

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, LETRAS E ARTES  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**VALQUIRIA BRILHADOR DA SILVA**

**ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS DERIVADOS DE BASALTO,  
LUIZIANA-PR.**

**Maringá  
2023**

VALQUIRIA BRILHADOR DA SILVA

ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS DERIVADOS DE DERRAMES DE  
BASALTO, LUIZIANA-PR.

Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Geografia, área de concentração: Análise Regional e Ambiental, linha de pesquisa Análise Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Edison Fortes

Maringá  
2023

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

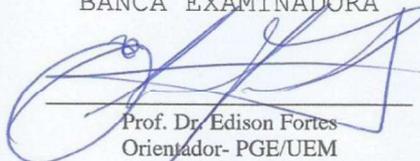
S586e	<p>Silva, Valquiria Brilhador da</p> <p>Estudo de processos erosivos em solos derivados de basalto, Luiziana-PR / Valquiria Brilhador da Silva. – Maringá, PR, 2023. 112 f.: il. color., figs., tabs., maps.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Edison Fortes. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Departamento de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2023.</p> <p>1. Processos erosivos. 2. Voçoroca . 3. Vales não canalizados. 4. Uso da terra. I. Fortes, Edison, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes. Departamento de Geografia. Programa de Pós-Graduação em Geografia. III. Título.</p> <p>CDD 23.ed. 910.02</p>
-------	---

ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS EM SOLOS DERIVADOS DE BASALTO,  
LUIZIANA-PR

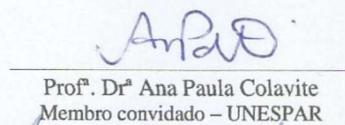
Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual de  
Maringá, como requisito parcial para obtenção do grau de  
Doutor em Geografia, área de concentração: Análise  
Regional e Ambiental, linha de pesquisa Análise Ambiental.

Aprovada em **06 de março de 2023.**

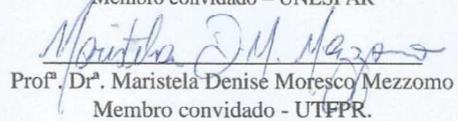
BANCA EXAMINADORA



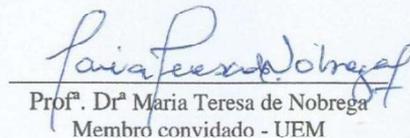
Prof. Dr. Edison Fortes  
Orientador- PGE/UEM



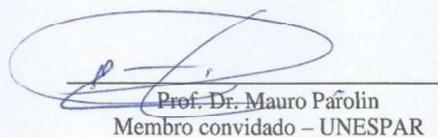
Prof.ª Dr.ª Ana Paula Colavite  
Membro convidado - UNESPAR



Prof.ª Dr.ª Maristela Denise Moresco Mezzomo  
Membro convidado - UTFPR.



Prof.ª Dr.ª Maria Teresa de Nobrega  
Membro convidado - UEM



Prof. Dr. Mauro Paolin  
Membro convidado - UNESPAR

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sim pois tive muitos motivos para desistir, e só a fé em Jesus me manteve neste percurso

Ao Prof. Dr. Edison Fortes que aceitou orientar esta pesquisa, e pela paciência.

Aos colegas de curso, Vitor H. R. Biffi, por me auxiliar na interpretação das análises mineralógicas, ao Fernando Wilwock pelo apoio em laboratório, ao Idjarrury Firmino pelo apoio, e aos colegas Sandra Malys e Thiago V. S. Athaydes.

Ao Vanderlei Grzegorzcyk do Laboratório de sedimentologia do GEMA-UEM, pelo conhecimento compartilhado e análises laboratoriais essenciais para pesquisa.

Aos professores Programa de Pós-Graduação em Geografia, Maria Teresa de Nóbrega, Marta Luzia de Souza, Susana Volkmer, Nelson L. Gasparetto e Otávio C. Montanher por colaborarem com seus conhecimentos.

Ao Prof. Edivando V. Couto, que me incentivou no início desta jornada.

Aos professores da UNESPAR campus de Campo Mourão, Jefferson Q. Crispim, e Mauro Parolin por ceder laboratórios e materiais, os quais foram fundamentais para a realização da pesquisa.

Ao Cipriano e ao Aparecido do laboratório de Mecânica de Solos, pela disposição nas análises laboratoriais, de suma importância para esta pesquisa, e a Prof. Nelcy H. M. Gutierrez, pelo empréstimo de materiais.

A Josi, e a Miriam do PGE, pelo auxílio nas documentações e pelas palavras de ânimo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro no primeiro ano de pesquisa.

Ao Mário da Secretaria de Meio Ambiente, e Aginaldo da Secretaria de Planejamento do município de Luiziana.

Ao Clóvis, técnico Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná - IAPAR-EMATER, pelas informações prestadas.

Aos meu irmão Valter pela ajuda em campo, a ele, sua esposa Maria, e seus filhos pelo apoio de ambos em todo tempo.

Aos meus amigos, Amábilis, Diva, Darcy, Claudinei e Greicy, a Denise, pelo apoio nos momentos difíceis.

E àqueles que partiram neste tempo, a minha mãe Maria Luiza Brilhador *in* memória, quem me ensinou a seguir com coragem, e ao Fernando O. Brilhador *in* memória pela ajuda nos primeiros campos.

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo investigar a evolução dos processos erosivos atuais em cabeceira de drenagem, a partir das características geomorfológicas, da dinâmica da água, das propriedades dos materiais, do uso e cobertura da terra. Foram investigadas três formas erosivas, uma ravina e duas voçorocas na área periurbana no município de Luiziana-PR. Para o estudo foi realizado os seguintes procedimentos: investigação de campo; descrição de perfis e coleta de amostras; elaboração de mapa geomorfológico; mapa de uso e cobertura do solo; análises laboratoriais de condutividade hidráulica saturada; granulometria; mineralogia e limites de consistência do solo. Os resultados permitiram compreender o desenvolvimento e expansão dos processos erosivos em cabeceiras de drenagem, em materiais oriundos de rochas basálticas. Os resultados indicam que os processos erosivos estão estreitamente relacionados às características geomorfológicas, às propriedades dos materiais de alteração, bem como às atividades antrópicas. As características geomorfológicas da área de estudo, como cabeceiras côncavas e vales não canalizados, condicionam os fluxos hídricos naturais superficiais e subsuperficiais que convergem para o canal de drenagem. As mudanças de uso do solo com a retirada da vegetação e a introdução de atividades agropecuárias, implantação de estradas e da cidade promoveram o aumento do escoamento superficial e direcionamento dos fluxos, os quais contribuem para o desenvolvimento ou ampliação, coincidindo com frentes de expansão das erosões. As propriedades dos materiais dos mantos de alteração, como textura muito argilosa, e diferenças de permeabilidade em profundidade, condicionam fluxos hídricos que contribuem para erosão em subsuperfície. As propriedades mineralógicas promovem alta plasticidade aos materiais, o que torna a área suscetível a movimentos de massas, nas vertentes já desestabilizadas pelo aprofundamento da incisão erosiva em voçoroca. A investigação em campo, associada às análises laboratoriais, evidenciou a influência da presença de horizontes endurecidos por óxidos de ferro, tanto na resistência a erosão, como na desestabilização do perfil quando o ferro é removido pela ação da água. O sistema de drenagem urbana de forma inadequada, com falta de dissipadores de energia e a concentração do lançamento de águas pluviais, provocou a aceleração do processo erosivo remontante. Conclui-se que a forma de evolução dos processos erosivos decorre das características do sistema natural frente às intervenções antrópicas. Entende-se que o conhecimento desses fatores contribui para o planejamento ambiental, não só do município de Luiziana, mas para ambientes com características semelhantes.

**Palavras chaves:** Processos erosivos. Vales não canalizados. Uso da terra.

## ABSTRACT

This research aimed to investigate the evolution of current erosive processes in drainage headwater, based on geomorphological characteristics, water dynamics, material properties, land use and land cover. Three erosive forms were investigated, one ravine and two gullies in a periurban area. The following procedures were performed for study: field investigation; profile description and sample collection; preparation of geomorphological map; use map and soil cover; laboratory analyzes of saturated hydraulic conductivity; granulometry; mineralogy and soil consistency limits. The results allowed to understand the development and expansion of erosive processes in drainage headwaters, in materials from basaltic rocks. These results indicate that erosive processes are closely related to geomorphological characteristics, the properties of alteration materials, as well as anthropic activities. The geomorphological characteristics of the study area, such as concave headwaters and unchanelled valleys, condition the natural surface and subsurface water flows that converge to the drainage channel. The changes in land use with the removal of vegetation and the introduction of agricultural activities, implementation of roads and city promoted the increase of surface runoff and direction of flows, which contributed to the development or expansion, coinciding with erosion expansion fronts. The material properties of the alteration profiles, such as a very clayey texture, and differences of the permeability in depth, condition water flows that contribute to subsurface erosion. The mineralogical properties promote high plasticity to the materials, which makes the area susceptible to mass movements, in the slopes already destabilized by the deepening of the erosive incision in gully. Field research, associated with laboratory analyzes, showed the influence of the presence of horizons hardened by iron oxides, both on erosion resistance and on profile destabilization when iron is removed by the action of water. The inadequate urban drainage system, with a lack of energy sinks and the concentration of rainwater release, caused the acceleration of the headward erosion process. It is concluded that the evolution way of erosion processes results from the characteristics of the natural system in the face of anthropic interventions. It is understood that the knowledge of these factors contributes to environmental planning, not only in the municipality of Luiziana, but for environments with similar characteristics.

**Keywords:** Erosive processes. Unchanelled valleys. Land use.

## APÊNDICE

Apêndice 1 – Tabela de análises .....	109
---------------------------------------	-----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de evolução de voçorocas.....	15
Figura 2 - Fluxos superficial e subterrâneo .....	16
Figura 3 - Rede de drenagem: vales não canalizados, cabeceiras de vale, rede de canais.....	20
Figura 4 - Esquema evolução de um anfiteatro, dando origem à formação de um complexo de rampas. ....	22
Figura 5 - Modelo de hollow concavo (HC) e hollow concavo plano (HCP).....	23
Figura 6 - Representação esquemática da formação de canais e desenvolvimento de concavidades estruturais.....	24
Figura 7 - Erodibilidade do saprólito comparado ao solo superficial.....	27
Figura 8 - Perfil de alteração .....	30
Figura 9 - Geometria das vertentes .....	32
Figura 10 - Localização dos perfis analisados.....	40
Figura 11- Coleta de amostra indeformada .....	43
Figura 12 - Área de estudo .....	47
Figura 13 - Contexto geomorfológico regional .....	48
Figura 14 - Média das precipitações anuais da área de estudo, período 1976 a 2019 .....	49
Figura 15 - Média das precipitações mensais da área de estudo, período 1976 a 2019.....	49
Figura 16 - Litologia da área de estudo.....	51
Figura 17 - Estrutura (genérica) interna de um derrame pahoehoe tabular de basalto .....	52
Figura 18 - Seção ideal de um depósito vulcanoclástico máfico.....	53
Figura 19 - Tipos de solo na área de estudo .....	54
Figura 20 - Localização das formas erosivas na área de estudo.....	56
Figura 21 - Fotografia aérea de Luiziana em 1953, escala 1:25.000 .....	58
Figura 22 - Uso e cobertura da Terra, Luiziana 1980 e 2019 .....	59
Figura 23 - Cobertura vegetal na área afetada por voçoroca 1980 e 2019.....	60
Figura 24 - Processos erosivos na área urbana e periurbana de Luiziana 2019. ....	61
Figura 25 - Expansão do processo erosivo na área periurbana: A) 1980, B) 1990 e C) 2005..	62
Figura 26 - Voçoroca Luiziana: A) 29/07/2007, B) 29/07/2010 e C) 09/08/2017.....	63
Figura 27 – A) Paliçada (A) Abatimento de bloco nas bordas da erosão .....	64
Figura 28 - Emissário na cabeceira da Voçoroca Luiziana .....	66
Figura 29 - Voçoroca das Lontras.....	67
Figura 30 - Ravina Sem Passo: A) 2016, B) 2019.....	68
Figura 31 - Mapa geomorfológico da área de estudo .....	69
Figura 32 - A) Vale não canalizado, B) Cabeceiras côncavas, C) Erosão linear em cabeceira côncava em 1980 e D) em 2019 .....	70
Figura 33 - Declividade na área de estudo .....	71
Figura 34 - A) Afloramento de rocha alterada, B) Afloramento de basalto .....	71
Figura 35 - Feições erosivas Voçoroca Luiziana 1980.....	74
Figura 36 - Feições erosivas Voçoroca Luiziana 2019.....	75
Figura 37 - A) Cabeceira da Voçoroca Luiziana, imagem aérea; B) Interceptação do lençol..	76
Figura 38- A) Perfil espesso, com nível endurecid, B) Perfil em vertente instável.....	77
Figura 39 - Concentração das linhas de fluxos.....	78
Figura 40 - Vertente Voçoroca Luiziana P1 .....	79
Figura 41- Perfil 1, granulometria, densidade, porosidade total e condutividade hidráulica..	80
Figura 42 - Vertente Voçoroca Luiziana P2.....	82
Figura 43 - Perfil 2, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica.....	83
Figura 44 - Vertente Voçoroca Luiziana P3 .....	84

Figura 45 - Perfil 3, granulometria, densidade, porosidade condutividade hidráulica .....	85
Figura 46 - Vertente Voçoroca Luiziana P4.....	87
Figura 47 - Perfil 4, granulometria, densidade, porosidade, e condutividade hidráulica.....	88
Figura 48- Vertente Voçoroca das Lontras P5 e P6.....	89
Figura 49 - Perfil 5, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica.....	90
Figura 50 - Perfil 6, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica.....	92
Figura 51 - Vertente Ravina Sem Passo P7 e P8. ....	93
Figura 52 - Perfil 7, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica.....	94
Figura 53 - Perfil 8, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica.....	96
Figura 54 - A) Estrutura prismática grande, B) Superfície de fricção .....	96
Figura 55 - Rede de drenagem e feições erosivas – recorte bacia do rio Nunes .....	98
Figura 56 - Modelo de escorregamento rotacional: A) Em perfil B) Em planta; B) Imagem em posição baixa vertente afetada pelo movimento de massa. ....	99
Figura 57 -Túnel erosivo.....	100
Figura 58 - Canal originado pela expansão da voçoroca .....	101

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. PROCESSOS EROSIVOS LINEARES</b> .....	13
2.1 PROCESSOS ASSOCIADOS A EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS .....	15
<b>2.1.1 Ação da água subterrânea no processo de erosão</b> .....	16
<b>2.1.2 Movimentos de massa</b> .....	18
2.2 PROCESSOS EROSIVOS EM CABECEIRAS DE DRENAGEM.....	20
<b>3 FATORES RELACIONADOS AOS PROCESSOS EROSIVOS</b> .....	26
3.1 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE ALTERAÇÃO .....	26
<b>3.1.1 A influência do substrato rochoso nas erosões</b> .....	26
<b>3.1.2 Propriedades do solo relacionadas ao processo erosivo</b> .....	28
3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PERFIL DE ALTERAÇÃO EM MEIOS TROPICAIS.....	29
3.3 A AÇÃO EROSIVA DAS ÁGUAS PLUVIAIS CONDICIONADA PELO RELEVO E A VEGETAÇÃO.....	31
3.4 PROCESSOS EROSIVOS EM DIFERENTES TIPOS DE COBERTURAS PEDOLÓGICAS.....	33
3.5 ATIVIDADES ANTRÓPICAS E O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS.....	38
<b>4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICOS</b> .....	40
4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	40
4.2 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS.....	41
<b>4.2.1 Levantamento cartográfico e elaboração de mapas</b> .....	41
<b>4.2.2 Trabalhos em campo</b> .....	42
4.2.2.1 Descrição morfológica do solo e coleta de campo .....	43
<b>4.2.3 Análises laboratoriais</b> .....	43
<b>5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	47
<b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	56
6.1 HISTÓRICO DOS PROCESSOS EROSIVOS ATUAIS .....	56
<b>6.1.1 Voçoroca Luiziana e o processo histórico de evolução</b> .....	62
<b>6.1.2 Voçoroca das Lontras</b> .....	66
<b>6.1.3 Ravina Sem Passo</b> .....	68
6.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E PROCESSOS ATUANTES .....	69
6.3 PERFIS DE ALTERAÇÃO: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E GEOTÉCNICAS .....	78

<b>6.3.1 Perfil de alteração P1 Voçoroca Luiziana .....</b>	<b>79</b>
<b>6.3.2 Perfil de alteração P2 Voçoroca Luiziana .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3.3 Perfil de alteração P3 Voçoroca Luiziana .....</b>	<b>83</b>
<b>6.3.4 Perfil de alteração P4 Voçoroca Luiziana .....</b>	<b>86</b>
<b>6.3.5 Perfil de alteração P5 Voçoroca das Lontras .....</b>	<b>88</b>
<b>6.3.6 Perfil de alteração P6 Voçoroca das Lontras .....</b>	<b>91</b>
<b>6.3.7 Perfil de alteração P7 Ravina Sem Passo .....</b>	<b>92</b>
<b>6.3.8 Perfil de alteração P8 Ravina Sem Passo .....</b>	<b>95</b>
<b>6.4 SÍNTESE DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>97</b>
<b>7 CONCLUSÕES .....</b>	<b>102</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão é uma das principais causas da degradação do solo e afeta tanto a área rural como a área urbana. Este é um problema que interessa diversas áreas do conhecimento devido à magnitude que pode alcançar e às consequências decorrentes desse fenômeno. No estado do Paraná, concomitante ao processo de urbanização, ocorreram diversos processos erosivos em áreas periurbanas de vários municípios, principalmente em solos derivados de arenitos do Grupo Caiuá (LICHT; ARIOLI, 2018), anteriormente denominado Formação Caiuá. No entanto os processos erosivos também foram constatados em solos derivados do basalto, normalmente considerados mais resistentes a erosão devido ao teor de argila. Embora tenham sido desenvolvidos programas para o controle da erosão desde a década de 1960, a erosão urbana e periurbana são apontadas como um dos maiores problemas ambientais (FONTANA, 2019).

Processos erosivos acelerados, tanto na área urbana como na área rural ou periurbana, são normalmente associados a atividade antrópica, que altera as características naturais do ambiente, como retirada da vegetação para implantação de cultivos e impermeabilização do solo. No entanto a resposta aos processos erosivos depende das características dos materiais, características geomorfológicas, propriedades dos perfis de alteração e característica das climáticas.

O estudo dos processos erosivos não é recente, no entanto é um fenômeno que apesar de apresentar características gerais comuns em diversos ambientes, é necessário entender os principais mecanismos atuantes em cada um deles, os quais dependem de propriedades específicas inerentes à sua natureza. O conhecimento destes mecanismos é indispensável para compreender o desenvolvimento dos processos erosivos, e contribui para tomada de decisões no âmbito do planejamento ambiental e controle.

No noroeste do Paraná em solos de textura média e arenosa, estudos foram realizados a partir da análise estrutural da cobertura Pedológica, buscando compreender as transformações laterais e dinâmica da água no solo. Destacam-se os trabalhos de Cunha, Castro e Salomão (1999) em Umuarama, de Nakashima (1999) aplicado a toda a região noroeste do Paraná, Martins (2000) em Cidade Gaúcha, Cunha (2002) em Cidade Gaúcha. Em solos de textura argilosa podemos citar os trabalhos realizado por Zamuner (2001) no município de Maringá, Moresco e Cunha (2003), Calegari e Martins (2004) realizados em Marechal Candido Rondon.

Dessa forma, a presente pesquisa busca compreender o desenvolvimento, de processos erosivos desenvolvidos em solos originados sobre derrames de basaltos. Estes processos erosivos estão localizados na área periurbana do município de Luiziana-PR, na forma de ravinas

e voçorocas. A área mais afetada, denominada aqui de Voçoroca Luiziana, vem se desenvolvendo ao menos desde a década de 1970. A partir da década de 1990, ganhou maior notoriedade pela expansão do processo erosivo remontante, devido ao aumento do escoamento superficial oriundo das vias urbanas, e pelo lançamento direto das galerias pluviais sem dissipadores/disciplinamento das águas.

Conhecendo a área desde 2007, em visitas de aulas de campo, e verificando a aceleração do processo erosivo, surgiram algumas questões que levaram ao desenvolvimento desta pesquisa. A questão inicial se refere à evolução do canal erosivo na cabeceira. De montante para jusante, num setor alargava e aprofundava e em outro tornava-se bastante estreito, voltando a alargar-se, em espaço relativamente curto. Havia também relatos de processos erosivos que remontavam a década de 1980.

Hipótese que norteia este trabalho, é que o desenvolvimento do processo erosivo está associado às características geomorfológicas das cabeceiras de drenagem que condicionam a dinâmica das águas (naturais e de drenagem urbana) e materiais com diferentes propriedades ao longo da incisão, o que explicaria a forma de evolução dos processos erosivos.

Portanto esta pesquisa tem como objetivo investigar a evolução dos processos erosivos atuais (ou dinâmica deste processo erosivo), a partir do estudo da dinâmica da água (ou rede de drenagem) das propriedades do manto de alteração, das características geomorfológicas, e dos fatores associados ao uso antrópico.

Dentre os objetivos específicos estão:

- Compreender a dimensão histórica do desenvolvimento dos processos erosivos a partir da análise da evolução do uso e ocupação do solo;
- Identificar geoformas associadas ao desenvolvimento de processos erosivos;
- Identificar o papel dos fluxos superficiais e subsuperficiais na formação e evolução das formas erosivas estudadas;
- Verificar a influência dos materiais de alteração no desenvolvimento dos processos erosivos;
- Identificar os diferentes setores e os processos associados.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: revisão da literatura referente a processos erosivos lineares no capítulo 2, e aos fatores relacionados aos processos erosivos no capítulo 3. Os procedimentos metodológicos e técnicos adotados no desenvolvimento desta pesquisa são descritos no capítulo 4. O capítulo 5, traz a caracterização da área de estudo. No capítulo 6 são apresentados resultados obtidos na pesquisa, e no capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

## 2 PROCESSOS EROSIVOS LINEARES

A erosão causada pelas águas pluviais compreende o destacamento ou remoção das partículas do solo e o seu transporte por meio do escoamento. O processo erosivo normalmente é diferenciado quanto ao tipo de escoamento superficial, que pode ser difuso dando origem a erosão laminar, ou concentrado, dando origem a sulcos, ravinas e voçorocas.

Na literatura, diferentes termos são utilizados para se referir aos fenômenos erosivos. Conforme Bigarella *et al.* (1996) na língua inglesa o termo *gully* seria o equivalente a designação de ravina, e *gully erosion* correspondente as voçorocas. O termo *lavaka* foi utilizado para denominar um tipo de voçoroca em Madagascar, que se desenvolve em horizonte endurecido (ferralítico) na superfície sobre saprolito espesso (THOMAS, 1994; BIGARELLA, 1996).

Alguns autores além de outros critérios, utilizam o critério dimensional para distinguir ravinas de voçorocas. Oliveira (1999) considera ravinas incisões com menos de 50 centímetros, e voçorocas incisões com largura e profundidade superior a 50 centímetros, que está de acordo com a classificação americana de dimensão de voçoroca. Vieira (1998) define voçoroca como sendo uma incisão erosiva que apresenta queda em bloco das camadas do solo, paredes verticais, fundo plano e com dimensões superiores a 1,5 m de profundidade, largura e comprimento superiores a 3m. De acordo com Bigarella e Mazuchowski (1985) a atuação das águas subterrâneas no processo erosivo ocorre após o ravinamento interceptar o lençol freático ou níveis que possam apresentar saturação transitória.

Bigarella e Mazuchowski (1985) caracterizam a voçoroca como um canal de drenagem de paredes abruptas, que termina numa cabeceira extremamente íngreme e escarpada, com fluxos efêmeros ou pequenos e na maioria dos casos, ocorrem em vertentes constituídas por material inconsolidado.

A terminologia adotada nesta pesquisa está de acordo com a adotada por Salomão (1994), sulcos: desenvolvem-se por concentração das linhas de fluxos de águas de escoamento superficial de água pluvial ou servida, resultando em pequenas incisões na superfície; ravinas, resultam da evolução dos sulcos por aprofundamento; voçorocas são resultantes do aprofundamento de ravinas, desenvolvem-se tanto por ação das águas de escoamento superficial como subsuperficial, onde se inclui o lençol freático. A adoção desta terminologia se deve ao fato de que as voçorocas apresentam uma dinâmica mais intensa e acelerada que as ravinas, e a presença de água subsuperfície nas voçorocas ser um condicionante que deve ser levado em consideração nos projetos de contenção, pois demanda medidas de drenagem subterrânea, conforme destacado por Iwasa *et al.* (1991).

Em relação a forma, em material de resistência homogênea as ravinas apresentam forma em V, quando os horizontes inferiores são mais resistentes, apresenta forma de U, e paredes abruptas (BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985)

Segundo Oliveira (2007) ravinas e voçorocas resultam da tendência de sistemas naturais a atingir um estado de equilíbrio entre a energia disponível e a eficiência do sistema em dissipar esta energia, e no caso dos solos, tanto a mudança na quantidade de energia disponível quanto a alteração das características do sistema podem levar a uma situação de desequilíbrio.

Para Salomão (1999) o desenvolvimento de erosão por ravinas e voçorocas depende de conjugação de fatores naturais e de uso e ocupação do solo. No entanto as voçorocas não são um fenômeno recente, mas são recorrentes no passado geológico. Conforme Bigarella e Mazuchowski (1985) o fenômeno voçoroca “é policíclico, representando sucessivos ravinamentos alternados com entulhamento”, em estudo de voçorocas no noroeste do Paraná, os autores reconheceram que quatro grandes ciclos destes fenômenos ocorreram durante o Quaternário. Já as voçorocas atuais são atribuídas a um desequilíbrio hidrológico, resultante principalmente pela ocupação das terras e a retirada da vegetação.

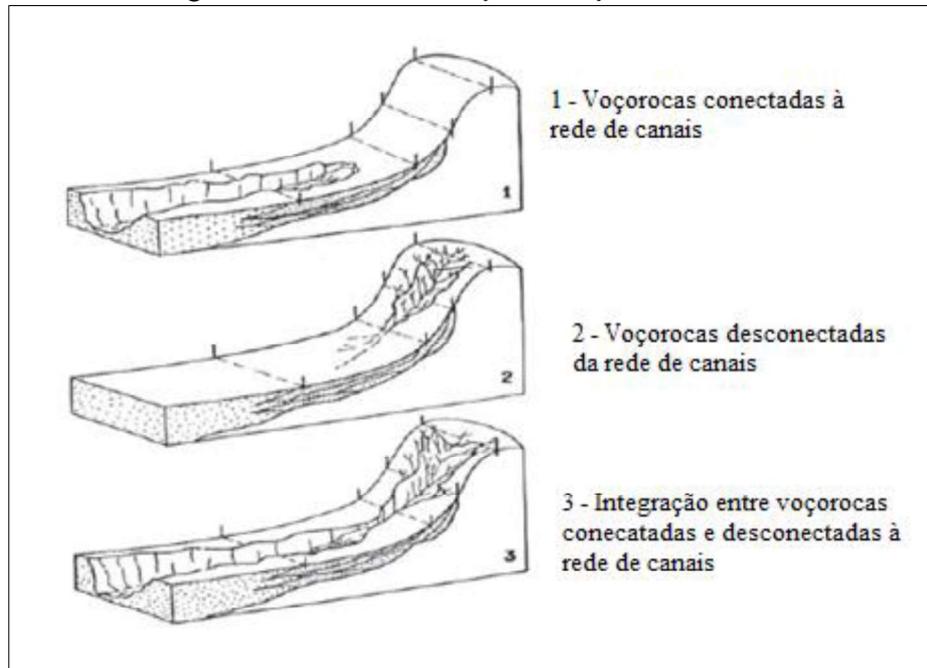
As voçorocas podem atingir centenas de metros de comprimento e profundidade entre 15 e 30m, perfil transversal em forma de U ou de manjedoura, normalmente num sistema erosivo ramificado (BIGARELLA *et al.*, 1996).

As principais características de uma voçoroca em atividade são destacadas por Fiori e Soares (1976): entalhe vertical para o desenvolvimento do perfil de mínimo trabalho (côncavo); a migração da seção de maior perda de altura dos taludes em direção a cabeceira; ramificação para drenagem na encosta; alargamento para atender ao aumento da vazão; movimento de massa nas paredes para atingir o talude estável.

Dadas as suas características de desenvolvimento, as voçorocas evoluem normalmente de forma mais rápida que as ravinas, atingindo grandes dimensões, tanto em sua direção principal como lateralmente, com a formação de ramos ativos (SALOMÃO, 1994).

Oliveira e Meis (1985) apresentaram um modelo de evolução de voçorocas (Fig. 1). Foi considerado a localização de incisões erosivas no médio vale do rio Paraíba do Sul, e a relação com canais de primeira ordem, neste modelo, essas incisões seriam resultado ao longo do tempo, de incisões conectadas e desconectadas a rede de canais, que a partir da interação entre diversos mecanismos integram-se, gerando uma única feição erosiva.

Figura 1- Modelo de evolução de voçorocas.



Fonte: Oliveira e Meis (1985).

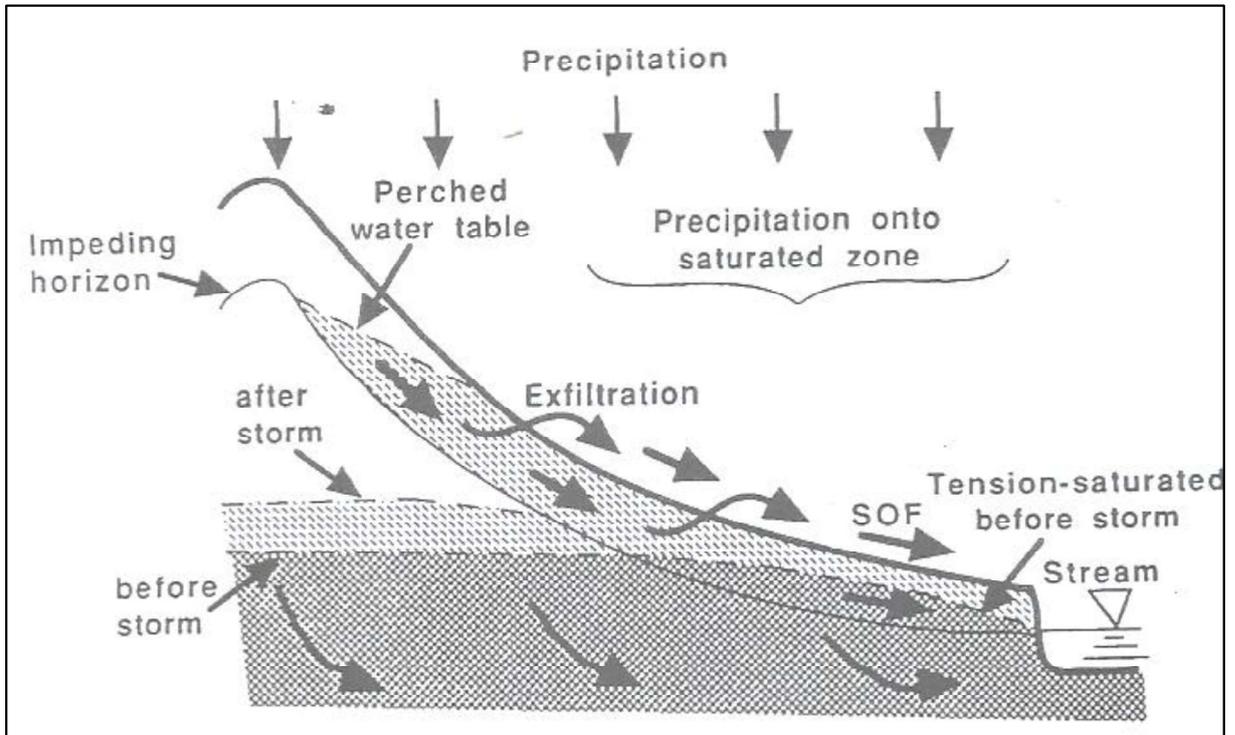
De acordo com os autores supracitados a aplicação desse modelo possibilita a compreensão de como determinados setores de bacias hidrográficas que constituem ambientes típicos de articulação entre encostas e canais fluviais, evoluíram num passado geológico recente. Segundo Coelho Netto (2003) na região Sudeste, os canais erosivos das cabeceiras drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando os processos de encostas com os processos fluviais.

## 2.1 PROCESSOS ASSOCIADOS A EVOLUÇÃO DE VOÇOROCAS

A água da chuva ao atingir o solo infiltra até que a capacidade de infiltração dos solos seja excedida, dando origem ao escoamento superficial, chamado fluxo hortoniano. A água que infiltra pode percolar até a zona saturada contribuindo para o fluxo de base, elevando o lençol freático. Uma zona saturada também pode ocorrer acima do lençol freático, devido a baixa permeabilidade (COELHO NETTO, 1998). Neste caso a água pode fluir lateralmente em subsuperfície. Com a elevação da zona saturada até a superfície, a água exfiltra (Fig. 2), este é chamado fluxo de retorno, e pode ocasionar erosão. A água do fluxo de retorno somada à precipitação, forma o fluxo superficial de saturação que segue até o canal. A emergência deste

fluxo é mais comum no sopé da vertente, em solos pouco espessos e em áreas côncavas (DUNNE, 1990).

Figura 2 - Fluxos superficial e subterrâneo



Fonte: Dunne (1990)

### 2.1.1 Ação da água subterrânea no processo de erosão

A água que escoar em subsuperfície pode provocar a erosão em túnel (*piping*) e erosão por exfiltração. Segundo Coelho Netto (1988) em estudos realizados no Sudeste do Brasil a propagação dos voçorocamentos se deve ao excesso de poro-pressão em faces de exfiltração da água subterrânea (*seepage erosion*). A literatura demonstra que a erosão em tubo pode ocorrer tanto em solos como em rochas. De acordo com Oliveira (2007) a erosão em túnel pode ocorrer sob efeito de água de escoamento superficial e subsuperficial que penetra em furos biogênicos ou fendas de diversas origens. Conforme Huggett (2007), em clima úmido, voçorocas podem resultar de fluxos de subsuperfície na base de uma encosta, sendo provável que o desenvolvimento de canais em regiões úmidas esteja relacionado a presença de erosão em túnel.

Salomão (2007) destaca que “o fenômeno de *piping* provoca a remoção de partículas do interior do solo formando canais que evoluem em sentido contrário ao do fluxo de água, podendo dar origem a colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a boçoroca ou criam novos ramos”. Segundo Morgan (2005) numerosos estudos registram a formação de voçorocas

pelo colapso do tubo em diferentes materiais e ambientes climáticos. A erosão em túneis pode ser detectada nas fases iniciais, pois com a evolução do fenômeno não é possível distinguir de uma voçoroca originadas por entalhe superficial (BIGARELLA; MAZUCHOWSKI, 1985).

