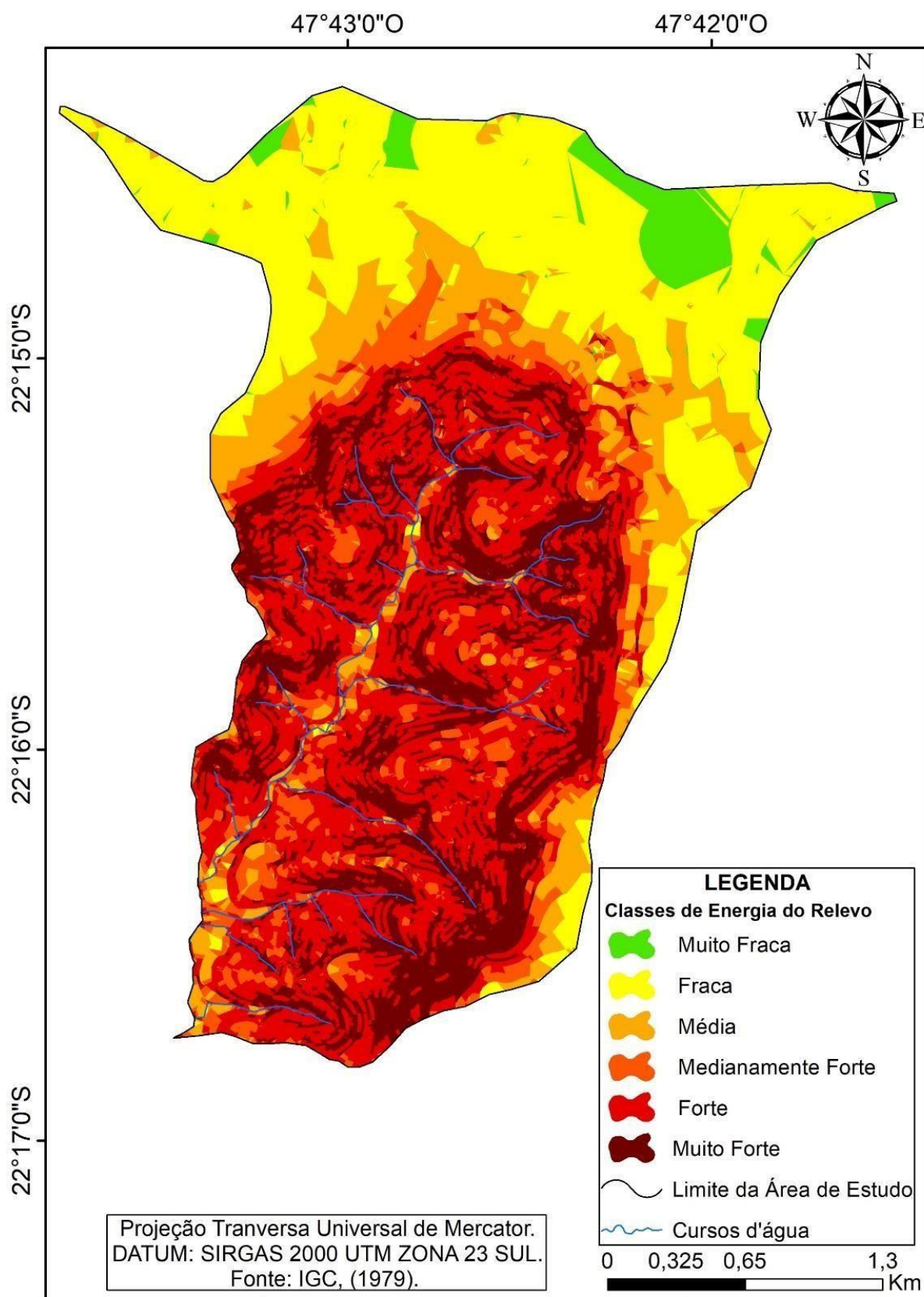
Desta forma, as áreas de nascentes e de concentração de cursos d'água com muitas confluências são mapeadas como de menor dissecação vertical, como a região sul da bacia (Figura 12A). Ainda, as áreas com poucas nascentes e de sub-bacias de grandes dimensões possuem as maiores dissecações verticais, por possuírem grandes variações altimétricas, como as sub-bacias que abarcam rios que se desenvolvem na Depressão Periférica e que possuem seus divisores no reverso do relevo cuestiforme (Figura 12B).

Figura 12 - (A) Setor de dissecação vertical no reverso cuestiforme; (B) Setor de dissecação vertical em área de depressão periférica.



Quanto a energia do relevo, esta destaca o setor de *front* cuestiforme em toda a sua extensão pelas classes forte e muito forte de energia, em tons de vermelho e de vermelho escuro (Figura 13). Para este setor, fica em evidência o intervalo entre o *front*, setores de tálus e os patamares estruturais, englobando as áreas de topo dos patamares estruturais e de vertentes medianamente inclinadas.

Figura 13- Energia do Relevo da alta bacia do Rio Cabeça.

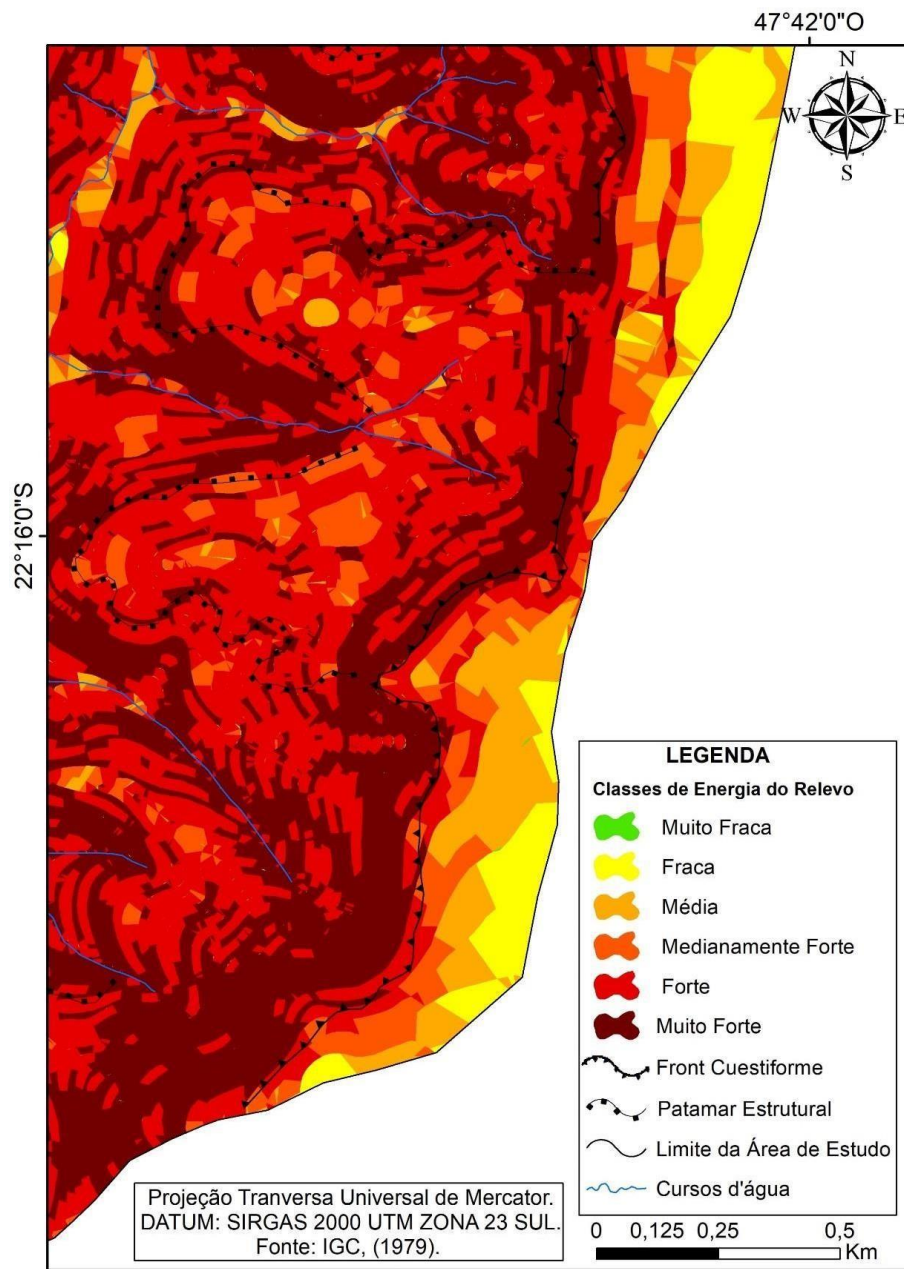


Ainda, na maior parte dos fundos de vale predominam as classes de maior energia. Porém, para o curso d'água principal da bacia, o Córrego da Serra, obtém-se classes mais amenas de energia do relevo, com o domínio das classes média e fraca, com exceção das áreas de confluência com outros rios, apresentando classes de maior intensidade de energia. O predomínio de classes mais amenas nestes setores é justificado pela menor declividade, com a maior energia desta localidade sendo ocasionada pela dissecação horizontal.

Já para as áreas de reverso do relevo cuestiforme, predominam as classes de menor intensidade de energia do relevo, como as classes muito fraca, fraca e média. A baixa declividade, a fraca dissecação horizontal e a desconsideração da classe mais forte de dissecação vertical para a classe mais forte de energia do relevo, apontam esse setor como uma área de baixa energia do relevo.

De forma geral, para a energia mais intensa do relevo, evidencia-se o *front* cuestiforme e as áreas próximas, como nos limites dos patamares estruturais, que se intercalam com o *front* cuestiforme (Figura 14).

Figura 14 – Áreas do *front* cuestiforme e de patamares estruturais com energia do relevo elevada.



Ainda para a energia do relevo, como pode ser observado pelo Tabela 5, as classes que mais predominam na bacia são as de energia fraca, forte e muito forte. A energia fraca do relevo se concentra principalmente no setor de reverso da *cuesta*, enquanto as classes forte e muito forte se encontram predominantemente no *front* cuestiforme e em baixas vertentes.

Tabela 5: Área total ocupada pelas classes de energia do relevo

Classes de Energia	Área ocupada em m ²	Área ocupada em porcentagem
Muito Fraca	305147 m ²	3,1%
Fraca	2509040 m ²	26%
Média	1167586 m ²	12%
Medianamente Forte	811213 m ²	8,4%
Forte	2973636 m ²	31%
Muito Forte	1851301 m ²	19,2%

Desta maneira, o levantamento de dados morfométricos para a área de estudo evidenciou as características naturais do terreno. Assim, destaca-se a presença do *front* cuestiforme, possuindo uma elevada declividade e energia do relevo, sendo ainda um importante setor de nascentes de cursos d'água, que possuem seus vales desenvolvidos ao longo da Depressão Periférica, como destacado pela carta de dissecação horizontal. Ainda, a carta de dissecação vertical mostra a grande variação altimétrica no contexto interno das sub-bacias, especialmente do setor norte, onde se registra o entalhamento de alguns vales que possuem nascentes no setor do *front* cuestiforme e o restante dos cursos ao longo da Depressão Periférica.

Ainda se tratando das características naturais da área de estudo, as formações rochosas e os solos possuem grande correlação com a morfometria, principalmente com a declividade, que se associa aos compartimentos geomorfológicos de relevo. A Formação Piramboia, com a ocorrência registrada na área da Depressão Periférica, próxima aos fundos de vale, domina setores com declives em torno de 0 a 30%, com algumas exceções de setores com declividades mais elevadas. Para estas localidades, a classe de solo dominante é a dos Argissolos Vermelho-Amarelos – Unidade Serrinha.

A Formação Serra Geral, por aflorar no setor de cornija do *front* das Cuestas Basálticas, está associada a uma área de grande declividade. A declividade desta região varia de 15% a mais de 47%, possuindo ainda áreas de topos planos vinculados aos patamares estruturais, apresentando declives mais amenos, variando de 2 a 15% de declive. Desta forma, para esta área são encontradas três classes de solo, associadas a rochas basálticas da Formação Serra Geral e possuindo variação espacial de acordo com a declividade da área. Para os setores de maiores declividades (15 a $\geq 47\%$), são encontrados os Neossolos Litólicos Eutróficos, comumente associados a área de grande declividade, acarretando solos rasos com pouco desenvolvimento vertical. Para as áreas de divisores e de topos planos nos patamares estruturais são encontrados os Latossolos Vermelhos – Unidade

Ribeirão Preto e os Nitossolos Vermelhos, que pela declividade amena, apresentam uma profundidade maior se comparado aos Neossolos vizinhos.

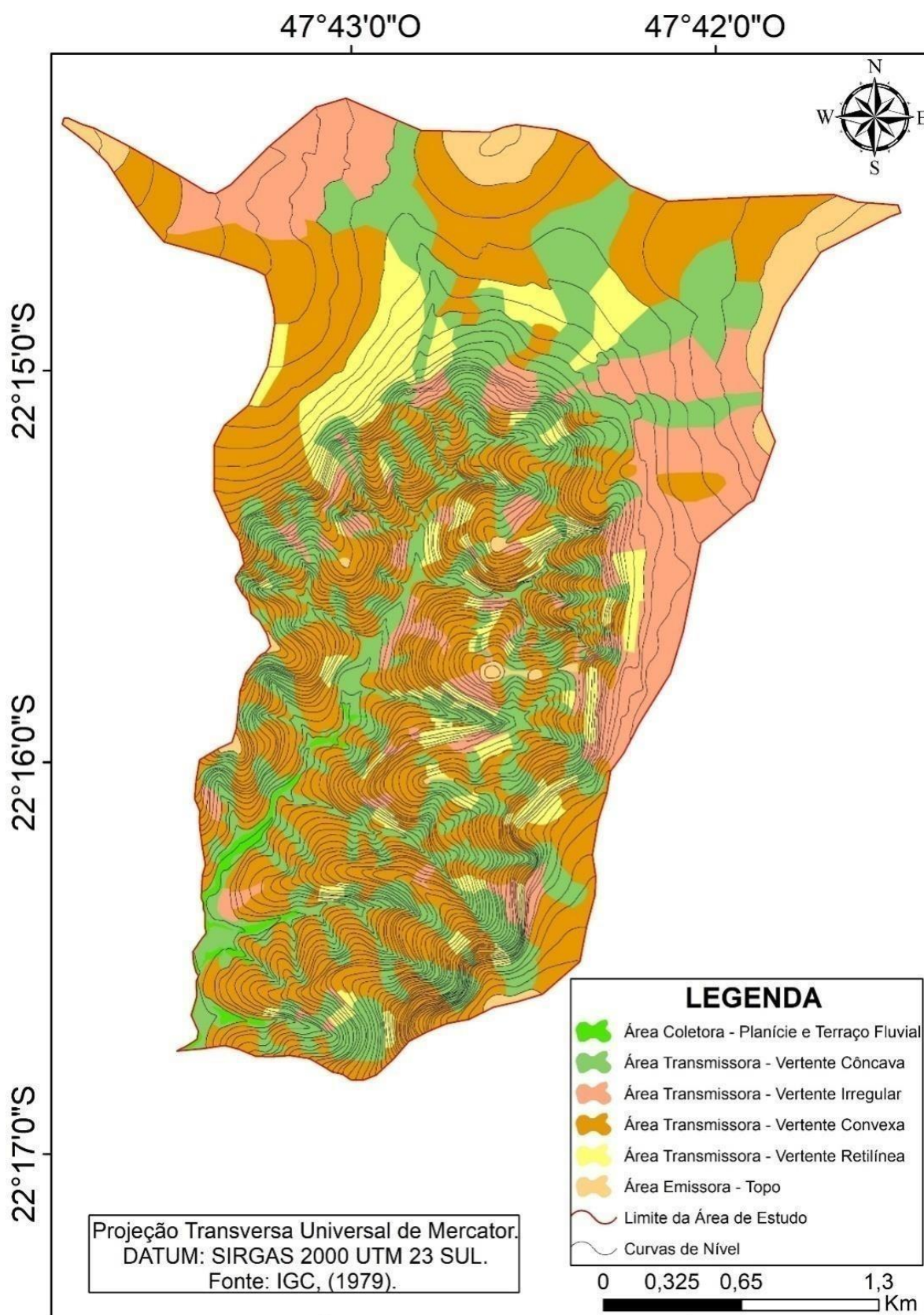
Por fim, para o reverso do relevo cuestiforme, ocorre a Formação Botucatu, permitindo o desenvolvimento de solos espessos como os da classe Latossolo Vermelho-Amarelos da unidade Serrinha. Para esta localidade, as declividades variam de 0 a 15%, se caracterizando como um extenso topo suave, com ausência de formação de vales fluviais.

Em se tratando das formas de relevo (Figura 15), estas se distribuem ao longo da bacia de forma heterogênea. De forma geral, as vertentes convexas ocupam as maiores áreas da bacia, seguidas pelas áreas de vertentes concavas, conforme pode ser observado na (tabela 6) As áreas de topo e coletoras ocupam poucas áreas (Tabela 6), uma vez que estes se restringem aos setores mais elevados, de divisores das bacias, e as áreas de fundos de vales mais planos, que permitem a recepção de materiais e de sua deposição.

Tabela 6: Área total ocupada pelos compartimentos de relevo na área de estudo

Compartimentos de relevo	Área ocupada em m ²	Área ocupada em porcentagem
Vertente Concava	2619882 m ²	27,8%
Vertente Convexa	4142935 m ²	44%
Vertente Retilínea	774378 m ²	8,2%
Vertente Irregular	1447206 m ²	15,3%
Área de Topo	356569 m ²	3,7%
APTF	73466 m ²	0,78%

Figura 15—Compartimentos de relevo da alta bacia do Rio Cabeça.



Desta maneira, os aspectos físicos naturais da bacia, como a morfometria do relevo, as formações rochosas e as classes de solo podem expressar fragilidades do ambiente a geração de processos erosivos e condicionarem o uso antrópico do espaço. Com a elaboração dos mapeamentos geomorfológicos para os cenários de 1988, 2010 e 2022, foi possível a observação e análise do avanço de feições geomorfológicas, incluindo feições que indicam processos erosivos, feições que possuem origem estrutural (naturais) e de feições antrópicas, construídas pelo homem (Figuras 16, 17 e 18).

Figura 16 – Carta Geomorfológica do cenário de 1988 na alta bacia do Rio Cabeça.

