



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



RAFAEL VILELA DE ANDRADE

PROCESSOS EROSIVOS NO RELEVO DE CUESTAS: A  
INFLUÊNCIA ANTRÓPICA E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL  
NO MUNICÍPIO DE BOTUCATU (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: Prof<sup>a</sup> Dra. Cenira Maria Lupinacci

Rio Claro - SP  
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

RAFAEL VILELA DE ANDRADE

PROCESSOS EROSIVOS NO RELEVO DE CUESTAS: A  
INFLUÊNCIA ANTRÓPICA E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO  
MUNICÍPIO DE BOTUCATU (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: Prof<sup>a</sup>. Dra. Cenira Maria Lupinacci

Rio Claro - SP

2022

A553p      Andrade, Rafael Vilela de  
              Processos erosivos no relevo de cuestas : a influência  
              antrópica e a legislação ambiental no município de Botucatu  
              (SP) / Rafael Vilela de Andrade. -- Rio Claro, 2022  
              135 p. : il., tabs., fotos, mapas

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

              1. Feições Erosivas. 2. Antropogeomorfologia. 3.  
              Cartografia. 4. Legislação Ambiental. 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.

RAFAEL VILELA DE ANDRADE

PROCESSOS EROSIVOS NO RELEVO DE CUESTAS: A  
INFLUÊNCIA ANTRÓPICA E A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL NO  
MUNICÍPIO DE BOTUCATU (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:

Prof. Dr. João Osvaldo Rodrigues Nunes

Profa. Dra. Andréia Medinilha Pancher

Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci (orientadora)

Conceito: Aprovado

Rio Claro/SP, 24 de novembro de 2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, meus pais Denise e Thales e meu irmão Eduardo pelo apoio, incentivo e parceria desde sempre;

Agradeço à minha namorada Raquel pelo amor, companheirismo, e ajuda ao longo desses anos de pesquisa;

Agradeço a minha orientadora, Professora Cenira, pelos tantos, diversos e valorosos ensinamentos ao longo dos anos de orientação;

Agradeço aos meus amigos do laboratório, departamento e da geografia pelas ajudas, ensinamentos e trocas de ideias;

Agradeço de modo conjunto, mas muito especialmente, a cada um dos amigos que estiveram comigo ao longo dos últimos anos e foram responsáveis por momentos tão felizes;

Agradeço a todos os meus familiares por todo apoio e carinho;

Agradeço cada um dos professores e funcionários da UNESP pelo trabalho que tiveram na minha formação ao longo da graduação e pós-graduação;

Aos professores João Osvaldo Rodrigues Nunes e Andréia Medinilha Pancher por avaliarem esta dissertação;

Agradeço a cada um dos que trabalham, lutam e sonham com um país que valoriza a educação, a ciência, o meio ambiente e que seja desenvolvido, soberano e sem miséria;

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

## RESUMO

O relevo de *cuestas*, característico de regiões de bacias sedimentares e presente de forma expressiva no interior do estado de São Paulo, têm sido objeto de atenção do poder público pelo seu potencial turístico, educacional e ambiental, assim como devido aos problemas que a degradação desse ambiente pode gerar para os sistemas de drenagem, solos e biodiversidade. Por isso, considera-se que, para a sociedade habitar essas regiões sem gerar problemas ambientais, é fundamental o conhecimento da dinâmica do relevo de *cuestas*. Dessa forma, esta pesquisa busca contribuir para o entendimento da influência dos elementos naturais, uso da terra e legislação ambiental sobre os processos erosivos nas regiões de relevo *cuestiforme*, a partir de um estudo de caso no município de Botucatu (SP). Para isso, utiliza-se da concepção metodológica da Teoria Geral dos Sistemas aplicada a Geografia para compreender as inter-relações existentes entre os elementos da natureza, assim como as contribuições da abordagem antropogeomorfológica, por reconhecer o potencial humano de atuar sobre a dinâmica do relevo. Essa análise se desenvolve a partir da elaboração de documentos cartográficos que permitem reconhecer a distribuição espacial das feições geomorfológicas do relevo *cuestiforme*, da densidade de feições erosivas lineares, do uso da terra e das áreas protegidas pela legislação ambiental. O cruzamento entre o mapa de densidade de feições erosivas lineares com o de feições do relevo *cuestiforme*, litologia e solos revelou uma concentração de voçorocamentos nas cabeceiras de drenagem, principalmente sobre latossolos, associadas a contatos litológicos da Formação Marília com a Formação Serra Geral. Ainda, demonstrou que existe uma grande concentração de sulcos e ravinamentos sobre o *front* *cuestiforme* em razão do declive acentuado, da presença de depósitos coluvionares e dos contatos entre coberturas mais argilosas e mais arenosas, oriundas dos basaltos ou formações areníticas. Já a análise das relações entre as feições erosivas e o uso da terra demonstrou a influência das pastagens no desenvolvimento de processos erosivos acelerados, assim como das estradas, rodovias, áreas urbanizadas e de expansão urbana que acarretam em voçorocamentos nos locais de descarga da drenagem das águas pluviais. A avaliação da relação entre as áreas de maior densidade de feições erosivas lineares e as áreas com restrições legais ao uso e ocupação, por sua vez, revelaram a importância da manutenção da vegetação florestal nas áreas com restrições segundo os critérios de declividade e nas Áreas de Preservação Permanente (APP) do entorno de nascentes, assim como a limitação da expansão urbana sobre as faixas de reverso das *cuestas* a fim de evitar o despejo das águas pluviais no *front*.

**Palavras-chave:** Feições Erosivas. Antropogeomorfologia. Cartografia. Legislação Ambiental.

## ABSTRACT

The *cuestras* relief, characteristic of sedimentary basins and extensively present in the state of São Paulo, has been object of attention by the public power due to its tourist, educational and environmental potential, as well as to the problems that the degradation of this environment can cause to the drainage systems, soils and biodiversity. Therefore, it is considered that, for society to live in these regions without generating environmental issues, it is necessary to understand the *cuestras* relief dynamics. Thus, this research seeks to contribute to the understanding of how natural elements, land use and the environmental legislation impacts erosion processes in *cuestras* relief regions, based on a case study in the municipality of Botucatu (SP). In order to do so, the methodological conception of the General Systems Theory applied to Geography was used to understand the interrelationships between the elements of nature, as well as the contributions of the anthropogeomorphological approach, by recognizing the human potential to act in the relief dynamics. This analysis was developed from the elaboration of cartographic documents that allow recognizing the spatial distribution of geomorphological features of the *cuesta* relief, the erosive features density, the land use and areas protected by environmental laws. The overlap between the linear erosive features density map and the *cuesta* relief features, the lithology and the soils, revealed a concentration of gullies in the headwaters, mainly over latosols, associated with lithological contacts of the formations Marília and Serra Geral. It also showed that there is a high concentration of hills and ravines on the *cuesta* front due to the steep slopes, the presence of colluvial deposits and the transitions of more clayey to more sandy covers, due to the contacts of basalts with sandstone formations. The analysis of the spatial relations between the erosive features density and land use, on the other hand, showed that pastures have significant influence in the development of accelerated erosion processes, as well as roads, highways and urbanized areas that lead to gullies in rainwater drainage sites. The evaluation of the areas with the higher linear erosive features density and its relation between areas with legal restrictions on land use revealed the importance of maintaining forest vegetation in slope protected areas and also in the permanent preservation areas around springs. In addition to it, the limitation of urban expansion in the *cuestras* reverse strips, in order to avoid the dumping of rainwater at the front, also revealed to be an important environmental measure.

Keywords: Erosive Features. Anthropogeomorphology. Cartography. Environmental legislation.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1:</b> Localização da Área de Estudos.....	12
<b>Figura 2:</b> Elementos do relevo de cuestras .....	24
<b>Figura 3:</b> Relevo de cuestras em Itirapina – SP.....	24
<b>Figura 4:</b> Bacias hidrográficas da área de estudo.....	28
<b>Figura 5:</b> Embasamento litológico da área de estudo .....	31
<b>Figura 6:</b> Formação Pirambóia (a); Formação Botucatu (b); Formação Serra Geral (c); Formação Marília (d) .....	32
<b>Figura 7:</b> Solos da Área de Estudos .....	34
<b>Figura 8:</b> Climograma de Botucatu (SP) calculado para o período de 1971 a 2006 .....	36
<b>Figura 9:</b> Mapa das Feições Morfológicas da Cuesta em Botucatu .....	60
<b>Figura 10:</b> Relação da posição do front associado aos lineamentos .....	61
<b>Figura 11:</b> Características morfológicas do front da cuesta em Botucatu.....	62
<b>Figura 12:</b> Patamares estruturais na Depressão Periférica sobre o embasamento da Formação Pirambóia .....	64
<b>Figura 13:</b> Patamares estruturais no reverso cuestiforme, nos contatos entre as formações Marília e Serra Geral .....	65
<b>Figura 14:</b> Mapa da Densidade de Feições Erosivas Lineares (1972) .....	66
<b>Figura 15:</b> Mapa da Densidade de Feições Erosivas Lineares (2010) .....	67
<b>Figura 16:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares por compartimento do relevo cuestiforme em 1972 .....	70
<b>Figura 17:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares por compartimento do relevo cuestiforme em 2010 .....	71
<b>Figura 18:</b> Feições erosivas, litologia e solos no reverso cuestiforme .....	72
<b>Figura 19:</b> Feições erosivas lineares e classes de densidade de feições erosivas sobre o tálus .....	73
<b>Figura 20:</b> Feições erosivas no front cuestiforme .....	74
<b>Figura 21:</b> Feições erosivas na Depressão Periférica (a); litologia (b) e solos (c).....	75
<b>Figura 22:</b> Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972.....	76
<b>Figura 23:</b> Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010.....	76
<b>Figura 24:</b> Classes de densidade de feições erosivas lineares próximo aos contatos entre as Formações Serra Geral e Botucatu (a) e sobre os Nitossolos e Neossolos Litólicos (b) .....	78
<b>Figura 25:</b> Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972.....	80
<b>Figura 26:</b> Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010.....	80
<b>Figura 27:</b> Feições erosivas sobre Latossolos Vermelhos.....	81
<b>Figura 28:</b> Feições erosivas na Depressão Periférica sobre Latossolos Vermelho-Amarelo. Próximo à Usina Indiana (Botucatu – SP).....	84
<b>Figura 29:</b> Mapa de Uso da Terra (1972).....	86
<b>Figura 30:</b> Mapa de Uso da Terra (2010).....	87
<b>Figura 31:</b> Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972 .....	89
<b>Figura 32:</b> Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010 .....	89
<b>Figura 33:</b> Pastagens sobre setores de front dismantelado e com patamares estruturais.....	91

<b>Figura 34:</b> Marcas de erosão laminar e terracetes sobre pastagens em Botucatu (SP) .....	92
<b>Figura 35:</b> Densidade de feições erosivas lineares em setores onde o front cuestasiforme é cortado por estradas e ferrovias .....	93
<b>Figura 36:</b> Feições erosivas associadas aos cortes no relevo para a instalação da linha férrea, próximo ao bairro Jd. Vista Linda (Botucatu – SP).....	93
<b>Figura 37:</b> Densidade de feições erosivas próximas a rodovias no reverso cuestasiforme .....	94
<b>Figura 38:</b> Voçoroca desenvolvida em decorrência do despejo das águas pluviais da Rodovia Marechal Rondon, próximo ao bairro Jd. Dom Henrique (Botucatu – SP) .....	95
<b>Figura 39:</b> Voçorocamento desenvolvido em consequência da drenagem urbana no bairro Jardim Maria Luiza (Botucatu - SP) .....	96
<b>Figura 40:</b> Diminuição da intensidade das classes de densidade de feições erosivas entre 1972 e 2010 associadas à expansão urbana. ....	97
<b>Figura 41:</b> Aterramento e obliteração de voçorocas associadas à expansão urbana .....	97
<b>Figura 42:</b> Uso de resíduos urbanos (entulho) para o aterramento de uma voçoroca próxima ao Distrito Industrial II (Botucatu – SP) .....	98
<b>Figura 43:</b> Relação das feições erosivas lineares com as conversões de pastagens para canaviais (a) e canaviais para pastagens (b) entre 1972 e 2010 .....	100
<b>Figura 44:</b> Obliteração de feições erosivas em áreas de pastagens para a instalação de silvicultura próximo à Usina Indiana (Botucatu – SP).....	101
<b>Figura 45:</b> Fragmentos de vegetação na área de estudos .....	101
<b>Figura 46:</b> Mapa das áreas com restrições legais ao uso e ocupação (1972) .....	103
<b>Figura 47:</b> Mapa das áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010) .....	104
<b>Figura 48:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação em 1972 .....	106
<b>Figura 49:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010) .....	106
<b>Figura 50:</b> Comparação das áreas protegidas pela legislação ambiental com as feições erosivas e com as classes de densidade de feições erosivas lineares (2010).....	107
<b>Figura 51:</b> Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação (1972).....	108
<b>Figura 52:</b> Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010).....	109
<b>Figura 53:</b> Recuperação da vegetação no entorno de nascentes entre os anos de 1972 e 2010 .....	110
<b>Figura 54:</b> Relação das feições erosivas lineares desenvolvidas sobre o front com as áreas de manejo florestal sustentável .....	113
<b>Figura 55:</b> Distribuição das feições erosivas lineares sobre o front, nas áreas de declive mais acentuado ou mais brando, próximo à Usina Indiana, Botucatu – SP.....	114
<b>Figura 56:</b> Feições erosivas lineares desenvolvidas sobre o front fora das áreas de manejo florestal sustentável .....	115
<b>Figura 57:</b> Feições erosivas lineares sobre o reverso e front cuestasiforme, em setor onde a APP de borda de tabuleiros ou chapadas é ocupada por pastagens, próximo à Usina Indiana, Botucatu – SP .....	116
<b>Figura 58:</b> Feições erosivas lineares sobre o front, em um setor onde a APP de borda de tabuleiros ou chapadas é ocupada por pastagens, próximo à Chácara Recreio Vista Alegre, Botucatu – SP.....	117
<b>Figura 59:</b> Voçoroca desenvolvida a partir de drenagem urbana sobre o front da cuesta no bairro Jardim Monte Mor – Botucatu (SP) .....	118
<b>Figura 60:</b> Relação das classes de densidade de feições erosivas com os limites da APA Corumbataí, Botucatu, Tejuapá – Perímetro Botucatu .....	119

## Lista de quadros

<b>Quadro 1:</b> Critérios e simbologias utilizados para a representação das feições cuestasiformes de Botucatu .....	43
<b>Quadro 2:</b> Classificação de Feições Erosivas .....	45
<b>Quadro 3:</b> Classes de Densidade de Feições Erosivas Lineares .....	49
<b>Quadro 4:</b> Classes de Uso da Terra.....	52
<b>Quadro 5:</b> Correlação da densidade de feições erosivas lineares com os compartimentos do relevo, embasamento litológico, classes de solos, uso da terra e áreas protegidas pela legislação ambiental.	122

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas por compartimento do relevo cuestasiforme.....	70
<b>Tabela 2:</b> Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010 .....	76
<b>Tabela 3:</b> Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010.....	80
<b>Tabela 4:</b> Área ocupada pelas classes de densidade de sulcos, ravinas, voçorocas e feições erosivas totais nos cenários de 1972 e 2010.....	88
<b>Tabela 5:</b> Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feições erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010.....	88
<b>Tabela 6:</b> Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação .....	105
<b>Tabela 7:</b> Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação .....	107

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	A antropogeomorfologia.....	13
2.2	A erosão dos solos .....	17
2.3	Os relevos de <i>cuestas</i> e sua suscetibilidade à erosão .....	23
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>40</b>
4.1	Mapa das Feições Cuestiformes de Botucatu (SP).....	41
4.2	Mapas de Densidade de Feições Erosivas Lineares (1972 e 2010).....	43
4.2.1	<i>Identificação das feições erosivas a partir da interpretação das fotografias aéreas (1972) e das ortofotos digitais da EMPLASA (2010)</i> .....	44
4.2.2	<i>Processamento da Densidade de Feições Erosivas</i> .....	46
4.3	Mapas de Uso da Terra (1972 e 2010).....	50
4.4	Mapas das Áreas com Restrições Legais ao Uso e Ocupação (1972 e 2010).....	54
4.4.1	<i>APPs das faixas marginais de cursos d'água e entorno de nascentes</i> .....	55
4.4.2	<i>Faixas de Reverso</i> .....	55
4.4.3	<i>Restrições ao uso e ocupação da terra segundo a declividade</i> .....	56
4.5	Análise das Relações Espaciais .....	57
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>59</b>
5.1	A densidade de feições erosivas lineares e sua relação com o relevo cuestiforme, solos e litologia.....	59
5.2	A densidade de Feições Erosivas Lineares e sua relação com as transformações no Uso da Terra.....	85
5.1	Relação das áreas protegidas pela legislação ambiental com as classes de densidade de feições erosivas lineares e o uso da terra.....	102
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>121</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>125</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os relevos de *cuestas* são encontrados em todo o mundo em regiões embasadas por bacias sedimentares monoclinais e caracterizam-se como um degrau topográfico esculpido por processos de erosão diferencial devido ao contato entre uma formação rochosa mais resistente sobreposta a uma mais friável (PENTEADO, 1983; SCHIMIDT, 1989). Essa relação entre as litologias heterogêneas faz com que a erosão mais acelerada da camada inferior tire a sustentação da camada superior mais resistente, levando à ocorrência de processos geomorfológicos sobre o *front*, que causam o recuo dessa feição (IMAIZUME *et al* 2015). Esta dinâmica cria um *front* cuestiforme caracterizado por uma face superior escarpada (cornija) sobreposta a rampas coluvionares na base (*tálus*<sup>1</sup>), compostas pelo material oriundo da cornija (PENTEADO, 1983; SCHIMIDT, 1989).

No Brasil, Ross (1996) registra a presença de relevos cuestiformes em todas as regiões do país, dentre as quais se identificam as *cuestas* da borda leste da bacia sedimentar do Paraná, que, no estado de São Paulo, são chamadas Cuestas Paulistas (AB'SABER, 1956; ALMEIDA, 1974). Este compartimento foi esculpido a partir do contato entre derrames basálticos do Jurássico, que sustentam o *front*, sobrepostos aos arenitos friáveis da Formação Botucatu (IPT, 1981a; IPT, 1981b). De acordo com Ab'Saber (1956) e Almeida (1974), as Cuestas Paulistas se destacam na paisagem como o maior acidente topográfico do interior do estado, a oeste do Planalto Atlântico, cruzando São Paulo de norte a sudoeste de forma quase contínua, marcadas por grandes desníveis locais que ultrapassam os 250 metros e altitudes que chegam a atingir 1200 metros.

Dessa forma, dada as altas declividades identificadas no *front* cuestiforme, o acúmulo de material coluvionar no sopé, as variações litológicas típicas desses terrenos e a intensa dinâmica geomorfológica sob a qual estas áreas estão naturalmente submetidas, entende-se que as Cuestas Paulistas constituem regiões de alta suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Assim, o uso da terra nessas regiões, quando feito de forma mal planejada e sem considerar os limitantes naturais, pode ser especialmente nocivo à conservação dos solos.

Diversos autores (SALOMÃO, 1999; FILIZOLA, BOULET; GOME, 2003; BLANCO; LAL, 2008; GARCIA-RUIZ *et al.*, 2015; DUBE *et al.*, 2020) chamam a atenção para os

---

<sup>1</sup> Cabe explicitar que nesta pesquisa, entende-se por Colúvio: material depositado por processos gravitacionais; *Tálus*: superfície inclinada no sopé da *cuesta* composta por material coluvionar (GUERRA; GUERRA, 2003)

impactos do uso da terra sobre a aceleração dos processos erosivos, especialmente em terrenos que já apresentam suscetibilidade natural a este tipo de degradação. De acordo com a perspectiva da antropogeomorfologia (NIR, 1983; GOUDIE, 2013), atividades humanas têm potencial para acelerar a dinâmica erosiva natural, levando à degradação dos solos, o que tem representado um grande problema ambiental na atualidade. Segundo Montgomery (2007), a erosão acelerada dos solos prejudica a produtividade agrícola, contribui com a emissão de gases de efeito estufa, leva ao assoreamento de corpos d'água e pode destruir infraestruturas urbanas.

Entende-se, portanto, que o uso da terra em áreas de relevos cuestiformes, pode intensificar a ocorrência de processos erosivos acelerados. Assim, é preciso salientar que, reconhecendo os impactos humanos frente à degradação ambiental, o poder público deve buscar maneiras de conter a degradação dos recursos naturais (ar, água, solo, biodiversidade) por meio de normas que limitam o uso da terra em terrenos mais suscetíveis a estes impactos. Dessa forma, entende-se que a investigação acerca do impacto do uso da terra sobre o desenvolvimento de processos erosivos nas áreas de relevo cuestiforme deve considerar os instrumentos legais que atuam sobre a região a fim de avaliar se estes têm sido eficientes na contenção ou atenuação dos processos erosivos. A nível federal, o documento mais importante que orienta a preservação ambiental no país é o novo Código Florestal (Lei 12651/2012), em substituição ao antigo código (Lei 4.771/1965), os quais, apesar de não mencionarem diretamente os relevos cuestiformes, impõe a proteção de áreas de nascentes, faixas marginais de cursos d'água, a borda de tabuleiros ou chapadas e áreas com declividades acentuadas (BRASIL, 1965).

A nível estadual, o governo paulista criou em 1983 as Áreas de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí, Botucatu e Tejuπά, as chamadas APAs da Cuesta, que, sob a gestão da Fundação Florestal, tem como objetivo proteger “as Cuestas Basálticas, Morros Testemunhos (...), exemplares significativos da flora e fauna regional, o Aquífero Guarani e o Patrimônio Cultural da região.” (SÃO PAULO, 2011, p. 4). Já a nível local, o município de Botucatu (SP), por meio da Lei Orgânica do Município (1990) e do Novo Plano Diretor Participativo de Botucatu (Lei Complementar 1224/2017) também estabelecem normativas específicas para a proteção das *cuestas* identificadas no interior do município. De acordo com o Artigo 162º do Plano Diretor “O Município declarará de Utilidade Pública uma faixa de terras de 250 metros de frente da Cuesta de Botucatu, em direção ao reverso, visando sua recuperação, preservação e segurança” (Lei Complementar 1224/2017).

Nesse sentido, o mapeamento da faixa de proteção de 250 metros a partir da linha de ruptura do *front* da *cuesta* em direção ao reverso, elaborado pelo autor durante a graduação, sob orientação da Professora Dra. Cenira Maria Lupinacci, através de um projeto de extensão universitária (LUPINACCI; ANDRADE, 2018), levantou questionamentos sobre a importância e o efeito desta faixa de proteção, assim como das outras restrições legais ao uso e ocupação para a preservação ambiental em áreas de relevo *cuestiforme*. Dessa forma, buscando o aprofundamento neste tema, o Objetivo Geral desta pesquisa foi analisar a interferência de múltiplas variáveis, como a litologia, os solos, o relevo, o uso da terra e a legislação ambiental, na degradação dos solos em relevos de *cuestras*. Para isso, buscou-se identificar a ocorrência e distribuição de feições erosivas lineares sobre as *cuestras* de Botucatu (SP), relacionando-as com as características naturais do terreno, com os padrões de uso da terra e com as áreas protegidas pela legislação ambiental.

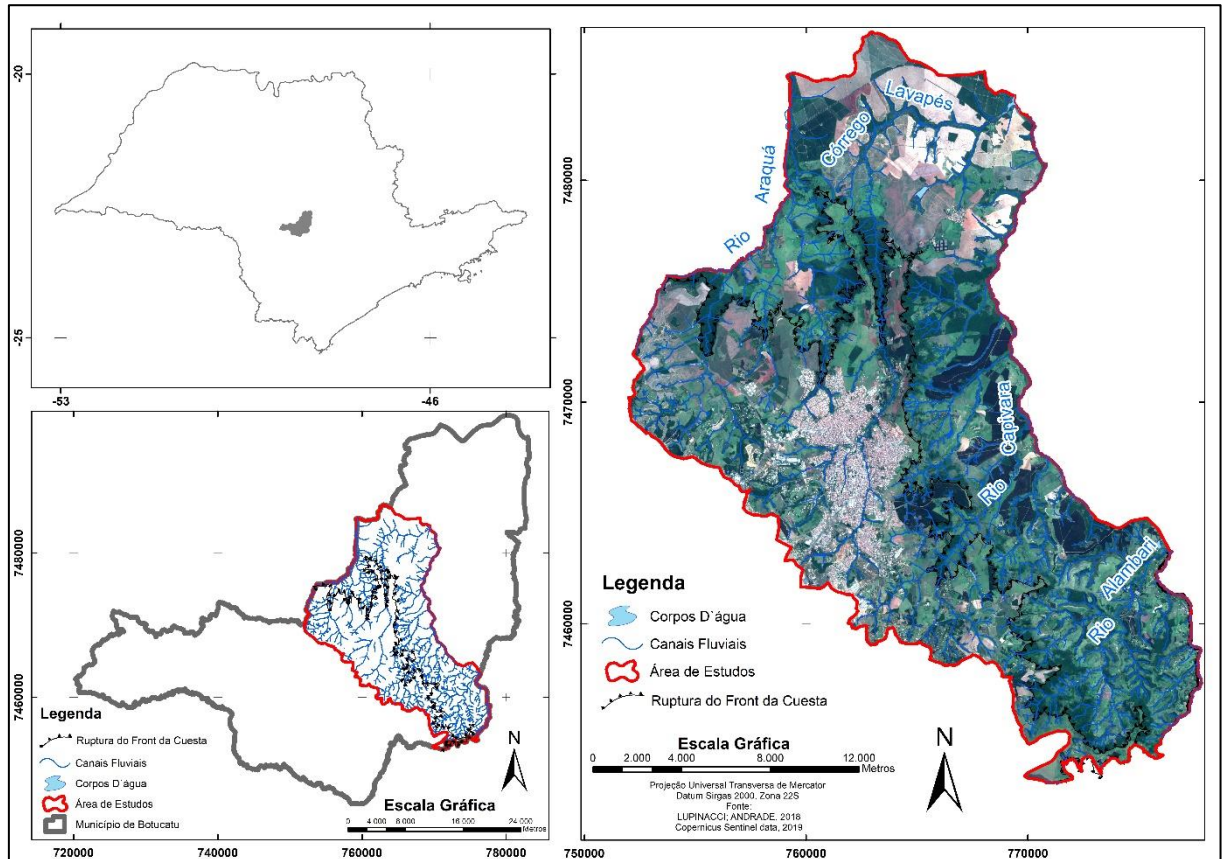
A área de estudos escolhida para essa pesquisa corresponde a um setor do município de Botucatu (SP), que abriga um fragmento das Cuestas Paulistas (Figura 1) e é limitado pelas áreas de drenagem dos canais anaclinais do município, ou seja, que tem sua nascente no reverso e fluem em direção à Depressão Periférica. Entende-se que a legislação municipal inovadora destinada a proteção das *cuestras* e o intenso uso da terra, tanto rural como urbano, identificado sobre este compartimento do relevo em Botucatu (ANDRADE; LUPINACCI, 2021) atribuem a este recorte alta representatividade frente à problemática em questão. Ainda, considera-se que a análise do caso de Botucatu pode fornecer subsídio científico às instituições responsáveis pelo planejamento ambiental de regiões de *cuesta*, através de informações acerca da dinâmica erosiva nestes relevos e do impacto de diferentes tipos de uso da terra sobre estes processos. Ademais, visto que os relevos *cuestiformes* extrapolam os limites do território paulista (ROSS, 1996), o conhecimento da dinâmica erosiva e conservação das *cuestras* pode contribuir com pesquisas que subsidiem o planejamento ambiental em outras regiões do Brasil e do mundo.

Com relação aos objetivos específicos dessa pesquisa:

– Identificar a ocorrência e distribuição das feições erosivas lineares nas áreas inseridas na dinâmica de *cuestras* do município de Botucatu (SP);

– Analisar a densidade de feições erosivas e sua relação com as características naturais da paisagem, como declividade, solos e litologia, e com os padrões de uso e ocupação da terra;

– Analisar a distribuição e ocorrência das feições erosivas em terrenos protegidos pelas leis ambientais que regulam o uso e ocupação da terra da área, a fim de avaliar a eficiência da legislação no combate aos problemas erosivos.



**Figura 1:** Localização da Área de Estudos

A partir dos objetivos elencados, elaborou-se a presente dissertação de mestrado que apresenta a seguir o capítulo intitulado “2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA” que apresenta uma discussão dos principais conceitos trabalhados nessa pesquisa, contextualizando-a dentre os demais estudos acerca da erosão dos solos e da antropogeomorfologia. Em seguida, no capítulo “3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS” apresenta-se um levantamento das características espaciais do ambiente onde a pesquisa se desenvolve, partindo de um recorte regional até o nível local. No capítulo “4. MATERIAIS E MÉTODOS” descrevem-se os procedimentos técnicos utilizados para a elaboração dos mapeamentos e análise dos dados, justificados a partir da bibliografia consultada. No capítulo “5. ANÁLISE DOS RESULTADOS” são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa e no capítulo “6. CONSIDERAÇÕES FINAIS” é realizada uma avaliação sintética das técnicas utilizadas e dos resultados obtidos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo destina-se à revisão da bibliografia e dos conceitos que fundamentam essa pesquisa. Inicialmente será apresentada uma análise acerca dos princípios da Antropogeomorfologia que norteiam esse trabalho. Em seguida será discutido o processo de erosão dos solos e os fatores que condicionam essa dinâmica. Por fim destaca-se a dinâmica geomorfológica dos relevos cuestiformes, relacionando-a com as potenciais suscetibilidades desses terrenos à ocorrência de processos erosivos acelerados.

### 2.1 A antropogeomorfologia

Esta pesquisa se baseia na abordagem metodológica da antropogeomorfologia, que é o campo da ciência geomorfológica que considera as atividades humanas como um agente de esculturação do relevo (NIR, 1983; HUPY, 2017), inclusive com importância da ordem de outros agentes clássicos da geomorfologia (HOOKE, 1994; HAFF, 2003; TAROLLI; SOFIA 2016). De acordo com Nir (1983), a noção de que as sociedades humanas constituem um agente do relevo surge primeiramente com a obra de George Perkins Marsh (1864) intitulada “*Man and Nature*”. Esta noção introduzida por Marsh (1864, *apud* Nir, 1983) ganha contribuições durante a primeira metade do século XX com destaque aos trabalhos de Woeikof (1901, *apud* Nir, 1983) e Sherlock (1922, *apud* Nir, 1983), assim como outros autores que abordaram o tema de forma menos direta.

Para Li *et al* (2017), na segunda metade do século XX, a discussão acerca da interferência antrópica sobre a paisagem ganha amplitude com a conferência internacional “*Man’s Role in Changing the Face of the Earth*”, realizada em 1955, seguida pelos trabalhos de Jennings (1966), Brown (1970), Detwyler (1971), Collier (1972), que difundiram o tema e aumentaram sua visibilidade. Entretanto, para Li *et al* (2017), o que marcou a antropogeomorfologia como um campo do conhecimento independente foi a obra de Dov Nir (1983): “*Man, a Geomorphological Agent: an Introduction to Anthropogenic Geomorphology*”. Esta publicação, assim como a obra de Andrew Goudie (1981) “*The Human Impact on the Natural Environment*”, discutem de maneira direta como diferentes atividades antrópicas interferem na dinâmica e formas do relevo.

Segundo a abordagem de Nir (1983), a antropogeomorfologia, ou geomorfologia antrópica, baseia-se na concepção de que o fator humano deve ser considerado um agente de esculturação do relevo. Dessa forma, a fim de estimar qual o grau de impacto deste agente sobre

a paisagem, Hooke (1994) calcula que, quando comparado aos agentes clássicos da geomorfologia, como rios, geleiras e os ventos, por exemplo, a ação antrópica é a que contribui com as maiores taxas de deslocamento de solo e rocha na atualidade. Portanto, apesar da dificuldade e das generalizações necessárias para a realização de um cálculo como este, a noção de que o fator antrópico é um dos, senão o mais importante agente geomorfológico da atualidade, é corroborada por diversos pesquisadores do tema (HAFF, 2003; ROZSA, 2007; SZABÓ, 2010; LI *et al*, 2017).

De acordo com Rozsa (2007) e Hooke (2000), a interferência humana sobre as formas e dinâmica do relevo tem início com o aparecimento da espécie na terra, uma vez que a utilização de argila e rochas na construção de abrigos durante o Paleolítico já podem ser caracterizadas como alterações geomorfológicas, apesar de mínimas. Entretanto, os avanços técnicos pelos quais as civilizações passaram, somado ao aumento populacional derivado desses avanços, têm aumentado cada vez mais as transformações sobre a paisagem resultante da ação antrópica (ROZSA, 2007, SZBÓ, 2010; HOOKE, 2000; WATERS, *et al*, 2016; LI *et al*, 2017).

Rozsa (2007) caracteriza três períodos importantes para o entendimento da antropogeomorfologia. O primeiro referente ao período pré-revolução agrícola, no qual as atividades e a população humana eram responsáveis por uma interferência mínima sobre o relevo. Posteriormente, na revolução do Neolítico, o aumento nas taxas de erosão dos solos pela instalação de campos de cultivo, o surgimento de pequenas vilas, as obras irrigação, o aumento da mineração e o crescimento populacional resultante desses avanços vão caracterizar um período de interferência antrópica crescente. Ainda, a revolução industrial no século XVIII altera novamente a escala destas interferências sobre o relevo. Neste momento a explosão demográfica, a urbanização e o modo de vida resultante da revolução industrial, multiplicam as terras agrícolas, as cavas de mineração, as obras no sistema fluvial e viário, levando a uma ampliação da importância do fator antrópico na dinâmica geomorfológica e elevando este ao patamar dos demais agentes do relevo (ROZSA, 2007; HOOKE, 2000).

Estas alterações na dinâmica natural do relevo, assim como a perturbação de outros sistemas naturais, têm levado inclusive à definição de uma nova época geológica, o Antropoceno, caracterizado pela interferência humana nos sistemas terrestres. De acordo com Zalasiewicz, *et al* (2011) e Waters, *et al* (2016), diversas práticas humanas têm gerado consequências suficientes para a definição desta nova época na escala estratigráfica

internacional, dentre as quais enfatiza-se a intensificação do fluxo de sedimentos transportados em consequência do desmatamento, pastoreio e agricultura extensiva. Portanto, a comunidade científica reconhece que a intensidade dos impactos gerados pela atividade antrópica no planeta é suficiente para influenciar não apenas a dinâmica do relevo, mas também a dinâmica climática e biológica de forma suficiente para caracterizar toda uma época geológica.

Em vistas de aprofundar a análise nas formas pelas quais o fator humano atua na perturbação da dinâmica do relevo, Hooke (1994) explica que esta pode ocorrer de maneira direta ou indireta. A mineração e a urbanização são exemplos clássicos de alterações diretas sobre o relevo, por consistirem em deslocamento intencional de material. Entretanto, o desmatamento, a agricultura e o pastoreio são exemplos de transformações indiretas sobre o relevo, uma vez que essas práticas aceleram o ritmo de processos erosivos naturais (HAFF, 2003; GOUDIE, 2013). Para Hooke, Martín-Duke e Pedraza (2012) e Goudie (2013), os processos indiretos de alteração do relevo são de maior magnitude quando comparados aos processos diretos.

Essas transformações antrópicas indiretas podem ser entendidas como alterações no estado de equilíbrio dos sistemas naturais. A noção de que a dinâmica dos processos naturais sobre o relevo se comporta como sistemas é introduzida por Chorley (1971) por meio da aplicação da Teoria Geral dos Sistemas, oriunda do campo da termodinâmica. Segundo o autor, os elementos da paisagem estão organizados em sistemas, de modo que uma alteração em algum dos elementos gera processos resposta que atuam sobre os demais. Como consequência, as partes do sistema são controladas por estímulos e respostas frente a alterações de matéria e energia, reagindo a esses estímulos de modo a sempre buscar a autorregulação.

Essa tendência a autorregulação pode ser explicada pela busca do chamado estado de equilíbrio (*steady state*) (CHORLEY, 1971). De acordo com Nir (1983), o conceito de estado de equilíbrio, ou equilíbrio dinâmico, é empregado para caracterizar não um processo inativo, mas sim a estabilidade de um processo ativo, que ocorre de modo constante. Utilizando o exemplo da erosão dos solos, pode-se entender que o regime climático, associado à cobertura vegetal, gera um processo erosivo (dinâmico) controlado, que mantém uma tendência regular. Porém, se em algum momento um desses elementos é perturbado, os processos resposta gerados em consequência tendem a desregular esta dinâmica e reorganizá-la em busca de um novo estado de equilíbrio (NIR, 1983). Para Nir (1983, p.10) “Toda alteração na natureza, ou mesmo na intensidade de um processo em particular, tem um efeito no sistema, e sob condições limites

ou críticas podem alterar radicalmente todo o sistema ou até mesmo destruí-lo” (tradução nossa).

Dessa forma, entendendo que a dinâmica terrestre é controlada pela tendência à autorregulação dos processos naturais, a antropogeomorfologia, especialmente ao tratar dos impactos indiretos sobre o relevo, considera que a atividade humana, ao interferir sobre os elementos da natureza, altera o estado de equilíbrio de determinado sistema, gerando respostas nos demais elementos (NIR, 1983; CHRISTOFOLETTI, 1999; HAFF, 2003; KERÉNYI, 2010). Por isso Christofolletti (1999) afirma que a dinâmica terrestre é regulada por sistemas naturais e sistemas socioeconômicos, uma vez que estes interferem um no outro permanentemente. Haff (2003) corrobora com esta tese ao afirmar que os ciclos econômicos interferem na dinâmica da paisagem ao determinar os tipos de atividades econômicas e o modo como estas serão executadas em determinado local.

Verificado o potencial antrópico para interferir nas formas e dinâmicas do relevo, os princípios da antropogeomorfologia têm sido utilizados em diversas pesquisas contemporâneas. O trabalho de Rodrigues (2005), pioneiro na utilização da abordagem antropogeomorfológica na análise do relevo no Brasil, se vale da concepção em questão para analisar as transformações do relevo em área urbana. A autora demonstra como formas de relevo em ambiente urbano são construídas por cortes no relevo, aterramentos, escavação de túneis e outras ações que, segundo a classificação de Hooke (1994) se enquadram como alterações diretas sobre as formas do relevo. Outro exemplo deste caso pode ser encontrado no trabalho de Peloggia, Silva e Nunes (2014) ao analisarem as formas de relevo tecnogênicas no município de Presidente Prudente (SP). Os autores verificaram a presença de diversas superfícies construídas ou destruídas pela atividade humana na criação de cortes de estradas e aterros, dando origem a novas formas e dinâmicas do relevo.

Os trabalhos de Simon (2010) e Zanatta (2018), por sua vez, partem da perspectiva da antropogeomorfologia para avaliar o impacto de alterações indiretas sobre o relevo. Simon (2010) analisa o impacto do barramento do rio Piracicaba para a criação da represa de Barra Bonita na reativação erosiva do sistema de drenagem. Segundo o autor, a alteração no nível de base promovida pelo barramento provoca uma reação à montante no sistema de drenagem que, na busca por um novo estado de equilíbrio, reativa o entalhamento fluvial. Zanatta (2018) por sua vez, demonstra como as alterações nos tipos de uso da terra influenciam a ocorrência de processos acelerados de erosão dos solos, culminando no desenvolvimento de feições lineares

no município de Marabá Paulista (SP). O autor revela, entretanto, que as alterações no tipo de uso da terra não são as únicas variáveis dessa dinâmica, sendo as características físicas do terreno (litologia, solos e declividade) condicionantes fundamentais destes processos.

Dessa forma, a partir da análise desses autores, entende-se que os processos erosivos nas *cuestas* de Botucatu expressam o resultado de interações entre a dinâmica geomorfológica natural destes terrenos associada às alterações promovidas pela dinâmica socioeconômica na região. Nesse sentido, não seria possível analisar como esses fatores interferem na dinâmica erosiva de modo separado uma vez que estes são indissociáveis e por isso a necessidade de uma análise integrada de tais variáveis.

## **2.2 A erosão dos solos**

Evidenciado o desempenho humano na perturbação dos sistemas naturais, discute-se a seguir a problemática relacionada à degradação dos solos, à dinâmica erosiva e seus condicionantes naturais e antrópicos. A revisão da literatura revela uma ampla diversidade de trabalhos que tratam dessa questão dado o impacto da erosão acelerada dos solos na sociedade, uma vez que, assim como a água e o ar, os solos são um recurso fundamental para a sustentação da vida terrestre no planeta (BLANCO; LAL, 2008; FAO, 2015; GARCIA-RUIZ *et al.*, 2015). Por esse motivo, diversos autores de décadas passadas e da atualidade têm considerado a degradação dos solos como um dos problemas ambientais mais graves dos últimos tempos (KERTZMAN *et al.*, 1995; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; GOUDIE, 2013).

A degradação dos solos compromete a produtividade agrícola podendo chegar ao ponto de exaurir a capacidade de cultivo; compromete as águas superficiais e subterrâneas por meio do assoreamento ou contaminação química; contribui com a emissão de gases de efeito estufa e sua erosão pode destruir obras de infraestrutura (MONTGOMERY, 2007; GOUDIE, 2013; LABRIÈRE *et al.*, 2015). De acordo com Stuiver (1978, *apud* MONTGOMERY, 2007), por exemplo, um terço da emissão de gás carbônico na atmosfera a partir da revolução industrial até meados do século XX está relacionado à oxidação da matéria orgânica dos solos devido à conversão de áreas para atividades agropecuárias. Goudie (2013), entretanto, salienta que, dentre os diversos processos de degradação dos solos, a erosão acelerada é a que traz os maiores prejuízos.

Os elevados índices de erosão comprometem especialmente as camadas superiores do solo, que são também as mais ricas em matéria orgânica e nutrientes, trazendo grande prejuízo

à sua fertilidade e capacidade produtiva (MONTGOMERY, 2007; GOUDIE; 2013). De acordo com Blanco e Lal (2008), a erosão acelerada dos solos é considerada a maior ameaça à produção alimentar na atualidade. A dimensão desse impacto é sintetizada por Pimentel e Burgess (2013) que, segundo estimativas de Mayers (1993) e Eswaran *et al.* (1999), calculam que a taxa anual de perda de solos férteis por atividades agrícolas no mundo seja de aproximadamente 75 bilhões de toneladas. Pimentel (1995, *apud* GOUDIE, 2013), por sua vez, afirma que 90% das terras agrícolas dos Estados Unidos sofrem com perdas de solo além das taxas sustentáveis, assim como 54% das pastagens norte-americanas também estiveram sujeitas a elevadas taxas de erosão, o que desencadeou prejuízos em torno de 44 bilhões de dólares ao ano no país.

Os estudos nacionais revelam que a realidade brasileira não foge a estes números alarmantes:

No Brasil, a perda da camada superficial é a principal forma de degradação dos solos. Em razão da ampliação da fronteira agrícola e do uso intensivo do solo, HERNANI *et al.* (2002) estimaram perdas totais anuais de solo em áreas de lavoura da ordem de 750 milhões de toneladas e de 70 milhões de toneladas para as áreas de pastagens em todo o país. (FILIZOLA, *et al.* 2011 p. 1).

Assim como as terras paulistas:

A frequência da manifestação dos processos erosivos do tipo laminar e em sulcos e o desenvolvimento de ravinas profundas e boçorocas mobilizam milhares de m<sup>3</sup> de sedimentos em pouco tempo, destruindo terras de cultura, equipamentos urbanos e obras civis. No Estado de São Paulo, estima-se que 80% da área cultivada esteja sofrendo processo erosivo além dos limites de tolerância, representando uma perda anual de aproximadamente 200 milhões de toneladas de terra, com prejuízos econômicos fabulosos, tanto pela queda de produtividade, perda de fertilizantes/sementes, como pelas necessidades de maiores investimentos, na recuperação do solo (LOMBARDI; BERTONI, 1985 *apud* KERTZMAN; *et al.*, 1995, p. 31).

A partir dos dados apresentados, é importante reafirmar que, apesar da erosão dos solos ser um processo que ocorre naturalmente, este pode ser acelerado pelas intervenções antrópicas. Nesse sentido, Blanco e Lal (2008) explicam que a erosão dos solos se divide em dois tipos: a geológica e a acelerada. O primeiro é entendido como um processo natural que em geral ocorre em pequenas taxas como parte do processo evolutivo do relevo. Em contrapartida, a erosão acelerada é um processo ativado por práticas humanas como o desmatamento, o uso do fogo na agricultura, o pastoreio sem controle, dentre outras práticas (BLANCO; LAL, 2008).

Segundo Blanco e Lal (2008), a erosão hídrica é um dos principais tipos de erosão, especialmente nas zonas tropicais úmidas e semiúmidas, podendo ocorrer por meio de diversos processos: erosão por salpicamento (*splash*), erosão em lençol (*sheet erosion*), erosão em sulcos (*rill erosion*) e voçorocamentos (*gully erosion*). É importante ressaltar que na natureza estes

costumam ocorrer de forma simultânea, muitas vezes por meio da associação ou soma dos diferentes processos em um determinado local.

O início da erosão por agentes hidrológicos ocorre a partir do impacto das gotas de chuva sobre o solo, remobilizando o material de superfície, que corresponde à chamada erosão por salpicamento, ou *splash erosion* (OLIVEIRA, 1999; SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008; FILIZOLA *et al*, 2011). Este processo tem como consequência a “compactação da superfície do terreno através da remobilização de silte e argila nos espaços intergranulares” (OLIVEIRA, 1999 p. 60) criando uma fina camada superficial com menor infiltração, o que favorece o escoamento superficial e conseqüentemente intensifica a erosão dos solos promovida pela energia da água.

Com o acúmulo da água em superfície, inicia-se o escoamento pluvial ao longo da vertente. Primeiramente, esse escoamento se dá em lençol, conhecido também como *sheet flow* (OLIVEIRA, 1999; SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008). Nesta etapa, as partículas superficiais do solo são transportadas por uma lâmina de água distribuída de maneira homogênea, dando origem à erosão laminar, que corresponde a “remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo” (SALOMÃO, 1999 p. 229).

À medida que o escoamento em lençol se intensifica, existe uma tendência do fluxo laminar se concentrar em microdepressões da superfície, evoluindo para um escoamento concentrado, marcando o início do processo de erosão linear que levará ao desenvolvimento de sulcos, ravinas e, em último caso, voçorocas (OLIVEIRA, 1999; SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008). A concentração do fluxo de água tende a aprofundar o canal de escoamento pluvial, dando origem aos sulcos erosivos, quando pouco profundos, mas com potencial para evoluir para ravinamentos. As ravinas se diferenciam dos sulcos erosivos pelo aprofundamento das incisões, revelando uma atividade erosiva mais intensa. De acordo com o *Soil Conservation Service* (1966, *apud* SALOMÃO 1999), o critério que diferencia essas feições é a possibilidade de obliteração dos sulcos a partir de técnicas convencionais de manejo dos solos, o que não é possível no caso dos ravinamentos.

Os voçorocamentos, por sua vez, correspondem ao estágio final e mais avançado do processo erosivo linear, ocorrendo a partir do aprofundamento, alargamento e ramificação das ravinas (SALOMÃO, 1999; AUGUSTIN; ARANHA, 2006a). A bibliografia nacional e internacional não dispõe de um critério único e claro para classificar uma feição erosiva como voçoroca. Alguns autores utilizam critérios meramente dimensionais, segundo os quais, a partir

de determinada medida de largura e profundidade, a feição seria enquadrada como voçoroca. Entretanto, vale acrescentar que mesmo segundo estes critérios, os valores variam. Para Blanco e Lal (2008), a partir de 30 cm de largura e profundidade já se tem uma voçoroca. Diferentemente, a classificação de Guerra (2016), baseada em padrões nacionais e buscando uma definição que melhor se adapte à literatura internacional, define as ravinas como incisões com até 50 centímetros de profundidade e as voçorocas como feições de maior dimensão. O IBGE (2009) diferencia as feições pela unidade de escala utilizada para medi-las: os sulcos apresentam profundidades centimétricas, as ravinas profundidades decimétricas e as voçorocas profundidades métricas.

Entretanto, outro tipo de classificação se baseia na ocorrência do escoamento subsuperficial para a classificação da feição como voçoroca. Para Fendrich *et al* (1997), Salomão (1999) e Oliveira (1999), o aprofundamento dos ravinamentos até o ponto de interceptação do lençol freático muda a dinâmica da feição erosiva devido à adição de outros processos, como o *pipping*. Para os autores, essa dinâmica interna da feição tem como consequência seu alargamento e ramificação à montante devido à evolução regressiva dos taludes erosivos e, portanto, tal fator corresponde ao critério decisivo para a classificação das feições erosivas como as voçorocas.

Dessa forma, entendida a dinâmica do processo erosivo, é preciso reconhecer que esta tem sua intensidade controlada por fatores naturais e humanos que influenciam nas taxas de erosão e degradação dos solos. Já está consolidado tanto na bibliografia nacional como internacional que as taxas de erosão dos solos são condicionadas pelas características do regime climático, especialmente pela precipitação, pelo declive, pelas características do solo e embasamento litológico e pela cobertura da terra (SALOMÃO, 1999; FILIZOLA, BOULET; GOME, 2003; BLANCO; LAL, 2008; GARCIA-RUIZ *et al.*, 2015; DUBE *et al.*, 2020).