Dentre os fatores que propiciam o fluxo de subsuperfície podem se considerar as discontinuidades de horizontes pedogenético. Solos com horizonte B textural (Bt), em função da elevada concentração da argila no horizonte iluvial, proporciona fluxo de subsuperfície paralelo à camada menos permeável (SALOMÃO, 1994; NAKASHIMA, 1999; CUNHA; CASTRO; SALOMÃO, 1999; MARTINS, 2000; CUNHA, 2002; CASSETI, 2005; MORGAN, 2005). No substrato rochoso os fluxos subsuperficiais podem ocorrer nos contatos entre unidades litoestratigráficas diferenciadas (CASSETTI, 2005), ou discontinuidades litológicas como fraturas (FERNANDES; MALDANER, 2011). Thomas (1994) associa a erosão em túneis a contrastes texturais que reduzem a permeabilidade, e a presença de uma zona do solo potencialmente dispersiva.

Conforme Salomão (2007), “para possibilitar a ocorrência de *piping*, é necessário a concentração de fluxo de água subsuperficial e valores elevados de gradiente hidráulico, suficientes para permitir a remoção de partículas do solo na zona de percolação do lençol”. O autor verificou em campo que nos locais de ocorrência do fenômeno de erosão em túnel na saída do lençol freático, houve rebaixamento localizado do nível d’água, com evidência de alívio de pressão, aumento do gradiente hidráulico e densidade de fluxo. Morgan (2005) destaca como condições propícias este fenômeno, solos com alta capacidade de infiltração através de macroporos, mas baixa permeabilidade intrínseca, incluindo solos propensos a rachaduras. Bigarella e Mazuchowski (1985), também referem que os fluxos tubulares, pode ter origem em fendas causadas por eventuais movimentos ou dessecação do manto de intemperismo ou dos depósitos colúvio aluvionares das encostas.

Segundo Casetti (2005) o escoamento de subsuperfície pode carrear quantidade variável de grãos de solo, partículas de argila e outros coloides, além de material em solução iônica. Algumas mudanças de estado se dão durante o transporte, tornando-se impraticável a distinção rígida entre dissolução e transporte em suspensão. Para o autor a ação coloidal se constitui na principal forma de erosão associada à água de subsuperfície.

De acordo com Baccaro e Silva (1997) e Baccaro e Soares (2005), estudos realizados no Triângulo Mineiro, região de Cerrado, vem demonstrando que os fluxos subsuperficiais em zonas de contato litológicos atuam na erosão em túnel, provocando o desmoronamento das paredes e contribuindo no desencadeamento e no avanço das frentes de erosão por voçorocas.

Camargo (1998) observou que erosão em túneis, no sul do estado do Paraná, estavam relacionadas com a expansão de cabeceiras de drenagem, e principalmente com a ação da água de subsuperfície.

### 2.1.2 Movimentos de massa

A evolução dos processos erosivos ocorre por diversos mecanismos. Considerando os processos que ocorrem na área de estudo, pareceu necessário abordarmos de forma breve os movimentos de massa. Segundo Oliveira (2007) vários tipos de movimentos de massa são verificados em voçorocas, podendo estar associados à extensão para montante ou ao alargamento das incisões erosivas.

Os movimentos de massa são resultantes da ruptura do solo. A ruptura ocorre geralmente por cisalhamento, quando as tensões cisalhantes ao longo da superfície de ruptura superam a resistência ao cisalhamento, e os grãos de solo deslizam ao longo da superfície de ruptura. A resistência está relacionada às características dos materiais, e a redução da resistência pode ocorrer pela redução da coesão e do ângulo de atrito, devido a presença de água. No caso das voçorocas, com o aprofundamento da incisão, ocorre a perda de suporte lateral o que faz aumentar a força cisalhante devido ao peso próprio do solo e a ação da gravidade, o que contribui para a ruptura do solo e movimentos de massa.

Esse comportamento mecânico do solo é afetado pela característica dos materiais constituintes, como textura, tipo de mineral presente, presença de água.

Dentre os condicionantes de deslizamentos, Fernandes e Amaral (1996) citam descontinuidades presentes no saprólito e solo residual. Estas descontinuidades incluem feições estruturais relíquias do embasamento rochoso, como fraturas, falhas e bandamentos, e horizontes do solo formados pela atuação de processos pedogenéticos. De acordo com os autores supracitados (FERNANDES; AMARAL; 1996) “escorregamentos rotacionais podem predominar em encostas onde as fraturas no embasamento rochoso se encontram pouco espaçadas, fazendo com que o saprolito se comporte como um material granular”.

Outro fator que pode condicionar a geração de movimento de massa, é a forma da vertente em perfil e em planta, que condiciona a convergência ou divergência dos fluxos de água superficiais e subsuperficiais. As porções côncavas (*hollows*) são áreas de convergência dos fluxos hídricos, e são áreas onde predomina a ocorrência de movimentos de massa, conforme constatado por diversos autores (TSUKAMOTO *et al.* 1992; DIETRICH; DUNNE, 1993; COELHO NETTO, 2003).

De acordo com Fernandes e Amaral (1996) nas zonas de convergências das porções côncavas (*hollows*), estão os depósitos de encosta, na forma de tálus ou de colúvios, os quais são importantes condicionantes de movimentos de massa. Estes autores destacam que estes depósitos apresentam grande heterogeneidade interna, resultado da descontinuidade espacial e temporal dos processos formadores, e exercem influência na hidrologia subsuperficial, além disso muitos depósitos colúviais estão dispostos diretamente sobre a rocha sã, gerando uma descontinuidade mecânica ao longo desse contato.

Segundo Oliveira (2007)

fendas e dutos indicam a existência de movimento generalizado da encosta em torno da incisão erosiva. Podem ser formados por movimentos translacionais profundos, por tração nas bordas da incisão, ou por expansão e contração de argilominerais do tipo 2:1 com substituições octaédricas. Tais feições podem servir de passagem para a água oriunda tanto da superfície da encosta, quanto do lençol freático, constituindo o que geralmente se denomina de erosão por *pipes* (OLIVEIRA, 2007).

Com base na classificação de movimentos de massa de Guidicini e Nieble (1984), e considerando a área de estudo, três tipos de movimentos de massa dentre aqueles propostos pelos autores são descritos a seguir: quedas de blocos, escorregamentos e rastejo (*creep*). A queda de bloco, pode ser queda de rocha ou de solo, ocorrem em movimentos rápidos em queda livre, pela ação da gravidade. Este tipo de movimento normalmente está relacionado a presença de fraturas ou a desgaste na base da encosta.

Os escorregamentos (*slides*) são caracterizados como movimentos rápidos, de curta duração, apresentam plano de ruptura bem definido, sendo possível a distinção entre o material mobilizado e o não movimentado. Conforme o plano de ruptura podem ser rotacionais ou translacionais. Os escorregamentos rotacionais apresentam uma superfície de ruptura curva, côncava para cima, ao longo da qual ocorre movimento rotacional da massa do solo. De acordo com Guimarães *et al.* (2008) esse tipo de escorregamento está associado a regiões com solos bem desenvolvidos. Outros fatores que podem contribuir são cortes artificiais, como na implantação de uma estrada por exemplo, realizados na base dos materiais, ou naturais, originados por exemplo pela erosão fluvial no sopé da encosta. O material movimentado pode ser constituído por solo, rocha, uma mistura complexa de solo e rocha (FERNANDES; AMARAL, 1996).

Os escorregamentos translacionais, são de curta duração, geralmente são compridos e rasos, apresentam superfície de planar, que acompanham geralmente descontinuidades no interior do material, as quais constituem planos de fraqueza. Estes planos de fraqueza podem

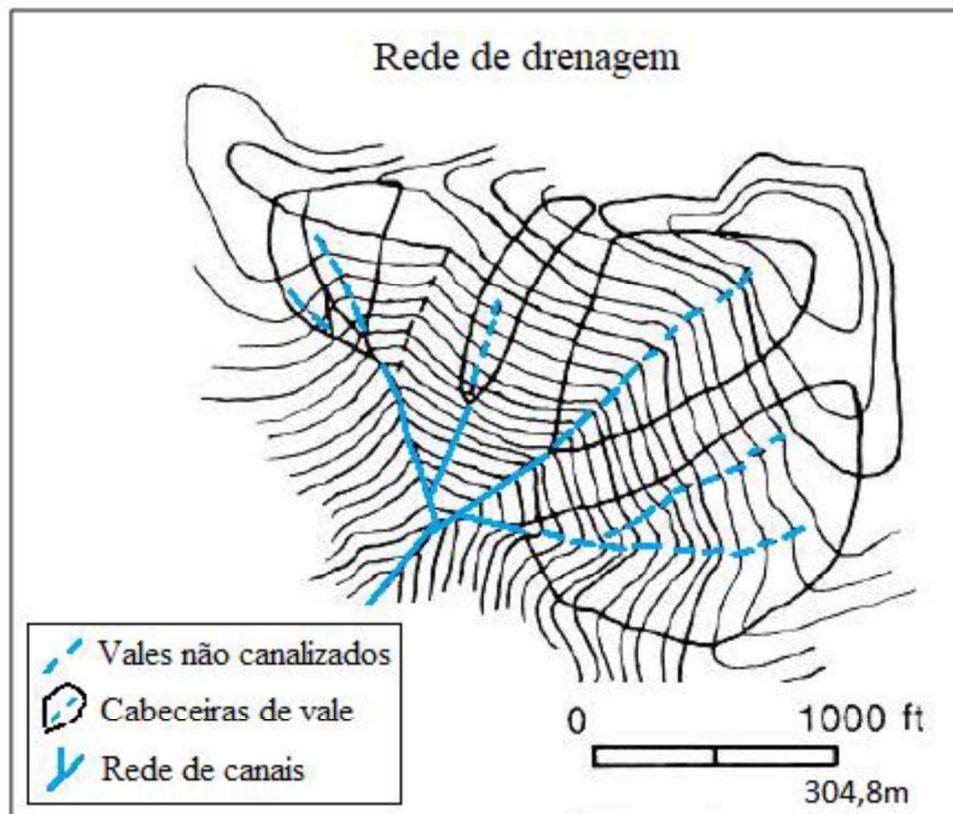
ser de origem geológica como acamamentos e fraturas; geomorfológicos como os depósitos de encostas ou pedológicos como contato entre horizontes e contato *solum*-saprólito. Quanto aos materiais, podem ser constituídos por rocha, solo residual, tálus e colúvio, além de detritos como lixo (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; IPT, 1991). De acordo com Guimarães *et al.*(2008) “esse movimento ocorre, quando a poro-pressão é elevada em uma superfície de descontinuidade, durante chuvas intensas”.

Os rastejos (*creep*) são movimentos lentos, contínuos, sem limites definidos, normalmente ocorrem pela ação da gravidade, podendo mobilizar grande quantidade de material. De acordo com Guidicini e Nieble (1984) a expansão e contração dos materiais podem influenciar neste fenômeno.

## 2. 2 PROCESSOS EROSIVOS EM CABECEIRAS DE DRENAGEM

Conforme Dietrich e Dunne (1993) muitas paisagens são dominadas por uma rede de vales não canalizados, que drena água e sedimentos para a rede de canais (Fig.3).

Figura 3- Rede de drenagem: vales não canalizados, cabeceiras de vale, rede de canais



Fonte: adaptado de Dietrich e Dunne (1993).

Na delimitação de bacias hidrográficas, o traçado das redes de drenagem individualiza sub-bacias situadas nas extremidades a montante de uma bacia hidrográfica, essas sub bacias são as áreas de cabeceiras de vale. Oliveira (2007) destaca que “a hierarquização de canais pode ser extrapolada para áreas no interior das bacias, nas quais não existe canais incisos”, constituindo assim a rede de drenagem. “Esses vales não canalizados, são os primeiros formadores da rede de drenagem, podendo constituir o prolongamento direto da nascente dos canais de 1ª ordem ou, ainda tributários laterais de fluxos canalizados de qualquer nível hierárquico (MOURA; SILVA, 2006)”, estes vales não canalizados correspondem as cabeceiras de drenagem em anfiteatro (MOURA *et al.*, 1991).

Na literatura internacional as cabeceiras de drenagem côncavas são referidas como *holows*. Com base na forma geométrica Hack e Goodlett (1960) identificaram segmentos das cabeceiras de drenagem, sendo: *nose* a área do interflúvio cujos contornos são convexos, *side slope* a zona aproximadamente retilínea, existente entre o segmento convexo e o fundo do vale, e *hollow* a parte central da cabeceira de drenagem ou qualquer outra área da encosta cujos contornos sejam côncavos. “Estes diferentes segmentos de encosta apresentam comportamentos hidrológicos distintos, refletindo na distribuição da umidade e da vegetação” (MOURA *et al.*, 1991). As cabeceiras de drenagem também são denominadas de bacias de ordem zero. Tsukamoto (1973), definiu as bacias de ordem zero como a unidade territorial mínima para que ocorra convergência de fluxo

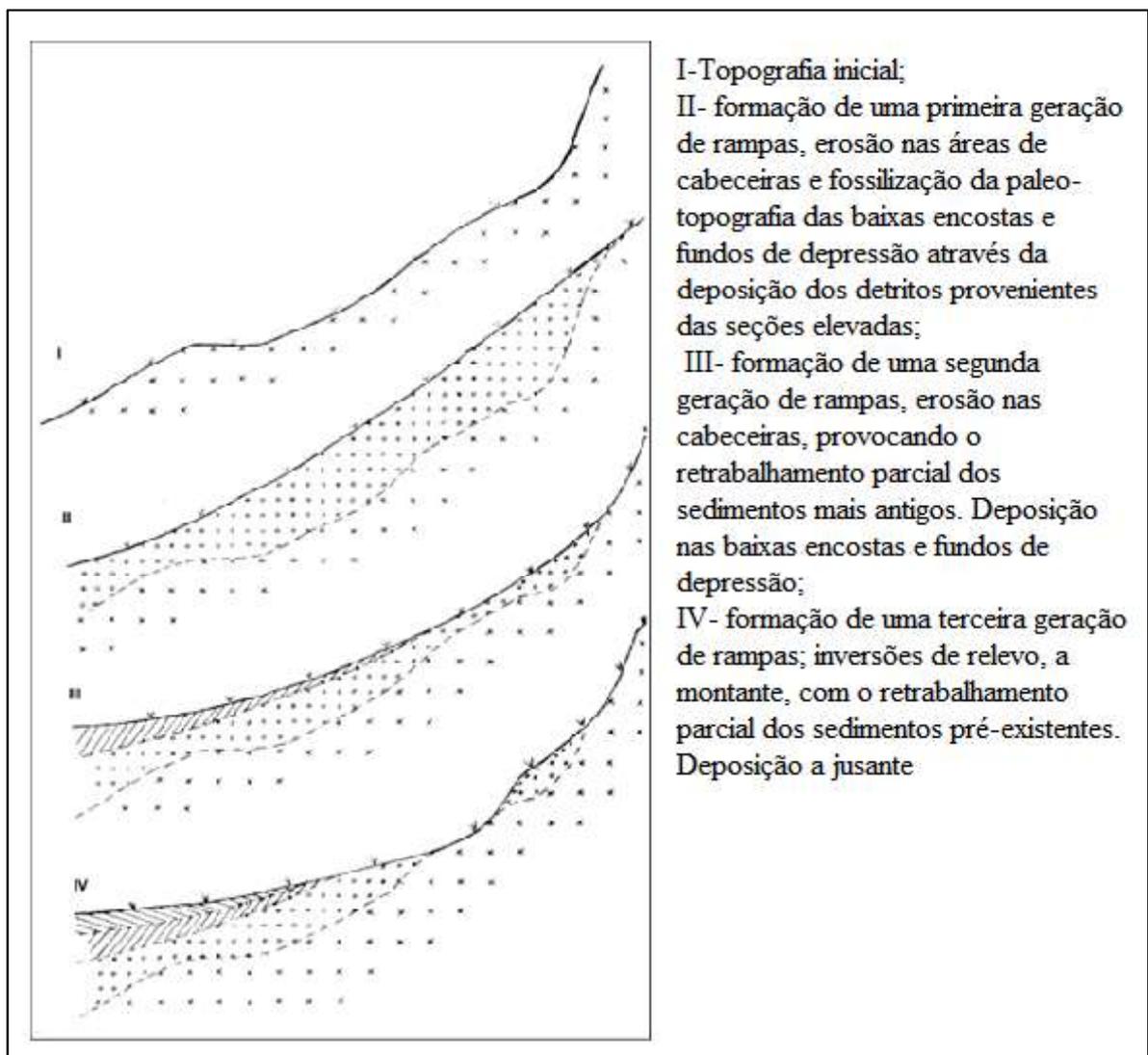
Para Bigarella *et al.* (1991), as cabeceiras de drenagem côncavas constituem ambientes onde predomina a atividade erosiva. Estas formas teriam resultado da perda de estabilidade de uma porção do regolito, o qual teria deslizado vertente abaixo durante fases climáticas mais secas, diferentes das condições atuais (BIGARELLA *et al.*, 1965). Os materiais removidos deram origem aos depósitos coluviais, aos quais os autores supracitados denominam de rampa de colúvio (formas inclinadas preservadas no fundo de vales).

As cabeceiras de drenagem côncavas ou *hollows*, foram identificados em estudos de evolução das vertentes realizados no Sudeste do Brasil. Meis e Monteiro (1979) adotaram o termo rampa para identificar as formas concavas, e segmentaram em: rampa superior, ou ambiente de erosão, rampa média ou seguimento de transição e rampa inferior ou ambiente de deposição. De acordo com as autoras a recorrência de períodos de formação de rampas durante o Quaternário Superior deu origem ao que denominaram de complexos de rampas, e que esta ciclicidade pode ser algumas vezes testemunhada pela presença de pequenos degraus na topografia (Fig.4).

De acordo com Coelho Netto (2003), nos complexos de rampa, os sedimentos coluviais destas concavidades menores, podem ser retrabalhados ao longo do eixo da concavidade principal, dando origem aos chamados depósitos alúvio coluviais no fundo do vale-tronco da cabeceira de drenagem, denominados anfiteatros (COELHO NETTO, 2003).

Oliveira e Meis (1985) constataram que 66% das voçorocas amostradas concentravam-se nos *hollows* com perfis côncavos, que são sensíveis a erosão acelerada, observaram ainda que a maior concentração de casos foi verificada em *hollows* com menor declividade e menor amplitude de relevo. Enquanto Peixoto *et al.*(1989), constataram que 60% de casos de erosão linear acelerada, na região de Bananal (SP/RJ), estavam localizados nas cabeceiras de drenagem com *hollow* côncavo-plano (HCP), indicando estes como locais onde a retomada erosiva é predominante.

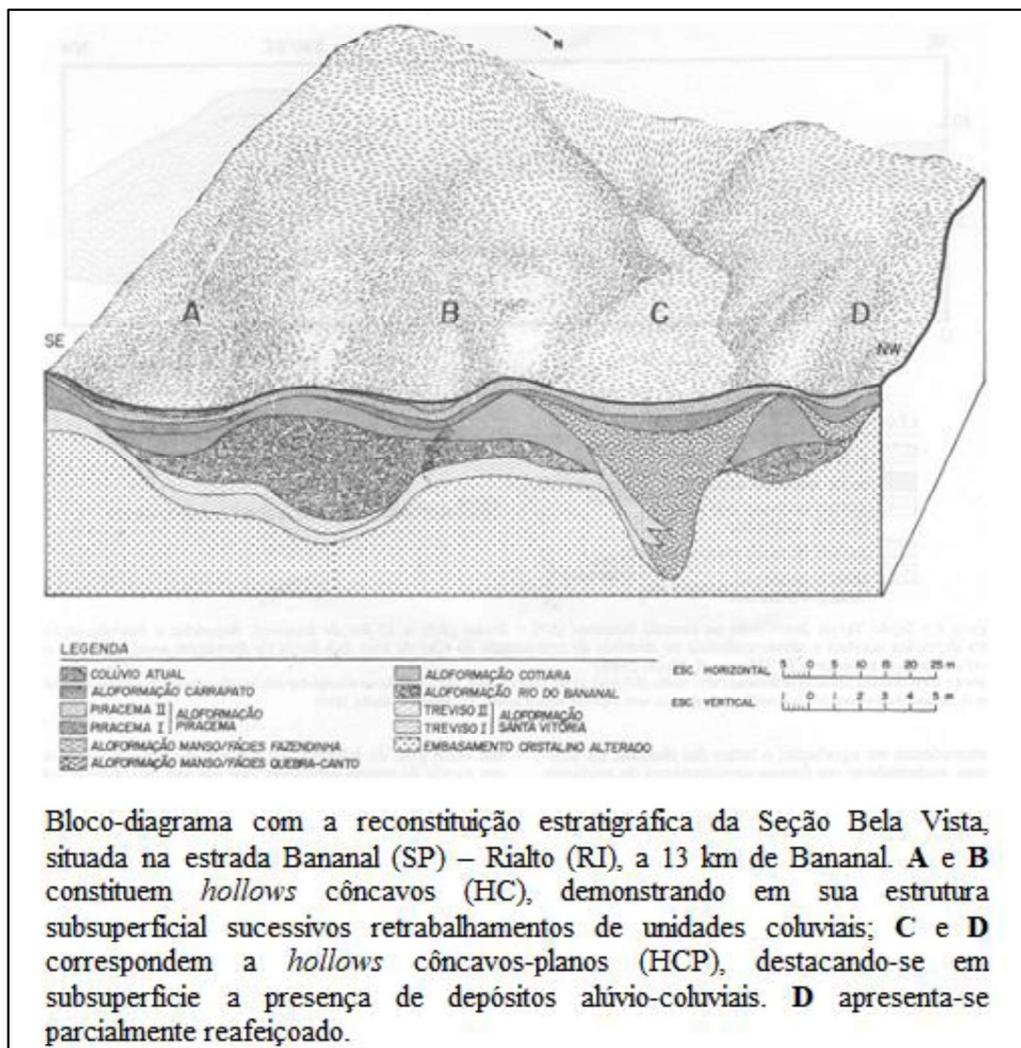
Figura 4- Esquema evolução de um anfiteatro, dando origem à formação de um complexo de rampas.



Fonte: Meis e Monteiro (1979).

Moura *et al.*(1991) estabeleceram dois tipos fundamentais de *hollows* (Fig.5). O *hollow* côncavo (HC) em planta e perfil relacionado ao predomínio de vários episódios de colúviação convergentes para o eixo principal, definindo a estrutura dos complexos de rampa. E o *hollow* concavo plano (HCP), para situação de ruptura brusca das encostas laterais e complexos de rampa, com reentrâncias de fundo plano subhorizontal a horizontal. O HCP seria resultante do preenchimento de paleocanais erosivos por materiais alúvio-colúviais (rampas de alúvio-colúvio), que define a geometria de anfiteatros e sub-bacias de drenagem entulhadas, caracterizado pelo *hollow* côncavo em planta e retilíneo em perfil.

Figura 5: Modelo de *hollow* concavo (HC) e *hollow* concavo plano (HCP).

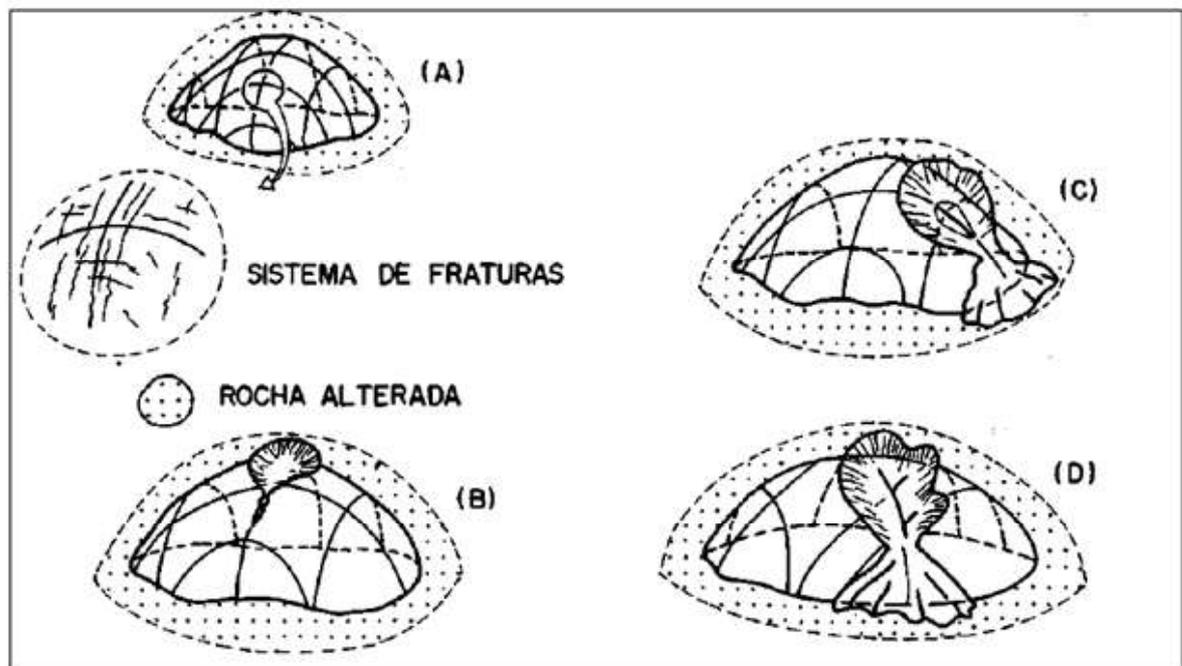


Fonte: Moura *et al.*(1991).

Avelar e Coelho Netto (1992) associaram o desenvolvimento das formas côncavas nas encostas ao sistema de fraturas do substrato rochoso. Segundo os autores, em estudo realizado

no médio vale do rio Paraíba do Sul, no município de Bananal, as concavidades estruturais predominam em todas as litologias estudadas, independente da densidade de fraturas. No modelo proposto (Fig. 6) o fraturamento em matriz de rocha alterada favorecerá a “exfiltração de fluxos d’água subsuperficiais”, que devido ao “mecanismo de erosão por poro-pressões críticas nas faces de vazamento (*seepage erosion*)” poderia dar origem a túneis erosivos e a formação de canais. A evolução desses canais detonaria movimentos de massa nas encostas laterais e cabeceiras, dando origem a formação e o desenvolvimento de concavidades estruturais (AVELAR; COELHO NETTO, 1992).

Figura 6: Representação esquemática da formação de canais e desenvolvimento de concavidades estruturais.



Desenvolvimento de concavidades estruturais, controladas por fraturas na rocha (A); formação de canal e desenvolvimento inicial de uma concavidade suspensa em relação ao fundo de vale adjacente (B); fase de aprofundamento e recuo de encostas (deslizamentos e erosão) (C); Desenvolvimento de subunidades côncavas na intersecção de duas famílias de fraturas (D).

Fonte: adaptado de Avelar e Coelho Netto (1992)

Filizola e Boulet (1996) associam a formação de vales de cabeceiras à evolução de depressões fechadas originadas pela denudação química. Os autores estudaram depressões fechadas com presença de turfa, sobre rochas sedimentares da bacia de Taubaté, no Vale do Paraíba. As depressões fechadas são caracterizadas por apresentar um rebaixamento ou passagem na lateral, niveladas acima do fundo da depressão, e estão localizadas aparentemente nas intersecções de falhas, onde a água infiltra verticalmente. Foi verificado por meio de

medidas piezométricas no interior das depressões que, após chuvas intensas, ocorre fluxo lateral da água subterrânea, o que favorece a exportação de solutos, promovendo o rebaixamento da passagem permitindo a abertura da depressão, que desta forma evolui para um vale de cabeceira.

Para Coelho Netto (2003) “os processos químicos e mecânicos não são excludentes entre si, a questão que se coloca é saber a magnitude dos diferentes processos nos diferentes estágios da evolução do modelado.”

No Sul do Brasil, no Planalto das Araucárias, as cabeceiras de drenagem e fundos de vales de baixa ordem vem sendo estudados por Paisani *et al.* (2016; 2017). Em estudo realizado em rampa de colúvio na superfície Palmas/Água Doce, Paisani *et al.* (2017), verificaram que fundos de vales de baixa ordem (<4ª ordem, conforme classificação de Strahler 1952) foram colmatados por sedimentos coluviais durante o Quaternário tardio. Segundo os autores, nas superfícies de cimeira do Planalto das Araucárias, “as rampas de colúvios são unidades geomórficas de trânsito de sedimentos”, e os sedimentos removidos colmatam vales vizinhos de baixa ordem.

De acordo com Bigarella e Mazuchowski (1985), para compreender o mecanismo de evolução da voçoroca é necessário conhecer o material afetado, os caminhos dos fluxos hídricos nas imediações da cabeceira e identificar o modo de recuo. Dessa forma, no próximo capítulo são elencados alguns fatores que exercem influência sobre o processo erosivo.

### 3 FATORES RELACIONADOS AOS PROCESSO EROSIVO

O processo erosivo envolve uma série de fatores como as características do manto de alteração, as chuvas, a cobertura vegetal as características do relevo e o uso e manejo do solo. A organização do manto de alteração em profundidade (organização e propriedade dos materiais) vai implicar nos fluxos hídricos e no comportamento mecânico.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE ALTERAÇÃO

##### 3.1.1 A influência do substrato rochoso e da zona de alteração

As características da rocha exercem influência sobre o desenvolvimento dos processos erosivos. A estrutura das rochas por exemplo, condiciona a circulação hídrica e o intemperismo, bem como a desagregação de blocos. De acordo com Maciel Filho (2007), a resistência da rocha depende, de maneira geral, muito mais do estado de alteração do que do tipo petrológico.

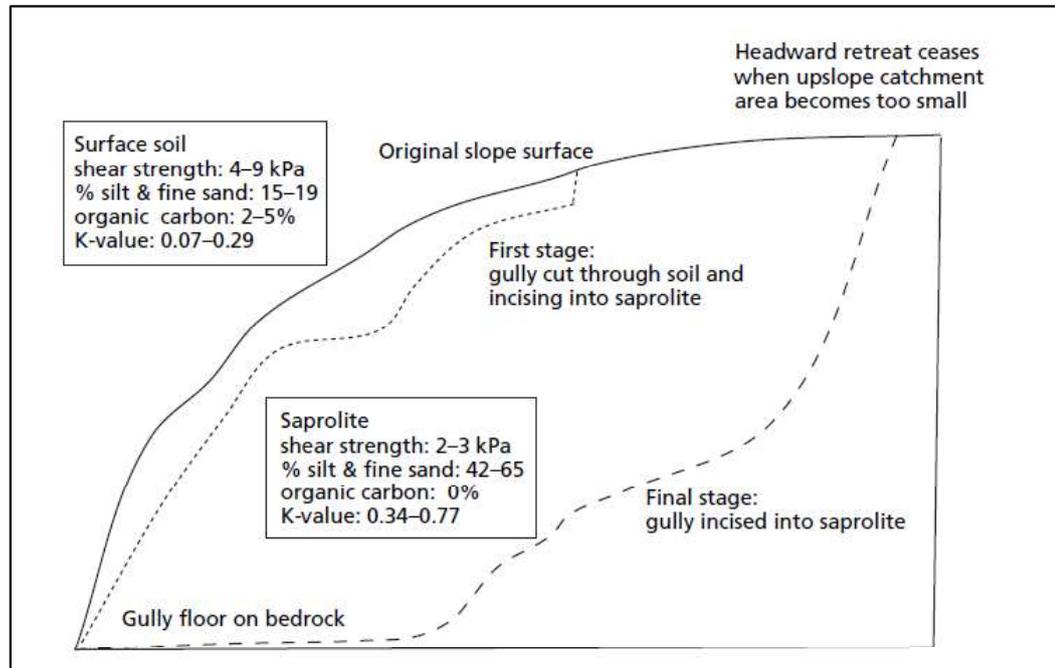
Segundo Casseti (2005) a presença de litologia subjacente impermeável, implica fluxo de subsuperfície, enquanto basaltos muito fraturados por outro lado permitem a infiltração da água. Em basaltos da Formação Serra Geral, em Ribeirão Preto, Fernandes e Maldaner (2011) constatou que não há propagação de fraturas de resfriamento nos níveis vesiculares, presentes nos contatos entre derrames, os quais funcionam como uma barreira hidráulica. Dessa forma a circulação de água subterrânea nos basaltos é limitada por estratos (*stratabound*), sendo muito mais intensa paralelamente aos derrames do que transversalmente a eles. A autora relata a presença de *piping*, associando estes, à ocorrência a fluxos preferenciais ao longo de fraturas subverticais de origem tectônica.

Marques Filho *et al.* (1981) observaram que falhas subverticais e juntas colunares permitem infiltração e decomposição de forma disseminada bem mais intensa nas zonas topograficamente altas, pois abrem por descompressão (desconfinamento lateral), aumentando a condutividade hidráulica nas proximidades de taludes.

Os processos erosivos acelerados como as voçorocas atingem a zona da alterita (zonas de saprolito fino e saprolito grosso), podendo atingir até a rocha alterada. Segundo Morgan (2005) voçorocas ocorrem em todo mundo em áreas de saprólitos profundamente alterados, sobreposto a granitos ou granodioritos. Por oferecer baixa resistência, quando a zona saprolítica é exposta, a erosão ocorre de forma muito rápida até atingir a zona de águas subterrâneas acima das rochas (MORGAN *et al.*, 1997). Na figura 7, pode ser observado a erodibilidade do

saprolito comparado ao solo superficial do local, o saprólito apresenta alto teor de silte e areia fina, e baixa resistência.

Figura 7 - Erodibilidade do saprólito comparado ao solo superficial.



Fonte: Morgan (2005).

Scholten (1997) observou que a existência de saprólito é essencial para o aprofundamento de voçorocas em áreas com rochas magmáticas. Durante a formação do saprólito, embora possa ser preservada a estrutura original ocorre perda de volume, diminuindo a densidade aparente em relação a rocha original e perdas de massa, com valores dependendo da composição mineral da rocha original (SCHOLTEN; FELIX-HENNINGSSEN; SHOTTE, 1997).

Dessa forma, Scholten (1997), analisando o complexo solo em Suazilândia (atual Essuatíni no Sul da África) verificou que comparado aos solos, a condutividade hidráulica saturada na zona saprolítica é cerca de duas vezes maior, estando relacionado a proporção de poros médios (que representam 70% do espaço total de poros) devido ao alto teor de silte e baixa quantidade de argila. Sendo que a condutividade hidráulica atingiu o máximo na zona saprolítica média, junto a maior quantidade de macroporos. Na zona sopolítica superior a condutividade foi menor com a diminuição quantidades de macroporos, o que se deve à alteração do espaço poroso nesta zona, através da incorporação de argila e humus. Os solos apresentaram os menores valores de condutividade hidráulica, estando relacionados ao maior teor de argila.

Bacellar *et al.* (2005) num estudo realizado na bacia do rio Maracujá, sudeste do Brasil, observou que os solos superficiais são resistentes à erosão, enquanto os saprólitos do subsolo são mais erodíveis, sendo assim o seu afloramento foi considerado essencial para o desenvolvimento de voçorocas. O autor constatou que voçorocas ocorrem em áreas de saprólitos mais espessos, com concentração natural de água superficial e subterrânea.