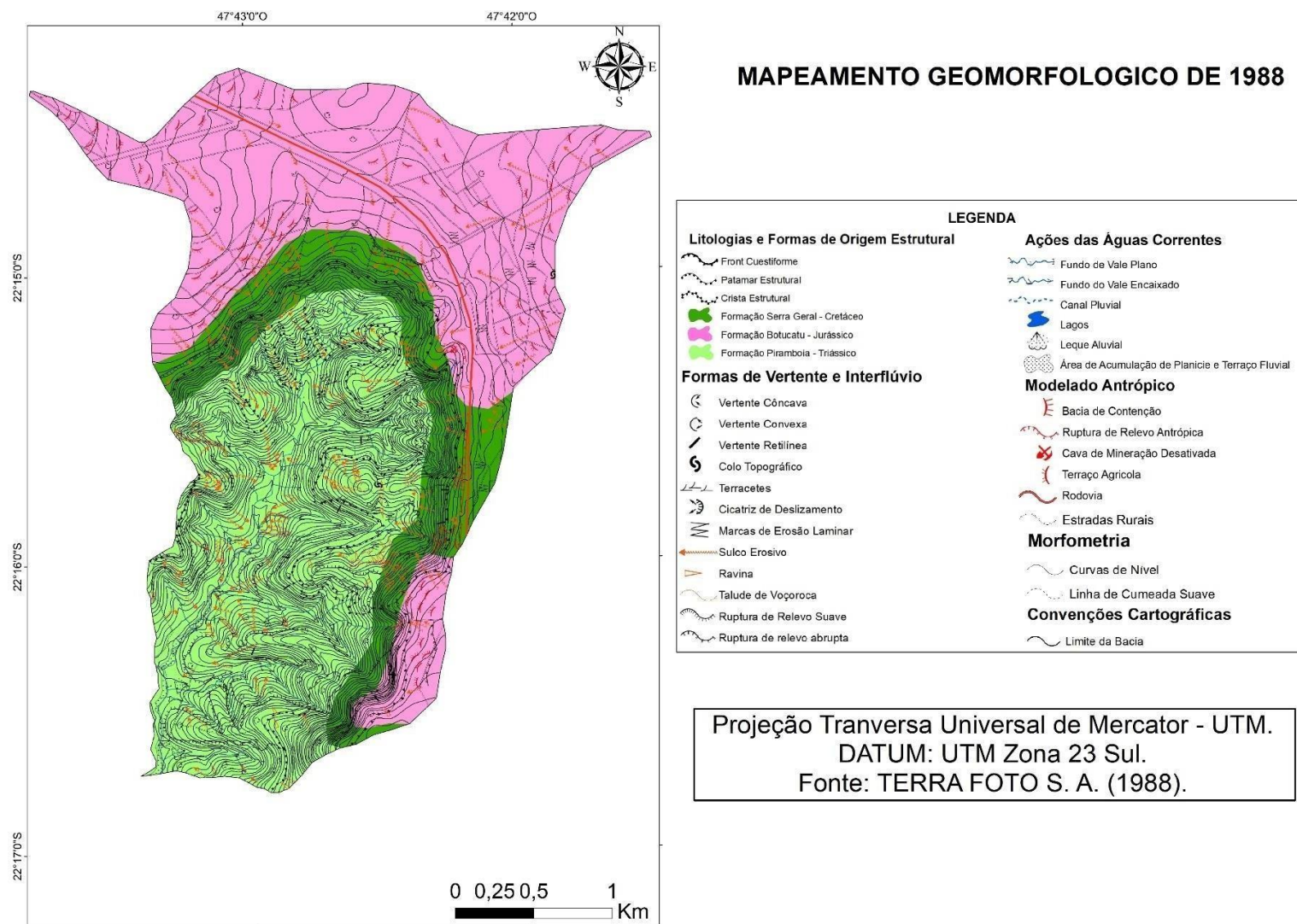


Figura 17 - Carta Geomorfológica do cenário de 2010 na alta bacia do Rio Cabeça.

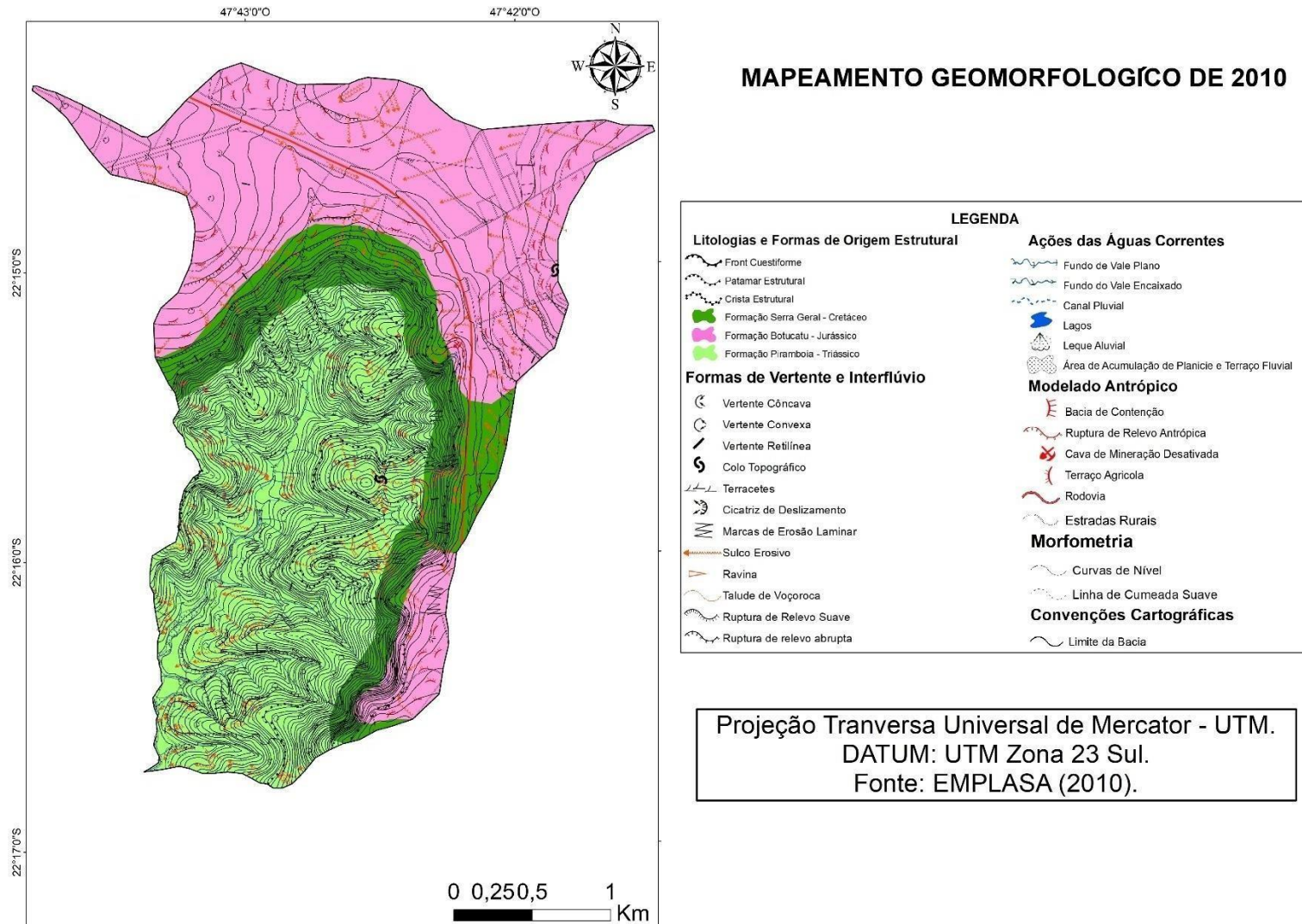
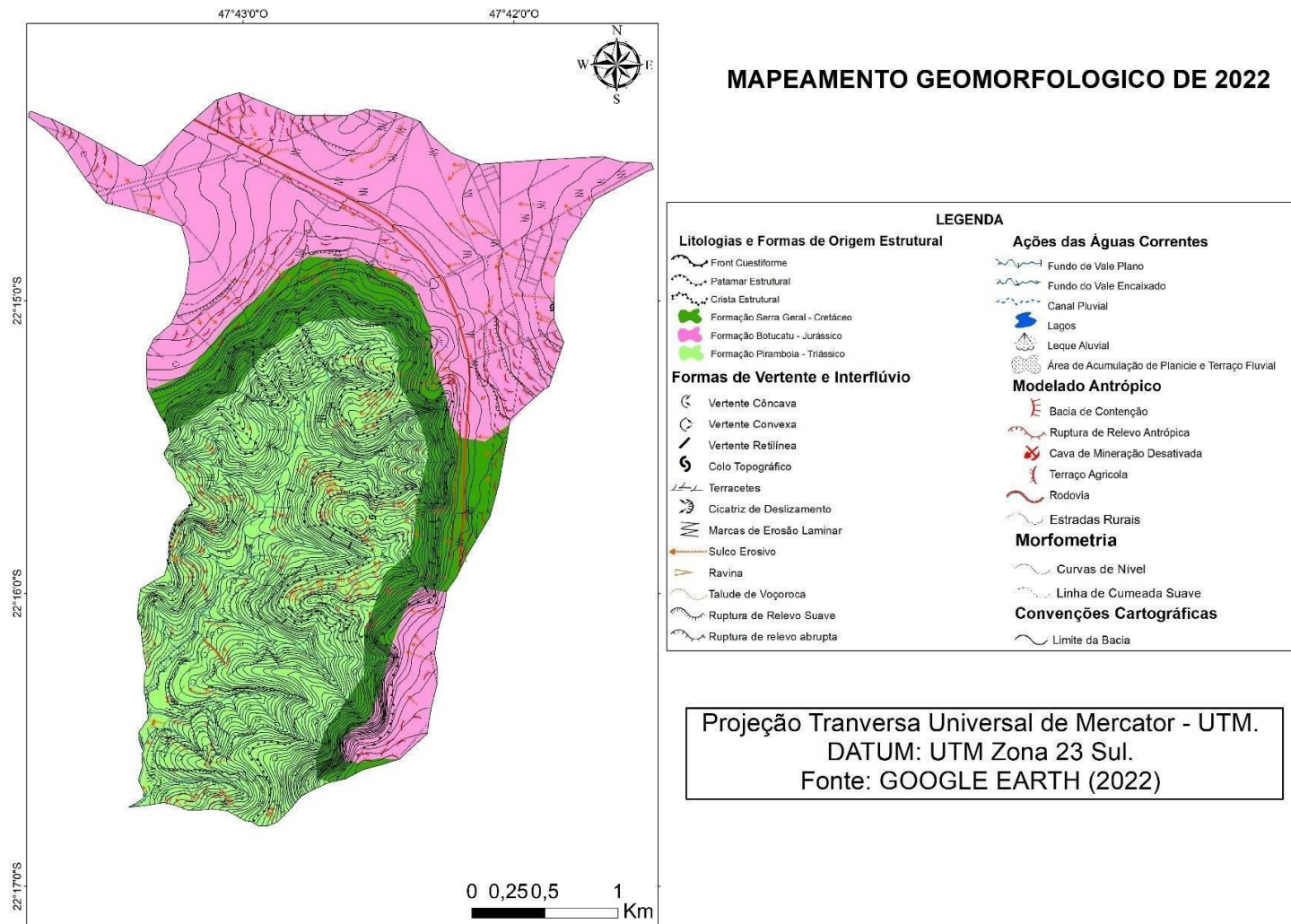


Figura 18- Carta Geomorfológica do cenário de 2022 na alta bacia do Rio Cabeça.



Analisando os cenários pelas figuras 16, 17 e 18 observam-se alguns elementos que se mantiveram constantes. Destaca-se a rodovia SP-310, que desde o cenário de 1988 já era asfaltada e com a sua pista de rodagem duplicada. Próximo à rodovia, é encontrada uma cava de mineração abandonada desde o cenário de 1988. No entanto, a maioria dos elementos mapeadas sofreram alterações espaciais e de dimensões ao longo dos anos, como por exemplo as feições erosivas lineares e as bacias de contenção, conforme pode ser observado pela tabela 7.

Tabela 7: Número total de feições erosivas lineares e bacias de contenção mapeadas nos cenários de 1988, 2010 e 2022.

Feições	Cenários		
	1988	2010	2022
Sulco erosivo (n° de feições)	157	248	195
Ravina (n° de feições)	43	24	19
Voçoroca (em m²)	26193	2431	6752
Marcas de erosão laminar (n° de feições)	22	14	42
Terraços agrícolas (n° de feições)	79	66	100
Bacias de contenção (n° de feições)	19	16	26

Fonte: Autores

Observa-se através dos cenários mapeados a mudança significativa no número de sulcos erosivos entre 1988 e 2022. Apesar do aumento de 91 feições mapeados para o cenário de 2010 em relação ao cenário anterior, o cenário de 2022 mostra uma diminuição em 53 sulcos em relação ao ano de 2010.

De forma geral, o número de ravinas e da área ocupada por voçorocas sofreram considerável diminuição entre os anos de 1988 e 2022, com 24 feições, e 19441 m² de voçoroca a menos. No entanto, o número de bacias de contenção mapeadas entre o primeiro e o último cenário indica que a problemática erosiva tem sido causa de preocupação para os proprietários locais, uma vez que estas feições buscam a contenção de ravinas e de voçorocas.

No entanto, as bacias de contenção, para que possuam efeito no contingenciamento dos processos erosivos, necessitam passar por manutenções periódicas, uma vez que com a ausência destas manutenções, os efeitos erosivos podem ser ainda maiores, já que as bacias de contenção barram e canalizam a água (Wen *et al.*, 2021). Para a área de estudo, observa-se que, em alguns setores, a ausência de manutenção tem desencadeado principalmente sulcos erosivos e ravinamentos.

Ainda, para o cenário de 1988 são encontradas cicatrizes de deslizamento próximas ao relevo de *cuestas*, não sendo mais observadas em outros cenários. Ainda se tratando de processos erosivos, as marcas de erosão laminar são observadas desde o cenário de 1988, aumentando em 20 feições mapeadas até o cenário de 2022 (Tabela 7).

Já os terraços agrícolas, feições associadas ao plantio de cana-de-açúcar na área de estudo, também sofreram variações espaciais e em quantidades mapeadas ao longo dos cenários, aumentando gradualmente no cenário de 2022, acompanhando o crescimento do cultivo de cana-de-açúcar na área de estudo (Tabela 7).

As feições de origem estrutural, como patamares, cristas e o *front* cuestiforme, não sofreram variação espacial ao longo dos cenários mapeados, por se tratar de feições que sofrem mudanças em escala de tempo geológico. Já as rupturas de relevo, divididas em abruptas e suaves, sofrem maiores alterações, uma vez que algumas podem ser alteradas por atividade antrópica, como o emprego da mecanização agrícola para a plantação de cana-de-açúcar, para a construção de estradas e para atividades de mineração.

Em relação as feições de origem fluvial, foram quantificados: a extensão de cursos d'água de fundo encaixado e plano, as nascentes, os leques aluviais e as áreas de APTF, conforme pode ser observado na tabela 8.

Tabela 8: Número e extensão de feições de origem fluvial mapeadas para os cenários de 1988, 2010 e 2022.

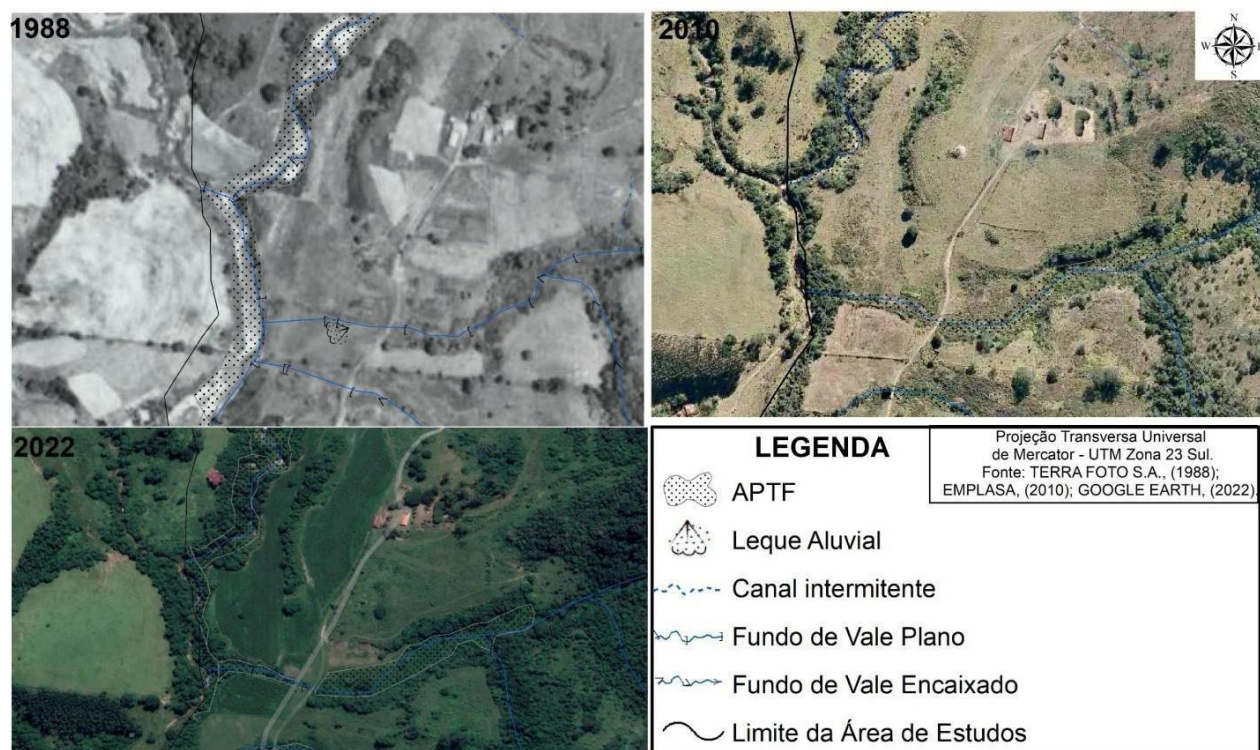
Feições	Cenários		
	1988	2010	2022
Fundo de vale encaixado (Em metros)	16748	16219	19254
Fundo de vale plano (Em metros)	4413	4007	2403
Nascentes (Em nº de feições)	45	45	51
Leque aluvial (Em nº de feições)	2	2	2
Área de acumulação de planície e de terraço fluvial (Em m²)	4500	16100	250000

Fonte: Autores

Para os três cenários mapeados, a área de estudo apresenta uma maior extensão de fundos de vale encaixados quando comparados aos fundos de vale planos. A maior diferença foi registrada no cenário de 2022 (Tabela 8). Já o número de nascentes aumentou durante o monitoramento.

Quanto a ocorrência de leques aluviais, foram identificados dois leques que se mantiveram em todos os cenários. Os leques se concentram no setor sul da bacia, onde o rio principal da área de estudo exibe uma maior área de APTF, que aumentou ao longo dos cenários e apresenta no ano de 2022, 250.000m² de área ocupada (Figura 19).

Figura 19 – Recorte na área de estudo mostrando a variação nas áreas de APTF ao longo dos cenários de 1988, 2010 e 2022.



Diante das características naturais do relevo, ocorrem áreas que possuem maior propensão natural para a ocorrência e desenvolvimento de processos erosivos. Desta forma, foram quantificadas, por área, as feições erosivas lineares, mapeadas nos cenários de 1988, 2010 e 2022, em relação a cada uma das classes das cartas morfométricas.

No que se refere a declividade, a variação das feições erosivas lineares em porcentagem ao longo dos anos de 1988, 2010 e 2022 pode ser observada pela tabela 9.

Tabela 9 – Porcentagem de feições erosivas lineares por classe de declividade ao longo dos cenários de 1988, 2010 e 2022.

Classes de Declividade	Cenários								
	1988			2010			2022		
	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)
0° I- 1,1° ≤ 2%	2,6%	0,1%	0,1%	1,8%	0,4%	0,04%	4,9%	0,4%	0,04%
1,1° I- 2,8° 2 I-5%	20,2%	0,06%	0%	21,7%	0%	0%	19%	0%	0%
2,8° I- 5,7° 5 I-10%	15%	5,5%	2,7%	14,6%	1,9%	0%	9,4%	2,17%	0,7%
5,7° I- 8,5° 10 I-15%	12,8%	22%	13,2%	13,5%	8,6%	30%	11,6%	18%	24,1%
8,5° I- 16,7° 15 I-30%	36%	49,8%	42,1%	36,2%	72,6%	68%	45,5%	60,7%	62,4%
16,7° I- 25,1° 30-47%	11,5%	19,3%	31,2%	10,3%	9,3%	1,7%	8%	14%	11,4%
≥25,1° ≥47%	1,7%	2,8%	10,5%	1,6%	6,9%	0%	1,3%	4,5%	1%

Fonte: Autores

Desta maneira, os três cenários em conjunto apresentam maior desenvolvimento de feições erosivas lineares no intervalo de declividade de 15-30%. Somadas todas as feições mapeadas nos cenários de 1988, 2010 e 2022, e fazendo uma média, a classe em destaque concentra 39,2% de todos os sulcos mapeados, 61,1% das ravinas e 57,5% das voçorocas. As classes de 10-15% e de 30-47% concentram boa parte do restante das feições erosivas lineares. Assim, constata-se que os processos erosivos se desenvolvem nas áreas de média vertente (Figuras 16, 17 e 18), em meio aos patamares estruturais, representados por declividades moderadas a fortes. Nos setores de maiores declividades ($\geq 47\%$), a ocorrência de processos erosivos é baixa, pois estes se localizam na cornija do *front* cuestiforme, com pouco espessura pedológica e com a presença de vegetação nativa, o que pode proteger estas localidades de eventuais processos erosivos lineares.