De acordo com Salomão (1999) e Garcia-Ruiz *et al.* (2015), as elevadas médias de precipitação dos ambientes tropicais úmidos encontrados em diferentes continentes são características que encontram correspondência com a ocorrência de processos erosivos. Porém, os mesmos autores ressaltam que a característica pluviográfica que mais influencia na aceleração dos processos erosivos não são médias elevadas, mas sim eventos de grande magnitude, no caso as chuvas intensas. O relevo também se destaca como condicionante da dinâmica erosiva devido ao fato de que declives mais acentuados e rampas mais longas são fatores que favorecem o aumento da energia do escoamento pluvial e, conseqüentemente, a

erosão (SALOMÃO 1999). Garcia-Ruiz *et al* (2015), entretanto, chamam a atenção para as relações complexas que são identificadas entre o declive e os processos erosivos, uma vez que, a partir de revisão bibliográfica, os autores identificam uma relação linear entre o aumento das taxas de erosão e a inclinação dos terrenos até os declives de 20%, sendo que a partir desse ponto essa relação é controlada por uma dinâmica complexa e não linear.

As características dos solos, por sua vez, correspondem a um condicionante não humano fundamental da dinâmica erosiva (SALOMÃO, 1999). Tais características dizem respeito à textura, a estrutura, às características de seus horizontes, às propriedades hidráulicas do solo e a quantidade de matéria orgânica (SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008). Para estes autores, solos com texturas mais arenosas favorecem a infiltração, o que diminui o escoamento, não sendo propícios a erosão. Por outro lado, solos mais arenosos têm também menor coesão, o que favorece a desagregação do material (SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008). Ainda, as características internas do solo também influenciam na dinâmica erosiva, uma vez que as variações texturais entre os horizontes podem interferir na dinâmica de escoamento subsuperficial (DEMARCHI; ZIMBACK, 2014). A matéria orgânica do solo também favorece a infiltração das águas pluviais e a formação de agregados, contribuindo com a proteção dos solos ao ataque dos processos erosivos (SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008).

As propriedades hidráulicas dos solos, as quais se relacionam também com o substrato rochoso, determinam a dinâmica do escoamento em subsuperfície, o que influencia nos processos erosivos, especialmente no desenvolvimento de voçorocas (SALOMÃO, 1999). Isso se deve à influência do embasamento litológico sobre a dinâmica do escoamento subsuperficial. Em áreas de solos mais rasos e com rochas pouco permeáveis, a tendência é uma maior facilidade para o afloramento do lençol freático (SALOMÃO, 1999).

Com relação à cobertura da terra, Garcia-Ruiz *et al* (2015) afirmam corresponder a fatores determinantes nas taxas de erosão dos solos. Em ambientes de vegetação florestal, a cobertura fornecida pelas árvores amortece o impacto das gotas de chuva reduzindo a erosão por salpicamento, favorece a infiltração da água, ajuda na manutenção da matéria orgânica do solo e quebra a energia do escoamento superficial (LAL, 1983; SALOMÃO, 1999; BLANCO; LAL, 2008, GOUDIE, 2013). De acordo com UNESCO/UNEP/ FAO, (1978, *apud* LAL, 1983) e Labrière *et al* (2015) a erosão dos solos em áreas cobertas por florestas densas é muito baixa.

Nesse sentido, o desmatamento de florestas tropicais tem elevado impacto sobre a intensificação da erosão dos solos (LAL, 1983) e, portanto, consiste na primeira etapa do

desenvolvimento dos processos erosivos por causas antrópicas (NIR, 1983). De acordo com Nir (1983), o desmatamento precede o estabelecimento de atividades agrícolas, pastoreio ou urbanização. A retirada de vegetação, especialmente de áreas sujeitas a altos índices pluviométricos, compromete a estabilidade dos solos, por torná-los mais exposto às intempéries, uma vez que elimina a interceptação das gotas de chuva, favorecendo a formação de crostas selantes, o que diminui as taxas de infiltração e aumenta a energia do escoamento (NIR, 1983; GOUDIE, 2013). A perda de raízes também compromete a estabilidade dos solos e contribui com a aceleração de sua erosão, especialmente em terrenos com maior declive (NIR, 1983)

O desmatamento, porém, raramente tem um fim em si mesmo. Geralmente as áreas desmatadas são convertidas para alguma atividade produtiva. O pastoreio, que frequentemente sucede o desmatamento, é uma das atividades de alto impacto sobre a erosão dos solos, especialmente quando excessivo (NIR, 1983). Além dos efeitos do desmatamento, necessário para a conversão de um terreno para a pecuária, o pastoreio excessivo contribui com a compactação do solo e conseqüentemente com a diminuição da infiltração e aumento do *runoff*, especialmente nas trilhas do gado (NIR, 1983; GOUDIE, 2013). Já no caso do cultivo agrícola, Nir (1983) Hooke, Duke e Pedraza (2012) afirmam que a erosão dos solos pode ser relativamente mais intensa que nas áreas de pastagens.

As atividades agrícolas são apontadas como grande fonte de erosão dos solos devido, especialmente, à alta erodibilidade das terras cultivadas (NIR, 1983; MONTGOMERY, 2007; LABRIÈRE 2015). Isso se deve ao processo de aragem do solo para o plantio que quebra sua estrutura, deixando-o mais exposto à erosão pelos agentes naturais, assim como ao uso do maquinário agrícola, contribuindo com sua compactação (MONTGOMERY, 2007; BLANCO; LAL, 2008; LABRIERE, 2015). Tais impactos, entretanto, dependem das técnicas empregadas no manejo e cultivo, uma vez que existem práticas conservacionistas que tem grande efeito na proteção dos solos (NIR, 1983; BLANCO; LAL, 2008 KERENYI, 2010).

Por fim, a erosão associada à expansão urbana também tem provocado danos aos solos e às águas, além de conseqüências desastrosas aos equipamentos da construção civil, intensificando à vulnerabilidade social. Os trabalhos de Tiz e Cunha (2007) no Paraná, de Imwangana *et al* (2015) no Congo e de Mathias (2016) no interior paulista, demonstram que esta relação é identificada em diversas regiões do Brasil e do mundo. De acordo com os autores (*op. cit.*) as feições erosivas identificadas em áreas periurbanas decorrem principalmente da

impermeabilização dos solos, concentração dos fluxos de escoamento pluvial e despejo destas sobre os solos do entorno. Estes processos são desencadeados principalmente por estradas e obras de drenagem urbana construídas sem planejamento ou mal dimensionadas para conter os efeitos sobre a degradação dos solos. Ainda, foi constatado também o uso de resíduos urbanos no aterramento das voçorocas, o que pode implicar em impactos para a contaminação dos solos e das águas na região.

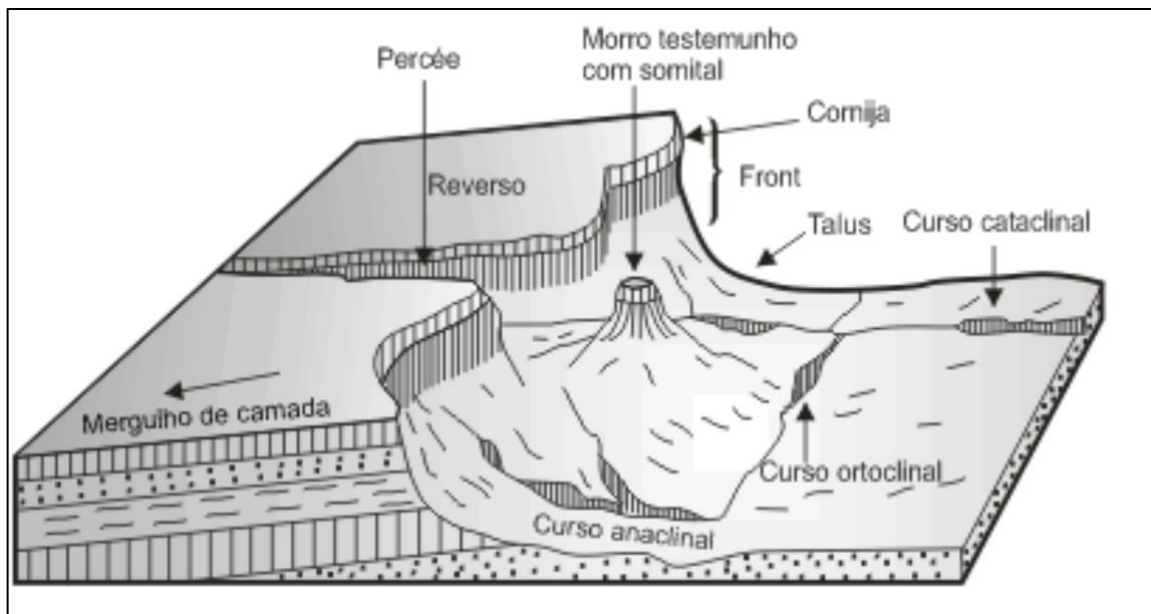
### 2.3 Os relevos de *cuestas* e sua suscetibilidade à erosão

As *cuestas* caracterizam-se como um relevo dissimétrico, típico de bacias sedimentares com camadas sub-horizontais, esculpidos por processos denudativos (SHEEHAN; WARD, 2018). De acordo com Pinheiro e Queiroz Neto (2017) estes relevos são encontrados em todo o mundo, e segundo Sheehan e Ward (2018) os processos de exumação que levam ao recuo do *front* *cuestiforme* são frequentes em regiões de embasamento sedimentar, dando origem a *cuestas* com inúmeras variações quanto às suas características morfológicas e dinâmica evolutiva. Apesar dessa heterogeneidade, o aspecto comum desse tipo de relevo se relaciona a sua evolução por processos de erosão diferencial, orientados conforme o sentido do caimento estratigráfico (SCHIMIDT, 1989; IMAIZUME *et al.* 2015; SHEEHAN; WARD, 2018).

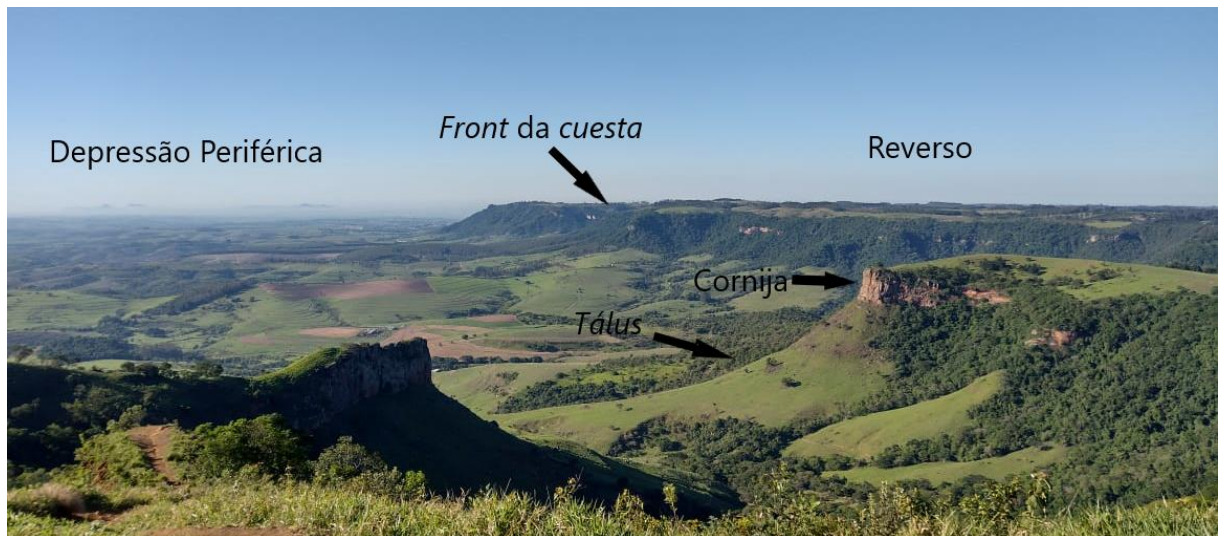
Imaizume *et al.* (2015) explicam que o processo de erosão diferencial ocorre devido ao contato entre formações rochosas com diferentes resistências à erosão, organizadas de forma que a camada mais resistente (*caprock*) esteja sobreposta à mais friável (*bedrock*). Essa disposição leva a um recuo da frente de erosão sem que sua altitude seja alterada, levando à evolução do relevo por meio do recuo do *front* (IMAIZUME *et al.* 2015). Nesse sentido, Sheehan e Ward (2018) explicam que a dinâmica do relevo *cuestiforme* se fundamenta na erosão mais acelerada da camada inferior, tirando a sustentação da formação superior, acarretando em processos geomorfológicos sobre o *front* *cuestiforme*.

A partir dessa dinâmica, Penteadó (1983) aponta que a morfologia do relevo de *cuestas* é composta por três elementos principais: a Depressão Ortoclinal, que corresponde à porção rebaixada pela erosão; o reverso, que corresponde à porção mais elevada do relevo, sustentada pela formação superior mais resistente; e o *front*, que corresponde à frente de erosão e é marcado por altas declividades, fazendo a transição entre os terrenos rebaixados da depressão e os elevados do reverso (Figuras 2 e 3). Outras características morfológicas como o festonamento do *front* e a ocorrência de morros testemunhos, relevos residuais separados do reverso pela

erosão fluvial, e eventualmente, condicionadas por lineamentos, também são encontradas em *cuestas* de diversas regiões do planeta, (PENTEADO, 1976; MERTLÍK; ADAMOVIČ, 2005).



**Figura 2:** Elementos do relevo de cuestas  
**Fonte:** Casseti, 2005, p. 63.



**Figura 3:** Relevo de cuestas em Itirapina – SP  
**Fonte:** Os autores, 28/11/2021

Penteado (1983) sintetiza também as características morfológicas do próprio *front*, registradas em diversas regiões do mundo (SCHIMT; BAYER, 2002; SHEEHAN; WARD, 2018), que se divide em duas feições principais: a cornija e o *tálus*. A cornija corresponde à parte superior do *front* cuestasiforme, e apresenta os maiores declives, mantida pela camada mais resistente, enquanto o *tálus*, por sua vez, localiza-se no sopé da *cuesta*, com declives moderados e corresponde a depósitos coluvionares dos materiais oriundos da cornija, depositados por

processos gravitacionais (PENTEADO, 1983; SCHIMDT; BAYER, 2002; PINHEIRO; QUEIROZ NETO, 2017; SHEEHAN; WARD, 2018).

Essas características morfológicas, entretanto, podem apresentar inúmeras variações quanto à forma, tamanho, altura e declividade, a depender das propriedades litológicas e climáticas da região. No que diz respeito ao arranjo geológico, os fatores condicionantes apontados com maior importância são a espessura das camadas litológicas, à resistência dessas à erosão e a inclinação do mergulho estratigráfico (PENTEADO, 1983; SCHIMDT, 1989). Da mesma forma, as características climáticas regionais também influenciam a dinâmica e os processos de exumação e evolução que atuam sobre o relevo (SCHIMDT; BAYER, 2002; PINHEIRO; QUEIROZ NETO, 2017). Schimidt (1989) acrescenta ainda que os processos geomorfológicos característicos da dinâmica *cuestiforme* são espacialmente desconexos e temporalmente descontínuos, sujeitos a variações geológicas locais e às irregularidades dos eventos climáticos.

Pesquisas nacionais e internacionais demonstram a diversidade de processos denudativos que ocorrem nos relevos *cuestiformes* pelo planeta. Schimidt e Bayer (2002) analisam a ocorrência do desabamento de blocos (*rock fall*) e deslizamentos de terra (*land slides*) em *cuestas* da Alemanha central, os quais, segundo os autores, são controlados principalmente por condicionantes litológicos e eventos de chuvas extremas. Os autores ressaltam, porém, que um dos deslizamentos de terra analisados foi ativado por atividade humana, relacionada à mineração de argila na base das *cuestas*, demonstrando o potencial da ação antrópica para interferir nestes processos. Também em ambiente temperado, Den Eeckhaut, Marre e Posen (2010) relacionam a suscetibilidade de deslizamentos de terra nas *cuestas* na região de Champagne–Ardenne (França) a condicionantes litológicos e níveis de declividade, assim como ao uso da terra, especialmente os vinhedos, em alguns setores do *front*.

O trabalho de Gobin *et al* (1999), por sua vez, mostra a relação das *cuestas* de Udi-Nsukka (Nigéria) com a ocorrência de processos erosivos lineares (sulcos, ravinas e voçorocas) e revela que a perda de solos no *front* chega a ser de 10 a 100 vezes maior do que no entorno. Os autores relacionam também a intensificação dos processos erosivos na região com o cultivo agrícola mal planejado, às vilas e às estradas rurais. No caso brasileiro, Stefanuto e Lupinacci (2019) e Silva e Lupinacci, (2021) analisam a ocorrência de feições erosivas lineares nas *cuestas* do interior paulista e explicam que os processos erosivos lineares são condicionados pelos contatos litológicos, características dos solos, níveis de declividade e tipos de uso da terra

identificados na região. Dessa forma, os autores demonstram a alta suscetibilidade destas áreas à ocorrência de processos erosivos, principalmente em locais onde o uso da terra não é adequado do ponto de vista dos limitantes físicos.

Por fim, a explicação de Sheehan e Ward (2018) sobre o ciclo erosivo das *cuestas* em Utah (Estados Unidos), possibilita compreender a relação entre os processos denudativos que se estabelecem na cornija e no *tálus*. De acordo com os autores, a erosão da camada inferior tira a sustentação da cornija, provocando desabamentos e a deposição de material inconsolidado no *tálus*, o que cria uma camada de proteção sobre as formações inferiores friáveis. Entretanto, esse depósito coluvionar é submetido a processos erosivos (no caso voçorocamentos) que removem o material, expondo novamente a formação friável aos agentes externos, reiniciando o ciclo. Portanto, Sheehan e Ward (2018) indicam que há uma relação entre os processos gravitacionais sobre a cornija e os processos erosivos sobre o *tálus*, caracterizando a dinâmica evolutiva do relevo de *cuestas*.

Dessa forma, a revisão da literatura acerca da dinâmica dos relevos *cuestiformes* possibilita compreender como suas características e os processos aos quais estes terrenos estão naturalmente submetidos os tornam mais suscetíveis aos processos erosivos. Além disso, evidencia-se que estes processos podem ser intensificados a partir das alterações provocadas pelo uso da terra. Baseado nesse entendimento, essa pesquisa analisa como se dão essas relações nas *cuestas* de Botucatu (SP), partindo de uma abordagem que integra os condicionantes físicos e humanos, buscando identificar quais são os tipos de uso da terra que mais contribuem com a ativação desses processos e em quais setores do relevo estes são mais intensos.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos desta pesquisa corresponde a um recorte do território municipal de Botucatu que abriga o *front* cuestiforme, assim como as partes do reverso e da Depressão Periférica drenadas pelos rios que cortam o referido *front*. Esta área deve ser entendida como um fragmento da paisagem paulista, com sua evolução associada a um amplo contexto no que se refere a seus atributos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos e humanos. Dessa forma, para caracterizar o recorte estudado, é preciso compreender a natureza dos fatores que se expressam localmente a partir de uma análise regional.

A área de estudo localiza-se no interior do estado de São Paulo, entre as latitudes 22°42'30"S e 23°0'33"S e longitudes 48°17'22"O e 48°32' 48"O, abrigando o fragmento das Cuestas Paulistas que cruza o município de Botucatu (Figura 1). O recorte espacial analisado corresponde a trechos de quatro bacias hidrográficas de Botucatu que cruzam o *front* da *cuesta*, limitando a área de estudo a oeste pelos divisores de água das drenagens que fluem para o reverso. As bacias dessa área correspondem à bacia do rio Araquá, no setor noroeste, a bacia do córrego Lavapés, que ocupa o setor central e norte da área de estudos, a bacia do rio Capivara, que ocupa o setor central e leste, e, ao sul, a bacia do rio Alambari (Figura 4). Os fragmentos dessas quatro bacias hidrográficas representam, portanto, uma área que engloba o compartimento cuestiforme, desde os terrenos do reverso até áreas da Depressão Periférica.

A área analisada está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, uma estrutura de grande extensão territorial com 1,5 milhão de km<sup>2</sup>, que recobre o Brasil meridional, assim como o Uruguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Paraguai (MILANI et al, 2007). No território paulista, esta se estende desde o leste do estado, no contato com o Escudo Atlântico, até sua fronteira com o Mato Grosso do Sul a oeste (IPT, 1981b). A Bacia do Paraná formou-se ao longo do Ordoviciano ao Neocretáceo, em deposições Gondwânicas que persistiram até a separação dos continentes (MILANI et al, 2007). Dessa forma, diversos pacotes sedimentares heterogêneos e descontínuos, associados a distintos ambientes deposicionais, assim como derrames e intrusões magmáticas, distribuem-se pela ampla bacia.

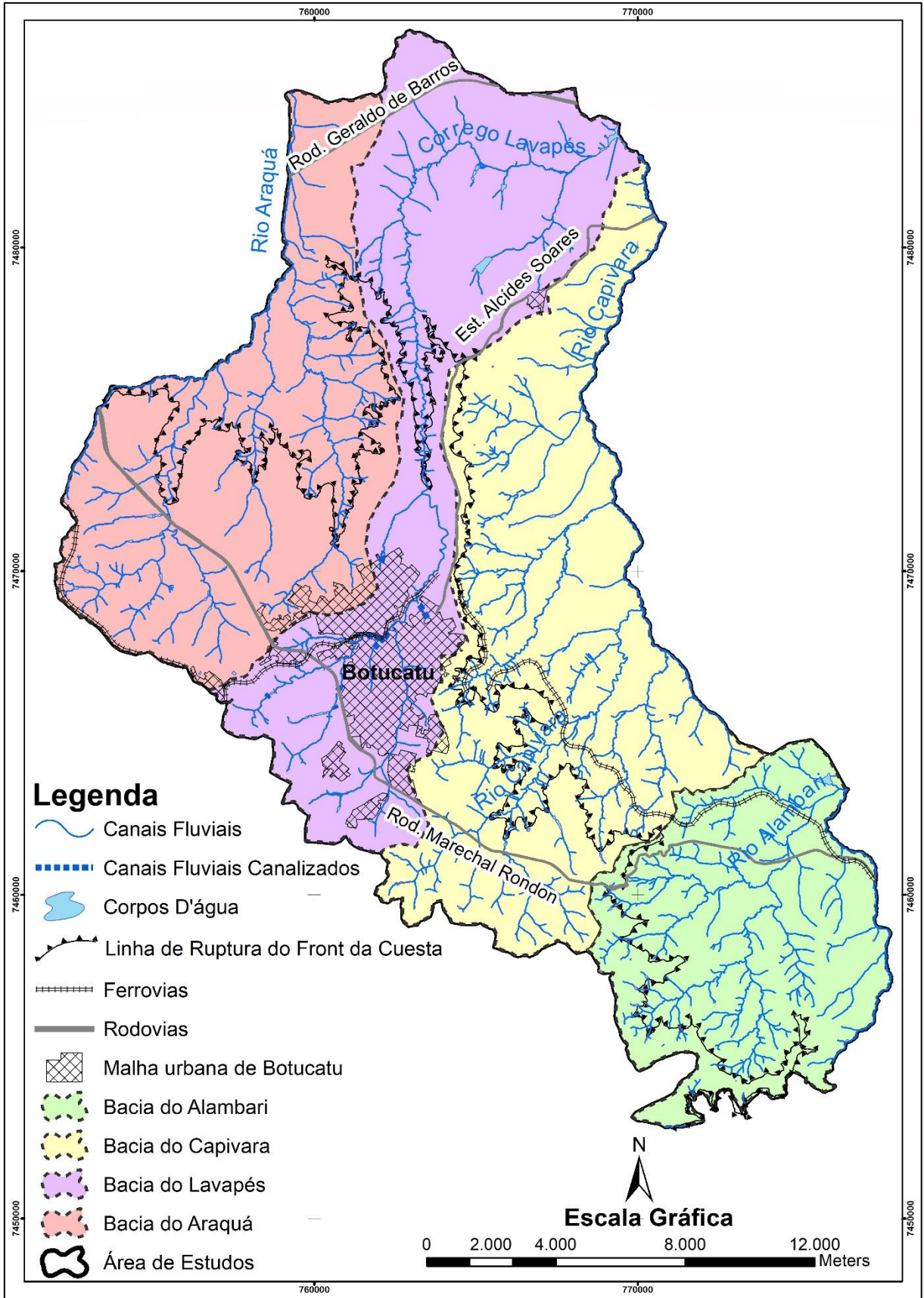


Figura 4: Bacias hidrográficas da área de estudo

De acordo com Ab'Saber (1949; 1956) e Ross (1996), nas periferias de bacias sedimentares é comum a formação de depressões periféricas em decorrência de processos de circundenudação. No estado de São Paulo, a partir do contato com o Escudo Atlântico, formou-se a chamada Depressão Periférica Paulista, que corresponde a uma unidade morfológica caracterizada por uma faixa de terrenos rebaixados pela erosão que separa as regiões elevadas do Planalto Atlântico, a leste, do Planalto Ocidental, a oeste (AB'SABER, 1956; ALMEIDA, 1974; PENTEADO, 1976; IPT, 1981b; ROSS; MOROZ, 1997). O formato isoclinal da Bacia Sedimentar do Paraná fez com que o rio homônimo se instalasse em seu eixo, condicionando um sistema de drenagem consequente superimposto às camadas estratigráficas homoclinais (AB'SABER, 1956; ALMEIDA, 1974; PENTEADO, 1976).

Os rios paulistas chamados grandes consequentes (Grande, Tietê e Paranapanema), com suas nascentes sobre o Planalto Atlântico, ao atingirem a borda da bacia do Paraná, entalharam o pacote sedimentar, aprofundando o nível de base para que seus tributários realizassem um rebaixamento generalizado da região (ALMEIDA, 1974). Este processo deu origem a uma faixa de terras rebaixadas, orientadas no sentido Norte-Sul, com aproximadamente 100 km de largura, de relevo suavizado, composto por colinas baixas, com desníveis locais entre 20 e 50 metros na média. A Depressão Periférica Paulista é sustentada por depósitos sedimentares dos Grupos Tubarão, Passa Dois e São Bento, com presença de intrusões de diabásio mantendo formas de relevo residuais mais proeminentes na região (ALMEIDA, 1974; PENTEADO, 1976).

Limitando a Depressão Periférica a oeste, as Cuestas Paulistas se destacam na paisagem como formas escarpadas, responsáveis pela transição entre os terrenos rebaixados da Depressão, já desgastados, das terras mais altas a oeste, referentes ao Planalto Ocidental (AB'SABER, 1956; ALMEIDA, 1974; ROSS; MOROZ, 1997). A sustentação desse compartimento se deve às características da estratigrafia da Bacia do Paraná, na qual os arenitos tenros da Formação Botucatu capeados por derrames basálticos da Formação Serra Geral, estão submetidos a processos de erosão diferencial responsável pela gênese e evolução das *cuestas* (AB'SABER, 1956; ALMEIDA, 1974).

O sistema Cuesta-Depressão, esculpido por processos de circundenudação (AB'SABER, 1949), conta também com influências tectônicas e estruturais associadas à sua gênese e evolução (PENTEADO, 1976; FACINCANI, 2000; AGUILAR; CUNHA, 2015; SOUZA; ANDRADE; LUPINACCI, 2020). De acordo com Penteado (1976), o

aprofundamento do nível de base promovido pelos grandes consequentes ativa o trabalho erosivo de seus tributários, que muitas vezes estão submetidos ao controle estrutural da morfotectônica, gerando um *front* de traçado irregular e festonado, assim como diversos morros testemunhos (AGUILAR; CUNHA, 2015; STEFANUTO; LUPINACCI, 2016; SOUZA; ANDRADE; LUPINACCI; 2020).

Estas irregularidades se manifestam também nos níveis altimétricos dos topos, em consequência de soerguimentos locais associados às linhas de falha, assim como na ocorrência de patamares estruturais, fruto das descontinuidades dos derrames basálticos entremeados com as camadas areníticas (AGUILAR; CUNHA, 2015; SOUZA; ANDRADE; LUPINHACCI, 2020; ANDRADE; LUPINACCI, 2021). Evidencia-se, portanto, um relevo complexo e um *front* cuestiforme irregular, recortado e heterogêneo, que chega a atingir 1200 metros de altitude, ultrapassando os 250 metros em desníveis locais (AB'SABER 1956; ALMEIDA, 1974).

A oeste das *cuestas*, sustentado pelos derrames basálticos e arenitos da Bacia Bauru (FERNANDES; COIMBRA, 2000), identifica-se o Planalto Ocidental, que corresponde a aproximadamente 2/5 da área do Estado (ALMEIDA, 1974). Neste extenso compartimento, Ross e Moroz (1997) individualizam unidades morfológicas que classificam como planaltos residuais, dentre os quais o Planalto Residual de Botucatu, que compõe a área dessa pesquisa. Segundo os autores, esta unidade morfológica sustentada pelos derrames basálticos interdigitados com arenitos, inicia-se no reverso cuestiforme e apresenta leve inclinação, perdendo altitude no sentido NW, concordante ao caimento estratigráfico.

Além das efusivas básicas e arenitos intertrapeados que constituem a Formação Serra Geral e dos arenitos eólicos da Formação Botucatu, São Paulo (1984) aponta que na área de estudo estão presentes também a Formação Pirambóia, sustentando os terrenos desgastados da Depressão Periférica, e os arenitos fluviais da Formação Marília no reverso cuestiforme, assim como depósitos aluviais do Holoceno e depósitos coluvionais do Plioceno-Pleistoceno (Figura 5).

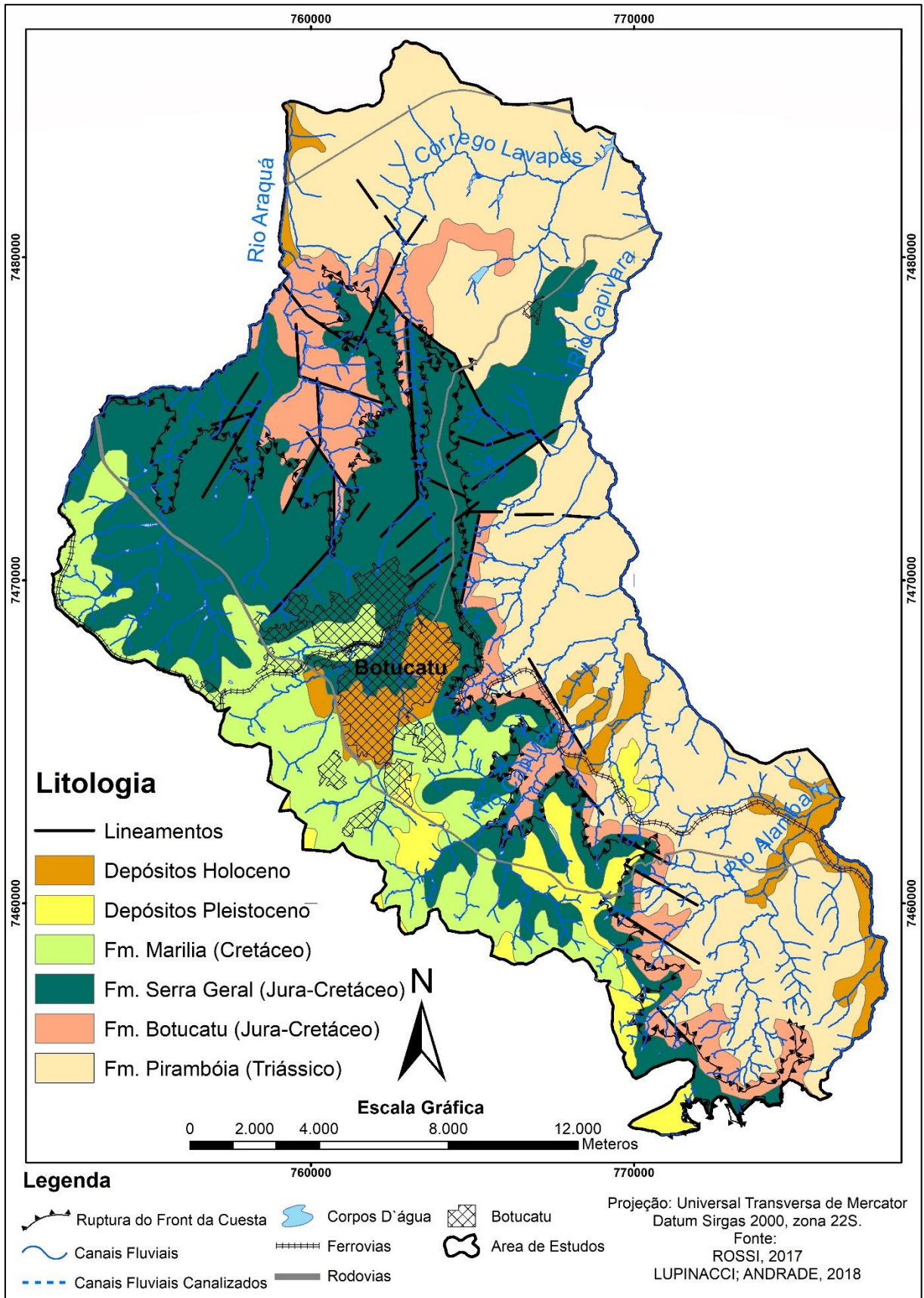


Figura 5: Embasamento litológico da área de estudo

A Formação Piramboia, pertencente ao Grupo São Bento do período Neotriássico, é identificada na Depressão Periférica, nos locais já desgastados pela erosão. De acordo com Perrota *et al* (2005), esta se caracteriza por arenitos fluviais e eólicos médios a finos, de coloração esbranquiçada, avermelhada e alaranjada, apresentando estratificação cruzada assim como laminação cruzada (Figura 6 a). Sobrepostos a esta, identifica-se a Formação Botucatu, caracterizada pela ocorrência de arenitos Jura-Cretáceos, médios a finos, róseos, com marcas de estratificação cruzada característica de ambientes desérticos (MILANI *et al*, 2007), como ilustrado na Figura 6 b. Devido a sua alta suscetibilidade à erosão, os arenitos da Formação Botucatu são encontrados em uma estreita faixa associada ao *front* cuestasiforme no município (Figura 5).



**Figura 6:** Formação Piramboia (a); Formação Botucatu (b); Formação Serra Geral (c); Formação Marília (d)

**Fonte:** Os Autores

Na área ocorre também a Formação Serra Geral (Figura 6 c), composta por derrames basálticos do vulcanismo fissural do Jura-Cretáceo e arenitos intertrapeados (MILANI, *et al*, 2007). O fato da Formação Serra Geral possuir estratos de arenitos interdigitados com os derrames magmáticos revela que os processos de deposição eólica que deram origem a Formação Botucatu persistiram durante os derrames, criando estratos irregulares e descontínuos

de basaltos e arenitos silicificados (FACINCANNI, 2000; AGUILAR; CUNHA, 2015). Na porção sul da área de estudos, esta litologia se distribui nos terrenos associados ao *front* da *cuesta* e em estreita área do reverso, como em fundos de vales (Figura 5). Na porção norte, por outro lado, identifica-se uma vasta área recoberta pela Formação Serra Geral, tanto a leste da linha de ruptura do *front* da *cuesta*, nos terrenos correspondentes a Depressão Periférica, como a oeste da linha, nos terrenos pertencentes ao reverso *cuestiforme* (Figura 5).

A Formação Marília, pertencente à Bacia Bauru, correspondente a depósitos supra basálticos do período Cretáceo (FERNANDES; COIMBRA, 2000), identificados em Botucatu sobre o reverso da *cuesta*, nos terrenos pertencentes ao Planalto Residual de Botucatu. De acordo com São Paulo (1984), esta Formação é constituída por arenitos grosseiros, imaturos, de coloração creme e vermelha (Figura 6 d). Por fim, na Figura 5, observa-se também a ocorrência de depósitos coluviais do Plioceno-Pleistoceno, compostos por “areias de matriz argilosa; cascalhos de limonita e quartzo na base” (SÃO PAULO, 1984) e depósitos aluviais do Holoceno, compostos por areias, argilas e cascalhos na base, manifestando-se tanto em áreas da Depressão Periférica, como do reverso *cuestiforme* (SÃO PAULO, 1984).

As distintas litologias identificadas na área de estudos, que inclusive correspondem ao embasamento rochoso de porções distintas do relevo, influenciam também as características pedológicas da região. A Figura 7 indica a distribuição dos solos identificados na área de estudo com base no mapeamento de Rossi (2017). São identificados Neossolos Litólicos, Nitossolos Vermelho, Latossolos Vermelho, Latossolos Vermelho-Amarelo e Argissolos Vermelho-Amarelo.

Primeiramente, destaca-se a vasta ocorrência dos Argissolos Vermelho Amarelo na porção leste da área de estudos, que coincide com os terrenos da Depressão Periférica e com o embasamento rochoso dos arenitos da Formação Piramboia, assim como em manchas menores, no oeste da área, em terrenos pertencentes ao reverso *cuestiforme* e com embasamento rochoso dos arenitos da Formação Marília (Figuras 5 e 7). De acordo com Rossi (2017), os Argissolos Vermelho-Amarelo identificados na área, caracterizam-se por seu aspecto distrófico, horizonte A moderado ou fraco, textura arenosa/média ou média e fase de relevo ondulado ou suave ondulado. Além disso, a menor coesão dos horizontes superficiais associada horizontes subsuperficiais de menor permeabilidade acarreta em uma elevada suscetibilidade à erosão aos Argissolos de textura média/arenosa do estado de São Paulo (IAC, 2014).

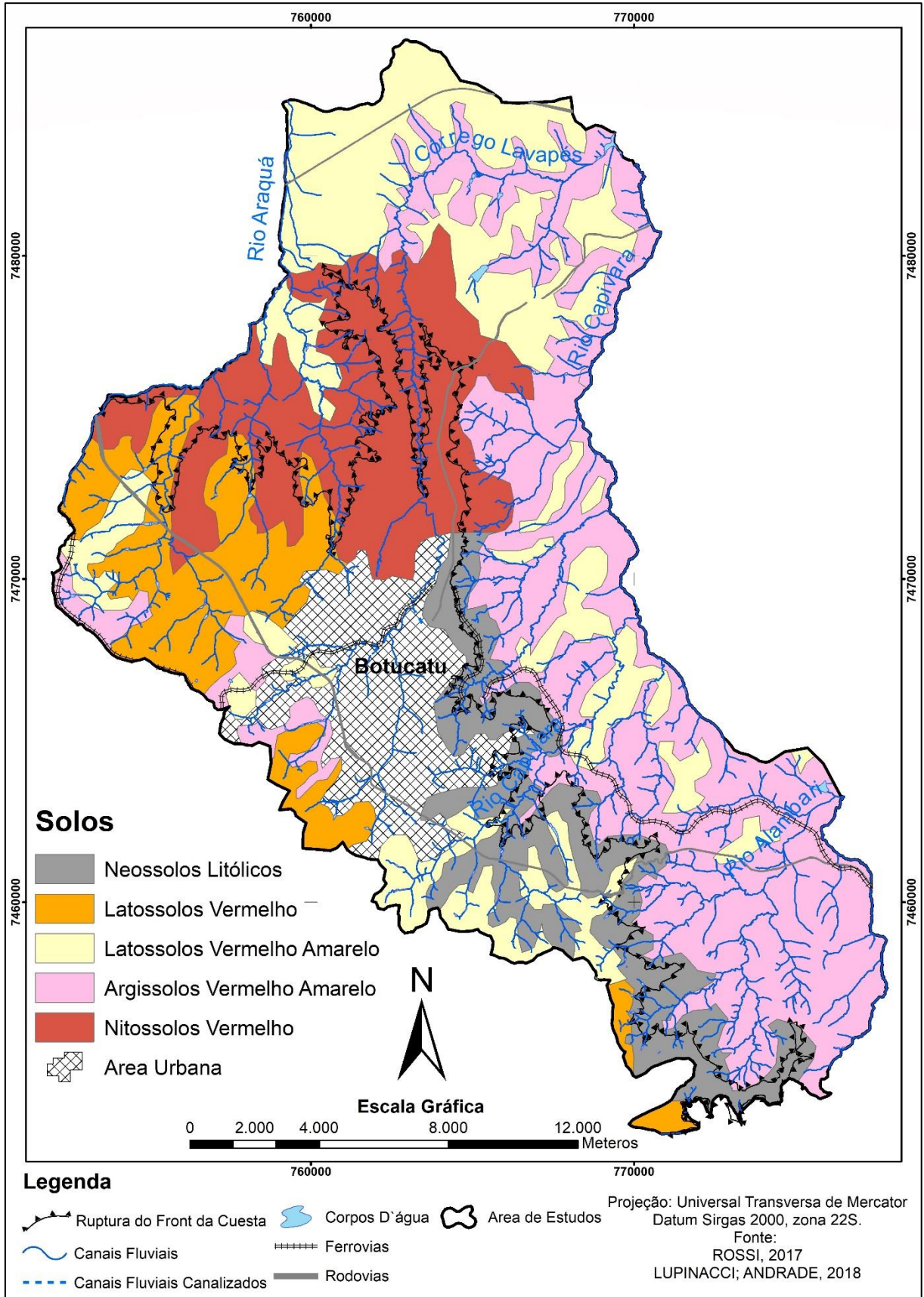


Figura 7: Solos da Área de Estudos

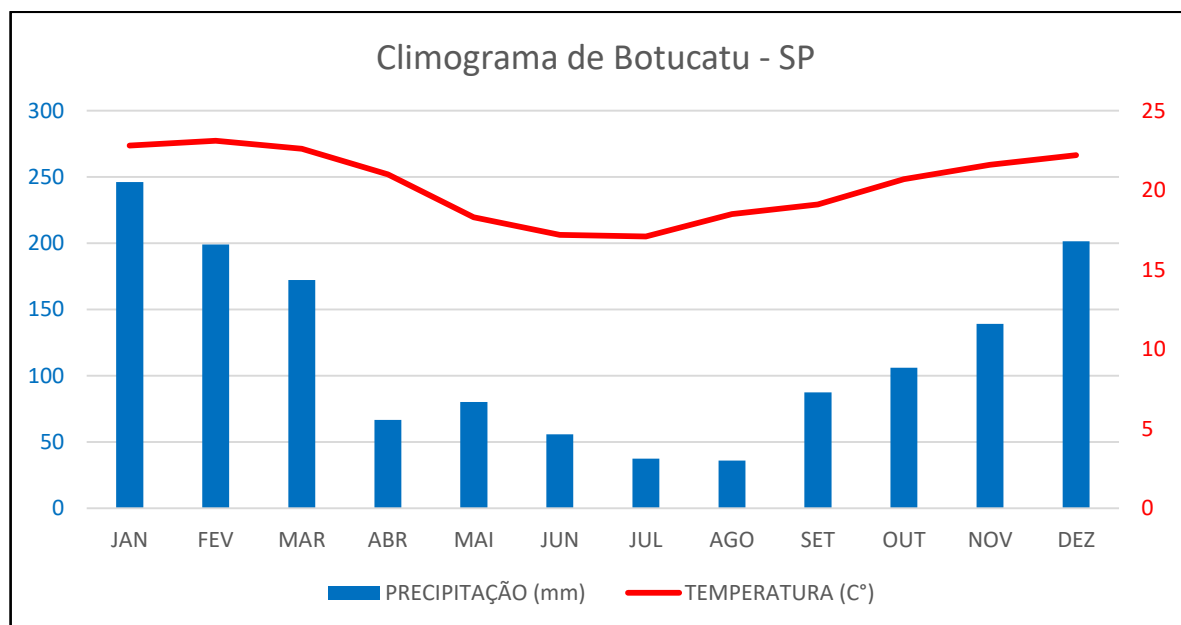
Na Depressão Periférica, especialmente no setor norte da área de estudos, assim como em fragmentos no reverso cuestiforme, são encontrados Latossolos Vermelho-Amarelo (Figura 7), distróficos típicos, A moderado ou fraco e textura média (ROSSI, 2017). De acordo com o Instituto Agronômico de Campinas (IAC, 2014), os Latossolos Vermelho-Amarelo de textura média são tipicamente encontrados próximos à região de *cuestas*, identificados nas áreas de relevo suavizado da Depressão Periférica ou do reverso e tem sua gênese associada a arenitos. São solos que se caracterizam pela baixa coesão e por isso são suscetíveis a degradação pelo manejo agrícola e a processos erosivos nos períodos chuvosos (IAC, 2014).

No setor noroeste da área de estudos, sobre o reverso cuestiforme, identifica-se a ocorrência de Latossolos Vermelho (Figura 7), distrófico típico e textura média (ROSSI, 2017). Estes têm sua localização associada ao embasamento basáltico e sobre os arenitos da Formação Marília que se identificam na região (Figura 5). De acordo com o IAC (2014), os Latossolos Vermelhos de textura média possuem uma baixa coesão, o que os torna suscetíveis à erosão, especialmente em declives acentuados e vertentes longas.

No setor norte da área de estudos, associado à posição do *front* cuestiforme e à ocorrência de uma expressiva área de embasamento basáltico, identificam-se Nitossolos Vermelhos (Figuras 5 e 7), caracterizados por seu aspecto eutroférico/distroférico, A moderado e textura argilosa a muito argilosa (ROSSI, 2017). De acordo com o IAC (2014), os Nitossolos no Estado de São Paulo têm origem em rochas basálticas e apresentam moderada a elevada fertilidade, correspondendo a chamada terra roxa com grande potencial para o desenvolvimento agrícola. Apesar da elevada coesão dos horizontes superficiais, o IAC (2014) destaca que sua ocorrência em relevos ondulados frequentemente acompanha a necessidade de medidas preventivas para evitar o desenvolvimento de processos erosivos.

Por fim, identificam-se Neossolos Litólicos, com características argilosas quando de origem basáltica, ou textura arenosa, quando de origem arenítica vinculada às formações Botucatu ou Marília (ROSSI, 2017). Estes solos estão presentes ao longo de uma faixa que segue o traçado do *front* cuestiforme na porção centro-sul da área de estudos, associados às formações Botucatu, Serra Geral e Marília (Figuras 5 e 7). Os Neossolos Litólicos caracterizam-se por solos pouco desenvolvidos e rasos, possuindo baixo potencial produtivo e alto potencial de degradação, mas são frequentemente utilizados como áreas de pastagens, apesar da recomendação de que sejam destinados a manutenção da vegetação nativa e preservação das nascentes (IAC, 2014).

Esses solos estão submetidos a condições climáticas que, segundo Cunha e Martins (2009, p. 9), se enquadram como **Cfa**, na classificação de Köppen. Caracterizam-se como “clima temperado quente (mesotérmico) úmido”, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. De acordo com os autores, os meses mais quentes do ano são janeiro e fevereiro, com temperaturas médias de 22,8°C e 23,1°C, respectivamente, e os mais frios correspondem a junho e julho, com temperaturas médias de 17,2°C e 17,1°C, respectivamente. Com relação aos índices pluviométricos, os meses mais chuvosos correspondem a dezembro e janeiro, com precipitações médias de 201,4mm e 246,2mm, respectivamente; enquanto os meses mais secos correspondem a julho e agosto, com precipitações médias de 37,5mm e 36,1mm, respectivamente (Figura 8).



**Figura 8:** Climograma de Botucatu (SP) calculado para o período de 1971 a 2006  
**Fonte:** CUNHA; MARTINS (2009)

Entretanto, vale acrescentar que a dinâmica pluviométrica local provavelmente sofre influência da orografia. A partir de um estudo aplicado à região de São Carlos e Rio Claro, Santos, Fontão e Souza (2020) demonstram que as *cuevas* influenciam nos regimes locais de precipitação. Segundo os autores, nas áreas próximas ao *front*, as médias de chuvas anuais são mais elevadas que em áreas rebaixadas do entorno, como na Depressão Periférica, devido ao efeito do relevo na precipitação atmosférica.

A conjunção dos fatores climáticos, geológicos, geomorfológicos e pedológicos se reflete também nas características da vegetação natural do município de Botucatu. De acordo com Souza (2014) e o IBGE (2021), a região é considerada um ecótono entre a mata atlântica e o cerrado, sendo que as variações das características físicas locais determinam o predomínio

das espécies de uma fitofisionomia sobre a outra (AB'SABER 1956; JORGE; MOREIRA, 2000). Quanto à sua ocorrência, São Paulo (2011) afirma que os remanescentes de vegetação nativa no interior da APA Corumbataí, Botucatu e Tejujá - Perímetro Botucatu, é constituído por fragmentos em áreas de difícil ocupação por atividades agrícolas. Esses fragmentos se concentram principalmente sobre as áreas declivosas do *front* cuestasiforme, morros testemunhos ou nas margens de cursos d'água.

Ab'Saber (1956) relata que o desmatamento e supressão da vegetação nativa do interior de São Paulo está relacionado ao processo de uso e ocupação das terras no estado, o qual é orientado de acordo com as características físicas do território paulista. Neste sentido, o clima, a vegetação e os solos, especialmente os solos férteis oriundos da decomposição do basalto, a chamada terra roxa, criaram condições favoráveis à interiorização e desenvolvimento agropecuário no estado.