### 3.1.2 Propriedades do solo relacionadas ao processo erosivo

Para Bertoni e Lombardi Neto (1999) as características físicas e químicas do solo podem conferir maior ou menor resistência a ação erosiva das chuvas quando expostos em condições semelhantes de topografia, chuva e cobertura vegetal. Para estes autores as propriedades do solo que influenciam a erodibilidade pela água são as que afetam a infiltração da água no solo e a dispersão e transporte das partículas, dentre elas a textura do solo, a estrutura e a porosidade.

A textura dos solos é uma das propriedades mais analisada tanto por pesquisas da área pedológica como geotécnica. Solos arenosos que possuem as partículas soltas, podem ser arrastadas pela enxurrada. Solos de textura argilosa formam agregados, isso ocorre devido a força de coesão entre as partículas (NÓBREGA, 1995).

A estrutura do solo é outro fator importante que influencia a resistência dos solos à erosão. Solos que possuem estruturas com grau de desenvolvimento forte, resistem de forma mais efetiva à ação da erosão causada tanto pelo impacto da chuva quanto pelo arraste causado pela enxurrada. Além disso, a agregação das partículas do solo em unidades estruturais permite o desenvolvimento da macroporosidade, o que permite a infiltração da água no solo (CAPECHE, 2008).

A porosidade do solo condiciona a percolação da água. Em solos arenosos, a movimentação água é rápida devido à predominância de macroporos. Ao contrário, nos solos de textura fina predominam microporos e a movimentação da água é lenta e tende a saturar mais rápido, dando início ao escoamento superficial.

A densidade é definida como a massa de uma unidade de volume de solo seco, que inclui sólidos e poros, portanto está relacionada ao espaço poroso do solo. Segundo Brady (1987) solos com elevada proporção de espaços porosos em relação aos sólidos, apresentam densidades de volume menores do que outros mais compactos com menos espaços porosos. De acordo com o autor, há tendência nítida para elevação da densidade de volume com o aprofundamento do perfil, o que pode ser atribuído a menor quantidade de matéria orgânica, e compactação ocasionada pelo peso das camadas.

A mineralogia do solo é outro fator importante, no que se refere ao comportamento mecânico dos solos. De acordo com Thomas (1994) a quantidade e o tipo de argilomineral é importante porque irá afetar muito as propriedades mecânicas e o comportamento dos solos. As argilas apresentam superfícies específicas muito elevadas e muito diferentes entre os diversos tipos de argila. Solos que apresentam argilominerais com características expansivas, proporcionam maior desagregação (SOUZA; GASPARETTO, 2010). Dessa forma o tipo de argila vai se refletir no índice de plasticidade do solo. Conforme Berhane e Walraevens (2012) solos que apresentam plasticidade alta são solos potencialmente expansivos sujeitos a mudança de volume devido a variação de umidade.

Os solos tropicais que apresentem altos teores de argila, em condições naturais, apresentam resistências mais altas do que solos que apresentam texturas similares nas zonas temperadas. Isso se deve a presença de óxidos de ferro que conferem estrutura granular ao solo, o que resulta em baixos índices de plasticidade (TOWNSEND *et al.* 1969, apud NÓBREGA, 1995). A lixiviação dos cimentos de  $Fe^2O^3$ , reduzirá a resistência do manto ao cisalhamento, o que pode promover instabilidade na vertente, enquanto em superfícies planas podem ocorrer a recalques (NÓBREGA, 1995; THOMAS, 1994).

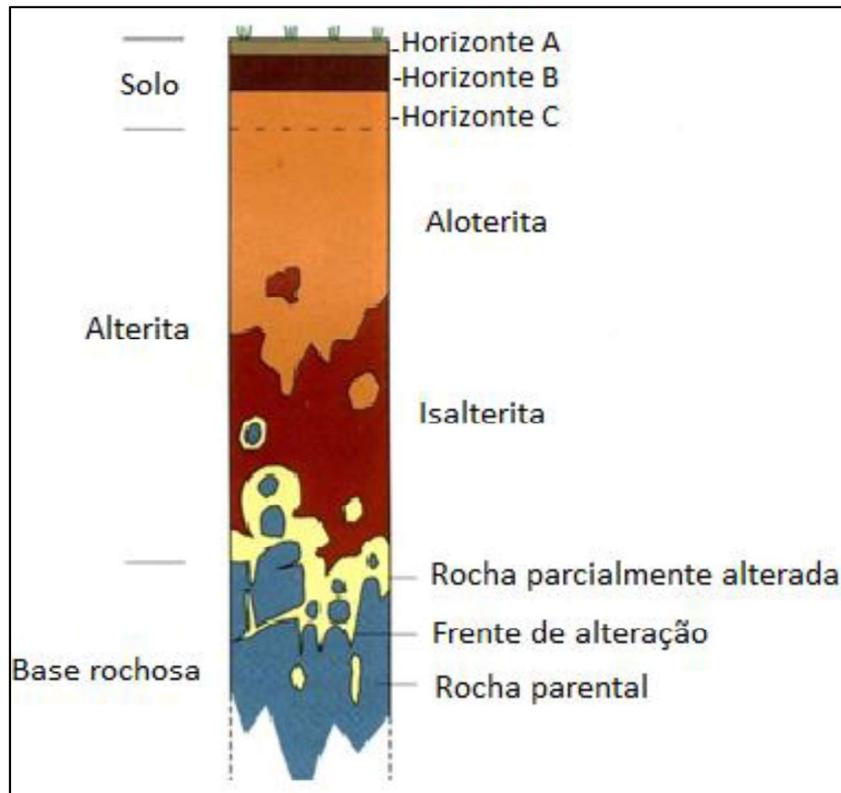
### 3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PERFIL DE ALTERAÇÃO EM MEIOS TROPICAIS

Para compreender a dinâmica da água e o seu papel na atividade erosiva, é importante compreender o manto de alteração as variações verticais das características dos materiais no perfil. Em meios tropicais as coberturas superficiais apresentam materiais de diferentes fácies, distribuídas em níveis ou conjuntos principais de horizontes que resultam de alteração intempérica e pedogênese da rocha (PEDRO, MELFI, 1982, apud GONÇALVES, 1987). O manto de alteração é composto pelo *solum* que compreende os horizontes pedológicos; pela alterita subdividida em aloterita e isalterita, pela rocha parcialmente alterada e a rocha mãe (Fig.8).

De acordo com Melfi (1984), nestes perfis podem ser separados dois conjuntos de horizontes, o conjunto inferior é de alteração (alterita) e o conjunto superior (*solum*) é caracterizado pelas evoluções pedológicas, e acumulação de óxidos, hidróxidos e argilas.

O perfil de alteração pode ser caracterizado de acordo com os níveis de alteração e de acumulações superficiais (NAHON, 1986).

Figura 8 - Perfil de alteração



Fonte: Delvigne (1998)

A alterita é caracterizada pela natureza dos minerais primários, pela cor e pelo grau de conservação do volume, textura e estrutura da rocha mãe original. Chatelin (1974) empregou o termo isalterita (saprólito grosseiro), que preserva volume, textura e estrutura original da rocha; e aloterita (saprólito fino), quando não é possível distinguir as características estruturais da rocha pela alteração, que encontra-se parcial ou totalmente modificadas com presença frequente de ilhas relictuais. A aloterita está situada distantes da rocha mãe em meio saturado de água, sob a influência da composição química do lençol de água subterrâneo e pelas condições da drenagem interna das vertentes (MELFI, 1994; GONÇALVES, 1987).

Segundo Melfi (1994) as acumulações ferruginosas afetam geralmente o topo das alteritas, e resultam principalmente da transferência do ferro proveniente da degradação de conjuntos ferruginosos superiores, ou situados a montante das paisagens, ou da redistribuição do ferro no interior as alteritas. De acordo com Gonçalves (1987), o conjunto dos horizontes de acumulações é caracterizado pela elevada concentração de óxi-hidróxidos e argilominerais, os quais podem ou não estar endurecidos, as litorrelíquias precedentes raramente são conservadas. Fritsch (1984, apud GONÇALVES, 1987) divide este conjunto de acumulações pedoturbadas, que apresetam uma distribuição regular do esqueleto e uma reorientação do plasma em: e

estruturas de acumulação variavelmente endurecidas contínuas (couraças lateríticas); e estruturas descontínuas, que são as glébulas (halos, microagregados, nódulos, concreções etc.) sustentados por um fundo matricial interglébular.

O *solum* corresponde ao (conjuntos superiores móveis) é o domínio de transformações, os horizontes estão situados acima do nível dos lençóis de água, e são submetidos às condições de temperatura e umidade que caracterizam o clima. São caracterizados por materiais finos, presença de minerais primários resistentes, como o quartzo e fragmentos residuais de glébulas, litorreliquis etc. Da parte inferior do perfil para o topo ocorre a diminuição progressiva da densidade aparente e o aumento da porosidade, dessa forma o perfil fica caracterizado pela densidade, porosidade e teor em água (MELFI, 1994).

De acordo com Gonçalves (1987) o fato desse conjunto de horizontes apresentarem ou não discordância entre si, sucessões complexas de diferentes fácies, transformações e estruturas, indicam que a gênese e evolução desses níveis podem resultar de vários processos de alteração e pedogênese. Como exemplos podem-se citar, os remanejamentos mecânicos superficiais com superposição de materiais alóctones, remanejamentos internos de origem biológicas, evoluções sucessivas diferentes, superimpostas no decorrer do tempo e refletidas na grande complexidade das organizações e transformações mineralógicas-estruturais.

### 3.3 A AÇÃO EROSIVA DAS ÁGUAS PLUVIAIS CONDICIONADA PELO RELEVO E A VEGETAÇÃO

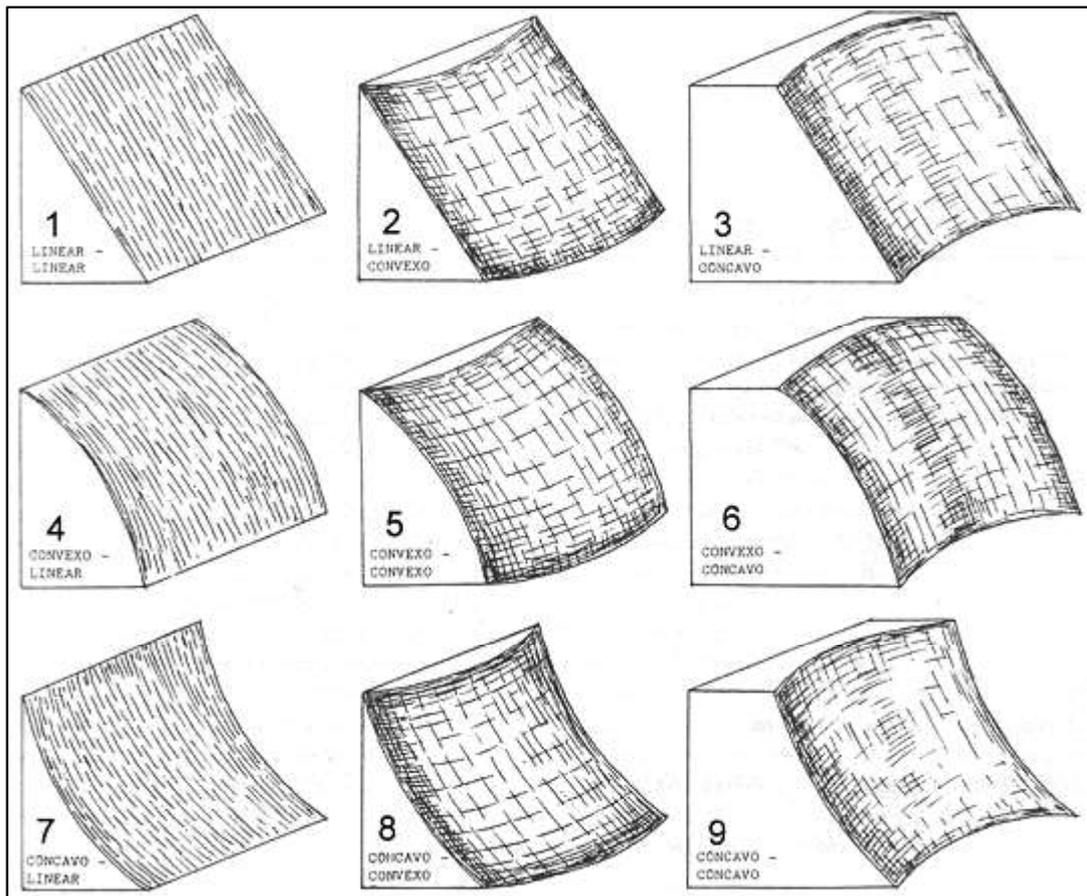
A erosão é iniciada pelo impacto provocado pela gota da chuva que rompe os agregados destacando as partículas de solo. O processo erosivo continua com escoamento da água pela superfície, sendo que o início do escoamento depende da taxa de infiltração. A velocidade com que a água se infiltra no solo é determinada pelas propriedades do solo, pela característica das chuvas, o tipo de cobertura vegetal, características das encostas e do uso e manejo do solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999). O volume da chuva, o regime sazonal ou diário, bem como a intensidade das chuvas individuais, são características que influenciam a natureza e magnitude do trabalho geomorfológico em bacias de drenagem (COELHO NETTO, 1998).

Conforme Souza (2001) os atributos do relevo relacionados às formas das vertentes, a declividade dos terrenos e os comprimentos das encostas, interferem diretamente nas atividades erosivas. A forma da vertente está relacionada a concentração ou dispersão dos fluxos de água. Encostas côncavas acabam concentrando maior volume de água, propiciando a saturação dos

poros e, conseqüentemente, diminuindo a capacidade de infiltração do solo, acelerando o escoamento superficial.

Conforme o modelo proposto por Ruhe (1975) a vertente é tridimensional e pode apresentar 9 aspectos geométricos (Fig.9) dependentes do perfil, e da forma (no plano).

Figura 9- Geometria das vertentes



Fonte: Bigarella *et al.* (2007)

Em estudos da paisagem, Colavite (2013) constatou que o processo se torna mais intenso e expressivo nas vertentes com formato côncavo, pelo escoamento concentrado da chuva nessa porção do relevo.

O tamanho e a quantidade de material transportado pela água de escoamento superficial dependem da velocidade de escoamento que é determinada pelo comprimento da vertente, e pelo grau de declividade do terreno (fator LS). A água que escorre ganha energia pelo aumento de massa no seu movimento ou pelo aumento de velocidade que adquire por uma mudança na declividade do terreno. Quanto maior o grau de declividade e o comprimento da rampa, maior será a velocidade da água e a capacidade erosiva (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

Apesar de a declividade ser um fator importante, não há necessariamente uma correlação positiva, pois à medida que a declividade aumenta, em encostas muito íngremes a erosão pode diminuir devido ao decréscimo de material disponível (MORGAN, 2005).

Outro fator extremamente importante no desenvolvimento do processo erosivo é a cobertura vegetal, pois oferece proteção ao impacto das gotas de chuva, favorece a infiltração da água por meio das raízes, diminui a velocidade do escoamento da enxurrada, além da adição de matéria orgânica ao solo. Além disso, a vegetação tem efeitos mecânicos na estabilidade das vertentes, promovidas pelo sistema radicular que aumenta a resistência do solo devido à rede de raízes (STYCZEN; MORGAN, 1995, apud POLIVANOV; BARROSO, 2011). Por outro lado, Thomas (1994) faz algumas considerações sobre a vegetação: as raízes aumentam a infiltração e o escoamento, elevando a poro pressão da água e diminuindo a coesão do solo; e a queda da árvore com o desenraizamento aumentará a erosão e a infiltração e produzirá um arrasto descendente. Sato (2012) verificou em cabeceiras de drenagem com plantio de eucalipto, que o processo de interceptação favorece a infiltração e recarga do aquífero em vales de cabeceiras, o que ocasionou a reativação e expansão de voçorocas já estabilizados antes do plantio.

#### 3.4 PROCESSOS EROSIVOS EM DIFERENTES TIPOS DE COBERTURAS PEDOLÓGICAS

Diversos trabalhos com enfoque em estudos pedológicos, buscaram compreender o comportamento dos materiais e dos fluxos hídricos, e o desenvolvimento de processos erosivos. Grande parte dos estudos sobre processos erosivos lineares na literatura, se referem a áreas com formações sedimentares arenosas.

No Paraná, na região noroeste constituída por arenitos da Formação Caiuá, os processos erosivos são problemas recorrentes. De acordo com Nakashima (1999), a partir da década de 1950, com a ocupação desta região, o desmatamento e a implantação de cultivo agrícola deram início aos processos erosivos. Segundo o autor, o manejo incorreto dos solos provocou o aparecimento de sulcos, ravinas, voçorocas, deslizamentos, solifluxão, compactação e aumento da erosão laminar.

Gasparetto *et al.*(1995) em trabalho realizado no município de Cidade Gaúcha-PR, atribuíram a origem das voçorocas e ravinas ao processo de urbanização. Segundo os autores os processos erosivos estão sempre associados a concentração da drenagem em superfície,

devido ao traçado inadequado das ruas, ruas inacabadas nas vertentes, terraplanagem para loteamentos, áreas de empréstimo de materiais.

Nakashima (1999) estudou os principais sistemas pedológicos da região noroeste do Paraná, o autor relacionou o grau de susceptibilidade à erosão com o relevo e os solos predominantes. Foram considerados sistemas de baixa ou nula susceptibilidade aos processos erosivos: as planícies de inundação dos rios Paraná e Ivaí (SP IV), atribuído a baixa declividade e a constituição por materiais finos, e o sistema composto por Latossolo de textura argilosa, Argissolo (Podzólico de textura média) e Gleissolo (Glei) (SP I), em relevo com colinas amplas, de topo plano a ligeiramente convexo e baixas declividades, onde os processos erosivos lineares são poucos, e os pequenos sulcos estão presentes próximos aos talwegues.

A sequência formada por Latossolo, Argissolo (Podzólico) e Gleissolo (Glei) (SP II), que ocorrem em colinas amplas de topos aplainados ou levemente convexizados, com pequena variação textural da cobertura pedológica vertical e lateralmente, foi considerado de moderada susceptibilidade a processos erosivos. Estes processos são mais atuantes no sopé da vertente, onde aparece um horizonte ligeiramente mais estruturado e um fluxo lateral devido a concentração de água entre os horizontes A e B (NAKASHIMA, 1999).

O sistema composto por Latossolo, Argissolo (Podzólico), Nitossolo (SP V), em colinas médias, com vertentes convexas com maior grau de dissecação e declividades crescentes para jusante, apresentou as seguintes características: no topo os fluxos hídricos são predominantemente verticais, devido a estrutura microagregada dos horizontes inferiores, após a ruptura de declive, a o fluxo subsuperficial passa a ser fracamente lateral, sobre um horizonte Bt. Para jusante o fluxo lateral é intensificado, o que é atribuído à mudança do material original do solo, que passa de mais arenoso para argiloso, resultante da alteração do basalto. O comportamento hídrico é complexo em virtude da origem diferenciada da cobertura pedológica. O topo e alta vertente foram considerados de grande susceptibilidade a erosão onde estavam localizadas ravinas e voçorocas ativas. Os setores de médias e baixa vertentes de textura mais argilosas, foram considerados como de baixa susceptibilidade erosiva (NAKASHIMA, 1999).

O sistema pedológico compostos pela sequência Latossolo, Argissolo (Podzólico), Gleissolo (Glei), (SP III), as vertentes deste sistema foram consideradas de alta susceptibilidade a processos erosivos, mas foi dividido em dois setores: o primeiro caracterizado por colinas amplas de topo plano a ligeiramente convexos, e vertentes convexas-retilíneas. Onde do topo até a média vertente predomina o Latossolo, com fluxos hídricos predominantemente verticais, da média vertente até o terço inferior predomina fluxo lateral em virtude de um horizonte Bt

mais argiloso e a presença de bandas onduladas que interferem na circulação vertical da água, e promove um escoamento lateral suspenso das águas subsuperficiais.

No setor inferior da vertente a circulação hídrica é vertical e lateral transformando-se em Nesossolo Quartzarênico (Areia Quartzosa), que podem favorecer o aparecimento de sulcos e ravinas. Em setores onde as colinas são pequenas e os topos dos interflúvios são poucos extensos, predomina a cobertura argissólica, em geral nos patamares rebaixados entre os grandes interflúvios. A ocorrência de cobertura argissólica com bandas onduladas, promovem o escoamento lateral das águas subsuperficiais até o sopé da vertente. Nesse sistema as ravinas e sulcos são frequentes na zona rural e voçoroca na zona urbana (NAKASHIMA, 1999).

O sistema composto por Latossolos, Argissolo (Podzólico abrupto), Gleissolo/Neossolo Quartzarênico (Areia Quartzosa), (IV) em colinas médias e amplas, vertentes retilíneas e ligeiramente convexas, com relevo dissecado, foi considerado altamente suscetível à erosão. Nos setores de média e baixa vertente a presença de B textural, promove o fluxo lateral da água subsuperficial. Ocorrem sulcos, ravinas e voçorocas de forma generalizada nestes setores tanto em zona urbana como em zona rural (NAKASHIMA, 1999).

Cunha, Castro e Salomão (1999), investigaram um sistema pedológico em Umuarama-PR, em solos de textura arenosa e média, em topossequência numa cabeceira de drenagem, conforme método bidimensional da cobertura pedológica, proposto por Boulet *et al.*(1992). A partir dos resultados obtidos, os autores estabeleceram três zonas distintas em relação a suscetibilidade a erosão, a zona de topo constituída por latossolo com predomínio de circulação hídrica vertical, que foram consideradas zonas estáveis. O setor da média vertente com Argissolo, foi considerado zona de estabilidade precária, onde o horizonte Bt, dificulta a circulação hídrica vertical, originando um fluxo lateral nos materiais sobrejacentes (horizontes A e E), que por ser arenosos, podem ser mobilizados, facilitando a instalação de processos erosivos lineares como sulcos e ravinas.

Os setores do terço inferior até o sopé da vertente, foi considerado zona de instabilidade potencial, caracterizada por espessamento do horizonte superficial arenoso sobre o Arenito Caiuá com delgado horizonte de alteração, e redução importante da porosidade. A circulação hídrica lateral é intensificada, e surgindo condições para o aparecimento de lençol freático, o que segundo os autores, pode promover a instalação do fenômeno de *piping* e a subsidência da superfície. Neste setor a presença de uma voçoroca cria uma situação desequilíbrio na vertente, que passa a sofrer os reflexos do seu aprofundamento e alargamento, como deslizamentos (CUNHA; CASTRO; SALOMÃO, 1999).

Martins (2000) em estudo realizado numa bacia hidrográfica em Cidade Gaúcha (PR), identificou Latossolos no topo, Argissolos na média e baixa vertente, e Neossolo Quartzosas no sopé da vertente. O autor verificou que a dinâmica hídrica nos Latossolos é vertical, passando a lateral nos Argissolos e Neossolos Quatzarênico. De acordo com o autor, essa dinâmica se deve ao ajuste da pedogênese a morfogênese, resultante do aprofundamento do nível de base condicionado por mudanças climáticas quaternárias e ao processo de convexização do relevo, principalmente a jusante da bacia.

O estudo realizado por Cunha (2002), em Cidade Gaúcha-PR, teve objetivo de compreender a evolução morfopedológica da vertente e a instalação de processos erosivos. Nos Latossolos na alta e média-alta vertente, verificou que o adensamento dos horizontes de transição (AB e BA) favoreceu a instalação de fluxos hídricos laterais. Do mesmo modo, no Argissolo, devido ao gradiente textural entre o horizonte AE e Bt ocorre a redução dos fluxos hídricos verticais e a instalação de fluxos hídricos laterais, promovendo a hidromorfia na baixa vertente e a remoção do ferro e argila. O setor ocupado por Argissolo foi considerado mais suscetível à erosão devido a declividade da vertente e da velocidade dos fluxos superficiais, atuando em materiais arenosos.

Nakashima (1999), ao elaborar a carta morfopedológica de Araruna-PR, na área de contato entre as rochas basálticas da Formação Serra Geral e o arenito da Formação Caiuá. Observou em campo que as ocorrências erosivas (voçorocas, ravinas e sulcos) eram mais evidentes nos setores de média e alta vertente onde predominam Argissolos (Podzólicos), e parecem com maior frequência no contato Argissolos (Podzólico Vermelho Escuro) com solos derivados do basalto, Latossolo Roxo e Nitossolos (Terra Roxa Estruturada). As ravinas e voçorocas aparecem em geral ao longo dos canais de drenagem intermitentes. O autor observou ainda que pequenos sulcos ocorriam próximos às margens dos rios, provocados pelo pisoteio do gado e carreadores.

Moresco e Cunha (2003), realizaram estudo em topossequência numa vertente no município de Marechal Cândido Rondon, com o objetivo de realizar uma setorização morfopedológica da vertente e indicar os principais fatores de risco a erosão. A sequência de solos na vertente é representada por Nitossolo Vermelho, Neossolo Litólico, Latossolo Vermelho, Neossolo Litólico. Os autores consideraram como setores mais suscetíveis à erosão, os setores representados pelas rupturas de declive com a transição lateral do Nitossolo Vermelho para Neossolo Litólico no segmento médio alto da vertente, e com a transição do Latossolo para o Neossolo litólico na baixa vertente, também com ruptura de declive, onde foi

constatado erosão laminar e linear. Os processos erosivos foram relacionados à declividade destes segmentos e a menor espessura dos Neossolos.

Calegari e Martins (2004) realizaram estudo em topossequência no município de Marechal Rondon com o objetivo de identificar os fatores responsáveis pelo desencadeamento dos processos erosivos. As autoras identificaram solos argilosos a muito argilosos (>60% de argila). Os Latossolos Vermelhos estão situados na alta vertente, Nitossolos Vermelho na média vertente, Neossolos Litólicos e Regolíticos nos segmentos de média-baixa e baixa vertente, associados às rupturas convexas fortes com declividades superiores à 20%. Os Neossolos também foram identificados em outros segmentos da vertente onde ocorrem rupturas de declive.

Neste estudo as autoras identificaram áreas de instabilidade morfopedológica das vertentes, observando que: ocorriam movimentos de massa generalizados e erosões lineares à jusante do seguimento de baixa vertente, caracterizado por solo raso com sequencia vertical Ap, Cr, proximidade da rocha e ruptura de declive; pequenos deslizamentos a partir da ruptura de declive até o fundo de vale; feições superficiais (bossas) causadas pelos movimentos de massa do tipo rastejo, o rastejo foi atribuído a textura argilosa do horizonte superficial Ap associado à declividade; cicatrizes e terracetes originados a partir de pequenos deslizamentos e o surgimento de sulcos e ravinas surgidos a partir das cicatrizes deixadas pelos deslizamentos. Destacam ainda que os deslizamentos são frequentes mas de baixa magnitude.

Zamuner (2001) realizou estudo de um processo erosivo na área urbana do município de Maringá-PR. O processo erosivo se desenvolveu no interior de um Parque em área florestada. Foram analisados três perfis de solo nas laterais de uma ravina, sendo Latossolo vermelho de textura argilosa, na média vertente, e Nitossolo vermelho de textura muito argilosa na baixa vertente, e um latossolo de textura média no topo em área urbana. O autor constatou que os processos erosivos se desenvolveram mais intensamente na classe de Nitossolos, situados em declividade variando de 10 a 20% e em menor número nos latossolos em declividades em torno de 7 a 10%. Ele destaca que apesar dos solos apresentarem textura argilosa, porosidade alta, e da floresta ter sido preservada na área de cabeceira e de fundo de vale, ravinas e voçorocas se desenvolveram pelo lançamento de água pluvial do sistema de drenagem urbana, de forma inadequada devido a falta de dissipadores na extremidade dos tubos.

Zaparoli e Nóbrega (2006), a partir do reconhecimento da estrutura “geoecológica” aplicada aos estudos de paisagem, avaliaram uma voçoroca situada entre os municípios de Sarandi e Maringá, com cabeceira localizada junto à descarga de uma galeria pluvial da área urbana. A voçoroca desenvolveu-se numa cabeceira de drenagem em anfiteatro, com vertentes longas convexo-côncavas. O substrato geológico é constituído por rochas vulcânicas (basaltos

e andesi-basaltos), cobertos por Latossolo Vermelho e Nitossolo Vermelho ambos de textura argilosa. De acordo com as autoras, os solos apresentam em geral espessuras entre 8 e 12 m em posição de topo, e até 1m na baixa vertente. Constataram que a voçoroca com 10 metros de profundidade e 748 metros de comprimento, tinha a cabeceira localizada centenas de metros à montante das nascentes, e ressaltam que apesar de ter sido construídos dissipadores de energia no ponto de descarga da galeria pluvial, estes encontram-se destruídos pela atividade erosiva.

Machado *et al.*(2017), realizaram estudo geoambiental de uma voçoroca no município de Campo Mourão-PR, no perímetro urbano. O processo erosivo desenvolve-se em área coberta por Latossolos e Nitossolos vermelhos originados de basaltos. Segundo as autoras a origem do processo erosivo está relacionado ao recebimento de águas de galerias pluviais num córrego, ainda na década de 1970. Posteriormente o córrego foi canalizado, e a rede de galeria prolongada, a erosão foi aterrada com resíduos de construção civil no final da década de 1980. Atualmente (2017) foi constatado pelas autoras que no ponto de lançamento da rede de galerias das águas pluviais não há dissipador de energia o que contribui para o processo erosivo. Afirmam ainda que não foi encontrado nenhum estudo técnico da área em questão, referente ao aterramento realizado.

### 3.5 ATIVIDADES ANTRÓPICAS E O DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS

A ação da sociedade sobre o meio provoca alterações em maior ou menor intensidade, tanto pelas atividades desenvolvidas nas áreas rurais, onde a cobertura da terra é alterada para o cultivo, como na construção de cidades com a impermeabilização que altera a drenagem natural. Na área rural, a erosão está relacionada principalmente ao manejo do solo. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1999), pois para um mesmo tipo de solo com diferentes sistemas de manejo a perda por erosão é maior do que diferentes tipos de solos com o mesmo tipo de manejo.

A mudança do uso do solo, com o desmatamento para a implantação das atividades agrícolas no noroeste do Paraná por exemplo, foi apontada como fator desencadeante dos processos erosivos. Na região oeste do Paraná em solos de textura argilosa, Calegari e Martins (2004) observaram que o pisoteio de animais e as trilhas formadas, favorecem a concentração de fluxos superficiais e o desenvolvimento de sulcos e ravinas. Outro fator importante, e que contribui para os processos erosivos na área rural são as estradas. De acordo com Luce e Weple (2001) a natureza linear das estradas, que comumente cruzam gradientes topográficos, e

exercem uma influência nos processos hidrológicos em escala de bacias hidrográficas. De acordo com o autor a concentração de escoamento de superfícies de estradas aumenta efetivamente a densidade de drenagem, alterando a distribuição de água nas encostas e potencialmente aumentando os fluxos de pico dos rios.

As erosões nas áreas periurbanas relacionadas ao sistema de drenagem urbano são um problema comum em vários municípios brasileiros, Iwasa *et al.*(1991) observam que a concentração de águas superficiais pelo processo de urbanização é uma causa decisiva na deflagração de processos erosivos. Ao analisar a ocupação urbana e a ocorrência das erosões na Bacia do Pardo Grande, no estado de São Paulo, os autores fazem algumas considerações por ser semelhante aos problemas encontrados em vários municípios, tais como: processos erosivos nas drenagens de primeira ordem, eixo natural de concentração das águas de superfície; medidas inadequadas pelas prefeituras, como aterramento com lixo; aterros sem drenagem subterrânea e proteção superficial; instalação de galerias sem dissipadores.

No noroeste do Paraná Nakashima (1999), Cunha, Castro e Salomão (1999), destacam o traçado viário e o escoamento das águas pluviais urbanas e falta de galerias pluviais como fatores relacionados a erosão linear em cabeceiras de drenagem.

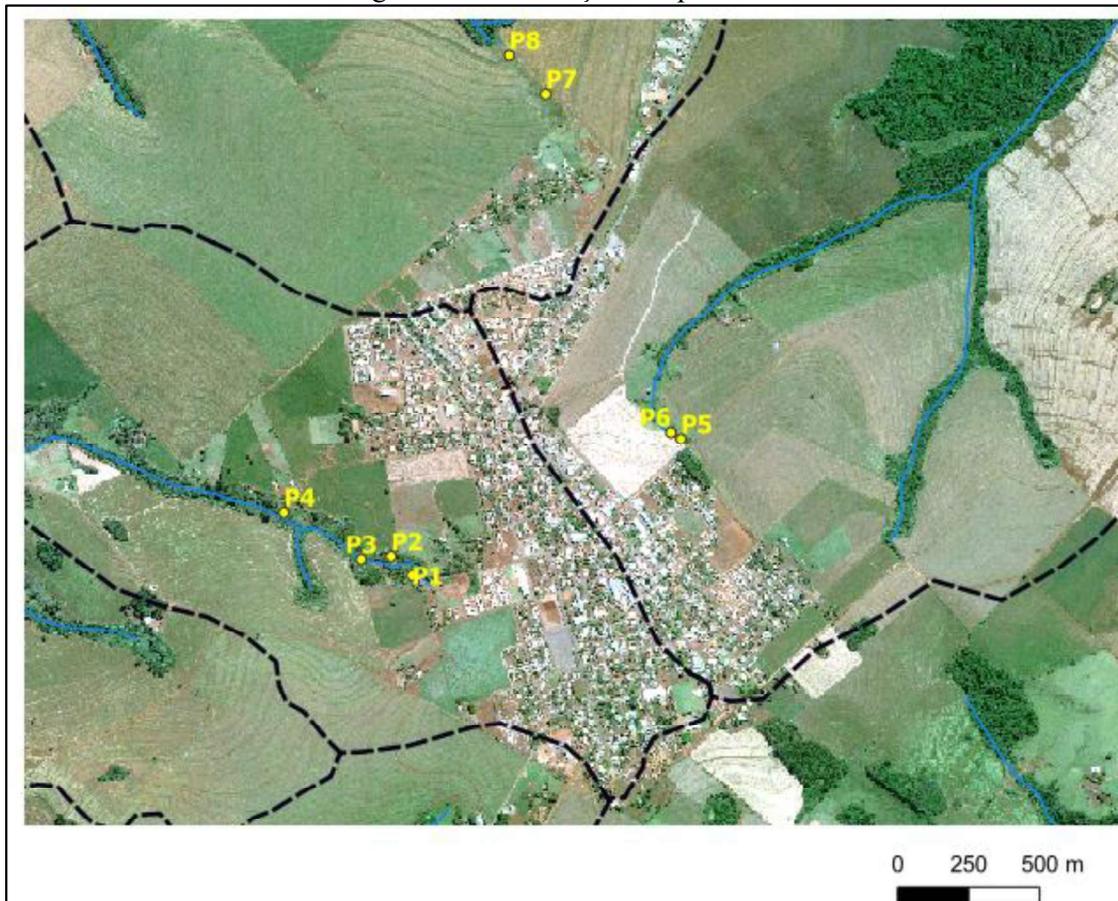
## 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E TÉCNICOS

### 4.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A escolha dos componentes do meio físico e os atributos analisados, foi realizada a partir da revisão da literatura, dos objetivos do trabalho, das características observadas em campo e dos recursos disponíveis. Buscou-se conduzir o trabalho a partir da abordagem sistêmica, considerando as características morfológicas das vertentes, os fluxos hídricos superficiais condicionados pela morfologia, as propriedades do manto de alteração (organização do perfil, textura do solo, porosidade, densidade, condutividade hidráulica, minerais presente e Limites de Atterberg), e as modificações introduzidas pela ação antrópica, que em conjunto auxiliam na compreensão dos processos atuantes.