Quando analisada a relação de proporcionalidade para as classes de declividade (Tabela 10), observa-se ainda uma tendência bem similar ao do quadro 12. Porém, a classe 10 -15% de declividade ganha notoriedade, uma vez que sua área ocupada ao longo da bacia representa apenas 8,8% do total, colocando esta classe como a que mais se destaca na concentração de sulcos e de voçorocas. No entanto, a classe 15-30% não só possui a maior quantidade de ravinas, como é a que mais concentra esse tipo de feição na relação de proporção (Tabelas 9 e 10). As classes 15-30% destaca-se ainda por ser a segunda classe que mais concentra sulcos e voçorocas.

Tabela 10: Relação de proporcionalidade entre as feições erosivas e as classes de declividade para os três cenários mapeados

Classes de declividade	Área ocupada pela classe de declividade	Sulco	Ravina	Voçoroca
Até 2%	3,3%	0,6	0,04	0,003
2 – 5%	26,7%	0,5	0	0
5 – 10%	13%	0,71	0,1	0,03
10 – 15%	8,8%	1	0,84	1
15 – 30%	28,7%	0,92	1	0,78
30 – 47%	15,3%	0,47	0,43	0,37
Maior ou igual a 47%	3,9%	0,69	0,56	0,38

A tabela 11 mostra a variação das feições erosivas lineares em porcentagem ao longo dos três cenários monitorados para as classes de dissecação horizontal.

Tabela 11 – Porcentagem de feições erosivas lineares por classe de dissecação horizontal ao longo dos cenários de 1988, 2010 e 2022.

Classes de Dissecação Horizontal	Cenários								
	1988			2010			2022		
	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)
≤10m	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
11-20m	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
21-40m	0,67%	0%	0,5%	0%	0%	0%	2%	0%	0%
41-80m	3,1%	2,3%	5,9%	2,9%	0%	0%	6,2%	0%	0%
81-160m	16,5%	7%	43%	18,4%	20,8%	16,4%	13%	5,2%	0%
161-320m	31,8%	39,5%	26%	32,6%	54,1%	69,3%	33,5%	57,8%	100%
≥321m	47,7%	51,1%	24,6%	46%	25%	14,2%	47,1%	36,8%	0%

Fonte: Autores

De forma geral, para todos os cenários mapeados, a concentração de sulcos ficou maior na classe ≥ 321 metros, com a média de 45,8% do total de sulcos mapeados para todos os cenários. As ravinas se concentraram em maior destaque para a classe 161-320 metros, com 47,6% do total de ravinas mapeadas. Já as voçorocas se concentraram mais na classe 81-160 metros, com 36,5% do total, seguida de perto pela classe 161-320 metros, com 33,6% do total.

Constata-se que as áreas com concentração de processos erosivos lineares, como os sulcos e as ravinas, se desenvolvem em áreas de menor dissecação horizontal, em extensas vertentes, enquanto os taludes de voçoroca se desenvolvem mais próximos dos cursos d'água. A maior proximidade entre os cursos d'água com as voçorocas pode ser explicada pela ocorrência destes em áreas de nascentes, pois, as voçorocas são geralmente encontradas bordejando estes setores.

A ausência de voçorocas em classes que indicam maior dissecação horizontal pode ser explicada pela diferença na distribuição espacial da rede de drenagem identificada pelos mapeamentos dos cenários de 1988, 2010 e 2022 em relação àquela existente na base topográfica utilizada para o mapeamento da dissecação horizontal, disponibilizada e elaborada em 1979 pelo IGC. A ausência de cursos fluviais de primeira ordem na base topográfica, onde os voçorocamentos se registram, comprometem a correlação das classes superiores de dissecação horizontal com os taludes erosivos.

Para a dissecação vertical, a tabela 12 mostra a variação das feições erosivas lineares em porcentagem ao longo dos três cenários mapeados.

Tabela 12 – Porcentagem de feições erosivas lineares por classe de dissecação vertical ao longo dos cenários de 1988, 2010 e 2022.

Classes de Dissecação Vertical	Cenários								
	1988			2010			2022		
	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)
≤10m	7,6%	0%	26%	3,7%	0%	43,7%	3,1%	0%	0%
10-20m	10,8%	2,3%	36,1%	12,5%	19%	46%	14,1%	10,5%	81,7%
20-30m	6,3%	16,2%	13,7%	12,1%	23,8%	10,2%	10%	10,5%	18,3%
30-40m	8,9%	11,6%	8,8%	12,5%	14,2%	0%	8,3%	21%	0%
40-50m	11,4%	13,9%	5%	8,3%	19%	0%	8,9%	21%	0%
≥50m	54,7%	58,1%	10,3%	54,3%	38%	0%	57,5%	36,8%	0%

Fonte: Autores

Somando as feições mapeadas ao longo dos três cenários, observa-se a ocorrência da concentração dos sulcos e das ravinas na classe ≥ 50 metros, com 54,3% do total de sulcos erosivos e 46,5% das feições do tipo ravina. Já as voçorocas se concentram na classe 10-20 metros, com 38,9% do total de voçorocas mapeados.

A dissecação vertical aponta maior concentração de processos erosivos lineares nas áreas com maior altitude relativa, com ≥ 50 metros de diferença altimétrica entre as linhas de cumeeada e os fundos de vale, que são as áreas de maior dissecação vertical. No entanto, as voçorocas se encontram nas áreas mais baixas das sub-bacias, pois estas se desenvolvem próximas aos cursos d'água, em áreas de nascentes.

Quanto a energia do relevo, a relação entre este parâmetro e a ocorrência de feições erosivas pode ser observada na tabela 13.

Tabela 13 – Porcentagem de feições erosivas lineares por classe de energia do relevo ao longo dos cenários de 1988, 2010 e 2022.

Classes de Energia do Relevo	Cenários								
	1988			2010			2022		
	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)	Sulco (%)	Ravina (%)	Voçoroca (%)
Muito Fraca	2,4%	0%	0,04%	0%	0%	0%	4,3%	0,1%	0%
Fraca	19,6%	0,1%	0,03%	22%	0,06%	0,04%	18,6%	0,2%	0,02%
Média	12,6%	3,2%	2,3%	13,4%	2,1%	0%	8,5%	1,4%	0,4%
Medianamente Forte	11,8%	19,8%	13,6%	13%	6,5%	30%	11,2%	13,3%	22,5%
Forte	38,1%	54,4%	42,1%	39,2%	75%	68%	47,8%	65,6%	64,4%
Muito Forte	15,3%	22,3%	41,7%	21,4%	16,3%	1,8%	9,3%	19,1%	12,5%

Fonte: Autores

De forma geral, para todos os cenários, o destaque ocorre na classe forte, que concentra 42% dos sulcos erosivos mapeados, 65% das ravinas e 58,1% da área ocupada pelas voçorocas.

De forma mais ampla, para a energia do relevo, constata-se que ocorre uma grande ocorrência das feições erosivas lineares nas áreas de energia medianamente forte, forte e muito forte, com destaque para a classe forte. A classe forte representa uma relação de vizinhança entre as áreas mais elevadas da bacia, com a presença da classe muito forte, que fornece energia ao escoamento superficial para todas as áreas adjacentes da bacia. Esta característica da área se reflete na geração de processos erosivos nos setores de energia forte e medianamente forte, presentes nas áreas de média vertente ao longo dos patamares estruturais e de contato entre o *front* da *cuesta* com os fundos de vales.

Quando analisada a relação de proporcionalidade a partir do índice normalizado para as classes de energia do relevo (Tabela 14), o mesmo padrão pode ser observado.

Tabela 14: Relação de proporcionalidade entre as feições erosivas e as classes de energia para os três cenários mapeados.

Classes de energia	Área ocupada pela classe de energia do relevo	Sulco	Ravina	Voçoroca
Muito Fraca	3,1%	0,48	0	0,001
Fraca	26%	0,53	0,0001	0
Média	12%	0,66	0,08	0,03
Medianamente Forte	8,4%	1	0,75	1
Forte	31%	0,94	1	0,71
Muito Forte	19,2%	0,55	0,47	0,36

Fonte: Autores

Aponta-se que a classe de energia medianamente forte (Tabela 14), possui os maiores índices nos sulcos erosivos e para as voçorocas, possuindo o segundo maior no índice das ravinas, colocando esta classe como a de maior problemática frente aos processos erosivos lineares. A classe forte merece destaque por apresentar o maior índice de ravinas, e o segundo maior índice dos sulcos erosivos e das voçorocas.

Contatou-se também que os sulcos erosivos, ravinas e taludes de voçoroca possuem relação com os compartimentos de relevo. Em todos os cenários, observa-se que os sulcos erosivos se concentram em sua maioria nas áreas de vertentes convexas e de vertentes concavas. As áreas côncavas concentram 21,8% dos sulcos, enquanto as convexas concentram 54,5% do total de sulcos erosivos. As vertentes concavas concentram 55,4% das ravinas e as vertentes convexas ficam com cerca de 30,1% do total de ravinamentos dos três cenários mapeados. Para a área ocupada por voçoroca, a maior concentração está nas vertentes concavas, com 61,5% do total de taludes, enquanto as vertentes convexas concentram cerca de 32,5% dos taludes mapeados. A tabela 15 apresenta os diversos tipos de feições mapeadas nos cenários de 1988, 2010 e 2022 por compartimentos de relevo.

Tabela 15 – Feições erosivas lineares por compartimentos de relevo.

Compartimentos do relevo	Área ocupada pelo compartimento (%)	Sulcos (%)	Ravinas (%)	Voçorocas (%)
Vertente Concava	27,8%	21,8%	55,4%	61,5%
Vertente Convexa	44%	54,5%	30,1%	32,5%
Vertente Irregular	15,3%	11,4%	5,5%	0%
Vertente Retilínea	8,2%	7,7%	8%	1%
Topo	3,7%	3,8%	0,7%	0%
APTF	0,78%	0,4%	0,02%	5%

Fonte: Autores

Quando aplicado o índice de normalização a partir de todas as erosões mapeadas nos três cenários (1988, 2010 e 2022), observa-se que, em relação a área da classe de compartimento do relevo, os sulcos erosivos se mantem mais concentrados nas vertentes convexas, assim como as ravinas se encontram em maior parte, concentradas nas vertentes concavas. No entanto, para as voçorocas, embora a classe de vertente concava reúna 61,5% das voçorocas, as áreas de APTF possuem o maior índice de normalização, uma vez que apresentam 5% da área total de voçorocas em 0,78% de extensão desta classe na bacia (Tabela 16).

Tabela 16: Relação de proporcionalidade entre as feições erosivas e os compartimentos de relevo para os três cenários mapeados

Compartimentos do relevo	Sulcos (%)	Ravinas (%)	Voçorocas (%)
Vertente Concava	0,63	1	0,35
Vertente Convexa	1	0,3	0,11
Vertente Irregular	0,6	0,17	0
Vertente Retilínea	0,75	0,48	0,01
Topo	0,82	0,09	0
APTF	0,45	0,01	1

Fonte: Autores

Desta forma, as características morfométricas e morfológicas podem fornecer subsídios ao entendimento de áreas potencialmente suscetíveis a ocorrência de processos erosivos. Não obstante, quando é analisada a distribuição espacial das feições erosivas lineares na bacia, além destas possuírem relações com as características morfométricas do relevo, as classes pedológicas também

podem se apresentar como condicionante natural ao desenvolvimento de processos erosivos, pois, alguns solos, de forma natural, possuem maior suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos lineares (Oliveira; Prado, 1984).

Quando somadas as feições erosivas mapeadas para os três cenários de acordo com as classes pedológicas, constatam-se algumas variações que podem ser observadas na tabela 17.

Tabela 17: Feições erosivas lineares por classe de solo.

Classes de Solo	Área total ocupada pela classe em porcentagem	Feições Erosivas Lineares em porcentagem		
		Sulco Erosivo	Ravina	Voçoroca
Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos	10,6%	21,8%	49,4%	21,6%
Neossolos Litólicos Eutróficos	24,8%	15,7%	35,2%	25,3%
Argissolos Vermelho-Amarelos	16,08%	19,3%	13,5%	53%
Latossolos Vermelho-Amarelos	48,3%	42,9%	1,7%	0,02%

Fonte: Autores

Para todos os cenários, os sulcos erosivos se encontram em sua maioria nos Latossolos Vermelhos-Amarelos; as ravinas se concentram nos Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos, enquanto as voçorocas se concentram nas classes dos Argissolos Vermelho-Amarelos. A relação de proporcionalidade para as classes de solo está demonstrada na tabela 18.

Tabela 18: Relação de proporcionalidade entre as feições erosivas e as classes de solo para os três cenários mapeados

Classes de Solo	Feições Erosivas Lineares em porcentagem		
	Sulco Erosivo	Ravina	Voçoroca
Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos	1	1	0,63
Neossolos Litólicos Eutróficos	0,31	0,3	0,31
Argissolos Vermelho-Amarelos	0,57	0,17	1
Latossolos Vermelho-Amarelos	0,44	0,006	0

Fonte: Autores

No entanto, quando analisado a relação de proporcionalidade a partir do índice normalizado (Tabela 18), observa-se que para os sulcos, embora a maior quantidade esteja sob os Latossolos Vermelho-Amarelos, a proporção entre estas feições e área indicam como a classe de maior incidência os Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos. Assim como para os sulcos, os Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos concentram as ravinas, mantendo o padrão da tabela anterior (Tabela 17). Já as voçorocas mantem a sua concentração tanto em valor absoluto e em proporção para a classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos, indicando a problemática erosiva frente aos voçorocamentos nesta classe pedológica.

Contudo, (Figuras 2B, 16, 17 e 18), é bastante frequente a ocorrência das feições erosivas lineares, ao longo dos três cenários, em área de contato entre classes pedológicas, em destaque para o contato entre os Neossolos Litólicos e os Argissolos, por onde se concentram principalmente as feições erosivas lineares de maior magnitude, como os taludes de voçorocas. O contato dos Neossolos Litólicos Eutróficos com a classe de Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos concentra boa parte das ravinas, e o contato entre os Neossolos Litólicos Eutróficos com os Latossolos Vermelho-Amarelos, concentram as áreas de ocorrência dos sulcos erosivos.

Observa-se ainda que, no contato entre os Neossolos Litólicos com os Argissolos Vermelho-Amarelos, a ocorrência de voçorocamento é associada a declives acentuados e moderados, em áreas de média e de baixa vertente. Desta forma, não são as áreas mais declivosas da bacia, possuindo uma energia do relevo muito forte, que concentram as feições erosivas, mas as áreas de média e de

baixa vertente que recebem maior energia das áreas mais elevadas do *front* cuestasiforme, estabelecendo uma relação de vizinhança.

Ainda, os Argissolos Vermelho-Amarelos, concentrados em média e baixa vertente, possuem uma suscetibilidade natural a ocorrência de processos erosivos, conforme explicam Oliveira e Prado (1984, p.120): “Em vista do acentuado declive e da textura contrastante, são solos muito suscetíveis a erosão, apresentando consequentes sinais dessa limitação nas áreas agricultadas”. Foi observado em trabalho de campo e identificada através do mapeamento geomorfológico de 2022, a ocorrência de várias voçorocas de grandes dimensões em área de Argissolos Vermelho-Amarelos, conforme pode-se observar na figura 20.

Figura 20 – Voçoroca em área de Argissolos Vermelho-Amarelos.



Fonte: Autores

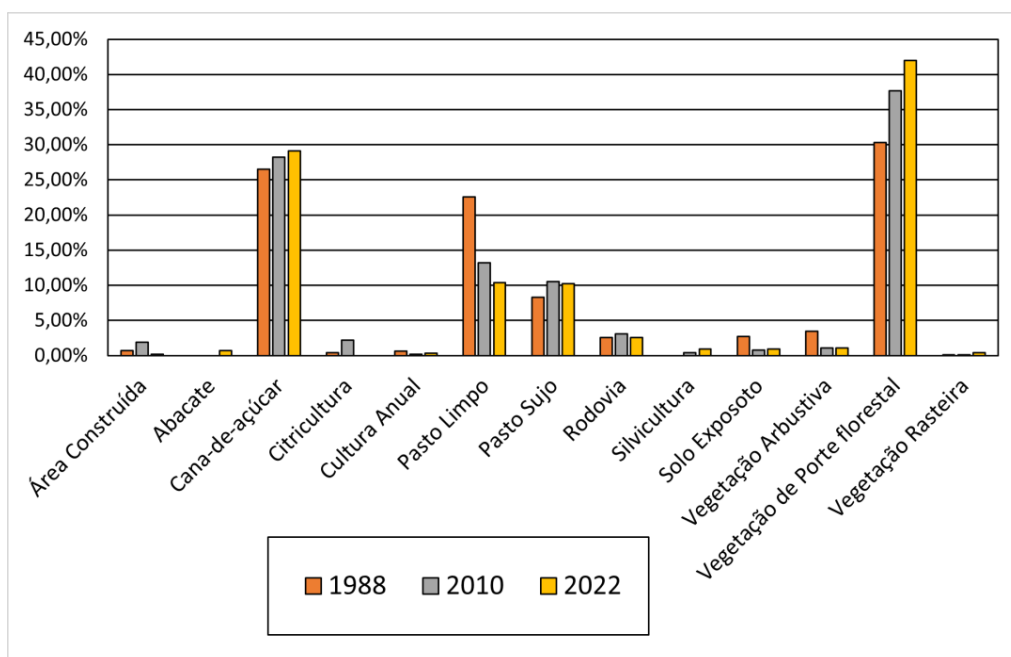
Já para as localidades com os Neossolos Litólicos Eutróficos, estes apresentam textura variada e pouco coesa, permitindo o surgimento de processos erosivos, mesmo com sua baixa profundidade (Oliveira; Prado, 1984). Ainda, por estarem ao longo de todo o *front* cuestiforme, as áreas de Neossolos Litólicos Eutróficos podem se misturar com áreas de deposição de talús do relevo cuestiforme, conferindo uma maior quantidade e espessura vertical de material depositado, ainda pouco coeso, uma vez que possui materiais de variadas granulometrias.

Já os Latossolos Vermelho-Amarelos se dispõem sob terrenos pouco declivosos e de baixa energia do relevo, ao longo do reverso do relevo cuestiforme. No entanto, estes possuem a maior ocorrência de sulcos erosivos da bacia. Estes solos possuem grande profundidade, e a maioria das feições erosivas lineares se encontram próximas a área de contato com a classe dos Neossolos Litólicos Eutróficos, mais suscetíveis aos processos erosivos e em localidades com maiores declividades e de energia do relevo mais acentuada. Ainda, a ocorrência de sulcos erosivos nos Latossolos Vermelho-Amarelos pode ser acentuada pelas atividades antrópicas exercidas na localidade, uma vez que as condições morfométricas são apropriadas para a mecanização da agricultura e para a instalação de infraestruturas, como de estradas e de rodovias.

5.2. O Uso e Ocupação da Terra e o Desenvolvimento de Feições Erosivas Lineares

O uso e ocupação da terra na área de estudo foi mapeado em três cenários distintos, demonstrando as variações ao longo de 34 anos. (Gráfico 1, Figura 21, 22 e 23).

Gráfico 1 - Variação no uso da terra ao longo dos cenários monitorados



Fonte: Autores

Figura 21 – Uso e ocupação da terra no cenário de 1988 na alta bacia do Rio Cabeça.