A ocupação humana na região é milenar, mas alterou profundamente sua dinâmica nos últimos séculos. O sítio arqueológico Caetetuba, localizado no município de São Manuel (SP), vizinho a Botucatu, possui artefatos líticos que, nos estratos mais profundos, datam de 9 a 11 mil anos no passado (TRANCOSO; CORRÊA; ZANETTINI, 2016), marcando a presença de populações humanas na região desde esta época até o período colonial. No início da colonização haviam 3 povos indígenas principais na região de Botucatu: os Oti-xavante, os Kaingang e os Guarani (MELLO, 2012; PIZA, 2015), os quais marcam a história da região, inclusive com o nome dado à cidade, o qual deriva do vocábulo tupi *Ybitu-katu*, que significa “bons ares”, em referência ao clima mais ameno encontrado no alto da *cuesta* (PINTO, 1943; MELLO, 2012).

Outra importante marca indígena deixada na região e que esteve associada ao uso e ocupação do interior do continente é o *Peabiru*, nome dado a um caminho que conectava o litoral do Sudeste e Sul do atual Brasil ao império Inca e ao Oceano Pacífico (DONATO, 1971). Acredita-se inclusive, que esta rota seja parte da extensa e complexa malha viária construída pelo império Inca no período pré-colonial que conectavam quase todo o continente sul-americano (DONATO, 1971). O caminho do Peabiru, apresentado aos colonizadores pelos nativos, teve grande importância na exploração do continente pela coroa portuguesa, sendo utilizada em incursões que partiam da costa leste, mas foi percorrida também no sentido oposto, partindo da costa oeste da América do Sul, por expedições da coroa espanhola (DONATO, 1971).

As missões para o interior, as quais tinham como objetivo a captura e escravização indígena, a exploração do território e sua ocupação a fim de garantir a posse das terras em disputa com a coroa espanhola, levaram a fundação de povoações pelo caminho, chamadas de “bocas do sertão”, a fim de fornecer pouso e mantimento às expedições, (PINTO, 1943). O povoado que dá origem a Botucatu, chamada inicialmente de Nossa Senhora das Dores de Cima da Serra, foi fundado em meados do século XVIII, em um ponto estratégico “no alto de uma serra que serve de contravertente para as águas do rio Paranapanema e Tietê” (PINTO, 1943, p.8) em terras que haviam sido cedidas pela coroa aos jesuítas para a criação de gado em 1719 (FIGUEROA, 2016).

Botucatu surgiu portanto em 1766. A partir de então continuou desempenhando sua função de <boca do sertão>, servindo de pouso e ponto de abastecimento às expedições que demandavam os sertões de Tibagi e Iguatemi. Era um pequenino e acanhado núcleo urbano, ponto de apoio dos criadores da região, com poucos moradores e poucas casas. Ao lado da função de ponto de pouso, teve Botucatu também outra função, de ordem econômica – a de fornecer ao governo, além de mantimentos, o gado e as cavalgaduras necessárias às expedições sertanistas. (PINTO, 1943, p. 9).

No momento inicial da ocupação colonial da região de Botucatu, em meados do século XVIII, a pecuária foi a principal atividade econômica, responsável pelo início do progressivo desmatamento do interior paulista. As criações eram de gado e mulas, as quais destinavam-se ao abastecimento da região com carne e animais de transporte de cargas, em especial o ouro nas Minas Gerais (PINTO, 1943; FIGUEROA, 2016). Posteriormente, com o estabelecimento do povoado e a chegada de posseiros, passa a ocorrer uma diversificação das atividades produtivas, em especial com o cultivo da cana, algodão e café (PINTO, 1943; FIGUEROA, 2016). Na segunda metade do século XIX, observa-se o fortalecimento da economia do café, especialmente em razão dos solos férteis encontrados no reverso da *cuesta*, fator que teve um papel central no desenvolvimento econômico de Botucatu, (FIGUEROA, 2016).

A produção cafeeira em alta no início do século XX possibilitou a expansão e modernização da cidade, assim como atraiu imigrantes, acarretando no crescimento populacional (FIGUEROA, 2016). Este processo trouxe também um desenvolvimento industrial incipiente, voltado ao atendimento do mercado interno, tanto pelo fornecimento de produtos domésticos à população crescente, como também ao desenvolvimento da agroindústria, voltada à fabricação de maquinários e o beneficiamento do café e do algodão (FIGUEROA, 2016). Entretanto, a crise do café a partir dos anos 1930 teve grande impacto

sobre a economia da cidade, acarretando em uma lenta e gradual retomada pecuária e reconversão das lavouras para e as pastagens extensivas na região (FIGUEROA, 2016).

Após décadas de crise (anos 1930 e 1940), verificou-se a retomada da atividade industrial na década de 1950, saindo das sombras do café e voltando-se inicialmente à metalurgia, com posterior diversificação do parque produtivo, o que retomou o desenvolvimento do município e acarretou em grande crescimento populacional, passando de 51.954 habitantes em 1970 para 100.876, em 1996, praticamente o dobro (FIGUEROA, 2016). Sem que a agricultura retomasse o vigor e a importância que teve no passado, atualmente Botucatu revela um território vinculado à dinâmica urbana, sendo a população estimada no município é 148.130 habitantes com apenas cerca de 3% dos domicílios localizados na zona rural (IBGE, 2021).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta e descreve os procedimentos técnicos utilizados para a elaboração dos mapeamentos, justificando as escolhas e os critérios adotados com base na revisão da bibliografia. No item 4.5 desta sessão, são explicados os procedimentos utilizados para quantificar as áreas ocupadas pelas diversas variáveis mapeadas bem como referente a análise comparativa dos elementos cartografados, buscando compreender as relações espaciais entre os mesmos.

Para a elaboração dos mapeamentos, inicialmente foi feito o tratamento da base cartográfica, ortofotos, fotografias aéreas e o levantamento das características litológicas e pedológicas da área de estudos. A base cartográfica consistiu nos dados vetoriais das curvas de nível e sistema de drenagem das cartas topográficas do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC) na escala 1:10.000, fornecidas pela prefeitura municipal de Botucatu, assim como o mapeamento da linha de ruptura do *front* da *cuesta* de Botucatu realizado por Lupinacci e Andrade (2018). As ortofotos digitais da área de estudo da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), do ano 2010, na escala original de 1:25.000, também foram fornecidas pela prefeitura de Botucatu e foram recortadas conforme o limite da área de estudos. As fotografias aéreas de 1972, elaboradas pela empresa Terrafoto, escala 1:25.000, foram fornecidas pelo Departamento de Engenharia Rural da UNESP de Botucatu e, assim como as ortofotos da EMPLASA, foram selecionadas conforme a cobertura da área de estudos. Ressalta-se que o aerolevanteamento de 1972 não cobre a área estudada por completo, porém entende-se que devido ao fato de a porção não coberta tratar-se que uma área pequena e que foi checada em campo, o uso do material não comprometeu a qualidade da pesquisa.

De posse dos materiais descritos, foram elaborados o mapa de Feições Morfológicas da *cuesta* de Botucatu, os mapas de densidade feições erosivas do cenário de 1972 e de 2010, os mapas de uso da terra dos mesmos cenários e os mapas das áreas com restrições legais ao uso e ocupação de 1972 e 2010, conforme as técnicas descritas nos itens 4.1 a 4.4. Trabalhos de campo foram realizados em maio e julho de 2021 e em março e junho de 2022, buscando refinar e validar os dados obtidos em laboratório. Todos os mapeamentos foram executados no *software ArcGis 10.5*. Após os mapeamentos, as informações temáticas foram sobrepostas e os aspectos integrados foram quantificados, buscando estabelecer relações espaciais entre estas, a fim de identificar os elementos condicionantes dos processos erosivos.

#### 4.1 Mapa das Feições Cuestiformes de Botucatu (SP)

Para atender o objetivo desta pesquisa, de buscar compreender como o relevo cuestiforme influencia na dinâmica erosiva, buscou-se mapear as feições morfológicas típicas das *cuestas* em Botucatu para, em seguida, comparar tais dados com os locais de maior ocorrência de feições erosivas lineares. Para isso, o mapeamento das Feições Cuestiformes de Botucatu foi elaborado em conformidade com os princípios e técnicas da cartografia geomorfológica, adaptados aos objetivos desta pesquisa. A tarefa da cartografia geomorfológica, que consiste em representar espacialmente o relevo de determinada região em um plano bidimensional, corresponde a um desafio complexo, uma vez que o relevo constitui, por definição, um elemento tridimensional (CUNHA, 2001). Além deste, outro desafio diz respeito à própria complexidade do relevo terrestre, o qual não corresponde a uma simples sequência de formas da superfície, mas a um conjunto de materiais, feições e processos que se relacionam de maneira contínua ao longo do tempo (ROSS, 1991).

Além disso, cabe salientar que nesta pesquisa foi elaborado um mapeamento específico para a identificação e representação das feições do relevo tipicamente associados à dinâmica cuestiforme, conforme o objetivo desta pesquisa. Por isso, apesar de utilizar técnicas da cartografia geomorfológica, este material não pretende constituir um mapa geomorfológico tradicional, mas um mapa das feições morfológicas da *cuesta*.

A bibliografia consultada (STEFANUTO; LUPINACCI, 2016; PINTON; LUPINACCI, 2019; SOUZA; ANDRADE; LUPINACCI, 2020; ANDRADE; LUPINACCI, 2021) atesta que as *cuestas* do Estado de São Paulo caracterizam-se pela complexidade geomorfológica em razão de fatores lito-estruturais e morfotectônicos, levando a ocorrência de uma diversidade de feições e processos geomorfológicos nestes ambientes. Para além dos elementos clássicos associados aos relevos cuestiformes, como o *front*, morros testemunhos, a depressão e o reverso (PENTEADO, 1983), os autores (*op. cit.*) detalham outras características das Cuestas Paulistas que apresentam potencial para interferirem na dinâmica erosiva.


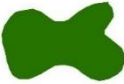
De acordo com Andrade e Lupinacci (2021), o *front cuestiforme* em Botucatu (SP) pode apresentar-se sob diversas variações quanto à forma, podendo possuir cornijas bem marcadas ou rupturas suaves. Da mesma forma, Stefanuto e Lupinacci (2016) relatam variações nos desníveis altimétricos e níveis de declividade do *front* cuestiforme em Analândia (SP). Além destas características, outra feição marcante nas Cuestas Paulistas em razão das variações litológicas são os patamares estruturais (SOUZA; ANDRADE LUPINACCI, 2020;




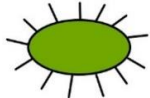
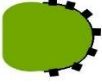

ANDRADE; LUPINACCI, 2021), os quais se diferenciam do *front* cuestiforme pelas dimensões menores, por não constituírem estruturas contínuas e não terem sua evolução associada, necessariamente, a processos de solapamento basal.

Dessa forma, a partir destas observações e da avaliação preliminar das características da área de estudo, este mapeamento foi elaborado com base nas fotografias aéreas do município de Botucatu de 1972. De posse do material, os pares estereoscópicos foram utilizados para a criação dos anaglífos no aplicativo *EstereoPhotoMaker*, conforme os procedimentos descritos por Souza e Oliveira (2012), o que permitiu a análise das imagens em três dimensões. Para isso foram selecionadas as fotografias aéreas que recobrem a área de estudo, as quais foram escaneadas, transformadas em anaglífos, os quais foram adicionados e georreferenciados no Arcgis, possibilitando a análise das feições do relevo na plataforma de SIG.

Além dos anaglífos, na busca pela identificação das feições do relevo cuestiforme também foram utilizados os arquivos vetoriais referentes às curvas de nível e canais fluviais, a carta de declividade de Botucatu (ANDRADE; LUPINACCI, 2021) e foi realizada a reambulação em campo dos pontos de dúvida.

As feições cuestiformes mapeadas, os critérios utilizados para defini-las e a simbologia adotada estão descritos no Quadro 1. Com relação à simbologia, vale acrescentar que algumas feições estão representadas como linhas, outras como polígonos. Aquelas representadas como polígonos seguiram a proposta de Ross e Moroz (1997), que sugerem a utilização de tons de verde para a representação das feições morfoesculturais pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. Mesmo que na escala adotada estejam representadas feições morfológicas de maior detalhe, que não se enquadrariam como morfoesculturas, seguiu-se a mesma lógica para estas no que diz respeito às cores utilizadas.

<b><i>Feição Cuestiforme</i></b>	<b>Caracterização</b>	<b>Simbologia</b>
Depressão Periférica	Compreende os terrenos rebaixados, já desgastados pela circundesnudação, limitados pelo <i>front</i> cuestiforme.	 ROSS; MOROZ (1997)
Reverso	Corresponde aos terrenos elevados a sudoeste do <i>front</i> ainda não desgastados pelos processos erosivos.	 ROSS; MOROZ (1997)

<i>Feição Cuestiforme</i>	Caracterização	Simbologia
<i>Tálus</i>	Corresponde aos terrenos cobertos pelas rampas coluvionares depositadas no sopé do <i>front</i> . Foi mapeado como um polígono que se inicia na linha de ruptura do <i>front</i> da <i>cuesta</i> e segue até sua base. Quanto aos seus limites, mesmo que os depósitos coluvionares se iniciem adiante da linha de ruptura do <i>front</i> , à frente da cornija, a escala do mapeamento não permite identificar esses espaços e por isso seu início ficou estabelecido na linha de ruptura. Com relação ao limite no sopé, entende-se que estes não são precisos e bem definidos na natureza e portanto, a fim de representar essa condição, a simbologia adotada possui traços na base, indicando um limite transicional.	 Os autores
Front com cornija	Esta feição utilizou como base a linha de ruptura do <i>front</i> da <i>cuesta</i> mapeada por Lupinacci e Andrade (2018). Entretanto, em virtude das variações morfológicas do <i>front</i> , entendeu-se a necessidade classificá-lo como duas feições distintas, possibilitando observar a influência desta característica na erosão dos solos. Neste caso, o <i>front</i> com cornija corresponde aos setores onde a ruptura topográfica se dá de modo abrupto e bem marcado.	 (VERSTAPPEN; ZUIDAN 1975)
Front desmantelado	Segundo a mesma lógica do <i>front</i> com cornija, esta feição identifica os setores onde a ruptura se dá de modo gradual, sem que haja uma transição abrupta.	 VERSTAPPEN E ZUIDAN (1975)
Morros testemunhos	Correspondem a feições residuais que foram separados do <i>front</i> por processos erosivos ( <i>cut off</i> ) mas ainda conservam a altura semelhante a este.	 TRICART (1965)
Feições residuais	Em diversos setores do <i>front</i> cuestiforme, identificou-se a presença de patamares estruturais entre a Depressão Periférica e o reverso, revelando um <i>front</i> escalonado em degraus. A superfície destes patamares identificados abaixo do <i>front</i> , que não estão cobertos por depósitos coluvionais, uma vez que suas formas atestam processos de dissecação, não podem ser classificadas como parte do <i>tálus</i> . Da mesma forma, não podem ser classificados como morros testemunhos por não serem isolados. Por esse motivo, foram identificados como feições à parte, constituindo uma característica do <i>front</i> cuestiforme em Botucatu com potencial para influenciar na dinâmica erosiva.	 Os autores
Patamares estruturais	Identificados por rupturas topográficas bem marcadas denotando influência estrutural na sustentação destas feições. Estas rupturas se distinguem do <i>front</i> em razão de seu menor desnível altimétrico e por sua descontinuidade. Entretanto, cabe ressaltar que o mapeamento em gabinete e as reambulações realizadas em campo permitiram identificar uma grande variedade nas características dos patamares estruturais (como altura, declive e continuidade) a depender do setor do relevo e do embasamento litológico. Entretanto, todos estes foram mapeados com a mesma simbologia e considerações individualizadas acerca das características destes patamares foram feitas, quando necessário.	 TRICART (1965)

**Quadro 1:** Critérios e simbologias utilizados para a representação das feições cuestiformes de Botucatu

#### 4.2 Mapas de Densidade de Feições Erosivas Lineares (1972 e 2010)

Salomão (1999) propõe a identificação de ravinas e voçorocas por meio de fotografias aéreas, a fim de avaliar áreas com maior suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas. Segundo o autor, o mapa de ocorrência de ravinas e voçorocas possibilita compreender a dinâmica do relevo, buscando revelar os fatores identificados localmente que favorecem ou não o desenvolvimento desses processos. A partir da identificação de tais formas, o autor sugere cruzar essas informações espaciais com dados relativos à litologia, pedologia e relevo da região,

e posteriormente com o uso da terra, visando interpretar os fatores relacionados à ocorrência de processos erosivos lineares.










Seguindo esta proposta, utilizaram-se as fotografias aéreas de 1972 e as ortofotos digitais de 2010 para o mapeamento das feições erosivas nos dois cenários. Inicialmente foram elaborados os mapas de Densidade de Sulcos Erosivos (1972 e 2010), Densidade de Ravinas (1972 e 2010), Densidade de Voçorocas (1972 e 2010); e, posteriormente, estes foram compilados para a elaboração dos Mapas de Densidade de Feições Erosivas Lineares (1972 e 2010). A elaboração destes produtos se dividiu em duas etapas principais, as quais serão apresentadas separadamente. A primeira (4.2.1) corresponde à identificação e mapeamento das feições erosivas presentes na área de estudos a partir da interpretação das fotografias aéreas para 1972 e das ortofotos para 2010. A segunda etapa (4.2.2) corresponde as técnicas utilizadas para quantificar tais feições a fim de representar sua densidade como se propõe neste trabalho.

#### *4.2.1 Identificação das feições erosivas a partir da interpretação das fotografias aéreas (1972) e das ortofotos digitais da EMPLASA (2010)*

As fotografias aéreas de 1972 e o mosaico das ortofotos de 2010 foram cuidadosamente analisados buscando identificar feições erosivas lineares mapeáveis na escala de 1:10.000. Cabe ressaltar que em ambos os casos a escala de 1:10.000 foi respeitada a fim de possibilitar comparações entre os mapeamentos dos dois cenários. Os sulcos, ravinas e voçorocas foram identificados por alterações de cor e textura da superfície. Os sulcos erosivos apresentam-se no sentido do declive, indicando canais de escoamento pluvial, sem a presença de taludes (Quadro 2). Devido à necessidade de quantificar as feições a fim de calcular sua densidade, os sulcos foram mapeados como linhas sobre as incisões no terreno.

As ravinas, por sua vez, correspondem a incisões mais desenvolvidas do que os sulcos, atestando uma dinâmica erosiva mais intensa. O desenvolvimento das ravinas se dá pela ruptura das camadas superficiais de solo, levando ao desenvolvimento de canais de escoamento profundos e estreitos. A definição do *Soil Conservation Service* (1966, *apud* SALOMÃO, 1999) diferencia sulcos erosivos de ravinamentos pela possibilidade de obliteração dos primeiros por técnicas simples de manejo do solo. Na interpretação visual das ortofotos, essa diferenciação se traduziu pela presença de taludes erosivos nos ravinamentos, indicando maior profundidade na incisão, o que dificultaria sua obliteração. A presença de taludes erosivos foi indicada pela ocorrência de solo exposto no interior da feição, ou pelo sombreamento de seu fundo devido à profundidade (Quadro 2). Entretanto, apesar dos taludes, a proximidade destes não possibilitava

seu mapeamento na escala 1:10.000; por isso, foram mapeadas da mesma forma que os sulcos, como linhas sobre as incisões.

Feição Erosiva	Simbologia	Fotografias Aéreas (TERRAFOTO, 1972)	Ortofotos (EMPLASA 2010)
Sulcos			
Ravinas			
Voçorocas			

**Quadro 2:** Classificação de Feições Erosivas

Na bibliografia consultada (GUERRA, 1999; OLIVEIRA, 1999; SALOMÃO, 1999; AUGUSTIN; ARANHA, 2006a; FILIZOLA *et al*, 2011; FILHO; FILHO, 2014; DANIEL; VIEIRA, 2015) existe um consenso de que as voçorocas correspondem ao estágio final e mais desenvolvido das feições erosivas lineares. Porém, como discutido no capítulo da fundamentação teórica, existem diversos critérios que podem ser utilizados para diferenciar as ravinas das voçorocas, buscando traçar o limite entre estas. A classificação das feições erosivas como voçorocas seguiu os critérios propostos por Fendrich *et al* (1997), Salomão (1999); Bacellar, Neto e Lacerda (2001), Augustin e Aranha (2006a) Filho e Filho, (2014) e outros, os quais prevêem a presença de escoamento subsuperficial para classificar a feição como voçoroca.

Para estes autores, o escoamento subsuperficial possibilita a ocorrência de processos que não podem ser encontrados em ravinas, como o *pipping* (SALOMÃO, 1999; AUGUSTIN; ARANHA, 2006a; FILHO; FILHO, 2014). Salomão (1999, p. 231) destaca ainda que “Apenas no início da formação da boçoroca haverá dificuldade para separar essas duas formas de erosão [ravinas e voçorocas]”, uma vez que o aprofundamento do ravinamento, até o ponto de afloramento do lençol freático, muda a dinâmica evolutiva da feição, adicionando o processo de escoamento subsuperficial, que promoverá o alargamento e ramificações da forma a montante.

Portanto, as incisões profundas no terreno foram assumidas como voçorocas quando se constataram indicativos de afloramento de água em seu interior. Um destes indicativos se deu pelo alargamento e ramificações das incisões, atestando a ocorrência do *pipping* (SALOMÃO, 1999; AUGUSTIN; ARANHA, 2006b; FILIZOLA *et al*, 2011; FILHO; FILHO, 2014), assim como pela observação de vegetação no interior da forma, que só pode ser sustentada pela ocorrência de água perene no local. Dessa forma, as voçorocas foram representadas pelo contorno dos taludes erosivos, possibilitado pelo seu alargamento promovido pelo escoamento subsuperficial (Quadro 2).

#### 4.2.2 *Processamento da Densidade de Feições Erosivas*

A criação de mapas de densidade de feições erosivas lineares objetiva identificar os locais onde essas formas se concentram, a fim de avaliar as características do terreno que o torna mais suscetível ao desenvolvimento de processos erosivos lineares.

Os procedimentos técnicos para a construção dos mapas de densidade de feições erosivas lineares se basearam na proposta de Hubp (1988) para a criação de mapas de densidade de drenagem. Para tanto, a área de estudo foi dividida em quadrículas de mesmo tamanho e os comprimentos das feições de interesse foram quantificados no interior de cada quadrícula. Entretanto, a transposição desse método para o universo da presente pesquisa apresentou uma dificuldade devido ao fato de se mapear tipos diferentes de feições erosivas que não podem ser quantificados da mesma forma, inclusive devido à própria maneira como estas foram cartografadas (sulcos e ravinas como linhas sobre as incisões e voçorocas como linhas sobre os taludes).

Assim, a primeira etapa da elaboração dos mapeamentos foi comum aos 3 tipos de feições erosivas. Esta consistiu na criação de uma malha quadriculada sobre a área de estudos

com a ferramenta *Create Fishnet*. A densidade de feições erosivas foi processada segundo diversos tamanhos das quadrículas da grade, e, após o teste com quadrículas de 250m de lado, adotou-se a dimensão de 500 metros, devido ao fato deste tamanho ter se mostrado o mais adequado para a representação do fenômeno na escala de análise. Quadrículas menores traziam um excesso de detalhe que não mostrava a relação com os elementos do entorno, ao mesmo tempo que Quadrículas com dimensões maiores acarretariam em uma generalização excessiva do dado de densidade, dificultando identificar os fatores condicionantes do processo. Entretanto, entende-se que este valor pode não ser adequado para outros estudos a depender dos objetivos da pesquisa, escala de análise ou características da área.

Posteriormente à criação da malha quadriculada, realizou-se a quebra das feições por quadrícula, através da ferramenta *Intersect*. Dessa forma, segmentos vetoriais referentes às feições erosivas foram divididos pelos limites das quadrículas, o que possibilitou quantificar a dimensão de cada feição incluída em determinada quadrícula. Em seguida, na tabela de atributos das camadas vetoriais referentes a cada feição erosiva, foi criada uma nova coluna na qual, por meio da opção *calculate geometry*, foi calculado o comprimento (em metros) de cada feição erosiva.

Em seguida, os dados dimensionais de cada feição erosiva foram associados às quadrículas da malha por meio da opção *Join and Relates: join*. Dessa forma, após realizar esse procedimento para os sulcos, ravinas e voçorocas, a tabela de atributos da grade passou a conter 3 colunas (uma para sulcos, uma para ravinas e uma para voçorocas), cada uma indicando a soma dos comprimentos da respectiva feição no interior de cada quadrícula. Por fim, os valores de todas estas colunas foram divididos por 250.000 m<sup>2</sup>, gerando o dado referente a densidade de feições erosivas em cada quadrícula.

Em um primeiro momento, os mapas de densidade de cada feição erosiva (densidade de sulcos erosivos, densidade de ravinas e densidade de voçorocas) tiveram seus resultados comparados, buscando avaliar se existe uma coincidência dos locais onde se desenvolvem cada tipo de feição. Posteriormente os dados referentes às densidades dos sulcos, ravinas e voçorocas de cada quadrícula foram somados, a fim de obter os mapeamentos representando a totalidade das feições erosivas lineares.






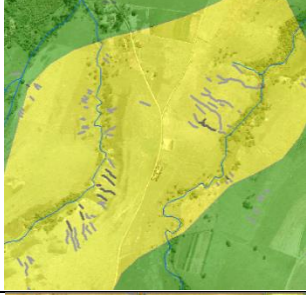


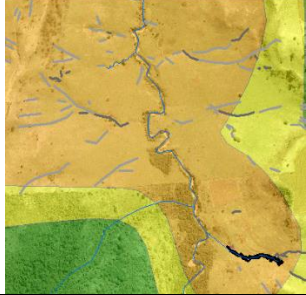


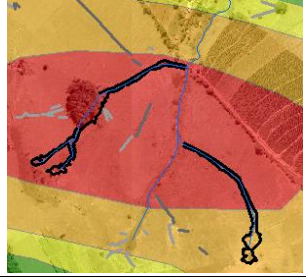


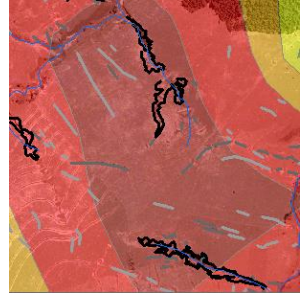
Como as quadrículas passaram a possuir um valor referente ao dado de densidade dos sulcos, das ravinas e das voçorocas em seu interior, a etapa seguinte consistiu na interpolação desses valores a fim de representá-los espacialmente. Para isso, segundo a proposta de Hubp

(1988), foi criado um ponto central no interior de cada quadrícula, por meio da ferramenta *Feature to Point*. Em seguida foi criado um *Triangular Irregular Network (TIN)*, visando espacializar os dados referentes à densidade de feições erosivas. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Create TIN* na qual, no campo *Input Feature Class*, selecionou-se a camada vetorial referente ao ponto central da quadrícula e, no campo *Height Field*, selecionou-se a coluna relativa à densidade de feições erosivas. Após a criação do *TIN*, esse arquivo é transformado para o formato *raster* por meio da ferramenta *TIN to Raster*.

Em seguida, para os mapas de densidade de feições erosivas lineares, que abarcam os três tipos de feições, os valores referentes às dimensões dos sulcos, ravinas e voçorocas foram somados e então divididos pela área, gerando o dado de densidade de feições erosivas lineares. Destaca-se, entretanto, que neste mapeamento os sulcos tiveram seus dados de comprimento multiplicados por 0,5, buscando-se atribuir menor peso às áreas afetadas por estas feições quando comparadas aos ravinamentos e voçorocamentos, uma vez que os sulcos atestam um processo erosivo menos desenvolvido. Os demais processos utilizados para especializar tais informações foram repetidos.

Para a elaboração do mapa final, os níveis de densidade de feições erosivas lineares foram divididos em cinco classes, as quais seguiram intervalos exponenciais, dobrando a cada classe. Dessa forma, os dados de densidade de feições erosivas que estavam indicados em metros por metros quadrados ( $m/m^2$ ) foram transformados em metros por hectares ( $m/ha$ ) para melhor se adequar aos dados de uso da terra, também analisados em hectares. Em seguida, buscando a definição dos valores mais adequados, as classes adotadas foram: I: 0 -| 10m/ha; II: 10 -| 20m/ha; III: 20 -| 40m/ha; IV 40 -| 80m/ha; V: 80 -| 160m/ha, conforme ilustrado no Quadro 3.

Por fim, para realizar os cálculos de área e sobreposição com os dados dos outros mapeamentos, o arquivo *raster* foi convertido novamente para o formato vetorial por meio da ferramenta *Raster to Polygon*. Na interface da ferramenta, o arquivo *raster* foi inserido, e após executar o processamento, foi gerado um único arquivo vetorial englobando toda a área, composto por diversos polígonos que representam a ocorrência de cada classe. Com o novo arquivo, foi selecionado o item *Properties*, em seguida o campo *Symbology*, e neste a opção *Value* foi alterada para *gricode*, o que possibilitou classificar os polígonos gerados segundo sua cor, ou seja, segundo a classe de cada um.

Classes de Densidade de Feições Erosivas Lineares	Fotografias Aéreas	Densidade de Feições Erosivas
<p> <b>Classe I (0 -  10 m/ha):</b> terrenos pouco atingidos por feições erosivas, com presenças excepcionais de sulcos ou ravinas.</p>		
<p> <b>Classe II (10 -  20 m/ha):</b> terrenos atingidos por feições erosivas, principalmente sulcos e ravinamentos e excepcionalmente voçorocas de pequeno porte e isoladas, indicando terrenos atingidos por processos erosivos pouco desenvolvidos, mas com potencial para evolução.</p>		
<p> <b>Classe III (20 -  40 m/ha):</b> terrenos fortemente atingidos por sulcos e ravinamentos, e eventualmente voçorocas, indicando um estágio mais desenvolvido do que o da segunda classe, onde os processos erosivos já comprometem as atividades de uso da terra no local.</p>		
<p> <b>A Classe IV (40 -  80 m/ha):</b> terrenos com presença de voçorocas já desenvolvidas associadas a sulcos e ravinas. Nestes locais, a erosão já representa um problema para o uso da terra e faz-se necessário aplicar medidas de contenção</p>		
<p> <b>A Classe V (80 - 160 m/ha):</b> terrenos marcados por voçorocamentos de grande porte, frequentemente associados a sulcos e ravinas, com elevado comprometimento das terras e necessidade de aplicação de técnicas de contenção. Em alguns locais, constata-se inclusive que estes métodos já foram aplicados na tentativa de estabilizar as voçorocas.</p>		

**Quadro 3:** Classes de Densidade de Feições Erosivas Lineares  
**Fonte:** EMPLASA 2010

Em seguida, com a opção *Editor* ativada, a tabela de atributos possibilitou selecionar todos os polígonos com o mesmo *gricóde*, os quais foram mesclados em um só, utilizando a ferramenta *Merge*. Dessa forma, o *software* passa a considerar todos os fragmentos pertencentes







à mesma classe como um só polígono, mesmo que não estejam espacialmente conectados no mapa. Com isso, as classes de densidade de feições erosivas passaram a ser representadas por um único arquivo vetorial composto por cinco polígonos, cada um identificando uma classe de densidade de feições erosivas.

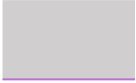






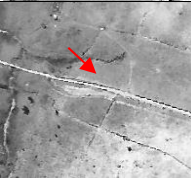




















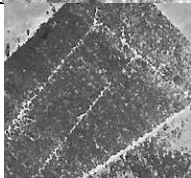

### 4.3 Mapas de Uso da Terra (1972 e 2010)


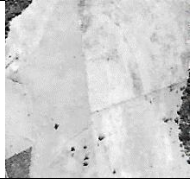


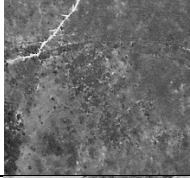


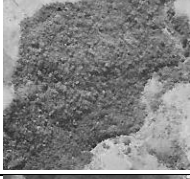







De acordo com o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), o mapeamento da cobertura e uso da terra corresponde a uma representação simplificada de um dado da realidade com objetivo de fornecer uma análise de determinada característica do espaço geográfico. Dessa forma, visto a impossibilidade de reproduzir a complexidade do dado real, o que se deve buscar no mapeamento são critérios claros para a classificação de determinado padrão de uso e cobertura da terra, que necessariamente contará com a agregação de condições heterogêneas em uma mesma classe.

Neste trabalho, o processo de classificação dos padrões de uso e ocupação da terra seguiu as orientações propostas por Ceron e Diniz (1966), agrupando-se áreas com base em características de tamanho e forma das parcelas, cor, textura e características do entorno. O mapeamento do cenário de 1972 foi feito com base nas fotografias aéreas e o de 2010 se deu sobre as ortofotos. Em ambos os casos, as imagens foram cuidadosamente analisadas a fim de delimitar manualmente os polígonos de cada classe de uso. Vale ressaltar também o respeito à escala de 1:10.000 a fim de garantir o uso do mesmo critério nos dois mapeamentos.

As classes utilizadas para a classificação do uso da terra basearam-se majoritariamente na proposta do Manual Técnico de Uso da Terra, elaborado pelo IBGE (2013), mas com alterações e modificações quando necessário, buscando adequar as classes às características da área de estudo e sua relação com a dinâmica erosiva. As classes e critérios utilizados são descritos a seguir e exemplificados no Quadro 4.

Agrupamento	Uso da Terra/Cor	Terrafoto (1972)	EMPLASA (2010)
Áreas Antrópicas não agrícolas	Urbanização Consolidada 		
	Expansão Urbana 		

	<p>Chácaras</p> 				
	<p>Infraestrutura Rural</p> 				
	<p>Estradas Rurais</p> 				
	<p>Estradas Pavimentadas</p> 				
	<p>Ferrovias</p> 				
	<p>Área de Mineração</p> 				
Áreas Antrópicas Agropecuárias	<p>Cana de Açúcar</p> 				
	<p>Cultivo Perene</p> 				
	<p>Cultivo Temporário</p> 				
	<p>Silvicultura</p> 				

	Pasto Limpo 				
	Pasto Sujo 				
Áreas de Vegetação	Vegetação Florestal 				
	Vegetação Herbácea 				
	Corpos D`Água 				

**Quadro 4:** Classes de Uso da Terra

As classes de uso da terra foram agrupadas em quatro tipos: as áreas antrópicas não agrícolas, as áreas antrópicas agropecuárias, as áreas de vegetação e os corpos d`água. Dentro das áreas antrópicas não agrícolas identificaram-se as áreas urbanizadas, que correspondem a regiões edificadas, integradas por um sistema viário, com propósitos residenciais, comerciais ou industriais (IBGE, 2013). Nesta pesquisa julgou-se adequado mapear duas categorias de áreas urbanizadas: as áreas de urbanização consolidada, na qual a malha urbana já está estabelecida com poucos ou nenhum lote não edificado, e as áreas de expansão urbana, que possuem a totalidade ou a maioria dos loteamentos ainda não edificados. Além da área urbana, foi criada a classe chácaras para identificar propriedades com mistura de áreas edificadas e áreas verdes, correspondentes a hortas, pomares, espaços de lazer, dentre outras finalidades (BERNADELLI, 2019).

As construções identificadas fora da área urbana foram classificadas como infraestrutura rural e correspondem a indústrias em meio a zona rural. O sistema ferroviário foi enquadrado na classe ferrovias; o sistema viário foi dividido entre as classes estradas pavimentadas e estradas rurais, não pavimentadas. Vale destacar que não foram mapeadas as vias de circulação

identificadas no interior das áreas urbanizadas ou culturas agrícolas que contam com vias para o deslocamento do maquinário, devido ao entendimento de que estes tipos de uso da terra (urbano, cana de açúcar, silvicultura, dentre outros) já incluem tal infraestrutura. As Áreas de Mineração correspondem às cavas de mineração ou áreas de empréstimo, caracterizadas pela rocha exposta (IBGE, 2013).

Dentre as áreas antrópicas agropecuárias, adotou-se a classe cana de açúcar que corresponde às áreas destinadas a este cultivo, independente da fase de plantio, incluindo, portanto, áreas com a cana desenvolvida, assim como áreas de solo exposto devido ao período de entressafra. A classe cultivo perene indica áreas destinadas às culturas que não necessitam de remoção para o replantio (IBGE, 2013). Alguns exemplos identificados na área são culturas de laranja e café, caracterizadas pelo porte arbóreo, organização em linhas e espaçamento constante dos indivíduos (CERON; DINIZ, 1966). A classe cultivo temporário, por sua vez, corresponde àquelas culturas que preveem a remoção dos indivíduos para o replantio, como as culturas de milho e arroz, por exemplo. A silvicultura corresponde às áreas destinadas ao cultivo de eucalipto e se distingue das demais culturas perenes pela tonalidade mais escura e o maior porte da vegetação.

O IBGE (2013) propõe uma classe de pastagem, referindo-se às áreas cobertas por gramíneas destinadas ao pastoreio. No presente trabalho, esta categoria foi dividida em duas classes, devido a suas características específicas, baseando-se em outros trabalhos que relacionam uso da terra à erosão dos solos (ZANATTA, 2018; STEFANUTO, 2019). O pasto limpo corresponde às pastagens que apresentam textura de superfície lisa, indicando certo manejo dada a ausência total ou parcial de espécies arbóreas ou arbustivas. O pasto sujo, entretanto, refere-se às pastagens com textura mais rugosa devido a presença de espécies arbustivas ou arbóreas, demonstrando a ausência de medidas de manejo.

No grupo correspondente às áreas de vegetação, a classe vegetação florestal (IBGE, 2013) foi identificada em áreas com cobertura arbórea de diferentes espécies, acusada pela textura da cobertura na imagem. As áreas de vegetação herbácea correspondem às áreas ocupadas por espécies de porte arbustivo, frequentemente identificadas em áreas de pastagens abandonadas, indicando que estes terrenos são incapazes de sustentar o gado, ou em áreas úmidas, próximas a nascentes ou canais fluviais. Por fim, os corpos d'água, correspondentes aos lagos e represas identificadas na área (IBGE, 2013).

#### **4.4 Mapas das Áreas com Restrições Legais ao Uso e Ocupação (1972 e 2010)**

Os mapas das Áreas com Restrições Legais ao Uso e Ocupação (1972 e 2010) visam a identificação dos locais que, segundo leis federais e municipais, possuem restrições ao uso da terra, visando a proteção dos recursos naturais. Os mapeamentos dos dois cenários basearam-se principalmente no antigo Código Florestal (Lei 4.771/1965), vigente sobre o território mapeado durante os períodos de análise, mas que, mais recentemente, foi substituído pelo novo Código Florestal (Lei 12.651/2012). É importante destacar que as áreas protegidas representadas nos mapeamentos se mantiveram na legislação atual e, portanto, o mapeamento do cenário de 2010 é um documento útil atualmente para a identificação das áreas protegidas pelo novo Código Florestal. As diferenças mais importantes entre os documentos no contexto desta pesquisa é o fato de o novo Código Florestal acrescentar uma série de medidas que possibilitam a redução das áreas protegidas, especialmente as APPs, caso atendidas determinadas condições. Ressalta-se ainda que estas alterações são discutidas nos resultados conforme a pertinência.

Ao todo, quatro categorias de restrições quanto ao uso e ocupação da terra foram mapeadas. Primeiramente as Áreas de Preservação Permanente (APP) segundo a Lei 4.771/1965. Há também as áreas de declive entre 25° e 45° onde não é permitido a derrubada de florestas (BRASIL, 1965), para as quais utilizou-se a designação “áreas de manejo florestal sustentável”, conforme a denominação adotada para estes terrenos no novo Código Florestal (BRASIL, 2012). Mapeou-se também as áreas com restrições à urbanização (Lei Lehman: 6766/1979) e as terras de Utilidade Pública segundo a Lei Orgânica do Município (1990), as quais também foram classificadas como Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPAM), de acordo com o Plano Diretor Participativo de Botucatu (Lei Complementar 1224/2017).

Os distintos critérios legais que definem as áreas de proteção ambiental cartografadas, necessitaram de diferentes técnicas para que fossem mapeadas. Destaca-se ainda, que existem APPs associadas a faixas marginais de cursos d’água e entorno de nascentes, APPs de borda de tabuleiros ou chapadas e APPs associadas a declividade, as quais demandaram técnicas diferentes para seu mapeamento, apesar desses locais se enquadrarem na mesma categoria de proteção ambiental. Dessa forma, serão apresentadas as regulamentações que definem cada categoria de área de proteção ambiental, seguido pela descrição dos procedimentos técnicos que foram utilizados no mapeamento dessas áreas.

#### 4.4.1 APPs das faixas marginais de cursos d'água e entorno de nascentes

De acordo com o antigo Código Florestal (BRASIL, 1965):

Art. 2º Consideram-se de preservação permanente, pelo efeito desta Lei, as florestas e demais formas de vegetação natural situadas:

a) ao longo dos rios ou de qualquer curso d'água desde o seu nível mais alto em faixa marginal cuja largura mínima será: (Redação dada pela Lei nº 7.803 de 18.7.1989)

1 - de 30 (trinta) metros para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura; (Redação dada pela Lei nº 7.803 de 18.7.1989)

c) nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados "olhos d'água", qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 50 (cinquenta) metros de largura; (Redação dada pela Lei nº 7.803 de 18.7.1989)

É importante ressaltar que rios com largura superior a 10 metros terão faixas de APP mais largas, segundo outros itens da lei transcrita acima. Entretanto, segundo avaliação prévia das ortofotos da EMPLASA e de imagens do Google Earth, não foram identificados trechos de canais fluviais com largura superior a esta na área de estudos. É possível que existam pontos onde os canais superam esse valor, porém corresponderiam a exceções locais, com pouco impacto para a qualidade do mapeamento apresentado.

Para mapear essas áreas utilizaram-se as informações vetoriais dos canais fluviais e nascentes do município de Botucatu pertencentes à área de estudos. Em seguida, utilizou-se a ferramenta *Buffer* para a criação de uma faixa de dimensão constante no entorno dessas feições. No campo *Distance*, para os canais fluviais foi escolhido o valor de 30 metros e para as nascentes o valor de 50 metros, segundo os padrões da legislação.

#### 4.4.2 Faixas de Reverso

Estas áreas consistem em duas faixas de diferentes larguras a serem dimensionadas a partir da linha de ruptura do *front* da *cuesta* no sentido do reverso. O artigo 2º do antigo Código Florestal identifica a APP:

g) nas bordas dos tabuleiros ou chapadas, a partir da linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100 (cem) metros em projeções horizontais; (Redação dada pela Lei nº 7.803 de 18.7.1989)

Os dispositivos municipais, por sua vez, ampliam essa faixa de proteção ambiental para 250 metros, classificando-a como área de "Utilidade Pública" (Lei Orgânica do Município, 1990), a qual foi também regulamentada como Zona Especial de Proteção Ambiental (ZEPAM). Segundo a Lei Orgânica do Município (1990) e a Lei Complementar (1224/2017), respectivamente:

Art. 162 – O Município declarará de Utilidade Pública uma faixa de terras de 250 metros de frente da Cuesta de Botucatu, em direção ao reverso, visando sua recuperação, preservação e segurança”

Art 73° (...) “Fica estabelecida uma Zona Especial de Proteção Ambiental, passível de ser subdividida em diferentes perímetros e regulamentada em diferentes níveis de restrição, cobrindo todo o Front da Cuesta de Botucatu, assim como uma faixa de terras com largura variável, igual ou maior a 250 (duzentos e cinquenta) metros, a contar da linha de ruptura do front da Cuesta, em direção ao reverso, a ser regulamentada em lei específica, devidamente mapeada, visando à recuperação, preservação e segurança da Cuesta.

Dessa forma, este trabalho adotou a faixa de 250 metros, assim como a linha de ruptura do *front* da *cuesta*, mapeada por Lupinacci e Andrade (2018). Ainda, a linha de ruptura foi também utilizada para a identificação da faixa de APP de 100 metros. Segundo as técnicas utilizadas por Andrade e Lupinacci (2018), o mapeamento da faixa de reverso se dá a partir da criação de um *Buffer* da linha de ruptura do *front* da *cuesta*. Neste procedimento, no campo *Distance*, foi adotado o valor de 100 metros, segundo a demanda legal, e no campo *Side Type* selecionou-se a opção *RIGHT*, uma vez que a faixa desejada corresponde apenas ao lado do reverso.

#### 4.4.3 Restrições ao uso e ocupação da terra segundo a declividade

O antigo Código Florestal (BRASIL, 1965), juntamente com a Lei Lehman (BRASIL, 1979), consideram níveis de declividade do terreno para restringir práticas de uso e ocupação da terra. A partir destes documentos, foram mapeados os terrenos inseridos em 3 classes de restrição segundo sua declividade. A primeira corresponde a determinação da Lei Lehman, que em seu Artigo 3º não autoriza o parcelamento do solo para fins urbanos: “III - em terrenos com declividade igual ou superior a 30% (trinta por cento) [16,7°], salvo se atendidas exigências específicas das autoridades competentes”.

A segunda classe de declividade com restrições legais ao uso e ocupação da terra está presente no Artigo 2º do antigo Código Florestal (BRASIL, 1965) que identifica as APPs: “nas encostas ou partes destas, com declividade superior a 45°, equivalente a 100% na linha de maior declive” e no Artigo 10º do mesmo documento:

Art. 10º. Não é permitida a derrubada de florestas, situadas em áreas de inclinação entre 25 a 45 graus, só sendo nelas tolerada a extração de toros, quando em regime de utilização racional, que vise a rendimentos permanentes.

A partir destas normas, foi criado um documento cartográfico que identifica os terrenos de declividade entre 16,7° e 25°, entre 25° e 45° e acima de 45°. Vale ressaltar que os níveis de

declive nos documentos legais são abordados hora em porcentagem, hora em graus. Nesta pesquisa, optou-se pela utilização dos valores em graus, fazendo, portanto, a conversão quando necessário, visto que o uso da unidade de declividade em graus é mais adequado para a análise de terrenos de declives mais acentuados.

O mapeamento destes terrenos partiu da criação de um mapa de declividade da área de estudo, utilizando-se a ferramenta *Create TIN*, a partir do arquivo vetorial correspondente às curvas de nível. Em seguida, transformou-se o arquivo *TIN* (vetorial) para o formato *Raster* com o uso da ferramenta *TIN to Raster*. A partir do arquivo *Raster* criou-se a declividade automaticamente utilizando-se a ferramenta *Slope*. Nesse novo arquivo, as classes de declividade foram determinadas segundo os critérios da legislação: de 0 -| 16,7°; de 16,7° -| 25°; de 25° -| 45°;  $\geq 45^\circ$ .

Dessa forma, gerada a declividade em formato *Raster*, transformou-se o arquivo novamente para o formato vetorial, utilizando-se a ferramenta *Raster to Polygon*. Assim como no procedimento realizado com as classes de densidade de feições erosivas, o novo arquivo vetorial foi tratado para que pudesse representar as diferentes classes de declividade. Na opção *Properties*, no campo *Symbology*, a opção *Value* foi alterada para *gricode*, o que possibilitou classificar os polígonos segundo os valores da declividade. Em seguida, estes foram agrupados em quatro classes de declividade: de 0 -| 16,7°, correspondente às declividades que não dispõem de restrições legais quanto ao seu tipo de uso e ocupação; de 16,7° -| 25° correspondente as áreas com restrições à urbanização; de 25° -| 45°, correspondentes às áreas de “manejo florestal sustentável”; igual ou superior a 45°, correspondentes às APPs.

Vale salientar que para a representação cartográfica dos terrenos mapeados, foram utilizadas cores distintas para identificar as áreas protegidas segundo os diferentes critérios legais. Embora diversas áreas protegidas estejam classificadas como APPs, julga-se importante diferenciá-las segundo o critério utilizado para defini-las, buscando comparar a eficiência destes na proteção dos solos. Por fim, acrescenta-se que, sempre que houver sobreposição de áreas classificadas sob distintos níveis de restrição, adota-se a categoria mais restritiva.

#### **4.5 Análise das Relações Espaciais**

A partir dos mapeamentos, os elementos cartografados foram sobrepostos a fim de identificar as relações espaciais entre as classes de densidade de feições erosivas de 1972 e 2010 com: as feições do relevo cuestasiforme, o embasamento litológico, os solos, o uso da terra e as

áreas com restrições legais ao uso e ocupação. Ressalta-se que os dois cenários de densidade de feições erosivas lineares foram sobrepostos aos elementos físicos da área estudada. Já no caso do uso da terra e áreas protegidas, a sobreposição foi feita apenas com os cenários dos mesmos anos. Ainda, foi calculada a sobreposição entre as áreas protegidas e os tipos de uso da terra buscando-se quantificar as áreas de conflito ambiental nos dois cenários.