Foram analisados perfis de alteração em três feições erosivas em sub-bacias opostas, as quais foram denominados Ravina Sem Passo, Voçoroca das Lontras, e Voçoroca Luiziana (Fig.10).

Figura 10- Localização dos perfis analisados



Fonte: Organizado pela autora, Imagem Bing (2019).

Na Ravina Sem Passo e Voçoroca das Lontras, as feições erosivas foram analisadas no compartimento de cabeceira de drenagem. A Voçoroca Luiziana está conectada ao rio Nunes, portanto esta bacia foi considerada para análise dos processos erosivos. Após uma análise inicial da bacia do rio Nunes com observações em campo e mapeamento preliminar das feições erosivas, optou-se por analisar perfis de solo na porção superior da bacia do rio Nunes, onde a voçoroca está em atividade. A escolha dos perfis de alteração foi realizada considerando três aspectos principais: perfis expostos pelo processo erosivo, diferenças nas características do manto de alteração e condições mínimas para coleta, pois se trata de uma área de risco. Os perfis 1, 2, 3 e 4 estão alocados na Voçoroca Luiziana, os perfis 5 e 6 representam a Voçoroca das Lontras e os perfis 7 e 8, correspondem a Ravina Sem Passo.

Como a área urbana do município está situado no topo de interflúvio e exerce influência em todos estes processos erosivos, na maioria dos mapas e discussões as características gerais da área e os três processos erosivos são apresentados de forma conjunta. No entanto devido a complexidade da Voçoroca Luiziana, ela ganha maior ênfase na discussão.

## 4.2 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS

Os procedimentos adotados nesta pesquisa contemplam: a revisão da literatura pertinente ao tema de pesquisa; o levantamento de dados cartográficos; observação em campo; descrição morfológica dos perfis e coleta de amostras; análises laboratoriais; análise e interpretação de dados obtidos e redação.

### 4.2.1 Levantamento cartográfico e elaboração de mapas

Para compor a base de dados cartográficos foi montado um banco de dados no Sistema de Informações Geográficas QGIS.

A carta topográfica na escala de 1:50.000 de 1990 no formato vetorizado (DSG, 2019), foi utilizada como base de dado oficial. Da carta da topográfica também foram obtidas informações úteis como divisas, localização de construções, o que auxiliou na contextualização dos fatos históricos. Imagens de satélite e fotografias aéreas de diferentes datas foram utilizadas para identificar e analisar a evolução do processo erosivo e para mapear o uso da terra. Para a escolha das imagens foram observados a presença do fenômeno de interesse, a disponibilidade, e a resolução espacial e temporal das imagens de satélite. As fotografias aéreas foram ortorretificadas em *software* específico e georreferenciadas, conforme Silva e Fortes (2022).

Para investigação do histórico dos processos erosivos atuais foi realizada análise de imagens, levantamento de informações históricas e investigação de campo. Os mapas de processos erosivos foram elaborados com base em: fotografias aéreas na escala de 1:25.000 do ano de 1980 (ITCG); imagens de satélite com resolução de 0,5m (BING MAPS, 2019). Para auxiliar na interpretação foram consultadas imagens de satélite disponíveis na plataforma *Google Earth*® entre os anos 2007 e 2019; fotografias aéreas na escala de 1:10.000 do ano de 1990 (PARANÁ CIDADE, 2019) e na escala de 1:25.000 do ano de 1953 (ITCG). A simbologia utilizada no mapa de feições erosivas foi adaptada de Silva *et al.*(2022) que disponibilizaram símbolos geomorfológicos para cartografia de detalhe em SIG.

O uso e cobertura da terra foi classificado em: campo sujo (áreas em que o uso foi deixado), mineração (área de exploração de argila), silvicultura (para culturas de pinus), florestal (áreas constituídas por reserva e ou Área de Preservação Permanente-APP), cultura temporária e cultura permanente, área exposta (áreas próximas a rios ou em meio a área cultivada), erosão (áreas onde foi possível detectar processos erosivos) e área urbana (área construída e loteamentos sem construção mas com arruamento definidos).

A identificação dos elementos foi realizada a partir de diferentes níveis de zoom, e a vetorização foi realizada com zoom para escala em torno de 1:2.000.

O mapa geomorfológico foi elaborado a partir da interpretação das fotografias na escala de 1:25.000 por meio de estereoscópio, as informações de interesse foram registradas no papel *ultraphan*, que recobre a fotografia na forma de *overlay*, e transferidos para o projeto no Sistema de Informações Geográficas. O mapa de declividade foi elaborado a partir do MDE obtido pelo sensor PALSAR/ALOS-1, com resolução de 12,5m (©JAXA/METI, 2011).

As informações inseridas em Sistema de Informação Geográfica-SIG, permitiu o mapeamento e a sobreposição de dados, permitindo a análise e correlação de informações.

#### **4.2.2 Trabalhos em campo**

O levantamento de campo compreende o reconhecimento da área, identificação dos processos erosivos; observação das formas de relevo; descrição morfológica e coleta de amostras de solo. Também foram realizadas observações de forma não sistemática em alguns pontos, com o objetivo de verificar a atividade erosiva no decorrer da pesquisa. Inúmeros campos foram realizados, e as evidências de campo “no dizer de Ana Luiza Coelho Netto” foram essenciais para compreender os processos, esta foi considerada uma das etapas mais importantes do trabalho.

#### 4.2.2.1 Descrição morfológica do solo e coleta de campo

A descrição morfológica e a coleta de amostras foram realizadas em perfis expostos pelos processos erosivos. A descrição morfológica do solo e a coleta de amostras foram realizadas conforme o Manual Técnico de Pedologia (IBGE, 2015) e Manual de Descrição e Coleta de Solos no Campo (SANTOS *et a.*, 2005). Foi realizado a limpeza do perfil, a identificação dos horizontes e a descrição morfológica de acordo com a cor, textura, estrutura, consistência, transição, cerosidade, presença de concreções. Em seguida foram retiradas as amostras indeformadas e deformadas para a análise em laboratório (Fig.11).

Figura 11 - Coleta de amostra indeformada



Fonte: A autora

#### 4.2.3 Análises laboratoriais

As análises laboratoriais contemplam: análise granulométrica para determinação da textura do solo, determinação da porosidade, da densidade do solo, da condutividade hidráulica, mineralogia da fração silte e argila, e Limites de Atterberg.

A preparação das amostras para as análises foi realizada de acordo com o Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2017). A análise granulométrica foi realizada no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa - COMCAP (UEM), no contador de partículas a Laser. O analisador de tamanho de partícula por difração a laser Battersize®, mede a intensidade da luz espalhada na medida em que um feixe de laser emitido interage com as partículas dispersas da amostra. Esses dados são utilizados para o cálculo da distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado.

A determinação da porosidade total, da densidade do solo e a condutividade hidráulica foram realizados no Laboratório de Pesquisa Geoambiental-LAPEGE da Universidade Estadual do Paraná-UNESPAR, no Campus de Campo Mourão. Os procedimentos foram realizados conforme descrito no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2017).

A porosidade total foi determinada pelo método direto. As amostras coletadas em cilindro volumétrico, são preparadas colocando na parte inferior tecido preso com liga de borracha, e levadas para saturar por 12 horas, após este período as amostras foram pesadas, e levadas para secar a estufa a 105° até obter peso constante. A porosidade total é obtida pela mensuração da massa de água necessária para saturar uma amostra de solo de volume total conhecido. A massa da água é obtida pela diferença de peso do solo saturado e do solo seco. Para o cálculo aplica-se a seguinte fórmula:

$$Pt = [(a-b) - (c-d)] / e \cdot 100$$

Pt – Porosidade total

a – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado, em kg.

b – massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg.

c – massa do conjunto cilindro-tecido-liga saturado, em kg.

d – massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C, em kg.

e – volume total da amostra, em m<sup>3</sup> (volume total da amostra igual ao volume do cilindro).

A densidade aparente do solo, foi obtida pelo método do cilindro volumétrico. As amostras indeformadas coletadas em cilindro volumétrico foram secas em estufa a 105° por 48h, resfriadas em dessecador e seguida pesadas. A densidade é a relação massa de solo pelo volume. A densidade é obtida pela divisão da massa de solo seca pelo volume do cilindro.

$$D_s = m_a / V$$

D<sub>s</sub> = densidade do solo (g cm<sup>3</sup>)

m<sub>a</sub> = massa da amostra de solo seco em g.

V = volume do cilindro em cm<sup>3</sup>

A condutividade hidráulica é a relação entre a carga e a velocidade com que a água se movimenta através do solo. A condutividade hidráulica saturada foi realizada em laboratório em permeâmetro de carga constante. As amostras indeformadas coletadas em cilindro

volumétrico, são preparadas colocando na parte inferior tecido tipo morim, preso com liga de borracha. Na parte superior do cilindro foi colocado um outro de igual diâmetro, fixado com fita adesiva impermeável com o objetivo de manter a carga hidráulica de 2 cm de altura constante durante o teste, e colocado para saturar por 12 horas. Após a saturação o conjunto foi transferido para o permeâmetro, e colocado água cuidadosamente com auxílio de uma pisseta.

A água percolada é recolhida, e seu volume é medido, para o cálculo da condutividade hidráulica foi utilizada a média das três últimas leituras. A condutividade hidráulica é obtida pela equação de Darcy.

$$K = (Q.L/A.H.t)$$

Onde:

K – condutividade hidráulica, em  $\text{cm h}^{-1}$ .

Q – volume do percolado, em mL, ou seja, o valor da última leitura quando não há variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação.

L – altura do bloco do solo, em cm.

H – altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm.

A – área do cilindro, em  $\text{cm}^2$ .

t – tempo de percolação, em horas.

Foram adotadas as classes de condutividade hidráulica apresentadas por Klute (1965), em  $\text{cm/h}$ : muito lenta ( $<0,125$ ); lenta ( $0,25-0,500$ ); moderadamente lenta ( $0,500-2,000$ ); moderada ( $2,000-6,250$ ); moderadamente rápida ( $6,250-12,500$ ); rápida ( $12,500-25,000$ ) e muito rápido  $>25,0$ .

A análise mineralógica teve por objetivo identificar os tipos de minerais presentes no solo. A análise dos minerais foi realizada por Difração por Raios X (DRF), pelo método do pó, para todos os perfis. As amostras foram maceradas em gral de porcelana e passadas pela peneira malha 0,053mm. A análise Difração por Raios X (DRF), foi realizada no Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa - COMCAP, da Universidade Estadual de Maringá. Utilizando radiação  $\text{CoK}\alpha$  operado a 30 mA e 40 kV, e varredura de  $0,02^\circ 2\theta$  por 0,6 segundos. Para elaborar os difratogramas, os dados foram importados para o *Software HighScore Plus*. Para a identificação dos minerais, o espaçamento interplanar dos reflexos dos minerais foi determinado pela Lei de Bragg, e identificado conforme Resende *et al.* (2005).

Os limites de consistência do solo ou ensaio de Limites de Atterberg foi realizado no Laboratório de Mecânica de Solos da Universidade Estadual de Maringá. Este ensaio é utilizado para avaliar comportamentos dos solos finos em função de seus teores de umidade, e

compreendem o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) a partir dos quais obtém-se o índice de plasticidade (IP) padronizados por Casagrande. Esses ensaios determinam teores de umidade para os quais os solos mudam seus comportamentos. O teor de umidade-limite a partir do qual um solo passa para um comportamento plástico, é o limite de plasticidade. O limite de liquidez corresponde à umidade-limite a partir do qual o solo passa a comportar-se como um líquido. O índice de plasticidade reflete o intervalo de plasticidade do solo, quanto maior o valor de IP, mais plástico será o solo.

Conforme Jenkins (1947 apud CAPUTO, 1998) segundo o índice de plasticidade o solo pode ser classificado em:

$1 < IP < 7$ : solos fracamente plásticos;

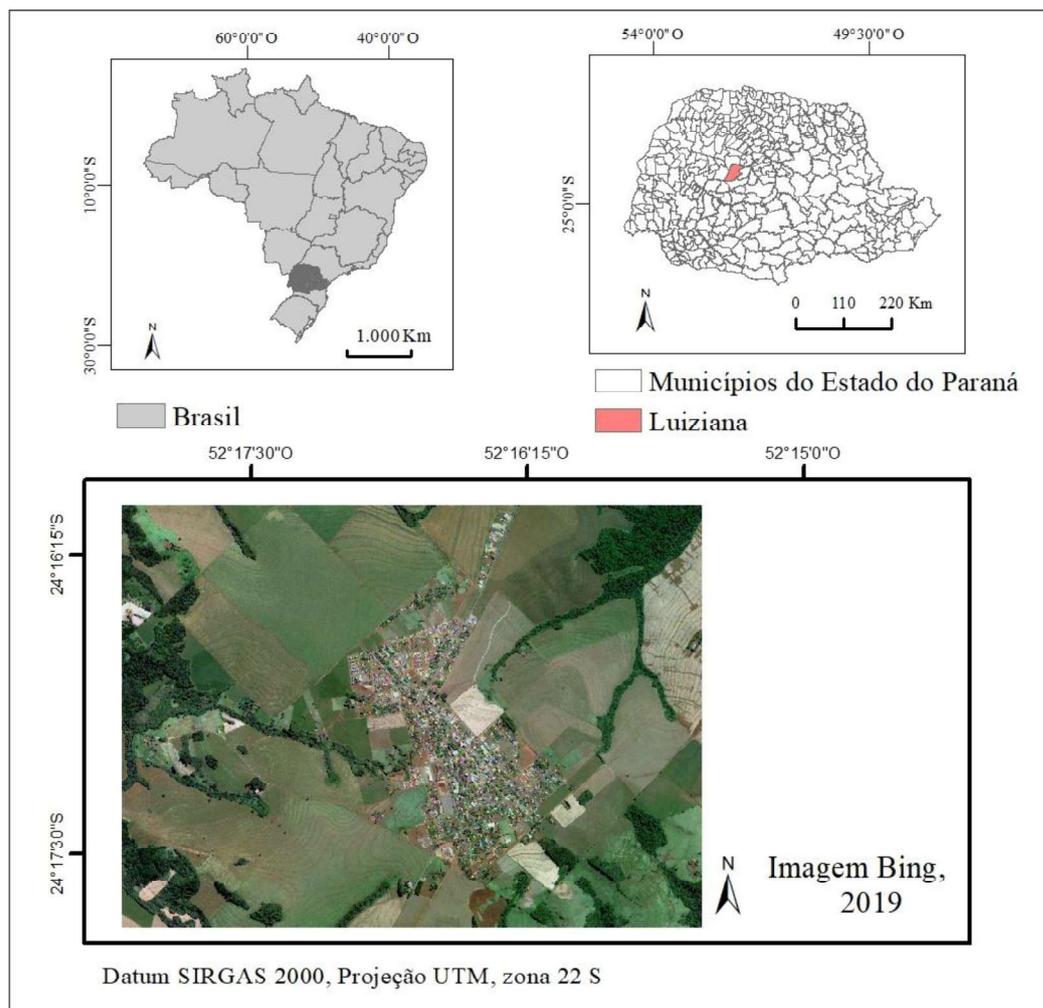
$7 < IP < 15$ : solos medianamente plásticos;

$IP > 15$ : solos altamente plásticos.

## 5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Luiziana  $24^{\circ}17'16.0''S$ ,  $52^{\circ}16'32.0''O$ , (Fig. 12), ocupa uma área de 908,788 km<sup>2</sup>, faz limites com os municípios de Campo Mourão, Barbosa Ferraz, Iretama, Roncador, Nova Cantu e Mamborê. Tem uma população estimada em 7.285 habitantes, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é de 0,668, e o grau de urbanização de 65,02% (IPARDES, 2019).

Figura 12 - Área de estudo

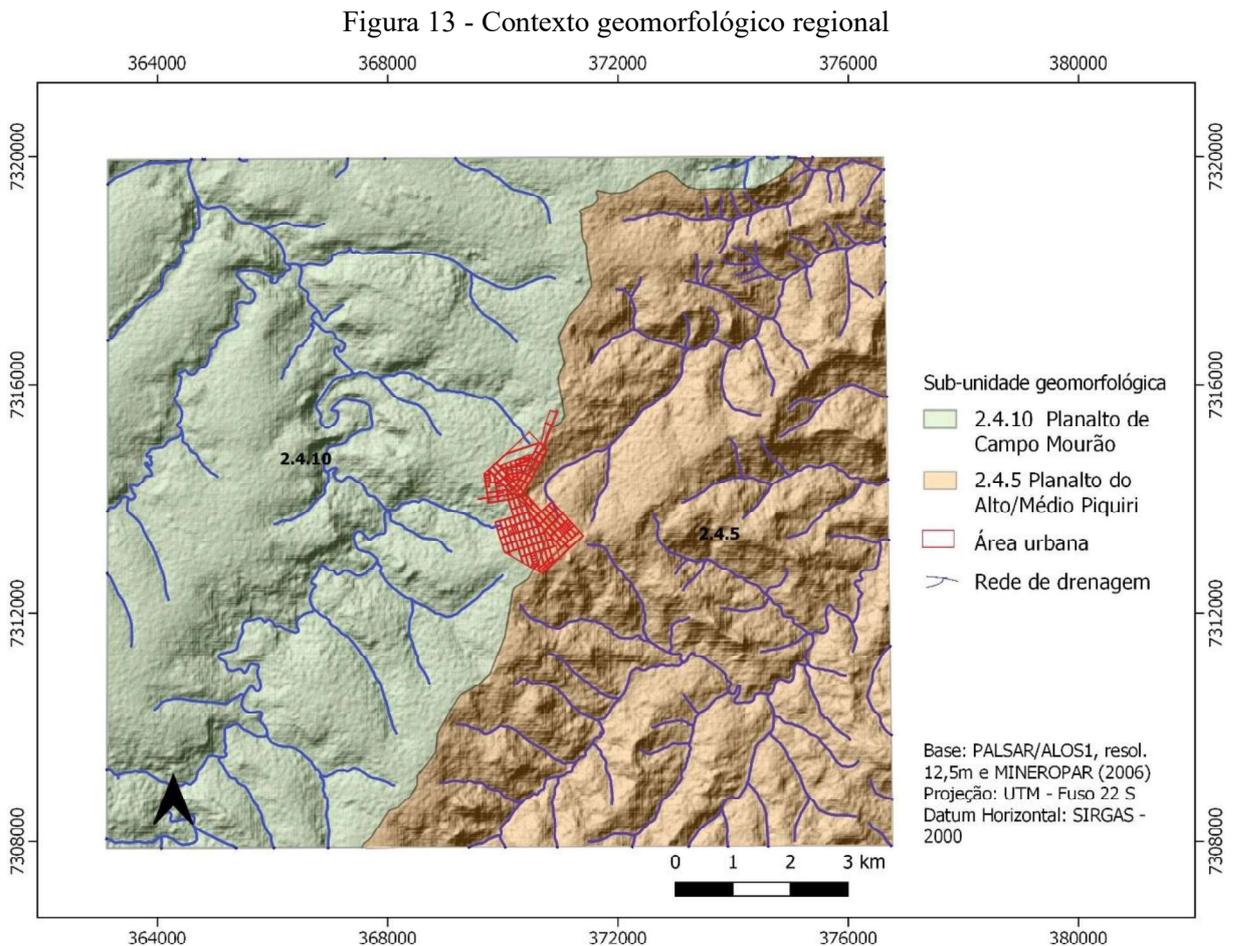


Fonte: Organizado pela autora (2019).

No contexto geomorfológico a área de estudo está no Terceiro Planalto paranaense, assim definido por Maack (2002), nas subunidades Planalto de Campo Mourão e Planalto do Alto/Médio Piquiri. De acordo com Santos *et al.* (2006) a sub-unidade do Planalto de Campo Mourão é caracterizada por apresentar baixa dissecação, topos aplainados, vertentes retilíneas e côncavas na base, com vales em calha. O Planalto do Alto/Médio Piquiri apresenta dissecação

média, topos alongados e isolados, vertentes convexas e convexo-côncavas e vales na forma de U aberto.

A área urbana do município de Luiziana está sobre uma área de topo, no limite entre as sub-unidades do Planalto de Campo Mourão e Planalto do Alto/médio Piquiri (Fig. 13), sobre o divisor de águas das bacias dos rios Sem Passo, rio Chupador e rio das Lontras, ambas pertencentes a bacia hidrográfica do rio Ivaí.

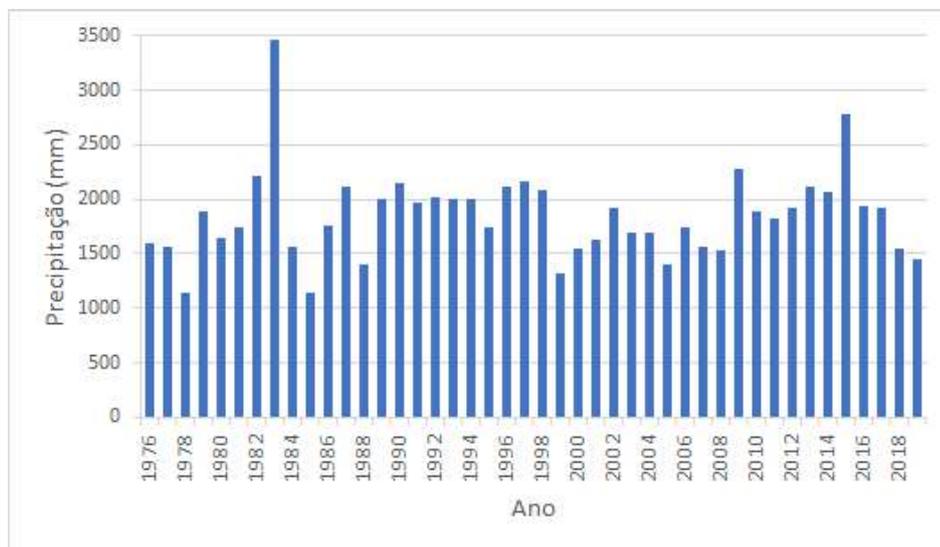


Fonte: adaptado de MINEROPAR (2006)

A área de estudo encontra-se na transição entre dois tipos climáticos o clima Cfa e o clima Cfb, segundo a classificação de Köppen. O clima Cfa é caracterizado por verões quentes, com temperatura média acima de 22°C no mês mais quente, sem estação seca e tendência de concentração de chuvas nos meses de verão. O Clima Cfb é caracterizado por apresentar temperatura média no mês mais quente inferior a 22°C, sem estação seca (CAVIGLIONE, 2000).

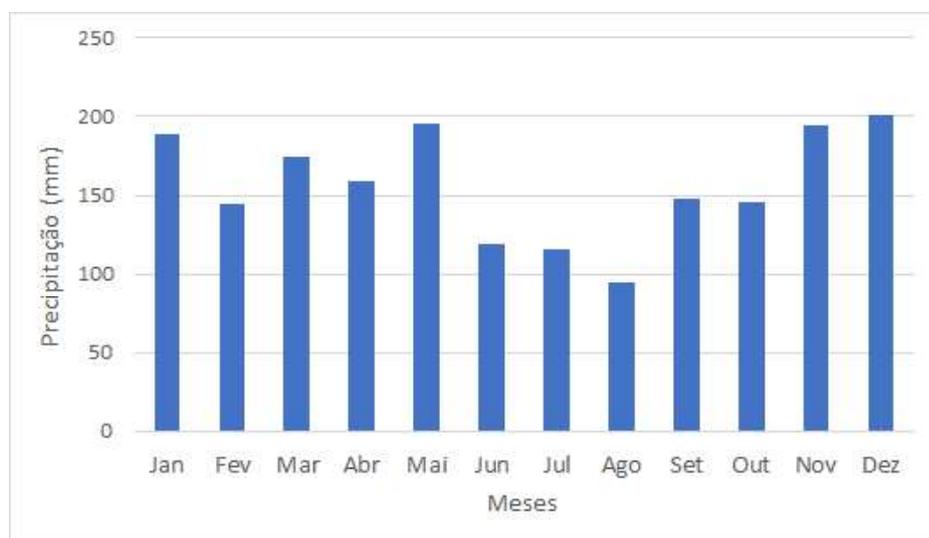
Dados de precipitação média mensal e anual de um período de 44 anos (1976-2019) foram obtidos do Sistema de Informações Hidrológicas do Instituto Água e Terra, e correspondem à altura de precipitada. Esse registro corresponde ao posto pluviométrico (código: 02452046) localizado próximo à área urbana do município de Luiziana, nas coordenadas 24° 16' 59" S e 52° 16' 00" O, com altitude de 800m. A média de precipitação anual para o período analisado é de 1846 mm, sendo que no ano de 1983 a precipitação foi de 3467mm e 2015 foi de 2773mm (Fig. 14). As médias mensais do período analisado indicam os meses de novembro, dezembro, janeiro e maio como os mais chuvosos (Fig. 15).

Figura 14- Média das precipitações anuais da área de estudo, período 1976 a 2019.



Fonte: INSTITUTO ÁGUA E TERRA (2020), organizado pela autora.

Figura 15- Média das precipitações mensais da área de estudo, período 1976 a 2019.



Fonte: INSTITUTO ÁGUA E TERRA (2020), organizado pela autora.

A vegetação original da área de estudo é a Floresta Ombrófila Mista Montana. Conforme Roderjan *et al.* (2002), dentre as espécies que compõem a Floresta Ombrófila Mista Montana podem ser encontrados: no estrato arbóreo a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Araucariaceae), *Ocotea porosa* (Nees & Mart.) Barroso (Lauraceae), *Ocotea puberula* (Rich.) Nees (Lauraceae), *Ocotea pulchella* (Nees & Mart.) Mez (Lauraceae), *Cinnamodendron dinisii* Schwacke (Canellaceae), *Moquiniastrium polymorphum* (Less.) G. Sancho (Asteraceae), *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl. (Podocarpaceae), *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. (Aquifoliaceae), *Cedrela fissilis* Vell (Miliaceae), *Campomanesia xanthocarpa* (Mart.) O. Berg (Myrtaceae), *Matayba elaeagnoides* Radlk. (Sapindaceae), *Sloanea lasiocoma* K. Schum. (Elaeocarpaceae), *Luehea divaricata* Mart. (Tiliaceae), *Mimosa scabrella* Benth. (Fabaceae), *Dalbergia brasiliensis* Vogel (Fabaceae), *Jacaranda puberula* Cham. (Bignoniaceae) e *Handroanthus albus* (Cham.) Mattos (Bignoniaceae).

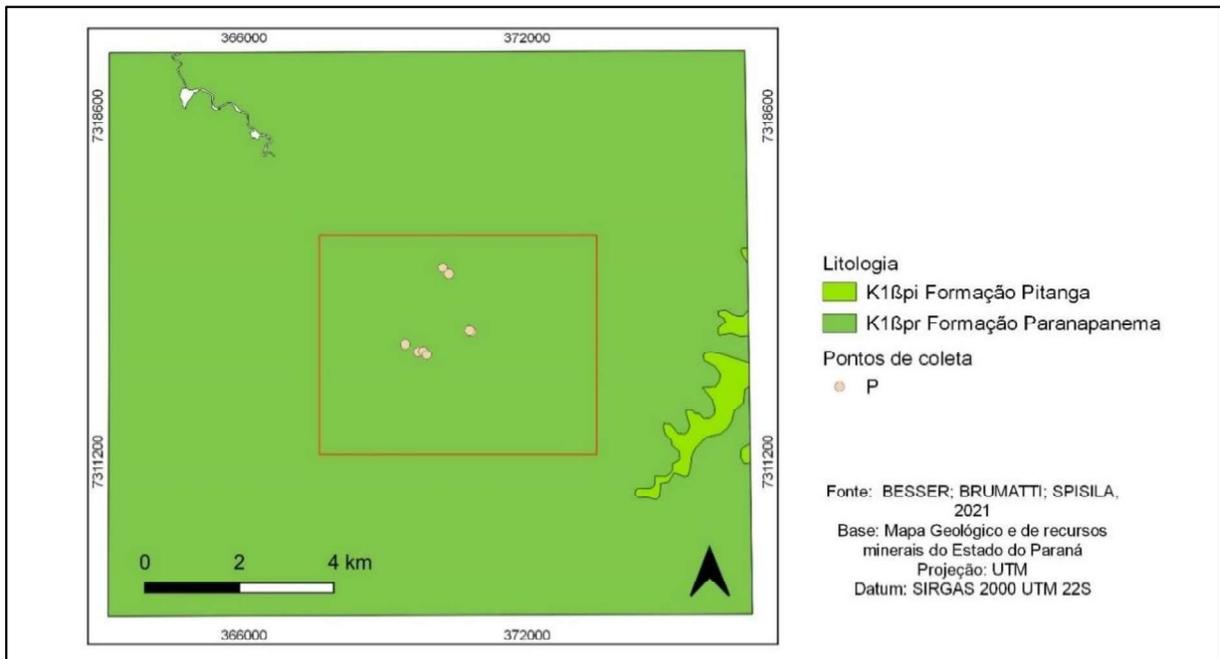
São comuns nos estratos inferiores representantes de *Myrcia*, sobretudo dos gêneros *Eugenia*, *Calyptanthes* e *Gomidesia*, acompanhados de Salicaceae (*Casearia* e *Xylosma*), Sapindaceae (*Allophylus* e *Cupania*), Rutaceae, Symplocaceae e Aquifoliaceae. Fetos arborescentes (*Dicksonia* e *Cyathea*) e gramíneas cespitosas (*Chusquea* e *Merostachys*) são frequentes (RODERJAN *et al.* 2002).

As características gerais do substrato rochoso são apresentadas com base na publicação recente de Licht e Arioli (2018). O Grupo Serra Geral (anteriormente denominado como Formação Serra Geral) foi subdividido em Subgrupo Serra Geral Sul e Subgrupo Serra Geral Centro-Norte, baseada principalmente na tipologia geoquímica, oriunda da associação dos discriminantes SiO<sub>2</sub>, Zr, TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

O Subgrupo Serra Geral Centro-Norte está dividido em Formação Pitanga e Formação Paranapanema. A área de estudo está sobre a formação Paranapanema que compreende o Membro Salto da Lontra e o Membro Santa Amélia, mas grande parte desta formação permaneceu indivisa, a qual corresponde a área de estudo neste trabalho (Fig.16).

Segundo Licht e Arioli (2018) a Formação Paranapanema (SBKSGCNPP), é composta exclusivamente por derrames de lavas básicas, com frequentes ocorrências de pegmatitos básicos, e raros depósitos vulcanoclásticos, que diminui a frequência da base para o topo. Os derrames que constituem a Formação Paranapanema, são do tipo *pahoehoe*, tabulares, podendo chegar a 20m de espessura devido aos processos de inflação por grandes volumes de magma com taxa de alimentação continuada.

Figura 16 - Litologia da área de estudo

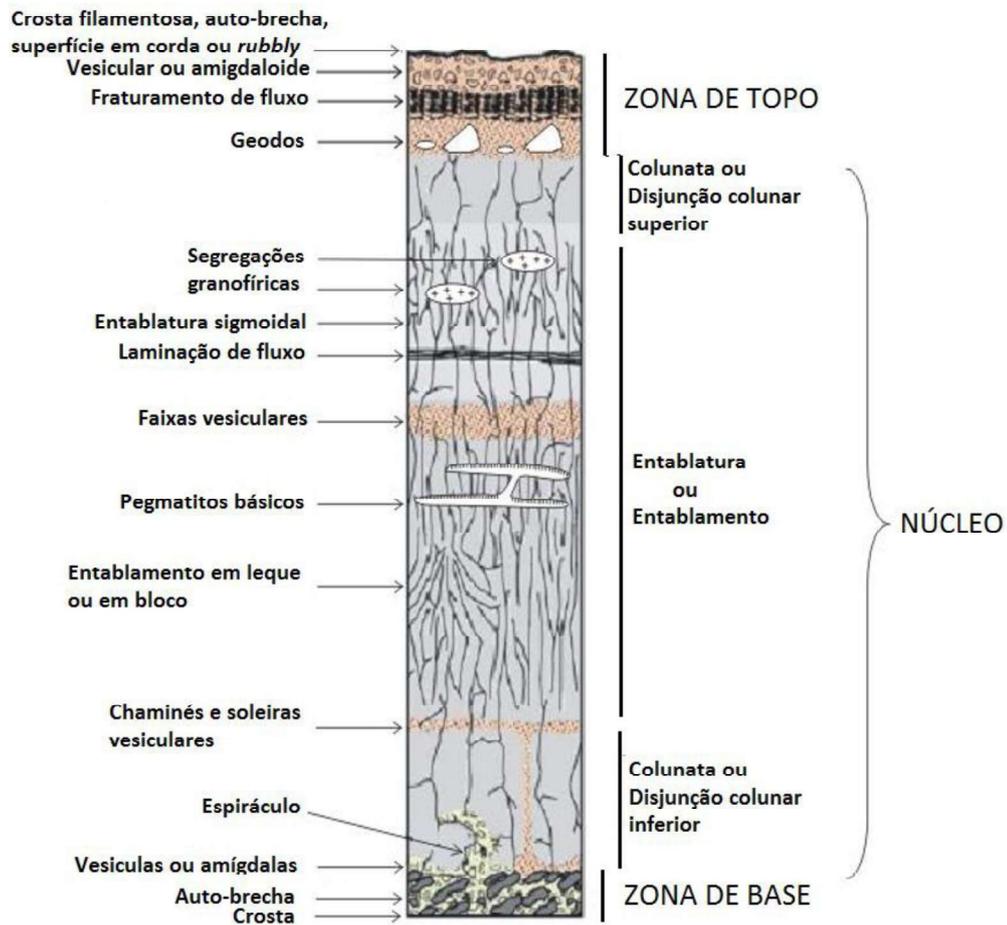


Fonte: organizado pela autora (2022)

Os derrames tabulares apresentam zonalidade interna caracterizada pelas seguintes subunidades quando completa: zona vesicular de base; disjunção tabular inferior; disjunção colunar inferior; disjunção colunar central; entablamento; disjunção tabular superior; disjunção colunar superior; zona vesicular de topo (Fig.17). Podem ser encontrados eventualmente derrames com características de morfologia *rubbly pahoehoe*, caracterizada por uma brecha autoclástica de topo, composta por fragmento do próprio derrame (LICHT; ARIOLI, 2018).