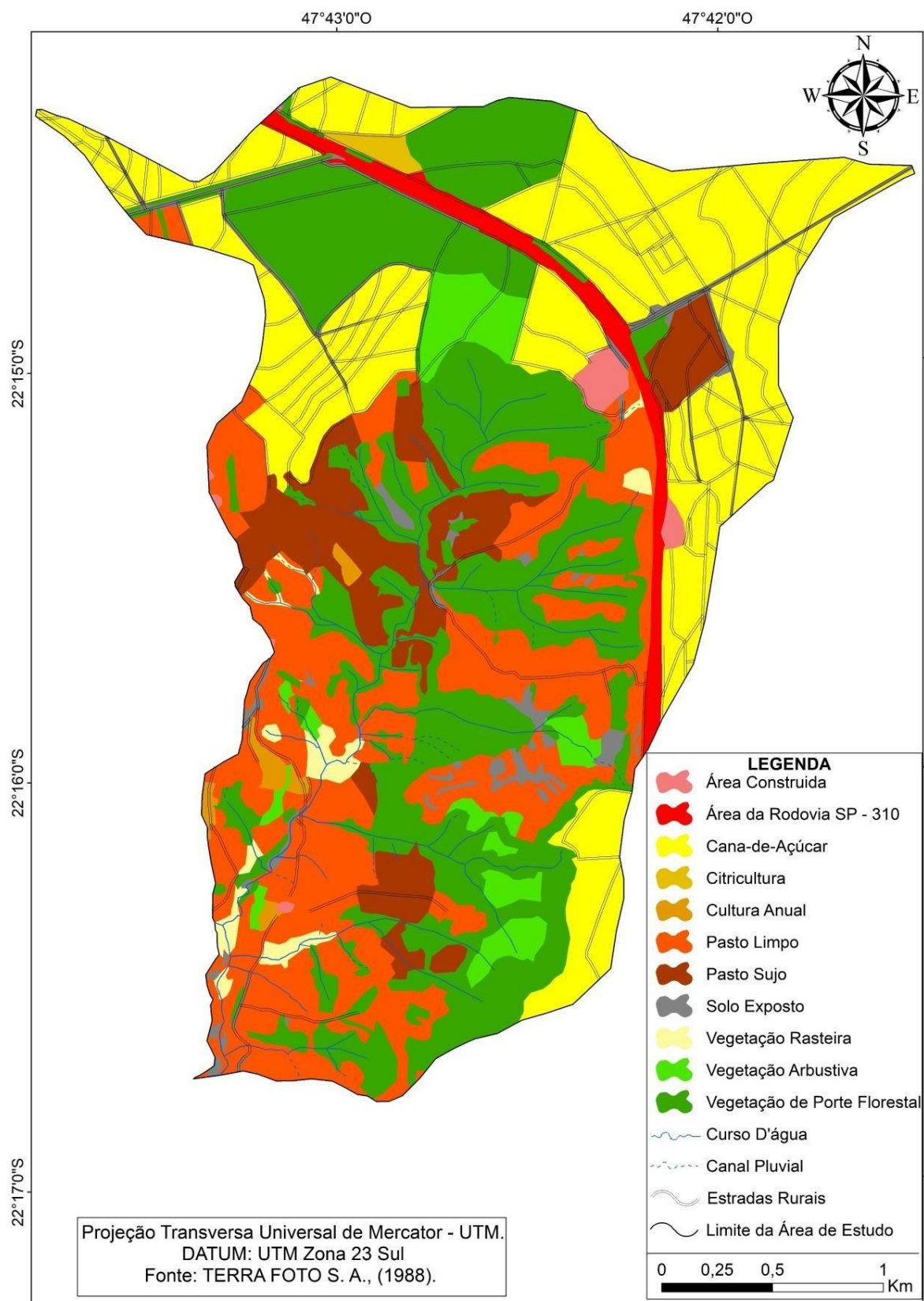


Figura 22 - Uso e ocupação da terra no cenário de 2010 na alta bacia do Rio Cabeça.

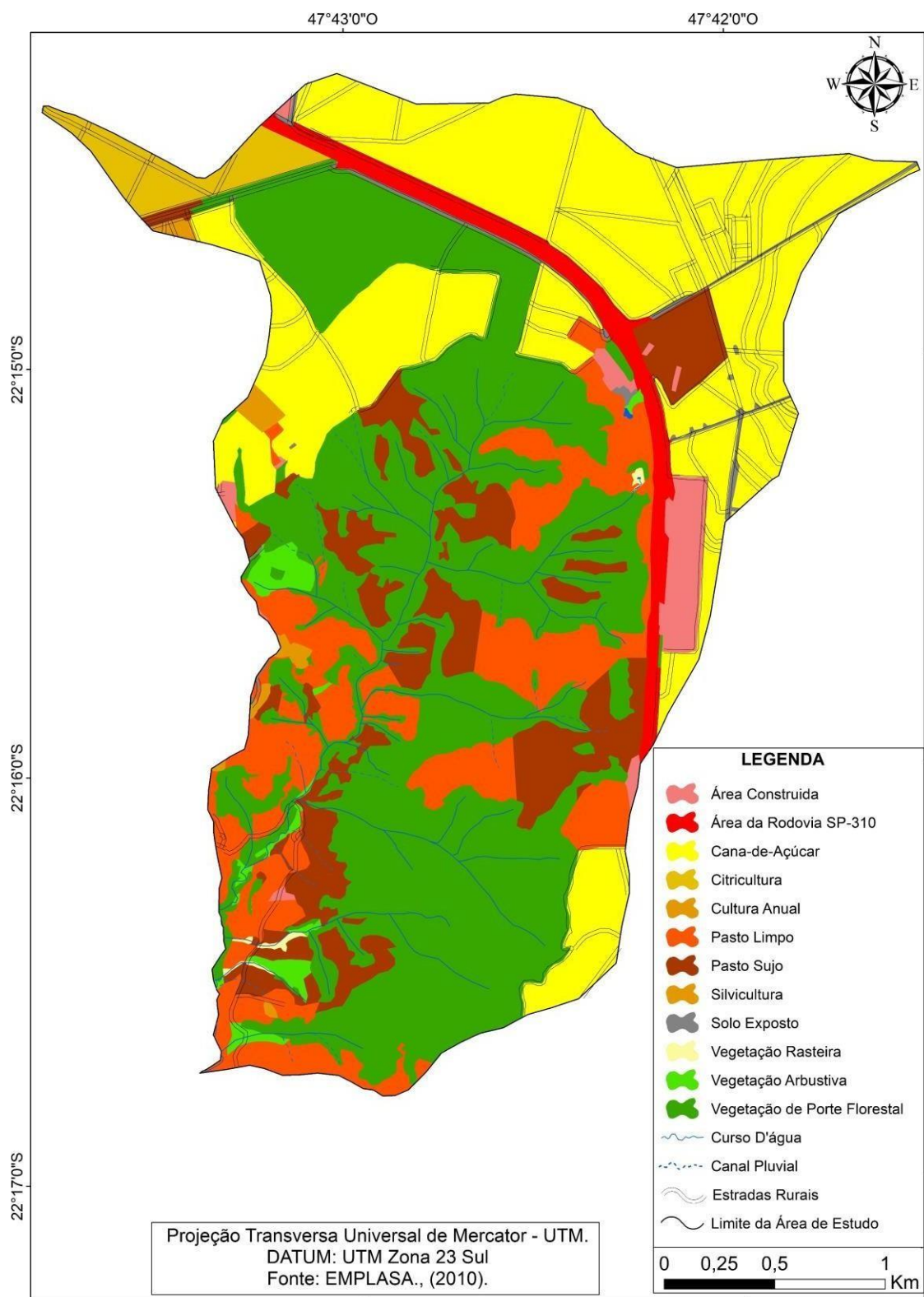
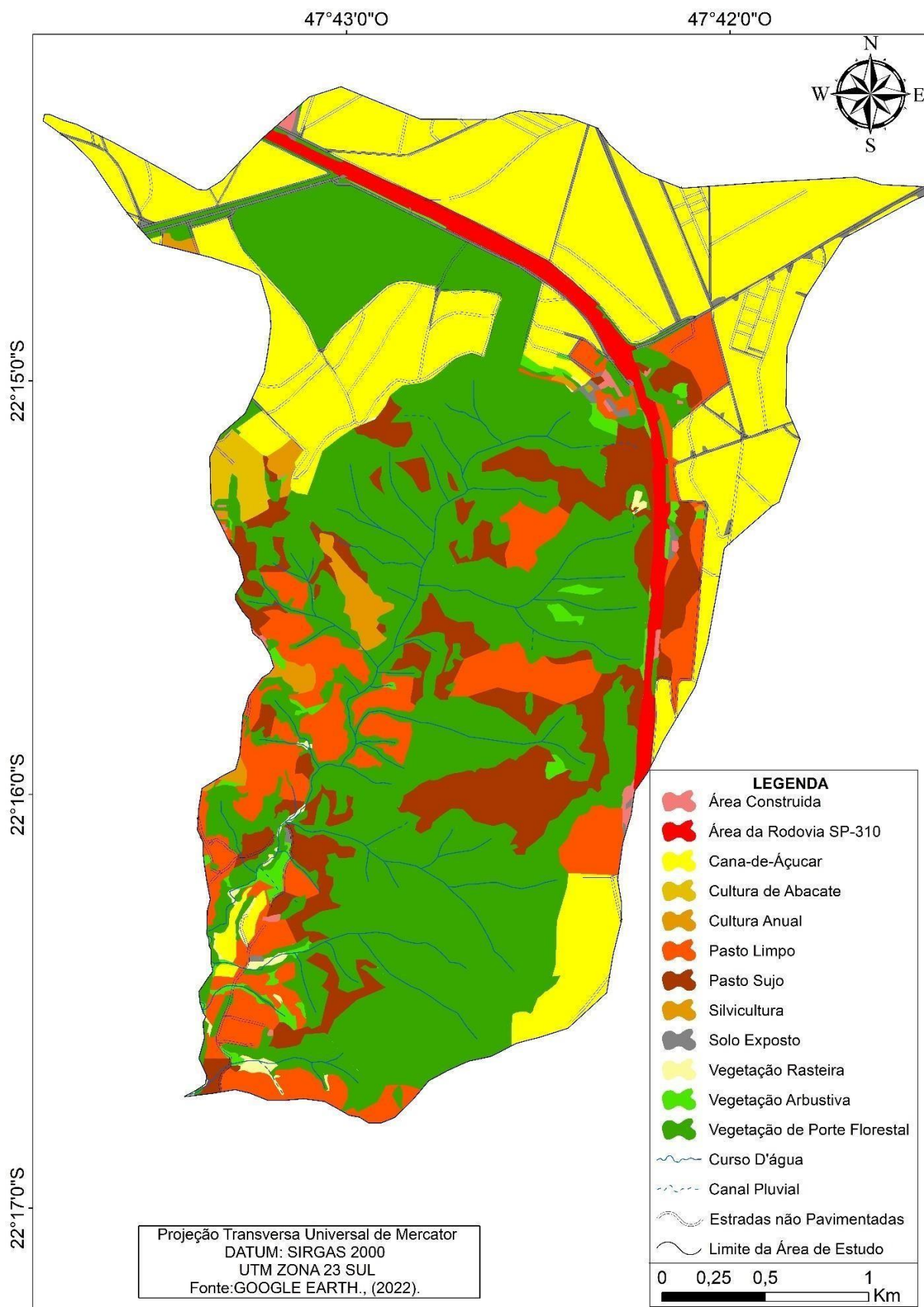


Figura 23 - Uso e ocupação da terra no cenário de 2022 na alta bacia do Rio Cabeça.



O gráfico 1 mostra que a área de vegetação arbórea aumentou em 12% ao longo dos três cenários monitorados. Em 1988, a vegetação arbórea representava 30,3%, em 2010 ocupava 37,7% da área e em 2022 ocupava 42% da área de estudo. O aumento de área ocupada pela vegetação

arbórea ocorreu, em alguns casos sobre áreas onde anteriormente eram encontradas vegetações arbustivas, que diminuíram em 2,4% ao longo dos três cenários monitorados.

Ainda, as pastagens ocupam quase 31% da bacia no cenário de 1988, divididas em pastos limpos e pastos sujos. Para o cenário de 2022, as classes de pastagens juntas representam 20,6% da bacia. As áreas de pastagens limpas diminuíram em 12,2% desde o cenário de 1988, enquanto as áreas de pasto sujo aumentaram em 1,9% entre 1988 e 2022. A diminuição da área total destinada a pastagens e o aumento do pasto sujo em relação a antigas áreas de pasto limpo, evidencia a provável intensão dos proprietários locais em diminuir as atividades pecuárias, uma vez que estas se encontram em menor área e com manejo mais precário, sendo convertidas em vegetação arbórea ou em cana-de-açúcar ao longo dos anos monitorados.

A cana-de-açúcar por sua vez aumentou sua área em relação ao total da área da bacia em 2,6% no intervalo de 1988 a 2022, ocupando 29,1% da área total da bacia no último cenário. O aumento das áreas de cana-de-açúcar se deu principalmente sobre as áreas de pastagens, evidenciando uma mudança de panorama econômico na área de estudo, influenciada por uma perspectiva que se tornou tendência no interior do estado de São Paulo nas últimas décadas, já que a produção de cana-de-açúcar passou por incentivos governamentais e foi impulsionada por grandes corporações nacionais e internacionais, principalmente para a produção de etanol (Camara; Caldarelli, 2016).

A cultura anual passou por poucas variações em suas áreas de ocupação nos cenários monitorados, representando uma pequena parcela da área de estudo. Destaca-se o abandono do uso da terra em áreas de citricultura e do aparecimento do cultivo do abacate no último cenário monitorado, ocupando 0,7% da bacia. Por fim, observa-se a chegada da silvicultura no cenário de 2010, outra importante atividade econômica rural crescente nos últimos anos no interior do estado de São Paulo, que também aumentou sua área de ocupação na bacia em 0,5% entre o intervalo de 2010 a 2022, ainda que represente apenas 1% da área total da bacia.

Em se tratando da erosão vinculada ao uso da terra, observa-se que desde o cenário de 1988 o uso que se apresenta com a maior quantidade de feições erosivas lineares é o pasto limpo, junto ao pasto sujo, conforme pode ser observado pelas tabelas 19 e 20.

Tabela 19: Porcentagem das feições erosivas lineares presentes nos diversos padrões de uso da terra ao longo dos cenários monitorados

Classes de Uso	1988			2010			2022		
	Sulco	Ravina	Voçoroca	Sulco	Ravina	Voçoroca	Sulco	Ravina	Voçoroca
Área Construída	0,9%	0%	0%	3,6%	0%	0%	0%	0%	0%
Abacate	-	-	-	-	-	-	0%	0%	0%
Cana-de- açúcar	34,3%	0,06%	0%	30,6%	0%	0%	28,1%	0%	0%
Citricultura	0,3%	0%	0%	0%	0%	0%	-	-	-
Cultura Anual	0,5%	1,4%	0%	0%	1,3%	0%	0,6%	2,2%	0%
Pasto Limpo	41,1%	50%	34,1%	33,5%	34,1%	89,5%	34,5%	36%	62,3%
Pasto Sujo	11,1%	5%	6,1%	21,7%	6,1%	0%	32,5%	46,6%	11%
Rodovia	0,06%	0,4%	0%	1,9%	0%	0%	0,5%	0%	0%
Solo Exposto	1,6%	31%	0%	0,1%	0%	0%	0,2%	0%	0%
Vegetação Arbustiva	2,7%	0%	0%	1,8%	0%	0%	1,3%	2,1%	0,3%
Vegetação de Porte Florestal	6%	11,4%	43,2%	6,6%	43,2%	10,4%	1,9%	8,5%	11,2%
Vegetação Rasteira	1%	0%	16,4%	0%	16,4%	0%	0%	4,3%	15%
Silvicultura	-	-	-	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Autores

Aplicando o índice normalizado, obtido através da área das feições erosivas contidas em cada classe em relação a área total da classe de uso da terra, onde o valor de 1 indica a variável de maior intensidade (Tabela 20).

Tabela 20: Feições erosivas lineares e as classes de uso da terra ao longo dos cenários monitorados

Classes de Uso	1988			2010			2022		
	Sulco	Ravina	Voçoroca	Sulco	Ravina	Voçoroca	Sulco	Ravina	Voçoroca
Área Construída	0,12	0	0	0,74	0	0	0	0	0
Abacate	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Cana-de-	0,12	0	0	0,42	0	0	0,29	0	0

açúcar									
Citricultura	0,07	0	0	0	0	0	-	-	-
Cultura Anual	0,07	0,17	0	0	1	0	0,51	0	0
Pasto Limpo	0,18	0,19	0,009	1	0,83	1	1	0,32	0,15
Pasto Sujo	0,13	0,05	0,004	0,81	0,14	0	0,93	0,42	0,02
Rodovia	0,002	0,01	0	0,24	0	0	0,05	0	0
Solo Exposto	0,05	1	0	0,06	0	0	0,06	0	0
Vegetação Arbustiva	0,07	0	0	0,64	0,001	0	0,3	0,18	0,007
Vegetação de Porte Florestal	0,001	0,02	0,008	0,06	0,07	0,04	0,01	0,01	0,006
Vegetação Rasteira	1	0	1	0	0	0	0	1	1
Silvicultura	-	-	-	0	0	0	0	0	0

Fonte: Autores

Em 1988, 41,1% dos sulcos erosivos estavam sobre o uso de áreas de pasto limpo, seguidos pelas áreas de cana-de-açúcar com 34,3% e de pasto sujo com 11,1% do total de sulcos erosivos para o ano de 1988. Ainda para o ano de 1988, as ravinas em área de pasto limpo somam 50% do total para o cenário e as voçorocas 34,1%. No entanto, o que se destaca para as voçorocas no cenário de 1988, são as vegetações de porte florestal e rasteira, totalizando 43,2% e 16,4% dos taludes de voçoroca, respectivamente.

Quando analisado a partir da tabela 20, a correlação entre feições erosivas e área ocupada pela classe de uso evidencia a vegetação rasteira como a que possui maior destaque frente as voçorocas, comumente encontrada próxima a cursos d'água e de nascentes desprotegidas de vegetação de porte florestal.

Levando em consideração apenas os usos econômicos e antrópicos da terra, as áreas de pastagens são as que mais se destacam perante os processos erosivos lineares no cenário de 1988. Destaca-se ainda a cana-de-açúcar para a concentração de sulcos erosivos.

Para o ano de 2010 (Tabela 19 e 20), a tendência de concentração de feições erosivas do tipo sulco erosivo e voçoroca permanecem para as áreas de pasto, com as áreas de cultura anual

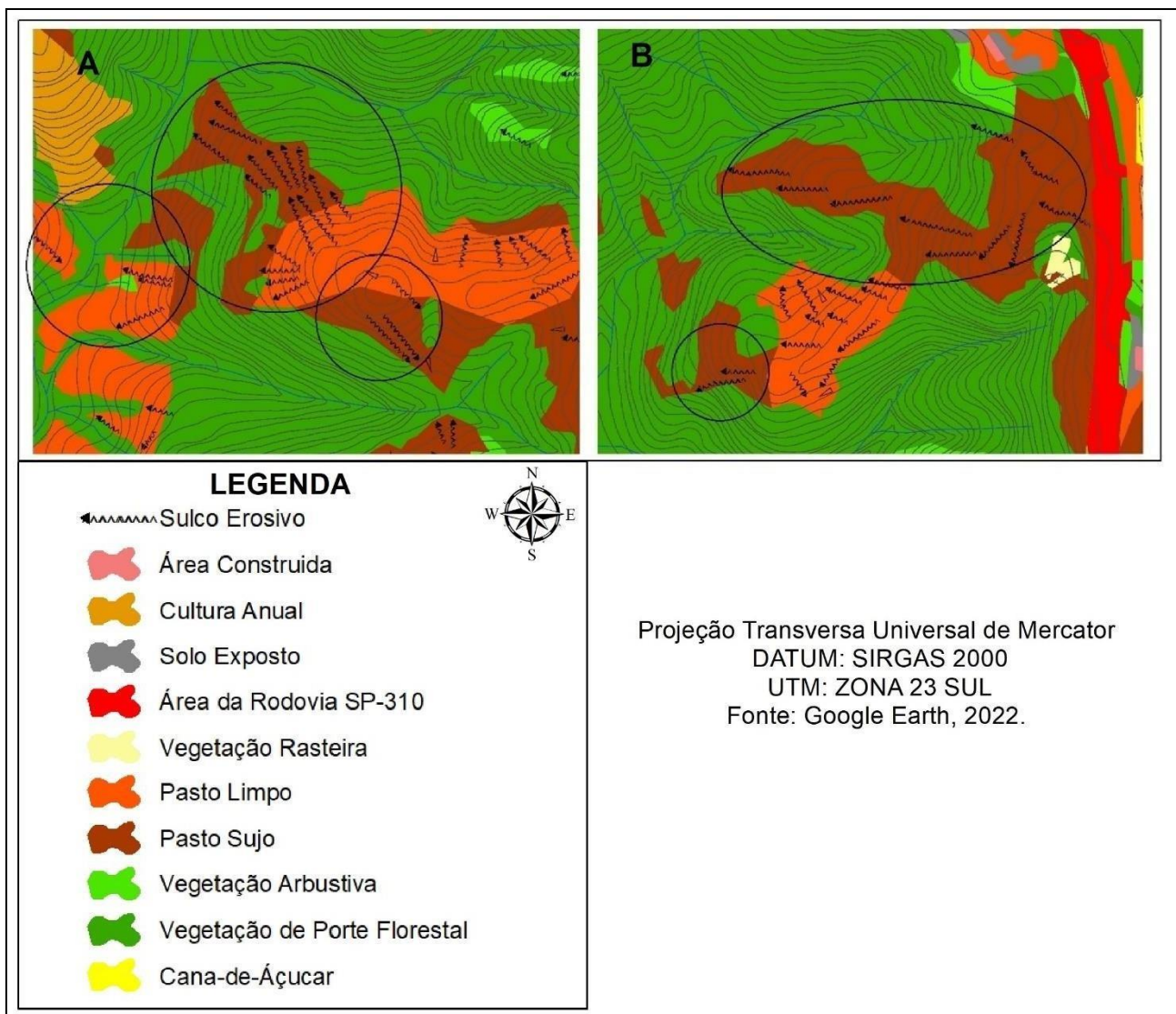
apresentando o maior índice na relação de proporcionalidade no caso das ravinas. O pasto limpo concentra 33,5% dos sulcos e 89,5% das voçorocas, e o maior número no índice de proporcionalidade, o que coloca esta classe de uso da terra grande destaque quando analisadas as voçorocas e os sulcos erosivos do cenário de 2010. O pasto sujo teve o segundo maior registro de sulcos erosivos para o mesmo cenário, evidenciando ainda mais os problemas vinculados aos processos erosivos em áreas de pastagens.