Para se calcular as áreas de sobreposição entre duas variáveis foi utilizada a ferramenta *Intersect*. Na interface da ferramenta foram selecionadas as duas camadas vetoriais que se desejava calcular a sobreposição e, como resultado do processamento, gerou-se um novo arquivo vetorial contendo apenas as áreas de sobreposição entre as duas variáveis escolhidas inicialmente. Em seguida, a soma das áreas dos polígonos que compõe este novo arquivo foi calculada na tabela de atributos em uma nova coluna intitulada “Área”, por meio da opção *Calculate Geometry*. Com isso obteve-se o valor da área de sobreposição entre as duas variáveis escolhidas inicialmente. Dessa forma, este procedimento foi repetido para calcular a área de sobreposição entre todas as variáveis que se desejava analisar. Os dados de sobreposição entre os elementos mapeados foram organizados no programa *Excel*, que possibilitou a criação de tabelas e gráficos que representam as sobreposições espaciais estabelecidas entre os elementos analisados.

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa serão apresentados a seguir e estão divididos em 3 subcapítulos. Primeiro, o subcapítulo “5.1 A densidade de feições erosivas lineares e sua relação com o relevo cuestiforme, solos e litologia” apresenta a análise da relação da densidade de feições erosivas lineares com as variáveis físicas da área de estudo, buscando compreender como estas condicionam a ocorrência das feições erosivas lineares. Em seguida, no subcapítulo “5.2 A densidade de Feições Erosivas Lineares e sua relação com as transformações no Uso da Terra” destaca a análise de como as mudanças no uso da terra entre 1972 e 2010 alteraram a ocorrência e disposição das feições erosivas, buscando identificar os tipos de uso da terra mais propensos ao desenvolvimento destas feições. Por fim, no subcapítulo “5.3 Relação das áreas protegidas pela legislação ambiental com as classes de densidade de feições erosivas lineares e o uso da terra” será analisado se os setores com restrições legais ao uso da terra estão em conformidade com os tipos de uso determinados pela legislação e se as feições erosivas lineares estão ou não inseridas nas áreas protegidas.

### 5.1 A densidade de feições erosivas lineares e sua relação com o relevo cuestiforme, solos e litologia

Para compreender como o relevo cuestiforme influencia na dinâmica erosiva, inicialmente analisou-se em detalhe o mapa das Feições Morfológicas da Cuesta em Botucatu (Figura 9). Esta análise possibilitou, em seguida, avaliar como a morfodinâmica deste relevo no município, assim como a litologia e os solos, influenciam na dinâmica erosiva.

A posição do *front* cuestiforme em Botucatu já foi identificada no trabalho de Lupinacci e Andrade (2018), entretanto, o que pode ser acrescentado nesse caso é a relação do seu traçado com os lineamentos mapeados por São Paulo (1984), representados na Figura 5. No setor oeste e norte da área de estudos, nas bacias do rio Araquá e do córrego Lavapés, percebe-se uma orientação do *front* no sentido oeste-leste, interrompido por reentrâncias no córrego Findo e córrego Lavapés, as quais estão associadas a lineamentos, com especial destaque à reentrância do córrego Lavapés, que caracteriza um recuo acentuado do *front* (Figura 10). Tais constatações corroboram com as bibliografias que relatam a influência morfotectônica no desenvolvimento do relevo de *cuestas* na região de Itirapina e Ipeúna (SOUZA; ANDRADE; LUPINACCI, 2020), Analândia (STEFANUTO; LUPINACCI, 2016) e Corumbataí (AGUILAR; CUNHA, 2015).

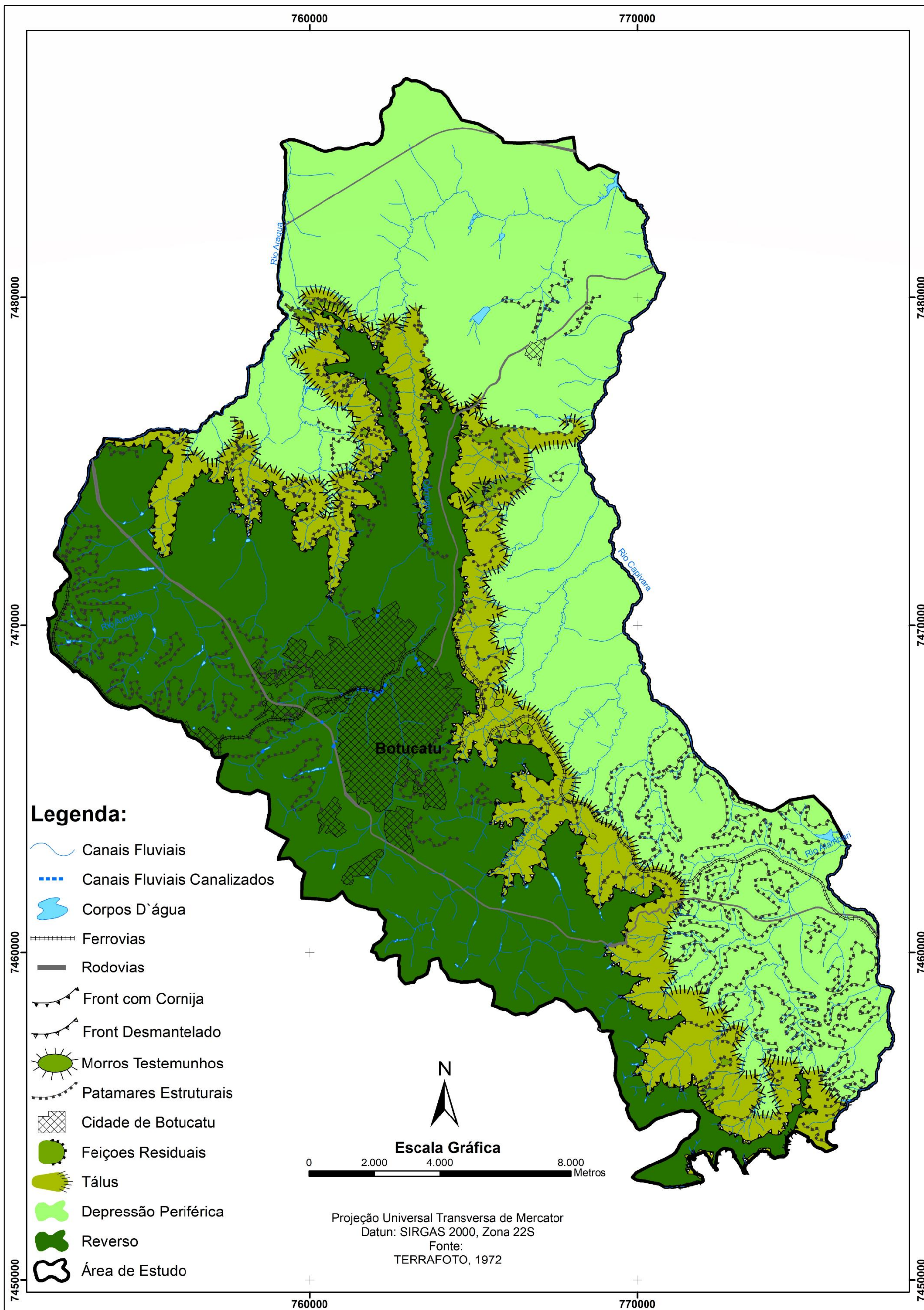
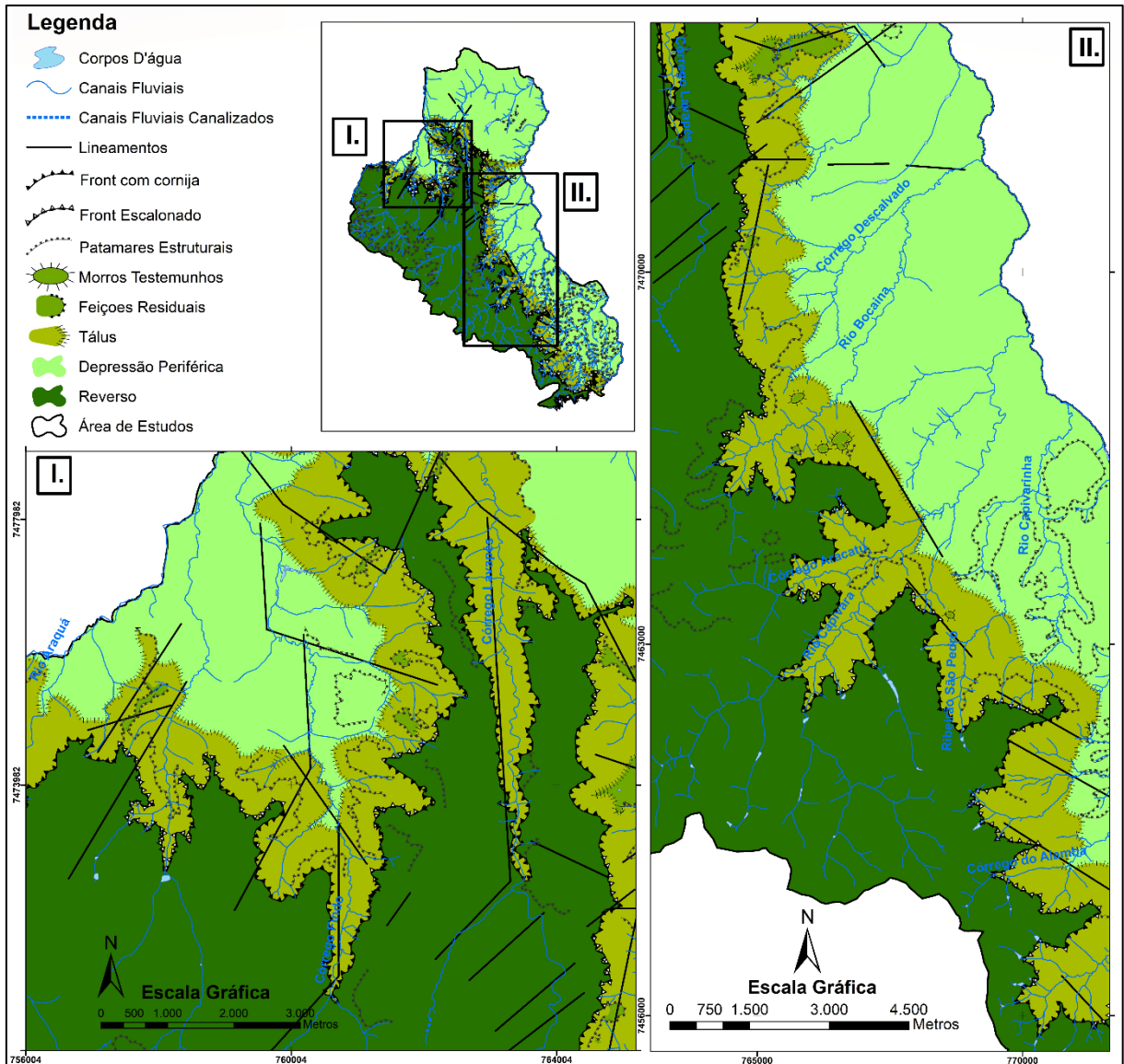


Figura 9: Mapa das Feições Morfológicas da Cuesta em Botucatu

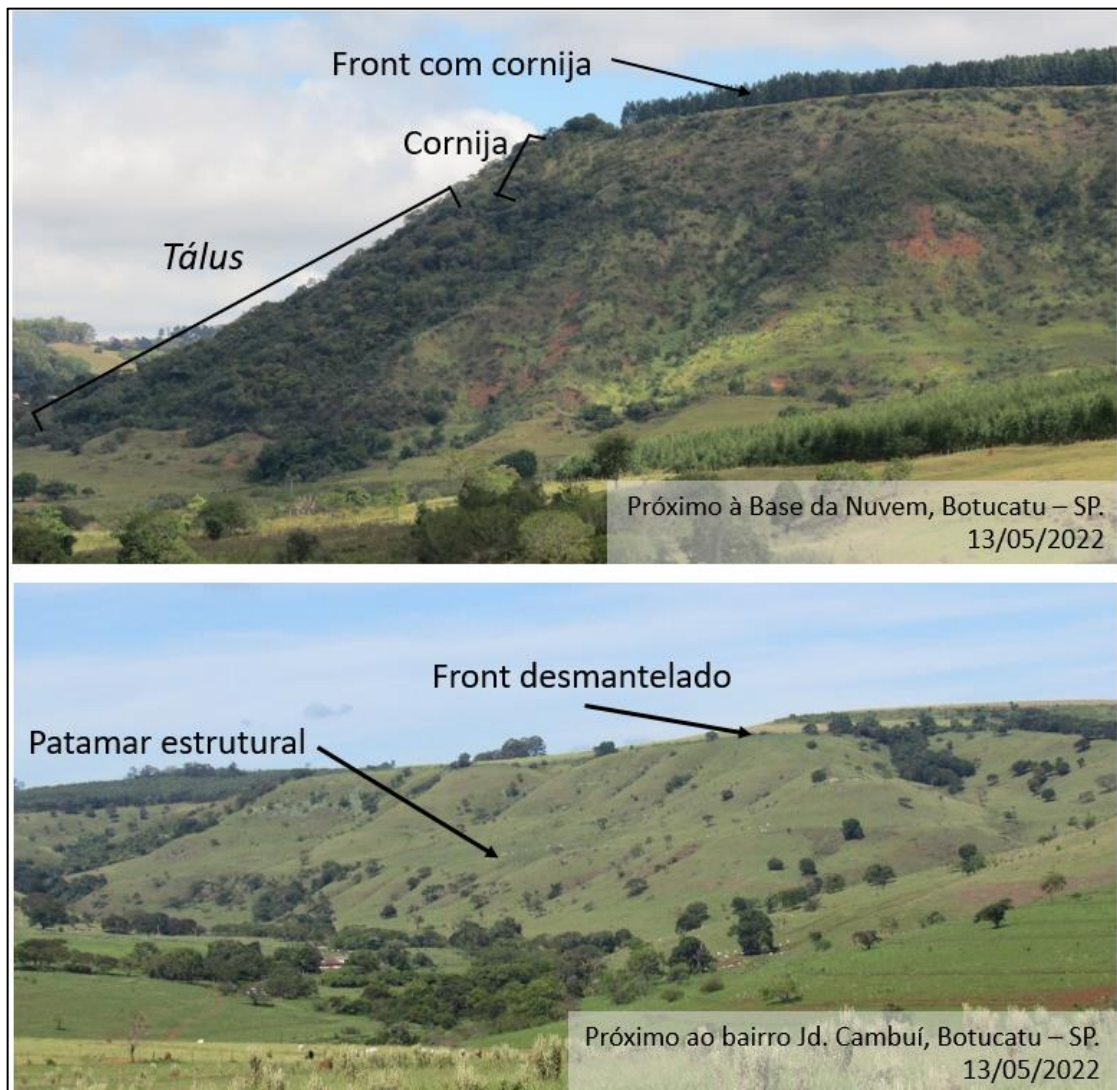


**Figura 10:** Relação da posição do front associado aos lineamentos  
**Fonte:** São Paulo (1984)

Nas bacias do rio Capivara e Alambari, por sua vez, o traçado do *front* é orientado preferencialmente no sentido nor-noroeste-sul-sudeste, paralelo à orientação de lineamentos, interrompido por algumas reentrâncias, especialmente nos rios Bocaina e Capivara (Figura 10). Apesar destas reentrâncias não estarem associadas aos lineamentos mapeados por São Paulo (1984), é possível que este fator esteja relacionado à escala mais generalizada desta fonte de dados e não necessariamente a não ocorrência de feições lineares neste setor. Com relação aos morros testemunhos, que são frequentes no relevo cuestasiforme na bacia do Corumbataí e por vezes se encontram isolados do *front* por canais fluviais associados a lineamentos (AGUILAR; CUNHA, 2015; STEFANUTO; LUPINACCI, 2016; SOUZA; ANDRADE; LUPINACCI, 2020), no caso de Botucatu, a Figura 10 indica os 4 morros testemunhos, de pequenas dimensões, próximos ao *front*, dos quais apenas um desses é associado a um lineamento (SÃO

PAULO, 1984). Dessa forma, reconhece-se a influência dos fatores morfoestruturais no desenvolvimento do relevo cuestasiforme em Botucatu, entretanto salienta-se a necessidade de estudos mais aprofundados a fim de compreender em detalhe esta morfodinâmica.

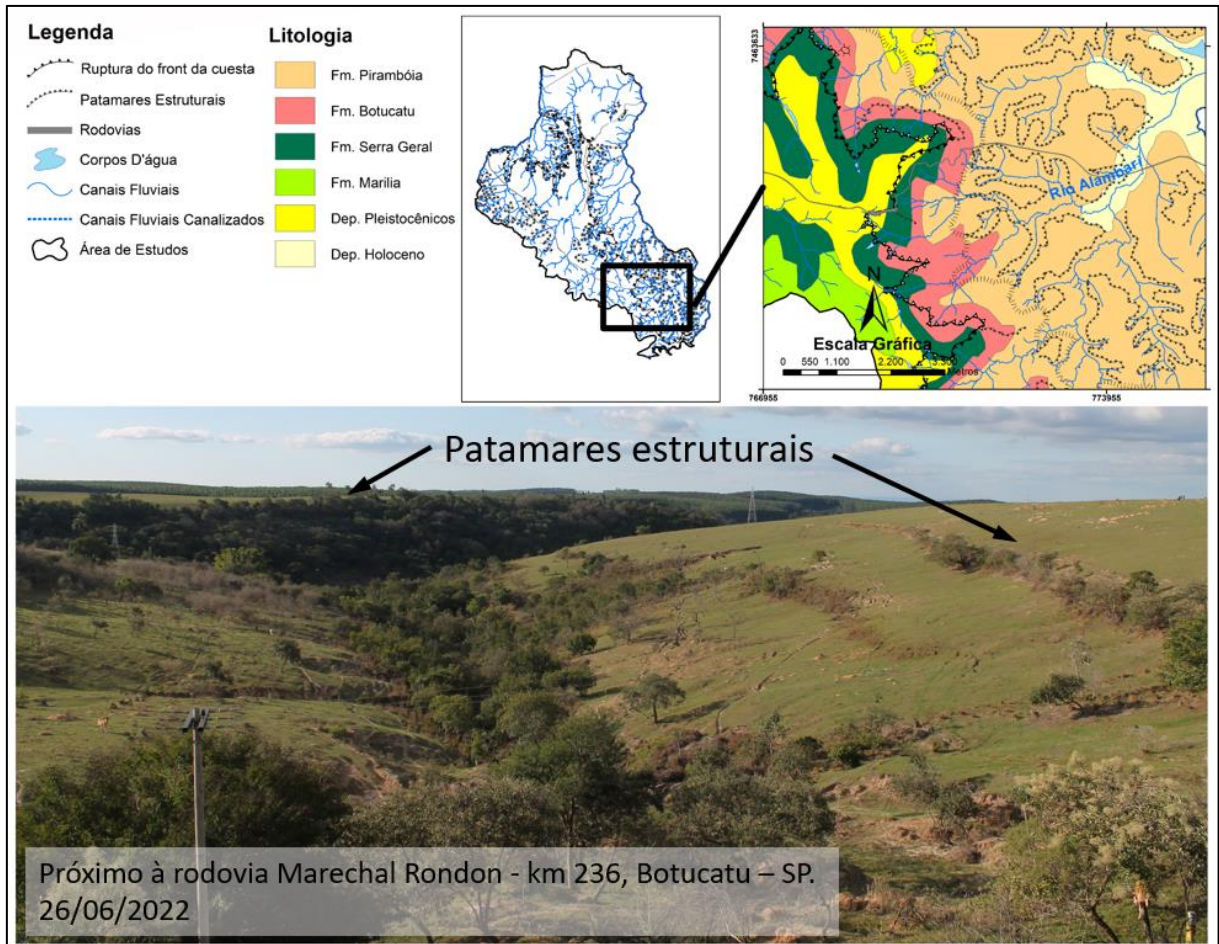
Com relação à morfologia do *front*, a Figura 11 ilustra a diferença entre setores de *front* com cornija, que se caracterizam pela abrupta ruptura do relevo, e locais onde o *front* é desmantelado, marcado por uma transição menos abrupta. Nesse sentido, o mapeamento permitiu notar que, em diversos locais marcados por um *front* desmantelado, havia a presença de patamares estruturais próximos. Mesmo que esta relação não se aplique para toda a área analisada, entende-se que os patamares estruturais identificados sob o *front* acarretam em um relevo escalonado, dividido em degraus, levando à quebra na energia dos processos de dissecação, dando origem a formas mais suavizadas (Figura 11).



**Figura 11:** Características morfológicas do front da cuesta em Botucatu  
**Fonte:** os autores

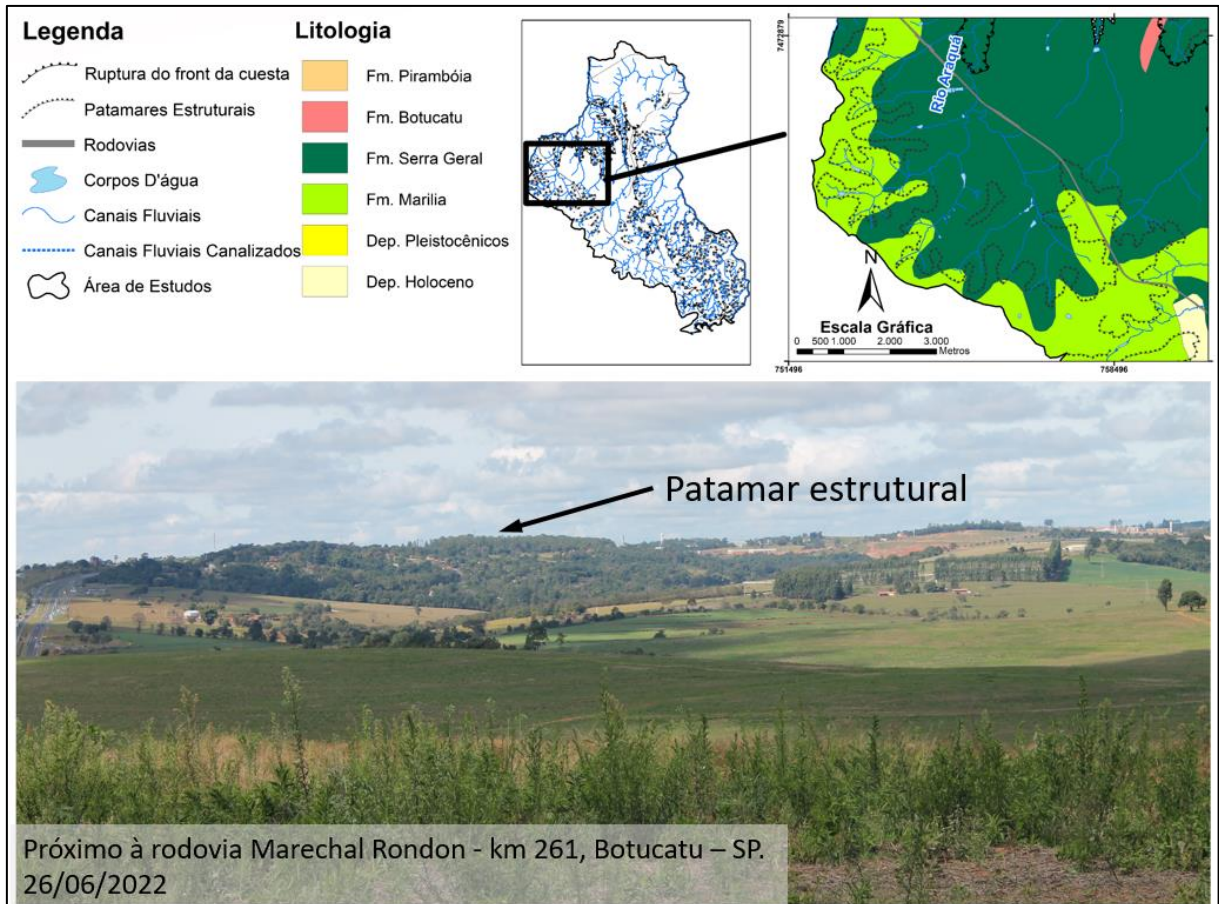
Os patamares estruturais identificados sob o *front* estão associados aos contatos litológicos dos arenitos da Formação Botucatu com os arenitos silicificados e os múltiplos derrames basálticos que caracterizam a Formação Serra Geral (IPT, 1981b; HARTMANN, *et al*, 2014). Cabe acrescentar, inclusive, que a grande variação interna desta formação levou a sua classificação como Grupo Serra Geral mais recentemente (HARTMANN, *et al*, 2014). Como consequência desta dinâmica, o que se verifica em Botucatu é a ocorrência de uma elevada quantidade de patamares estruturais sob o *front*, os quais sustentam, em alguns casos, feições residuais. Além disso, outro elemento importante do *front* cuestiforme mapeado é o *tálus*, rampas de colúvio que acompanham a linha do *front*, e possuem um limite transicional, pouco definido na base e no setor superior (Figura 11). Estes depósitos são eventualmente interrompidos por feições residuais, sustentadas por patamares estruturais com extensão suficiente para criar degraus intermediários no *front*, que não estão cobertos por depósitos coluvionares, encontrando-se, portanto, em processo de dissecação.

Este escalonamento do relevo em razão da presença de patamares estruturais não se restringe apenas ao *front* da *cuesta*. Na área analisada, foram identificados patamares estruturais tanto na Depressão Periférica como no reverso *cuestiforme*, demonstrando que o relevo de *cuestas* não configura, necessariamente, um amplo degrau topográfico bem marcado, mas, por vezes, uma sucessão de degraus menores. Entretanto, é preciso ressaltar que os patamares estruturais identificados nesta pesquisa também se caracterizam por uma elevada heterogeneidade, associada, principalmente, ao embasamento litológico. Na Depressão Periférica chama atenção o setor sul da área de estudo, principalmente na bacia do rio Alambari, onde verificou-se a ampla ocorrência de patamares estruturais profundos sobre o embasamento da Formação Pirambóia (Figura 12). Estes patamares estruturais provavelmente estão associados às diferenças na resistência das fácies da própria Formação Pirambóia, marcada pela heterogeneidade dos processos deposicionais, fluviais e eólicos, que a formaram (CORTÊS; PERINOTTO, 2015).



**Figura 12:** Patamares estruturais na Depressão Periférica sobre o embasamento da Formação Pirambóia  
**Fonte:** São Paulo, 1984; os autores

Já no caso do reverso, nas cabeceiras das bacias do rio Araquá e do córrego Lavapés, na porção oeste da área de estudos, identificaram patamares estruturais associados ao contato da Formação Marília com a Formação Serra Geral (Figura 13). Quando estes patamares estruturais são sobrepostos aos dados litológicos, nota-se que existe uma proximidade entre os patamares estruturais e o contato entre a Formação Marília e a Formação Serra Geral, cuja discordância deve-se, provavelmente, à escala de menor detalhe do mapeamento litológico. Essa condição, entretanto, não é identificada em todos os setores de contato entre estas formações, o que provavelmente se explica pelas variações locais nas características da própria Formação Marília (IPT, 1981b).



**Figura 13:** Patamares estruturais no reverso cuestiforme, nos contatos entre as formações Marília e Serra Geral  
**Fonte:** São Paulo, 1984; os autores

Dessa forma, reconhecidas as características morfológicas da *cuesta* em Botucatu, utilizaram-se os mapas de Densidade de Feições Erosivas Lineares de 1972 e 2010 (Figuras 14 e 15), a fim de identificar quais setores do relevo cuestiforme são mais propensos ao desenvolvimento de feições erosivas lineares, buscando compreender as relações que levam a esse desenvolvimento. Vale destacar ainda, que a densidade de feições erosivas apresenta distribuição distinta nos dois cenários analisados, fenômeno que se deve principalmente às mudanças nos padrões de uso da terra neste intervalo de 38 anos. Entretanto, as características físicas da área de estudos, como as formas do relevo cuestiforme, as classes de solos e a litologia, não se alteram significativamente neste período. Por isso a relação destas variáveis com a densidade de feições erosivas lineares será analisada de forma complementar, buscando identificar as semelhanças entre os cenários, trazendo resultados mais consistentes acerca da influência das variáveis físicas sobre a dinâmica erosiva. Posteriormente, as alterações na densidade de feições erosivas lineares serão analisadas à luz das transformações no uso da terra a fim de compreender esta relação.

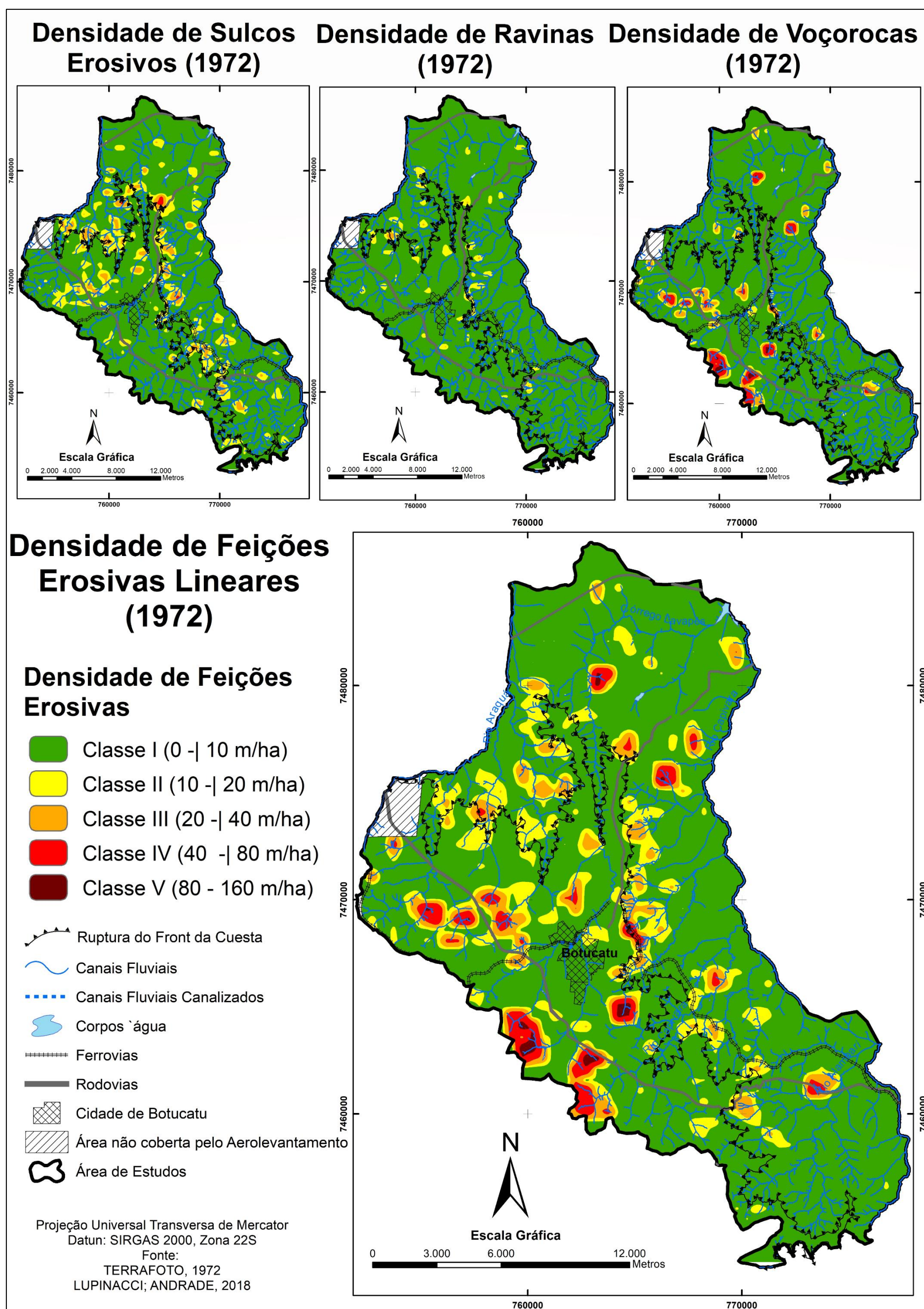


Figura 14: Mapa da Densidade de Feições Erosivas Lineares (1972)

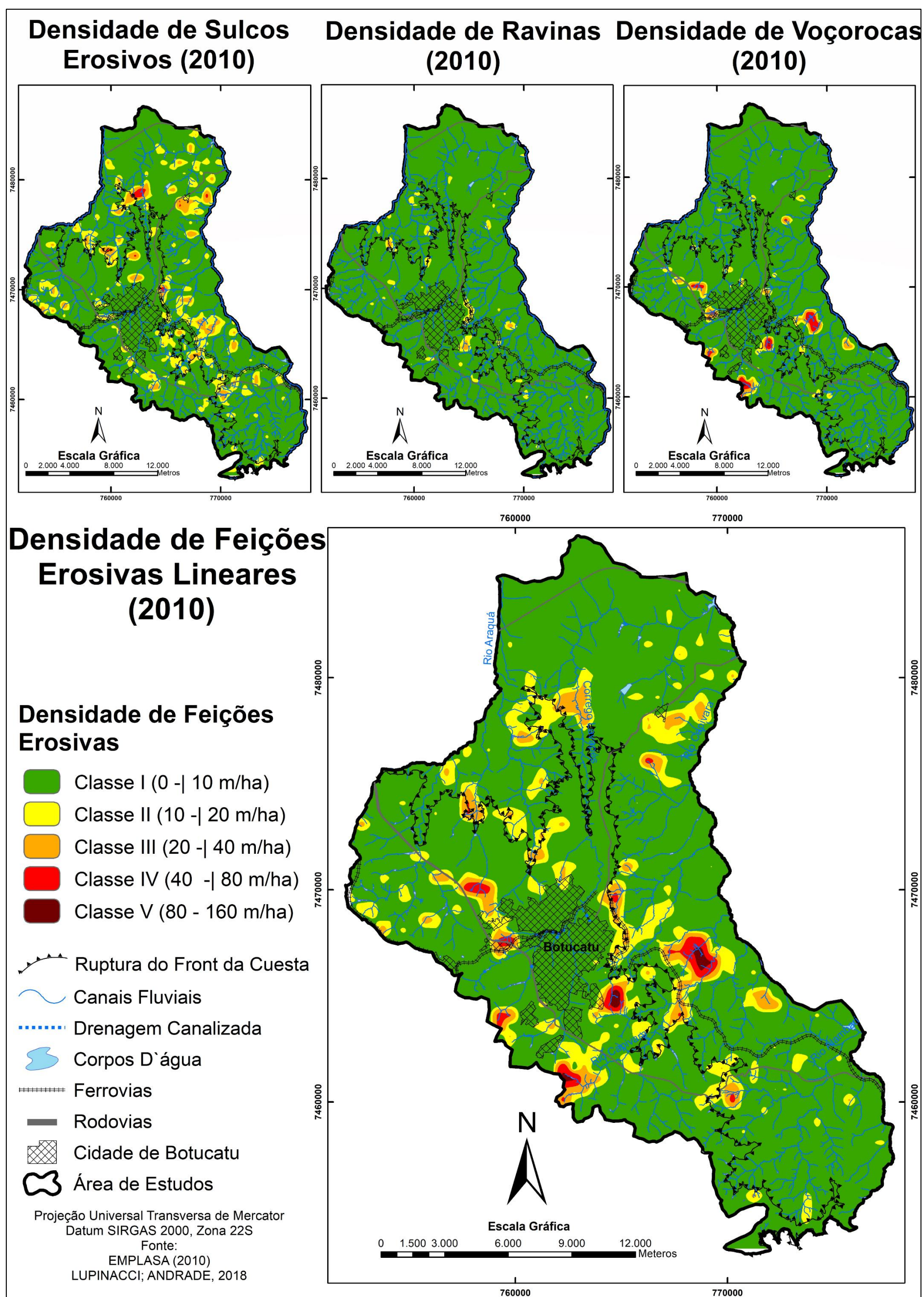


Figura 15: Mapa da Densidade de Feições Erosivas Lineares (2010)

A densidade de sulcos erosivos nos cenários de 1972 e 2010 mostra uma ampla distribuição das classes II, entre 10 e 20m/ha, e III, entre 20 e 40m/ha, pela área de estudos, enquanto a Classe IV, entre 40 e 80m/ha, é identificada apenas em alguns pontos específicos. Nota-se também que em 1972 as classes mais altas de densidade de sulcos erosivos se concentravam mais próximas ao *front* cuestasiforme, enquanto em 2010, nota-se uma maior distribuição destas pela Depressão Periférica e reverso (Figuras 14 e 15). Com relação às ravinas, os dois cenários mapeados mostram um predomínio da Classe I, com poucas áreas identificadas nas classes II, e eventualmente III (Figuras 14 e 15). Os setores mais atingidos pelos ravinamentos, em ambos os anos, também se concentram próximos ao *front*, revelando uma relação deste tipo de feição com os setores de maior declive.

Entretanto, no caso dos voçorocamentos, notou-se uma tendência inversa na distribuição destas feições em comparação aos sulcos e ravinas. Enquanto as últimas tendem a se concentrar nas proximidades do *front*, a densidade de voçorocas intensifica-se no reverso e na Depressão Periférica, onde grandes voçorocamentos resultam nas Classes IV e V (Figuras 14 e 15). No *front* cuestasiforme identificam-se majoritariamente pequenos voçorocamentos, que levam estes setores a atingirem as Classes II, III, e, eventualmente, IV. Essa distribuição varia ainda nos distintos cenários analisados, especialmente nas classes mais altas, revelando nítida diminuição das áreas atingidas por voçorocamentos entre 1972 e 2010.

Essa avaliação também permite constatar que as diferentes classes de densidade de feições lineares refletem características distintas da dinâmica erosiva. Enquanto as classes II e III estão mais associadas a setores que concentram sulcos, ravinas e voçorocas de pequenas dimensões, as classes IV e V, indicam setores predominantemente atingidos por extensos voçorocamentos. Vale acrescentar ainda, no que diz respeito à relação entre os sulcos, ravinas e voçorocas, que apesar da constatação dos grandes voçorocamentos estarem concentrados preferencialmente no reverso e na Depressão Periférica, enquanto os sulcos e ravinas encontram-se, predominantemente, próximos ao *front*, notou-se que os pontos de maior densidade de um tipo de feição frequentemente estão assinalados nos outros mapeamentos. Esta condição revela uma relação de vizinhança entre os sulcos, ravinas e voçorocas, assim como relatado por Guerra (1999), demonstrando que, apesar das diferenças, as feições são condicionadas por fatores semelhantes. Além disso, devido ao potencial de sulcos e ravinas evoluírem para formas mais desenvolvidas, é possível que, sem os devidos cuidados, áreas afetadas por sulcos erosivos evoluam para ravinamentos e, posteriormente, voçorocamentos.

Com relação à densidade de feições erosivas lineares, no cenário de 1972 (Figura 14) observou-se a concentração das classes II e III próximas o *front*, as classes IV e V no reverso cuestiforme; na Depressão Periférica, uma tendência menos clara, com alguns pontos atingindo a Classe III, IV e, em um ponto específico, até a Classe V. Já no cenário de 2010 (Figura 15), é possível identificar uma distribuição semelhante, entretanto, com uma diminuição na intensidade das classes em diversos setores. Essa diminuição é nítida nas classes IV e V identificadas no reverso e nas manchas das classes II e III próximas ao *front*. Na Depressão Periférica, entretanto, esta tendência não se verifica, uma vez que as manchas com as mais altas classes de densidade de feições erosivas diminuem em alguns setores, mas aumentam em outros (Figuras 14 e 15).

Dada esta condição, a fim de identificar quais são os fatores que condicionam a ocorrência dos processos erosivos, as classes de densidade de feições lineares foram cruzadas com os compartimentos do relevo de *cuestas*, com o embasamento litológico e com as classes de solos. Tal procedimento possibilitou compreender como essas variáveis interferem na dinâmica erosiva localmente. Ressalta-se ainda que, apesar do relevo, a litologia e os solos serem elementos que estão conectados no espaço geográfico, optou-se por descrever a relação entre a dinâmica erosiva e estes fatores de forma separada a fim de tornar o texto mais claro e organizado, de modo a facilitar a compreensão dos leitores.

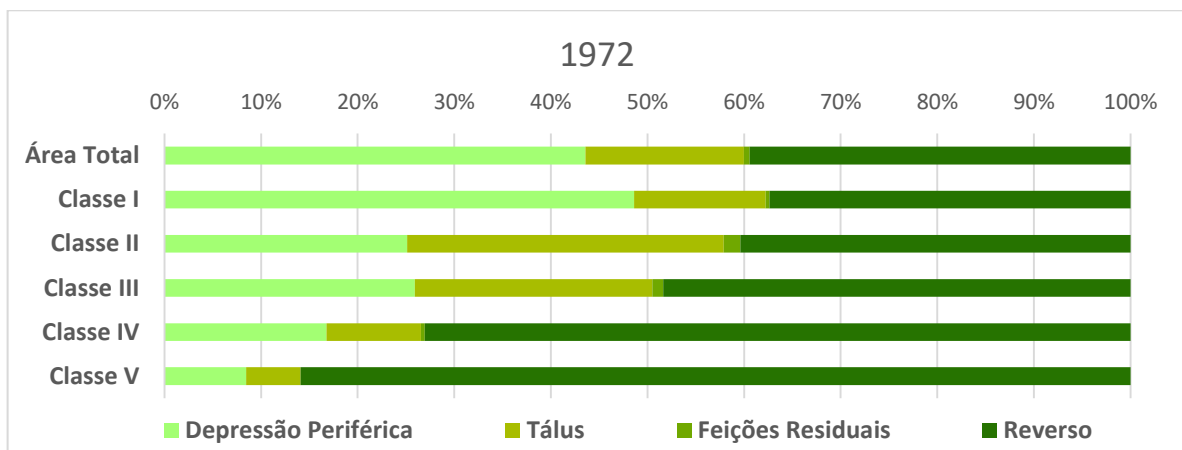
Cabe ponderar também que a escala dos mapas litológicos e de solos utilizados como base para compreender a relação destas variáveis com a dinâmica erosiva não possuem o mesmo nível de detalhe dos mapeamentos elaborados nesta pesquisa. Por esse motivo, o uso destes materiais acarreta em generalizações que impossibilitam identificar variações locais na distribuição das classes de solo e embasamento rochoso, as quais também influenciam na dinâmica erosiva, mas não estão indicadas pelos dados quantitativos. No entanto, avaliações qualitativas dos locais discutidos e dados de trabalhos de campo, aliados a informações acerca das características litológicas e dos solos na região, contidas na bibliografia, possibilitaram minimizar tais distorções.

No que diz respeito aos compartimentos do relevo cuestiforme, a Tabela 1 mostra que a sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas em 1972 indica que as mais altas classes se concentram no reverso, que sustenta 73,1% da Classe IV e 85,9% da Classe V (Tabela 1; Figura 16). Em 2010, entretanto, as classes IV e V possuem distribuição semelhante no reverso e na Depressão Periférica, uma vez que 54,1% da Classe IV encontra-se sobre o reverso,

enquanto 39,4% na Depressão Periférica; já a Classe V possui 48,7% de sua área sobre o reverso, enquanto 51,3% na Depressão Periférica (Tabela 1; Figura 17).

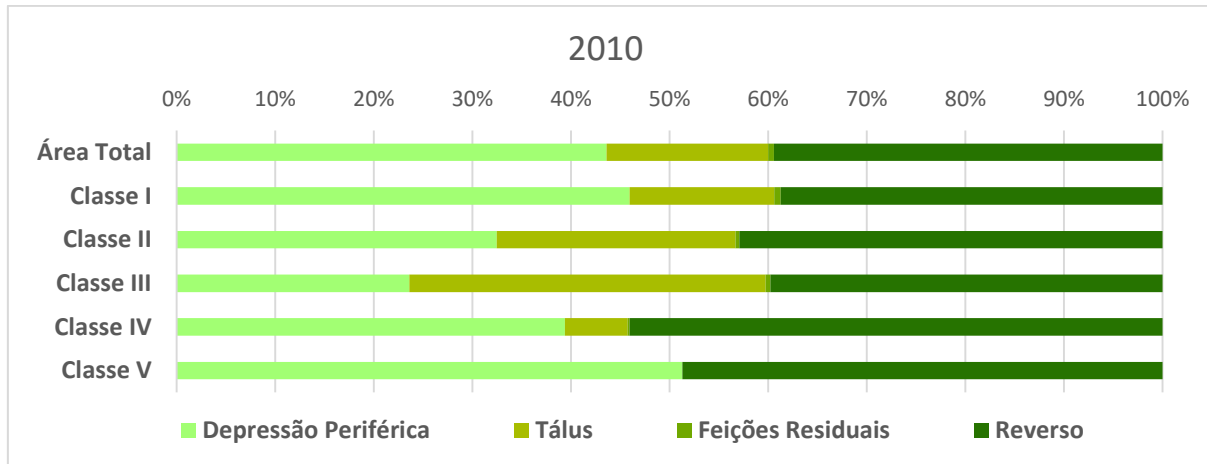
**Tabela 1:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas por compartimento do relevo cuestasiforme.

Compartimentos do relevo de cuestas	Área Total	Densidade de Feições Erosivas Lineares									
		Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
		1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Depressão Periférica	43,6%	48,6%	46,0%	25,1%	32,5%	25,9%	23,6%	16,8%	39,4%	8,5%	51,3%
Tálus	16,4%	13,6%	14,6%	32,8%	24,2%	24,6%	36,1%	9,8%	6,4%	5,6%	0,0%
Feições Residuais	0,6%	0,4%	0,7%	1,7%	0,4%	1,1%	0,5%	0,4%	0,2%	0,0%	0,0%
Reverso	39,4%	37,4%	38,7%	40,4%	42,9%	48,4%	39,8%	73,1%	54,1%	85,9%	48,7%



**Figura 16:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares por compartimento do relevo cuestasiforme em 1972

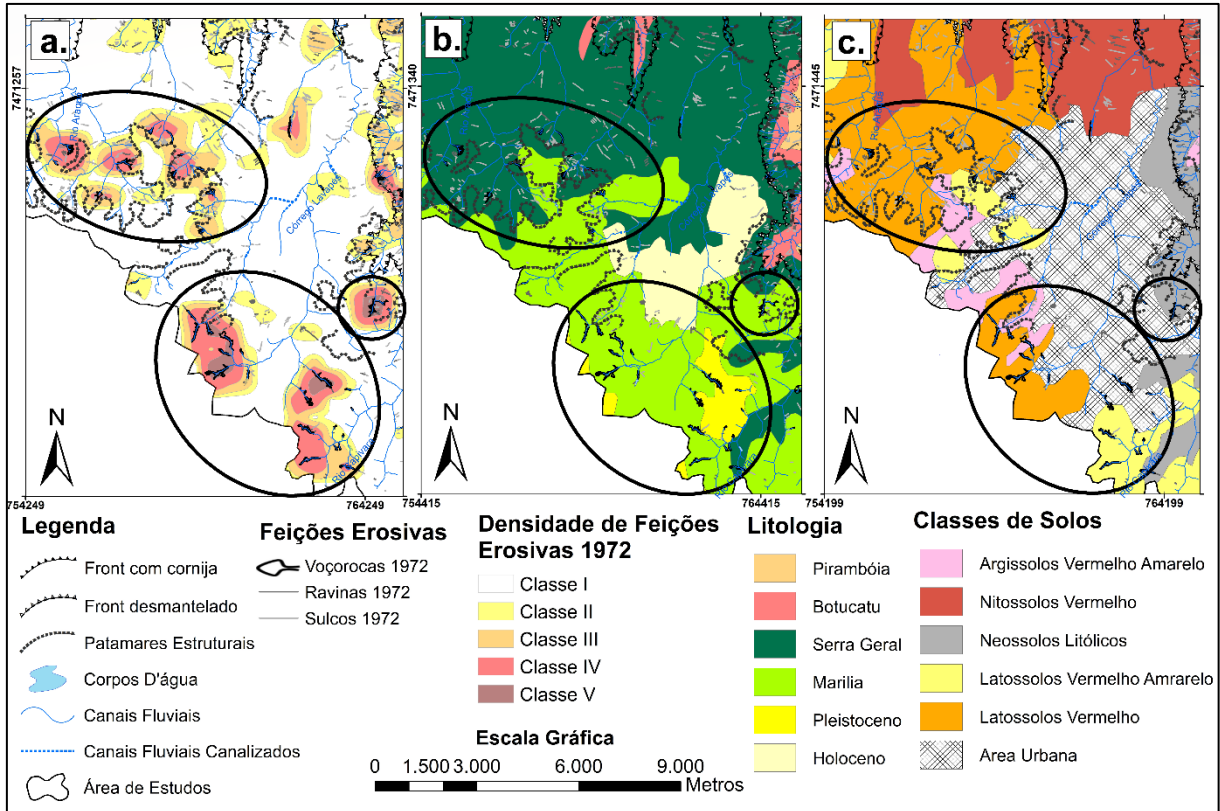
Essa mudança na disposição das mais altas classes de feições erosivas lineares provavelmente está associada a mudanças no padrão de uso da terra, que trouxeram como resultado tanto o aumento das feições erosivas na Depressão Periférica, como sua diminuição no reverso. Entretanto, cabe ressaltar que os setores do reverso cuestasiforme mais atingidos por feições erosivas em 1972 são os mesmos do cenário de 2010, porém em alguns casos identificados por classes mais brandas em razão da aplicação de medidas de contenção, estabilização, aterramentos e reflorestamentos destas erosões.