Quanto a litoquímica, a Formação Paranapanema é composta principalmente por derrames de basaltos e andesibasaltos subalcalinos e secundariamente traquibasaltos alcalinos do Tipo 1 CN (LSi-LZr-LTi-LP) raramente intercalados por basaltos, andesibasaltos subalcalinos do Tipo 3 (LSi-LZr-HTi-LP). Os derrames do Tipo 1 CN (Centro Norte) são formados por lavas enriquecidas em elementos compatíveis, isto é, mostram teores elevados em Cr, Ni, Cu, V, Au, Pt e Pd. Essas características geoquímicas indicam que os derrames pertencentes à Formação Paranapanema sofreram pouca contaminação crustal e representam magma basáltico toleítico primitivo (LICHT; ARIOLI, 2018).

Figura 17 - Estrutura (genérica) interna de um derrame *pahoehoe* tabular de basalto.

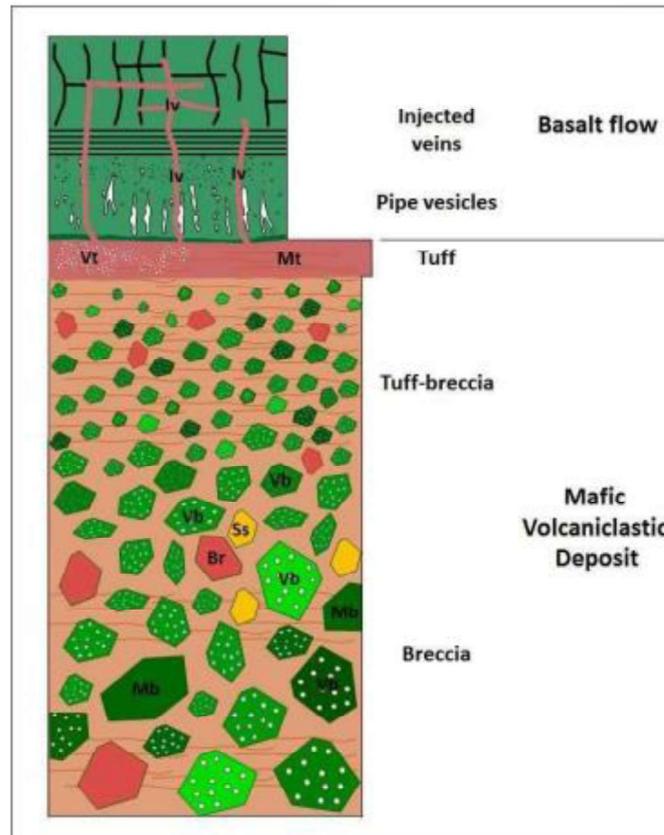


Fonte: Licht e Arioli (2018)

O contato basal da Formação Paranapanema com a Formação Pitanga é transicional, nessa transição também ocorrem depósitos vulcanoclásticos intercalados aos derrames. Conforme Licht e Arioli (2018) na porção basal da Formação Paranapanema, são encontrados depósitos vulcanoclásticos, que ocorrem intercalados aos derrames de basalto, principalmente nos que compõem a fase inicial de vulcanismo, sendo os mais comuns os depósitos vulcanoclásticos máficos. A estratigrafia destes depósitos vulcanoclásticos é composta por três fácies principais, sendo por brecha na base, tufo brecha na porção média e tufo no topo, todos em contato transicional (Fig. 18).

De acordo com Licht e Arioli (2018), os depósitos vulcanoclásticos são originados pela interação entre o magma em ascensão com a sequência sedimentar paleozoica e sistemas aquíferos profundos, o que teria dado origem a erupções explosivas, em processos que podem ser compreendidos no conceito geral de hidrovulcanismo.

Figura 18- Seção ideal de um depósito vulcanoclástico máfico



Fonte: Licht; Arioli (2020)

A alta pressão de confinamento na profundidade em que o contato ocorreu produziria erupções explosivas misturando material siliciclástico da sequência sedimentar, fragmentos basálticos juvenis (magma ascendente) e líticos (fragmentos de derrames anteriores). A matriz é arenosa-siltosa-argilosa (cinzas a lapilli), composto por cristaloclastos de quartzo, plagioclásio, k-feldspato e minerais acessórios como apatita, piroxênio, com presença constante de sericita e, eventualmente, biotita. As características da matriz são muito semelhante a do todo do Depósito Vulcanoclástico, pode ser igualmente aplicado a brechas, tufo-brechas e tufo de acordo com os autores (LICHT; ARIOLI, 2020).

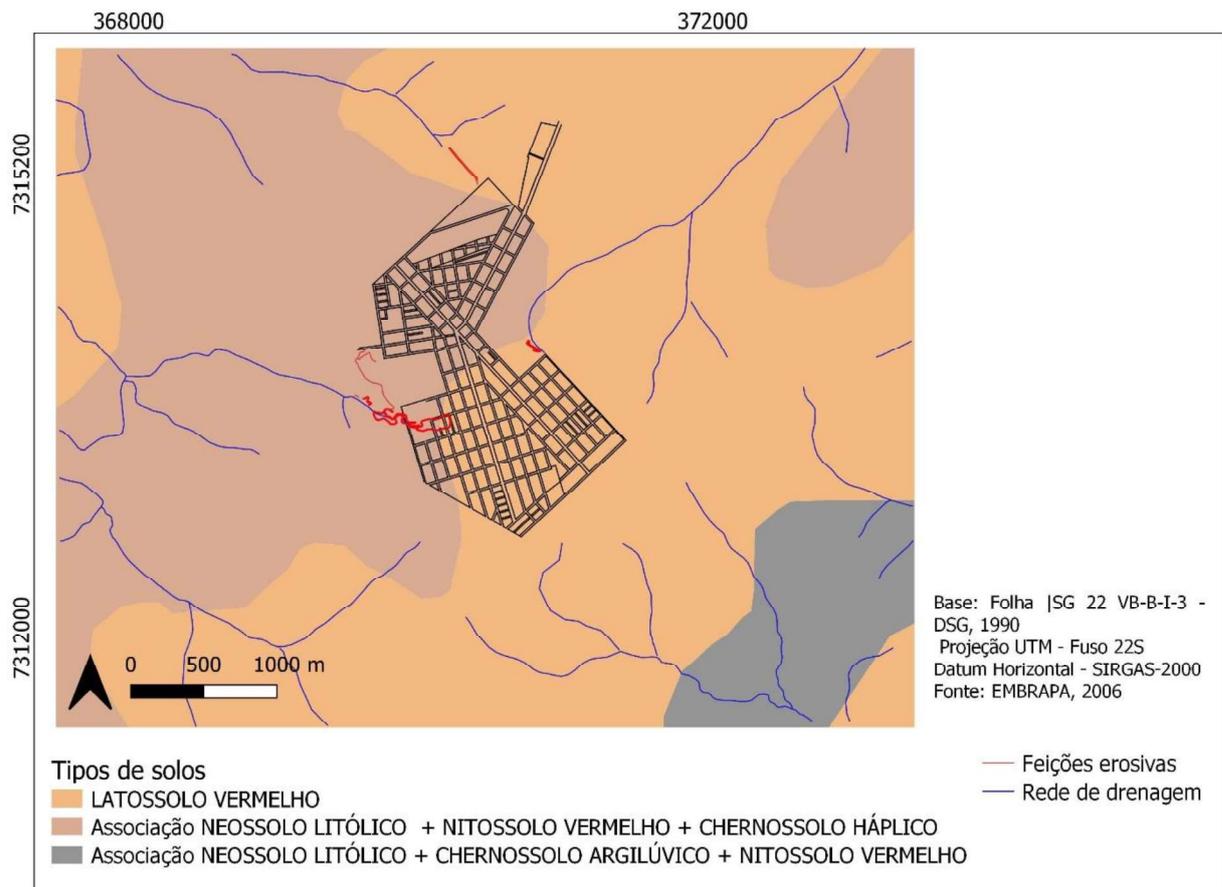
Os clastos que constituem as brechas e tufo-brechas são constituídos por fragmentos angulosos, subangulosos ou globular, de tamanho variável de lapilli a bombas e blocos. Ainda de acordo com os autores, além dos MVDs, também são encontrados depósitos sedimentares vulcanogênicos (epiclásticos) e peperíticos, porém em menor frequência (LICHT; ARIOLI, 2018).

De acordo com Licht e Arioli (2020) os depósitos vulcanoclásticos são amplamente distribuídos, apresentam grande continuidade lateral e podem atingir até 12m de espessura.

Licht e Arioli (2018), constataram o controle preferencial dos degraus ou *trapp* nas vertentes, pela presença de depósitos vulcanoclásticos. Os autores ressaltam que não são todos os ‘degraus’ observáveis nas vertentes que são formados pela presença de depósitos vulcanoclásticos, muitos deles são devidos apenas a descontinuidade produzida pelo contato direto entre derrames.

A área de estudo apresenta classes de solo em associação, o que se deve as características das vertentes, com rupturas e diferentes classes de declive. De acordo com a classificação da EMBRAPA (2018), os tipos de solos encontrados na área de estudo são o Latossolos Vermelho distroférico de textura argilosa, e em associação os Neossolos Litólico + Nitossolos Vermelho eutroférico + Chernossolos Háptico de textura argilosa (Fig. 19).

Figura 19 - Tipos de solos na área de estudo



Fonte: EMBRAPA (2006) organizado pela autora.

Os Latossolos são solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos, variam de fortemente a bem drenados, normalmente são muito profundos, com espessura do

solum raramente inferior a 1m. Apresentam sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições usualmente difusas ou graduais. Em distinção às cores mais escuras do A, o horizonte B tem cores mais vivas, variando desde amarelas ou mesmo bruno-acinzentadas até vermelho-escuro-acinzentadas (EMBRAPA, 2018).

Os Neossolos Litólicos são solos rasos, com contato lítico ou lítico fragmentário dentro de 50 cm a partir da superfície, apresentando horizonte A diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr, ou ainda sobre material com 90% (por volume) ou mais de sua massa constituída por fragmentos grosseiros com diâmetro maior que 2 mm (cascalhos, calhaus e matacões). Admite-se um horizonte B em início de formação, desde que a espessura não satisfaça a nenhum tipo de horizonte B diagnóstico (EMBRAPA, 2018).

Nitossolos são solos que apresentam horizonte B nítico abaixo do horizonte A. Apresentam textura argilosa ou muito argilosa, estrutura em blocos angulares ou subangulares ou prismática, de grau de desenvolvimento moderado ou forte, e cerosidade em quantidade no mínimo comum. São profundos, bem drenados, de coloração variando de vermelha a brunada. Em geral, com argila de atividade baixa ou com caráter alumínico conjugado com argila de atividade alta, com composição caulínico-oxídica. Quando possuem o caráter alumínico conjugado com argila de atividade alta, apresentam mineralogia da argila com presença de argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (vermiculita e esmectita) (EMBRAPA, 2018).

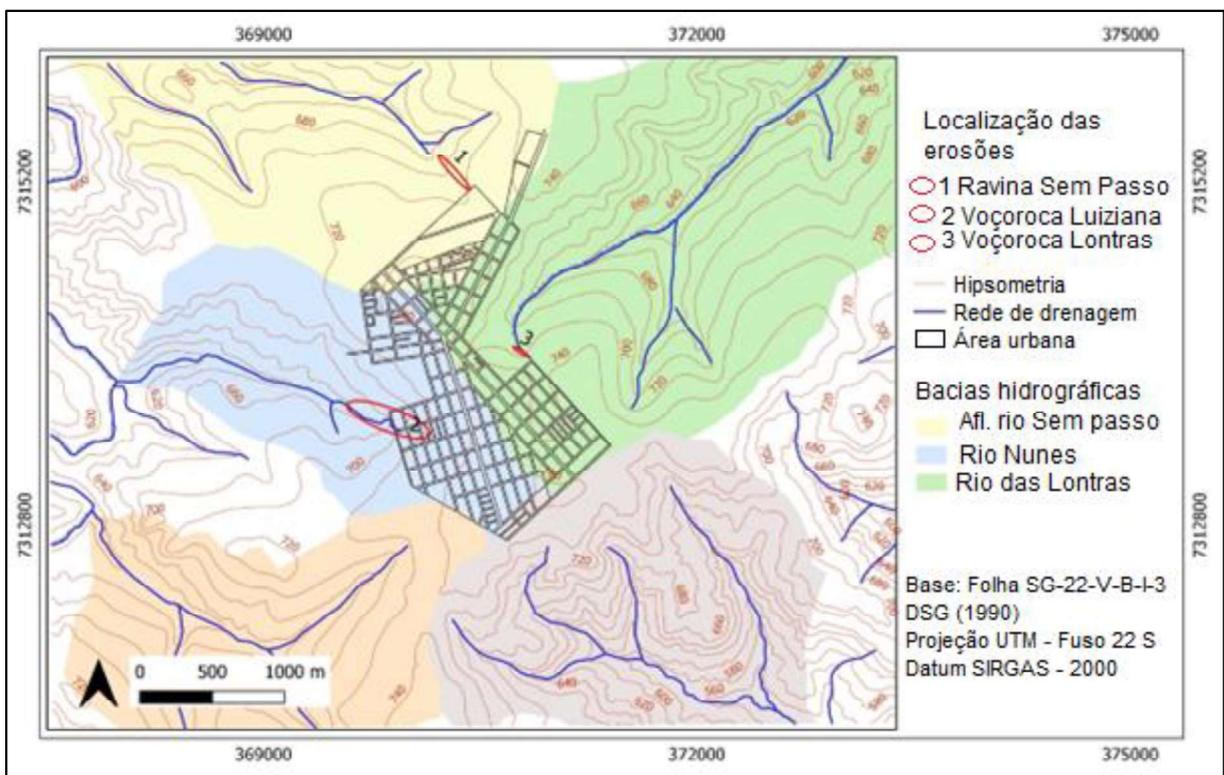
Chenossolos Háplicos, são solos normalmente de bem a imperfeitamente drenados, tendo sequências de horizontes A-Bt-C ou A-Bi-C. São formados sob condições climáticas bastante variáveis e a partir de diferentes materiais de origem, o desenvolvimento destes solos depende da conjunção de condições que favoreçam a formação e persistência de um horizonte superficial rico em matéria orgânica, com alto conteúdo de cálcio e magnésio e com a presença de argilominerais 2:1, especialmente os do grupo das esmectitas (EMBRAPA, 2018).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 HISTÓRICO DOS PROCESSOS EROSIVOS ATUAIS

As três formas erosivas analisadas nesta pesquisa estão localizadas na área periurbana do município de Luiziana, e são tratadas no texto por: Voçoroca Luiziana, Ravina Sem Passo e Voçoroca das Lontras, conforme figura 20.

Figura 20 - Localização das formas erosivas na área de estudo



Elaboração: A autora

A ocupação no município de Luiziana teve início por volta de 1912, por algumas famílias de posseiros vindas do sul do Paraná e do estado do Rio Grande do Sul, que se instalaram na localidade formando um povoamento (LUIZIANA, 2019). Bernardes (1953) afirma que o povoamento já se iniciara espontaneamente desde o começo do século XX, em grande parte das colônias fundadas pelo governo estadual, especialmente junto ao divisor Ivaí-Piquiri e no vale destes rios.

De acordo com Yokoo (2013), entre 1903-1939, a ocupação territorial efetuada nos terrenos devolutos situados no vale do Piquiri-Ivaí é resultado da frente de expansão, pois o

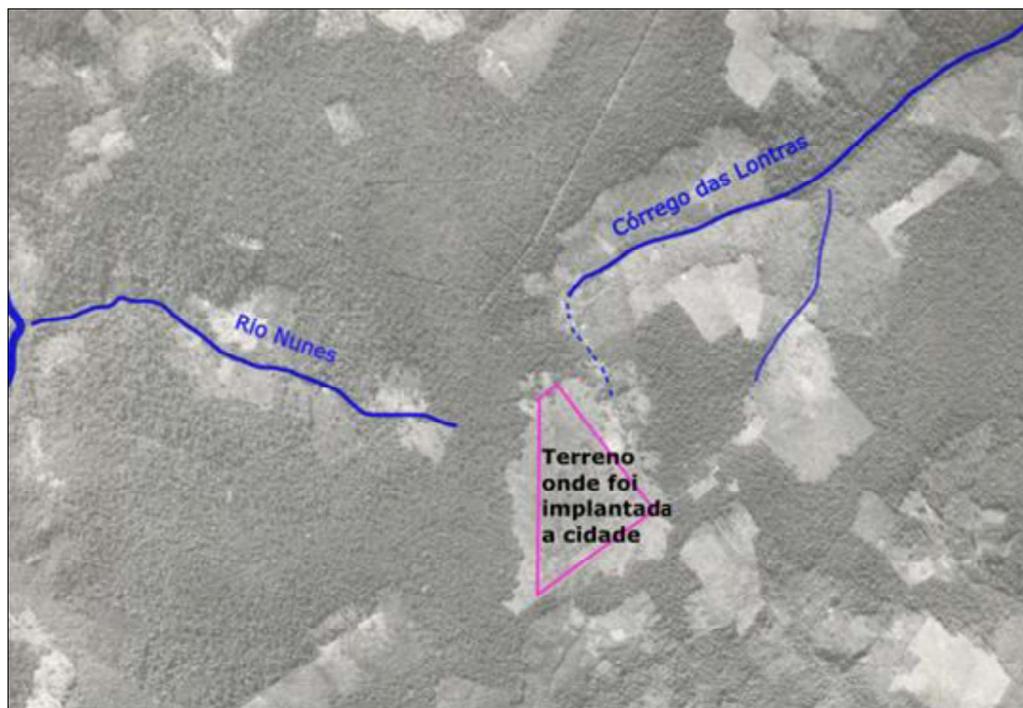
povoamento se deu de modo espontâneo, sobretudo de caboclos e camponeses pobres que constituíram posse de terra. A partir de 1939 ocorreu o avanço das frentes pioneiras com a entrada em vigor do Decreto Estadual nº 8.564, de 17 de maio de 1939 autorizando a Secretaria de Obras Públicas, Viação e Agricultura a executar nos municípios de Londrina e Guarapuava (ao qual pertenciam as terras correspondentes ao atual município de Luiziana) os Planos de Colonização dirigida (YOKOO, 2013).

Segundo Yokoo e Serra (2018), o governo do estado do Paraná por meio do Departamento Terras e Colonização, responsável pela execução das políticas de colonização deu encaminhamento aos pedidos de concessão e demarcação das glebas de terras devolutas para colonização. Na mesorregião centro ocidental foram demarcadas glebas de terras para a instalação de diversas Colônias Estaduais, dentre elas a Colônia Muquilhão, a qual pertencia Luiziana.

Nas colônias estaduais foram planejados e instalados pequenos centros urbanos, adotado a repartição dos lotes coloniais de tamanho variável e nos fundos das propriedades o acesso a curso de água e, ligados por carreadores até o espigão acessando as estradas vicinais ligando aos núcleos urbanos coloniais (YOKOO; SERRA 2018).

Na fotografia aérea de 1953, pode ser observado o início do desmatamento (Fig. 21), e uma área “limpa” onde viria a ser instalada a área urbana, correspondente a parte sul da cidade.

Figura 21 - Fotografia aérea de Luiziana em 1953, escala 1:25.000



Fonte: ITCG

A demarcação e titulação legal dos lotes agrícolas em Luiziana ocorreu em 1952, por determinação do governador do estado e executado pela Prefeitura de Campo Mourão. Também foi delimitado o perímetro urbano de Luiziana e traçado ruas e avenidas. Em 1965 o patrimônio de Luiziana foi elevado a Distrito Administrativo de Campo Mourão-PR. E em 1987 Luiziana se tornou município (LUIZIANA, 2019).

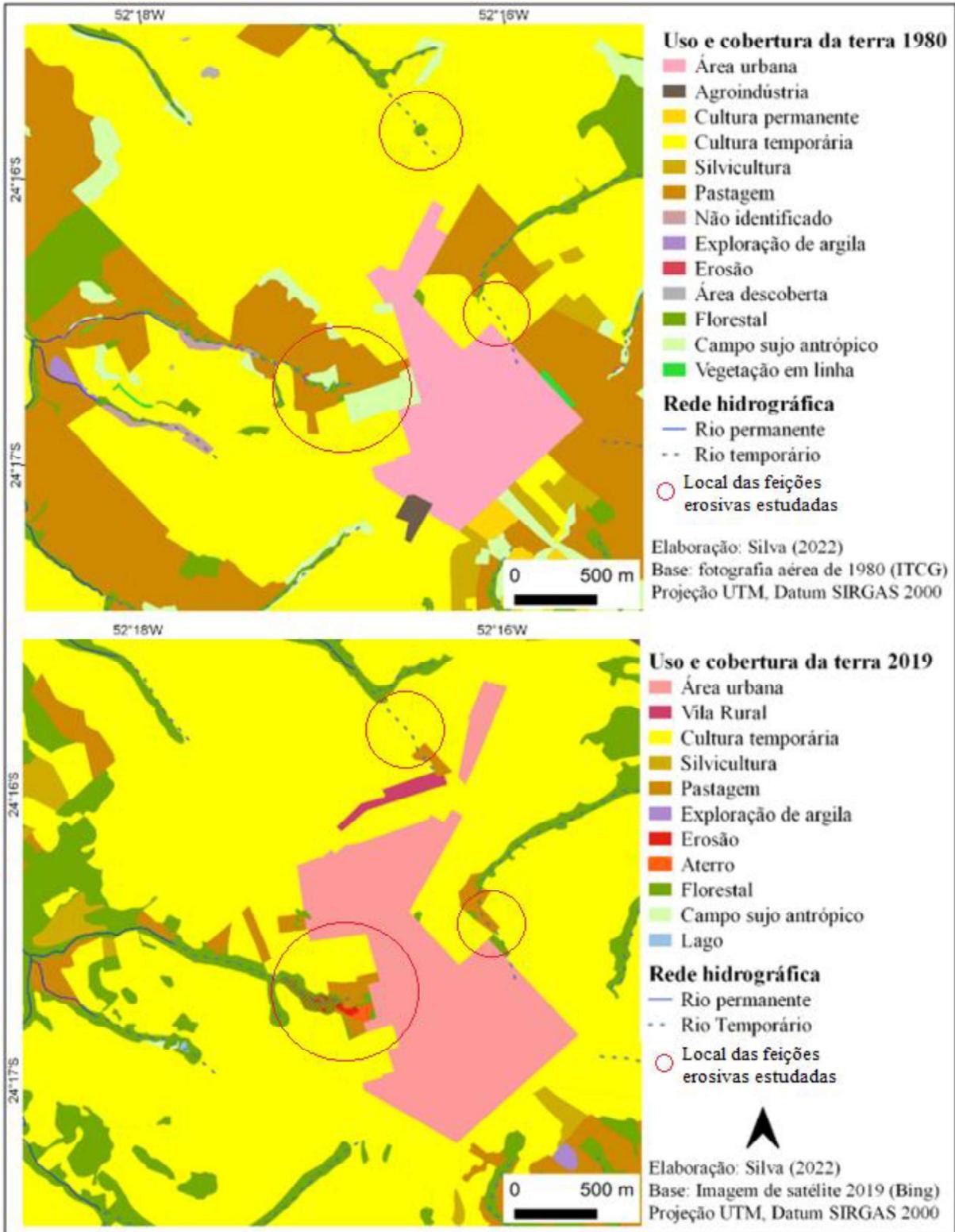
De acordo com Daniel (2007), o desenvolvimento da Voçoroca Luiziana teve início no final da década de 1970, mas suas dimensões ampliaram no fim da década de 1990. A expansão do processo erosivo é atribuída pela população a pavimentação asfáltica e implementação das galerias pluviais. Segundo Kallás e Sant'Ana (2018) o processo erosivo já existia anterior ao processo de implantação das galerias pluviais, e se caracterizava por uma ravina por volta de 1980.

Ao analisar a cobertura e uso da terra na área nos anos de 1980 e 2019, verifica-se que não houve mudanças significativas quanto a área cultivada e quanto ao tipo de cobertura, na área onde ocorrem os processos erosivos em estudo (Fig.22). Nesse contexto diminuiu a área de pastagem, onde o uso passou a ser cultivos temporários como trigo, soja e milho.

Quanto a cobertura vegetal observa-se que houve um aumento na vegetação ripária. Na figura 23, observa-se trechos de rio que em 1980 estavam expostos, e em 2019 encontram-se cobertos por vegetação; em outros pontos afetados pelo processo erosivo em 1980, houve uma desaceleração (Fig. 23 A). Quando analisadas as imagens históricas, verifica-se que a área de vegetação ripária foi sendo ampliada gradativamente, e isso ocorreu ou por imposição da Lei, ou devido a expansão do processo erosivo. No último caso o aumento da vegetação não significa ampliação da área de APP, pois na realidade a vegetação encobre parcialmente a atividade erosiva na voçoroca (Fig. 23 B), e muitas vezes a borda da vegetação coincide com paredes abruptas nos limites da feição erosiva.

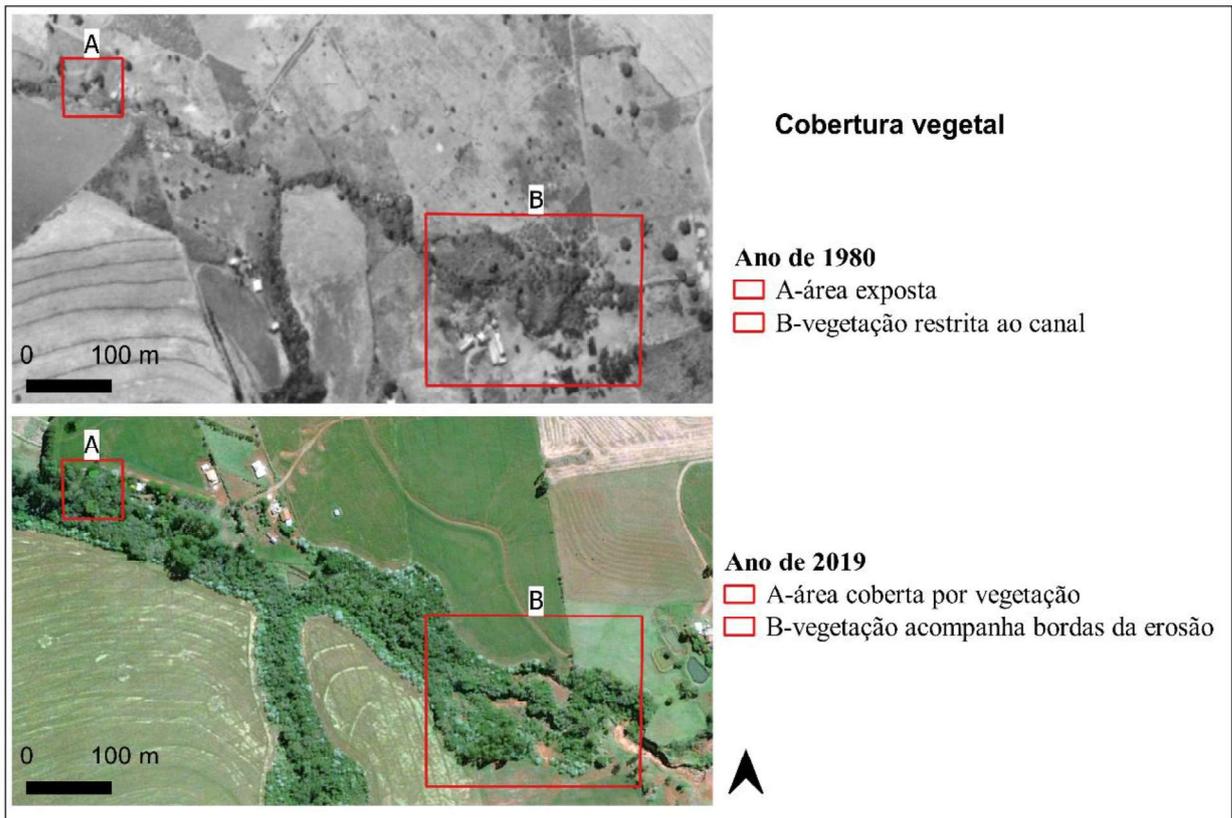
Conforme o processo erosivo avança, abrem-se fendas no solo com posterior abatimento de blocos, e processos de deslizamentos. Consequentemente, com expansão do processo erosivo, houve a perda de área de cultivo ou de pastagem, perda de moradia e infraestrutura rural, e consequentemente deslocamento da população. Com os movimentos de massa, parte do solo movimentado é levado pela água, e parte continua em blocos abatidos onde a vegetação continua fixa, o que acaba por “mascarar” a magnitude do processo erosivo. .

Figura 22 - Uso e cobertura da Terra, Luiziana 1980 e 2019



Elaboração: A autora (2022)

Figura 23 – Cobertura vegetal na área afetada pela Voçoroca Luiziana 1980 e 2019.



Fonte: Organizado pela autora (2022).

Em relação ao manejo do solo na área estudada, até 1989 não havia curvas em nível (terraços mecanizados) em todas as propriedades, sem curvas a água escoava livremente pelo terreno, aumentando o fluxo e a energia até chegar ao rio. As estradas rurais eram “aprofundadas” em relação aos terrenos adjacentes, facilitando o escoamento concentrado que deu origem a ravinas. No final da década de 1980, o município de Luiziana, foi contemplado pelos programas de conservação do solo do governo do Paraná, o Programa de Manejo Integrado do Solo e da Água – PMISA, programa PMISA evoluiu para a implementação do sub-programa de Manejo e Conservação do Solo em Microbacias Hidrográficas do Programa de Manejo e Conservação do Solo - PARANÁ RURAL que durou de 1990 até 1995 (COSTA *et al.*, 2006). Entre 1989 e 1990 foram implantadas práticas conservacionistas como curvas em nível e readequação das estradas rurais. Neste período também foram realizadas práticas mecânicas para recuperar áreas afetadas por ravinas.

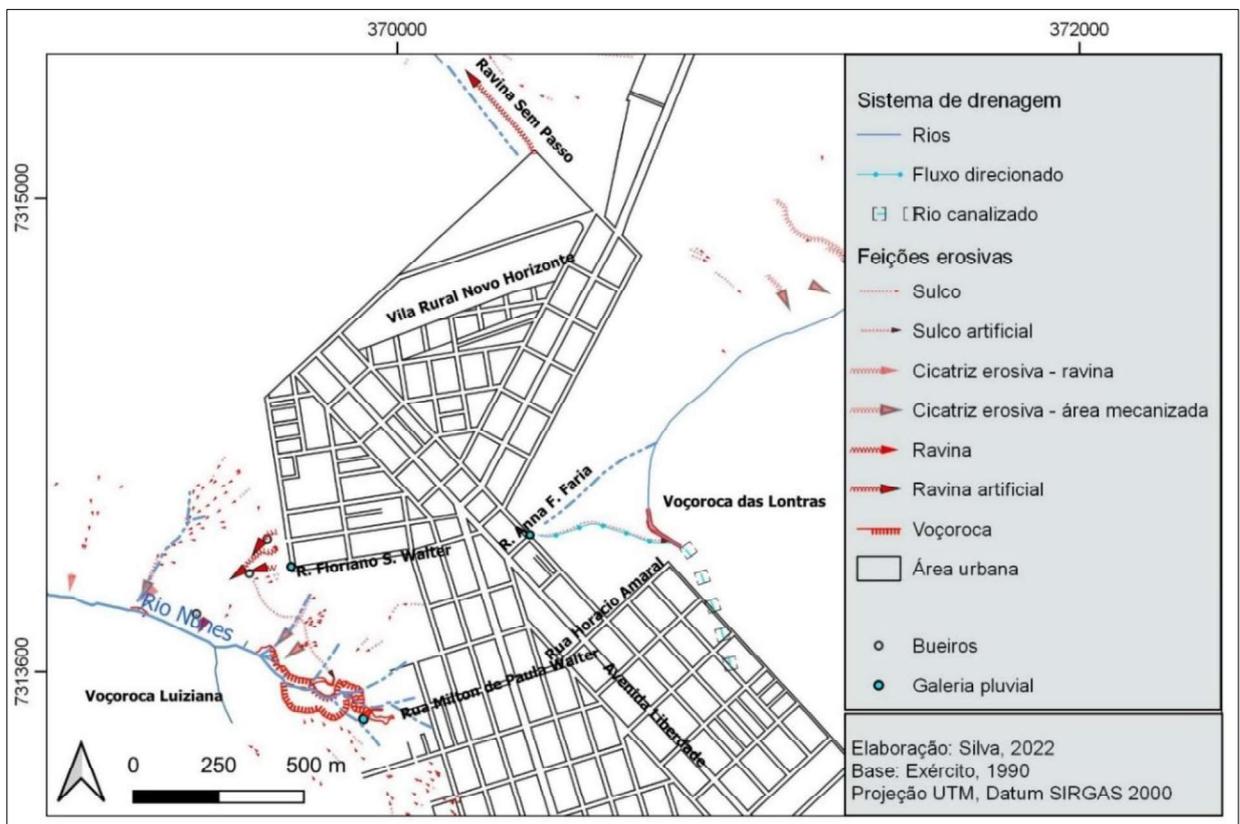
Comparando o mapa de 1980 com o mapa do ano de 2019 verificou-se que houve uma diminuição de carregadores e divisas. Esses são elementos importantes, pois como já citados na revisão, tanto as estradas como as divisas são fontes originárias de escoamento concentrado das

águas pluviais. Atualmente verifica-se a existência de curvas em nível, mas carecem de manutenção e adequação. Algumas curvas acabam nas divisas onde inicia o escoamento concentrado, ou acabam por conduzir as águas de origem pluvial da drenagem urbana e rural como no caso da Voçoroca das Lontras e Voçoroca Luiziana.

Quanto a área urbana, em 1980 o sistema de arruamento na área urbana de Luiziana já estava implantado, no entanto as ruas não eram asfaltadas. Verificou-se que a área urbana aumentou de 107 ha em 1980, para 177ha (65%) em 2019. Considerando a área de uma vila rural que fica anexa a cidade e contribui com escoamento, a área urbana passa para 191ha (78%), sendo que a influência da área da vila rural é considerada no projeto de drenagem urbana do município. Destaca-se que a área urbana cresceu principalmente para o lado oeste. A pavimentação asfáltica e implantação de galerias pluviais inacabadas, contribui para o aumento do escoamento superficial concentrado, nas cabeceiras de drenagem na bacia hidrográfica do rio Nunes, onde está localizada a Voçoroca Luiziana.

Na figura 24 são destacadas as três formas erosivas que foram analisadas na área urbana e periurbana: a Voçoroca Luiziana, Voçoroca das Lontras e a Ravina Sem Passo.

Figura 24 - Processos erosivos na área urbana e periurbana de Luiziana 2019.