Para o cenário de 2022, o uso da terra destinado a pasto limpo reúne 34,5% do total de sulcos erosivos, 36% das ravinas e 62,3% das voçorocas. A classe de uso pasto sujo representa, para o cenário de 2022, 32,5% dos sulcos erosivos 46,6% das ravinas e 11% dos taludes de voçoroca. Ainda, embora a cana-de-açúcar não apresente ravinas e taludes de voçoroca, 28% dos sulcos erosivos mapeados neste cenário estão nas áreas destinadas a este plantio.

No entanto, quando analisada a relação de proporção (Tabela 20), para as ravinas e voçorocas se destacam novamente a vegetação rasteira, assim como no cenário de 1988. Por ocuparem poucas áreas da bacia e de estarem comumente próximas aos cursos d'água, sendo ainda possíveis áreas de pastagens abandonadas, são fatos que podem corroborar para que esta classe concentre essas feições. No entanto, as classes de pasto limpo e sujo possuem as maiores concentrações de sulcos erosivos, sendo estas as classes que mais concentram as ravinas e as voçorocas após a classe de vegetação rasteira, fato que corrobora com a problemática das áreas de pastagens perante as feições erosivas na área de estudo.

A respeito da relação entre os sulcos erosivos e os compartimentos de relevo, conforme observado na tabela 16, é constatado a concentração destas feições erosivas lineares nas áreas de convexidades. Conforme exposto na figura 24, observa-se que estas feições presentes nas áreas convexas estão ligadas principalmente aos padrões de uso da terra, especialmente as áreas de pastagens.

Figura 24: Sulcos erosivos em áreas convexas no cenário de 2022



Na figura 24, em A, os sulcos se iniciam em sua maioria nas áreas de topo e se desenvolvem nas convexidades em direção aos fundos de vale, nas médias e baixas vertentes. Ainda, os topos desprotegidos (sem vegetação de porte florestal), assim como as áreas de entorno, utilizadas como áreas de pastagem, condicionam a relação de vizinhança demonstrada pela carta de energia do relevo, permitindo o desenvolvimento das feições erosivas nos setores intermediários e convexos da bacia. Ainda, na figura 24 B, o mesmo fenômeno ocorre, porém, desta vez o processo se inicia nas áreas de topo a partir da rodovia, que é cercada por uma área de pastagem, permitindo o desenvolvimento dos sulcos erosivos nas convexidades rumando em direção ao fundo de vale. Logo, a concentração de sulcos erosivos em áreas de convexidades é consequência do uso da terra e das características naturais dos terrenos presentes na área de estudo.

Um outro fenômeno observado na área de estudo é a diminuição significativa das áreas de voçorocamento entre os cenários mapeados. Através dos mapeamentos geomorfológicos e de

trabalhos de campo, constatou-se que muitas voçorocas identificadas no cenário de 1988, passaram por um processo de estabilização ao longo dos anos.

Conforme pode ser observado pela Figura 25, no cenário de 1988, quando as voçorocas foram mapeadas pela primeira vez, estas estavam sob áreas de pastagens, com vegetação de porte florestal se desenvolvendo apenas em seu interior. Diferentemente, no cenário de 2022, estas voçorocas estavam com a vegetação de porte florestal bem mais desenvolvida, ocupando além dos interiores das voçorocas, também as áreas de entorno, acarretando uma estabilidade nos processos erosivos, tornando-as estáveis e não identificadas como voçorocas nos últimos cenários, conforme pode ser observado pelas figuras 25 e 26.

Figura 25: Voçorocas no cenário de 1988. No cenário de 2022, a vegetação de porte florestal sobre antigas áreas de voçorocamento

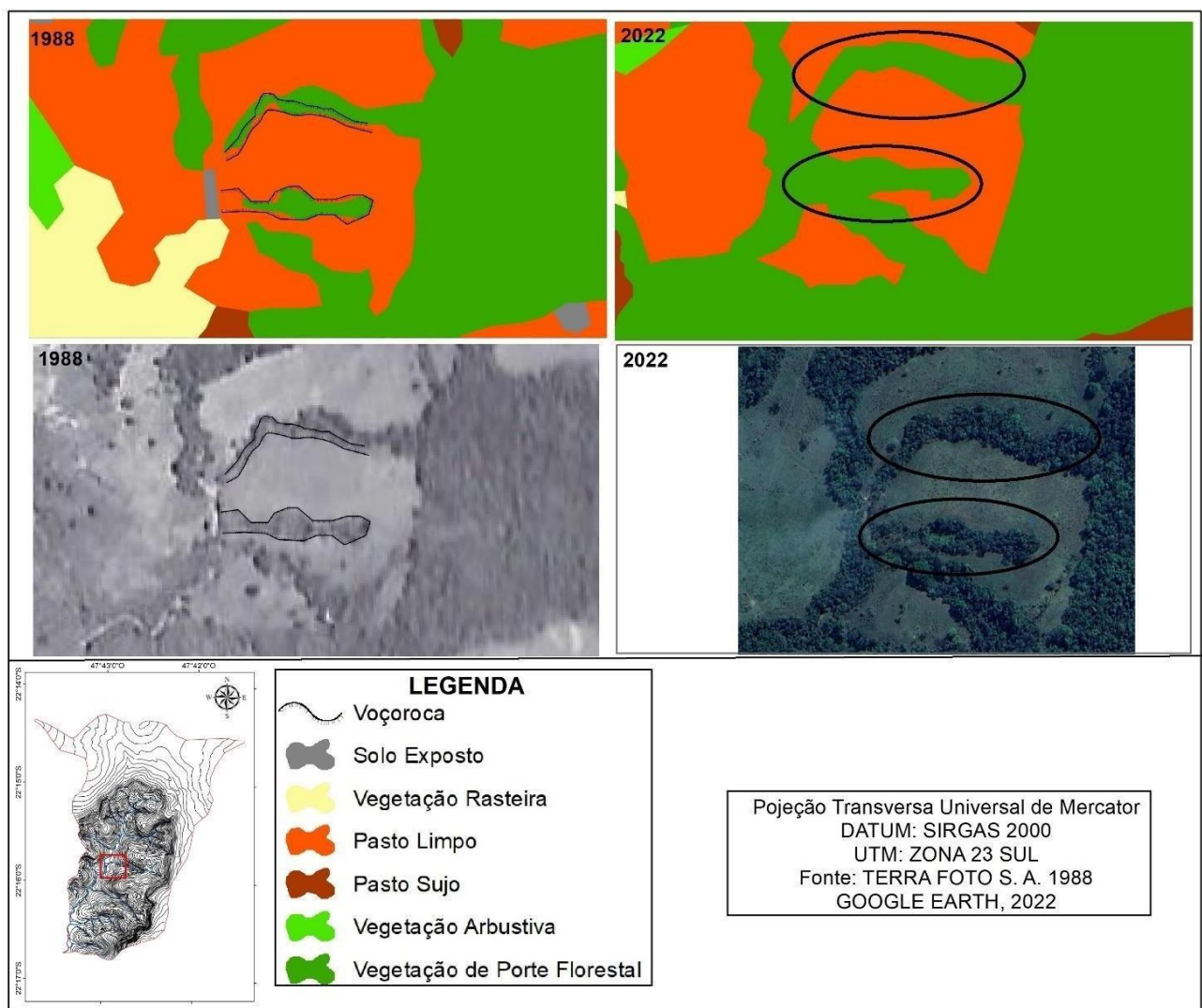


Figura 26: Antiga voçoroca, hoje recoberta pela vegetação



Fonte: Autores

As áreas de pastagens ainda chamam a atenção frente as feições que indicam erosões laminares (Tabela 21). Para o cenário de 2010, mais de 90% destas feições estavam em áreas de pastagens. No entanto, se tratando do cultivo de cana-de-açúcar, no cenário de 1988, foi o segundo uso com mais feições deste tipo, com mais de 30% de todas as feições que indicam erosões laminares. Para o cenário de 2022, a maioria das feições que indicam erosão laminar se encontram sobre as áreas de cana-de-açúcar, com mais de 52%.

Tabela 21: Feições que indicam erosão laminar por classe de uso da terra

Classe de uso da terra	1988	2010	2022
Cana-de-açúcar	31,8%	7,1%	52,3%
Pasto Limpo	22,7%	50%	30,9%
Solo exposto	45,4%	0%	4,7%
Pasto Sujo	0%	42,8%	11,9%

Fonte: Autores

Desta forma, por serem áreas por onde ocorrem o carreamento de sedimentos em superfície, de forma concentrada através dos sulcos erosivos e de forma esparsa pelas feições que indicam erosões laminares, os produtores locais criaram inúmeras feições do tipo bacia de contenção, especialmente nas bordas das áreas de cultivo da cana-de-açúcar, próximas as estradas rurais de acesso a essas plantações (Figura 27).

No entanto, a presença de inúmeras bacias de contenções as margens das áreas de plantio de cana-de-açúcar, evidenciam a perda de sedimentos causados pelos processos erosivos nestas áreas, especialmente nos períodos de entre safra, quando o solo fica exposto. O interior destas bacias denota uma grande quantidade de sedimentos transportados por processos de erosão laminares em direção as áreas de captação das bacias de contenção. Ainda, nos períodos de safra, quando há a presença do cultivo de cana, pode ocorrer o transporte de sedimentos, principalmente através das estradas rurais, conforme pode ser observado pela figura 27.

Figura 27 – Fotos de uma bacia de contenção em área de cana.



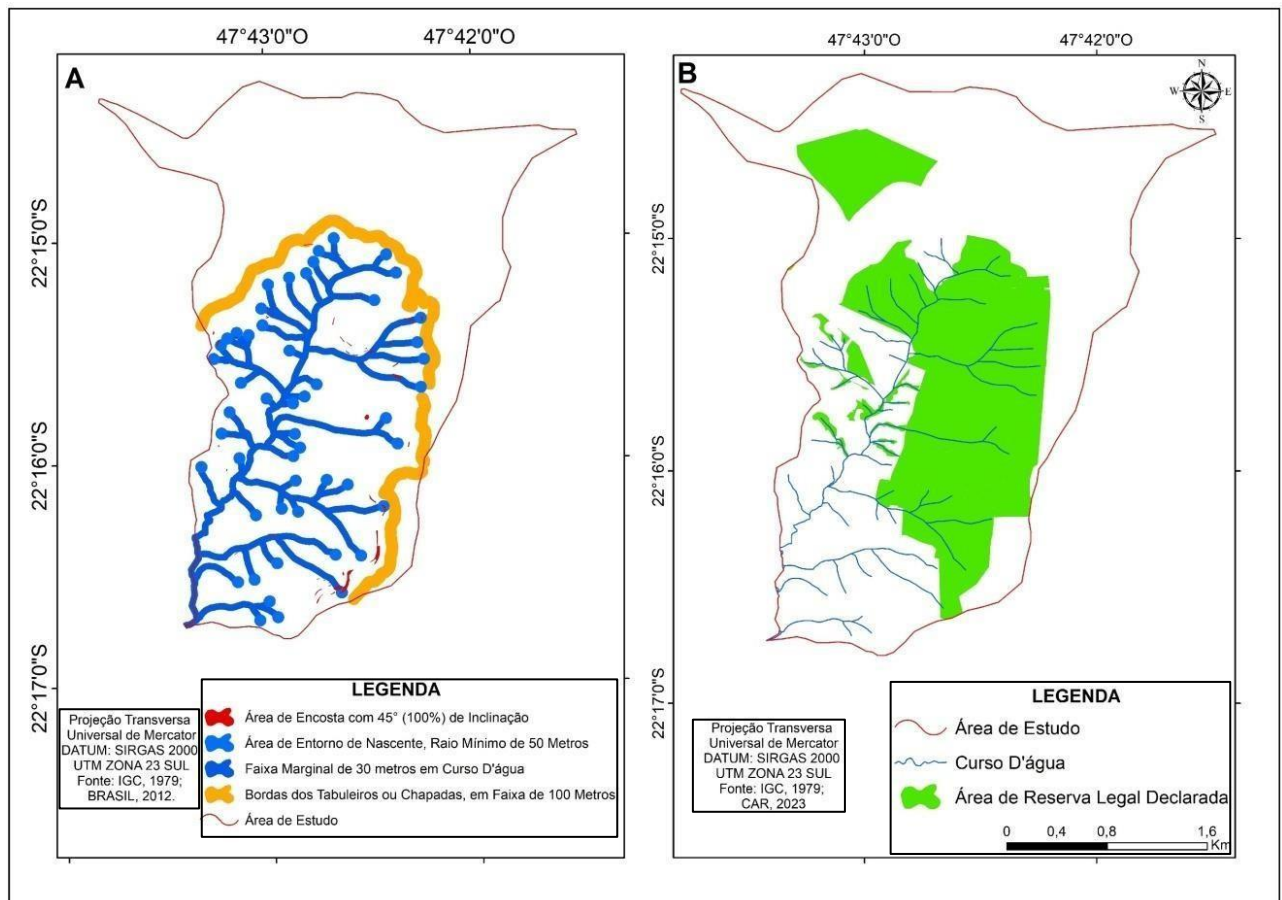
Fonte: Autores

Desta maneira, observa-se que o uso destinado a áreas de pastagens, como o pasto limpo e pasto sujo, representa os padrões econômicos de uso da terra com maior tendência erosiva ao longo dos cenários mapeados. Em sua maioria, possuem as maiores concentrações de sulcos erosivos e de ravinas, incluindo feições de maiores magnitudes, como as voçorocas, de maior capacidade erosiva e que representam um sério problema ambiental, uma vez que a presença de voçorocamentos inviabiliza a produção agrícola local, potencializa a perda de material pedológico e a consequente perda de qualidade dos solos, podendo ainda desencadear o assoreamento de cursos d'água ao longo da bacia.

Conforme destacam Descroix *et al.*, (2008), a erosão causada em áreas de pastagens, especialmente as quais possuem problemas de sobrepastoreio, são as maiores causas da degradação ambiental em todo o planeta. Não obstante, a cartografia retrospectiva aplicada na área de estudo permitiu constatar que este problema de ordem global também se registra na área estudada.

Outra questão importante analisada na área de estudo refere-se à preservação dos terrenos resguardados pela Lei 12,651. Foram mapeadas as áreas que devem ser de preservação permanente, assim como foram reunidos os dados de Reserva Legal declarada pelos proprietários (Figura 28).

Figura 28 – (A): Áreas de Preservação Permanente. (B): Áreas Declaradas como Reserva Legal.



Através da análise da figura 28(A), constatou-se que as áreas de APP deveriam ocupar 224 hectares de vegetação nativa. No entanto, a figura 26 mostra que algumas áreas de APP estão destinadas a outro uso da terra, como por exemplo para o plantio de cana-de-açúcar e pastagens. Desta maneira, dos 224 hectares de áreas de preservação permanente, apenas 153 hectares estão preservados, com 71 hectares não possuindo vegetação arbórea.

As áreas de Reserva Legal (RL) declaradas pelos proprietários totalizam 309 hectares (Figura 28B). No entanto, quando analisada a distribuição destas áreas de RL, muitas se encontram sobrepostas a áreas de APP, o que pela Lei 12.651, não é correto, já que, além da obrigação dos proprietários de manterem as áreas de APP, as propriedades devem dispor de áreas adicionais preservadas, sem sobreposição a APP's. Assim, dos 309 hectares declarados, 78 hectares estão em áreas de APP, sendo apenas 231 hectares declarados como de Reserva Legal de fato (Figura 29). Porém, dos 231 hectares restantes como área de RL, 76 hectares não possuem vegetação arbórea,

conforme a carta de uso da terra do cenário de 2022. Desta forma, apenas 155 hectares dos 309 hectares declarados cumprem a função destinada como Reserva Legal (Tabela 22).

Figura 29 - Áreas de APP e de Reserva Legal sem vegetação de porte florestal

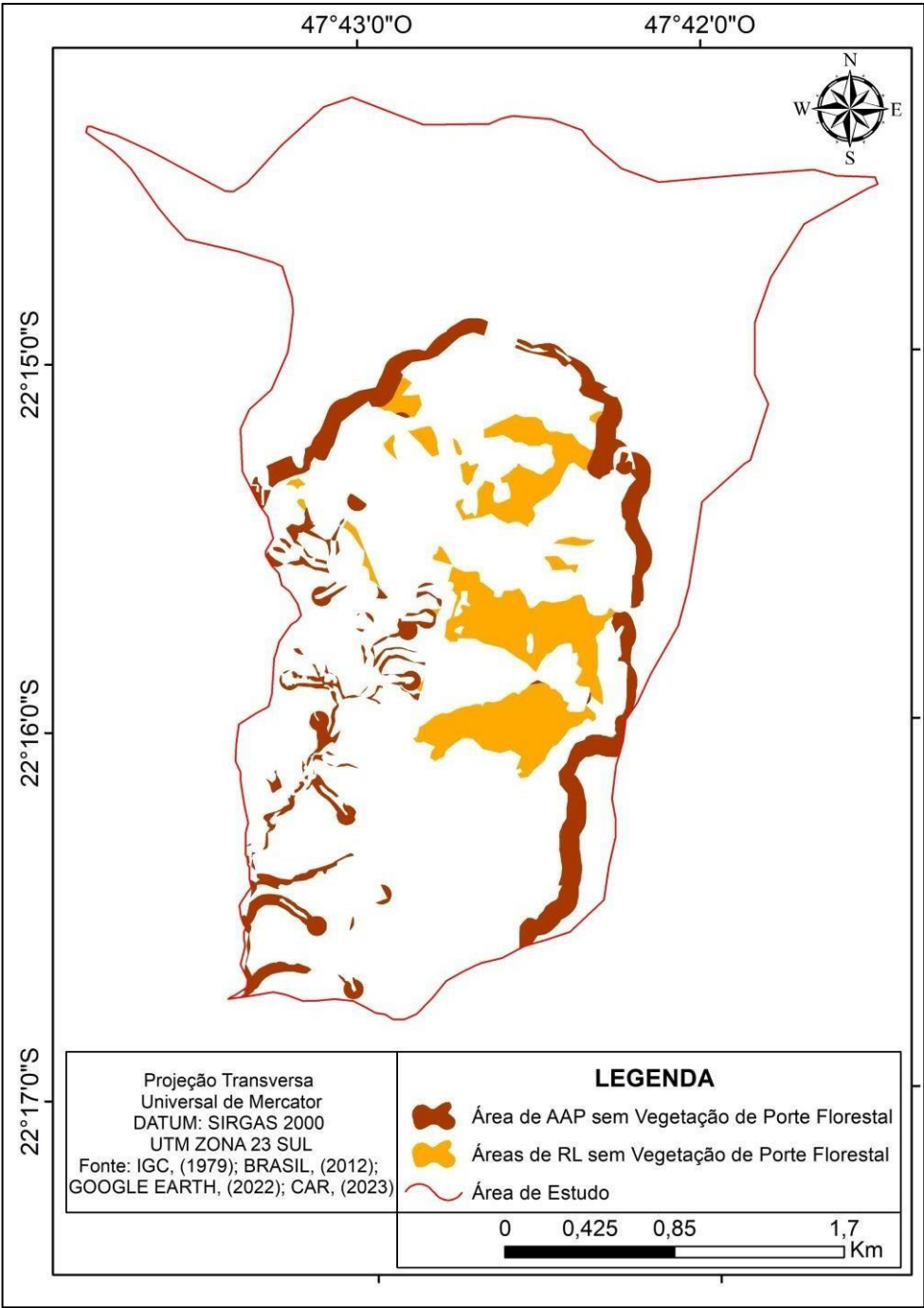


Tabela 22 - Áreas de APP e de Reserva Legal.