**Figura 17:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares por compartimento do relevo cuestasiforme em 2010

Nesse sentido, salienta-se a alta suscetibilidade do reverso cuestasiforme ao desenvolvimento de feições erosivas lineares em razão dos extensos voçorocamentos identificados nas cabeceiras das bacias do rio Araquá, córrego Lavapés e rio Capivara (Figura 18 a.). A este respeito, Daniel e Vieira (2015) ressaltam a tendência à concentração das voçorocas nas cabeceiras de drenagem a partir da revisão de diversos estudos em distintas regiões brasileiras. Em Botucatu, porém, nota-se que boa parte das manchas com altas classes de densidade de feições erosivas lineares no reverso acompanham o patamar estrutural referente ao contato entre a Formação Marília e a Formação Serra Geral (Figura 18 b.). Entretanto, ressalta-se também que outras manchas de densidade de feições erosivas lineares não estão associadas aos patamares estruturais, mas também se desenvolvem sobre o contato dos depósitos Pliocênico-Pleistocênico com a Formação Marília e Serra Geral (Figura 18 b.).

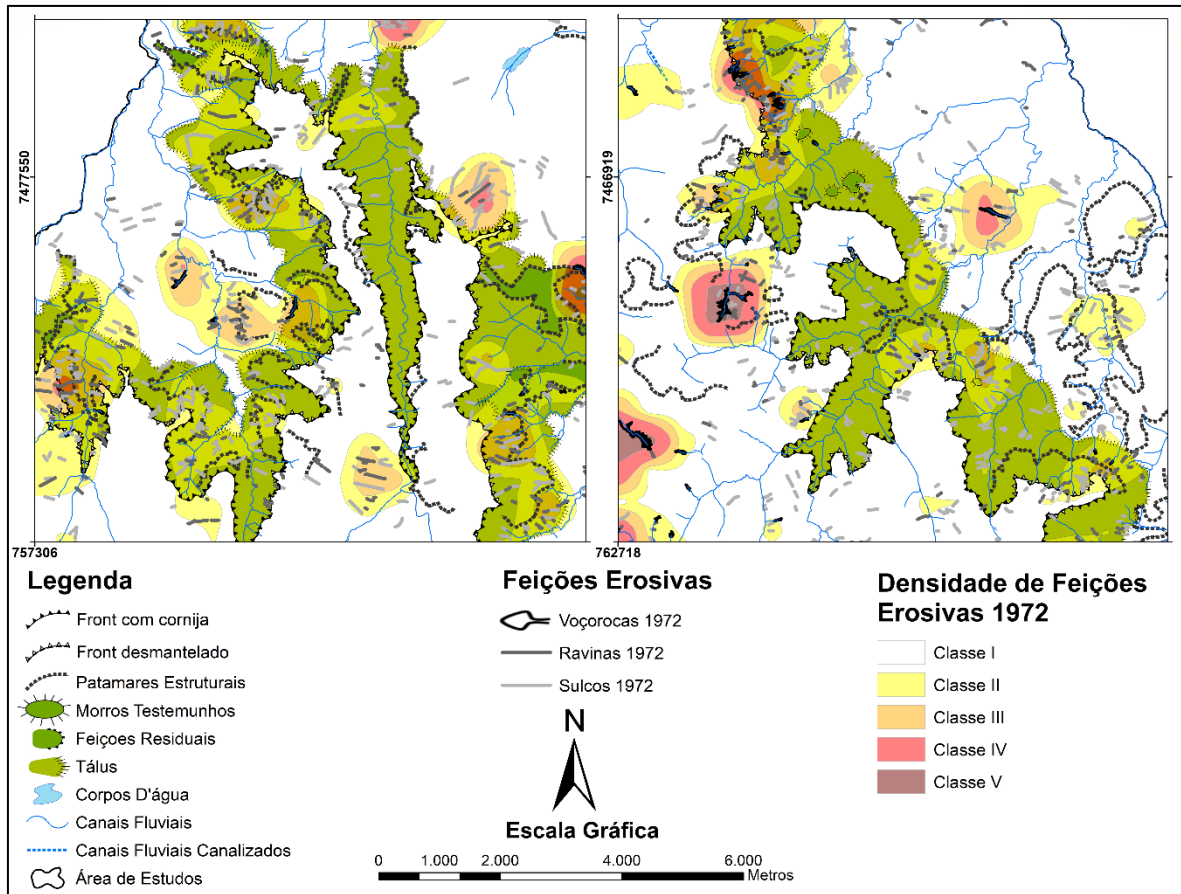
No caso do *tálus*, a sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas lineares revelou que este compartimento, que cobre 16,4% da área de estudos, concentra 32,8% da área da Classe II e 24,6% da Classe III no cenário de 1972, ao passo que estes valores atingem 24,2% da Classe II e 36,1% da Classe III no cenário de 2010 (Tabela 1, Figuras 16 e 17). Entretanto, quando se avalia a expressão das classes IV e V neste compartimento, nota-se a relação inversa, ou seja, estas classes se manifestam proporcionalmente menos sobre o *tálus*, dado que no cenário de 1972 9,8% da Classe IV e 5,6% da Classe V se estabeleciam nesse compartimento, enquanto em 2010, estes valores correspondem a, respectivamente, a 6,4% e 0% (Tabela 1, Figuras 16 e 17).



**Figura 18:** Feições erosivas, litologia e solos no reverso cuestiforme

**Fonte:** São Paulo, 1984; Rossi, 2017

Dessa forma, foi possível constatar que o *tálus* é mais propenso ao desenvolvimento de sulcos, ravinas e pequenas voçorocas (Figuras 19 e 20) que o reverso e a Depressão Periférica, onde os setores indicando a maiores classes de densidade de feições erosivas estão associados a grandes voçorocamentos (Figura 18 a). Essa dinâmica pode ser atribuída a uma combinação de diversos fatores associados ao relevo, litologia e solos desses terrenos. Primeiramente, o aumento da energia do escoamento superficial em decorrência do declive acentuado e do comprimento da vertente atribuem a este setor maior potencial para o desenvolvimento de processos erosivos lineares. Além disso, em razão da dinâmica do relevo cuestiforme, o *tálus*, que se caracteriza pelo acúmulo de depósitos coluvionares oriundos de processos geomorfológicos sobre o *front*, dá origem a uma cobertura mais recente, inconsolidada, pouco desenvolvida e, portanto, mais suscetível ao desenvolvimento de processos erosivos (DANIEL; VIEIRA, 2015; SHEEHAN; WARD, 2018).



**Figura 19:** Feições erosivas lineares e classes de densidade de feições erosivas sobre o tálus

Vale destacar ainda a complexidade das características do *tálus* nas Cuestas Paulistas, que podem interferir de múltiplas formas no desenvolvimento dos processos erosivos. Pinheiro e Queiroz Neto (2017), a partir de uma revisão da literatura acerca dos processos de formação destes depósitos, apontam a variedade de fatores que atuaram no seu desenvolvimento. De acordo com os autores, as mudanças climáticas de um ambiente mais seco para mais úmido ao longo do Quaternário acarretaram em alterações nos processos de dissecação do *front* e, conseqüentemente, de deposição e acúmulo dos materiais, além de intensificar os processos de intemperismo sobre as coberturas coluvionares. Ademais, o contato entre os arenitos Botucatu e os basaltos na região implicam em variações mineralógicas nas coberturas coluvionares e tipos de solos, agregando ainda mais complexidade ao entendimento e caracterização destas coberturas, as quais podem potencializar o desenvolvimento de feições erosivas lineares localmente.



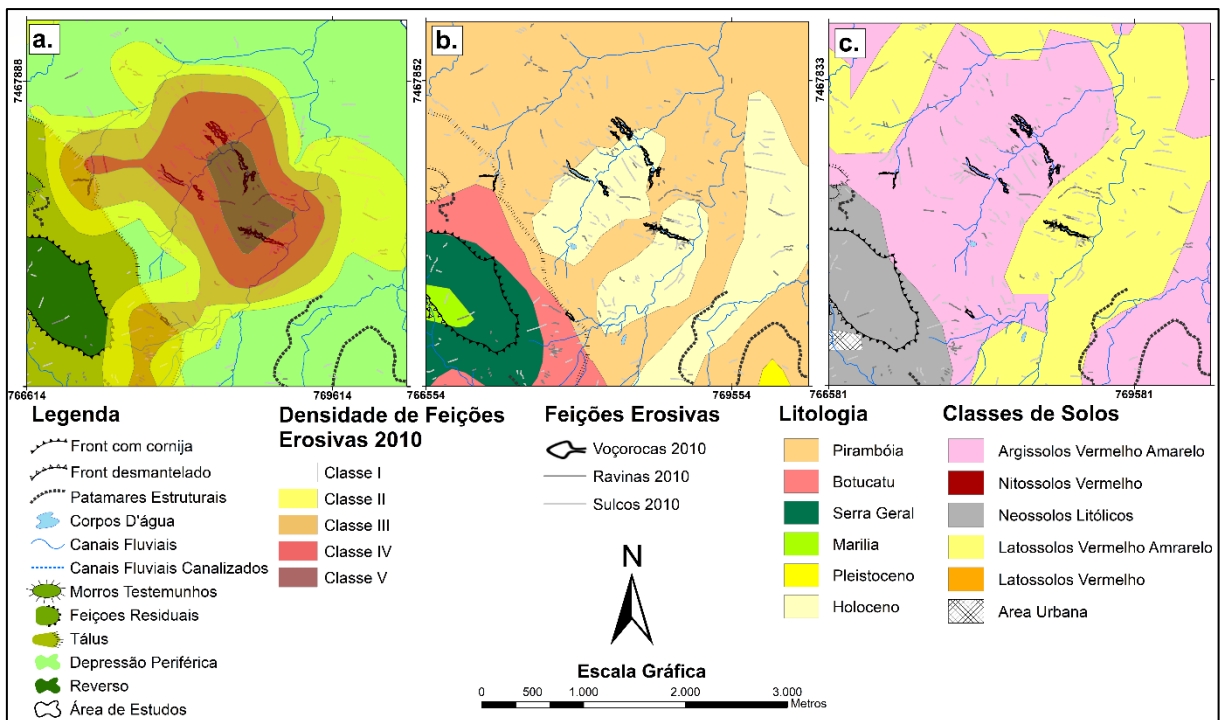
**Figura 20:** Feições erosivas no *front* cuestasiforme

**Fonte:** Os autores

Já na Depressão Periférica, a sobreposição com a densidade de feições erosivas mostra uma fraca relação com as classes mais altas no cenário de 1972, no qual o compartimento sustenta 16,8% dos terrenos inseridos na Classe IV e 8,5% da Classe V, as quais se concentram majoritariamente no reverso (Tabela 1; Figura 16). Entretanto, com a redução da densidade de feições erosivas no reverso no cenário de 2010 e o desenvolvimento de voçorocamentos na Depressão Periférica, este setor passou a abrigar 39,4% da Classe IV e 53,3% da Classe V (Tabela 1; Figura 17), caracterizando o único compartimento do relevo com aumento na concentração dos processos erosivos no período analisado. Ainda, quando se analisa a localização das maiores densidades de feições erosivas na Depressão Periférica, nota-se que o drástico aumento dos voçorocamentos em um setor (Figura 21 a) coincide com a redução na densidade de feições erosivas em outros pontos em razão da aplicação de medidas corretivas, como a estabilização, obliteração e reflorestamento.

Com relação aos locais onde se desenvolvem os processos erosivos na Depressão Periférica, é interessante destacar que a bacia do rio Alambari, marcada por uma grande quantidade de patamares estruturais, consiste na região menos acometida pelas feições lineares

(Figuras 12, 14 e 15), apontando para uma relação inversa daquela identificada no caso dos patamares estruturais no reverso e no *front*. Esta condição pode estar relacionada ao fato dos patamares estruturais deste setor se desenvolverem sobre uma mesma formação litológica, a Pirambóia, diferentemente dos patamares estruturais de outros setores que marcam contatos litológicos entre formações distintas. Ainda, a presença destes patamares estruturais indica a ocorrência de uma fácies mais resistente da Formação e, portanto, menos suscetível aos processos erosivos.



**Figura 21:** Feições erosivas na Depressão Periférica (a); litologia (b) e solos (c)

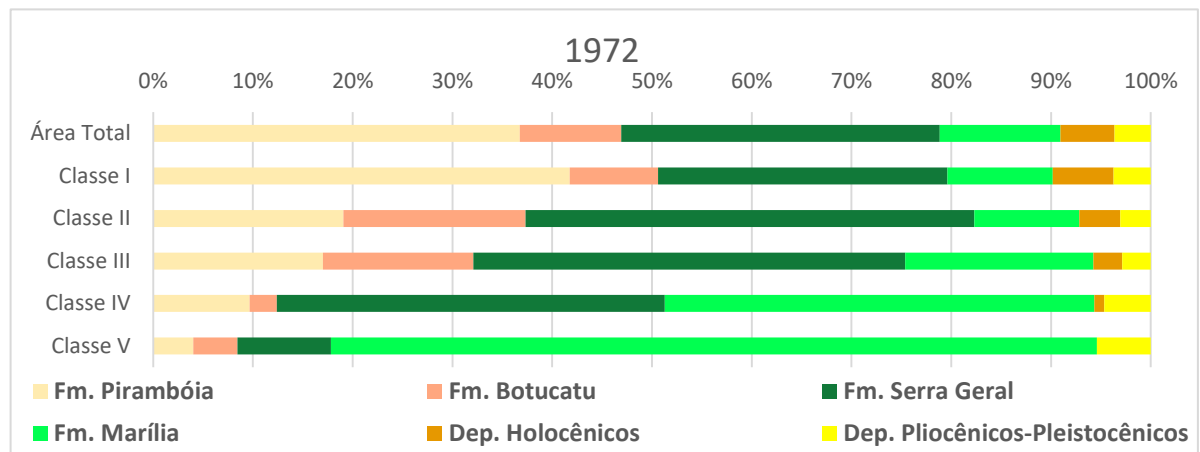
**Fonte:** São Paulo, 1984; Rossi, 2017

Dessa forma, reconhecida a relação dos compartimentos do relevo com os processos erosivos, buscou-se compreender a influência do embasamento litológico nesta dinâmica. No cenário de 1972, identificou-se uma forte relação da classe IV com a Formação Marília e Serra Geral, as quais sustentam respectivamente 43,1% e 38,9% da área inserida nesta classe (Tabela 2, Figura 22). Já na Classe V, a concentração sobre a Formação Marília é de 76,8% (Tabela 2, Figura 22). Cabe destacar ainda, que os depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos, que ocorrem em apenas 3,6% da área de estudos, ocupavam 4,7% da Classe IV e 5,6% da Classe V em 1972 (Tabela 2, Figura 22). Em 2010, pode-se verificar uma dinâmica semelhante, porém com aumento da proporção da Formação Pirambóia e Depósitos Holocênicos sob as classes IV e V em razão do aumento das feições erosivas na Depressão Periférica. Nesse cenário a Classe IV possui 35,9% de sua área sobre a Formação Marília e 19,4%, sobre a Formação Serra Geral e,

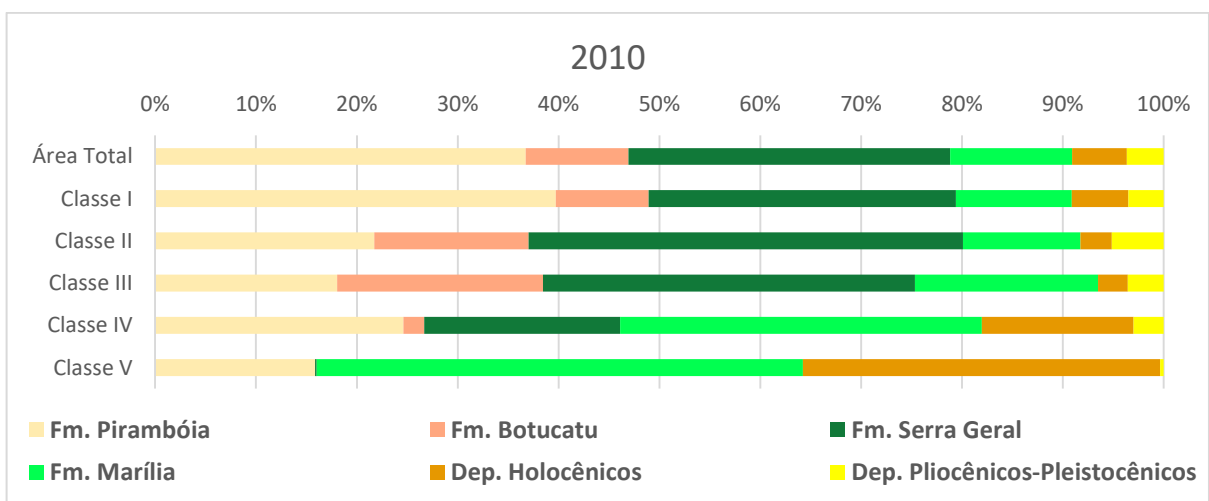
com relação à Classe V, a sobreposição com a Formação Marília é de 48,2% (Tabela 2, Figura 23).

**Tabela 2:** Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010

Litologia	Área Total	Densidade de Feições Erosivas Lineares									
		Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
		1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Fm. Pirambóia	36,7%	41,7%	39,7%	19,1%	21,7%	17,0%	18,1%	9,7%	24,6%	4,0%	15,9%
Fm. Botucatu	10,2%	8,9%	9,2%	18,3%	15,3%	15,1%	20,4%	2,8%	2,1%	4,4%	0,0%
Fm. Serra Geral	31,9%	29,0%	30,5%	45,0%	43,1%	43,3%	36,9%	38,9%	19,4%	9,4%	0,2%
Fm. Marília	12,1%	10,6%	11,5%	10,5%	11,6%	18,9%	18,1%	43,1%	35,9%	76,8%	48,2%
Dep. Holocênicos	5,4%	6,1%	5,6%	4,1%	3,1%	2,9%	3,0%	1,0%	15,0%	0,0%	35,4%
Dep. Pliocênicos-Pleistocênicos	3,6%	3,7%	3,5%	3,1%	5,1%	2,9%	3,6%	4,7%	3,0%	5,4%	0,3%



**Figura 22:** Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972



**Figura 23:** Embasamento litológico das classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010

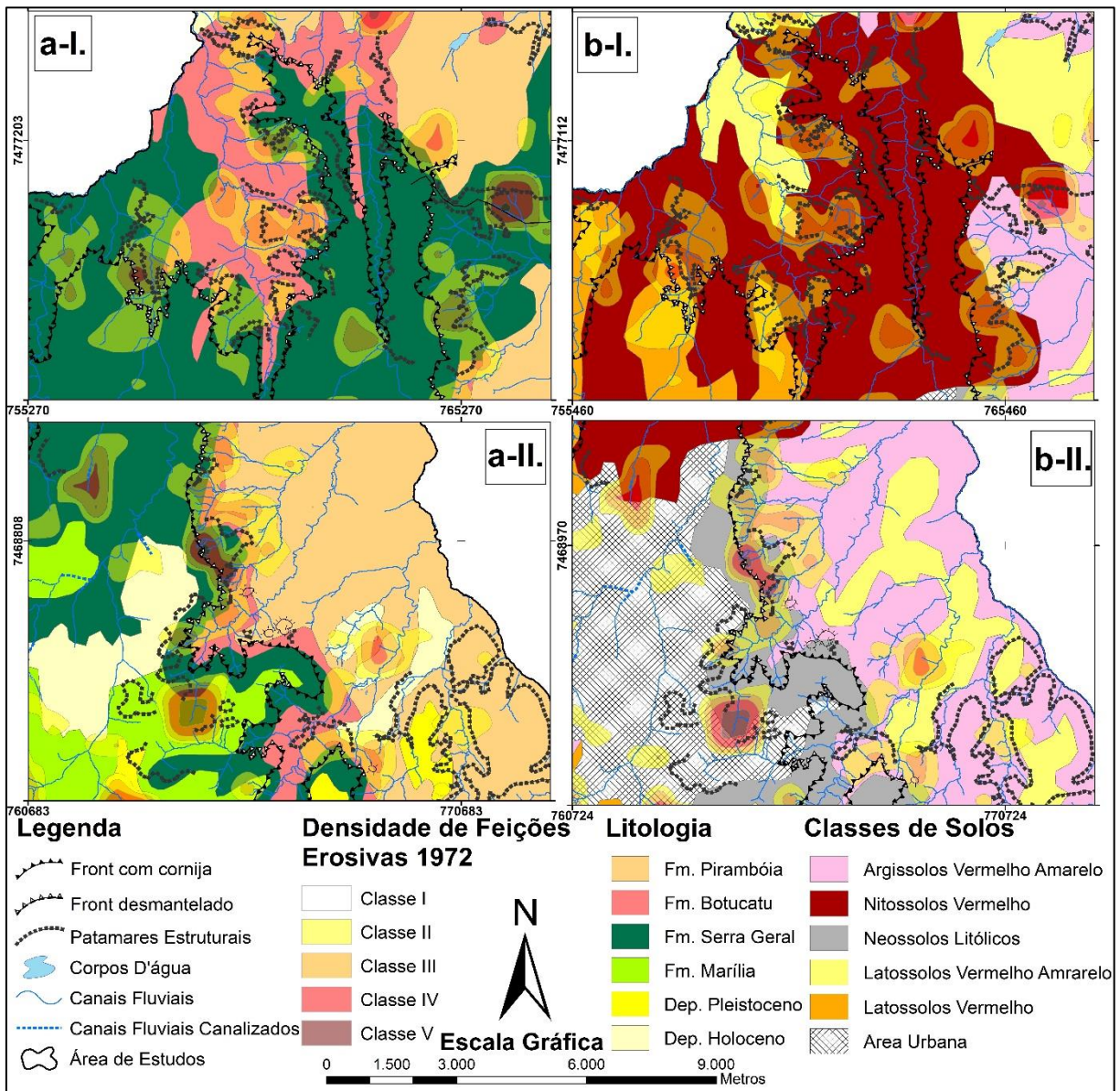
Os dados quantitativos que indicam a relação entre as feições erosivas e as formações Marília e Serra Geral, portanto, reafirmam a relação destas com os contatos litológicos do

reverso, especialmente nas cabeceiras de drenagem. A hipótese levantada para explicar esta relação é que, o contato de formações mais arenosas e, portanto, mais permeáveis, com os basaltos da Formação Serra Geral, faz com que estes setores sejam mais propensos ao afloramento das águas subsuperficiais e, portanto, à ocorrência de nascentes, atribuindo-lhes maior fragilidade (Figura 18 b). Ainda, as características arenosas da Formação Marília e dos depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos e, conseqüentemente sua menor resistência, contribuem com uma maior propensão ao desenvolvimento e evolução dos voçorocamentos à montante. Além disso, a menor ocorrência de sulcos e ravinamentos neste setor reforça o entendimento de que os processos erosivos nestes locais resultam majoritariamente da dinâmica do escoamento subsuperficial.

Bezerra *et al* (2009), ao analisarem a dinâmica erosiva sobre o planalto Marília no município homônimo do interior paulista, constataram que o caráter arenoso da Formação Marília dá origem a solos igualmente arenosos e frágeis do ponto de vista erosivo. Entretanto, neste caso, constata-se que o contato com formações menos permeáveis na base pode potencializar esta dinâmica. Ainda, com relação aos patamares estruturais, foi possível notar que as erosões desenvolvidas sobre estes eram potencializadas pelo declive acentuado, porém os voçorocamentos eram menos extensos que aqueles identificados próximos a contatos litológicos no reverso onde não haviam patamares estruturais. Tal avaliação sugere que onde as formações rochosas apresentam maior resistência, evidenciada pela presença dos patamares estruturais, o processo erosivo é dinamizado pelo declive, mas menos desenvolvido a montante, com menos ramificações. Já nos contatos onde não foram verificados patamares estruturais, o que sugere menor resistência da rocha matriz, as feições erosivas possuíam maior extensão.

No que diz respeito à análise das sobreposições entre as formações Botucatu e Serra Geral com as classes de densidade de Feições Erosivas Lineares, notaram-se resultados semelhantes com os identificados na sobreposição com o *tálus*. A Formação Botucatu, que se estende por 10,2% da área de estudos sustenta 18,3% dos terrenos inseridos na Classe II e 15,1% dos inseridos na Classe III, enquanto a Formação Serra Geral, que ocupa 31,9% da área analisada abriga 45% dos terrenos inseridos na Classe II e 43,3% dos inseridos na Classe III no cenário de 1972 (Tabela 2; Figura 22). No cenário mais recente, por sua vez, os arenitos Botucatu embasam 15,3% da área da Classe II, chegando ao seu valor máximo na Classe III, de 20,4%, enquanto a Formação Serra Geral sustenta 43,1% dos terrenos inseridos na Classe II e 36,9% dos inseridos na Classe III (Tabela 2, Figura 23).

Além dos dados quantitativos, o fato das sobreposições destas formações com as classes de densidade de feições erosivas estarem majoritariamente próximas aos contatos litológicos (Figura 24 a) sugere que a transição entre estas formações com características distintas consiste em um fator que potencializa o desenvolvimento das feições erosivas. Dessa forma, além do aumento do potencial erosivo em razão do declive do *front* e dos patamares estruturais, estes contatos implicam em descontinuidades nas taxas de infiltração, levando a ocorrência de elevada quantidade de nascentes, as quais, sem os devidos cuidados, podem levar ao desenvolvimento de voçorocamentos.



**Figura 24:** Classes de densidade de feições erosivas lineares próximas aos contatos entre as Formações Serra Geral e Botucatu (a) e sobre os Nitossolos e Neossolos Litólicos (b)

**Fonte:** São Paulo, 1984; Rossi, 2017

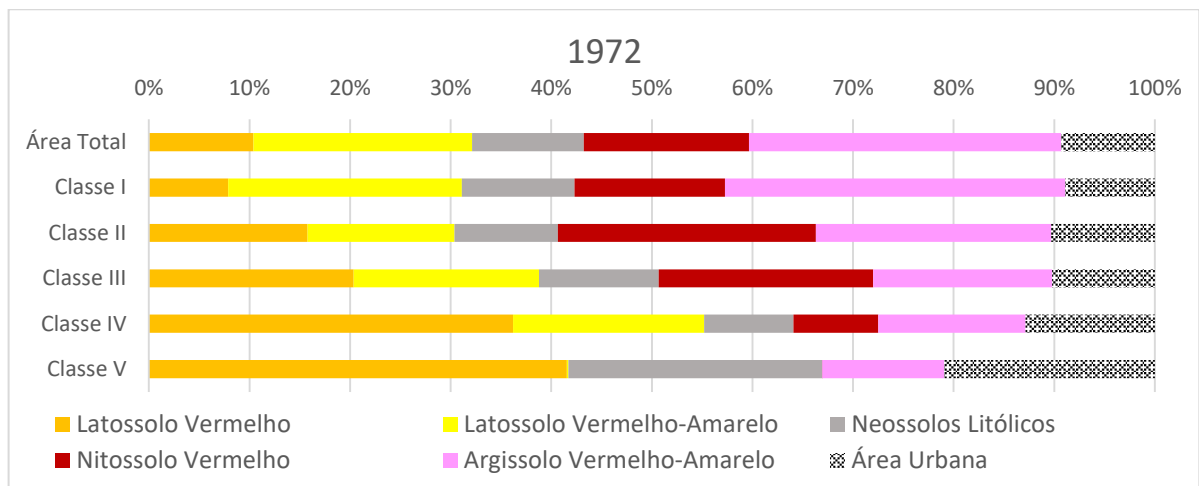
Além disso, essas formações litológicas dão origem a solos com propriedades distintas, como os Nitossolos Vermelhos, de origem basáltica, e os Neossolos Litólicos, mais argilosos quando de origem basáltica e mais arenosos quando de origem arenítica (ROSSI, 2017). Tais diferenças texturais impactam na dinâmica do escoamento superficial, podendo intensificar o *runoff* em setores menos permeáveis, acarretando em um alto potencial erosivo quando estes fluxos atingem coberturas mais friáveis.

Com relação a Formação Pirambóia, que sustenta a maior parte da Depressão Periférica na área estudada, nota-se uma fraca relação com as mais altas classes de densidade de feições erosivas em 1972. Mesmo ocupando 36,7% da área de estudos, a sobreposição com as classes IV e V são de, respectivamente, 9,7% e 4,0%, em razão da concentração das feições erosivas no reverso em 1972 (Tabela 2; Figura 22). Já em 2010, estes valores chegam a 24,6% na Classe IV e 15,9% na Classe V, enquanto a relação com os depósitos Holocênicos, que se estendem por apenas 5,4% da área de estudos, no cenário de 2010 sustentam 15% dos setores inseridos na Classe IV e 35,4% da Classe V (Tabela 2, Figura 23). Tais valores são atingidos principalmente no setor onde se verificou o maior aumento dos voçorocamentos (Figura 21 b) e também pode estar associada ao contato litológico entre essas formações e as características pedológicas locais.

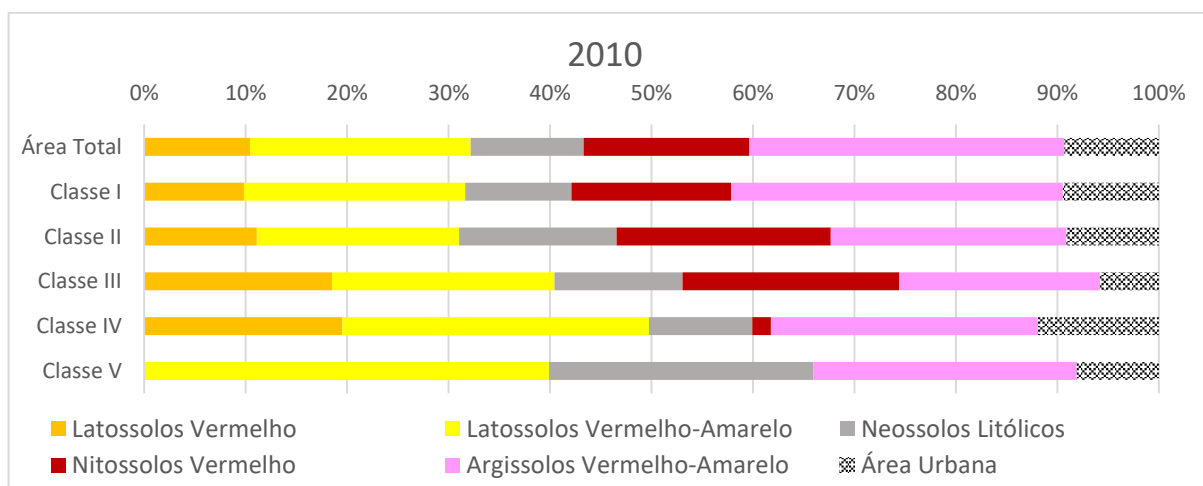
Por fim, no que diz respeito às relações estabelecidas entre as classes de densidade de feições erosivas lineares e os solos, nota-se que as erosões no reverso cuneiforme desenvolvem-se predominantemente sobre os Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelo e Neossolos Litólicos (Figura 18 c). Os Latossolos Vermelhos, que ocupam 10,4% da área de estudos e são encontrados apenas no reverso, sustentam, respectivamente, 36,2% e 41,6% das áreas das classes IV e V em 1972, entretanto esse valor cai para 19,5% e 0% no cenário de 2010 (Tabela 3, Figuras 25 e 26). No caso dos Latossolos Vermelho-Amarelo, apesar de estes estarem distribuídos majoritariamente sobre a Depressão Periférica, são encontrados também no reverso, onde embasam extensos voçorocamentos em ambos os cenários (Figura 18 c). A sobreposição dos Latossolos Vermelho-Amarelo com as classes IV e V é de, respectivamente 19,0% e 0,1% no cenário de 1972 e de 30,2% e 39,9% em 2010 (Tabela 3, Figuras 25 e 26). Porém, cabe ressaltar que no cenário de 2010, boa parte destas sobreposições se estabelecem na Depressão Periférica.

**Tabela 3:** Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010

Solos	Área Total	Densidade de Feições Erosivas Lineares									
		Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
		1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
LATOSSOLO VERMELHO	10,4%	7,9%	9,8%	15,8%	11,1%	20,4%	18,5%	36,2%	19,5%	41,6%	0,0%
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	21,7%	23,2%	21,8%	14,6%	19,9%	18,4%	21,9%	19,0%	30,2%	0,1%	39,9%
NEOSSOLOS LITÓLICOS	11,1%	11,2%	10,5%	10,3%	15,5%	11,9%	12,6%	8,9%	10,2%	25,2%	26,1%
NITOSSOLO VERMELHO	16,4%	15,0%	15,8%	25,7%	21,1%	21,3%	21,3%	8,4%	1,8%	0,0%	0,0%
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	31,0%	33,8%	32,7%	23,4%	23,2%	17,8%	19,8%	14,6%	26,3%	12,1%	26,0%
Área Urbana	9,3%	8,9%	9,5%	10,3%	9,1%	10,2%	5,8%	12,8%	11,9%	20,9%	8,1%



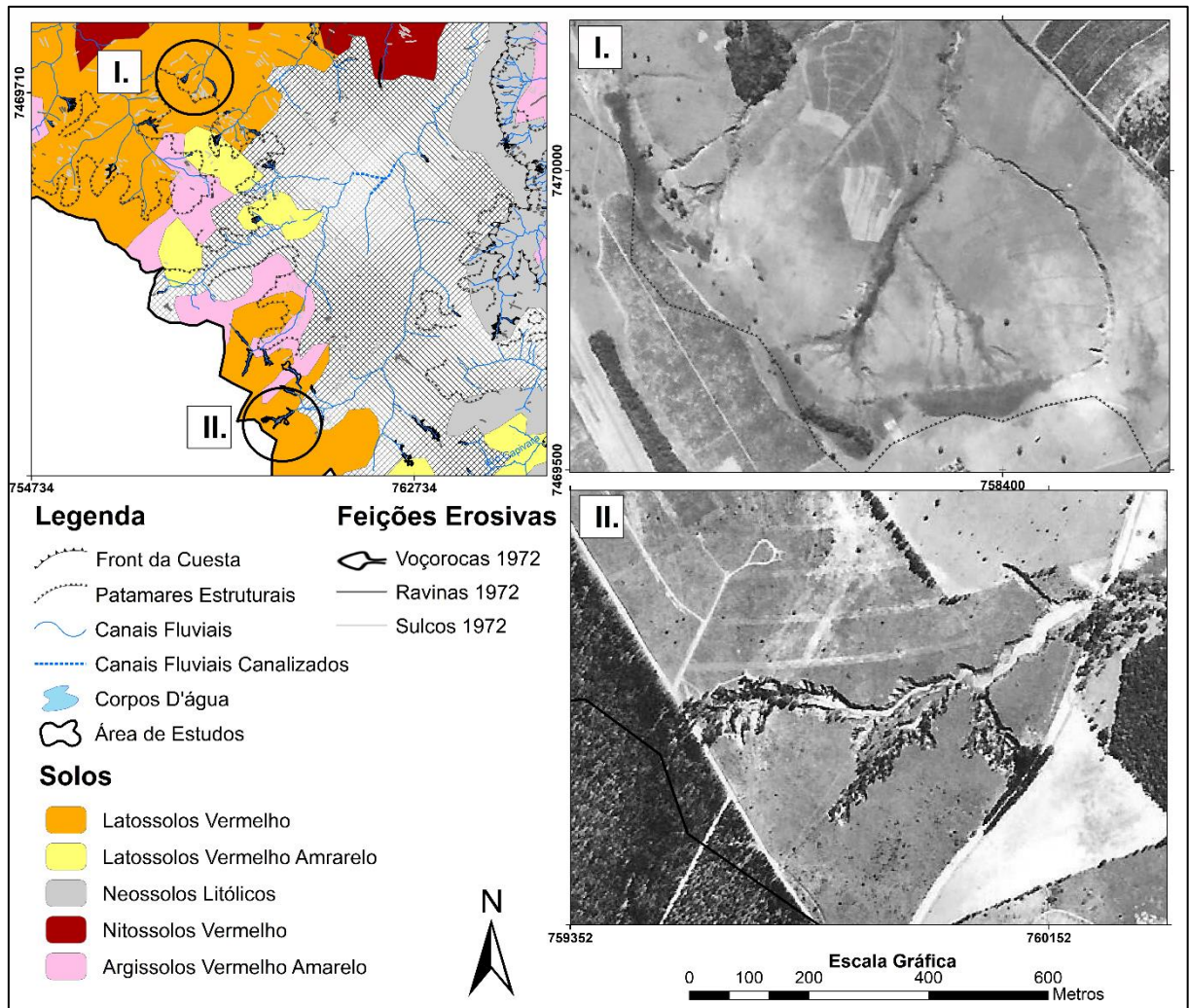
**Figura 25:** Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972



**Figura 26:** Distribuição dos solos nas classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010

Os Latossolos Vermelhos, que são encontrados sobre o embasamento das formações Serra Geral e Formação Marília, possuem texturas que podem variar de mais argilosas a mais arenosas (IAC, 2014; ROSSI, 2017). Estas características aparentemente influenciam a

morfologia das feições erosivas. A análise dos mapeamentos demonstrou que os voçorocamentos desenvolvidos sobre os Latossolos Vermelhos, próximos aos contatos entre as formações Marília e Serra Geral, possuem menores dimensões em comparação às grandes voçorocas identificadas sobre os Latossolos Vermelhos ou Latossolos Vermelho-Amarelo em locais embasados pela Formação Marília e depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos (Figuras 18 b e c; Figura 27).



**Figura 27:** Feições erosivas sobre Latossolos Vermelhos.

**Fonte:** Terrafoto, 1972; Rossi, 2017

Tais constatações sugerem um teor mais argiloso e mais resistente dos Latossolos Vermelhos identificados próximos ao contato Serra Geral-Marília. Além disso, nestes setores foram constatadas também maiores concentrações de sulcos e ravinamentos (Figura 18 a, b e c; Figura 27), o que sugere maior relação deste local com processos de escoamento superficial, potencializado pelo declive acentuado em virtude do patamar estrutural. Por outro lado, as características dos voçorocamentos identificados nos Latossolos Vermelhos sobre a Formação

Marília, mais extensos e com mais ramificações a montante, semelhantes às aquelas identificadas sobre os Latossolos Vermelho-Amarelo (Figura 27), sugere um teor mais arenoso dos Latossolos Vermelhos nestes locais. Esta condição lhes atribui maior suscetibilidade ao desenvolvimento de voçorocamentos em razão dos fluxos de escoamento subsuperficial, semelhante às condições identificadas por Arraes, Bueno e Pissarra (2010).

Ademais, os altos valores de densidade de feições erosivas lineares identificados sobre os Latossolos Vermelho-Amarelo, especialmente no reverso, vão de encontro às informações do IAC (2014) segundo o qual a elevada permeabilidade e baixa coesão os tornam especialmente sensíveis à degradação por voçorocamentos.

A sobreposição das classes de densidade de feições erosivas lineares com os Nitossolos Vermelhos e com os Neossolos Litólicos, por sua vez, apresentam condição semelhante àquela identificada entre as formações Botucatu e Serra Geral. No cenário de 1972 os Neossolos Litólicos sustentam, respectivamente 10,3% e 11,9% dos terrenos inseridos nas classes II e III, enquanto nos Nitossolos Vermelhos estes valores são de, respectivamente, 25,7% e 21,3% (Tabela 3, Figura 25). Concomitantemente, em 2010, os Neossolos Litólicos sustentam, respectivamente 15,5% e 12,6% da área das Classes II e III enquanto os Nitossolos sustentam, respectivamente, 21,1% e 21,3% da área destas mesmas classes (Tabela 3, Figura 26). Vale destacar ainda, que assim como no caso dos dados litológicos, os pontos de sobreposição entre estas variáveis localizam-se majoritariamente próximos ao *front* (Figura 24 b).

No caso de Botucatu, apesar dos altos teores de argila dos Nitossolos Vermelhos, que lhes atribuem alta coesão e baixa erodibilidade (IAC, 2014), assim como dos Neossolos Litólicos quando de origem basáltica (ROSSI, 2017), as feições erosivas associadas a estas coberturas podem se desenvolver em razão das altas declividades, mas também devido à proximidade com superfícies mais arenosas. Essa condição é relatada por Stefanuto *et al* (2022) ao observar uma concentração de feições erosivas em uma área de relevo cuestasiforme em Analândia (SP), próxima à transição entre solos mais argilosos, em decorrência do embasamento basáltico, e solos mais arenosos, fruto da decomposição dos arenitos Botucatu e Santa Rita do Passa Quatro. Segundo os autores, os solos mais argilosos possuem menores taxas de infiltração durante a estação úmida, agregando energia ao escoamento superficial que, ao atingir as coberturas vizinhas, mais arenosas e menos resistentes, provocam o desenvolvimento de sulcos e ravinamentos.

Com relação aos Neossolos Litólicos, as pequenas profundidades e baixa coesão (IAC, 2014) também contribuem para o desenvolvimento de feições erosivas lineares em áreas de relevo de *cuestas*. Em São Pedro (SP), Daniel e Vieira (2015) constataram que os neossolos de matriz arenítica no sopé da *cuesta* eram especialmente propensos ao desenvolvimento de voçorocas. Da mesma forma, Bezerra *et al* (2009) relatam que os depósitos coluvionares do Planalto de Marília são locais de alta suscetibilidade ao desenvolvimento de feições erosivas devido às características do material arenoso e inconsolidado, aliados à energia cinética adicionada pelo relevo.

Ainda, outro ponto que pode ser destacado é a influência dos Nitossolos e Neossolos Litólicos nas características das feições erosivas desenvolvidas, especialmente os voçorocamentos sobre o *front*. Além da maior propensão à ocorrência de sulcos e ravinas, os voçorocamentos tendem a ser menores, mais estreitos e possuem poucas ramificações (Figuras 19 e 20), diferentemente das voçorocas extensas, alargadas e com diversas ramificações identificadas sobre os latossolos profundos e bem drenados na Depressão Periférica e no reverso *cuestiforme*. Provavelmente, tal fato se deve à maior resistência dos Nitossolos Vermelhos e as baixas profundidades dos Neossolos Litólicos, especialmente os identificados sobre os declives mais acentuados.

Ainda com relação aos Neossolos Litólicos, estes também embasam um grande voçorocamento identificado em ambos os cenários no reverso *cuestiforme*, mas próximo ao *front* (Figura 18 c). O embasamento pela Formação Marília sugere um teor mais arenoso dos Neossolos neste setor, fazendo com que, aliado a outras propriedades dos neossolos, como baixa profundidade e coesão, o local possua alta suscetibilidade ao desenvolvimento desses processos.

Por fim, o que se observa em ambos os cenários é que os setores com os processos erosivos mais desenvolvidos na Depressão Periférica localizam-se nos contatos entre os Argissolos Vermelho-Amarelo e os Latossolos Vermelho-Amarelo. No cenário de 1972, os Argissolos Vermelho-Amarelo sustentam 14,6% da área da Classe IV e 12,1% da área da Classe V (Tabela 3, Figura 25). Já no cenário de 2010, nota-se uma intensificação da densidade de feições erosivas lineares nos Argissolos Vermelho-Amarelo, fazendo com que estes passem a sustentar 26,3% dos terrenos inseridos na Classe IV e 26,0% dos terrenos inseridos na Classe V (Tabela 3, Figura 26).

De acordo com Silva e Alvarez (2005), os argissolos no estado de São Paulo caracterizam-se por sua alta erodibilidade, enquanto Corrêa, Moraes e Pinto (2015) os classificam como solos de média a muito alta erodibilidade. Já para o IAC (2014), os argissolos de textura média/arenosa, como no caso dos Argissolos Vermelho-Amarelo identificados na área de estudos (ROSSI, 2017), possuem alta suscetibilidade à erosão. Essa característica estaria associada principalmente à baixa coesão dos horizontes superficiais mais arenosos e a baixa permeabilidade dos horizontes subsuperficiais, com maior teor de argilas, proporcionando maior suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos em consequência da variação no gradiente textural entre os horizontes (IAC, 2014; DEMARCHI; ZIMBACK, 2014; CORRÊA, MORAES, PINTO, 2015; SILVA; LUPINACCI, 2021).

Entretanto, o que se constatou na área de estudo é que o setor onde ocorre a maior sobreposição dos argissolos com as mais altas classes de densidade de feições erosivas lineares possui proximidade com os Latossolos Vermelho-Amarelo (Figura 21 c). Neste caso, entende-se que o depósito Holocênico identificado neste setor, assim como a transição dos latossolos para os argissolos, levam a variações granulométricas em subsuperfície que potencializam o desenvolvimento de processos erosivos, seja em razão do gradiente textural, seja devido as menores resistências dos latossolos (Figura 28).



**Figura 28:** Feições erosivas na Depressão Periférica sobre Latossolos Vermelho-Amarelo. Próximo à Usina Indiana (Botucatu – SP)

**Fonte:** Os autores, 31/05/2021

## **5.2 A densidade de Feições Erosivas Lineares e sua relação com as transformações no Uso da Terra**

Este item analisa como as transformações no uso da terra entre os anos de 1972 e 2010 influenciaram na ocorrência das feições erosivas lineares na área estudada. Para isso, as classes de densidade de feições erosivas lineares de 1972 e 2010 (Figuras 14 e 15) tiveram suas áreas sobrepostas as classes de uso da terra mapeadas nos mesmos cenários (Figuras 29 e 30), buscando-se identificar as relações espaciais estabelecidas entre estas variáveis.

A Tabela 4 mostra a diminuição na densidade de feições erosivas entre 1972 e 2010. De acordo com os dados quantitativos houve uma redução da área da Classes II de 12,1% para 10,8%; na Classe III essa redução foi de 5,4% para 3,8%; na Classe IV de 2,6% para 1,0% e na Classe V de 0,36% para 0,23%. É preciso ponderar que estas reduções não ocorrem de maneira uniforme em todos os setores, sendo constatado um arrefecimento dos processos erosivos em alguns pontos, assim como sua intensificação em outros. Entretanto, a diminuição generalizada nas áreas das classes mais altas coincide com a diminuição na área dos pastos sujos de 32,2% para 13,1%, acompanhado do aumento das áreas da urbanização consolidada, que passou de 1,1% para 4,9%, da cana de açúcar, que foi de 3,7% para 10,8% e nas áreas de vegetação florestal, que passaram de 7,5% para 16,8% (Tabela 5).

Além disso, a Tabela 5 e as Figuras 31 e 32 indicam que a sobreposição dos pastos limpos com as classes de densidade de feições erosivas aumenta nas classes mais altas, ao passo que as áreas de urbanização consolidada, cana de açúcar e vegetação florestal possuem a tendência inversa, com redução da participação destes usos nas classes que indicam processos erosivos mais desenvolvidos. Dessa forma, os dados quantitativos demonstram que a diminuição das pastagens, assim como o aumento destes outros tipos de uso da terra no período em questão, contribuiu com a diminuição da intensidade dos processos erosivos lineares na região estudada.