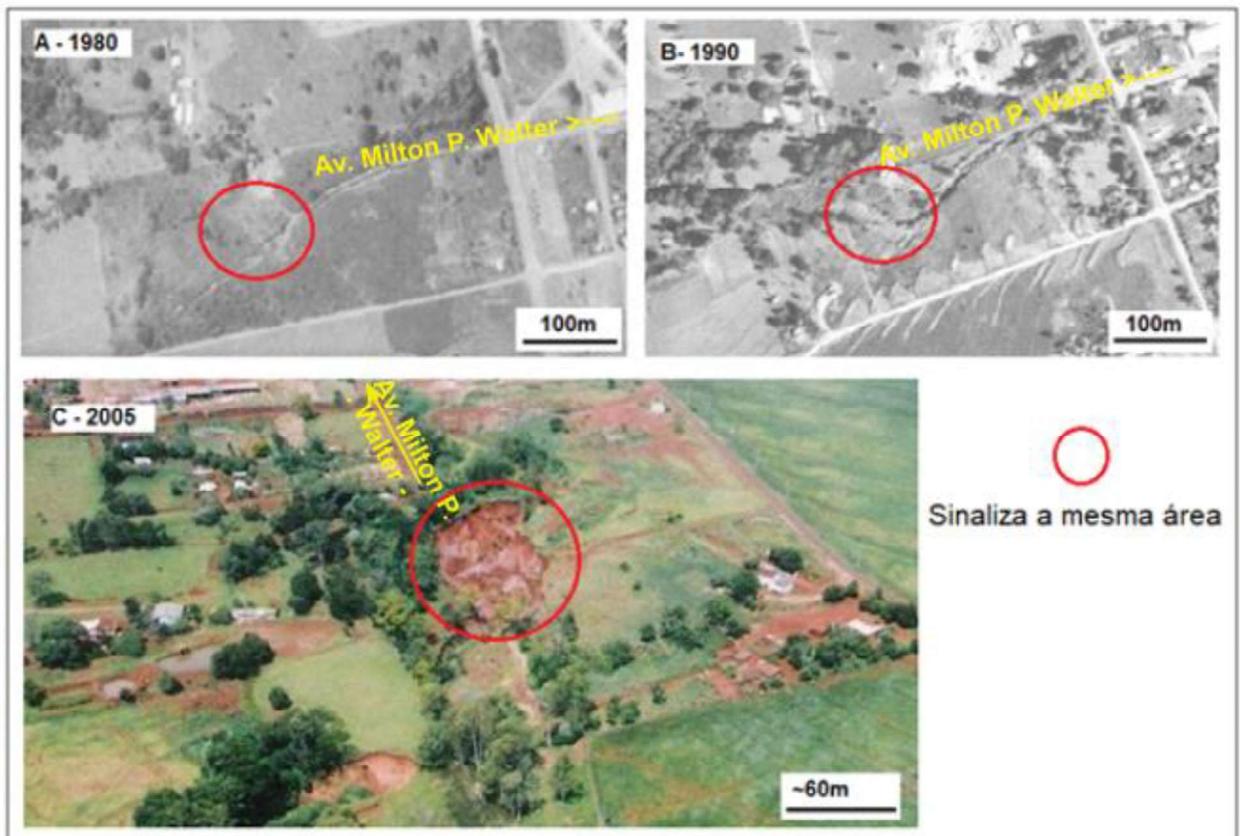
Elaboração: A autora (2022)

### 6.1.1 Voçoroca Luiziana e o processo histórico de evolução

A Voçoroca Luiziana se desenvolveu no curso do rio Nunes, ou seja, é uma voçoroca do tipo conectada ao canal fluvial. Sua extensão é de 750 metros, sendo que os primeiros 450 metros de montante para jusante correspondem as áreas maior atividade do processo erosivo, onde ocorrem movimentos de massa. Apresenta largura variável, que chega a 100m na área mais ativa, sua profundidade que variam de 8 a ~30 metros.

Na figura 25, o círculo em vermelho nas imagens, sinaliza o local onde veio a se estabelecer a cabeceira da Voçoroca Luiziana. Em 1980 aparece a estrada continuação da rua Milton de Paula Walter, onde o processo erosivo veio a se desenvolver lateralmente; em 1990, observa-se alargamento e aprofundamento da incisão; em 2005, após um evento chuvoso, houve um movimento de massa e uma ampliação significativa do processo erosivo, que teria toma do uma proporção de aproximadamente 60m de largura e 20m de profundidade.

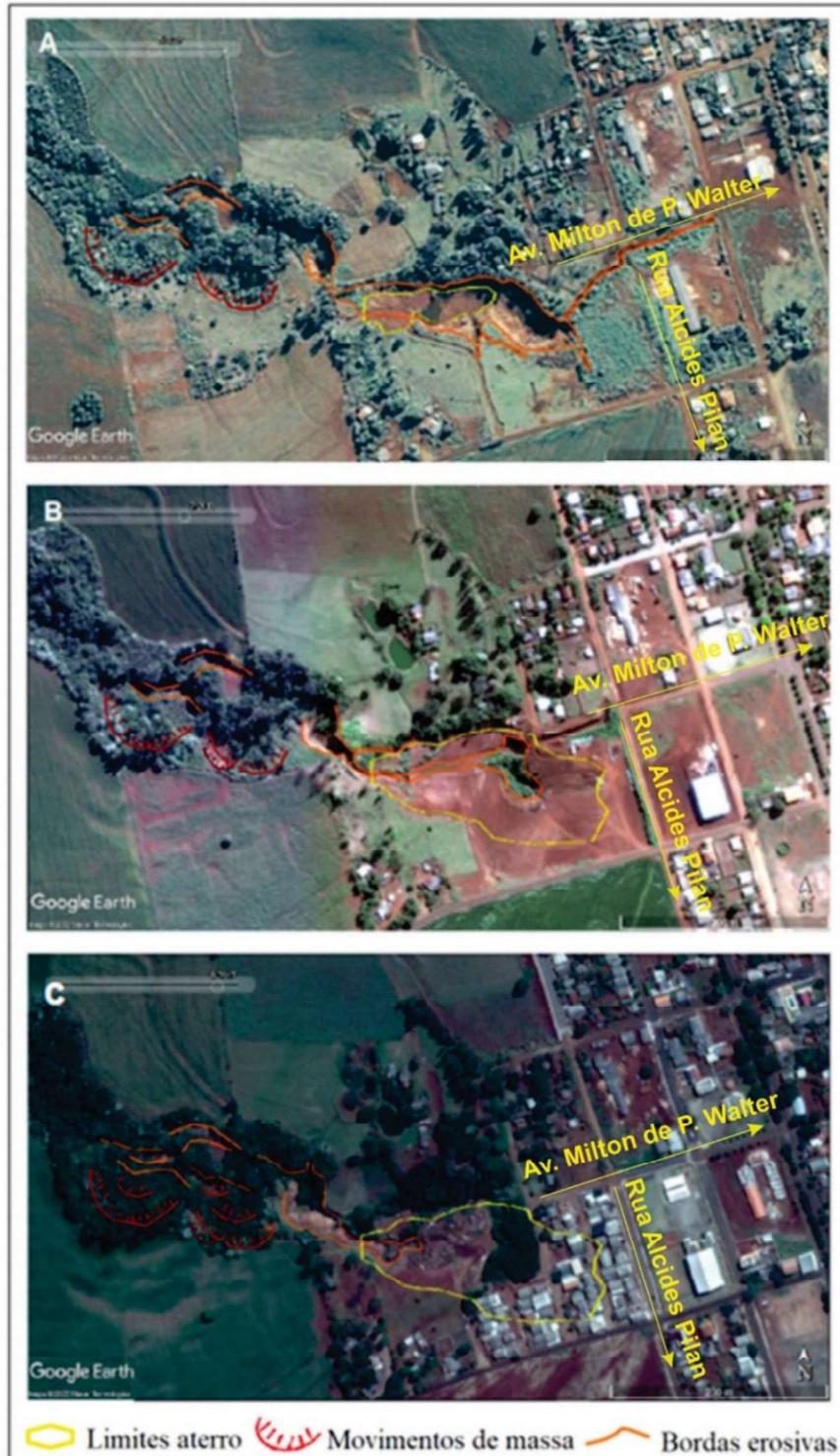
Figura 25 - Expansão do processo erosivo na área periurbana: A) 1980, B) 1990 e C) 2005



Fonte: A - ITCG (1980); B- Ministério das Cidades (1990); C- Prefeitura Municipal de Luiziana (fotografia obtida em sobrevoo, sem escala) (DANIEL, 2007)

A partir de 2005 diversas mudanças ocorreram nas imediações da cabeceira da Voçoroca Luiziana. A figura 26 A, mostra o estado da erosão em 2007, a figura 26 B, mostra o estado da erosão em 2010 e o aterro realizado na então cabeceira, na figura 26 C, é possível observar o crescimento da área urbana em direção a cabeceira voçoroca, e as vias asfaltadas.

Figura 26 – Voçoroca Luiziana: A) 29/07/2007, B) 29/07/2010 e C) 09/08/2017

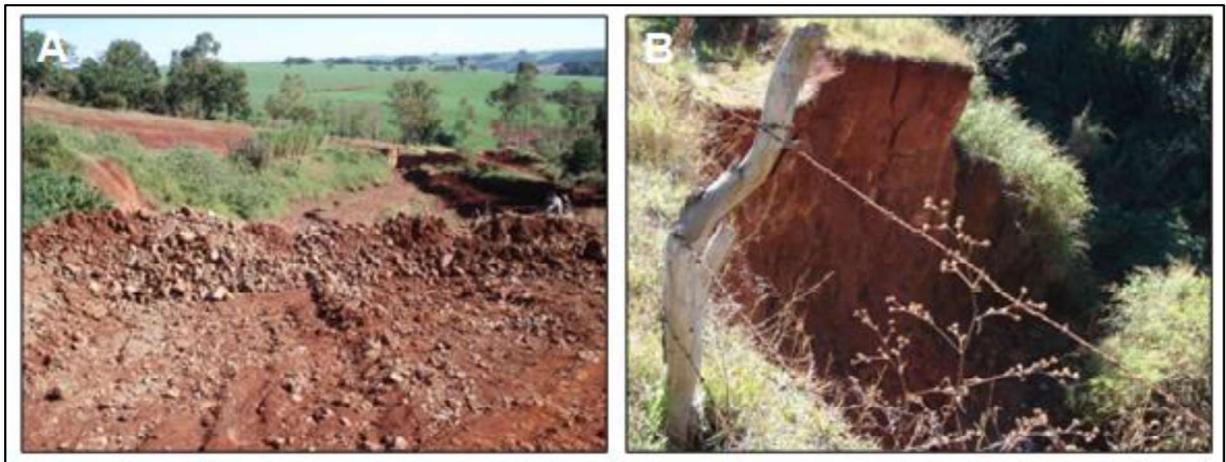


Fonte: *Google Earth* imagens históricas

Ainda no ano de 2006 foi iniciada a implantação da rede de galerias pluviais. na cidade. O ponto de lançamento das águas pluviais foi alocado no final da rua Milton de Paula Walter, cruzamento com a rua Alcides Pilan, área da cabeceira da voçoroca. Devido falta de dissipador de energia, rapidamente os tubos da galeria começaram a ser destruídos, e a erosão evoluiu remontantemente (Fig. 26 A). No ano de 2007 apenas duas avenidas na área central da cidade foram asfaltadas, a avenida Liberdade e a avenida Independência. O asfaltamento das vias urbanas foi ampliado em 2010 e em 2016, com a ampliação também da rede de galerias pluviais.

Ao decorrer dos anos, na tentativa de conter a erosão, foram implantadas medidas paliativas por parte da Prefeitura Municipal, tais como: aterro, diques e paliçadas (Fig.27 A). Inclusive, na tentativa de dissipar a energia da água oriunda da galeria pluvial, blocos de rochas foram colocados no ponto de lançamento da água. No entanto a força da água mobilizava estes materiais, aumentando o poder erosivo por abrasão, e a incisão erosiva evoluiu aprofundando e alargando nas laterais (Fig.27 B).

Figura 27 – A) Paliçada, B) Abatimento de bloco de solo nas bordas da erosão.



Fonte: arquivo da autora (2009)

O processo erosivo vem causando prejuízos sociais e econômicos. Um fator agravante ao processo erosivo é o lançamento de resíduos, parte destes são entulhos que advém de construção civil, e resíduos de origem doméstica por parte da população, e resíduos vegetais oriundos de poda, lançado em grande quantidade sob responsabilidade da Prefeitura Municipal. O Lançamento de entulho e lixo foi constatada por Daniel (2007), e no decorrer desta pesquisa (2018-2022). Destaca-se que resíduos de origem vegetal como poda de árvores são decompostos muito rápido, o que resultará em instabilidade na área, principalmente levando em conta a quantidade que é depositada.

No Plano Diretor do Município, do ano de 2007, já eram mencionados processos erosivos relacionados à drenagem urbana nas áreas periféricas, onde não havia pavimentação. O processo erosivo em discussão é citado no Plano Diretor do Município (2007), como “o maior processo erosivo da região”, que por falta de investimentos adequados, tornou-se em um dos grandes problemas de degradação ambiental do município. Advertindo-se naquele momento que o município não dispunha de condições técnicas e financeiras para combater tal processo, devendo este ser tratado em esferas superiores, federal e estadual. O mesmo documento designa a área atingida para recuperação ambiental tendo em vista que o processo erosivo se encontrava em estágio avançado.

A diretriz dada no Plano Diretor de 2007, foi para a complementação e ampliação do sistema de drenagem nas áreas urbanas, bem como a sua manutenção. No macrozoneamento foram elencadas como áreas não urbanizáveis e definidas áreas de recuperação ambiental, àquelas que apresentassem processo erosivo intenso e necessidade de medidas de contenção da degradação e de reconstituição do solo e da vegetação. Em 2009 foi sancionada a Lei Nº 463/2009, que dispõe sobre o Plano Diretor do município de Luiziana. No capítulo I, que trata do macrozoneamento municipal, fica estabelecido no Art. 38 as áreas não urbanizáveis do município, como “aquelas onde não é recomendável o uso para ocupação urbana”. Dentre as áreas não urbanizáveis, inciso II, está a área de recuperação ambiental que “são as áreas que apresentam processo erosivo intenso e necessitam de medidas de contenção da degradação e de reconstituição do solo e da vegetação” (PLANO DIRETOR, 2009). Estas áreas, correspondem no anteprojeto de Lei de Zoneamento (2007), Art. 28, a “Zona Especial de Recuperação Ambiental, onde não é permitido nenhum tipo de edificação e uso onde deverá ser promovida a recuperação da área degradada” (PLANO DIRETOR, 2007).

Embora no Plano Diretor de 2007 e de 2009 as áreas de degradadas sejam citadas como não aconselhável para construção, a área de cabeceira da voçoroca foi aterrada em 2010, e destinada à construção de moradias populares.

Embora o município enfrente sérios problemas com erosão causada por lançamento de águas pluviais, e estes já tenham sido apontados na formulação do Plano Diretor, as galerias pluviais continuam sendo construídas e deixadas inacabadas sem dissipadores de energia. No ano de 2019, a galeria situada na cabeceira da voçoroca foi ampliada, e o emissário está instalado a uma altura de aproximadamente 13 metros, em relação a base da voçoroca (Fig.28).

Figura 28 - Emissário na cabeceira da Voçoroca Luiziana



Fonte: A autora (2022)

### 6.1.2 Voçoroca das Lontras

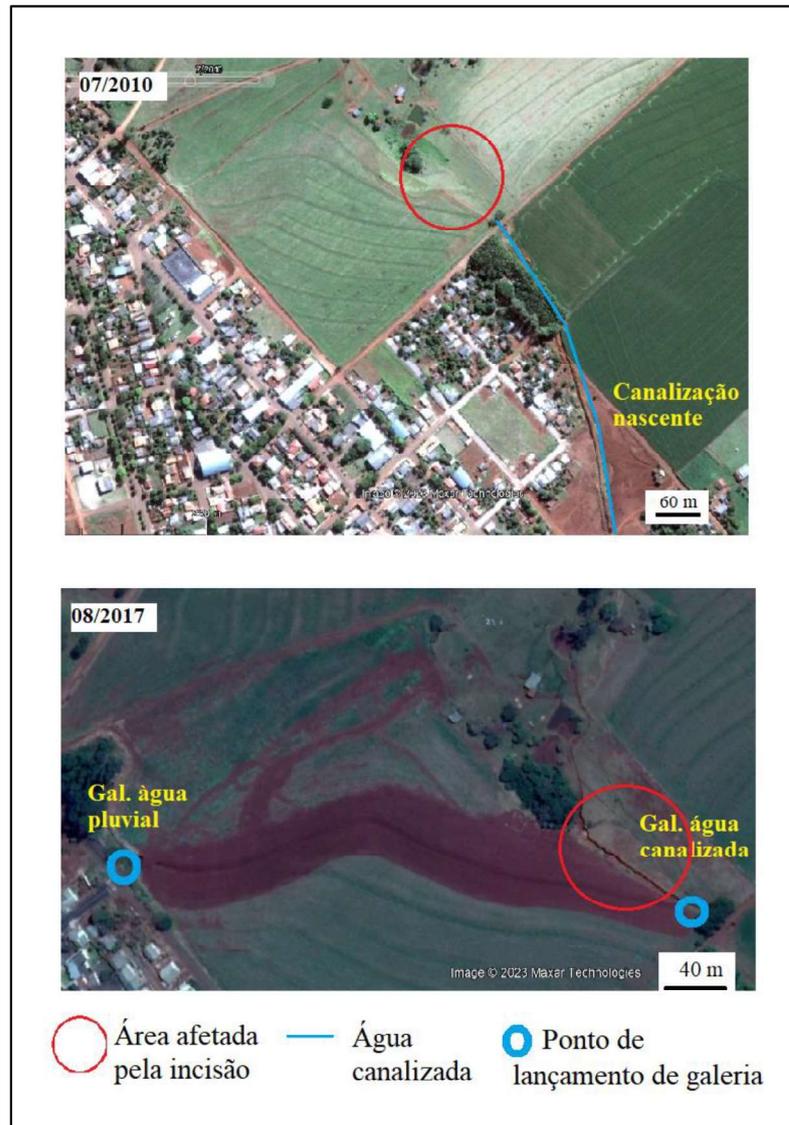
A Voçoroca das Lontras (Fig.29) teve desenvolvimento lateralmente ao eixo do vale de um canal intermitente, com aprofundamento da incisão até a base rochosa, composta por basalto vesicular alterado. Com cabeceira a ~730m de altitude, com canal inciso de 112m de extensão em 2019 (medida no início da pesquisa). Apresenta largura média de 3m, profundidade de 3,30m na cabeceira, 1,70m no ponto médio e 5m na extremidade inferior no encontro com a vegetação. No entanto analisar as imagens históricas observa-se que a área afetada por esta voçoroca alcançou aproximadamente 240 metros de extensão, em 2018 após intervenção mecânica com terraplanagem e plantio de capim à jusante, diminuindo a extensão da incisão.

O estudo indica que a Voçoroca das Lontras surgiu e foi ampliada por uma combinação de fatores. Entre 2010 e 2011, o rio intermitente teve sua nascente canalizada, com rebaixamento do lençol (Fig.29), as águas foram direcionadas para a propriedade rural, junto a uma divisa, entre cultura temporária e pastagem separada por cerca. As águas são lançadas em bacia de contenção, sem nenhum dissipador de energia. A ocorrência de água neste ponto é sazonal, e originada pelo córrego que foi desviado do curso original.

A segunda fonte de contribuição é oriunda do lançamento das águas de drenagem urbana. Processos erosivos já ocorriam em outro ponto da propriedade no final da rua Ana

Francisca, desde a década de 1980, onde formava uma ravina, pois se trata de uma cabeceira de drenagem onde se concentra o escoamento natural.

Figura 29 - Voçoroca das Lontras



Fonte: *Google Earth*®, imagens históricas (2010; 2017)

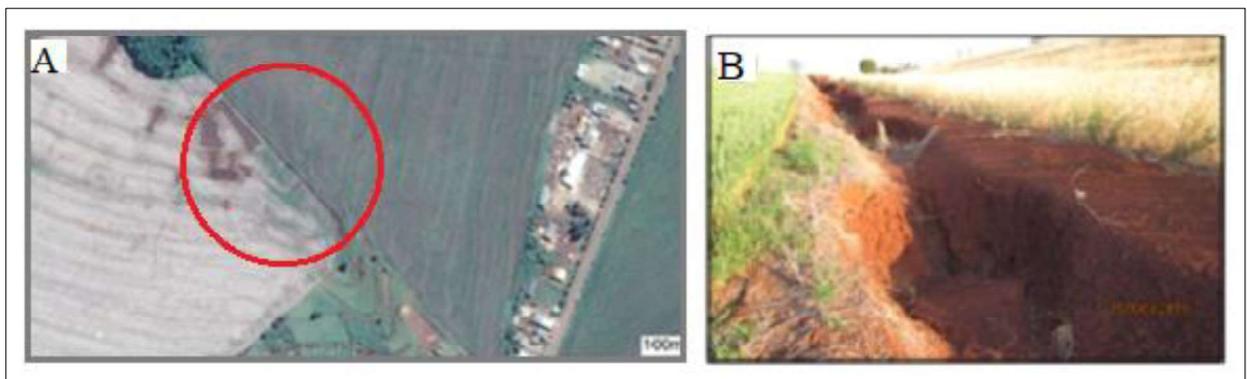
No entanto, após asfaltamento em 2016 com a implantação de galerias pluviais, as águas da drenagem urbana passaram a ser lançadas também em bacia de acumulação, sem nenhum tipo de dissipador de energia. Analisando as imagens de satélite observa-se que a incisão aparece nas imagens no ano de 2017, no mesmo ano ocorre mudança na posição da curva em nível, que acaba conduzindo as águas da drenagem urbana por uma distância de ~380m, para o mesmo ponto onde ocorre o lançamento das águas do córrego canalizado.

Em maio de 2017, o Ministério Público do Paraná, acionou o município de Luiziana, para que fossem implantadas galerias pluviais com dissipadores de energia, junto ao córrego das Lontras., o que até o final desta pesquisa não foi constatado. Já o proprietário foi acionado pela ausência da área de APP (MINISTÉRIO PÚBLICO DO PARANÁ, 2017).

### 6.1.3 Ravina Sem Passo

A Ravina Sem Passo (Fig.30 A e B) se desenvolveu na divisa entre propriedades, lateralmente ao eixo do vale de cabeceira. A cabeceira da ravina encontra-se a 720m de altitude, e se estende para jusante, até altitude de 686m, e 320m de extensão. Na sua largura predomina medidas em torno de 1m, podendo medir até 3m em alguns pontos. O escoamento concentrado forma diversos degraus, que medem de 30cm a 2,70m. Na base de um destes degraus ocorre o afloramento de basalto alterado, observando se neste ponto da vertente uma ruptura de declive. A incisão aparece nas imagens de satélite somente no ano de 2016.

Figura 30 - Ravina Sem Passo: A) 2016, B) 2019



Fonte: A) *Google Earth*®, imagens históricas (2016), B) A autora (2019)

Neste local não há lançamento de água por galerias pluviais, no entanto, sofre influência das águas de escoamento superficial. Na área rural as curvas em nível são interrompidas na divisa, onde a água escoando seguindo a uma linha retilínea na divisa.

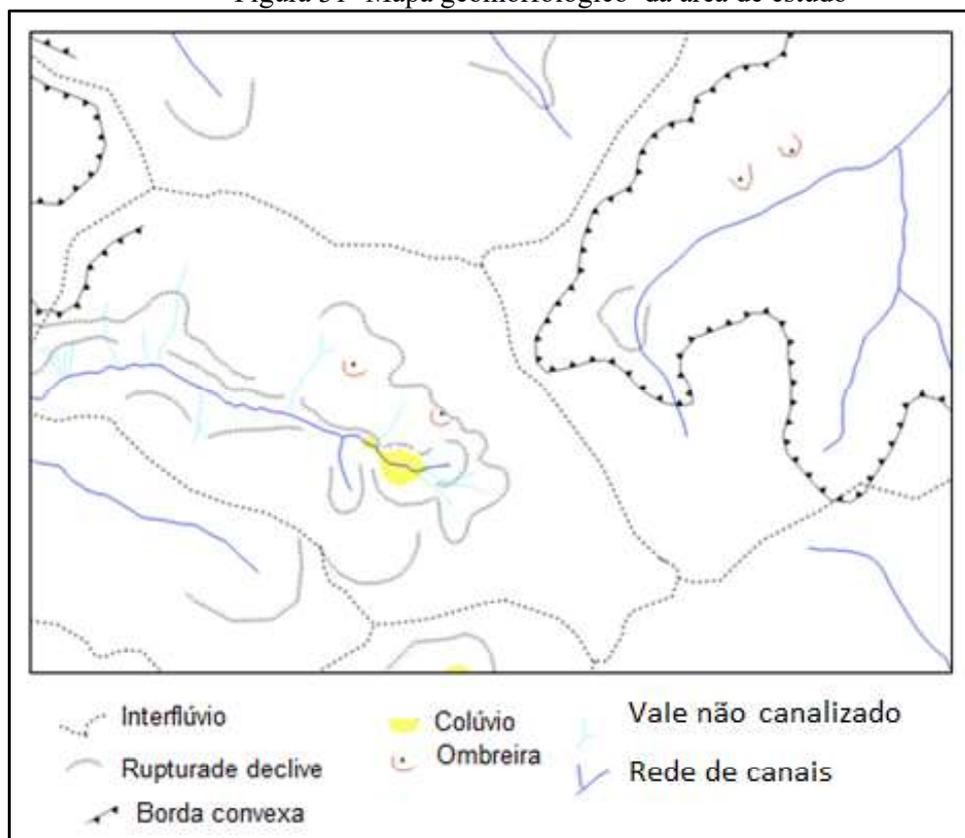
A partir do histórico dos três processos erosivos, observa-se que um fator importante foram as mudanças no uso de cobertura do solo na bacia hidrográfica: a cobertura do solo passou de floresta entre as décadas de 1940 e 1950, para culturas permanente e temporárias nas décadas seguintes; a implantação da cidade com sistema de arruamento em 1952. Como agravante, foi constatado a falta de vegetação ripária no ano de 1980. Entre os anos de 1980 para 2019, não houve mudança significativa na cobertura do solo, na área rural. No entanto verificou-se a relação entre elementos construídos como divisas e carregadores, práticas

mecânicas inadequadas e focos de processos erosivos no ano de 1980. Na área urbana houve expansão, impermeabilização das vias, e a implantação de galerias pluviais de forma inadequada, ou seja, sem dissipadores de energia, contribuíram para acelerar os processos erosivos.

## 6.2 CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS E PROCESSOS ATUANTES

A área de estudo está situada num contexto geomorfológico de limite entre duas subunidades geomorfológicas, a do Planalto de Campo Mourão caracterizada por apresentar baixa dissecação, e a do Planalto do Alto/Médio Piquiri, que apresenta dissecação média (SANTOS *et al.*, 2006). As altitudes variam de 612m no ponto mais baixo a 762m no topo. As vertentes são complexas, compostas por segmentos convexo-côncavos, e convexo-côncavos retilíneo, marcadas por rupturas de declives, com extensão que variam de 680 a aproximadamente 1200m. Uma característica morfológica importante na área em estudo são os vales não canalizados (Fig. 31) e as cabeceiras côncavas. Depósitos colúviais também foram identificados e aparecem na parte superior da bacia do rio Nunes (Fig. 31).

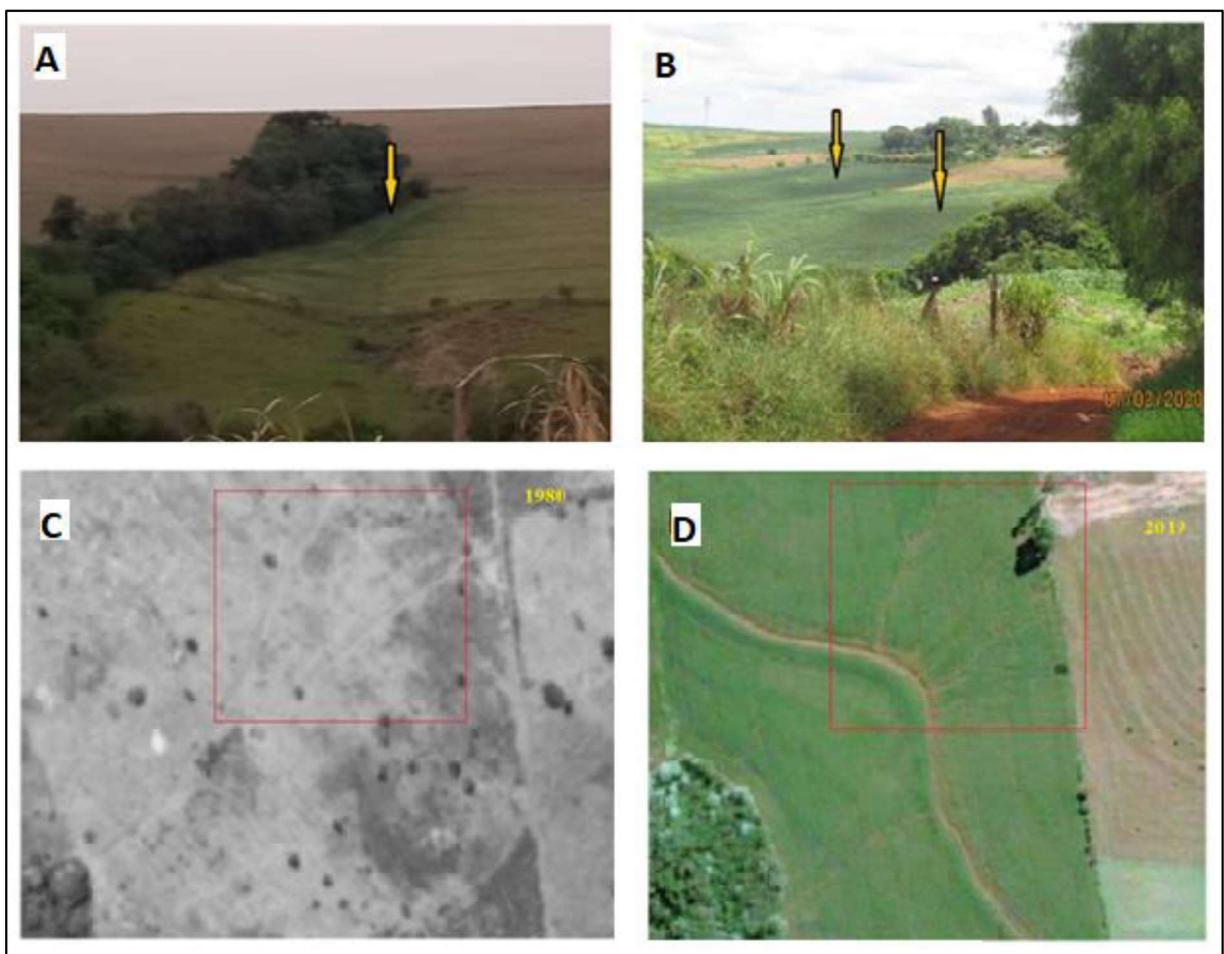
Figura 31- Mapa geomorfológico da área de estudo



Elaboração: A autora

Os vales não canalizados e os segmentos côncavos das vertentes (Fig.32 A e B), são áreas de concentração dos fluxos hídricos superficiais que dão origem a sulcos e ravinas. As figuras 32 C e 32 D mostram que estes processos erosivos permanecem no mesmo local ao longo do tempo. Verificou-se ainda que estes fluxos superficiais concentrados estão relacionados aos processos de erosão ativa encontrados no fundo de vale, o que revela a conexão entre processos na vertente e canal fluvial como destacado por Coelho Netto (2003).

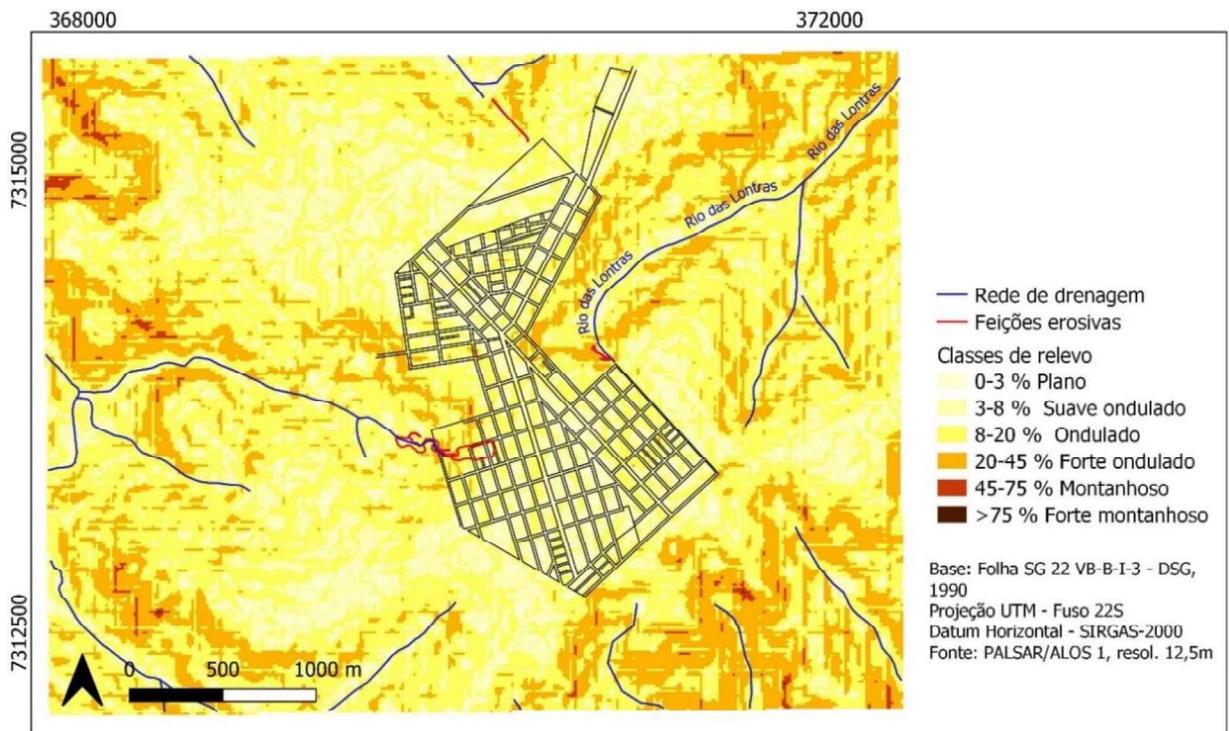
Figura 32 - A) Vale não canalizado, B) Cabeceira côncava, C) Erosão linear em cabeceira côncava em 1980 e D) em 2019.



Fonte: A e B) arquivo (2020); C) ITCG (1980); D) Plataforma *Bing Maps* (2019).

As maiores declividades estão associadas às rupturas de declive, onde o relevo é forte ondulado (Fig. 33). Nas rupturas de declive ocorrem solos rasos, e afloramento da rocha. A figura 34 A, mostra afloramento de rocha alterada, exposta pelo processo erosivo na baixa vertente, e a figura 34 B, mostra afloramento de basalto na ruptura de declive na alta vertente.