	Área total	Área sem vegetação de porte florestal, destinadas a outro uso	Área de Reserva Legal Declarada sobreposta a áreas de APP	Total de área com vegetação de porte florestal

Área de Preservação Permanente (APP)	224 hectares	71 hectares	-	153 hectares
Área de Reserva Legal	309 hectares	76 hectares	78 hectares	155 hectares

Fonte: Autores

Com isso, mesmo depois de 10 anos do estabelecimento da Lei 12.561, do novo Código Florestal em 2012, inúmeras áreas que já deveriam estar destinadas a recuperação ambiental ou preservadas, ainda se encontram em uso para outros fins. As APP's possuem importante destaque, pois podem evitar importantes processos de degradação ambiental, como deslizamentos de terras em áreas muito declivosas ou de processos erosivos próximos aos cursos hídricos, que quando desencadeados, geram o assoreamento das nascentes ou do leito fluvial, gerando um problema ambiental em toda a extensão da bacia hidrográfica (Brasil, 2012).

Ainda, a falta de vegetação arbórea nas áreas de APP e de RL, além de gerarem processos erosivos em excesso, desencadeiam a perda das camadas superficiais dos solos, com a consequente perda da fertilidade, transformando áreas de preservação em localidades degradadas, conforme observado através das análises dos dados de uso e ocupação da terra e das feições erosivas lineares.

Por fim, a falta de vegetação nativa em áreas de Reserva Legal compromete os estudos e critérios ambientais utilizados em sua delimitação, os quais buscam estabelecer planos de manejo de bacias hidrográficas e de formação de corredores ecológicos que ligam áreas de reservas legais a áreas de APP, possuindo relevância para a conservação da biodiversidade e para localidades de maior fragilidade ambiental (Brasil, 2012).

5.3 O Uso Adequado das Terras

Analisa-se a seguir os dados obtidos com os mapeamentos de uso adequado das terras, em duas propostas, ideal e viável. As cartas foram comparadas, a fim de se avaliar o grau de diferença entre ambas as propostas. A comparação se dá pela análise da área ocupada por cada classe e pela sobreposição das feições erosivas mapeadas em ambas as propostas.

Assim, nas cartas de uso adequado das terras, proposta ideal (Figura 30) e viável (Figura 31), é possível identificar as variações entre estas e os terrenos mais suscetíveis ao desenvolvimento de feições erosivas, destacados pelas indicações de uso para reflorestamento e de preservação, em setores próximos ao relevo cuneiforme e aos cursos d'água.

Figura 30: Carta de uso adequado das terras em ambiente de relevo cuestiforme, proposta ideal

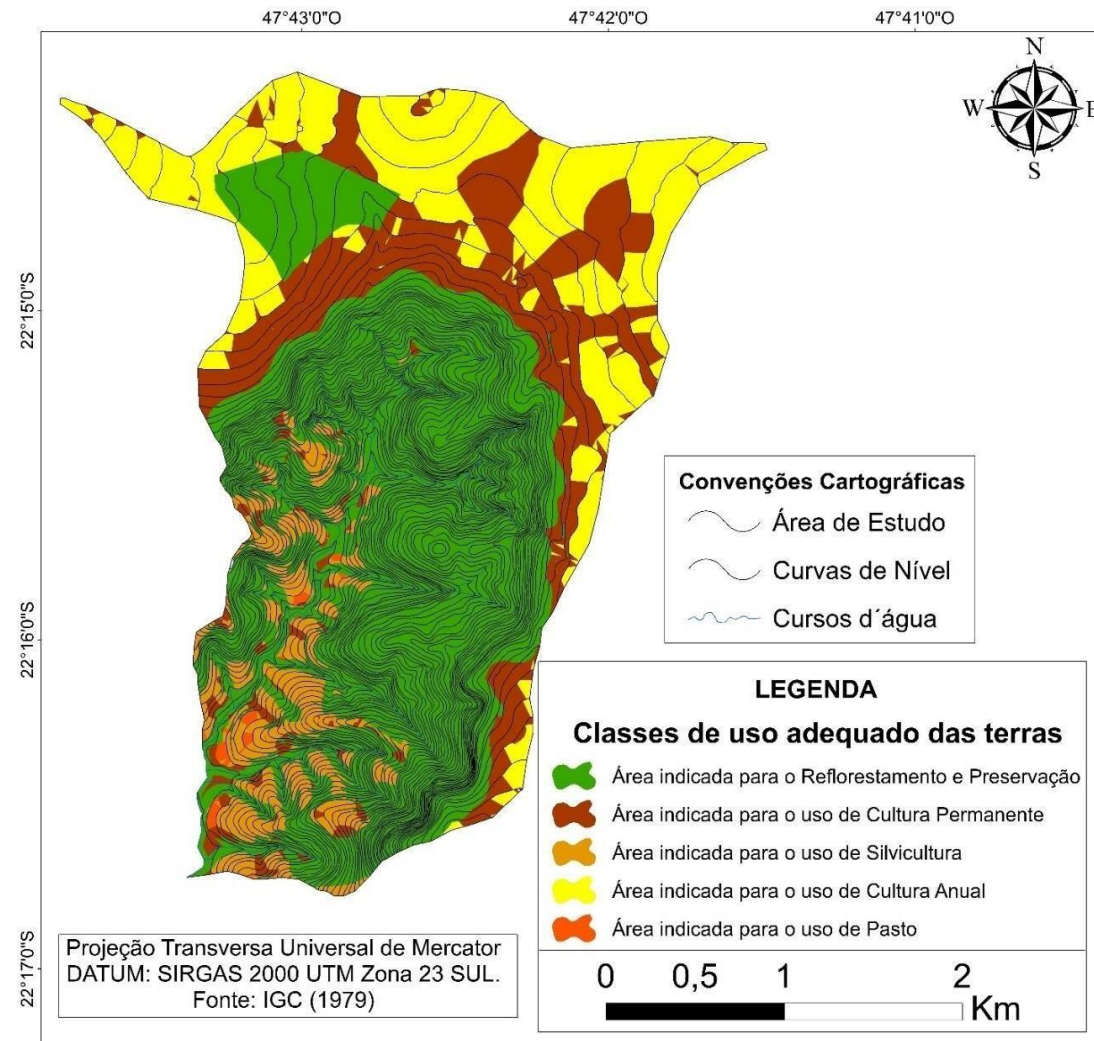
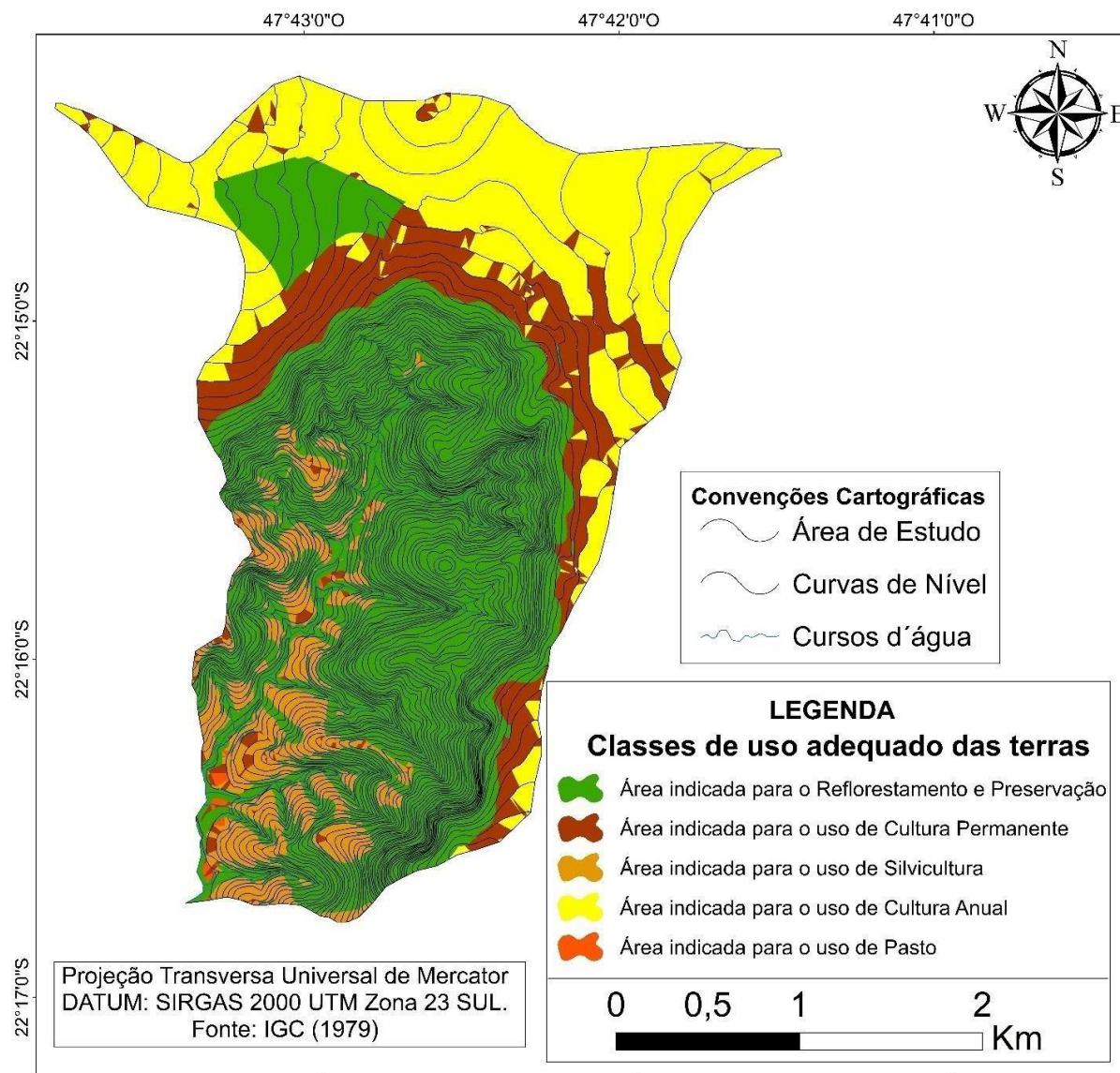
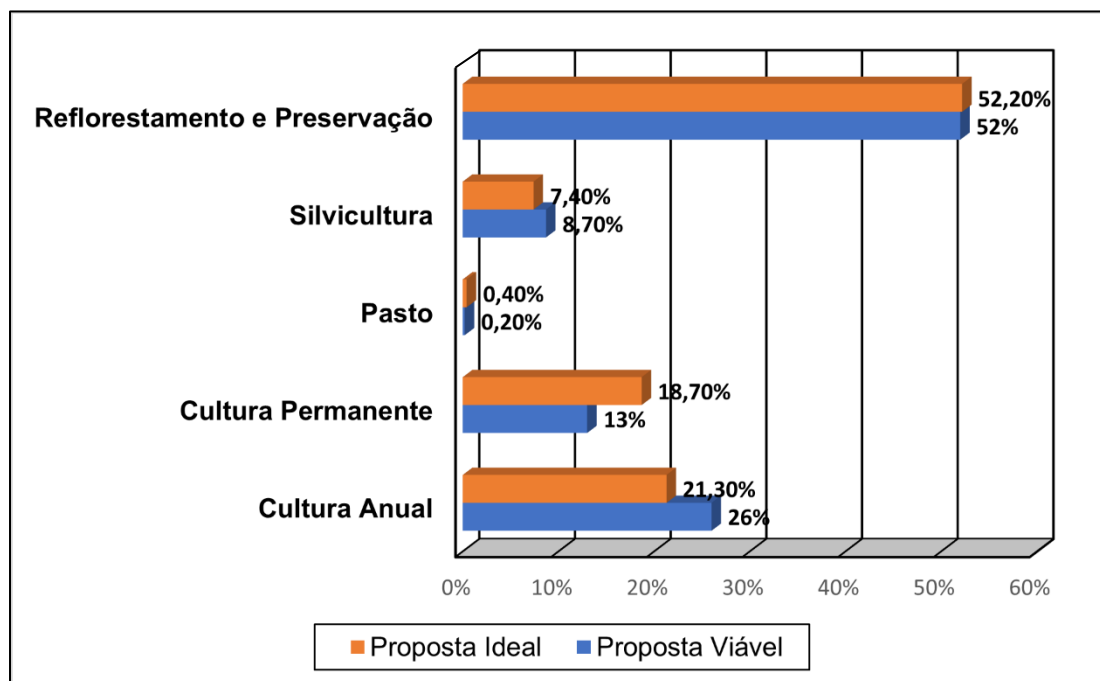


Figura 31: Carta de uso adequado das terras em ambiente de relevo cuestiforme, proposta viável



Analisando de forma quantitativa, ocorrem mudanças significativas entre uma proposta de outra (Gráfico 2). As áreas designadas para o reflorestamento e preservação sofrem poucas mudanças entre as propostas, com apenas 0,2% a mais de área destinada a preservação no cenário ideal.

Gráfico 2: Área em porcentagem ocupada por cada classe de uso nas propostas ideal e viável

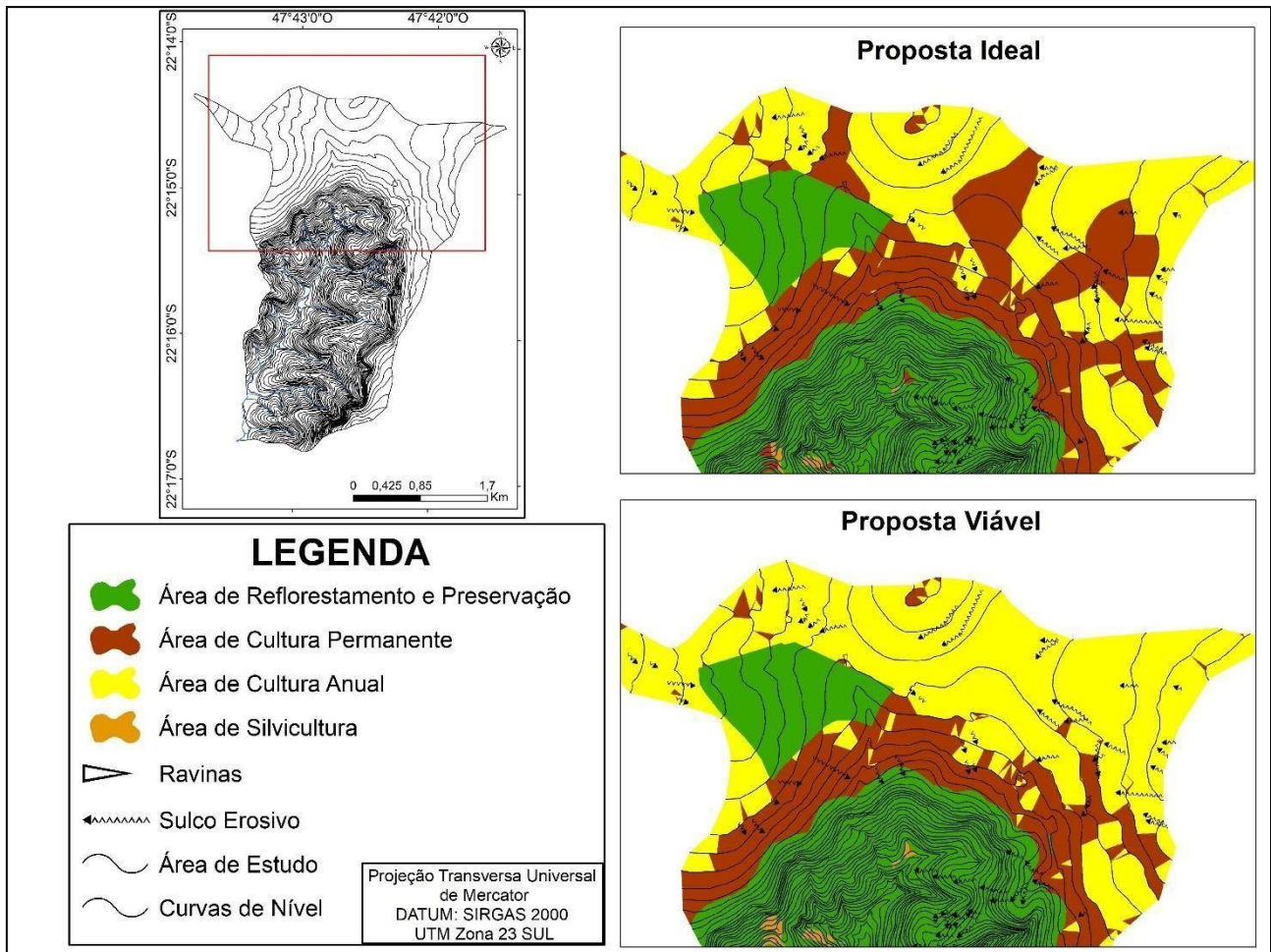


Fonte: Autores

Já a silvicultura possui uma diferença de 1,3% entre as propostas ideal e viável. Como a proposta ideal considera as áreas de concavidades como destinadas a cultura permanente, boa parte das áreas indicadas como de silvicultura na proposta viável passam para o cultivo de cultura permanente na proposta ideal. Ainda, a cultura permanente assume boa parte das áreas de cultura anual na proposta ideal, principalmente nas áreas de concavidades de vertente, passando de 13% na proposta viável para 18,7% na proposta ideal.

A cultura anual perde significativo espaço entre as propostas, diminuindo 5,7% entre as propostas ideal e viável, o que evidência mais uma vez a importância da consideração das áreas de concavidades na proposta ideal em detrimento da proposta viável. Conforme pode ser observado pela figura 29, as áreas de concavidades no setor do reverso se destacam pela diminuição das áreas de cultura anual em relação as áreas de cultura permanente. Ainda, as declividades mais amenas neste setor facilitam o emprego do uso da terra para os cultivos anuais e permanentes.