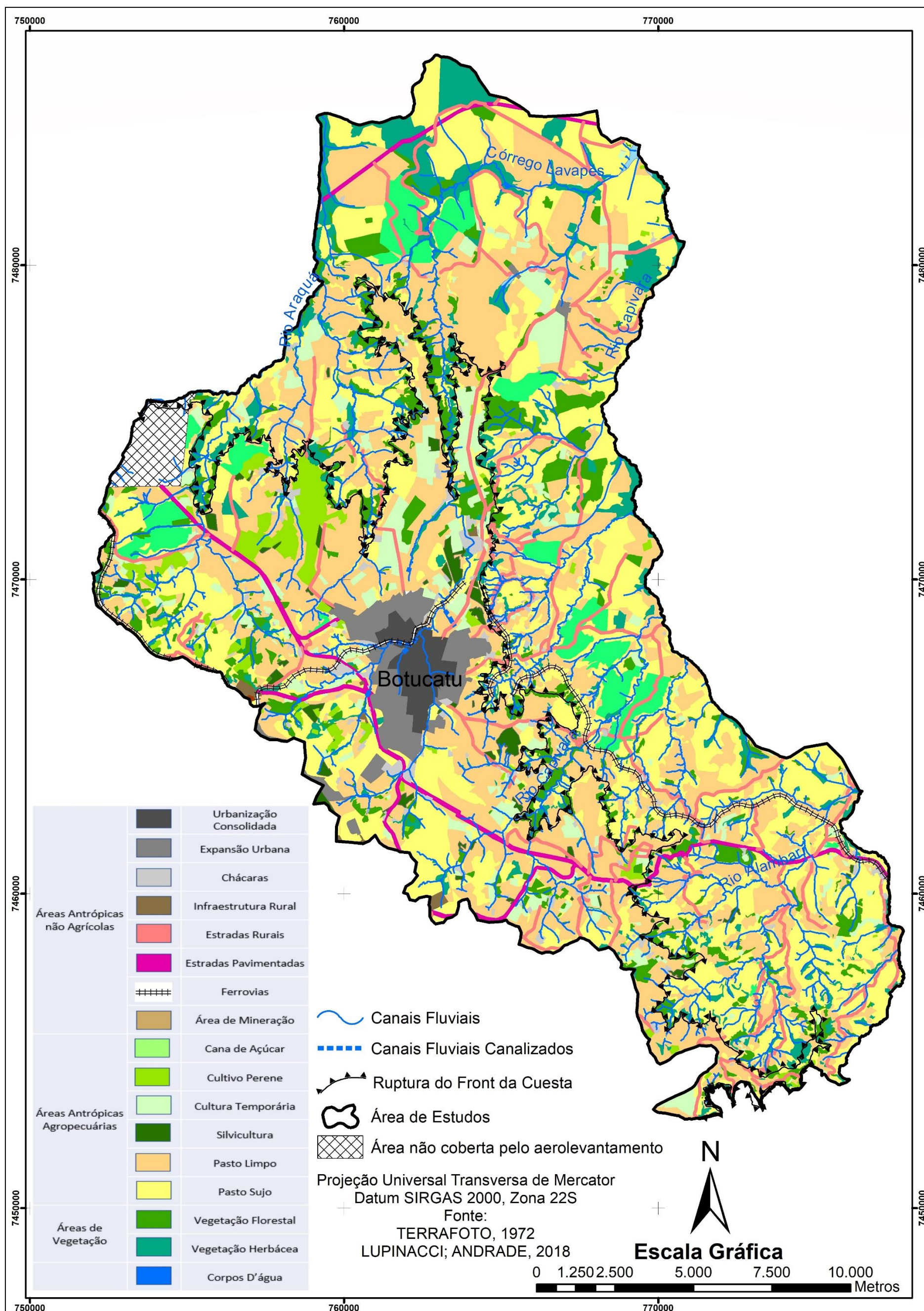


Figura 29: Mapa de Uso da Terra (1972)

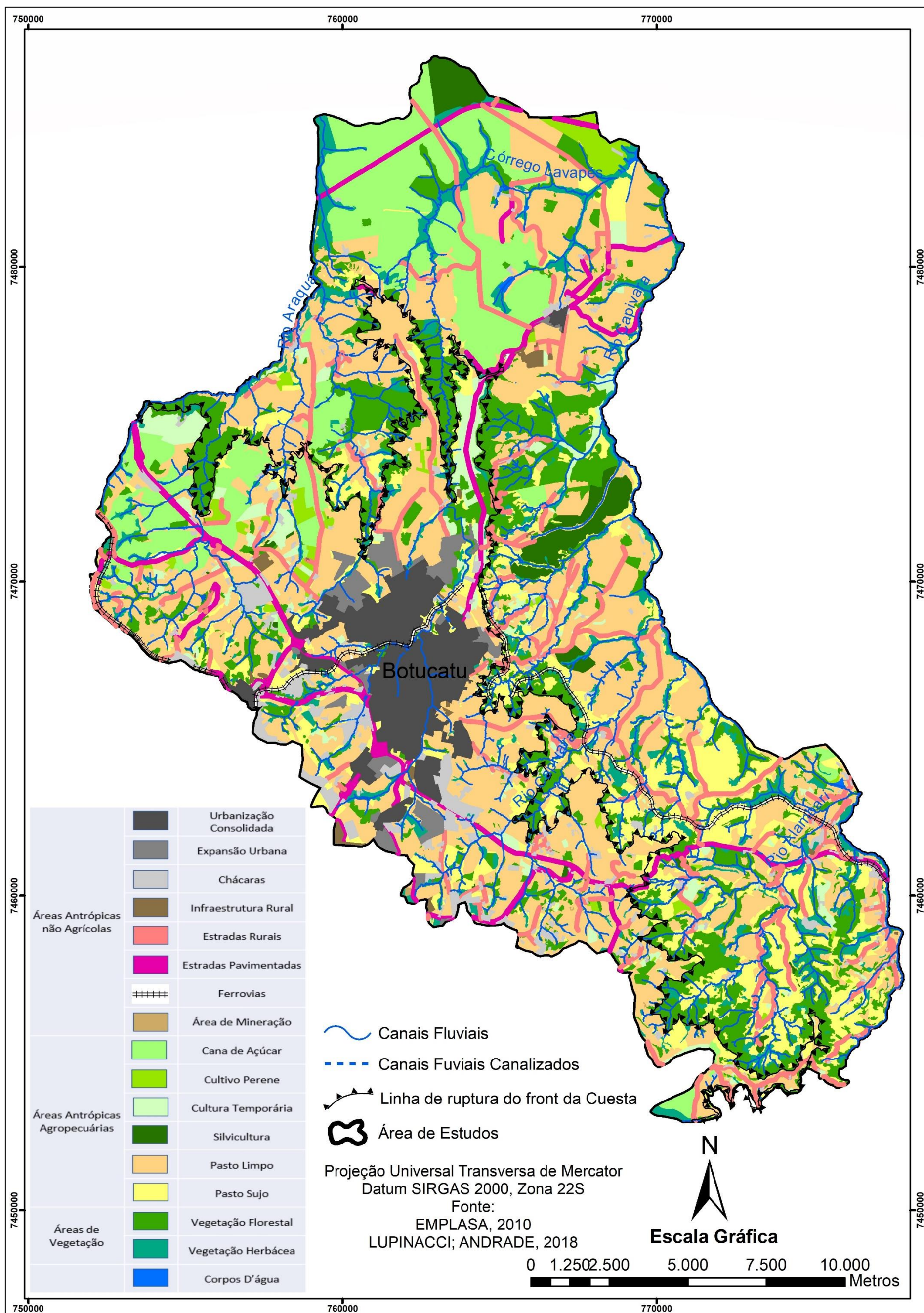


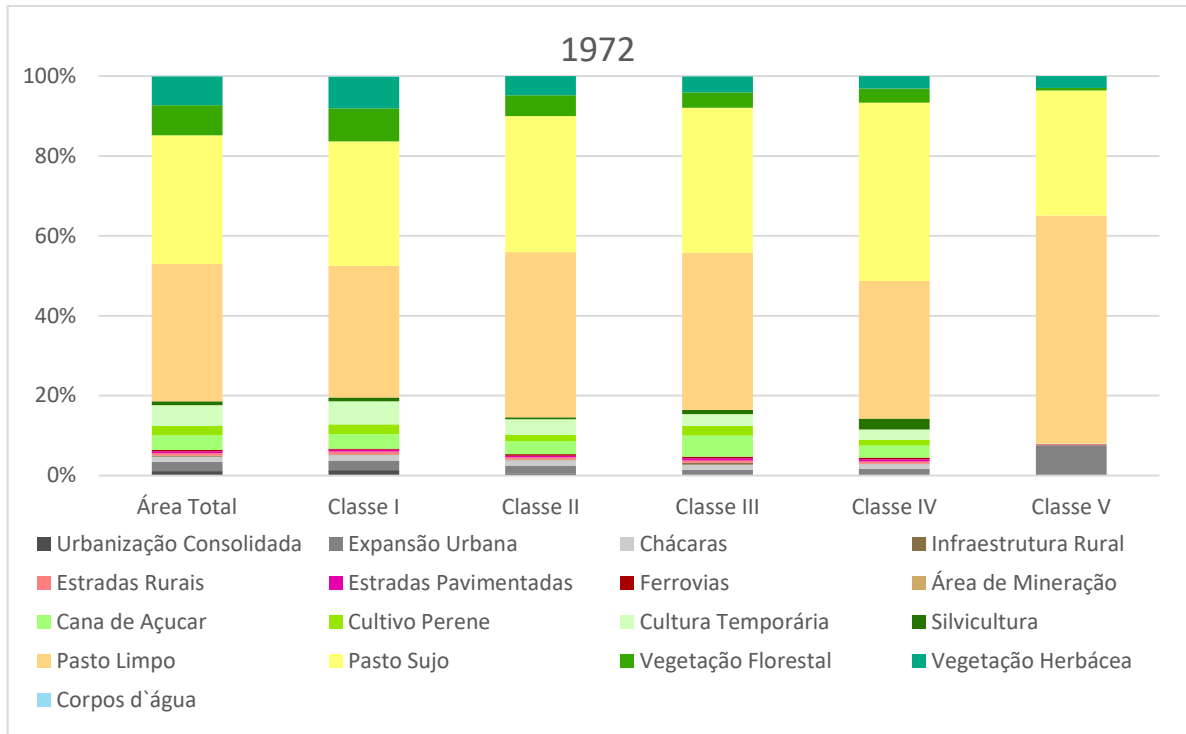
Figura 30: Mapa de Uso da Terra (2010)

**Tabela 4:** Área ocupada pelas classes de densidade de sulcos, ravinas, voçorocas e feiçoes erosivas totais nos cenários de 1972 e 2010

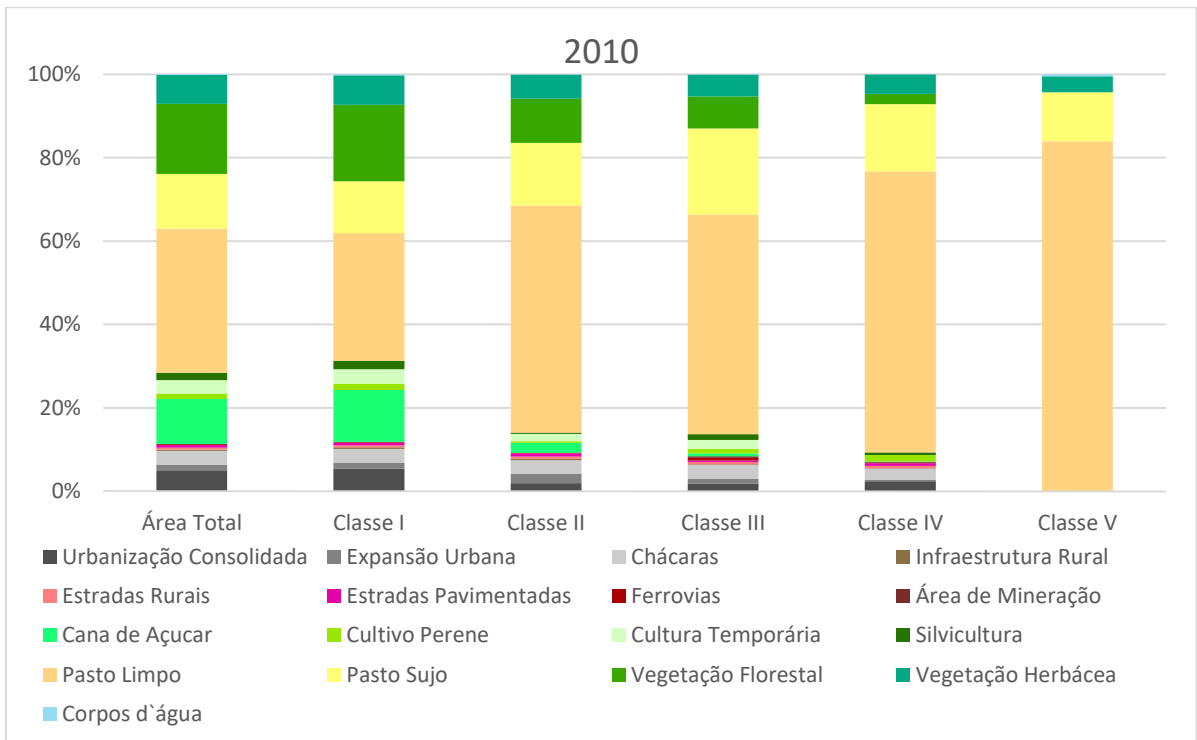
	Densidade de feiçoes erosivas lineares									
	Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Sulcos Erosivos	84,9%	84,3%	12,1%	12,4%	2,9%	3,0%	0,1%	0,3%	0,00%	0,00%
Ravinas	96,7%	97,8%	3,1%	2,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	0,00%	0,00%
Voçorocas	91,5%	95,2%	3,2%	2,3%	3,1%	1,5%	2,0%	0,8%	0,24%	0,05%
<b>Feiçoes Erosivas Lineares</b>	<b>79,4%</b>	<b>84,1%</b>	<b>12,2%</b>	<b>10,8%</b>	<b>5,5%</b>	<b>3,8%</b>	<b>2,6%</b>	<b>1,0%</b>	<b>0,37%</b>	<b>0,23%</b>

**Tabela 5:** Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feiçoes erosivas lineares nos cenários de 1972 e 2010

Uso da Terra	Densidade de Feiçoes Erosivas lineares											
	Área Total		Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Urbanização Consolidada	1,1%	4,9%	1,3%	5,4%	0,5%	2,0%	0,0%	1,8%	0,0%	2,4%	0,0%	0,0%
Expansão Urbana	2,3%	1,5%	2,4%	1,4%	1,9%	2,3%	1,4%	1,2%	1,6%	0,4%	7,6%	0,0%
Chácaras	1,3%	3,3%	1,3%	3,4%	1,5%	3,2%	1,3%	3,4%	1,3%	2,6%	0,0%	0,0%
Infraestrutura Rural	0,2%	0,3%	0,2%	0,3%	0,1%	0,3%	0,5%	0,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Estradas Rurais	0,7%	0,5%	0,7%	0,5%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	0,6%	0,3%	0,0%
Estradas Pavimentadas	0,5%	0,6%	0,5%	0,6%	0,4%	0,8%	0,5%	0,4%	0,6%	0,6%	0,0%	0,0%
Ferrovias	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	0,4%	0,2%	0,4%	0,6%	0,4%	0,1%	0,1%	0,0%
Área de Mineração	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%
Cana de Açúcar	3,7%	10,8%	3,7%	12,5%	3,3%	2,4%	5,3%	0,7%	3,0%	0,1%	0,0%	0,0%
Cultivo Perene	2,3%	1,4%	2,4%	1,5%	1,6%	0,4%	2,4%	1,1%	1,5%	1,5%	0,0%	0,0%
Cultura Temporária	5,3%	3,2%	5,7%	3,4%	3,9%	1,7%	3,0%	2,1%	2,6%	0,0%	0,2%	0,0%
Silvicultura	0,9%	1,8%	0,9%	2,0%	0,4%	0,4%	1,1%	1,4%	2,8%	0,6%	0,0%	0,0%
Pasto Limpo	34,4%	34,6%	32,9%	30,6%	41,4%	54,4%	39,3%	52,7%	34,4%	67,4%	57,0%	84,0%
Pasto Sujo	32,2%	13,1%	31,2%	12,4%	34,1%	15,1%	36,3%	20,7%	44,6%	16,1%	31,3%	11,7%
Vegetação Florestal	7,5%	16,8%	8,3%	18,3%	5,2%	10,6%	3,9%	7,7%	3,6%	2,4%	0,7%	0,0%
Vegetação Herbácea	7,2%	6,9%	7,9%	7,1%	4,8%	5,8%	4,0%	5,2%	3,1%	4,7%	2,9%	3,8%
Corpos d'água	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%



**Figura 31:** Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 1972



**Figura 32:** Sobreposição do uso da terra com as classes de densidade de feições erosivas lineares no cenário de 2010

Dessa forma, foi analisada, primeiramente, a dinâmica erosiva sobre os pastos limpos e sujos, os quais correspondem as classes de uso da terra mais frequentes na área estudada, cobrindo, respectivamente, 34,4% e 32,2% da superfície total em 1972 e 34,6% e 13,1% em

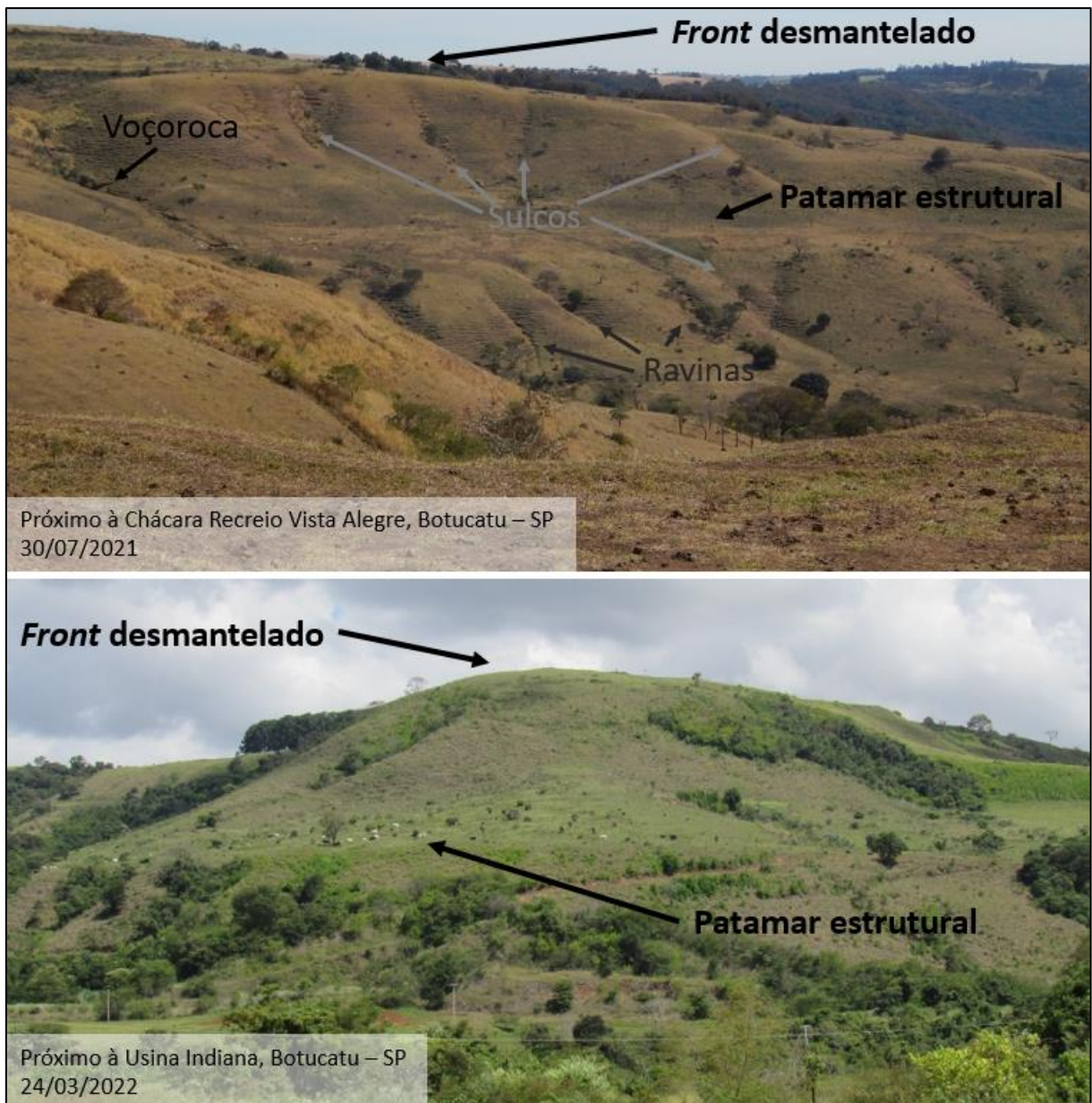
2010 (Tabela 5). Além disso, a sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas demonstra que em 1972 as classes mais altas de densidade de feições erosivas lineares se desenvolvem sobre os pastos limpos e sujos e em 2010, com a significativa redução na área ocupada pelos pastos sujos, estas passam a se concentrar principalmente sobre os pastos limpos (Tabela 5, Figuras 31 e 32). Dessa forma, o fato das pastagens serem os principais tipos de uso da terra associados às classes superiores de densidade de feições erosivas lineares demonstra que este tipo de uso é altamente suscetível ao desenvolvimento de sulcos, ravinas e voçorocamentos.

Tal relação é reconhecida pela bibliografia e está descrita nos trabalhos de Zanatta (2018), Stefanuto (2019) e Silva e Lupinacci (2021) que identificaram o desenvolvimento de feições erosivas lineares em pastagens no interior paulista. Da mesma forma, autores internacionais (LAL, 1983; GOUDIE, 2013; LI, *et al*, 2019) também constataram essa relação e a atribuíam principalmente à diminuição da cobertura vegetal, a redução da matéria orgânica do solo, diminuição dos enraizamentos e compactação do solo em razão do pisoteio do gado. Tais condições acarretam em uma redução nas taxas de infiltração, intensificando o *runoff*, ao mesmo tempo que a diminuição dos enraizamentos implica em uma maior suscetibilidade dos solos aos processos de cisalhamento (BLANCO; LAL, 2008; LI *et al*, 2019).

No caso analisado em Botucatu, aparentemente essa dinâmica também é potencializada por outros dois fatores. Primeiramente, observou-se que terrenos com maior suscetibilidade natural ao desenvolvimento de processos erosivos lineares estão frequentemente cobertos por pastagens. Tal fato foi constatado no *front* cuestasiforme e próximo a patamares estruturais, onde os declives mais acentuados dificultam a instalação de culturas agrícolas e infraestrutura urbana. Desse modo, estes terrenos que já possuem uma suscetibilidade natural à erosão acelerada, como demonstrado no item anterior, quando não estão cobertos pela vegetação, estão sendo utilizados como pastagens, as quais estão frequentemente marcadas por feições erosivas. Tais resultados são corroborados pelo trabalho de Silva e Lupinacci (2021) em relevo de *cuestas* entre os municípios de Itirapina e Rio Claro (SP), onde as pastagens também foram identificadas como o tipo de uso da terra que concentra a maior parte dos processos erosivos, especialmente sobre os terrenos de declive mais acentuado.

Ainda, as análises dos mapeamentos e observações em campo mostraram que em diversos setores onde o *front* é desmantelado ou há presença de patamares estruturais, o relevo mais suavizado torna o local mais propenso à instalação das pastagens (Figura 33). Essa constatação contribui com o entendimento de que é preciso pensar formas de ampliar a

manutenção da vegetação sobre o *front*, mesmo em locais onde o declive é menos acentuado, visto que as coberturas coluvionares, os contatos litológicos e as variações texturais dos solos, típicos do *front* e especialmente associados aos patamares estruturais, também constituem fatores de fragilidade. Cabe ressaltar também, que os trabalhos de campo possibilitaram observar outras feições denudativas sobre as pastagens em terrenos de maior declive, como terracetes e marcas de erosão laminar, indicando que estes setores são sensíveis a outros processos de degradação dos solos (Figura 34).



**Figura 33:** Pastagens sobre setores de front desmantelado e com patamares estruturais

**Fonte:** Os autores

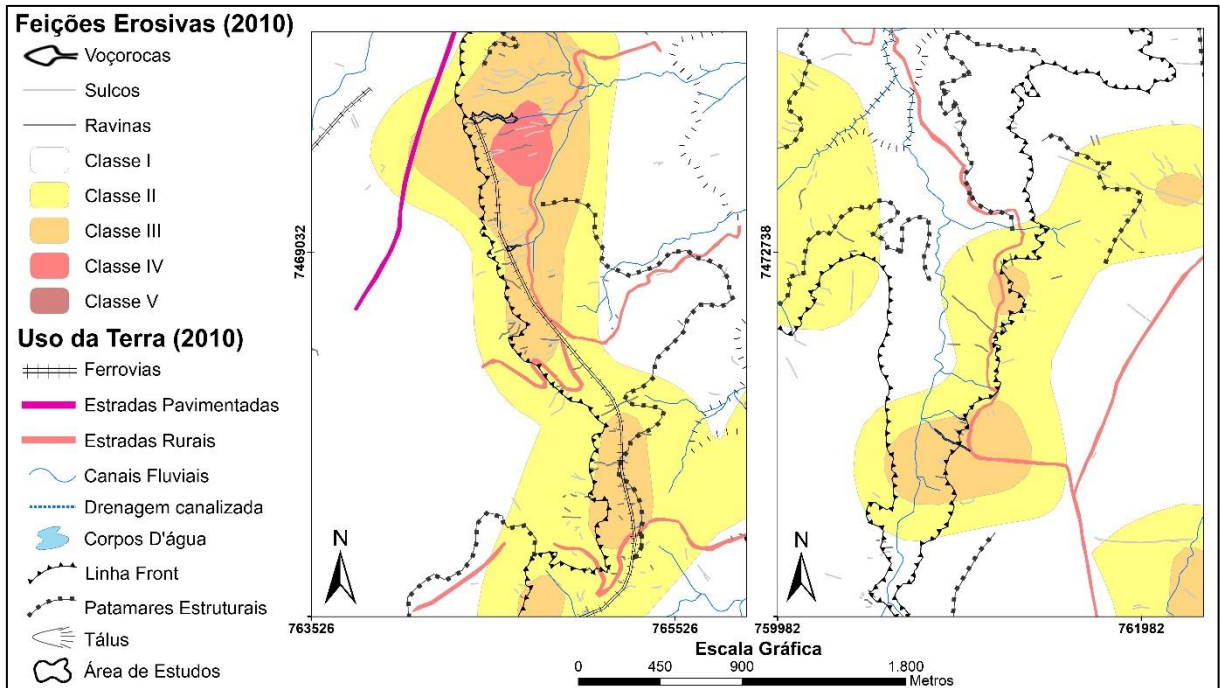


**Figura 34:** Marcas de erosão laminar e terracetes sobre pastagens em Botucatu (SP)

**Fonte:** Os autores

Retomando os processos erosivos lineares, outro fator que potencializa o desenvolvimento destas formas sobre as pastagens são os padrões de uso identificados no entorno de estradas, ferrovias e áreas de expansão urbana. Tal associação decorre da concentração e despejo das águas pluviais sobre as pastagens vizinhas, agregando energia suficiente para provocar incisões sobre os solos. Essa dinâmica é identificada principalmente quando estas estruturas se instalam sobre os terrenos naturalmente mais sensíveis aos processos erosivos lineares. Como mencionado anteriormente, o declive acentuado do *front* e patamares estruturais impõe limites ao processo de urbanização, porém as estradas e ferrovias nem sempre contornam os obstáculos do relevo e, justamente nos setores onde estas se sobrepõem aos terrenos mais sensíveis, se verifica o desenvolvimento de ravinas e voçorocamentos.

Dessa forma, a análise dos mapeamentos em ambos os cenários mostra que nos locais onde o *front* cuneiforme é cruzado por estradas rurais, estradas pavimentadas e ferrovias a presença das feições erosivas se intensifica devido ao aumento da energia cinética das águas despejadas em terrenos mais declivosos, criando incisões profundas, assim como em razão dos cortes no relevo que desestabilizam as vertentes de entorno (Figuras 35 e 36). O impacto das estradas e da linha férrea no desenvolvimento de feições erosivas, principalmente nos locais mais suscetíveis à erosão, também é um fenômeno conhecido pela bibliografia internacional (NIR, 1983; GOUDIE, 2013). De acordo com Nir (1983), reconhecido o impacto dos sistemas de transporte na ativação dos processos erosivos, é preciso que a implementação destas estruturas, especialmente sobre declives mais íngremes, possua um sistema de drenagem bem planejado e seja acompanhado por medidas de reflorestamento no entorno para garantir a proteção dos solos.

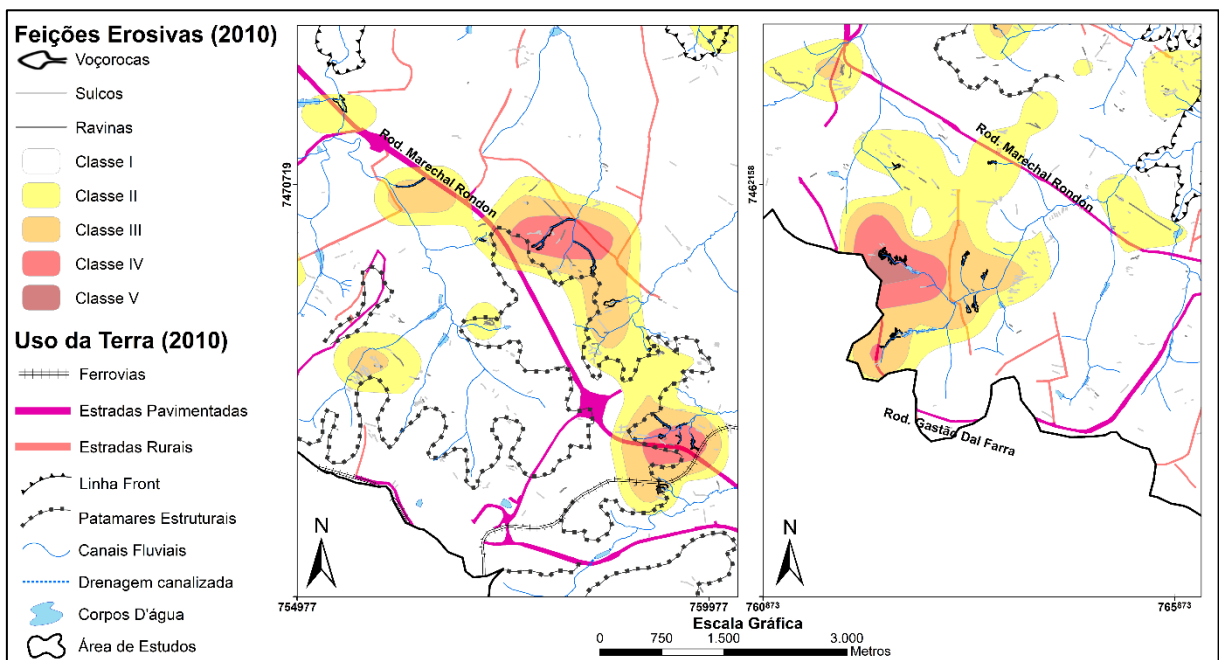


**Figura 35:** Densidade de feições erosivas lineares em setores onde o front cuestiforme é cortado por estradas e ferrovias



**Figura 36:** Feições erosivas associadas aos cortes no relevo para a instalação da linha férrea, próximo ao bairro Jd. Vista Linda (Botucatu – SP)  
**Fonte:** Os autores, 31/05/2021.

Uma dinâmica semelhante foi identificada também próximo às estradas rurais e rodovias no reverso cuestasiforme, nos locais onde estas se aproximam das cabeceiras de drenagem e patamares estruturais (Figura 37). Neste caso, as rodovias Marechal Rondon e Gastão Dal Farra constituem exemplos da influência destas estruturas no desenvolvimento dos voçorocamentos, acarretando na presença das mais altas classes de densidade de feições erosivas lineares no entorno. Nestes locais, o despejo das águas pluviais sobre coberturas mais arenosas e setores de declive mais acentuado em razão dos patamares estruturais, ativam o desenvolvimento de voçorocamentos sobre o reverso (Figura 38).



**Figura 37:** Densidade de feições erosivas próximas a rodovias no reverso cuestasiforme

Essa associação entre processos erosivos lineares e a pavimentação de estradas e obras de escoamento pluvial mal planejadas também são relatados por Tiz e Cunha (2007) em Cândido Rondon (PR), Pascoto, Furegatti e Peixoto (2018) em São Manuel (SP), assim como por Imwangana *et al* (2015) no Congo. Constata-se, portanto, que este constitui um problema recorrente em outros municípios do Brasil e do mundo, como consequência da falta de planejamento e de obras bem dimensionadas. Neste caso acrescenta-se que os condicionantes físicos potencializam os processos erosivos e, portanto, também devem ser considerados na implementação das obras de infraestrutura.



**Figura 38:** Voçoroca desenvolvida em decorrência do despejo das águas pluviais da Rodovia Marechal Rondon, próximo ao bairro Jd. Dom Henrique (Botucatu – SP)

**Fonte:** Os autores, 30/07/2021

No caso das áreas urbanizadas, a influência sobre o processo erosivo apresenta dinâmica parecida em razão da impermeabilização do solo e da concentração e despejo do escoamento pluvial, acarretando em processos erosivos nas áreas de entorno, frequentemente cobertas por pastagens. Esse processo é potencializado ainda pelo adensamento da rede viária e pela presença da linha férrea que, apesar de se distribuírem por toda a região, irradiam dos centros urbanos. Nestes casos, o método de interpolação utilizado no mapa de densidade de feições erosivas lineares frequentemente não indica sobreposição das áreas de urbanização consolidada ou, quando indica, são com as classes II e III, e raramente com as classes IV e V (Tabela 5, Figuras 31 e 32).

As áreas de expansão urbana nas periferias da cidade, por sua vez, possuem uma sobreposição maior com as classes de densidade de feições erosivas lineares quando comparado com as áreas de urbanização consolidada. Segundo Goudie (2013), é durante o processo de urbanização que se tem a maior intensidade dos processos erosivos devido à grande quantidade de solo exposto e ao trânsito de maquinário. Além disso, a Figura 39 exemplifica que, assim como no caso das estradas, a expansão urbana em direção a terrenos mais suscetíveis, seja em razão do declive ou das formações mais arenosas, pode implicar no desenvolvimento de feições

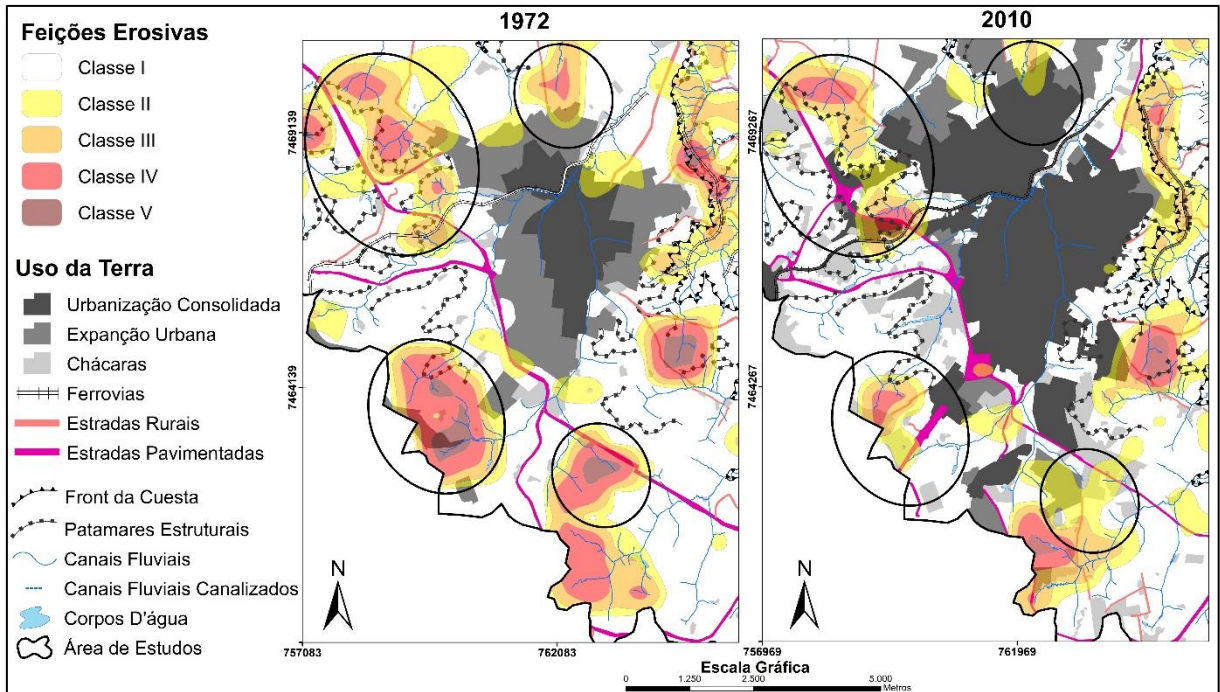
erosivas lineares, especialmente quando calhas ou galerias pluviais despejam as águas sobre os solos expostos no entorno (IMWANGANA *et al* 2015).



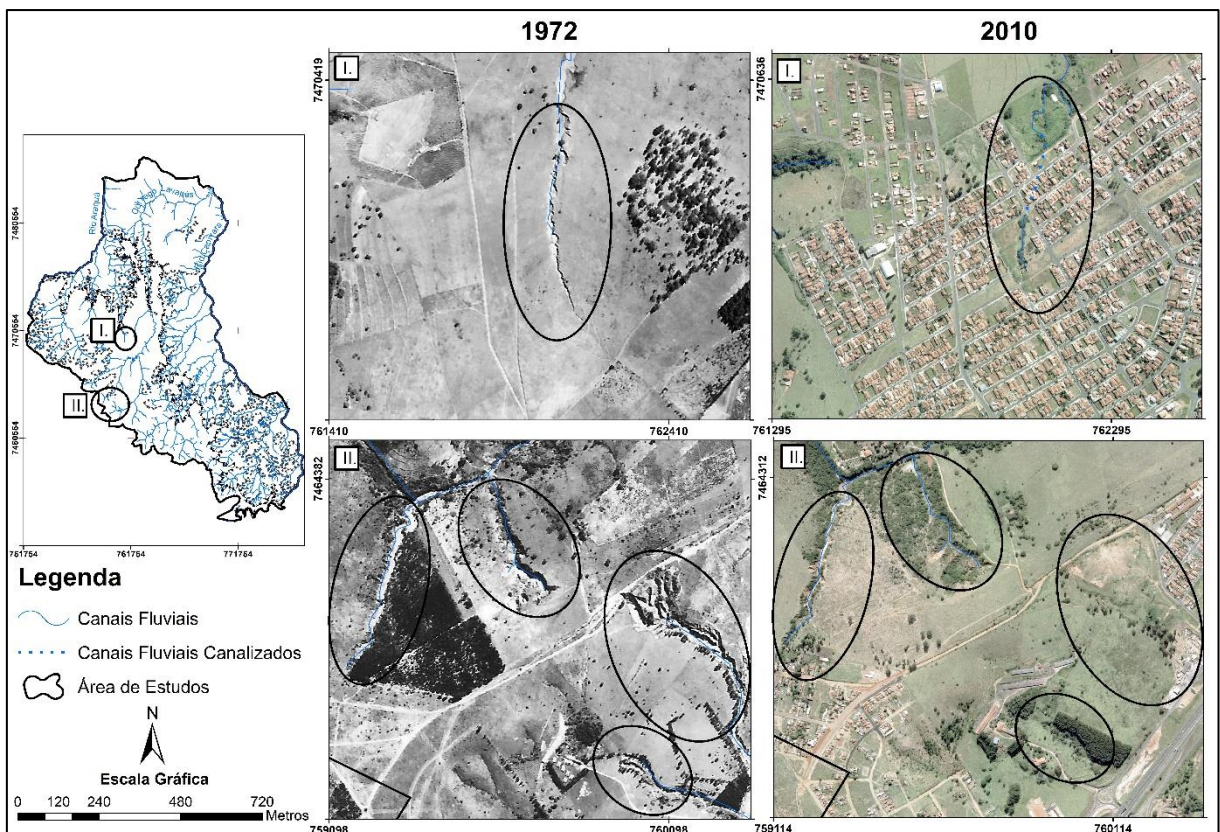
**Figura 39:** Voçorocamento desenvolvido em consequência da drenagem urbana no bairro Jardim Maria Luiza (Botucatu - SP)

**Fonte:** Os autores, 30/07/2021

Entretanto, a análise dos mapeamentos mostra que, apesar do aumento pontual dos processos erosivos em alguns locais, no geral o que se verificou é que a expansão urbana no reverso, em direção a setores atingidos por altas classes de densidade de feições erosivas em 1972, implicou em uma diminuição na intensidade destas em 2010 (Figura 40). Mesmo com a alta suscetibilidade natural destes setores ao desenvolvimento dos processos erosivos, como constatado no subcapítulo 5.1, esta condição decorre da aplicação de medidas de contenção, obliteração e reflorestamento das erosões que acompanharam a instalação destas infraestruturas (Figura 41). Nesse sentido é preciso reconhecer o impacto da expansão urbana na redução das feições erosivas, porém é necessário avaliar se a aplicação destas medidas realmente traz benefícios à conservação dos solos e das águas na região.



**Figura 40:** Diminuição da intensidade das classes de densidade de feições erosivas entre 1972 e 2010 associadas à expansão urbana.



**Figura 41:** Aterramento e obliteração de voçorocas associadas à expansão urbana

**Fonte:** Terrafoto, 1972; EMPLASA, 2010

Mathias, Lupinacci e Moruzzi (2013) relatam que os processos de urbanização no entorno de uma voçoroca em São Pedro (SP), mesmo acompanhado de obras de aterramento e

contenção da dinâmica evolutiva da feição, promoveram a intensificação do processo erosivo em virtude da utilização de técnicas de contenção e estabilização inadequadas ou mal dimensionadas. Dessa forma, os autores constataram que as medidas de contenção erosiva podem trazer benefícios ambientais quando aplicadas corretamente, mas também podem levar ao aumento da deterioração ambiental quando mal aplicadas. Nesse sentido, notou-se que os processos de aterramento na cabeceira da voçoroca com o uso de resíduos urbanos constituiu um fator de agravamento do quadro ambiental (MATHIAS; NUNES, 2019; MATHIAS; LUPINACCI; NUNES, 2020). Segundo os autores, o aterramento do canal dissimula o processo erosivo, mas sua reativação pode acarretar no assoreamento dos canais fluviais a jusante, quadro que pode ser agravado ainda devido aos resíduos urbanos utilizados, trazendo o risco de contaminação dos recursos hídricos.

Em Botucatu, foi possível constatar em campo a utilização de entulho para aterrar uma voçoroca próxima ao Distrito Industrial II (Figura 42), da mesma forma como descrito por Mathias, Lupinacci e Nunes (2020). Desse modo, entende-se que os processos aplicados neste caso podem trazer consequências ambientais análogas àquelas descritas pelos autores, trazendo prejuízos aos solos, assim como aos recursos hídricos. Ainda, é necessário avaliar o impacto que a urbanização próxima às cabeceiras de drenagem pode ter sobre a disponibilidade de águas da região, visto que o aumento da impermeabilização dos solos associados a este tipo de uso implica na diminuição das taxas de infiltração.



**Figura 42:** Uso de resíduos urbanos (entulho) para o aterramento de uma voçoroca próxima ao Distrito Industrial II (Botucatu – SP)

**Fonte:** Os autores, 31/05/2022

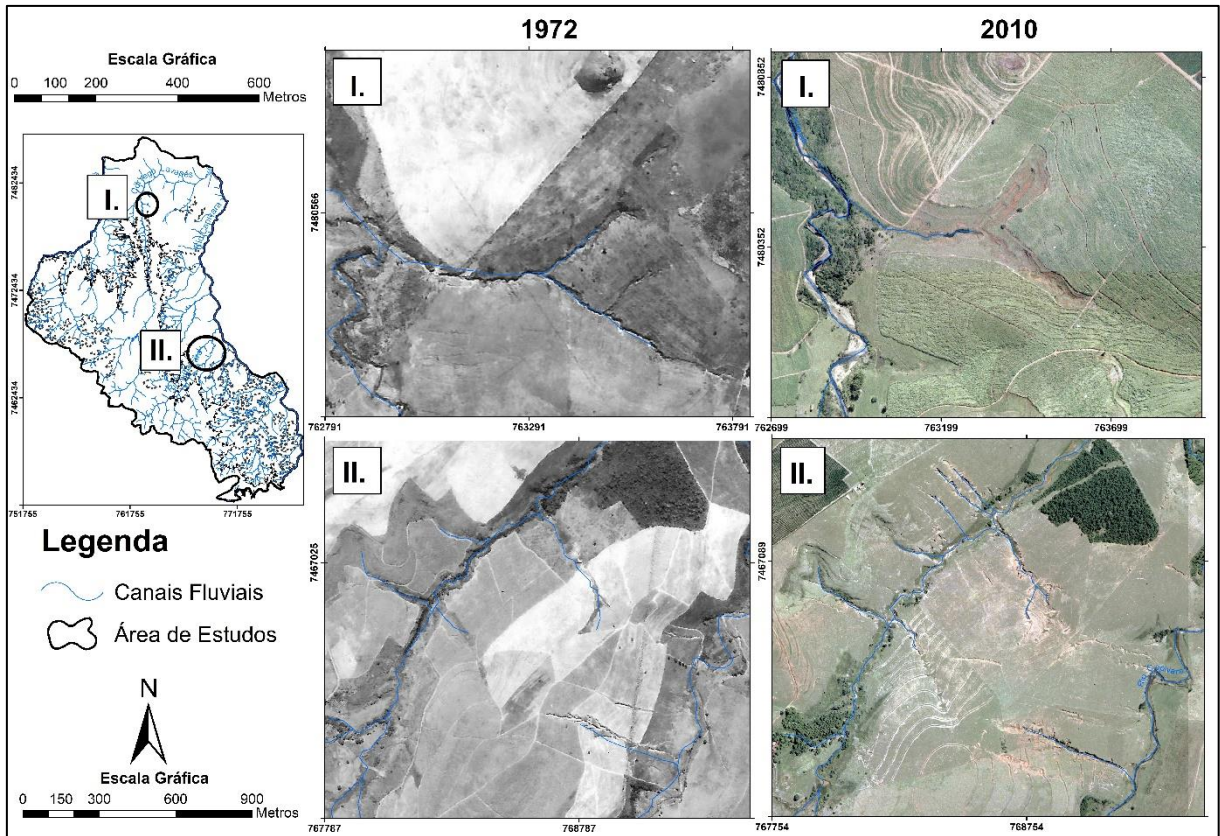
Com relação às culturas agrícolas, é interessante observar o aumento da cana de açúcar na área estudada, ao mesmo tempo que se verifica a diminuição da área ocupada por culturas perenes, que passa de 2,3% em 1972 para 1,4% em 2010, e culturas temporárias, que vão de

5,3% para 3,2% no mesmo período (Tabela 5, Figuras 31 e 32), demonstrando uma concentração das atividades agrícolas no setor sucroalcooleiro. Com relação aos impactos destas transformações na dinâmica erosiva, o fato de a cana de açúcar reduzir sua participação nas classes superiores de densidade de feições erosivas lineares em 2010 sugere uma fraca relação deste tipo de uso da terra com a dinâmica erosiva linear.

O cultivo mecanizado empregado nos canaviais faz com que esta cultura seja limitada pelos declives acentuados, fator que contribui com a menor ocorrência de processos erosivos lineares. Além disso, a correção do solo pelo maquinário agrícola, que oblitera sulcos erosivos, impede o desenvolvimento de ravinas e voçorocas no decorrer do tempo. Entretanto, Corrêa *et al* (2018) apontam que estas culturas são severamente atingidas pela erosão laminar, especialmente em consequência do ciclo anual e a coincidência do período de entressafra com o início da estação chuvosa, fazendo com que as chuvas atinjam solos com pouca ou nenhuma cobertura vegetal. Por isso, apesar dos resultados indicarem uma fraca relação com processos erosivos lineares, os canaviais não devem ser considerados seguros do ponto de vista da conservação dos solos.

Além disso, é possível observar que alguns setores de pastagens atingidos por voçorocamentos em 1972, assim como no caso das áreas urbanas, passaram por processos de obliteração em decorrência da implantação dos canaviais, contribuindo com a diminuição na densidade de feições erosivas em setores da Depressão Periférica em 2010 (Figura 43 a). De modo análogo, a relação inversa também pôde ser verificada nos mapeamentos. O setor que registra a maior concentração da Classe V em 2010 corresponde a um ponto da Depressão Periférica ocupado por canaviais em 1972, onde já ocorriam algumas feições erosivas mas que, ao ser convertido para pastagem no cenário mais recente, registra um aumento nos processos erosivos lineares (Figura 43 b).

O processo de obliteração das voçorocas para a implantação de outras culturas pôde ser observado em campo também no caso da conversão das pastagens para silvicultura (Figura 44), como registrado no trabalho de Bonzanini e Lupinacci (2022). Entretanto, assim como no caso dos canaviais, é preciso compreender que a obliteração das feições erosivas não necessariamente garante a segurança dos solos no local. Da mesma forma que se constata o aumento da erosão laminar associado aos canaviais, a silvicultura pode implicar na degradação dos solos e diminuição na disponibilidade de águas a depender das condições naturais do local onde é implementado (VITAL, 2007).