Figura 33- Declividade na área de estudo



Elaboração: A autora

Figura 34 - A) Afloramento de rocha alterada, B) Afloramento de basalto



Fonte: A autora

Os locais com solos rasos são propícios para que ocorra surgência da água subterrânea, ocorrendo interação entre fluxos superficiais e subsuperficiais, como referido por Dunne (1980), podendo desencadear processos erosivos.

Os mapas de feições erosivas dos anos de 1980 e 2019 (Fig. 35 e 36), revelam que feições erosivas relacionadas às áreas de concentração natural dos fluxos hídricos superficiais permanecem na mesma posição ao longo do tempo. Várias ravinas foram identificadas no mapa de 1980, principalmente nas vertentes da margem direita do rio Nunes, que apresenta as maiores declividades. Atualmente parte destas ravinas encontram-se em estado de estabilização. A figura 36 apresenta o mapa de processos erosivos do ano de 2019, com fotografias localizadas, o que permite fazer associações. A figura 36 A mostra cicatriz erosiva; a figura 36 B mostra uma ravina em atividade e a figura 36 C mostra erosão em túnel.

A partir das observações em campo e do mapeamento dos processos erosivos, é possível estabelecer as seguintes relações quanto às características geomorfológicas da área e a atuação dos fluxos hídricos na geração de processos erosivos. A área apresenta topo convexo, com relevo plano a suave ondulado. A alta vertente apresenta forma convexa e relevo suave ondulado a ondulado. Ambos funcionam como áreas de distribuição dos fluxos hídricos, e atualmente está ocupada pela área urbanizada.

Na média vertente, o relevo é ondulado e forte ondulado, neste setor estão situados os vales não canalizados (onde não há canal inciso) e as porções côncavas do relevo. São as áreas de concentração de fluxos hídricos superficiais, que formam de sulcos, os quais convergem para formação de ravinas (Fig. 36 D). Em pontos onde ocorre o lançamento de água da drenagem urbana (Fig. 36 E), a direção de escoamento natural é alterada artificialmente, neste caso as feições erosivas foram identificadas como “ravina artificial” e “sulco artificial”, e “fluxo direcionado” no mapa de feições erosivas (2019).

No segmento da média para baixa vertente predomina relevo ondulado, neste setor escoamento ocorre de forma concentrada em ravinas, até atingir o rio. Foram identificadas cicatrizes erosivas de ravinas antigas as quais foram divididas em dois tipos: “cicatriz erosiva” e “cicatriz em ravina mecanizada” no mapa de processos erosivos 2019 (Fig. 36). O primeiro tipo se refere a cicatrizes em que a incisão erosiva permanece, mas encontra-se em fase de recuperação. Estas cicatrizes estão situadas em áreas onde o uso da terra foi deixado em favor da vegetação. O segundo tipo “cicatriz em ravina mecanizada”, corresponde a ravinas antigas localizadas na área de cultivo, estas ravinas passaram por obras de terraplanagem para contenção do processo erosivo, e são constantemente retrabalhadas por processos de mecanização inerentes ao cultivo.

Figura 35 - Feições erosivas Voçoroca Luiziana 1980

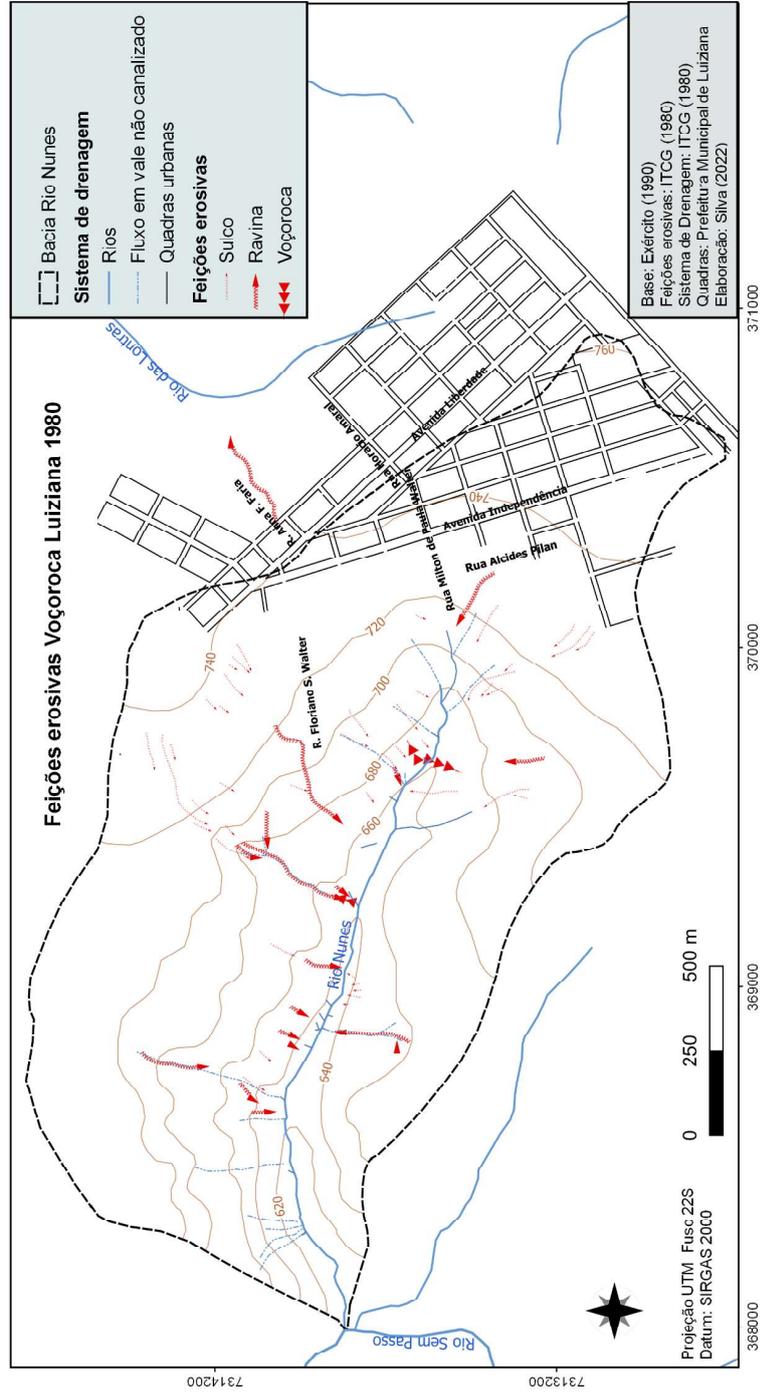
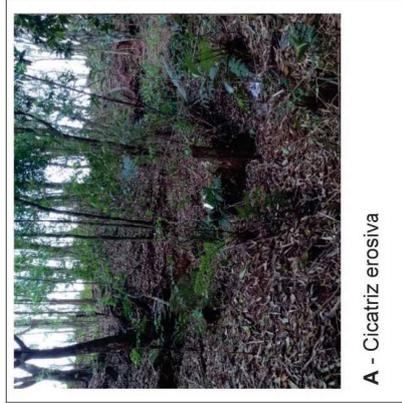
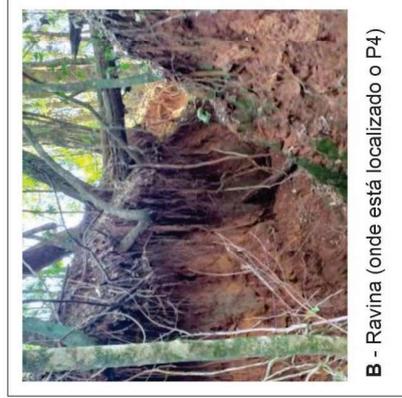


Figura 36: Feições erosivas Voçoroca Luiziana 2019.



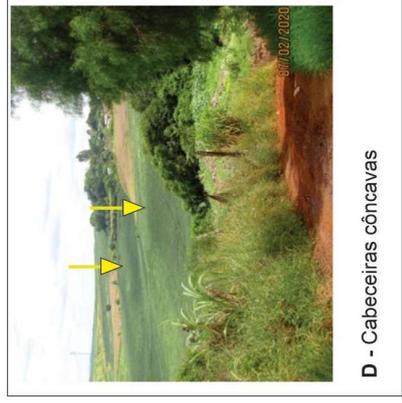
A - Cicatriz erosiva



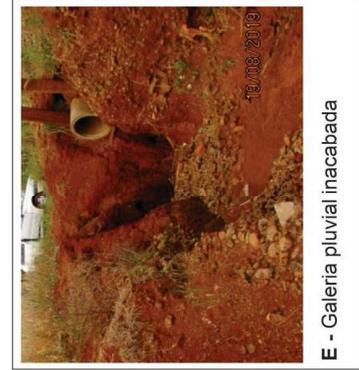
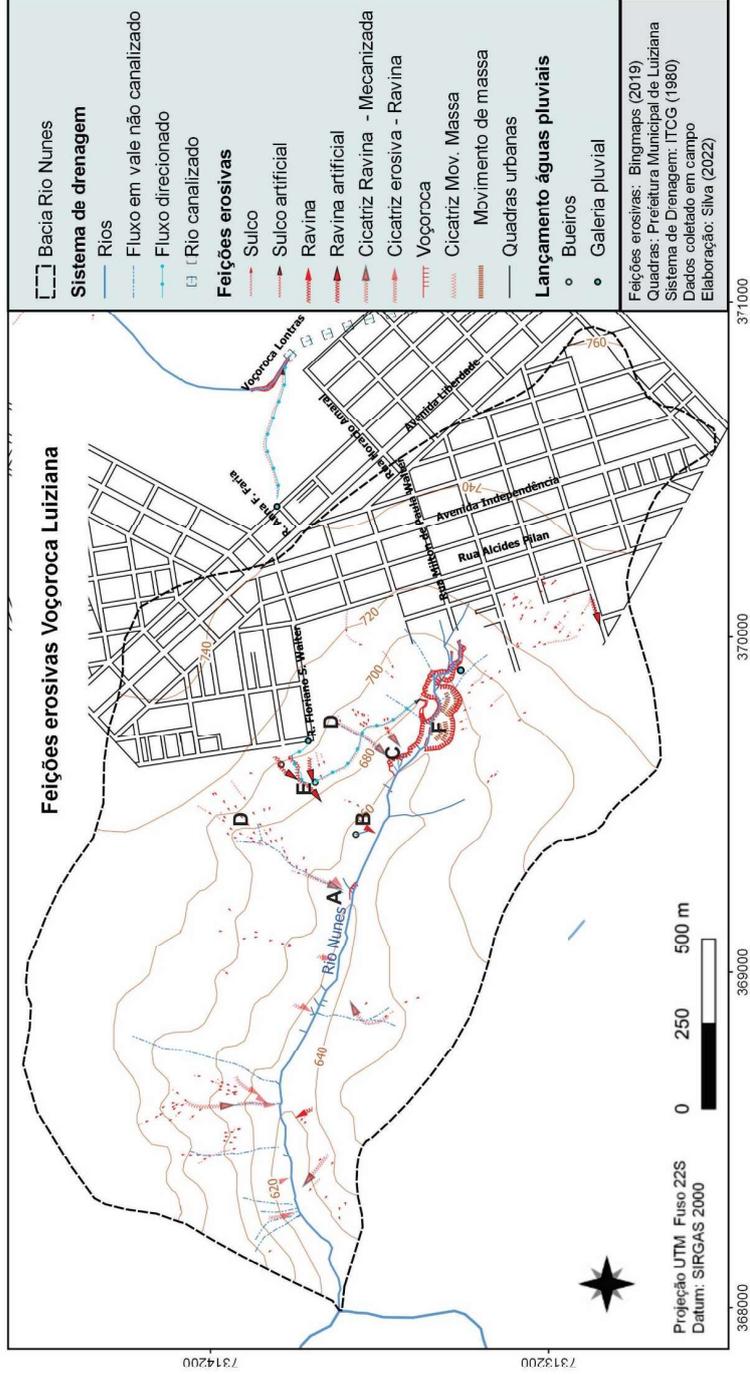
B - Ravina (onde está localizado o P4)



C - Erosão em duto-pipe



D - Cabeceiras côncavas



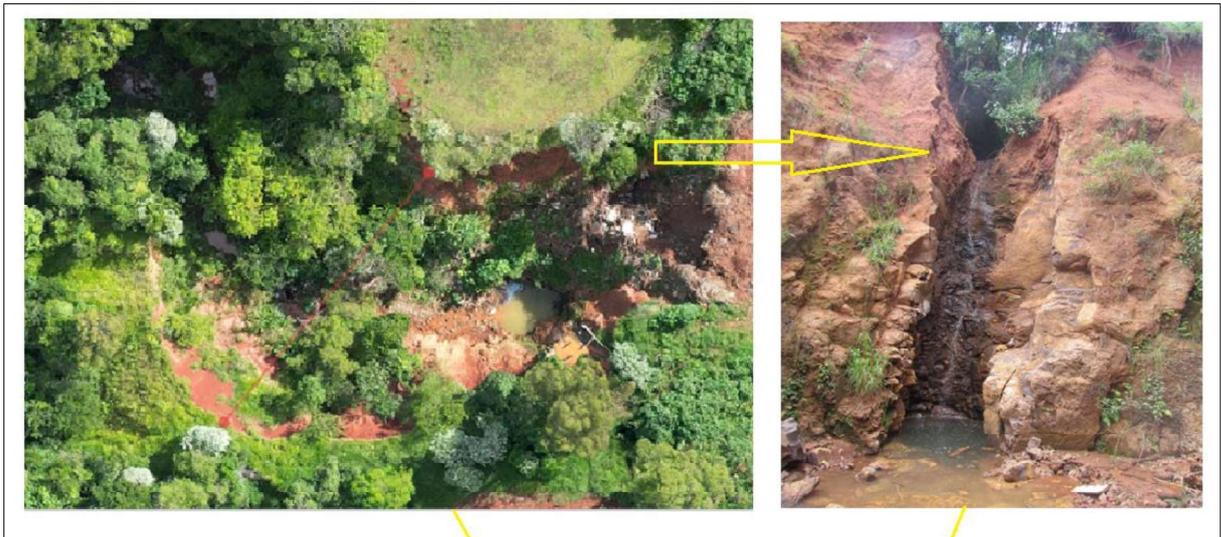
E - Galeria pluvial inacabada



F - Movimentos de massa

O rio Nunes, no qual a Voçoroca Luiziana está conectada, é rio de 2ª ordem conforme a classificação Strahler (1952). A bacia deste rio ocupa uma área de 3,125km<sup>2</sup>, apresenta amplitude altimétrica de 150m. Na cabeceira do rio Nunes, a área afetada pela erosão em voçoroca, é caracterizada por uma transição de solo raso (30cm) para solo de espessura em torno de 2m, sobre um perfil espesso de rocha bastante alterada, com paredes abruptas (Fig. 37).

Figura 37 - A) Cabeceira da Voçoroca Luiziana, imagem aérea, B) Intercepção do lençol



Fonte: Imagem de drone (2023); arquivo da autora 2019.

A jusante os perfis de alteração tornam-se mais espessos variando de 8 a ~20m. Na margem direita, ocorre uma alternância de perfis espessos de ~20 metros, constituídos por horizontes endurecidos pela presença de óxidos, que estão sendo “truncados” por canais erosivos, permanecendo “blocos de solo” imobilizados (Fig.38 A). Esses perfis endurecidos por óxidos podem apresentar permeabilidade muito baixa. Bigarella *et al.* (1996) destaca que horizontes de acumulação de óxidos de ferro podem ser quase impermeáveis à percolação da água. Isso poderia explicar a permanência destes “blocos” sem se movimentar. Na margem esquerda da voçoroca predominam os movimentos de massa, que já removeram grande quantidade de solo (Fig. 38 B). Com o aprofundamento da incisão ocorre o solapamento das margens, ocasionando queda de blocos de solo. Sob condição de saturação resultante da concentração da água subterrânea somada a água pluvial ocorrem escorregamentos que se propagam para a vertente.

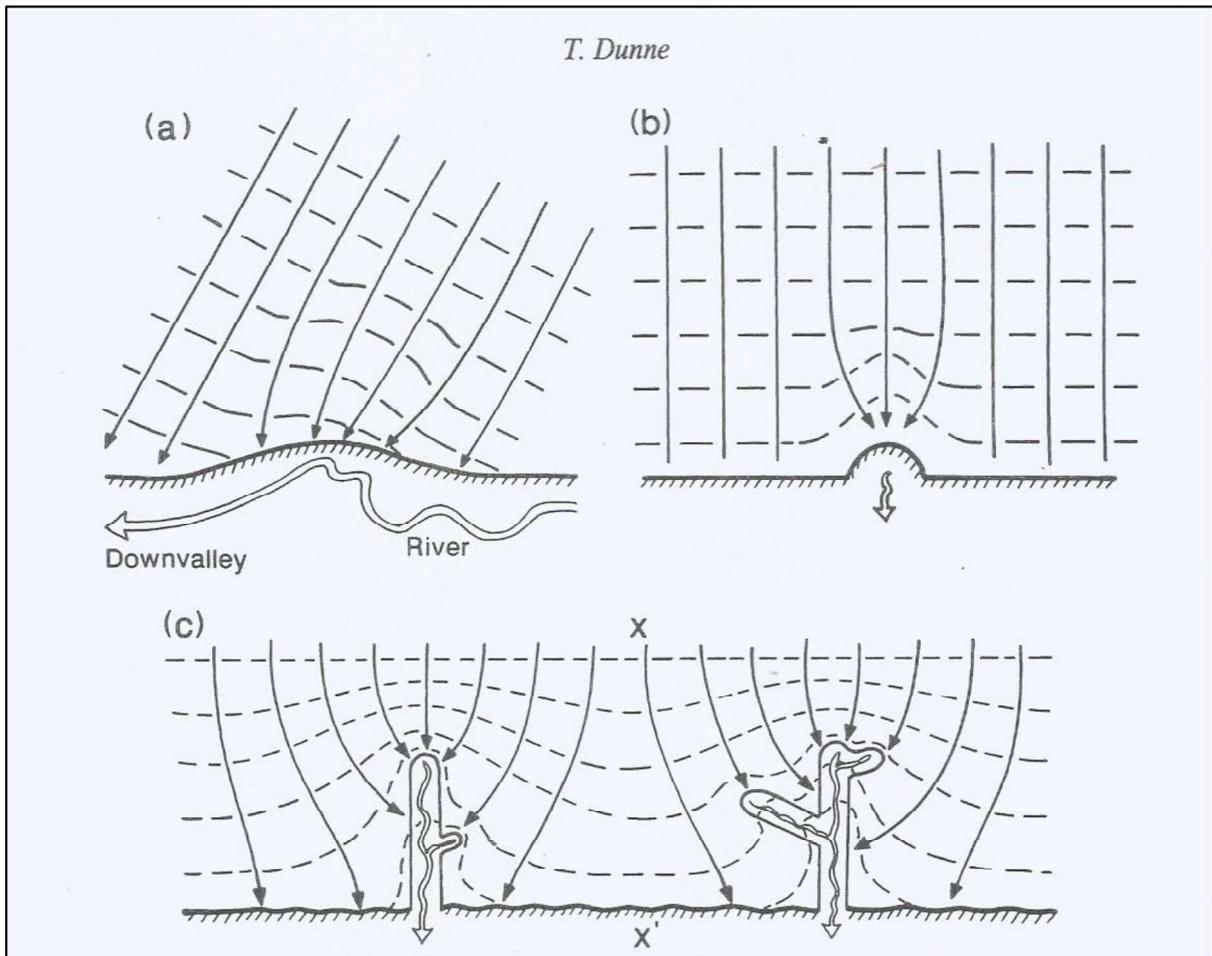
Figura 38 - A) Perfil espesso, com nível endurecido, B) Perfil em vertente instável.



Fonte: A autora

As frentes de expansão da Voçoroca Luiziana estão gerando novos canais, ou seja, com fluxo de água subterrânea contínuo. Esse fenômeno é explicado por Dunne (1980), de acordo com o autor, quando o lençol subterrâneo sofre alguma perturbação como o solapamento da base da vertente, que pode ser resultante de incisão erosiva, ou erosão de margem por exemplo (Fig.39 a), as linhas de fluxos subsuperficiais convergem e aumenta o fluxo na zona de exfiltração da água subterrânea (Fig.39 b), que recua por movimento de massa, dando origem a novos canais de drenagem (Fig. 39 c). Na área de estudo estes canais estão conectados a ravinas, evidenciando a sinergia entre escoamento superficial e subterrâneo, como descrito por Oliveira (2007).

Figura 39 – Concentração das linhas de fluxos



Fonte: Dunne (1980)

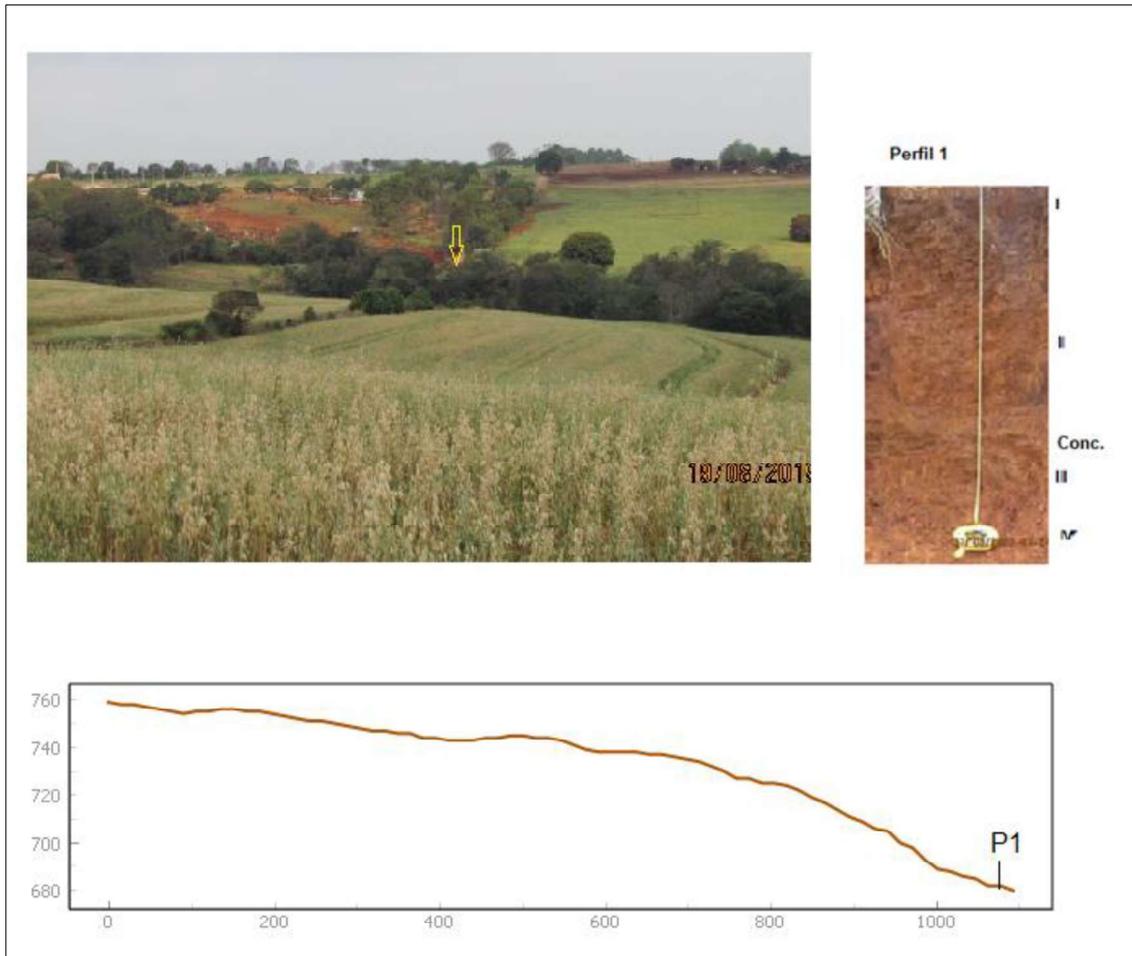
### 6.3 PERFIS DE ALTERAÇÃO: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E GEOTÉCNICAS

Em virtude da amostragem realizada dos perfis em profundidade, optou-se por apresentar os dados por volume, onde as amostras foram coletadas, e quando possível foram indicados os horizontes correspondentes a classificação brasileira de solo, uma vez que alguns solos requerem outras análises para a confirmação (EMBRAPA, 2017). Primeiro são apresentadas as características morfológicas descritas em campo; em seguida são apresentados em gráficos os dados de granulometria em porcentagem (%), a densidade aparente do solo ( $\text{g m}^{-3}$ ), a porosidade total (Pt%), a condutividade hidráulica ( $\text{cm}^{\text{h}^{-1}}$ ), por último são apresentados o índice de plasticidade e os minerais presentes no solo.

### 6.3.1 Perfil de alteração P1 Voçoroca Luiziana

O perfil 1 (Fig. 40) está situado na posição de baixa vertente, na cabeceira da Voçoroca Luiziana, sob cobertura de gramíneas.

Figura 40 – Vertente Voçoroca Luiziana P1



Elaboração: A autora

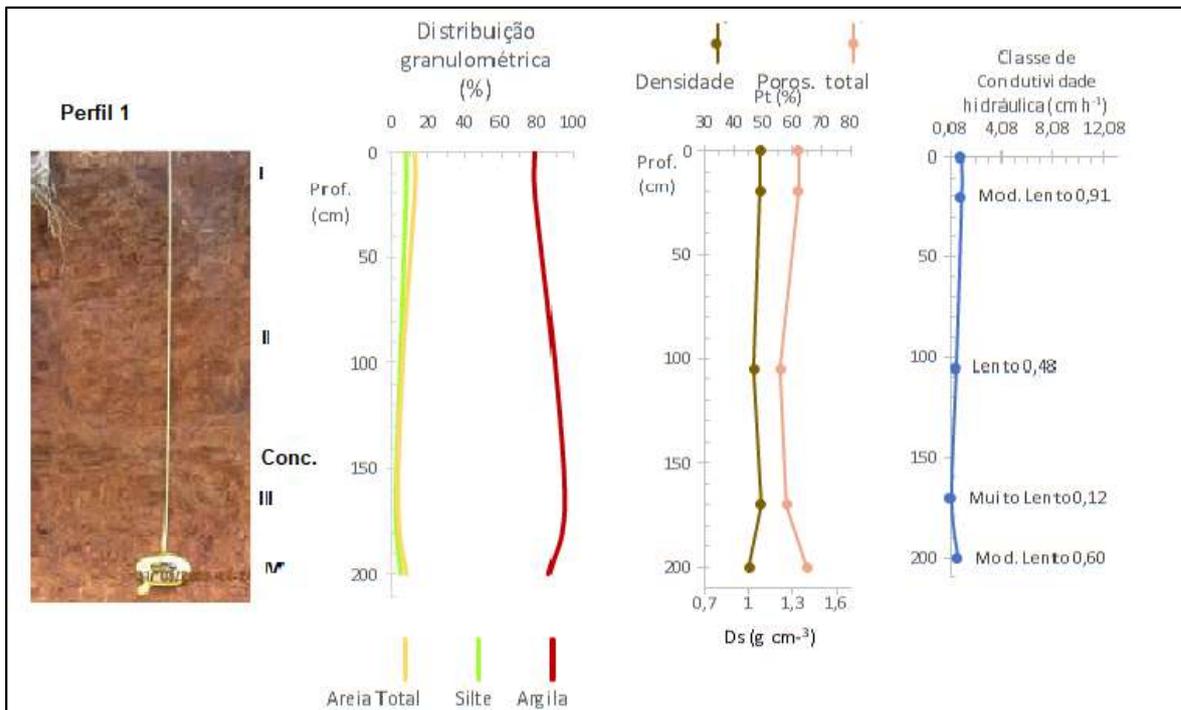
O perfil 1, apresenta as seguintes características morfológicas:

I - Horizonte Ap 0-35cm, cor 2,5 YR 4/6, textura argilosa, estrutura em blocos subangulares, médio, grau de desenvolvimento forte, consistência dura, firme, plástica e pegajosa, a transição é ondulada e clara entre 35-65cm.

II – Horizonte B nítico 65-165cm, cor 2.5 YR 4/6, textura argilosa, estrutura em blocos subangulares, médio, forte consistência, dura, firme, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, apresenta cerosidade comum, e nódulos entre 150 e 165cm de profundidade. transição plana e abrupta.

III – Horizonte Bc 165-190cm, cor 10 R 4/6, textura argilosa, estrutura maciça, consistência ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição clara e plana.  
V- Horizonte C 190+, rocha alterada 10R 7/4, textura argilosa.

Figura 41- Perfil 1, granulometria, densidade, porosidade total e condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

No Perfil 1, no volume I, foram encontrados os seguintes valores na composição textural do solo: teor de argila 78,59 %, silte 8,3 % e areia 13,11%. A densidade de 1,08 g m<sup>-3</sup>, porosidade total de 62,07 %, e condutividade hidráulica 0,91 cm h<sup>-1</sup> que corresponde a classe moderadamente lenta de acordo com Klute (1965). O volume II apresenta teor de argila 89,91%, silte 4,51 % e areia 5,58 %. A densidade é de 1,04 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 55,99% e a condutividade hidráulica 0,48 cm h<sup>-1</sup>, classe lento, devendo neste caso estar relacionada ao teor de argila. O volume III apresentou teor de argila de 94,7%, silte 2,08% e areia 3,22 %. A densidade neste horizonte é de 1,09 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 58,15% e condutividade hidráulica 0,12 cm h<sup>-1</sup>, muito lenta. O volume IV apresentou 86,28% de argila, 5,02% de silte e 8,7 % de areia. A densidade neste horizonte é de 1,01 g m<sup>-3</sup>, a porosidade total 64,97% e a condutividade hidráulica 0,6 cm h<sup>-1</sup> (classe muito lenta).

A granulometria apresentou menor valor de argila no volume I, e maior valor no volume III, que também apresentou maior densidade. A condutividade hidráulica do solo saturado no perfil cabeceira reduziu no volume III, e voltou a aumentar no volume IV. A menor

permeabilidade no volume III, deve estar relacionado ao teor de argila, Thomas (1994) explica que a curva da permeabilidade apresenta baixos valores na parte superior do saprolito onde alto teor de argila e encontrado.

Neste caso a condutividade hidráulica muito lenta no volume III, pode levar a saturação do horizonte superior o que conseqüentemente gerar fluxo lateral, ocasionando erosão interna, e ou ultrapassar o limite de plasticidade o que pode contribuir para a ocorrência de movimentos de massa.

Os minerais presentes no solo no ponto 1, em todo o perfil foram: caulinita, goethita, hematita, gibbsita, quartzo e argilominerais 2:1. No horizonte, A além de destes minerais manganita/maghemita. Além destes, no horizonte C a ferrihidrita. O índice de plasticidade no perfil 1 foi de IP=21 no horizonte endurecido volume III, e IP=19 em todas as outras amostras do perfil, correspondendo a solos altamente plásticos. O que pode estar relacionado a presença dos argilominerais 2:1.

### **6.3.2 Perfil de alteração P2 Voçoroca Luiziana**

O perfil 2 (Fig.42), corresponde a um depósito de origem coluvial, está situado à margem direita do rio Nunes, há cerca de 90 metros a jusante do ponto 1.

O ponto 2 apresenta as seguintes características morfológicas:

I - 0-85/95cm, cor variegada, solo 10 R 4/6, fragmentos de rocha alterada cores 10 R 5/6; 10 R 3/6; 10 YR 7/8; 2,5 YR 6/8, textura argilosa, estrutura subangular, grande, se desfaz blocos menores prismáticos, consistência ligeiramente dura, friável quando úmida, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, com concreção de ferro a 75cm, transição ondulada e abrupta.

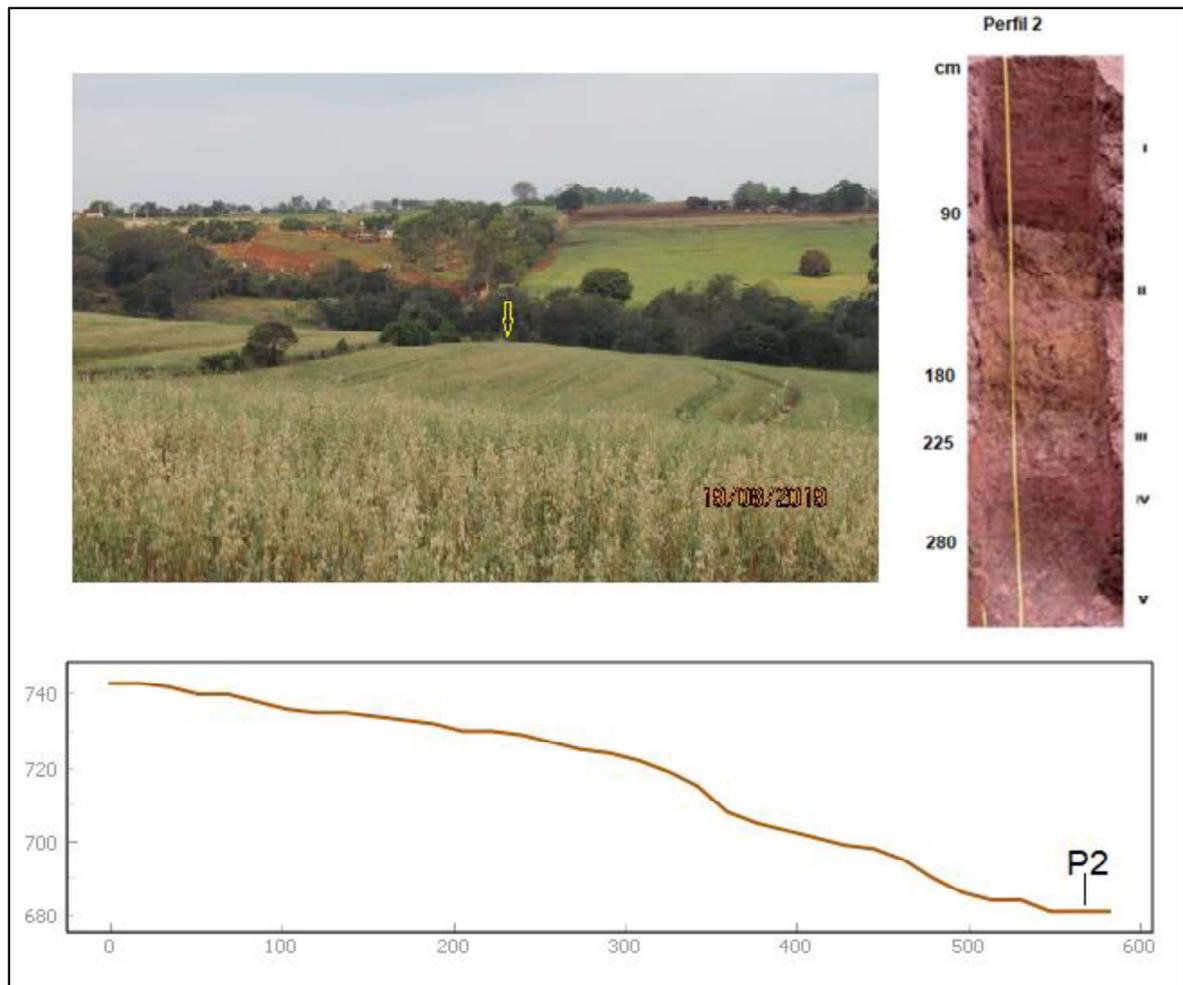
II - 85/95-180cm, horizonte mosqueado cor 10 YR 5/6 e 10 YR 4/6, textura argilosa, estrutura aspecto maciço, horizonte endurecido com presença de nódulos, transição ondulada e clara.