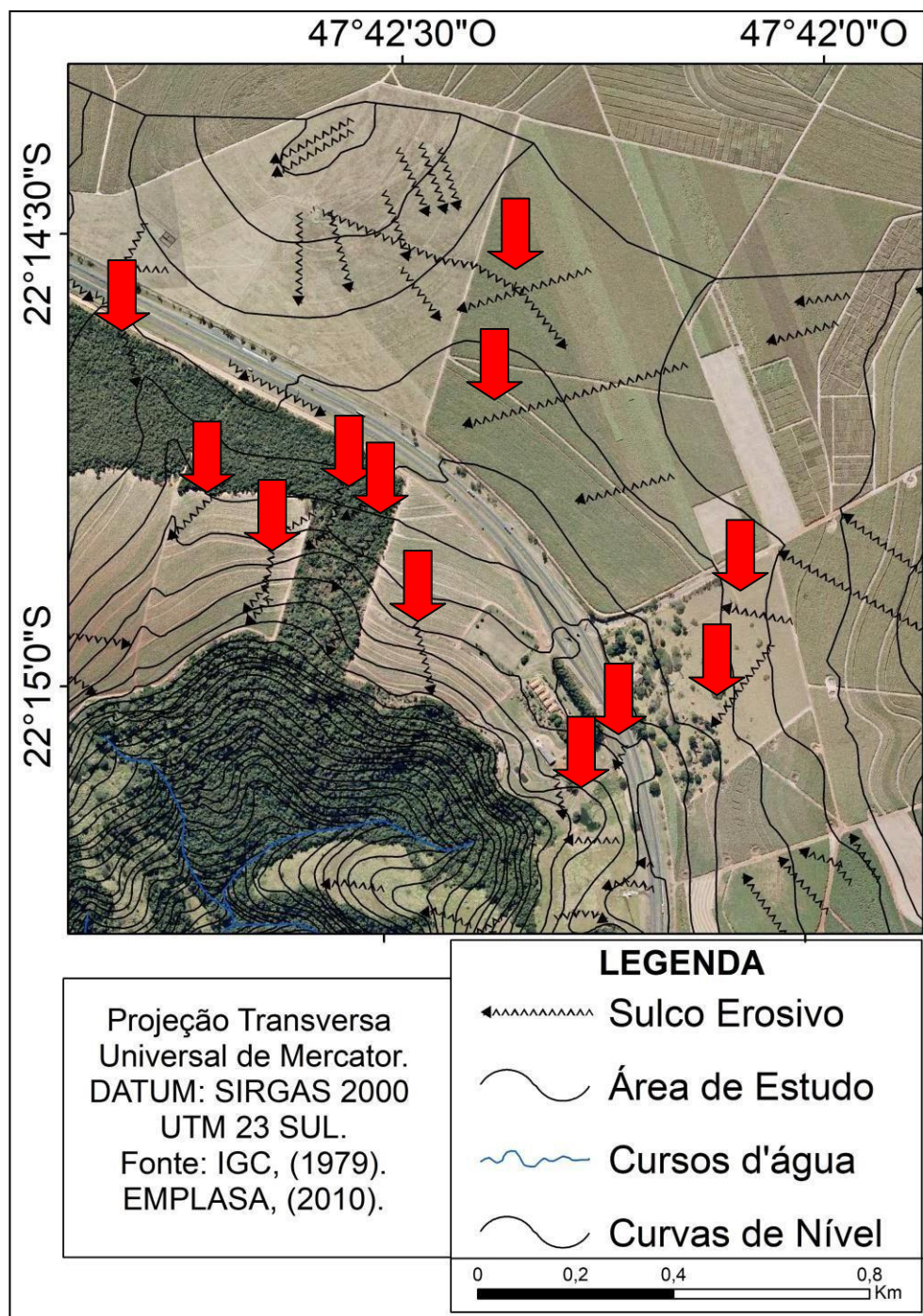
Figura 32: Diferença entre as propostas ideal e viável na área de reverso do relevo cuestasiforme



Fonte: Autores

Ainda, a proposta ideal, ao sugerir culturas permanentes em áreas côncavas, visa conferir maior proteção a essas localidades, por serem áreas naturalmente de maior escoamento de água. Como pode ser observado na figura 33, os sulcos erosivos, mapeados no cenário de 2010, nas áreas de reverso do relevo cuestiforme, estão predominantemente em vertentes côncavas, muito associadas ao cultivo de cana-de-açúcar e as estradas de acesso a essas plantações. Como pode ser constatado (Figura 33), os sulcos presentes nos setores de convexidades tendem a rumarem para as áreas de concavidades. São situações como essas, que ocorrem ao longo da área de estudo e em muitos cenários que a proposta ideal visa evitar.

Figura 33: Sulcos erosivos mapeados no setor de reverso no cenário de 2010, com destaque para aqueles em áreas de vertentes côncavas

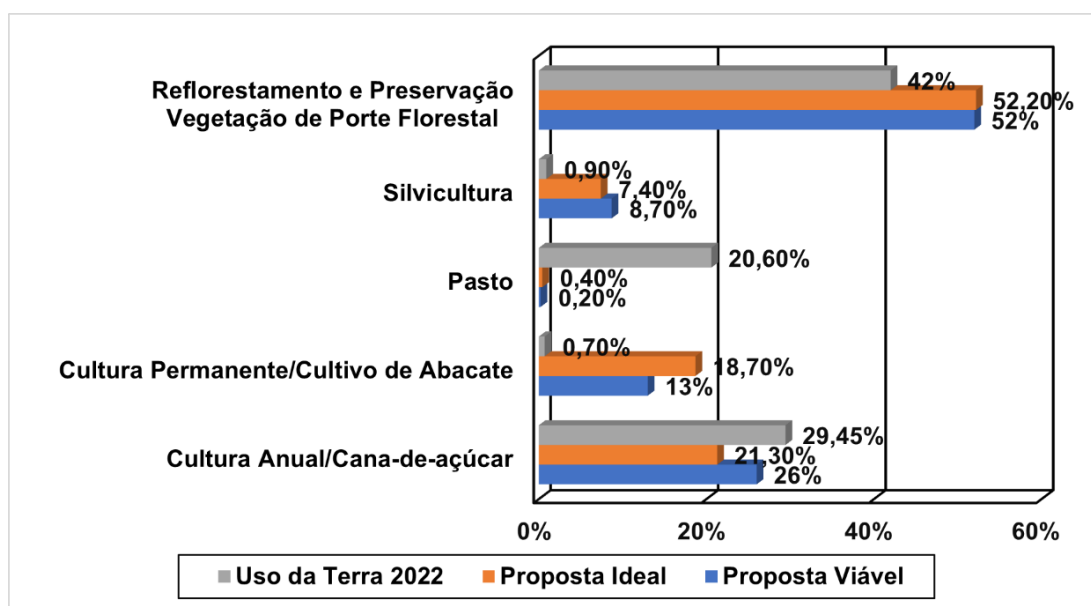


Já as áreas de pasto, consideradas como o uso antrópico da terra de maior problema frente aos processos erosivos lineares na área de estudo, se manteve bem restrito em ambas as propostas. Para a proposta ideal, a qual considerou a energia do relevo para o estabelecimento das classes, o pasto representa apenas 0,4% do total da área de estudo. Porém, na proposta viável, que considera a declividade em detrimento da energia, o pasto perdeu ainda mais espaço, totalizando apenas 0,2% da área total da bacia. A pequena diferença entre ambas as cartas se dá principalmente pelos critérios estabelecidos para a energia do relevo, a qual leva em consideração a dissecação vertical e horizontal, além da própria declividade, o que conferiu ao pasto a possibilidade de expandir em 0,2% em sua área a partir destas características.

Ainda, as áreas de pasto para ambas as propostas se concentram nas áreas de menores declives e de energia do relevo mais fracas, próximas ao rio principal da bacia e com a presença do Argissolos Vermelho-Amarelos, que embora seja uma classe considerada de grande suscetibilidade a ocorrência de processos erosivos, é de baixa fertilidade, o que qualitativamente, possibilita a indicação do uso econômico destas áreas para pastagens, desde que as demais variáveis permitam, tendo ainda a necessidade de um acompanhamento adequado por parte dos proprietários para o emprego correto de medidas conservacionistas. No entanto, a pouca área destinada ao uso do pasto na área de estudo em ambas as propostas sinaliza que a localidade não é de fato adequada para este uso da terra, salvo raras exceções. Como em ambas as propostas, além das áreas de pasto ocuparem poucas extensões na área de estudo, a continuidade espacial destas áreas é baixa, sendo pontuais e esparsas (Figura 27 e 28), o que tornaria esse uso da terra inviável do ponto de vista econômico em ambas as propostas.

Conforme apontado ao longo do trabalho, boa parte da área de estudo está atualmente destinada ao uso de áreas de pastagens, cana-de-açúcar (Cultura anual) e vegetação de porte florestal (Gráfico 3).

Gráfico 3: Comparativo entre as principais classes de uso da terra no cenário de 2022 com as classes de uso adequado das terras das propostas ideal e viável



Fonte: Autores

Embora a área no cenário de 2022 tenha 42% do total coberto pela vegetação de porte florestal, que é uma boa porcentagem levando-se em consideração o uso da terra em outras áreas similares (Stefanuto; Lupinacci, 2019; Silva; Lupinacci, 2021; Bonzanini; Lupinacci, 2022), as propostas evidenciam a necessidade de expansão destas, a partir das fragilidades naturais dos

terrenos. Além disso, constatou-se que diversos setores de APP e de Reserva Legal se encontram sem a presença de vegetação de porte florestal, com inúmeras áreas sendo destinadas principalmente ao pasto, o que corrobora ainda mais para que este uso da terra se apresente como uma grande problemática erosiva na área de estudo.

Para os demais padrões de uso da terra, é nítido que as áreas de cultura permanente e de silvicultura ocupam poucas localidades na área de estudo, o que evidencia o uso econômico da terra ainda muito tradicional, observado desde 1988, muito voltado para as atividades típicas e históricas do interior do estado de São Paulo, como o pasto e a cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar é o uso da terra que mais se aproxima na realidade frente as propostas, não só pela porcentagem de área ocupada, mas pela área a qual ocupa no cenário de 2022. Como em ambas as propostas, o cultivo de cultura anual é majoritariamente indicado nos setores de reverso do relevo de *cuestas*, boa parte planos e de baixa energia do relevo, com solos bem desenvolvidos, sendo características que permitem esse cultivo. Porém, é comum ainda a relação destas áreas de cultivo de cana com as feições que indicam erosão laminar, conforme apontado na tabela 21 e imagem Figura 24, indicando que estas localidades merecem atenção quando este uso for aplicado, necessitando de um manejo adequado por parte dos proprietários. Ainda, a proposta ideal, que impede que as áreas concavas sejam aproveitadas para o cultivo de culturas anuais pode auxiliar no controle dos processos erosivos laminares, a partir do plantio de culturas permanentes.

De fato, todas estas questões evidenciam a problemática que há em aplicar as propostas aqui apresentadas, mesmo que ambas apresentem dados satisfatórios. Embora as duas tenham significativa variação espacial de um mesmo cultivo ao longo da bacia, ou seja, alguns usos apresentam baixa continuidade espacial, o que dificultaria a aplicação para a economia das propriedades rurais. Assim, a proposta ideal se apresenta como a mais indicada perante a preservação ambiental, ao restringir o uso econômico da terra nas áreas concavas à cultura anual, acrescentando ainda 0,2% a mais de áreas de reflorestamento e de preservação na área de estudo, contribuindo de forma mais significativa na diminuição dos processos erosivos lineares.

Ressalta-se ainda que, embora a proposta ideal tenha uma resposta mais interessante, a complexidade e dificuldade de sua elaboração sugere que os resultados obtidos pela proposta viável, mais simples e ágil de ser elaborada, são de qualidade, ficando significativamente próximos, em especial para a classe de reflorestamento e de preservação. Porém, a desconsideração das áreas concavas como critério de elaboração das classes de capacidade de uso na proposta viável, torna a proposta ideal mais adequada, mesmo com sua complexidade inerente de elaboração.

6. Considerações Finais

A partir das características morfométricas do relevo, foram identificados setores com fragilidades naturais a ocorrência de processos erosivos lineares, especialmente aqueles com a declividade variando entre as classes de 10 a 15% e de 15 a 30%, e possuindo energia do relevo nas classes medianamente forte e forte. Com isso, as feições erosivas lineares estão concentradas entre os topos dos patamares estruturais e os fundos de vales, em média e baixa vertente.

No que se refere as classes de solos, as feições erosivas lineares se encontram nas bordas da classe dos Argissolos Vermelho-Amarelos e dos Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos, em contato com a classe Neossolos Litólicos Eutróficos. A partir dos Neossolos, as feições erosivas se concentram em direção a média e baixa vertente; enquanto em contato superior, em meio aos patamares estruturais, concentram-se feições erosivas no contato com os Latossolos Vermelhos/Nitossolos Vermelhos. Especialmente para as voçorocas, os terrenos que merecem maior atenção estão sobre os Argissolos Vermelho-Amarelos com contato entre os Neossolos Litólicos Eutróficos.

A partir dos compartimentos de relevo, constatou-se que as feições erosivas do tipo sulco se concentram nas áreas de vertente convexa, enquanto as áreas de vertente côncava concentram as ravinas e boa parte das voçorocas. As áreas de APTF apresentam as maiores taxas de voçorocamento, junto das vertentes côncavas, o que justifica a sua preservação.

Quanto ao uso da terra, constatou-se que há um aumento gradual da vegetação de porte florestal desde o cenário de 1988, mesmo que a Lei 12.651 não esteja plenamente aplicada a todas as áreas de APP e de RL. Ainda, se tratando de uso econômico da terra, a maioria das feições erosivas lineares observadas para os cenários de 1988, 2010 e 2022 estão sob o uso de pastagens, com as voçorocas principalmente concentradas em áreas de pasto limpo. Por se tratar de uma área declivosa, o que dificulta a mecanização da agricultura, a pastagem se tornou a principal atividade econômica da bacia, seguida pelas plantações de cana-de-açúcar, majoritariamente encontradas no reverso do relevo cuestiforme, sob declividade amena. Embora apresente poucas feições de grandes magnitudes, e com ausência de voçorocamentos, a cana-de-açúcar merece atenção por apresentar muitos sulcos erosivos e feições que indicam erosão laminar.

Com isso, evidencia-se que a área de estudo se apresenta como uma localidade de potencial natural a ocorrência de processos erosivos e, com o uso e ocupação da terra nos padrões atuais, os processos de degradação ambiental se fazem atuantes, em destaque para as áreas de pastagens. Embora o número total de feições erosivas lineares tenha diminuído entre o cenário inicial de 1988 e o último cenário de 2022, o aumento expressivo nas áreas de APTF evidencia a perda de

capacidade de transporte de materiais conduzidos pelos cursos d'água, acarretando o aumento das áreas de acumulação. Esta situação pode ainda ser explicada pela falta de vegetação nativa em áreas de APP, pelo manejo inadequado das áreas de pastagens e de cultivo de cana-de-açúcar, e pela presença de usos incompatíveis com as características naturais da área de estudo.

Desta forma, as propostas de capacidade de uso da terra, elaboradas com o intuito de auxiliar no planejamento ambiental e no uso da terra em áreas com a presença de relevo cuestiforme e degradadas, evidenciam o emprego de padrões de uso da terra incompatíveis com as características naturais dos terrenos estudados, especialmente para as áreas de pastagens. Embora no cenário mais recente a área de estudo apresente mais de 20% da sua área total destinada ao pasto, observa-se que a proposta ideal, a mais otimista para este uso, indica apenas 0,4% da área total da bacia como adequada ao emprego desta classe, o que testemunha o uso inadequado das terras na área estudada.

Ainda, a comparação entre as propostas ideal e viável permitiu avaliar qual destas seria de melhor aplicação, levando em consideração a conservação ambiental em uma área com o relevo declivoso, de inúmeras fragilidades naturais e com grandes quantidades de feições erosivas identificadas. Chegou-se à conclusão de que, para o cenário apresentado, a proposta ideal tende a proteger mais os terrenos, embora possua uma complexidade inerente em sua produção quando comparada a proposta viável, a qual se demonstrou também com um resultado satisfatório. A escolha pela proposta ideal se justifica especialmente pela maior proteção as áreas de concavidades, as quais concentram as voçorocas, e na diminuição significativa da cultura anual, que conforme exposto ao longo do trabalho, mesmo quando aplicada em condições naturais favoráveis, pode potencializar a ocorrência de erosões laminares, devido à falta de manejo adequado das áreas de produção. Não obstante, para ambas as propostas, valendo-se para as classes de pasto, cultura anual, cultura permanente e silvicultura, mesmo que as condições dos terrenos sejam favoráveis aos cultivos, deve-se empregar o manejo conservacionista dos terrenos, a fim de se evitar a ocorrência de processos erosivos.

Por fim, a adaptação da proposta original de Zanatta (2018), realizada para áreas com a presença de relevo cuestiforme, necessitou de inúmeros ajustes frente a proposta original de 2018, tendo em vista as diferenças impostas a partir das características naturais dos terrenos entre as áreas de estudo. As principais diferenças estão na sistemática de avaliação das classes de energia do relevo, dos compartimentos do relevo e das classes de solo que são substancialmente diferentes em função dos relevos de *cuesta*. Ainda, a proposta apresentada possui a distinção entre silvicultura e cultura permanente, sendo que a proposta original indica apenas o uso para a silvicultura. Não menos importante, as adaptações realizadas foram estabelecidas frente a realidade da área de estudo analisada, podendo ser testadas em outras localidades com a presença do relevo cuestiforme, que

podem possuir distinções da alta bacia do Rio Cabeça, necessitando de novas adaptações diante da complexidade dos terrenos em área de *cuesta*.

Referências Bibliográficas

AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE – U. S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. Ephemeral Gully Erosion – A National Resource Concern. **Watershed Physical Processes Research**. Oxford (EUA), Technical Research, n° 69, 2010.

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, 1964.

AZIZ, S.; ISLAM, M. S. Erosion and runoff reduction potential of vetiver grass for hill slopes: A physical model study. **International Journal of Sediment Research**, n. 38, p. 49-65, 2023.

ANDRADE, R. V. de. **Processos erosivos no relevo de cuestas: A influência antrópica e a legislação ambiental no município de Botucatu (SP)**. 2022. Dissertação (Mestrado em geografia) –Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2022.

BARTHES, B.; ROOSE, E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. **Catena**, n. 47, p.133-149, 2002.

BERNATEK-JAKIEL, A.; POESEN, J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. **Earth-Science Reviews**, n. 185, p. 1107-1128, 2018.

BERTONI, J.; PASTANA, F.I.; LOMBARDI-NETO, F.; BENATTI-JÚNIOR, R. **Conclusões gerais das pesquisas sobre conservação do solo no Instituto Agronômico**. Campinas: Instituto Agronômico, 1972. 56p.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. p. 1436.

BOIN, M. N.; ZANATTA, F. A. S.; LUPINACCI, C. M. Avaliação da morfometria do relevo da alta bacia hidrográfica do ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP). **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. 2, p. 5-26, 2014.

BONZANINI, H.L.; LUPINACCI, C. M.; STEFANUTO, E. B. A Erosão Linear e Sua Relação com a Morfometria do Relevo na Alta Bacia do Rio Capivara – Botucatu (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, n.4, v. 15, p.1947-1964, 2022.

BRASIL. **Lei nº 6.766/79, de 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providencias. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acesso em: 30/09/2022.

BRASIL. **Lei nº 12.651/12, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.933, de 19 de dezembro de 199, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, de 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providencias. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso: 29/08/2022.

CABECAUER, T.; HOFIERKA, J. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. **Geomorphology**, n. 98, p. 187-198, 2008.

CADASTRO AMBIENTAL RURAL – CAR. **Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural**. Disponível em: <https://www.car.gov.br/#/>. Acesso em: 08/02/2023.