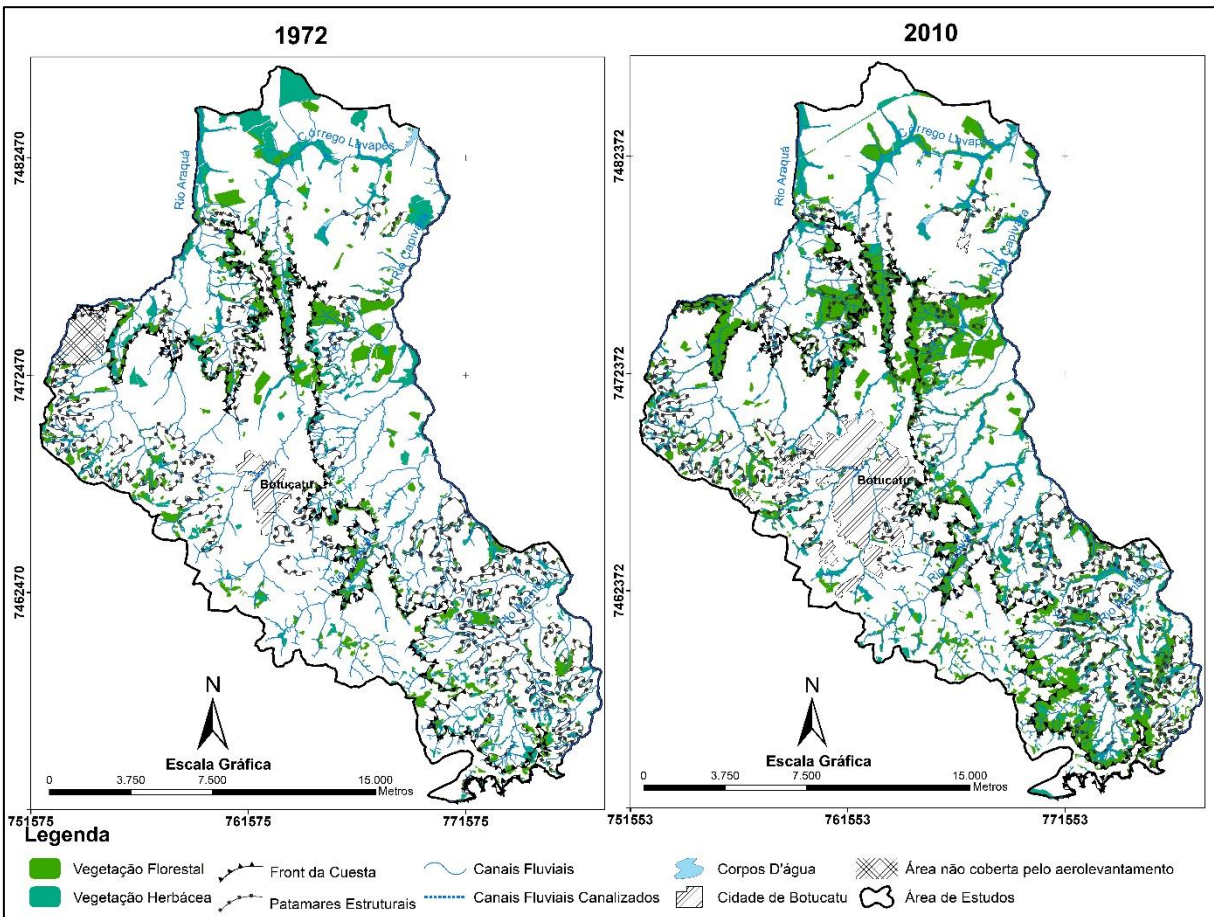


**Figura 43:** Relação das feições erosivas lineares com as conversões de pastagens para canaviais (a) e canaviais para pastagens (b) entre 1972 e 2010  
**Fonte:** Terrafoto, 1972 e EMPLASA, 2010

Por fim, o aumento da vegetação florestal na área estudada, passando de 7,5% para 16,8% também esteve associado à diminuição na intensidade dos processos erosivos. Esse aumento da vegetação foi identificado em vários setores, como no entorno de nascentes e canais fluviais, mas principalmente no *front*, onde se encontra a maior parte dos fragmentos de vegetação florestal (Figura 45), provavelmente em decorrência do declive acentuado que dificulta a instalação de outros tipos de uso da terra. Isso demonstra a importância do *front* na manutenção da vegetação nativa, contribuindo com a conservação dos solos, assim como com a recarga do aquífero Guarani (CARNEIRO, 2007), a proteção de nascentes e desempenhando a função de corredores ecológicos a fim conectar os fragmentos de vegetação (JORGE; MOREIRA, 2000).



**Figura 44:** Obliteração de feições erosivas em áreas de pastagens para a instalação de silvicultura próximo à Usina Indiana (Botucatu – SP).  
**Fonte:** Os autores, 31/05/2021.



**Figura 45:** Fragmentos de vegetação na área de estudos

Segundo a literatura consultada, a vegetação florestal constitui um dos principais métodos para a prevenção dos processos erosivos em regiões tropicais. A partir de revisão bibliográfica sobre o tema, Wang *et al* (2021) apontam que as taxas de erosão em ambientes cobertos por florestas tende a ser baixas em razão de diversos fatores. Primeiramente, o dossel e a camada de serrapilheira contribuem com o amortecimento da chuva, diminuindo seu

impacto sobre o solo, atenuando o processo de erosão por salpicamento, que também influencia na dinâmica erosiva linear. Ademais, sob áreas vegetadas as taxas de infiltração no solo são significativamente maiores em comparação a outros tipos de uso, como também foi constatado por Zhang *et al* (2014) e Shin *et al* (2019), devido ao maior teor de matéria orgânica do solo, assim como pelos caminhos criados pelo enraizamento e pela fauna do solo. A presença da vegetação também acarreta em um aumento da rugosidade da superfície, quebrando a energia do escoamento pluvial e, por fim, os enraizamentos prestam fundamental serviço na proteção dos solos aos processos de cisalhamento e na estabilização das vertentes, especialmente sobre declives acentuados (SHIN *et al*, 2019; WANG *et al*, 2021).

A análise dos locais com significativo aumento da vegetação florestal mostrou que muitos destes eram altamente atingidos por processos erosivos e foram submetidos ao reflorestamento provavelmente visando minimizar estes impactos. Dessa forma, entende-se que o aumento dos fragmentos florestais sobre o *front* trouxe impactos positivos sobre a preservação dos solos, além de contribuir com a recarga dos aquíferos e com a biodiversidade na região.

### **5.1 Relação das áreas protegidas pela legislação ambiental com as classes de densidade de feições erosivas lineares e o uso da terra**

Os mapas das áreas com restrições legais ao uso e ocupação de 1972 e 2010 (Figuras 46 e 47) revelam uma concentração de áreas protegidas nas proximidades do *front* cuestasiforme. Isso se deve ao fato destes terrenos se enquadrarem em diversas categorias de restrição ao uso da terra. Primeiramente, as faixas de proteção de reverso, seja a APP, seja a faixa de Utilidade Pública, se estabelecem, por definição, sobre o reverso cuestasiforme, acompanhando o *front*. As restrições ao uso e ocupação da terra por níveis de declividade também se concentram sobre o *front*, devido à natureza do relevo escarpado, mas são identificadas também sobre os patamares estruturais do reverso e da Depressão Periférica. No caso das APPs nas margens de cursos d'água e nascentes, apesar de se distribuírem por toda a região, também possuem uma relação com o *front*, que concentra uma elevada quantidade de nascentes (Figuras 46 e 47).

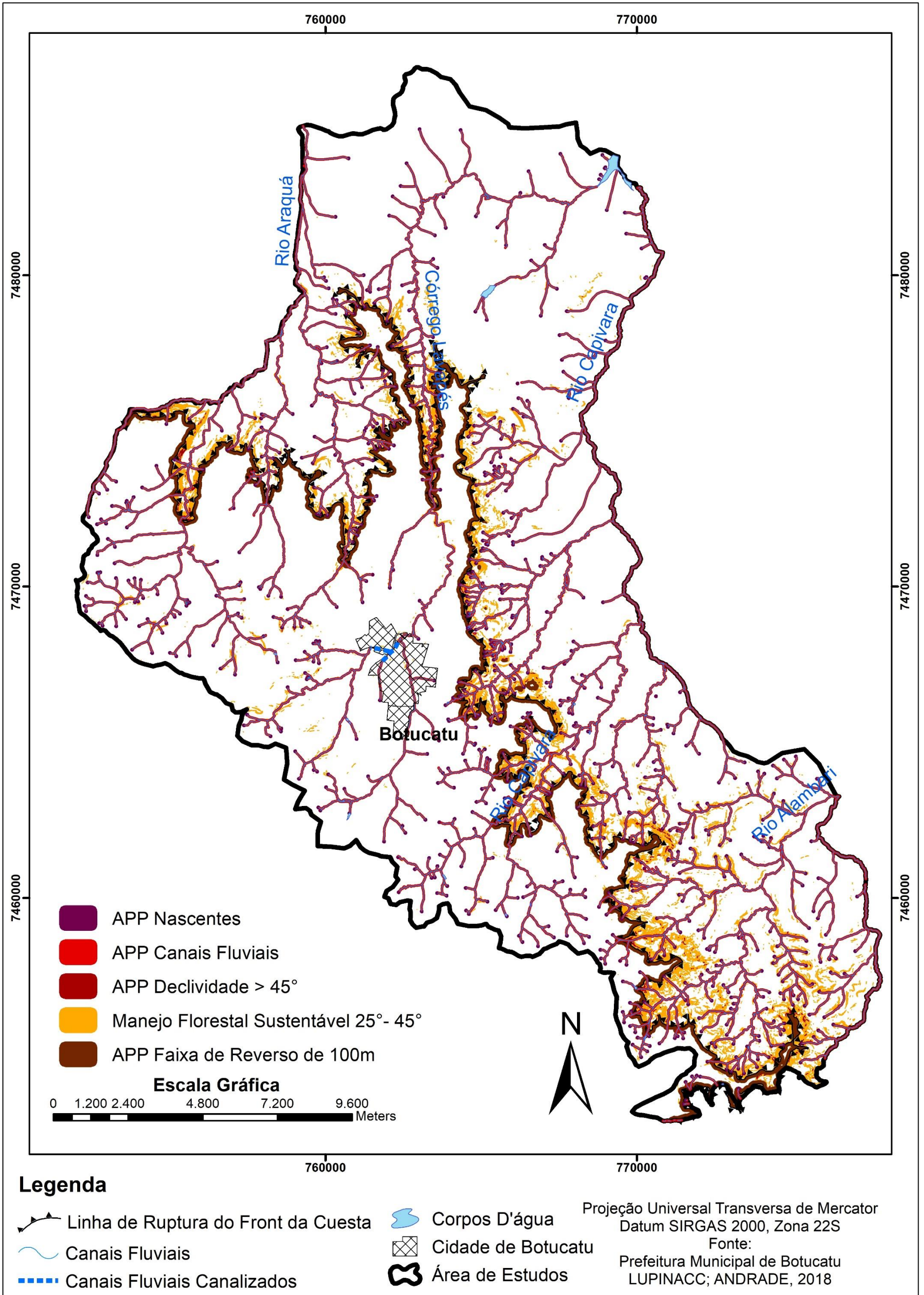


Figura 46: Mapa das áreas com restrições legais ao uso e ocupação (1972)

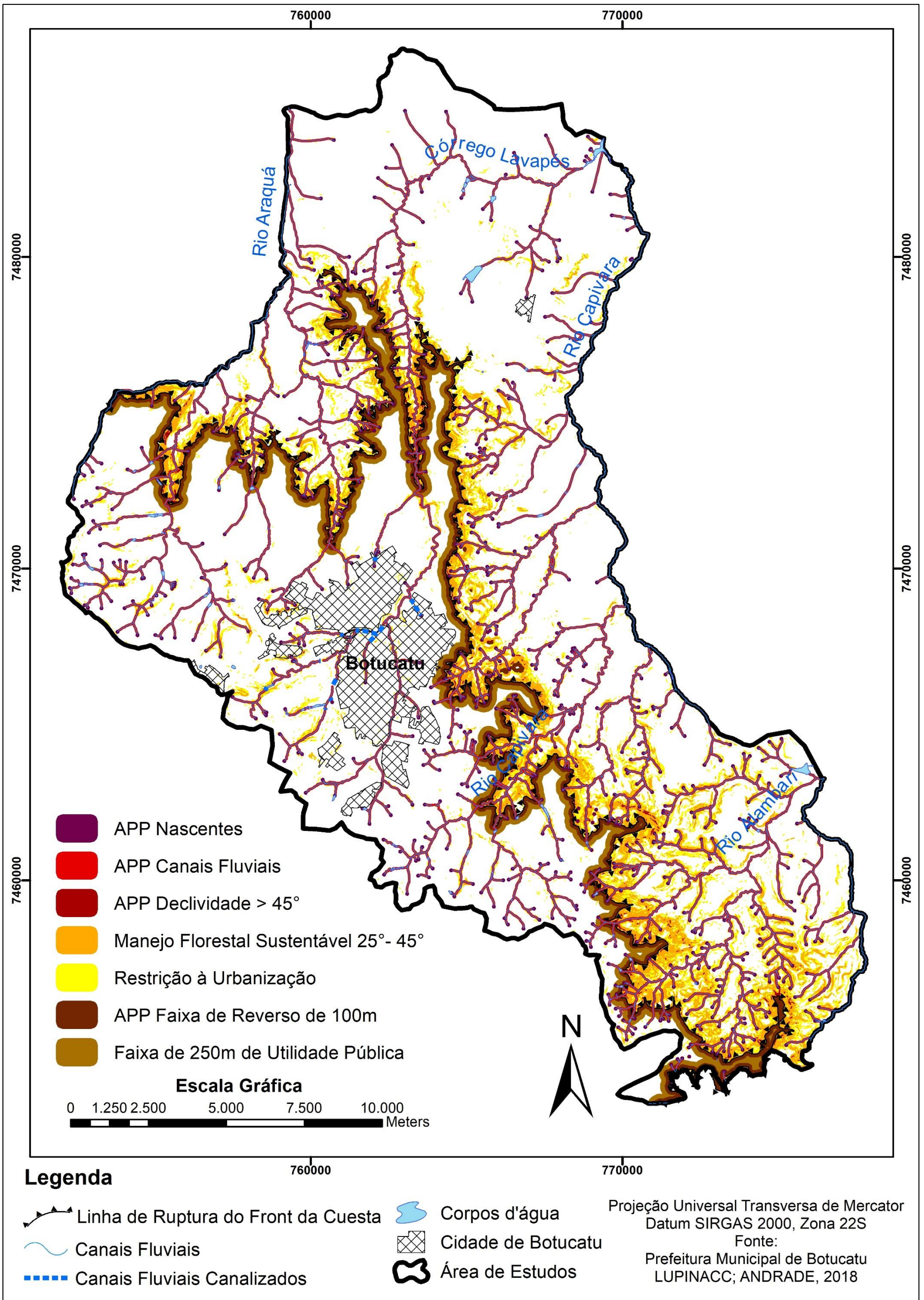
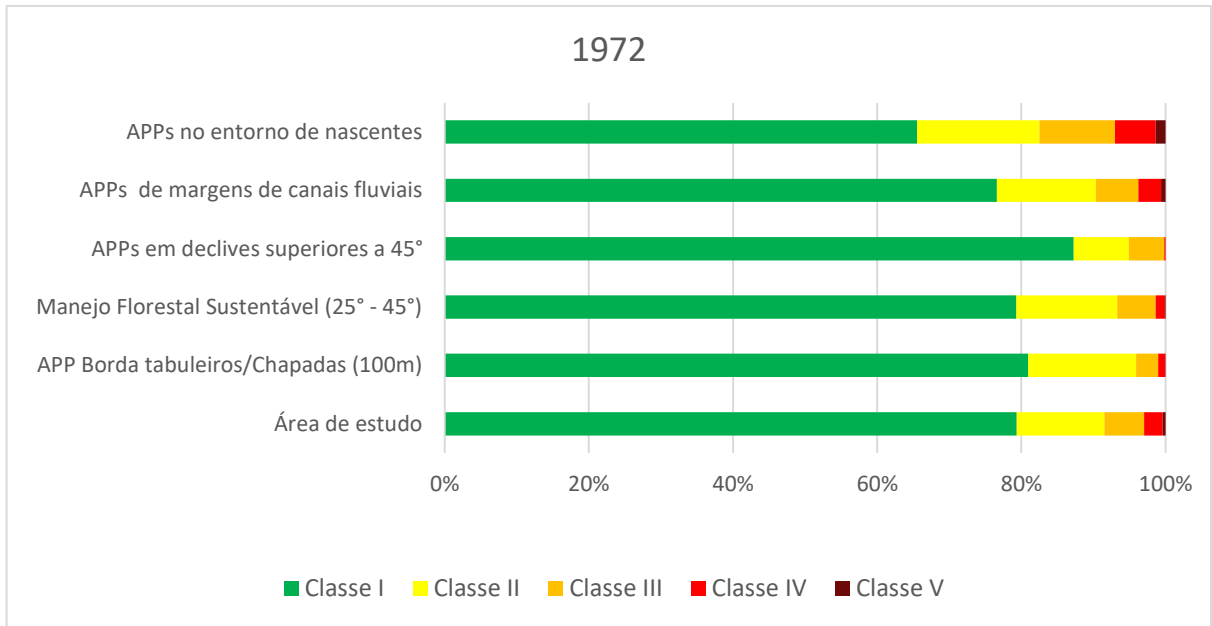


Figura 47: Mapa das áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010)

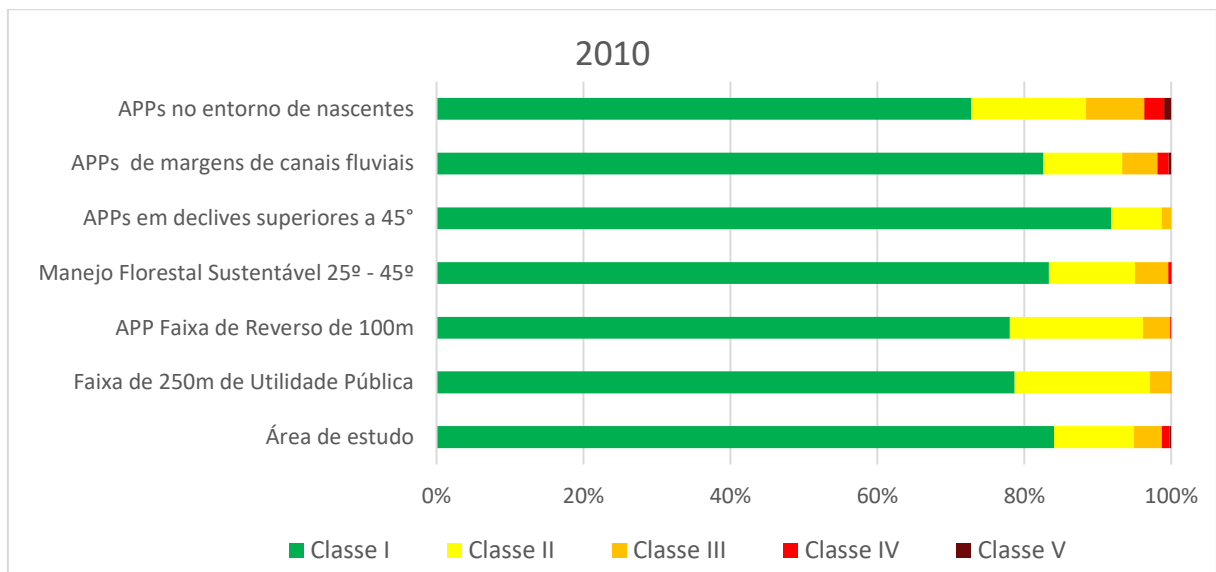
A fim de compreender a relação das áreas protegidas com as feições erosivas, possibilitando avaliar a eficiência da legislação ambiental vigente na proteção dos solos ao desenvolvimento de feições erosivas lineares, foi realizada a sobreposição das classes de densidade de feições erosivas com as áreas com restrições legais ao uso e ocupação (Tabela 6; Figuras 48 e 49). Inicialmente, é válido ponderar que o processo de interpolação utilizado na elaboração da densidade de feições erosivas lineares acarreta na extrapolação das classes para além dos limites das áreas protegidas ou da localização precisa dos processos erosivos, como exemplificado na Figura 50. Dessa forma, entende-se que a avaliação das classes de densidade de feições erosivas lineares no interior das áreas com restrições legais ao uso e ocupação pode contribuir com uma orientação acerca das relações entre a dinâmica erosiva e as áreas protegidas, indicando tendências neste processo. Entretanto, a fim de compreender com mais precisão as relações que se estabelecem entre estas variáveis foi preciso analisar em detalhe a localização das próprias feições em comparação com as áreas protegidas.

**Tabela 6:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação

Áreas protegidas pela legislação ambiental	Densidade de Feições Erosivas lineares									
	Classe I		Classe II		Classe III		Classe IV		Classe V	
	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
APPs no entorno de nascentes	65,5%	72,8%	17,0%	15,6%	10,5%	7,9%	5,6%	2,7%	1,4%	1,0%
APPs de margens de canais fluviais	76,6%	82,6%	13,7%	10,7%	5,9%	4,8%	3,2%	1,5%	0,6%	0,4%
APPs em declives superiores a 45°	87,3%	91,9%	7,7%	6,9%	4,9%	1,3%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%
Manejo Florestal Sustentável (25° - 45°)	79,3%	83,3%	14,0%	11,7%	5,3%	4,5%	1,3%	0,4%	0,1%	0,0%
APP Borda tabuleiros/Chapadas (100m)	81,0%	78,0%	15,0%	18,2%	3,1%	3,7%	0,9%	0,1%	0,0%	0,0%
Faixa de 250m de Utilidade Pública	-	78,7%	-	18,5%	-	2,8%	-	0,1%	-	0,0%
Área de estudo	79,4%	84,1%	12,2%	10,9%	5,5%	3,8%	2,6%	1,0%	0,4%	0,2%



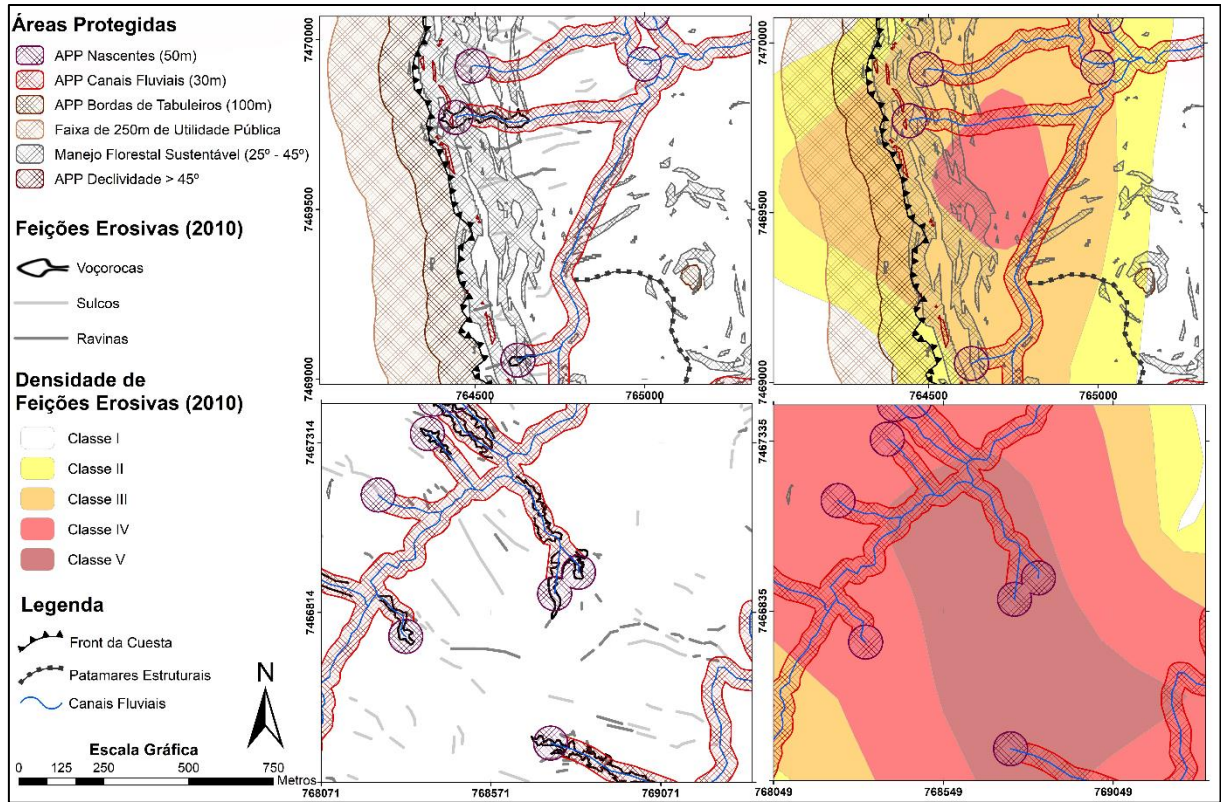
**Figura 48:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação em 1972



**Figura 49:** Distribuição das classes de densidade de feições erosivas lineares nas diferentes áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010)

O cruzamento das APPs no entorno de nascentes com as mais altas classes de densidade de feições erosivas lineares revelou que em diversos setores estas se sobrepõem nos dois cenários analisados (Tabela 6; Figuras 48 e 49). Tal associação demonstra a alta suscetibilidade ao desenvolvimento de voçorocamentos nas áreas de nascentes quando inexistente uma proteção por parte da vegetação na estabilização dos solos. Esta condição pode ser identificada a partir da comparação entre os dois cenários mapeados: nota-se que a diminuição nos valores de sobreposição entre as APPs no entorno de nascentes e as mais altas classes de densidade de

feições erosivas lineares entre 1972 e 2010 coincide com um expressivo aumento na vegetação florestal no interior das APPs no mesmo período (Tabela 6 e 7; Figuras 48; 49; 51; 52).



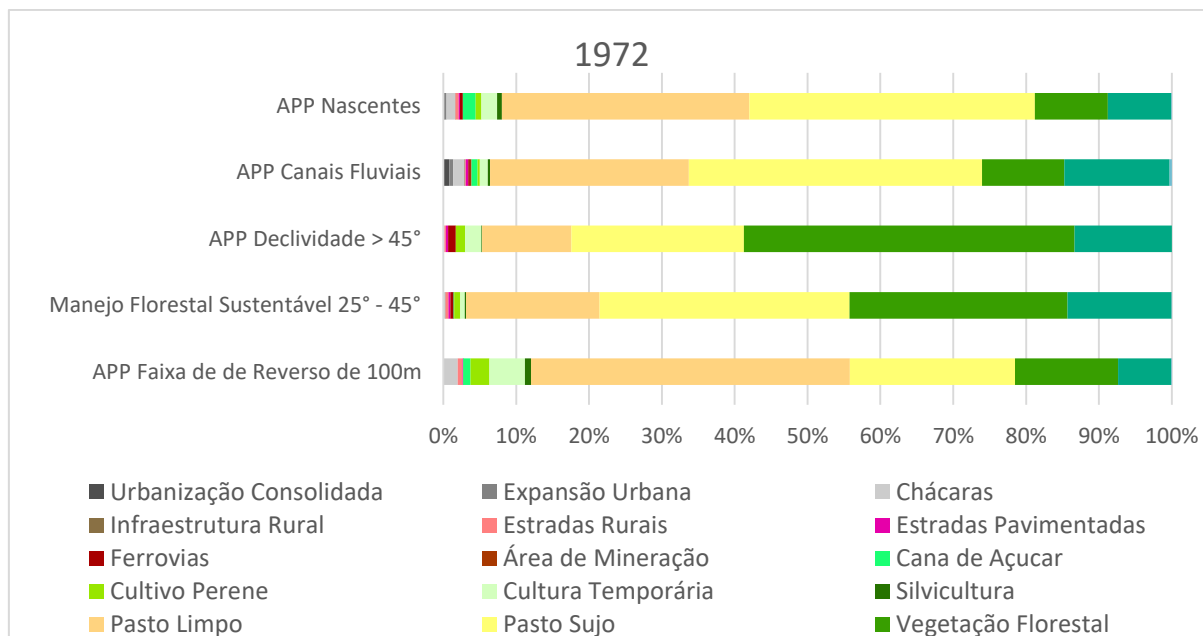
**Figura 50:** Comparação das áreas protegidas pela legislação ambiental com as feições erosivas e com as classes de densidade de feições erosivas lineares (2010)

**Tabela 7:** Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação

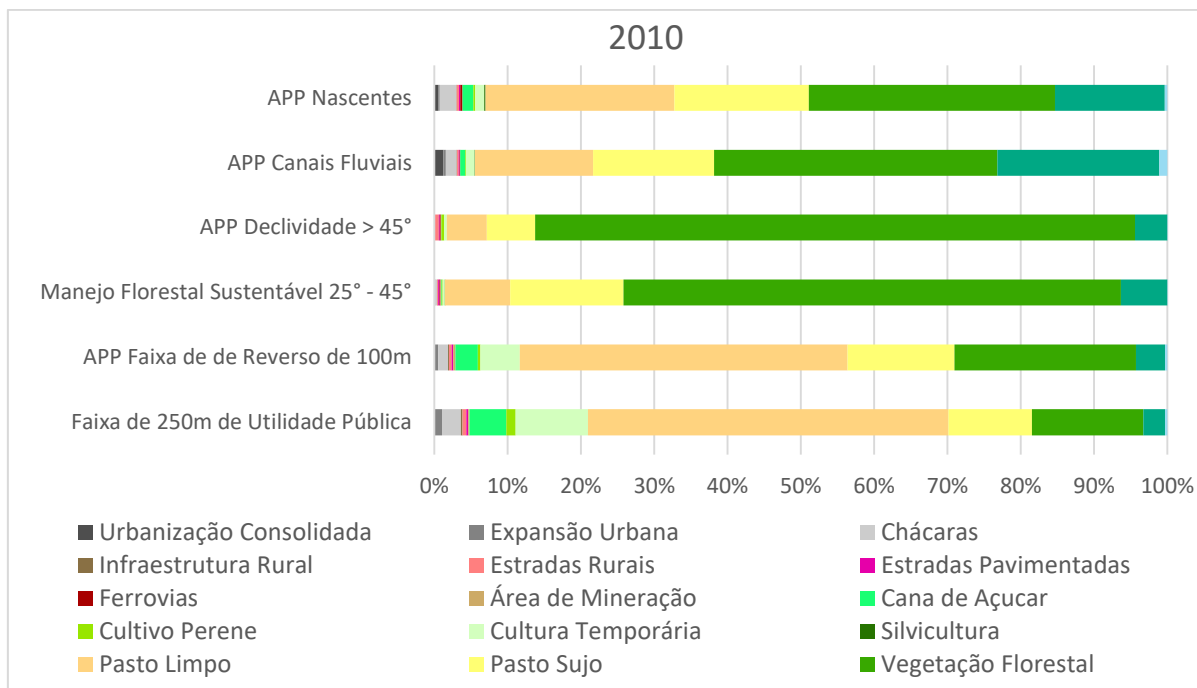
	APP Nascentes		APP Canais Fluviais		APP Declividade > 45°		Manejo Florestal Sustentável 25° - 45°		APP Faixa de de Reverso de 100m		Faixa de 250m de Utilidade Pública	
	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Urbanização Consolidada	0,1%	0,5%	0,8%	1,2%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	-	0,0%
Expansão Urbana	0,3%	0,2%	0,5%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,5%	-	1,0%
Chácaras	1,2%	2,3%	1,6%	1,5%	0,2%	0,0%	0,1%	0,2%	2,0%	1,4%	-	2,6%
Infraestrutura Rural	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	-	0,2%
Estradas Rurais	0,5%	0,3%	0,1%	0,2%	0,4%	0,6%	0,2%	0,2%	0,7%	0,4%	-	0,5%
Estradas Pavimentadas	0,2%	0,2%	0,3%	0,1%	0,3%	0,1%	0,3%	0,2%	0,1%	0,2%	-	0,3%
Ferrovias	0,4%	0,3%	0,2%	0,1%	0,5%	0,2%	1,1%	0,1%	0,0%	0,0%	-	0,0%
Área de Mineração	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,3%	-	0,2%
Cana de Açúcar	1,8%	1,5%	0,8%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	1,0%	3,0%	-	5,0%
Cultivo Perene	0,8%	0,3%	0,3%	0,1%	0,8%	0,4%	1,3%	0,1%	2,6%	0,4%	-	1,2%
Cultura Temporária	2,2%	1,2%	1,1%	1,2%	0,6%	0,3%	2,3%	0,3%	4,9%	5,4%	-	9,9%
Silvicultura	0,6%	0,2%	0,3%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,8%	0,0%	-	0,0%

	APP Nascentes		APP Canais Fluviais		APP Declividade > 45°		Manejo Florestal Sustentável 25° - 45°		APP Faixa de de Reverso de 100m		Faixa de 250m de Utilidade Pública	
	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010	1972	2010
Pasto Limpo	34,0%	25,7%	27,3%	16,1%	18,4%	5,5%	12,3%	8,9%	43,8%	44,7%	-	49,2%
Pasto Sujo	39,2%	18,4%	40,3%	16,5%	34,3%	6,6%	23,7%	15,4%	22,6%	14,6%	-	11,4%
Vegetação Florestal	10,0%	33,6%	11,3%	38,6%	29,9%	81,8%	45,4%	67,8%	14,2%	24,8%	-	15,2%
Vegetação Herbácea	8,7%	15,0%	14,5%	22,1%	14,3%	4,4%	13,3%	6,3%	7,3%	4,0%	-	3,0%
Corpos d'água	0,1%	0,4%	0,3%	1,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,3%	-	0,3%

Em 1972, apenas 10,0% das APPs no entorno de nascentes eram cobertas por vegetação florestal, sendo os pastos limpos e sujos os usos da terra mais recorrentes sobre estas áreas (Tabela 7; Gráfico 11). Em 2010, entretanto, a vegetação florestal passa a ocupar 33,6% das APPs no entorno de nascentes. É inegável que este significativo aumento das áreas vegetadas acarreta em um impacto relevante na estabilização e recuperação dos voçorocamentos. Ademais, cabe salientar que, o fato do critério utilizado na definição das voçorocas consistir no afloramento das águas subsuperficiais faz com que estas feições estejam necessariamente inseridas nas APPs de entorno de nascentes (Figura 40), assegurando a obrigatoriedade da manutenção ou recomposição da vegetação florestal no entorno das voçorocas.



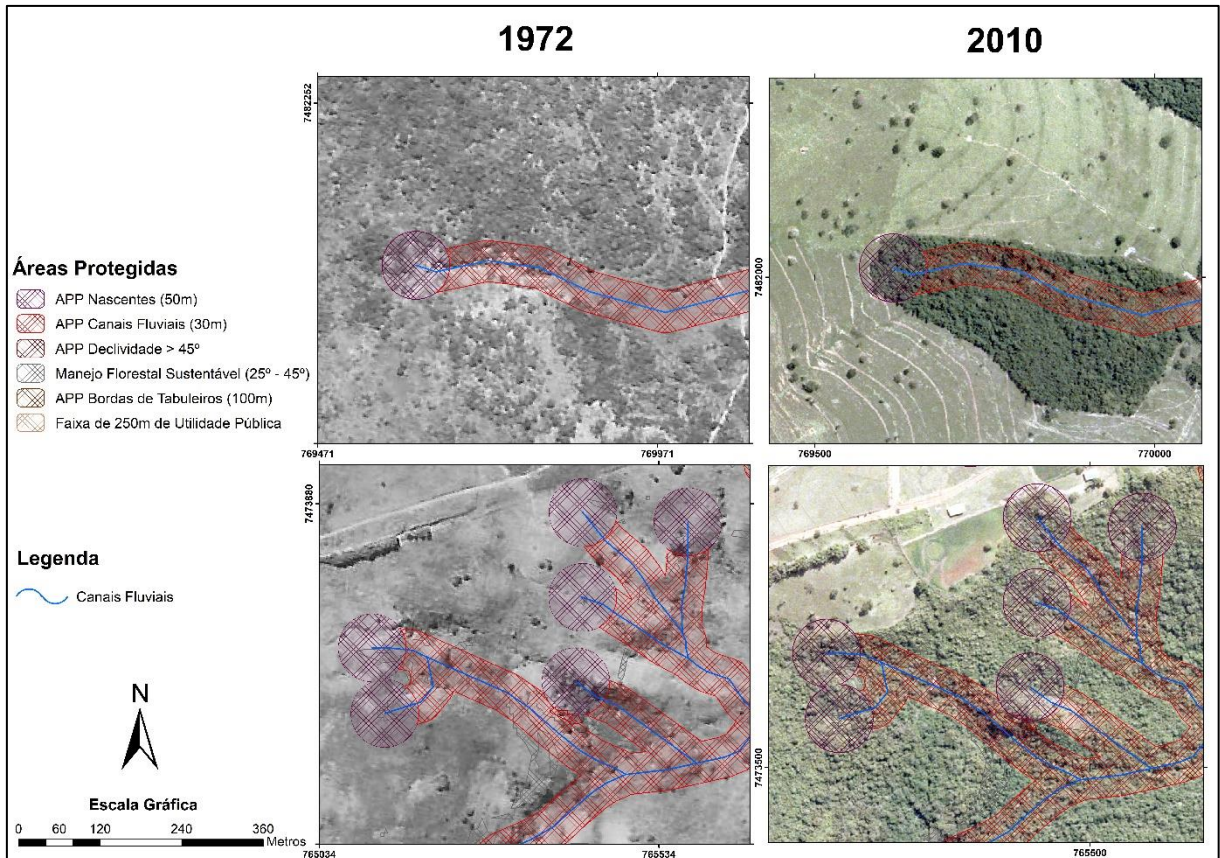
**Figura 51:** Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação (1972)



**Figura 52:** Uso da terra nas áreas com restrições legais ao uso e ocupação (2010)

No item 5.2 foram analisados os casos de diversas voçorocas que passaram por processos de aterramento visando obliterar as feições erosivas possibilitando assim a expansão urbana e instauração de culturas agrícolas sobre estas (Figuras 41 e 43). Porém, os casos de reflorestamento no entorno de nascentes também foram identificados na área, demonstrando que estas medidas foram adotadas no período analisado, trazendo resultados positivos no que diz respeito à proteção dos solos e das águas na região (Figura 53). Acrescenta-se ainda que, mesmo que a legislação demande a proteção de todas as nascentes, as discussões nos itens anteriores demonstraram a especial atenção que deve ser dada àquelas identificadas nos setores mais sensíveis ao desenvolvimento dos voçorocamentos, como por exemplo as cabeceiras de drenagem, próximas aos contatos litológicos, sobre o *front* cuestasiforme, próximo a áreas urbanizadas, estradas, rodovias, ferrovias, dentre outras.

Com relação às APPs nas faixas marginais de cursos d'água, identifica-se uma dinâmica semelhante à das APPs no entorno de nascentes. A sobreposição destas áreas protegidas com as mais altas classes de densidade de feições erosivas lineares aponta para uma alta sobreposição em ambos os cenários, apesar dos valores mais brandos que aqueles identificados sobre as APPs no entorno de nascentes (Tabela 6; Figuras 48 e 49). Porém, a análise dos setores onde se dão as sobreposições revelam que estas ocorrem em grande parte associadas aos canais de primeira ordem, próximo aos voçorocamentos nas nascentes dos cursos d'água.



**Figura 53:** Recuperação da vegetação no entorno de nascentes entre os anos de 1972 e 2010

Ademais, quando comparados os dois cenários, assim como na dinâmica verificada nas APPs no entorno de nascentes, nota-se que a diminuição da sobreposição das áreas protegidas com as classes mais altas coincide com o aumento das áreas de vegetação florestal concomitantemente à diminuição das pastagens sobre estas entre 1972 e 2010 (Tabela 6 e 7; Figuras 48; 49; 51; 52). Neste período, a vegetação florestal, que cobria 11,3% destas APPs em 1972, passa para 38,6% em 2010 (Tabela 7; Figuras 51 e 52). Com isso, os dados demonstram um impacto positivo na contenção dos processos erosivos em razão do aumento das áreas vegetadas nas APPs, evidenciando a necessidade de mantê-las preservadas, especialmente no interior das pastagens e no entorno de canais de primeira ordem. Entretanto, é preciso dar continuidade ao processo de recuperação das faixas marginais de cursos d'água a fim de garantir o cumprimento integral da legislação, aumentando assim a proteção das águas e dos solos.

Os conflitos ambientais nas APPs no entorno de nascentes e faixas marginais de cursos d'água não é só uma problemática local de Botucatu, como também foi constatado por Campos *et al* (2015), mas é recorrente em diversas regiões do Brasil (NEVES *et al*, 2009; BORGES; NEVES; CASTRO, 2011; COUTINHO *et al*, 2013; VILELA *et al*, 2021). Diversos trabalhos apontam que os conflitos nestas APPs estão majoritariamente associados a pastagens (NEVES

*et al*, 2009; BORGES; NEVES; CASTRO, 20011; CAMPOS *et al*, 2015). De acordo com NEVES *et al* (2009) provavelmente esta condição está associada a falta de medidas efetivas para a implementação e fiscalização deste regramento que já está estabelecido no Brasil desde o antigo Código Florestal (BRASIL, 1965), sendo caracterizada pelo autor com a expressão popular “lei que não pega”.

Ainda, Zanatta, Cunha e Boin (2014) destacam o impacto das reformas introduzidas pelo Novo Código Florestal (BRASIL, 2012), que além de dificultar a delimitação das APPs e conseqüentemente sua implementação, podem implicar em diminuições significativas nas áreas preservadas, comprometendo suas funções ambientais. Ademais, além dos benefícios das matas ciliares na prevenção e estabilização dos processos erosivos constatados nesta pesquisa e na bibliografia (ZANATTA; CUNHA; BOIN 2014), estas faixas de vegetação, a depender de sua largura, podem contribuir também com a contenção e filtragem de sedimentos e detritos do escoamento superficial; filtragem de poluentes; regulação do fluxo hídrico; estabilização das margens; habitat para fauna terrestre e aquática e corredores ecológicos (CRJC, 1998). Nesse sentido, julga-se necessário reforçar a crítica de Zanatta, Cunha e Boin (2014) às alterações na legislação trazidas pelo novo Código Florestal, dada a importância das faixas de vegetação na largura mínima de 50 metros para nascente e 30 metros para canais fluviais a fim de assegurar o cumprimento das funções ambientais da vegetação destes setores.

Outra condição que pode ser destacada tanto no caso das APPs no entorno das nascentes como nas faixas marginais de canais fluviais diz respeito ao considerável aumento nas áreas de vegetação herbácea entre os cenários de 1972 e 2010 (Tabela 7; Figuras 51 e 52). Tal aumento, possivelmente consiste em uma consequência da erosão acelerada, acarretando no abandono das terras, levando a um processo de restauração passiva, quando a área é cercada para que a vegetação se regenere naturalmente. Ainda, outro fator que possivelmente está associado a esse aumento é o assoreamento das nascentes e cursos d'água em decorrência do excesso de sedimentos.

Com relação às APPs sobre declives iguais ou superiores a 45°, os mapeamentos indicam que estas são identificadas em pontos específicos do *front da cuesta*, em seus setores mais íngremes (Figuras 46 e 47). Em ambos os cenários, estas áreas são as menos associadas às maiores classes de densidade de feições erosivas lineares, com 87,3% de sua área na Classe I em 1972 e 91,9% em 2010 (Tabela 6; Figuras 48 e 49). Apesar do declive acentuado, a fraca sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas lineares pode ser explicada pelos

solos serem muito rasos ou inexistentes, o que impede a ocorrência de feições erosivas sobre estes. Entretanto, a ausência de vegetação nestes setores pode implicar na intensificação dos fluxos de escoamento pluvial, acarretando no desenvolvimento dos processos erosivos a jusante.

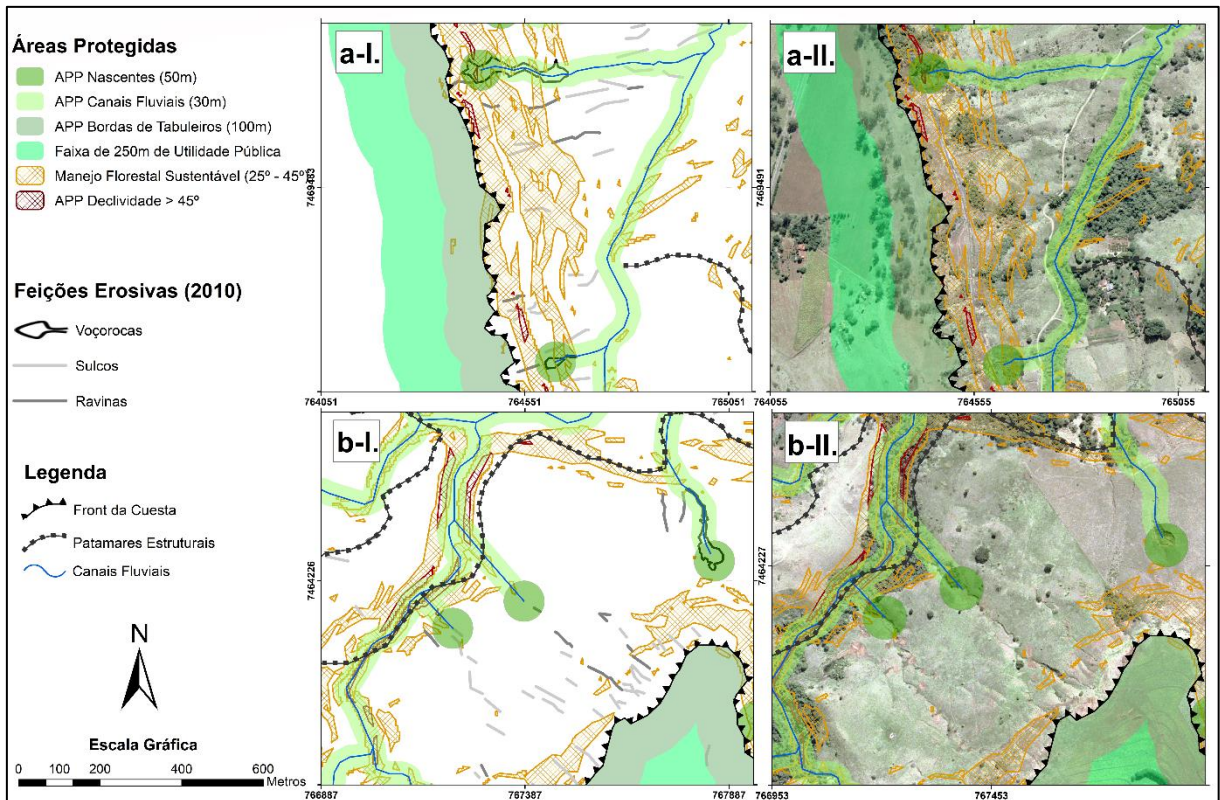
Além disso, as sobreposições com os tipos de uso da terra demonstram que as APPs em decliveis iguais ou superiores a 45° são as áreas protegidas proporcionalmente mais ocupadas pela vegetação florestal, a qual cobre 45,4% destes terrenos em 1972, chegando a 81,8% em 2010 (Tabela 7; Figuras 51 e 52). Tais resultados corroboram com os de Neves *et al* (2009) e Vilela *et al* (2021), que também constataram que as APPs associadas aos níveis de declividade são mais ocupadas pela vegetação florestal quando comparadas a outras APPs, provavelmente em razão das dificuldades de estabelecimento de outros tipos de uso da terra, como os cultivos agrícolas mecanizados, por exemplo.

Esse aumento da vegetação sobre as APPs coincide com uma diminuição em sua sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas lineares, a maioria associada a feições erosivas identificadas abaixo dos terrenos de maior declive. Dessa forma, fica evidente o efeito da manutenção da vegetação nestas áreas para a redução das formas erosivas. Entretanto, é preciso ressaltar que, pelo fato destes declives serem encontrados em setores muito restritos, sem que haja uma continuidade ao longo do *front*, entende-se que a preservação destes terrenos, apesar de importante, é insuficiente para assegurar a proteção dos solos nas *cuestas* de Botucatu.

No caso das áreas de manejo florestal sustentável (declividade entre 25° e 45°), estas são identificadas de maneira descontínua, sobre os setores mais declivosos do *front*, por quase toda sua extensão (Figuras 46 e 47). Quando é feita a sobreposição destas áreas com as classes de densidade de feições erosivas lineares, porém, não se identifica altos valores de sobreposição com as classes II e III, como foi identificado sobre o *tálus*, no subcapítulo 5.1. Tal constatação sugere que, apesar da elevada concentração de sulcos, ravinas e pequenas voçorocas sobre o *front* cuestiforme, estas feições não necessariamente estão concentradas sobre as áreas de manejo florestal sustentável, podendo se desenvolver sobre setores menos íngremes do *front*.

A fim de compreender melhor essa condição, a análise dos mapeamentos possibilitou constatar que as feições erosivas lineares sobre o *front* ocorrem por vezes sobre as áreas de manejo florestal sustentável (Figuras 54 a e 55), mas também em setores menos íngremes do relevo (Figuras 54 b e 55). Tais resultados reforçam o entendimento de que os processos

erosivos lineares desenvolvidos sobre o *front* cuestasiforme possuem uma natureza complexa, condicionada por múltiplos fatores para além do declive. Nesse sentido, entende-se que o aumento da cobertura vegetal sobre os setores mais íngremes pode contribuir com a proteção dos solos no local, mas também nos setores abaixo, devido à quebra de energia do escoamento pluvial. Entretanto, resta saber se a adesão a essa legislação é suficiente para garantir a proteção dos solos sobre o *front*.



**Figura 54:** Relação das feições erosivas lineares desenvolvidas sobre o front com as áreas de manejo florestal sustentável

A análise das relações espaciais possibilitou constatar que a redução na sobreposição das mais altas classes de densidade de feições erosivas lineares com as áreas de manejo florestal sustentável entre 1972 e 2010 (Tabela 6; Figuras 48 e 49) coincide com o expressivo aumento da vegetação florestal sobre as mesmas, passando de 29,9% em 1972 para 67,8% em 2010 (Tabela 7; Figuras 51 e 52). Tal fato demonstra que esse aumento teve um impacto significativo na redução das erosões no *front* cuestasiforme, tanto sobre os declives mais acentuados como também sobre os mais brandos no entorno. Portanto, é possível afirmar que a recuperação da vegetação nestes terrenos do *front* cuestasiforme é de grande importância para proteção aos processos erosivos lineares tanto nos setores mais íngremes, como nos menos inclinados, típicos do *tálus*.