- CAETANO-CHANG M. R.; WU F.T. As Formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. *In: Simpósio de Geologia do Sudeste*, 4, Águas de São Pedro, 1995. **Anais [...]**, Rio Claro, Boletim Resumos, p. 64. 1995.
- CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. Diagênese de arenitos da formação Pirambóia no centro-leste paulista. **Geociências**, Rio Claro, v. 22, 33-39, 2003.
- CAMA, M.; SCHILLACI, C.; KROPA CEK, J.; HOCHSCHILD, V.; BOSINO, A.; MARKER, M. A probabilistic assessment of soil erosion susceptibility in a head catchment of the Jemma basin, Ethiopian highlands. **Geosciences**, n. 10, 2020.
- CAMARA, M. R. G.; CALDARELLI, C. E. Expansão canavieira e o uso da terra no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo. v. 30, n. 88, p. 93 – 116, 2016.
- CAMBRA, M.F.E.; SILVA, L.G.E.; DANTAS, M.E. & COELHO NETTO, A.L. Lito-estruturas pré-cambrianas no controle do voçorocamento atual: Subsídios a modelagem sobre expansão da rede de canais na bacia do rio Piracema (SP/RJ). *In: Simpósio Nacional de Geografia Física Aplicada*, 6, Goiânia, 1995. **Anais [...]**, Goiânia, UFG, V.1. p. 487-492. 1995.
- CERON, A. O.; DINIZ, J. A. F. O uso das fotografias aéreas na identificação das formas de utilização agrícola da terra. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 28, 161-173, 1966.
- CLIMATE-DATA. **Clima Itirapina**. 2023. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/itirapina-34775/>. Acesso em: 12 mar. 2023.
- COUTO JUNIOR, A. P.; CONCEIÇÃO, F. T. da.; FERNANDES, A. M.; SPATTI JUNIOR, E. P.; LUPINACCI, C. M.; MORUZZI, R. B. Land use changes associated with the expansion of sugar cane crops and their influences on soil removal in tropical watershed in São Paulo state (Brazil). **Catena**, n. 172, p. 313-323, 2019.
- CONCIANI, W. **Processos erosivos: conceitos e ações de controle**. 1 ed. Cuiabá: CEFET - MT, 2008, 148p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T & BARBOSA, C. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CUNHA, C. M. L. **A cartografia do relevo no contexto da gestão ambiental**. 2001. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.
- CUNHA, C. M. L.; PINTON, L. G. Avaliação da capacidade de uso da terra da bacia do córrego do cavaleiro – Analândia, SP. **Geociências**, Rio Claro (SP), v. 31, n. 3, p.459-471, 2012.
- DAL RÉ CARNEIRO, C. “Os fundamentos geológicos do relevo paulista” nos dias atuais. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 39, n. 3, 2018.
- DALEY, J. S.; *et al.* Direct rain splash and downwearing of internal surfaces as an important erosion process in aluvial gully development. **Catena**, n. 221, p. 1-15, 2023.
- DATAGEO – SISTEMA AMBIENTAL PAULISTA. **Cartas topográficas 1:10.000**. Disponível em: <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO>. Acesso: 02/09/2022.
- DE BIASI, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 2, 1970.
- DE BIASI, M. A carta clinográfica: Os métodos de representação e sua confecção. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, n. 6, p. 45-60, 1992.

DESCROIX, L.; GAUTIER, E. Water erosion in the French Southern Alps: climatic and human mechanisms. **Catena**, n. 50, p. 53-85, 2002.

DESCROIX, L.; BARRIOS, J. L. G.; VIRAMONTES, D.; POULENARD, J.; ANAYA, E.; ESTEVES, M.; ESTRADA, J. Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. **Catena**, n. 72, p. 325-339, 2008.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO – EMPLASA. **Ortofotos do Estado de São Paulo 2010/2011**. São Paulo: EMPLASA, 2010/2011. Escala: 1:25.000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural**. Colombo (PR): Embrapa Florestas, 2000. p. 31.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Recuperação de Voçorocas em Áreas Rurais**. 1º edição. Seropédica: EMBRAPA, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Controle dos Processos Erosivos Lineares (ravinas e voçorocas) em Áreas de Solos Arenosos**. Circular Técnica n.22, EMBRAPA, Jaguariúna: EMBRAPA, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 5º edição. Brasília: EMBRAPA, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Solos Tropicais: Neossolos**. Página da web, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/neossolos>. Acesso em: 10/11/2023.

FACINCANI, E. M. **Morfotectônica da depressão periférica paulista e cuesta basáltica: regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba, SP**. 2000. 222 f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Roma: FAO, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point**. Roma: FAO, 2021.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSE, M.; GARCAS, C. M. **Drenagem e Controle da Erosão Urbana**. Curitiba: Champagnat, 1997.

FERREIRA, R. R. M.; FERREIRA, V. M.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R. Origem e evolução de voçorocas em Cambissolos na bacia do alto Rio Grande, Minas Gerais. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007, Gramado-RS. **Anais**, (...), 2007.

FLAUZINO, B. K.; MELLONI, E. G. P.; PONS, N. A. D.; LIMA, O. de. Mapeamento da capacidade de uso da terra como contribuição ao planejamento de uso do solo em sub-bacia hidrográfica piloto no sul de Minas Gerais. **Geociências**, Rio Claro (SP), v. 35, n. 2, p.277-287, 2016.

FURLANI, G. M. **Estudo geomorfológico das voçorocas de Casa Branca – São Paulo**. 1980. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia (FFLCH), São Paulo, 1980.

GALETI, P. A. **Conservação do solo, reflorestamento e clima**. 2. ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1982. 286p.

GOOGLE. **Imagens Google earth**. Versão 9.150.0.2. [S.I.]: Google LLC. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 10/09/22.

GIBOSHI, M. L. **Desenvolvimento de um sistema especialista para determinar a capacidade de uso da terra**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 1999.

GOLDMAN, S. J.; JACKSON, K.; BURSHTYNSKY, T. A. **Erosion and sediment control handbook**. Nova York: McGraw-Hill, 1986.

GOMES, W. M.; MIGUEL, A. E. S.; PINTO, A. L. Análise da dissecação horizontal e vertical da bacia hidrográfica do córrego Moeda, Três Lagoas/MS. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 12, n. 03, 2016.

GOUDIE, A. S. Human influence in geomorphology. **Geomorphology**, v. 7, p. 37-97, 1993.

GOUDIE, A. S. **Encyclopedia of geomorphology**. Nova York: Routledge, 2004.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994. p. 149-196.

GUERRA, A. G.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 2010. p. 652.

GUERRA, A. J. T. **Erosão dos Solos e Movimentos de Massa – Abordagens Geográficas**. Curitiba: CRV, 2016.

GRAB, S.; DESCHAMPS, C. Geomorphological and geocological controls and process following gully development in Alpine Mires, Lesotho. **Arctic, Antarctic and Alpine Research**, v. 36, n. 1, p. 49-58, 2004.

GYSEL, G.; POESEN, J.; BOCHET, E.; LI, Y. Impacto of plant roots on the resistance of soil to erosion by water: A review. **Progress in Physical Geography**, n. 2, p. 189-217, 2005.

HARTMANN, L. A. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o recente. **Ciência e Natura**, Santa Maria (RS), v.36, Ed. Especial, p. 173-182, 2014.

HAN, J.; GUZMAN, J. A.; CHU, M. L. Gully erosion susceptibility considering spatiotemporal environmental variables: Midwest U.S. region, **Journal of Hydrology: Regional Studies**, n. 43, p. 1-15, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Manual técnico de Uso da Terra**. 3ª edição. Rio de Janeiro: IBGE, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **Malha municipal**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 10/09/2022.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo, IPT, 1981.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - IGC. **Mapeamento sistemático do estado de São Paulo**. São Paulo: IGC, 1979. Escala 1:10.000.

KARIMINEJAD, N.; SEPEHR, A.; POESEN, J.; HASSANLI, ALI. Combining UAV remote sensing and pedological analyses to better understand soil piping erosion. **Geoderma**, n. 429, p. 1-15, 2023.

- KERTZMAN, F.F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X.; GOUVEIA, M. I. F. Mapa da erosão do estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, volume especial, 1995. p. 31-36.
- KINNELL, P. I. A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review. **Hydrological Processes**, n. 14, p. 2815-2844, 2005.
- KLINGEBIEL, A. A.; MONTGOMERY, P. H. **Land - capability classification**. Washington, D. C. USDA, 1961. 21p.
- KOFFLER, N. F.; *et al.* **Solos da bacia do Rio Corumbataí**. Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 1992.
- LAL, R. **Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management**. New York: McGraw-Hill, 1990.
- LEPSCH, I. F.; BELINAZZI Jr., D.; ESPINDOLA, C. R. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação das terras no sistema de capacidade de uso**. 4ª aproximação. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 1983.
- LOU, Y.; *et al.* Vegetation affects gully headcut erosion processes by regulating runoff hydrodynamics in the Loess tableland region. **Journal of Hydrology**, n. 616, p. 1-11, 2023.
- MA, R. M.; LI, Z. X.; CAI, C. F.; WANG, J. G. The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). **Catena**, n. 121, p. 279-287, 2014.
- MA, R. M.; HU, F.; XU, C.; LIU, J.; ZHAO, S. Response of soil aggregate stability and splash erosion to different breakdown mechanisms along natural vegetation restoration. **Catena**, n. 208, p. 1-8, 2022.
- MAGALHÃES, R. A. **Processos erosivos e métodos de contenção**. Ouro Preto: CEEB, 1995.
- MARQUES, J. Q. A. **Manual brasileiro para levantamentos conservacionistas: 2ª aproximação**. Rio de Janeiro: Escritório Técnico Brasil-Estados Unidos (ETA), 1958. 135p.
- MARQUES, J. Q. A. **Manual para levantamento da capacidade de uso da terra: 3ª aproximação**. Rio de Janeiro: Escritório Brasil-Estados Unidos (ETA), 1971. 433p.
- MATHIAS, D. T.; NUNES, J. O. R. A dinâmica geotecnogênica em áreas periurbanas: município de São Pedro (SP). **Geosul**, Florianópolis, v. 34, n. 70, p. 484-498, 2019.
- MATULE, E. D.; MACARRINGUE, L. S. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo no distrito de Boane em Moçambique. **Sociedade e natureza**, Uberlândia (MG), v. 32, p.225-235, 2020.
- MENDES, I.A. **A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na bacia do Córrego Lafon – Araçatuba – SP**. 1993. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- MERGULHÃO, A. D. Circuito de produção da laranja no Brasil: Do cultivo aos produtos industriais destinados principalmente ao mercado internacional. **Estudos Geográficos**, Rio Claro (SP), v. 16, n. 2, p. 126-136, 2018.
- MIYAZAKI, L. C. P.; OLIVEIRA, A. A. G. Anáglifo, fotointerpretação e imagens do Google Earth como alternativa para elaboração do mapeamento geomorfológico da Serra do Corpo Seco – Ituiutaba – MG (Brasil). **Revista Ibero-Afro-Americana de Geografia Física e Ambiente**, Porto (PT), v. 2, nº 2, p. 43-65, 2020.

MOKARRAM, M.; ZAREI, A. R. Determining prone areas to gully erosion and the impact of land use change on it by using multiple-criteria decision-making algorithm in arid and semi-arid regions. **Geoderma**, n. 403, p. 1-13, 2021.

MONTEIRO, C.A.F. **A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo: estudo geográfico sob forma de atlas**. USP, São Paulo, 1973.

NOGUERAS, P.; BURJACHS, F.; GALLART, F.; PUIGDEFABREGAS, J. Recent gully erosion in the El Cautivo badlands (Tabernas, SE Spain). **Catena**, n. 40, p. 203-215, 2000.

NORTON, E. A., **Soil conservation survey handbook**. Washington: USDA, 1939, 40p.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de Latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Belo Horizonte, v. 32, 2008, p. 2839-2845.

NYSSSEN, J.; POSEN, J.; MOEYERSONS, J.; DECKERS, J.; HALIE, M. Erosion et conservation des sols en montagne sahélienne: le cas de l'Éthiopie du Nord. **Sécheresse**, v. 15, n1, p. 33-39, 2004.

OLIVEIRA, J. B. de.; PRADO, H. do. **Levantamento pedológico semidetalhado do estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos II. Memorial descritivo**. Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA, 1984. 188 p.

PASCHOAL, L. G.; CONCEIÇÃO, F. T.; CUNHA, C. M. L. Utilização do ArcGis 9.3 na elaboração de simbologias para mapeamentos geomorfológicos: Uma aplicação na área do Complexo Argileiro de Santa Gertrudes/SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 8., 2010, Recife. **Anais [...]**. Recife: UFPE, 2010. p. 1-14

PEREYRA, M. A.; FERNÁNDEZ, D. S.; MARCIAL, E. R.; PUCHULU, M. E. Agricultural land degradation by piping erosion in Chaco Plain, Northwestern Argentina. **Catena**, n. 185, p. 1-15, 2020.

PINHEIRO, L. S.; CUNHA, C. M. L. Extensão de vertentes: contribuição à modelagem erosiva. In: 10º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 10, 2014, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: UEA, 2014.

PINTON, L.G.; CUNHA, C. M. L. Implicações geomorfológicas da dinâmica do uso da terra da bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia/SP – Brasil. In: 12º ENCONTRO DE GEOGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 12., 2009, Montevideo. **Anais [...]**. Montevideo: UM, 2009. p. 59-63.

PINTON, L.G. **Evolução dos processos morfogenéticos em relevo cuneiforme: a bacia do Córrego do Cavalheiro – Analândia (SP)**. 2016. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

PES, L. Z.; GIACOMINI, D. A. **Conservação do solo**. Rede e-Tec Brasil, UFSM, Santa Maria, 2017. 69 p.

PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. Mapa Geológico da Bacia do Rio Corumbataí. In: GARCIA, G.J.; ANTONELLO, S.L.; MAGALHÃES, M.G.M. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. Rio Claro, Centro de Análise e Planejamento Ambiental, IGCE, UNESP, 2010.

PEÑUELA, A.; *et al.* A multi-millennial reconstruction of gully erosion in two contrasting Mediterranean catchments. **Catena**, v. 220, p. 1-13, 2023.

POESEN, J.; NACHTORGAL, J.; VERSTRAC, G. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, n. 50, p. 91-133, 2003.

POESEN, J.; *et al.* Gully erosion in Europe. In: BOARDMAN, J; POESEN, J. **Soil Erosion in Europe**. EUA: John Wiley & Sons, 2006, p. 515–536.

- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de Avaliação da Aptidão Agrícola das Terras**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1995. 78p.
- RAN, Q.; SU, D.; LI, P.; HE, Z. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff Generation and soil erosion. **Journal of hydrology**, n. 424-425, p. 99-111, 2012.
- RAJIBANSHI, J.; DAS, S; PAUL, R. Quantification of the effects of conservation practices on surface runoff and soil erosion in croplands and their trade-off: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, n. 864, p. 1-15, 2023.
- RODRIGUEZ, J. M. M.; MAURO, C. A.; RUSSO, I. L.; SILVA, C. M. S.; BOVO, R.; ARCURI, M. E. P.; MARINHO, V. L. F. Análise da paisagem como base para uma estratégia de organização geoambiental: Corumbataí (SP). **Geografia**, Rio Claro (SP), vol. 20 (1), p. 81- 129, 1995
- RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. **Geoecologia das paisagens: uma visão geossistêmica da análise ambiental**. Fortaleza: Editora UFC, 2004. 222 p.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v.8, p. 63-74, 1994.
- ROSS, J. L. S. Análise e síntese na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 9, p. 65-75, 1995
- RUBIRA, F. G.; MELO, G. do V. de M.; OLIVEIRA, F. K. S. Proposta de padronização dos conceitos de erosão em ambientes úmidos de encosta. **Revista de Geografia**, Recife, n. 1, p. 168-193, 2016.
- SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (edit.). **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1998. p. 87-101.
- SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-265.
- SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais [...]**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 1, p. 41-65
- SHIN, S. S.; PARK, S. D.; PIERSON, F. B.; WILLIAMS, C. J. Evaluation of physical erosivity factor for interrill erosion on steep vegetated hillslopes. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 559–572, 2019.
- SIDLE, R. C.; GOMI, T.; USUGA, J. C. L.; JARIHANI, B. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. **Earth-Science Reviews**, v. 175, p. 75-96, 2017.
- SINOGA, J. D. R.; MURILLO, J. F. M. Effects of soil surface components on soil hydrological behaviour in a dry Mediterranean environment (Southern Spain). **Geomorphology**, n. 108, p.234-345, 2009.
- SILVA, T. P. da.; SALGADO, C. M.; GONTIJO, A. H. F.; MOURA, J. R. da S. A influência de aspectos geológicos na erosão linear – médio-baixo vale do Ribeirão do Secretário, Paty do Alferes (RJ). **Geosul**, Florianópolis, v. 18, n. 36, p. 131-150, 2003.

- SILVA, M. M.; LUPINACCI, C. M. Análise das alterações antropogeomorfológicas na Bacia do Rio Cabeça (SP) a partir do uso de geoindicadores. **Geografias**, Belo Horizonte, v.29, n.1, p. 1-22, 2021.
- SMART, R. P.; *et al.* The dynamics of natural pipe hydrological behavior in blank peat. **Hydrological Processes**, n. 11, p. 1523-1534, 2012.
- SOAREAS, P. C. **O Mesozóicogondwânico no Estado de São Paulo**. 1973. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1973.
- SOCHAVA, V. B. **O estudo de geossistemas**. São Paulo: Instituto de Geografia USP, 1977.
- SOUSA, M. O. L. **Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D’Alho e Jibóia – Centro do Estado de São Paulo**. 2002. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- SOUZA, T. de A. de.; OLIVEIRA, R. C. de. Avaliação da potencialidade de imagens tridimensionais em meio digital para o mapeamento geomorfológico. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 2, p. 1348-1355, 2012.
- SPIRIDONOV, A. I. **Principios de la Metodologia de las investigaciones de Campo y el Mapeo Geomorfológico**. Havana: Universidad Habana, Vol. 3, 650p. 1981
- STEFANUTO, E. B. **Análise da dinâmica erosiva linear e seu potencial evolutivo em ambiente agrícola**. 2019. Dissertação (Mestrado em geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2019.
- SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Soil macro-aggregate turnover and micro-aggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agricultural soil. **Soil Biol. Biochem.**, n. 32, p. 2099-2103, 2000.
- TERRA FOTO S. A. **Fotografias aéreas de 1988**. São Paulo: Terra Foto S.A., 1988. Escala 1:40.000.
- TROMBETA, L. R.; LEAL, A. C. Planejamento ambiental e geoecologia das paisagens: contribuições para a bacia hidrográfica do córrego Guixarinha, município de Alvares Machado, São Paulo, Brasil. **Revista Formação (online)**, Presidente Prudente, v. 3, p. 187-216, 2016.
- TRICART, J. **Principes et méthodes de la geomorphologie**. Paris: Masson ET C éditeurs; 1965.
- TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPREN, 1977. 91p.
- VANACKER, V.; *et al.* Land use impacts on soil erosion and rejuvenation in Southern Brazil. **Catena**, n. 178, p. 256-266, 2019.
- VALENTIN, C.; POESEN, J.; YONG, L. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 2-3, p. 132-153, 2005.
- VERSTAPPEN, F. A. S.; ZUIDAN, R. A. van. **ITC System of geomorphological survey**. Enschede: International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences; 1975.
- WANG, B.; ZHANG, G. H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the loess plateau. **Soil Science of America Journal**, n. 6, v. 81, p.1567-1576, 2017.
- WANG, L.; SHI, Z. H.; WANG, J.; FRANG, N. F.; WU, G. L.; ZHANG, H. Y. Rainfall Kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 168-176, 2014.

WANG, L.; ZHENG, F.; HU, W.; ZHANG, X. J.; SHI, H. Interactive effects of rainfall intensity, kinetic energy and antecedent moisture regime on splash erosion in the Ultisol region of South China. **Catena**, n. 222, p. 1-11, 2023.

WEN, Y.; KASIELKE, T.; LI, H.; ZHANG, B.; ZEPP, H. May agricultural terraces induce gully erosion? A case study from the Black Soil Region of Northeast China. **Science of the Total Environment**, n. 750, p. 1-10, 2021.

WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Soil and water management and conservation. Relation of soil Properties to its erodibility. **Soil Science of America**, n. 33, 131-137.

YAN, Y.; JIANG, Y.; GUO, M.; ZHANG, X.; CHEN, Y.; XU, J. Effects of grain-forage crop type and natural rainfall regime on sloped runoff and soil erosion in the Molisols region of Northeast China. **Catena**, n. 222, p. 1-14, 2023.

ZANATTA, F. A. S. **Limitação física em área rural degradada: busca metodológica para definir o uso adequado das terras**. 2018. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

ZHANG, J.; YANG, M.; DENG, X.; LIU, Z.; ZHANG, F. The effects of tillage on sheet erosion on sloping Fields in the wind-water erosion crisscross region of the Chinese Loess Plateau. **Soil & Tillage Research**, n. 187, p. 235-245, 2019.

ZHU, R.; YU, Y.; ZHAO, J.; LIU, D.; CAI, S.; FENG, J.; RODRIGO-COMINO, J. Evaluating the applicability of the water erosion prediction Project (WEPP) model to runoff and soil loss of sandstone reliefs in the Loess Plateau, Chine. **International Soil and Water Conservation Research**, n. X, p. 1-11, 2023.