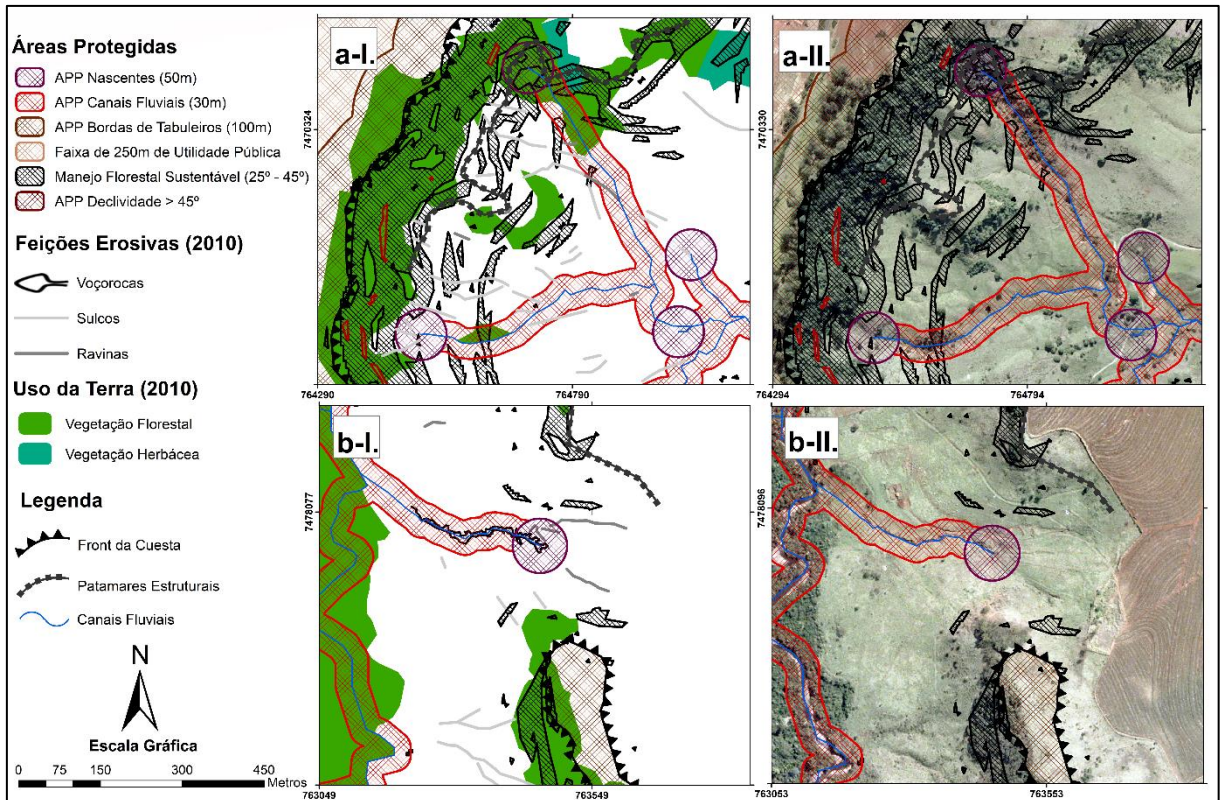


**Figura 55:** Distribuição das feições erosivas lineares sobre o front, nas áreas de declive mais acentuado ou mais brando, próximo à Usina Indiana, Botucatu – SP

**Fonte:** Os autores, 30/07/2021

Porém, também foram identificados locais onde as áreas de manejo florestal sustentável estavam majoritariamente cobertas por fragmentos de vegetação florestal e mesmo assim as pastagens a jusante continham feições erosivas lineares, apesar de menores em dimensão e quantidade (Figura 56 a). Ainda, identificaram-se também feições erosivas em setores do *front* onde não havia pontos que atingiam os declives de 25° e, portanto, não estão protegidas pela legislação vigente (Figura 56 b). Dessa forma, constata-se que, apesar da importância das áreas de manejo florestal sustentável na proteção dos solos no *front* custiforme, a manutenção da vegetação apenas nestes setores não assegura por completo a contenção dos processos erosivos sobre o *front*, sendo necessário avaliar outras formas de garantir tal condição.

Além disso, as áreas de manejo florestal sustentável também foram identificadas no reverso e na Depressão Periférica (Figuras 46 e 47) associadas aos patamares estruturais. A relação identificada entre estas estruturas e as feições erosivas lineares, especialmente no reverso, sugere que a manutenção da vegetação também pode contribuir com uma maior proteção dos solos. Porém, pelo fato destes locais estarem especialmente associados à degradação por voçorocamentos em razão da elevada quantidade de nascentes, é preciso que a manutenção da vegetação sobre as áreas de maior declive esteja acompanhada pela proteção das nascentes e canais fluviais, garantindo maior eficiência na proteção dos solos e águas nestes setores.



**Figura 56:** Feições erosivas lineares desenvolvidas sobre o front fora das áreas de manejo florestal sustentável

Com relação às áreas com declive entre  $16,7^\circ$  e  $25^\circ$ , com restrições à urbanização segundo a Lei Lehman (BRASIL, 1979), nota-se que as áreas urbanas ou de expansão urbana raramente avançam sobre estes locais. Em geral, tais declives são encontrados no sopé da *cuesta* e em patamares estruturais, tanto na Depressão Periférica como no reverso. As áreas urbanizadas que se distribuem pelo reverso cuestiforme raramente se sobrepõe a esses terrenos, respeitando, no geral, os limites do declive para a urbanização. Os raros locais onde a urbanização desrespeita os limites impostos pela Lei Lehman, correspondem principalmente às baixas vertentes, as quais também estão inseridas nas APPs de faixa marginal de cursos d'água.

Entretanto, é preciso ressaltar que os processos erosivos sobre os declives mais acentuados, especialmente próximos aos patamares estruturais, podem ser ativados pelo despejo das águas pluviais sobre estes, sem que a área urbana se estabeleça diretamente nestes terrenos. Dessa forma, é necessário considerar as limitações do relevo no processo de planejamento da expansão da malha urbana e rede viária, de modo a garantir que tais infraestruturas, quando estabelecidas sobre os patamares estruturais, possuam um sistema de drenagem adequando, que não despeje os efluentes sobre os declives.

No caso da APP na borda de tabuleiros ou chapadas, identificada no reverso da *cuesta* e em morros testemunhos, a sobreposição com as classes de densidade de feições erosivas

lineares, principalmente as classes II e III, demonstra que esses terrenos estão associados aos processos erosivos no *front* e no próprio reverso. A análise dos mapeamentos mostra que frequentemente as feições erosivas que dão origem às classes de densidade que se sobrepõe à faixa de reverso ocorrem no *front* cuestasiforme. Entretanto, também foi possível identificar locais em que as erosões se iniciam sobre declives mais suaves do reverso e se intensificam a partir da linha de ruptura (Figura 57), ou setores onde as feições erosivas se iniciam a partir da linha de ruptura do relevo, mas se desenvolvem em decorrência dos fluxos de escoamento provenientes do reverso (Figura 58).



**Figura 57:** Feições erosivas lineares sobre o reverso e *front* cuestasiforme, em setor onde a APP de borda de tabuleiros ou chapadas é ocupada por pastagens, próximo à Usina Indiana, Botucatu – SP

**Fonte:** Os autores, 30/07/2021

Nesse sentido, entende-se que a presença de faixas de vegetação próximas à linha de ruptura no *front* da *cuesta* tem um efeito na quebra de energia do escoamento pluvial em direção ao *front*, auxiliando na redução das feições erosivas sobre estes terrenos. Entretanto, salienta-se que esta medida deve ser acompanhada pela presença da vegetação também nos setores mais íngremes a partir da linha de ruptura, a fim de garantir a proteção necessária aos solos sobre o *front*.



**Figura 58:** Feições erosivas lineares sobre o front, em um setor onde a APP de borda de tabuleiros ou chapadas é ocupada por pastagens, próximo à Chácara Recreio Vista Alegre, Botucatu – SP

**Fonte:** Os autores, 30/07/2021

Outro ponto que chama a atenção neste caso é o fato de, mesmo com o aumento na área de vegetação florestal sobre a APP na borda de tabuleiros ou chapadas entre os anos de 1972 e 2010, que passam de 14,2% para 24,8% (Tabela 7; Figuras 51 e 52), esta corresponde a única categoria de área protegida mapeada nos dois cenários que registrou aumento na sobreposição com as classes II e III entre 1972 e 2010 (Tabela 6; Figuras 48 e 49). A análise dos mapeamentos, entretanto, não possibilitou identificar um padrão que explique essas variações. Frequentemente, o aumento na sobreposição das classes de densidade de feições erosivas lineares com a APP de borda de tabuleiros ou chapadas em alguns locais coincide com a diminuição em outros, em razão de alterações no uso da terra fora da faixa de proteção ambiental, principalmente sobre o *front*. Dessa forma, não foi possível constatar alterações significativas na dinâmica erosiva em razão do aumento das áreas vegetadas no reverso cuestasiforme.

O trabalho de Neves *et al* (2009) também registra a pequena quantidade de vegetação florestal nas APPs em bordas de tabuleiros ou chapadas na alta bacia do Ribeirão João Leite, em Goiás, inclusive em comparação com outras categorias de APPs. Nesse sentido, Martins e Salgado (2016) apontam que as dificuldades conceituais na definição de tabuleiros e chapadas constituem um problema adicional na implementação e fiscalização das áreas protegidas nestes setores.

No caso da faixa de proteção do reverso das *cuestas*, implementada no ano de 1990 através da Lei Orgânica do Município de Botucatu, verifica-se uma dinâmica semelhante àquela encontrada sobre a APP de borda de tabuleiros ou chapadas. Neste caso, constatou-se um aumento na quantidade de feições erosivas quando estas são cruzadas por estradas rurais ou pavimentadas, acarretando na sobreposição destas áreas com classes II ou III de densidade de feições erosivas. Estes resultados demonstram a sensibilidade da faixa de terras de Utilidade Pública a essas estruturas, fator que merece destaque devido ao processo de expansão urbana de Botucatu em direção ao *front*. Já existem locais em que as áreas de expansão urbana invadem a faixa de reverso, o que também foi registrado por Andrade, Lupinacci e Stefanuto (2019) a partir de uma avaliação de imagem orbital de 2018.

O risco da expansão urbana sobre estes setores é que o sistema de drenagem urbana ou as calhas das estradas causam um aumento do escoamento de superfície na direção do *front*, os quais, potencializados pelo declive, podem levar ao desenvolvimento de profundos voçorocamentos, como o que foi identificado em campo (Figura 59). Dessa forma, entende-se a importância do regramento municipal para a contenção da expansão urbana em direção ao *front* cuestasiforme. Ainda, visto o impacto das estradas e ferrovias na ativação dos processos erosivos nestes locais, constata-se a necessidade de maior atenção nas obras de drenagem destas estruturas quando identificadas sobre as áreas protegidas.

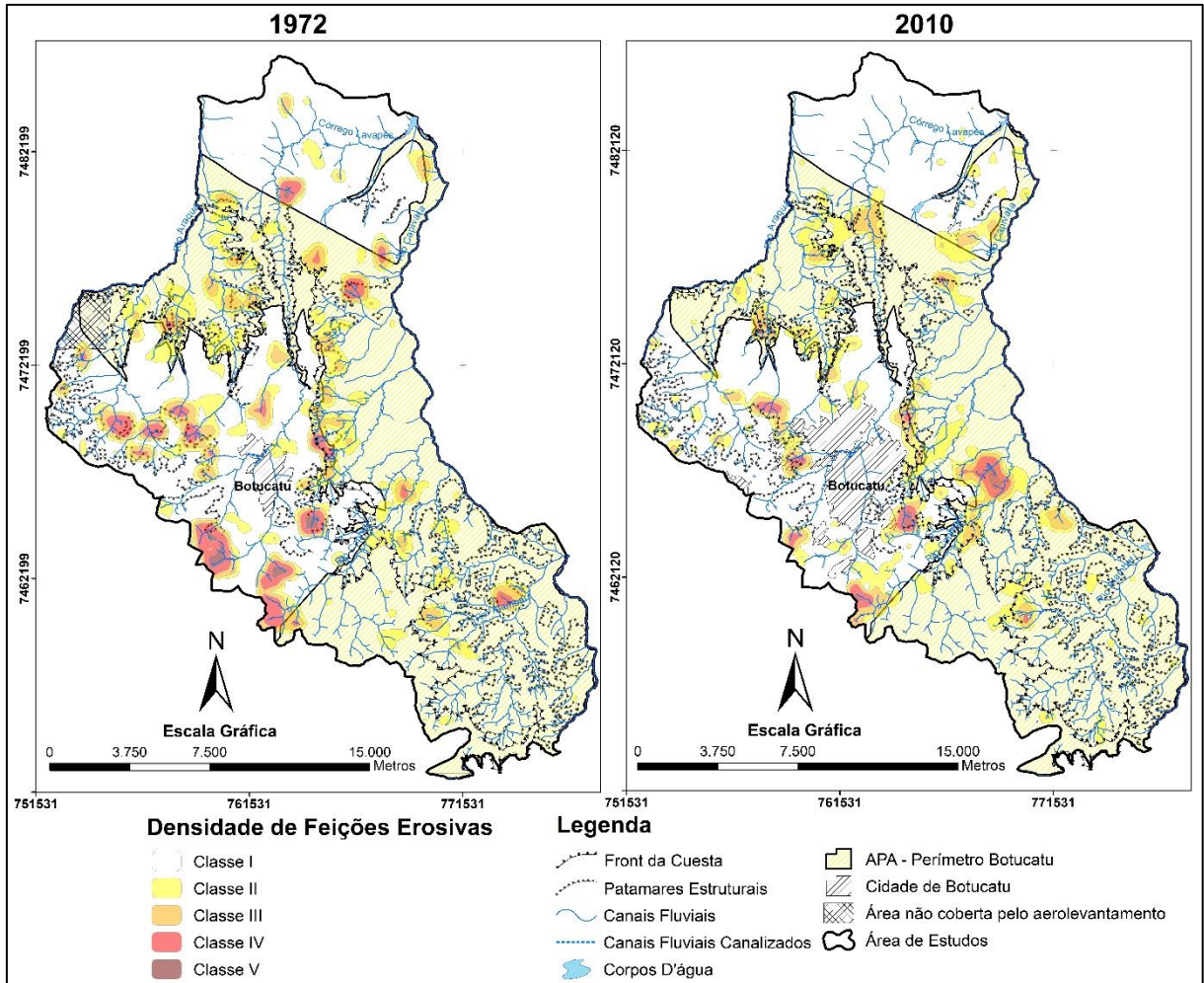


**Figura 59:** Voçoroca desenvolvida a partir de drenagem urbana sobre o front da cuesta no bairro Jardim Monte Mor – Botucatu (SP)

**Fonte:** Os autores, 31/05/2021

Por fim, cabe destacar também a relação da densidade de feições erosivas com a área da APA Corumbataí Botucatu Tejujá – Perímetro Botucatu, implementada pelo governo paulista

em 1983 com o objetivo de proteger “as Cuestas Basálticas, Morros Testemunhos (...), exemplares significativos da flora e fauna regional, o Aquífero Guarani e o Patrimônio Cultural da região” (SÃO PAULO, 2011, p. 4). Quando os limites da unidade de conservação, que extrapolam os da área de estudos, são cruzados com as classes de densidade de feições erosivas lineares, nota-se que diversos setores atingidos por elevadas densidades de feições erosivas lineares nas cabeceiras de drenagem não estão inseridos no território da APA (Figura 60).



**Figura 60:** Relação das classes de densidade de feições erosivas com os limites da APA Corumbataí, Botucatu, Tejujá – Perímetro Botucatu

**Fonte:** Datageo (2022)

Nesse sentido, a presente pesquisa demonstrou que as cabeceiras de drenagem, eventualmente associadas a patamares estruturais, fazem parte da dinâmica do relevo cuestasiforme e são áreas especialmente sensíveis à degradação por processos erosivos. Dessa forma, constata-se a importância da aplicação de políticas públicas direcionadas a proteção destes setores visando uma maior proteção dos solos e das águas nas Cuestas Paulistas, visto que a dinâmica erosiva nas cabeceiras também pode implicar em uma série de impactos

ambientais a jusante, como por exemplo o assoreamento dos cursos d'água. Além disso, destaca-se a expansão urbana em direção às cabeceiras de drenagem, um padrão de uso da terra de grande impacto sobre a dinâmica erosiva e que também pode estar associada a outras formas de degradação ambiental. Dessa forma, entende-se que a inclusão das cabeceiras de drenagem nos limites da APA pode contribuir com limitações à expansão urbana nestes locais e, conseqüentemente, com a proteção ambiental das Cuestas Paulistas, conforme estabelecido dentre as funções da unidade de conservação.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa permitiu, primeiramente, avaliar a distribuição da densidade de feições erosivas lineares a partir dos mapeamentos elaborados, os quais demonstraram sua eficiência na identificação dos terrenos com solos comprometidos pela concentração de sulcos, ravinas e voçorocas. Cabe ressaltar que as áreas atingidas por voçorocamentos indicam densidades de feições erosivas superiores aos terrenos atingidos por sulcos e ravinas e a técnica de interpolação e espacialização da densidade de feições erosivas adotada possibilitou analisar a influência dos fatores no entorno das feições erosivas e não apenas dos elementos localizados sob estas. Em seguida, o cruzamento das classes de densidade com as variáveis físicas e humanas presentes no recorte de análise permitiram identificar as correlações entre estes fatores, os quais se apresentam de modo resumidos no Quadro 5.

Densidade de Feições Erosivas Lineares	Compartimento do Relevo	Embasamento Litológico	Classes de Solos	Uso da Terra	Áreas protegidas pela legislação ambiental
<b>Classe I</b> (0 -  10m/ha)	Depressão Periférica; setores do <i>front</i> cobertos pela vegetação; reverso cuestasiforme	Formações Pirambóia, Serra Geral	Argissolos Vermelho Amarelo e Nitossolos Vermelho	Urbanização consolidada; cana de açúcar; silvicultura;	Fora das áreas protegidas, ou sobre estas quando estão de acordo com o uso previsto
<b>Classe II</b> (10 -  20 m/ha)	<i>Front</i> cuestasiforme; eventualmente patamares estruturais na Depressão Periférica e reverso	Contatos litológicos entre as Fm. Serra Geral e Botucatu	Neossolos Litólicos e Nitossolos Vermelhos, especialmente próximo aos contatos deste com coberturas mais arenosas	Pastagens	Áreas de manejo florestal sustentável; APP na borda de Tabuleiros ou Chapadas; Faixa de 250 metros do reverso da <i>cuesta</i>
<b>Classe III</b> (20 -  40 m/ha)	<i>Front</i> cuestasiforme; eventualmente patamares estruturais na Depressão Periférica e reverso	Contatos litológicos entre as Fm. Serra Geral e Botucatu	Neossolos Litólicos e Nitossolos Vermelhos, especialmente próximo aos contatos deste com coberturas mais arenosas	Pastagens, eventualmente associadas à estradas, rodovias e ferrovias	Áreas de manejo florestal sustentável.

Densidade de Feições Erosivas Lineares	Compartimento do Relevo	Embasamento Litológico	Classes de Solos	Uso da Terra	Áreas protegidas pela legislação ambiental
<b>Classe IV</b> (40 -  80 m/ha)	Reverso, nas cabeceiras de drenagem eventualmente associadas a patamares estruturais; eventualmente sobre o <i>front</i> e Depressão Periférica	Contatos litológicos entre as Fm. Marília e Serra Geral ou Depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos; nos contatos entre a Formação Pirambóia e Depósitos Holocênicos	Latossolos Vermelho e Latossolos Vermelho Amarelo	Associadas a pastagens e ao despejo pluvial de rodovias, ferrovias e áreas de expansão Urbana	APPs no entorno de nascentes e canais fluviais de primeira ordem
<b>Classe V</b> (80 -  160 m/ha)	Reverso, nas cabeceiras de drenagem; eventualmente na Depressão Periférica	Contatos litológicos entre as Fm. Marília e Serra Geral ou Depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos; os contatos entre a Formação Pirambóia e Depósitos Holocênicos	Latossolos Vermelho e Latossolos Vermelho Amarelo	Associadas a pastagens e ao despejo pluvial de rodovias, ferrovias e áreas de expansão Urbana	Associadas à APPs no entorno de nascentes e canais fluviais de primeira ordem

**Quadro 5:** Correlação da densidade de feições erosivas lineares com os compartimentos do relevo, embasamento litológico, classes de solos, uso da terra e áreas protegidas pela legislação ambiental.

Os mapas de densidade de feições erosivas lineares possibilitaram a constatação de uma elevada concentração de voçorocamentos no reverso, nas cabeceiras de drenagem (Quadro 5). Estes setores encontram-se majoritariamente associados a contatos litológicos entre as Formações Marília e Serra Geral, eventualmente marcados por patamares estruturais, e contatos entre os depósitos Pliocênicos-Pleistocênicos com a Formação Marília. Dessa forma, ficou evidente a relação entre os contatos de formações mais arenosas com formações menos permeáveis na base e o desenvolvimento dos voçorocamentos. Ainda, identificou-se também uma elevada concentração de sulcos, ravinas e pequenas voçorocas sobre o *front* (Quadro 5), as quais tem seu desenvolvimento potencializado pelo declive acentuado, depósitos coluvionares pouco desenvolvidos e transições entre solos mais argilosos, de origem basáltica, e mais arenosos, oriundos de formações mais areníticas.

Constatou-se ainda que, onde havia a presença de patamares estruturais sob o *front*, acarretando em um escalonamento do relevo, havia um maior número de feições erosivas lineares. Além da fragilidade natural destes setores em razão dos contatos litológicos e a

transição entre coberturas pedológicas heterogêneas, notou-se que estes terrenos, que possuem um declive mais suavizado em razão dos patamares estruturais, estão mais propensos à instalação de outros tipos de uso da terra, principalmente pastagens, estradas e linhas férreas. Dessa forma, a combinação do uso da terra com as características naturais do terreno foi determinante para a ocorrência de elevadas concentrações de feições erosivas lineares.

Com relação aos solos, identificou-se que as voçorocas nas cabeceiras de drenagem encontravam-se majoritariamente sobre Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelo (Quadro 5). As feições erosivas sobre o *front*, por sua vez, estavam majoritariamente associadas aos Nitossolos Vermelhos e Neossolos Litólicos (Quadro 5). Ainda, foram identificados também voçorocamentos na Depressão Periférica em áreas de transição entre os Argissolos Vermelho-Amarelo e os Latossolos Vermelho-Amarelo (Quadro 5), sugerindo que a transição entre estes cria condições mais favoráveis ao desenvolvimento de voçorocamentos devido a influência das variações texturais entre os horizontes sobre a dinâmica do escoamento subsuperficial.

No que diz respeito à relação entre as feições erosivas e o uso da terra, os mapeamentos da densidade de feições erosivas lineares de 1972 e 2010 mostram que a diminuição nas mais altas classes de densidade no cenário mais recente coincide com uma diminuição significativa na área ocupada por pastos sujos, concomitantemente ao aumento nas áreas de urbanização consolidada, cana de açúcar e vegetação florestal. Além disso, o cruzamento entre os mapeamentos de densidade de feições erosivas lineares e o uso da terra em ambos os cenários mostraram que a maior parte dos sulcos, ravinas e voçorocas identificadas encontram-se em pastagens, mas muitas vezes estão associadas a áreas de expansão urbana, estradas, rodovias e ferrovias que despejam águas pluviais sobre as pastagens no entorno (Quadro 5). Ainda, as maiores concentrações de feições erosivas lineares estão associadas aos locais onde as pastagens recobrem os locais mais sensíveis do ponto de vista erosivo, como o *front* e as cabeceiras de drenagem.

Constatou-se também que a expansão urbana no reverso cuneiforme, assim como nos canaviais no reverso ou Depressão Periférica, acarretaram em processos de aterramentos e obliterações das feições erosivas. Tal condição implicou em uma redução nas classes de densidade de feições erosivas lineares. Entretanto, resta avaliar se tais medidas trazem resultados positivos do ponto de vista da conservação dos solos e águas na região ou

correspondem a medidas paliativas que implicam em outros tipos de impactos aos recursos naturais.

No que diz respeito ao efeito da legislação ambiental, verificou-se a importância da manutenção da vegetação nas APPs no entorno de nascentes e canais fluviais para a preservação dos solos, especialmente na prevenção a processos de voçorocamento (Quadro 5). Da mesma forma, as APPs em declives iguais ou superiores a 45°, assim como as áreas de manejo florestal sustentável, identificadas sobre declives entre 25° e 45° são de grande importância para a contenção aos processos erosivos, especialmente sobre o *front* cuestasiforme (Quadro 5).. Entretanto, a identificação de feições erosivas sobre o *front* em declives mais brandos indica que essas medidas podem ser insuficientes para conter por completo o desenvolvimento de feições erosivas lineares em alguns setores do *tálus*.

Por fim, a manutenção da vegetação na APP na borda de tabuleiros e chapadas demonstrou sua importância na quebra do escoamento pluvial em direção ao *front*, contribuindo com a atenuação da dinâmica erosiva neste setor, apesar de possuir um efeito menos significativo na contenção dos processos erosivos quando comparado a importância das demais APPs. Entretanto, a faixa de 250 metros de utilidade pública sobre o reverso das *cuestas* de Botucatu demonstrou ser um instrumento de grande importância para a contenção da expansão urbana em direção ao *front* e pode ser utilizada também a fim de garantir maior cuidado nas obras de drenagem das estradas, rodovias e ferrovias nesta área, a fim de impedir o desenvolvimento de feições erosivas em virtude do despejo das águas pluviais sobre os declives da *cuesta*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. A Terra Paulista. **Boletim Paulista de Geografia**, São Paulo, n. 23, p. 5 - 38, 1956.
- AB'SABER, A. N. Regiões de Circundesnudação Pós-Cretácea, no Planalto Brasileiro. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 1, p. 3–21, 1949.
- AGUILAR, R. L.; CUNHA, C. M. L. Análise morfoestrutural de um setor da Serra da Atalaia, Analândia/Corumbataí (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 8, n. 5, p. 1410-1434. 2015.
- ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1974. 109p. (Série Teses e Monografias, n. 14).
- ANDRADE; R. V.; LUPINACCI, C. M.; STEFANUTO, E. B. ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DA TERRA EM FAIXA DE PROTEÇÃO NO REVERSO DA CUESTA DE BOTUCATU (SP). In: XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2019, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2019, p. 1–12.
- ANDRADE; R. V.; LUPINACCI, C. M. PROPOSTA PARA A CARTOGRAFIA DE FAIXA DE PROTEÇÃO DO REVERSO DAS CUESTAS: UM ESTUDO DE CASO EM BOTUCATU (SP). **Caderno Prudentino de Geografia**. n. 43, v. 2, p. 75-96. 2021
- ARRAES, C. L.; BUENO, C. R. P.; PISSARRA, T. C. T. Estimativa da erodibilidade do solo para fins conservacionistas na microbacia Córrego do Tijuco, SP. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 849-857, 2010.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. A ocorrência de voçorocas em Gouveia, MG: Características e Processos Associados. **Geonomos**. n.14, p.75-86, 2006a.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em Área de Voçorocamento, Noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**.V. 7, n. 1, p. 09-18, 2006b.
- BACELLAR, L. A. P., NETTO, A. L. C., & LACERDA, W. FATORES CONDICIONANTES DO VOÇOROCAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MARACUJÁ, OURO PRETO, MINAS GERAIS. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2001, p. 1–8.
- BERNARDELLI, Valéria Coghi. **Diagnóstico das Alterações Geomorfológicas em Área de Expansão Urbana no Setor Sul de Araras (Sp):** subsídio para o planejamento urbano. 2019. 199f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2019.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012.
- BEZERRA, M. A.; ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R. CASADO, F. C. Análise geoambiental da região de marília, SP: Suscetibilidade a processos erosivos frente ao histórico de ocupação da área. **Geociências**, v. 28, n. 4, p. 425–440, 2009.
- BLANCO, H.; LAL, R. **Principles of soil conservation and management**. Springer. 2008. 245 p.
- 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**, v.15 n. 04, p. 1947-1964, 2022

BORGES, R. O.; NEVES, C. B.; CASTRO, S. S. Delimitação de Áreas de Preservação Permanente determinadas pelo relevo: Aplicação da legislação ambiental em duas microbacias hidrográficas no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 109-114, 2011

BOTUCATU. **Lei Complementar Nº 1224/2017**. Dispõe sobre o Plano Diretor Participativo do Município de Botucatu e dá outras providências. Botucatu: Prefeitura Municipal, 2017. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-botucatu-sp>. Acesso em: 03 jul. 2019

BOTUCATU. **Lei Orgânica do Município de Botucatu de 05 de Abril de 1990**. Botucatu: Câmara Municipal de Botucatu, 1990. Disponível em [http://www.camarabotucatu.sp.gov.br/portalexv/ri\\_lomb/leiorganica.pdf](http://www.camarabotucatu.sp.gov.br/portalexv/ri_lomb/leiorganica.pdf). Acesso em: 03 jul. 2019.

BRASIL. **Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965**. Institui o Código Florestal Brasileiro. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1965. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4771.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm). Acesso em: 03 jul. 2019.

BRASIL. **Decreto-lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; [...]. Brasília: Presidência da República, 2012. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm). Acesso em: 03 jul. 2019.

BRASIL. **Decreto-lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979**. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Brasília: Presidência da República, 1979. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L6766.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm). Acesso em: 03 jul. 2019.

CAMPOS, S.; CAMPOS, M.; GOBB, T. T. A. Espacialização do conflito de uso da terra em Áreas de Preservação Permanentes na bacia do rio Capivara - Botucatu/SP. In: CAMPOS, S, PISSARRA, T. C. T.; CAMPOS, M. **Geotecnologia aplicada no planejamento ambiental de bacias hidrográficas**. Tupã: ANAP, 2015. cap. 8. p. 91-113.

CARNEIRO, C. D. R. Viagem virtual ao Aquífero Guarani: Formações Piramboias e Botucatu, Bacia do Paraná. **Terra Didática**, v. 3, n. 1, p. 50-73, 2007

CASSETI, Valter **Geomorfologia**. [S. l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 06/11/2018

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**. n. 2, v. 28, p. 161-173, 1966.

CHORLEY, R. J. A geomorfologia e a teoria dos sistemas gerais. **Notícia Geomorfológica**. Campinas, v. 11, n. 21, p. 3-22, jun. 1971

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Bluncher, 1999. 236 p.

CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; PINTO, S. A. F. Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista. **Geociências**, v. 34, n. 4, p. 848-860, 2015.

- CORRÊA, E. A.; MORAES, I. C.; LUPINACCI, C. M.; PINTO, S. A. F. Influência do cultivo de cana-de-açúcar nas perdas de solo por erosão hídrica em Cambissolos no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, p. 231-243, 2018.
- CORTÊS, A. R. P.; PERINOTTO, J. A. J. Fácies e associação de fácies da Formação Piramboia na região de Descalvado (SP). **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 15, n. 3-4, p. 23-40, 2015
- COUTINHO, L. M.; ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A.; GARCIA, G. O.; XAVIER, A. C. Usos da Terra e Áreas de Preservação Permanente (APP) na Bacia do Rio da Prata, Castelo-ES. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 4, p. 425-434, 2013
- CRJC. **Introduction to Riparian Buffers for the Connecticut River Watershed**, 1998. Disponível em: <<http://www.crjc.org/buffers/Introduction.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2022.
- CUNHA, C. M. L. **A cartografia do relevo no contexto da gestão ambiental**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 128f., 2001.
- CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação Climática para os Municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, p. 1–11, 2009
- DANIEL, E., & VIEIRA, B. C. A Evolução Das Feições Erosivas Da Bacia Do Córrego Espreado, São Pedro (SP). **Boletim Goiano de Geografia**, Goiana, v. 35, n. 2, p. 339–358. 2015
- DEMARCHI, J. C.; ZIMBACK, C. R. L. Mapeamento, erodibilidade e tolerância de perda de solo na sub-bacia do Ribeirão das Perobas. **Energ. Agric., Botucatu**, v. 29, n.2, p.102-114, 2014
- DEN EECKHAUT, M. VAN; MARRE, A.; POESEN, J. Comparison of two landslide susceptibility assessments in the Champagne-Ardenne region (France). **Geomorphology**, v. 115, n. 1–2, p. 141–155, 2010.
- DONATO, H. Peabiru. **Revista comentário**, Rio de Janeiro, n. 48, p. 1-16, 1971.
- DUBE, H. B.; MUTEMA, M.; MUCHAONYERWA, P. POESEN, J.; CHAPLOTA, V. A global analysis of the morphology of linear erosion features. **Catena**, v. 190, P. 1-12. 2020
- FACINCANI, E. M. **Morfotectônica da Depressão Periférica Paulista e Cuesta Basáltica: regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba–SP**. 2000. 222f. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.
- FENDRICH, R.; OBLADEN, N. L.; AISSÉ, M.; GARCÍAS, C. M. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4. ed. Curitiba: Champagnat, 1997. 486p.
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências** v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.
- FIGUEROA, J. C. **Boca do Sertão: história resumida e comentada da cidade de Botucatu**. Botucatu: Ed. Centro Cultural de Botucatu, 2016
- FILHO, G. S. A., FILHO, J. T. A Importância da Diferenciação dos Processos Erosivos

- Lineares dos Tipos Ravina e Boçoroca. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos Do Nordeste, 2014, Natal. **Anais...** Natal, 2014, p. 1–15.
- FILIZOLA, H. F.; BOULET, R.; GOMES, M. A. F. Processos erosivos lineares em áreas de recarga do aquífero guarani. **Água, Agricultura e Meio Ambiente no Estado de São Paulo: Avanços e Desafios**, [s. l.], p. 1–19, 2003.
- FILIZOLA, H. F., ALMEIDA, G. S. F., CANIL, K., SOUZA, M. D. de, & GOMES, M. A. F. **Controle dos processos erosivos lineares (ravinas e voçorocas) em áreas de solos arenosos**. Circular Técnica n. 22, Embrapa, Jaguariúna 2011.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Roma, 2015.
- GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; NADAL-ROMERO, E.; GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; LANA-RENAULT N.; SANJUÁN Y. A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, v. 239, p. 160-173. 2015
- GOBIN, A. M. et al. Soil erosion assessment at the Udi-Nsukka Cuesta (southeastern Nigeria). **Land Degradation and Development**, v. 10, n. 2, p. 141–160, 1999.
- GOUDIE, A. S.; **The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present and Future**. 7. ed. Oxford: John Wiley & Sons, 2013. 410 p.
- GUERRA, A. J. T. **Erosão dos Solos e Movimentos de Massa: Abordagens Geográficas**. Curitiba: CRV, 2016.
- GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p.
- GUERRA, A.T.; GUERRA, A. J. T. **Dicionário geológico-geomorfológico** (3. ed.). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.
- HAFF, P. Neogeomorphology, prediction, and the anthropic landscape. **Geophysical Monograph Series**. v. 135, p. 15-26, 2003
- HARTMANN, L. A. A história natural do Grupo Serra Geral desde o Cretáceo até o Recente. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial, 2014, p. 173–182
- HOOKE, R. L. On the history of humans as geomorphic agents. **Geology**, v. 28, n. 9, p. 843–846. 2000
- HOOKE, R. L. On the efficacy of humans as geomorphic agents. **GSA Today**. V. 4, n. 3, p. 223-225. 1994
- HOOKE, R. L.; MARTÍN-DUQUE, J. F.; PEDRAZA, J. Land transformation by humans: A review. **GSA Today**. V. 22, n. 12, p. 4-10. 2012
- HUBP, J. I. L. **Elementos de Geomorfologia Aplicada (Metodos Cartograficos)**. México D.F.: Universidad Nacional Autonoma de México, 1988. 128 p.
- HUPY, J. Anthropogeomorphology. **International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology**, p. 1-6. 2017
- IMAIZUME, F.; NISHII, R.; MURAKAMI, W.; DAIMARU, H. Parallel retreat of rock slopes underlain by alternation of strata. **Geomorphology**, v. 238, p. 27–36, 2015

IMWANGANA, F. M. VANDECASTEELE, I.; TREFOIS, P.; OZER, P.; MOEYERSONS, J. The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (D.R. Congo). *Catena*, v. 125, p. 38–49, 2015.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. **Solos do Estado de São Paulo**. 2014. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solosp/> Acesso em: 09 de abril de 2021

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades**. 2021. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>>. Acesso em: 13 de abril de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981a.v. 1.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa geológico do estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981b. v.1.

JORGE, L. A. B.; MOREIRA, M. P. Padrões da Fragmentação do Habitat na Cuesta de Botucatu (SP). *Ciência Florestal*, v. 10 n. 1, p. 141–157, 2000.

KERÉNYI, A. Human Impact in a Systems Approach. JózsefSzabó, LórántDávid, DénesLóczy, 2010. **Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-made Land-forms**. Dordrecht - Heidelberg - London - New York: Springer. 298p.

KERTZMAN, F. F.; OLIVEIRA, A. M. S.; SALOMÃO, F. X. T.; GOUVEIA, M. I. F. Mapa de erosão do estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v. 16, n. especial, 1995.

LABRIÈRE, N.; LOCATELLI, B.; LAUMONIER, Y.; FREYCON, V.; BERNOUX, M. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, [s. l.], v. 203, p. 127–139, 2015.

LAL, R. Soil erosion in the humid tropics with particular reference to agricultural land development and soil management. **Hydrology of humid tropical regions. Proc. Hamburg symposium, 1983**, [s. l.], n. 140, 1983.

LI, J.; YANG L.; PU R.; LIU Y. A review on anthropogenic geomorphology. *Journal of Geographical Sciences*. V. 27, p. 109-128. 2017

LUPINACCI, C. M.; ANDRADE, R. V. **Cartografia da Faixa de Preservação das Cuestas em Botucatu**. Rio Claro: Projeto de Extensão Universitária, 2018. 45 p.

LI, Y.; LI, J.; ARE, K. S.; HUANG, Z.; YU, H.; ZHANG, Q. Livestock grazing significantly accelerates soil erosion more than climate change in Qinghai-Tibet Plateau: Evidenced from <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pbex measurements. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 285, p. 106643, 2019.

MARTINS, F. P.; SALGADO, A. A. R. Chapadas do Brasil: abordagem científica e conceitual. *Revista Brasileira de Geomorfologia* v. 17, nº 1, p.163-175, 2016

- MATHIAS, D. T. **Contribuição Metodológica para o Diagnóstico da Dinâmica Erosiva Linear e seu Prognóstico Evolutivo visando subsidiar Projetos de Recuperação**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Geografia). Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Presidente Prudente, 2016.
- MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; MORUZZI, R. B. Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização: Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro — SP). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n.4, p. 101-113, 2013
- 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.
- MATHIAS, D. T.; LUPINACCI, C. M.; NUNES, J. O. R. Identificação dos fluxos de escoamento superficial em área de relevo tecnogênico a partir do uso de modelos hidrológicos em SIG. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p.820-831, 2020.
- MELLO, M. G. Populações indígenas. In: GRIESE, J.; MELLO, M. G (orgs) 2012. **Atlas da Cuesta**. Botucatu: Instituto Itapoty, 52p.
- MERTLÍK, Jan; ADAMOVIČ, Jiří. Some significant geomorphic features of the Klokočí Cuesta, Czech Republic. **Ferrantia**, v. 44, p. 171-175, 2005
- MILANI, E. J., HENRIQUE, J., MELO, G., SOUZA, P. A. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências - Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.
- MONTGOMERY, D. R. Is agriculture eroding civilization's foundation? **GSA Today**. V. 17, n. 10, p. 4-9. 2007
- NEVES, C. B.; CASTRO, S. S.; SANTOS, N.; BORGES, R. O. Análise das relações entre solos, relevo e a legislação ambiental para a delimitação das áreas de preservação permanente: o exemplo da alta bacia do ribeirão João Leite, Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 1, p. 3–21, 2009.
- NIR, D. **Man, a geomorphological agent: an introduction to anthropic geomorphology**. Jerusalem: Katem Pub, House, 1983.
- OLIVEIRA, Marcelo Accioly Teixeira de. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de Erosão por Voçorocas. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p.
- PELOGGIA, A. U. G.; SILVA, E. C. N.; NUNES, J. O. R. Technogenic landforms: conceptual framework and application to geomorphologic mapping of artificial ground and landscape as transformed by human geological action **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2, p. 67-81, 2014.
- PASCOTO, T. V.; FUREGATTI, S. A.; PEIXOTO, A. S. P. Classificação das Erosões da Área Urbana de São Manuel – SP. In: XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador. **Anais...** Salvador, 2018.
- PENTEADO, M. M. **Geomorfologia do Setor Centro Ocidental da Depressão Periférica Paulista**. Tese (Doutorado) Universidade de São Paulo, 1976.
- PENTEADO, M. M. **Fundamentos de Geomorfologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1983. 186p.

- PERROTTA, M.M.; SALVADOR, E.D.; LOPES, R.C.; D'AGOSTINHO, L.Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S.D.; SACHS, L.L.; MEIRA, V.T.; GARCIA, M.G.M.; LACERDA FILHO, J.V. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil – PGB, CPRM, São Paulo, 2005.
- PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil erosion threatens food production. **Agriculture (Switzerland)**, v. 3, n. 3, p. 443–463, 2013.
- PINHEIRO, M. R.; QUEIROZ NETO, J. P. DE. From the semiarid landscapes of southwestern USA to the wet tropical zone of southeastern Brazil: Reflections on the development of cuestas, pediments, and talus. **Earth-Science Reviews**. v.172, p. 27-42, 2017.
- PINTON, L. G.; LUPINACCI, C. M. A cartografia geomorfológica retrospectiva como instrumento de análise das mudanças morfológicas da Bacia do Córrego do Cavalheiro — Analândia (SP). In SIMON, A. L. H.; LUPINACCI, C. M. (orgs) 2019. **A Cartografia geomorfológica como instrumento para o planejamento**. Pelotas, Ed. da UFPel, 172 p.
- PINTO, E. A. A cidade de Botucatu: origens. In: X congresso Brasileiro de Geografia, Belém. **Anais...** Belém, 1943
- PIZA, J. F. B. T. **Nos Sertões de Botucatu: arquitetura e território das sesmarias pioneiras às grandes instalações cafeeiras 1830 – 1930**. 2015. 374f. TESE (Doutorado – Área de Concentração: História e Fundamentos da Arquitetura e Urbanismo) – FAUUSP, 2015
- RODRIGUES, C. Morfologia Original e Morfologia Antropogênica na definição de unidades espaciais de planejamento urbano: Exemplo na Metrópole Paulista. **Revista do Departamento de Geografia**. n. 17, p. 101-111, 2005
- ROSS, J L S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. [S.l: s.n.], 1991.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo: **Laboratório de Geomorfologia, Departamento de Geografia FFLCH-USP/IPT/FAPESP**: v.I e II, São Paulo, 1997.
- ROSS, J. L. Sanches (org.). **Geografia do Brasil**. São Paulo: EdUSP, 1996. 546p.
- ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p. (inclui Mapas)
- ROZSA, P. Attempts at qualitative and quantitative assessment of human impact on the landscape. **Geogr. Fis. Dinam. Quat**. n. 30, p. 233–238.2007
- SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos Processos Erosivos. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p.
- SANTOS, B. C.; FONTÃO, P. A. B.; SOUZA, P. H. O efeito do relevo nas chuvas na porção central do Estado de São Paulo em anos padrão extremos. **Revista do Departamento de Geografia**. N. 40, p. 132-147. 2020
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Obras e do Meio Ambiente. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Universidade Estadual Paulista. **Folha Geológica de Bauru (SF-22-Z-B)**: Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1984. Escala 1:250.000.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente, **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental Corumbataí, Botucatu e Tejuapá- Perímetro Botucatu**. Botucatu: Fundação Florestal. 2011.474p.

SCHMIDT, K. H. The significance of scarp retreat for cenozoic landform evolution on the Colorado Plateau, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 14, n. 2, p. 93–105, 1989.

SCHMIDT, K. H.; BEYER, I. High-magnitude landslide events on a limestone-scarp in central Germany: Morphometric characteristics and climatic controls. **Geomorphology**, v. 49, n. 3–4, p. 323–342, 2002.

SHEEHAN, C. E.; WARD, D. J. Late Pleistocene talus flatiron formation below the Coal Cliffs cuesta, Utah, USA. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 9, p. 1973–1992, 2018.

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.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no Estado de São Paulo. **Geociências**, v. 24, n. 1, p. 33–41, 2005.

SILVA, M. M.; LUPINACCI, C. M. Feições Erosivas Lineares em Ambientes de Cuesta: estudo de caso no interior paulista. **Geografia (Londrina)**, v. 30. n. 1. pp. 421 – 437, 2021.

SIMON, A. L. H. **Influência do reservatório de Barra Bonita sobre a morfohidrografia da baixa bacia do Rio Piraciaba – SP**: contribuições à geomorfologia antropogênica. 150 f. Tese (doutorado) - Instituto de Geociência e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

SOUZA, T. A.; ANDRADE, R.V.; LUPINACCI, C. M. Análise Geomorfológica da Transição Cuestas-Depressão Periférica: A Alta Bacia do Rio Passa Cinco(SP) como estudo de caso. **Revista Brasileira de Geografia Física**. V. 13, n. 2, p. 465 - 486. 2020

SOUZA, P. O. **Conexão Florestal em Áreas mais Favoráveis à Infiltração na APA Botucatu – SP**. 2014. 85f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014.

SOUZA, T. A.; OLIVEIRA, R. C. Avaliação da potencialidade de imagens tridimensionais em meio digital para o mapeamento geomorfológico. **REVISTA GEONORTE**, Edição Especial, v.2, n.4, p.1348 – 1355, 2012

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Características morfoestruturais do relevo em setor de cuestas: um estudo em Analândia (SP). **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 9 n. 4, p. 1197-1211, 2016.

STEFANUTO, E. B. **Análise da Dinâmica Erosiva Linear e seu Potencial Evolutivo em Ambiente Agrícola**. 2019, 123f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2019

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Avaliação Das Características Ambientais De Ocorrências Das Feições Erosivas Lineares Nos Limites Depressão-Cuesta - Analândia (Sp). **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 70, p. 367–384, 2019.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M.; CARVALHO, F. FRANCOS, M.; ÚBEDA, X. An evaluation of erosion in cuesta relief: São Paulo State, Brazil. **Geomorphology**. V. 398, p. 108049. 2022

SZABÓ, J. Anthropogenic Geomorphology: Subject and System. In József Szabó, Lóránt Dávid, Dénes Lóczy, 2010. **Anthropogenic Geomorphology: A Guide to Man-made Land-forms**. Dordrecht - Heidelberg - London - New York: Springer. 298p.

TAROLLI, P.; SOFIA, G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. **Geomorphology**, v. 255, p. 140 – 161, 2016.

TIZ, G. J.; CUNHA, J. E. Erosão Periurbana Em Marechal Cândido Rondon-PR: uma abordagem introdutória. **Geografia** (Londrina), v. 16, n. 1, p. 79-100, 2007

TRONCOSO, L. P. S.; CORRÊA, A. A.; ZANETTINI, P. E. Paleoíndios em São Paulo: nota a respeito do sítio Caetetuba, município de São Manuel, SP. **Palaeoindian Archaeology**, v.1, n.1, p. 50-71, 2016.

TRICART, J. **Principes et méthodes de lagéomorphologie**. Paris: Masson, 1965.

VILELA, H. T. F.; GONÇALVES, A. F. A.; FRANÇA, L. C. J. JÚNIOR, F. H. A. Conflitos de uso do solo em Áreas de Preservação Permanente em uma região do Alto Rio Grande (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.9, n.1. p. 65-81, 2021.

VITAL, M. H. F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235-276, 2007

VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAN, R. A. van. **ITC System of geomorphological survey**. Manual ITC Textbook, Netherlands: Enschede. V. 1, cap. 8, 1975.

WANG, D.; YUAN, Z.; CAI, Y.; JING, D.; LIU, F.; TANG, Y.; SONG, N.; LI, Y.; ZHAO, C.; FU, X. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 1-6, 2021.

WATERS, C. N.; ZALASIEWICZ, J.; SUMMERHAYES, C.; BARNOSKY, A. D.; POIRIER, C.; GALUSZKA, A.; CEARRETA, A.; EDGEWORTH, M.; ELLIS, E. C.; ELLIS, M.; JEANDEL, C.; LEINFELDER, R.; MCNEILL, J. R.; RICHTER, D. B.; STEFFEN, W.; SYVITSKI, J.; VIDAS, D.; WAGREICH, M.; WILLIAMS, M.; ZHISHENG, A.; GRINEVALD, J.; ODADA, E.; ORESKES, N.; WOLFE, A. P. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. **Science**, v. 351, n. 6269, p. 2016

ZALASIEWICZ, J.; WILLIAMS, M.; HAYWOOD, A.; ELLIS, M. The Anthropocene: a new epoch of geological time? **Phil. Trans. R. Soc. A**, v. 369, p. 835–841, 2011

ZANATTA, F. A. S. **Limitação Física em área rural degradada: busca metodológica para definir o uso adequado das terras**. 2018. 164 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2018.

ZANATTA, F. A. S.; CUNHA, C. M. L.; BOIN, M. N. Análise da aplicação do atual e antigo código florestal na Alta Bacia do Ribeirão Areia Dourada, Marabá Paulista (SP) (BR). **Caderno Prudentino de Geografia**, n. 36, p. 203–214, 2014.

ZHANG, X.; YU, G. Q.; LI, Z. B.; LI, P. Experimental Study on Slope Runoff, Erosion and Sediment under Different Vegetation Types. **Water Resour Manage**, v. 28, p. 2415–2433, 2014.