III - 180-225cm, horizonte endurecido, mosqueado, cor 7,5 YR 7/4; 7,5 YR 2.5/1, fragmentos muito pequenos de rocha alterada 10 YR 6/8, textura argilosa, estrutura subangular, consistência dura, friável quando úmida, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, presença de nódulos e concreções.

IV - 225-280cm, cor variegada 10 R 4/6; 2 YR /4 textura argilosa, estrutura subangular grande, consistência dura, friável quando úmida, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição ondulada e clara, com presença de nódulos.

V - 280-320+cm, rocha alterada brecha, cor clara (matriz) 10 R 7/4 e clastos de basalto muito alterado cor 10 R 3/4; 10R 4/2; 10 8/1. Esse está sob influência do lençol freático.

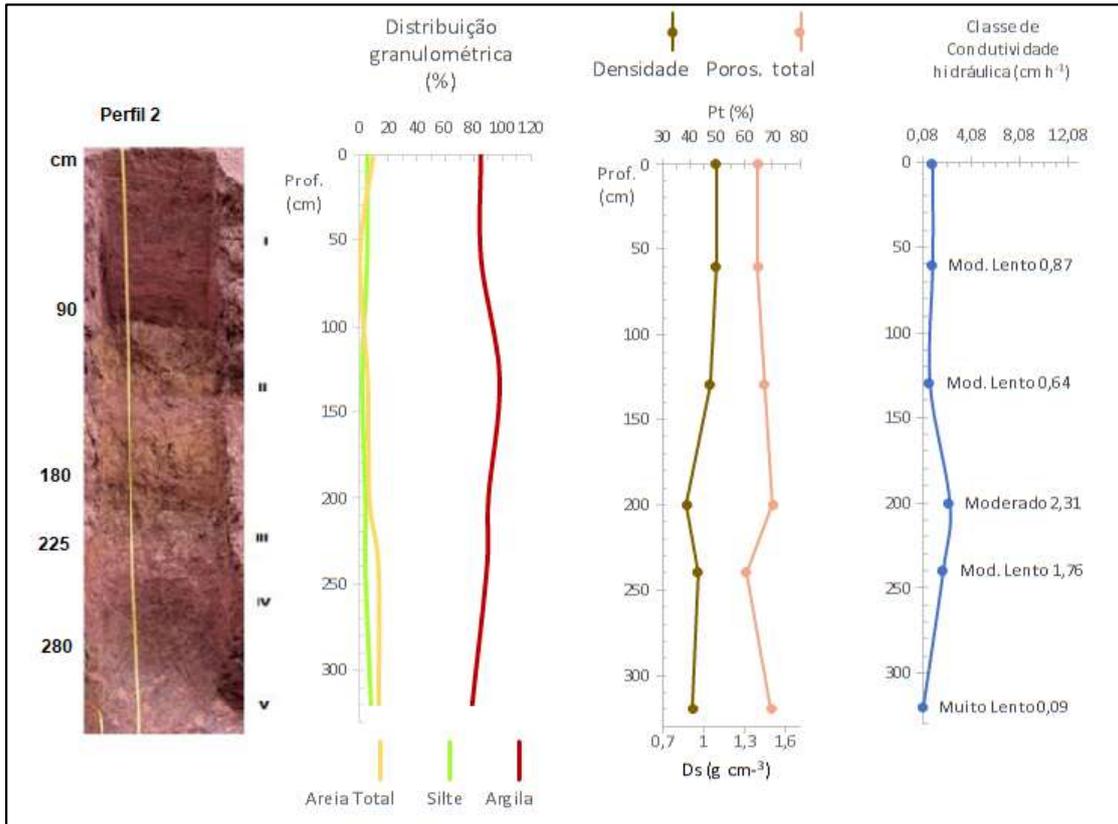
Figura 42- Vertente Voçoroca Luiziana P2



Elaboração: A autora

No perfil 2, o volume I apresentou os seguintes valores texturais 84,75% de argila, 5,17 % de silte e 10,08 de areia. A densidade aparente do solo é de  $1,09 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade é de 64,61% e a condutividade hidráulica saturada de  $0,87 \text{ cm h}^{-1}$ , classe moderadamente lenta. No volume II, o teor de argila é de 97,93%, silte 1,63% e areia 0,44%. A densidade aparente do solo é de  $1,05 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade de 67,12% e a condutividade hidráulica saturada de  $0,64 \text{ cm h}^{-1}$ , moderadamente lento. No volume III, foram verificados os seguintes valores: para o teor de argila 90,04%, para o silte 4,01%, e areia 5,95%. A densidade aparente do solo é de  $0,88 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade é de 70,25% e a condutividade hidráulica saturada de  $2,31 \text{ cm h}^{-1}$ , classe moderada.

Figura 43- Perfil 2, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

No volume IV, o teor de argila é de 89,00%, para o silte 3,82%, areia 7,18%. A densidade aparente do solo é de  $0,96 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade é de 60,66% e a condutividade hidráulica saturada de  $1,76 \text{ cm h}^{-1}$ , classe moderadamente lenta. No volume V, que corresponde a rocha alterada do tipo brecha, a argila apresentou 78,62%, para o silte 7,74%, areia 13,64%. A densidade aparente do solo é de  $0,92 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade 69,53% e condutividade hidráulica de 0,09, muito lenta.

A condutividade hidráulica no perfil 2, variou de moderadamente lenta nos volumes I e II, aumentando para moderado no volume III, e muito lento no volume V que corresponde a rocha alterada que corresponde ao nível do lençol freático, que oscila sazonalmente. A baixa permeabilidade no volume V, pode elevar o lençol e ocasionar fluxo lateral nos volumes superiores III e IV.

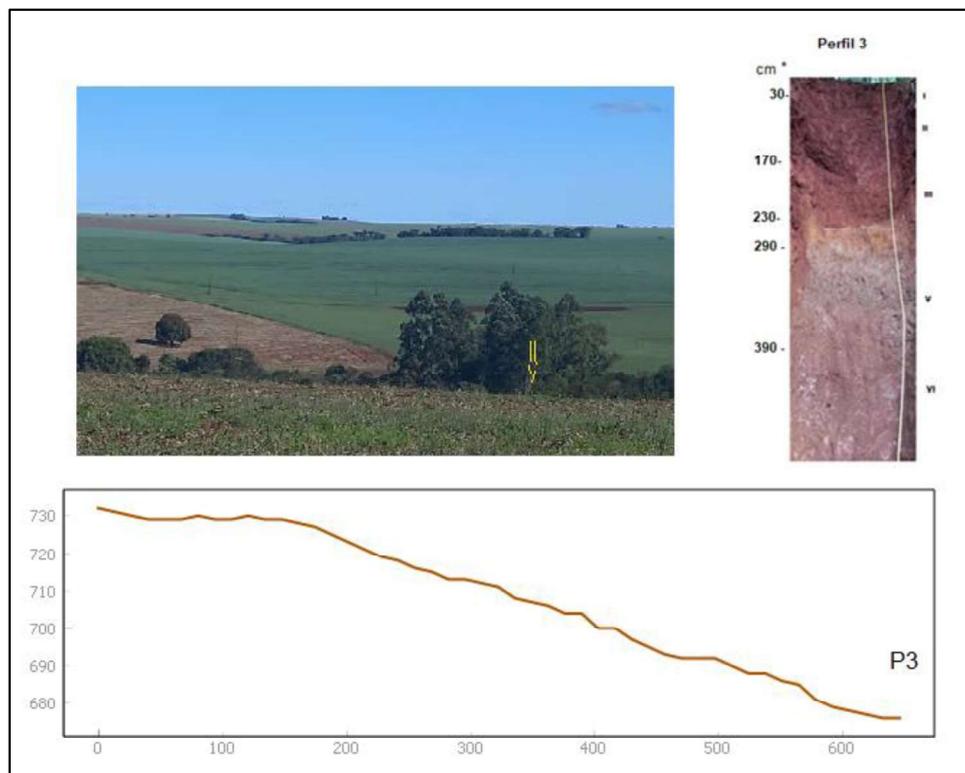
Dentre os minerais encontrados no perfil 2, estavam presentes nas amostras analisadas: caulinita, hematita, goethita, maghemita, manganita, gibbsita, quartzo e argilominerais 2:1. Neste perfil, na matriz da brecha foram encontrados, hematita, manganita/maghemita, quartzo, laumonita e argilominerais 2:1.

O índice de plasticidade no perfil 2 foi de  $IP=23$  no volume I, no volume II apresentou  $IP=28$ , no volume III o  $IP=22$ , e no volume IV apresentou  $IP=15$ . O valor mais alto do índice de plasticidade no volume II deve estar relacionado ao alto teor de argila  $IP=28$ .

### 6.3.3 Perfil de alteração P3 Voçoroca Luiziana

O perfil 3 está localizado na margem esquerda da voçoroca (Fig. 44), sob cobertura vegetal, e é um perfil representativo da porção onde ocorre movimentos de massa.

Figura 44 - Vertente Voçoroca Luiziana P3



Elaboração: A autora

O perfil 3, é representativo da área onde ocorrem movimentos de massa, dessa forma, apresenta fendas de tração na parte superior e estrutura com aspecto maciço “quebrada” nos volumes V e VI. Dessa forma pode apresentar características morfológicas afetadas, mas é um ponto representativo, e de importância para compreensão dos processos atuantes.

O perfil 3 apresenta as seguintes características morfológicas:

I - Horizonte A, 0-50cm, cor vermelho escuro 2,5 YR 3/6, textura argilosa, estrutura prismática colunar e subangular, médio, forte, consistência ligeiramente dura a dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa, transição plana e gradual.

II - Horizonte B nítico, 50-170, cor vermelho escuro 2,5 YR 3/6, textura: argilosa, estrutura prismática colunar grande, e subangular médio, consistência, seca ligeiramente dura a dura, friável, ligeiramente pegajosa a pegajosa, transição plana e gradual, cerosidade comum.

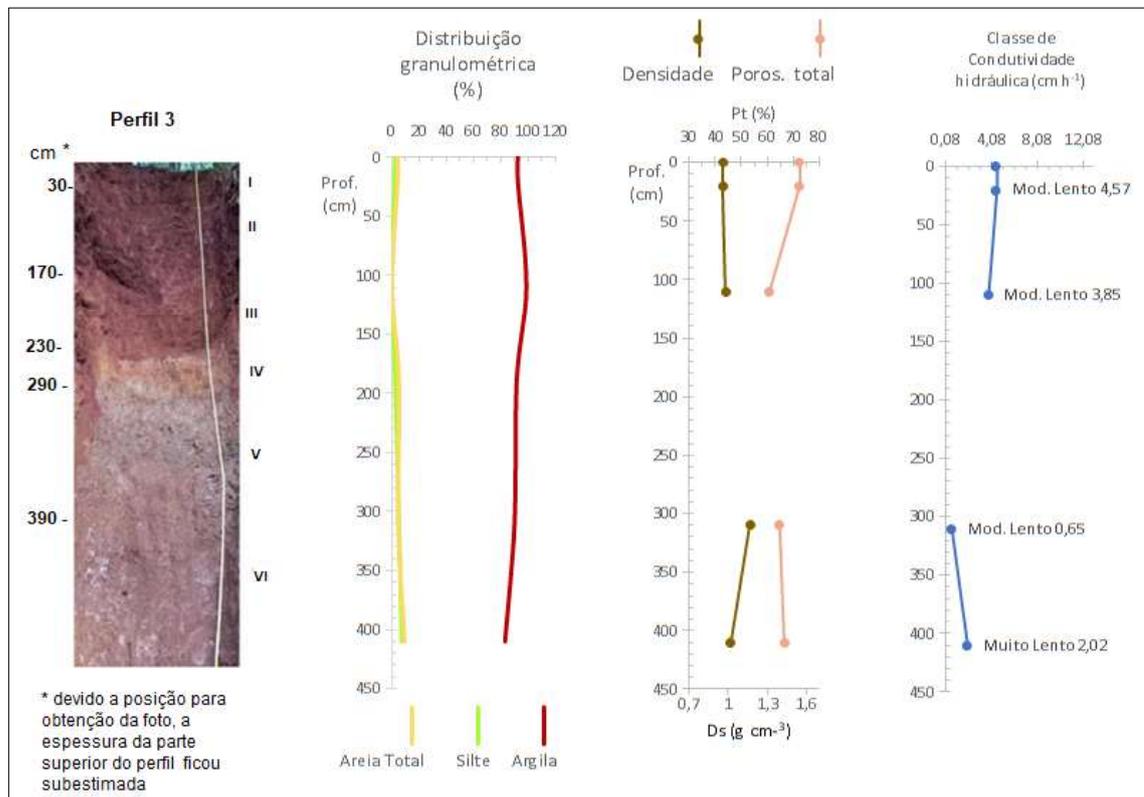
III - Horizonte B2, 1,70-2,30/2,40, cor vermelho 2,5 YR 4/8, textura argilosa, estrutura subangular média, forte, consistência ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa, transição, ondulada e abrupta.

IV- Camada constituída por petroplintita contínua, 240-290, cor marrom amarelado escuro 10 YR 4/6.

V- Horizonte Cg, 290-3,90, mosqueado, cor cinza avermelhado 2,5 YR 5/1 e vermelho claro 2,5 YR 6/8, textura argilosa, estrutura maciça sem desenvolvimento pedogenético, apresenta se em blocos fragmentados por esforço, consistência ligeiramente dura, úmida friável, ligeiramente plástica e pegajosa.

VI- Horizonte C, 3,90-450+, mosqueado, cores vermelhas 2,5 YR 4/8 e bruno amarelado escuro 10 YR 4/6, textura argilosa, estrutura prismática muito pequena, forte, consistência dura, plástica e pegajosa. O horizonte VI corresponde ao nível do lençol freático.

Figura 45 – Perfil 3, granulometria, densidade, porosidade condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

O perfil 3, apresentou no volume I, teor de argila 92,91%, silte 2,93%, areia 4,16%. A densidade aparente do solo é de  $0,96 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade é de 72,44% e a condutividade hidráulica saturada de  $4,57 \text{ cm h}^{-1}$ , que corresponde a classe moderadamente lenta. O volume II, apresentou teor de argila de 92,91%, silte 2,93%, areia 4,16%. A densidade aparente do solo é de  $0,96 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade é de 72,44% e a condutividade hidráulica saturada de  $4,57 \text{ cm h}^{-1}$ , que corresponde a classe moderadamente lenta. O volume III apresentou teor de argila de 92,05%, silte 2,89, areia 5,06. Não foi possível coletar amostra indeformada neste volume para obter densidade, porosidade e condutividade hidráulica. No volume V o teor de argila encontrado foi de 90,43%, silte 5,4%, areia 4,43%. A densidade aparente do solo é de  $1,17 \text{ g m}^{-3}$ , porosidade de 64,77% e a condutividade hidráulica saturada de  $0,65 \text{ cm h}^{-1}$ . O volume VI apresenta teor de argila de 83,22%, areia 7,32% e silte 9,46%. A densidade aparente do solo é de  $1,02 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade de 66,61% e a condutividade hidráulica saturada de  $2,02 \text{ cm h}^{-1}$ .

Os minerais identificados em todo o perfil foram: caulinita, hematita, gibbsita, anatásio/ilmenita, quartzo e argilominerais 2:1. No volume III além destes a magnetita, e no volume V laumonita.

O índice de plasticidade apresentou os seguintes valores: IP=30 no volume I, IP=23 no volume II, IP=18 no volume no volume III e IP=11 no volume VI.

#### **6.3.4 Perfil de alteração P4 Voçoroca Luiziana**

O perfil 4 está localizado no fundo de vale sob cobertura vegetal, à margem direita da Voçoroca Luiziana (Fig.46). Este perfil apresentou as seguintes características morfológicas:

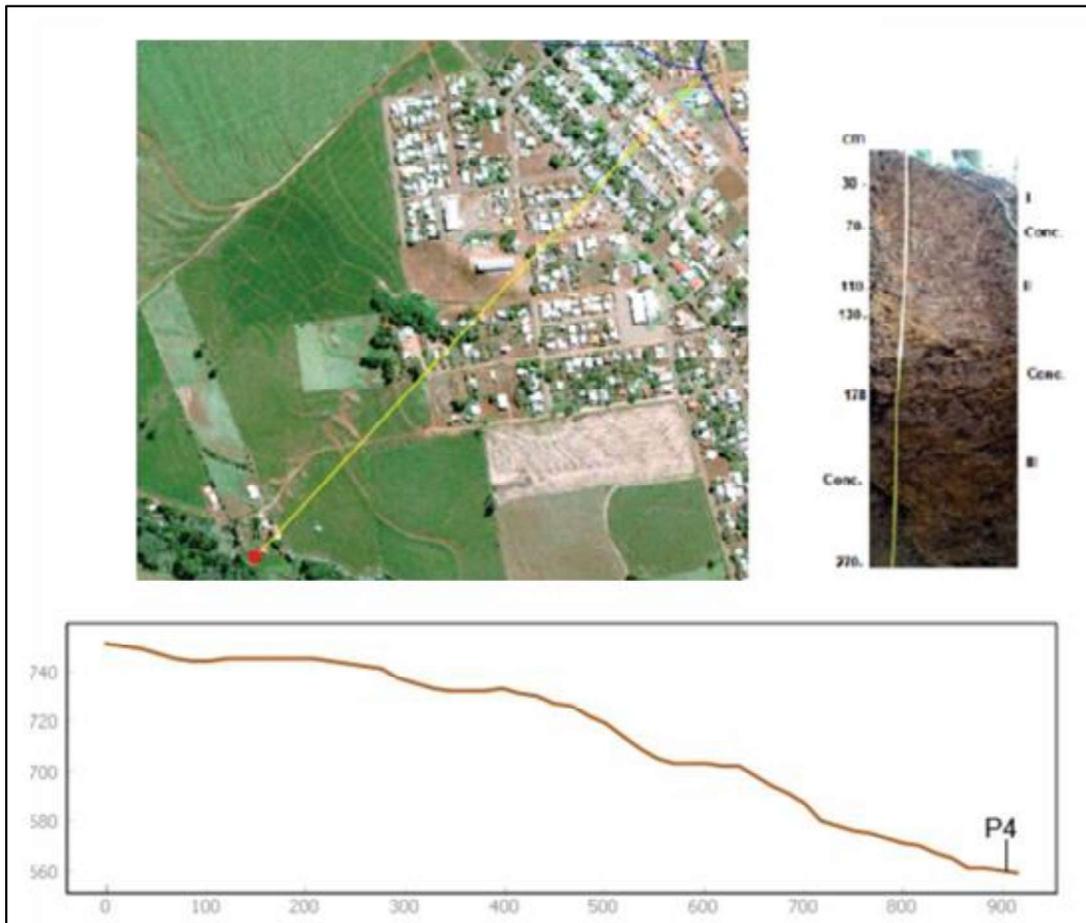
I – Horizonte A 0-30, cor vermelho 2,5 YR 5/8, textura argilosa, estrutura subangular de tamanho médio e muito pequena, e prismática pequena e muito pequena, forte, consistência dura, muito friável quando úmida, ligeiramente plástica e pegajosa, transição gradual e ondulada (30-70). Presença de concreções a 48cm de profundidade, em pouca quantidade, de tamanho grande, dura, em fragmentos irregulares de cor preta.

II - Horizonte Bc, 70-110, cor mosqueado vermelho 2,5 YR 4/8, e bruno forte 7,5 YR 5/8 (cor seca amarelo avermelhado 7,5 YR 6/8), textura argilosa, estrutura subangular média muito pequena, forte, consistência seca, ligeiramente dura muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa, transição, ondulada e abrupta.

III - Camada constituída por petroplintita contínua, 110/150-130/167, cor amarelo brunado 10 YR 6/8.

IV-Horizonte petroplântico 130-270+, mosqueado cor vermelho 2,5 YR 5/8 e amarelo brunado 10 YR 6/8, textura argilosa, estrutura aspecto maciço poligonal, consistência plástica e pegajosa. Concreções ferruginosas em maior concentração no topo do horizonte entre 130/167-178cm, em pouca quantidade, de tamanho grande, dura, forma laminar continua e quebrada de cor preta.

Figura 46 - Vertente Voçoroca Luiziana P4

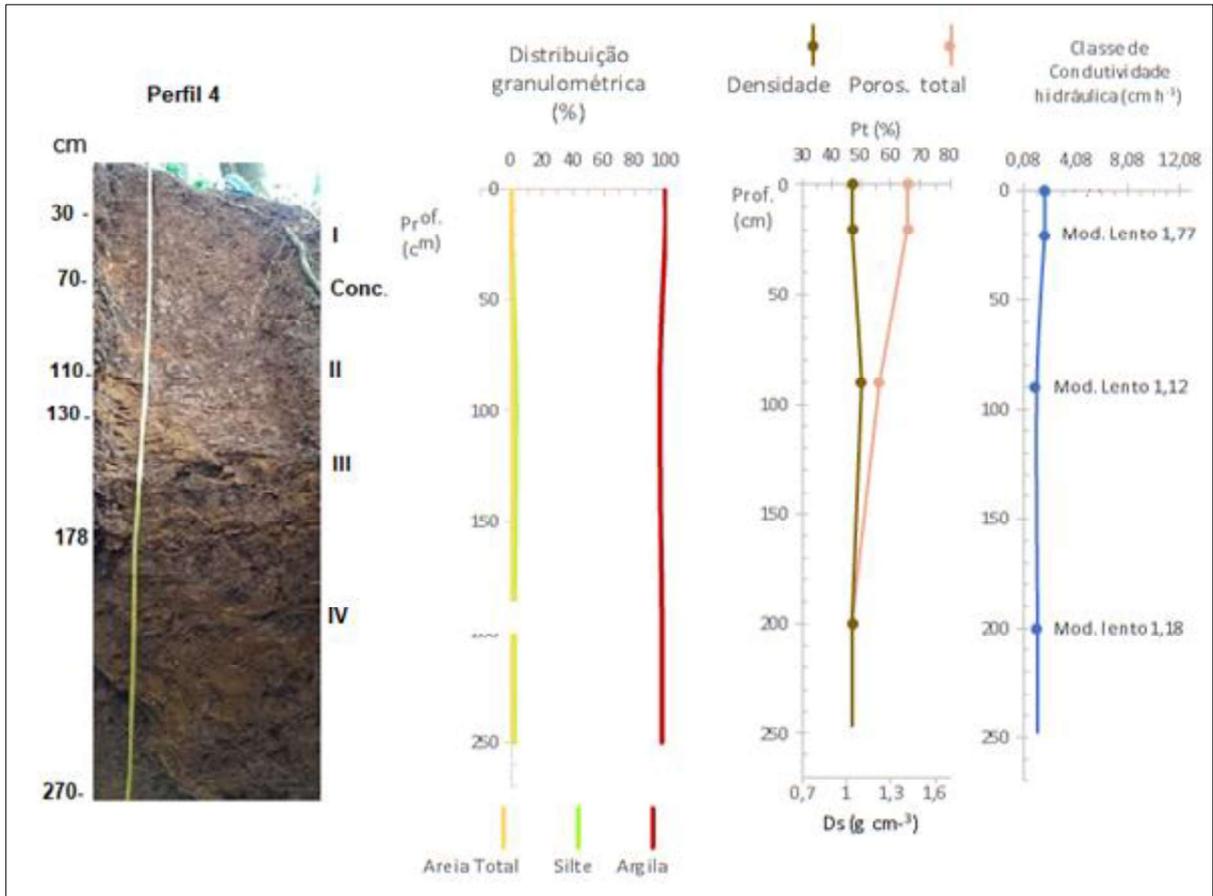


Elaboração: A autora

O perfil 4, apresentou no volume I, teor de argila de 99,52%, silte 0,48%, e não foi constatado a presença de areia. A densidade aparente do solo é de  $1,04 \text{ g m}^{-3}$ , porosidade 65,68, e a condutividade hidráulica saturada de  $1,77 \text{ cm h}^{-1}$ , que corresponde a classe moderadamente lenta. O volume II apresentou 96,19% de argila, 2,91 de silte e 0,9% de areia. A densidade aparente do solo é de  $1,10 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade 56,09, e a condutividade hidráulica saturada de  $1,12 \text{ cm h}^{-1}$ , moderadamente lenta. O volume IV, apresentou 97,53 % de argila, 2,02% de silte e 0,45% de areia. A densidade aparente é de  $1,04 \text{ m}^{-3}$ , a porosidade 47,19% e a condutividade hidráulica de  $1,18 \text{ cm h}^{-1}$ .

Os valores de condutividade hidráulica foram moderadamente lento em todas as amostras, o que deve estar relacionado ao alto teor de argila em todas as amostras.

Figura 47- Perfil 4, granulometria, densidade, porosidade, e condutividade hidráulica



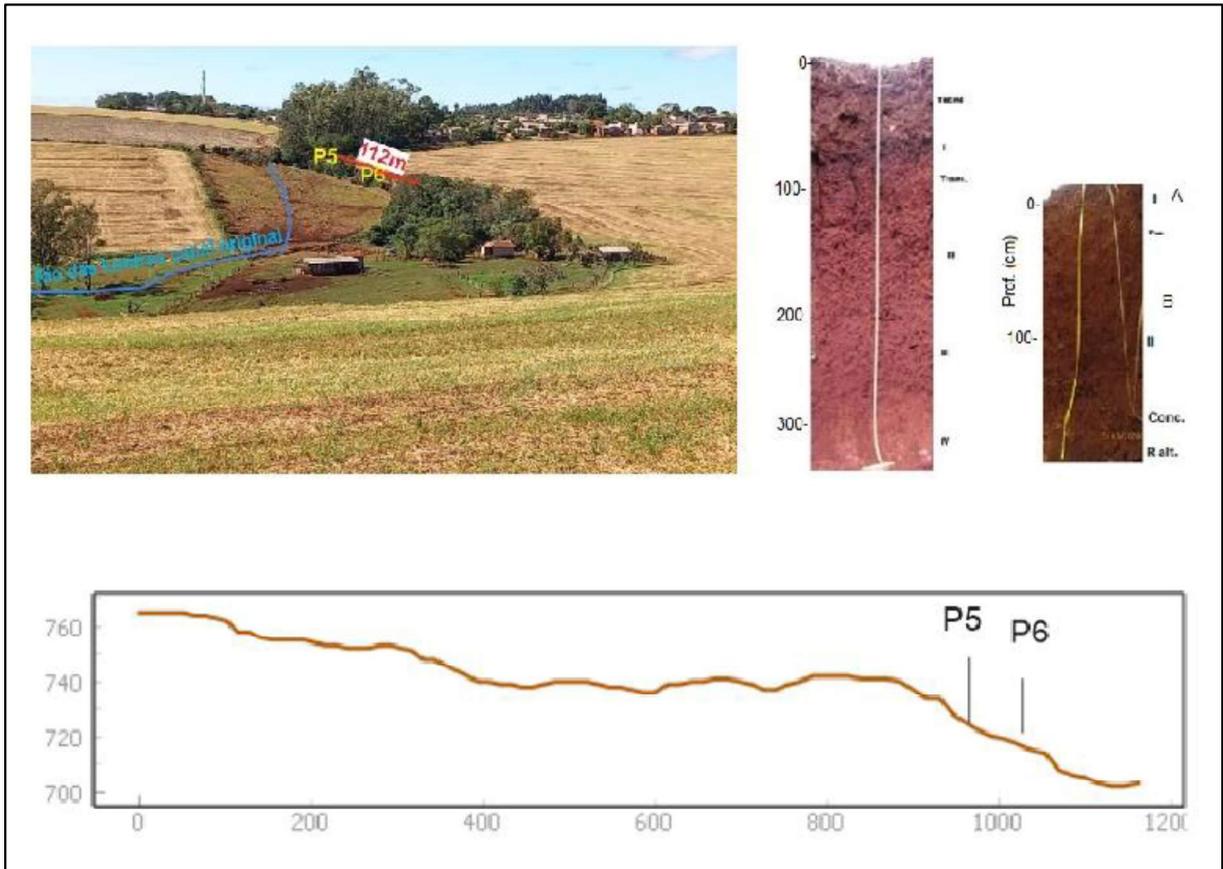
Elaboração: A autora

Todas as amostras analisadas apresentaram-se altamente plásticas, no volume I apresentou IP=21, no volume II apresentou IP=22, e no volume IV, o IP=29. No perfil 4, foram encontrados em todo o perfil: caulinita, goethita, hematita, gibbsita, quartzo e argilominerais 2:1, e no volume II III, ferrihidrita, anatásio/ilmenita.

### 6.3.5 Perfil de alteração P5 Voçoroca das Lontras

Os perfis 5 e 6, correspondem a Voçoroca das Lontras, ambos estão localizados na baixa vertente (Fig.48), no limite entre cobertura usos por pastagem e culturas temporárias, sendo que a coleta foi realizada na margem sob pastagem.

Figura 48 - Vertente Voçoroca das Lontras P5 e P6



Elaboração: A autora

No perfil 5 uma camada superficial com espessura de 0- 40/50,cm, é composta por material de origem antrópica (composto por pedregulhos, resíduos de plástico) e provavelmente está relacionado a obras de terraplanagem antigas, pois este ponto está próximo a estrada. Os demais horizontes do perfil 5 apresenta as seguintes características morfológicas:

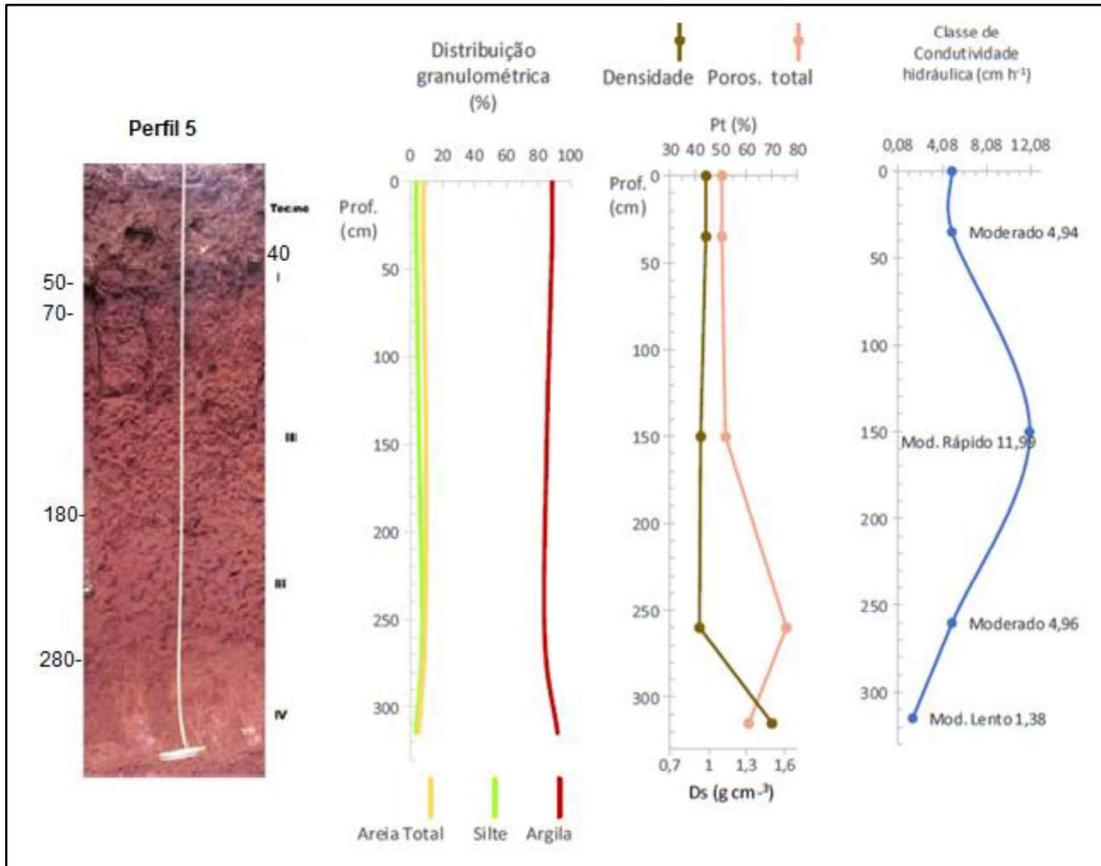
I – Horizonte A soterrado, 40/50 a 65-70cm, cor bruno avermelhado escuro 2,5YR 2.5/3, textura argilosa, estrutura subangular e granular, médio, forte, consistência ligeiramente dura, quando úmida friável, plástica e pegajosa, transição ondulada e clara

II - B nítico 1, de 65/70 a 180 cm, cor vermelho 2,5 YR 4/8, textura argilosa, estrutura subangular e granular, pequena, forte, apresenta com fendas de contração, a consistência macia quando seca, muito friável quando úmida, plástica e pegajosa, cerosidade comum, transição plana e gradual

III - B nítico 2, de 180-280, cor vermelho 2,5 YR 4/6, textura argilosa, estrutura subangular, pequena, forte, consistência, friável quando úmida, plástica e pegajosa, cerosidade pouca, transição plana e clara.

IV- Horizonte C, 280-330+, cor vermelho 2.5 YR 4/8 e rocha alterada vermelho claro acinzentado 10R 7/4, textura argilosa, estrutura subangular, de tamanho pequeno e muito pequeno, forte, consistência, úmida muito friável, pegajosa e plástica.

Figura 49- Perfil 5, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

No Perfil 5, no volume I, foram encontrados os seguintes valores na composição textural do solo: teor de argila 88,66%, silte 3,5% e areia 7,84%. A densidade é de 0,98 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 50,28% e condutividade hidráulica 4,94 cm h<sup>-1</sup>. O volume II apresentou teor de argila 85,32%, silte 5,22% e areia 9,46%. A densidade é de 0,94 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 51,73% e condutividade hidráulica 11,99 cm h<sup>-1</sup>. O volume III apresentou teor de argila 84,05%, silte 7,11% e areia 8,84%. A densidade é de 0,93 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 75,62% e condutividade hidráulica 3,25 cm h<sup>-1</sup>. O volume IV apresentou 92,14% de argila, 3,1% de silte e 4,76% de areia. A densidade é de 1,5 g m<sup>-3</sup>, porosidade total 60,81% e condutividade hidráulica 1,38 cm h<sup>-1</sup>.

Houve uma redução no teor de argila do volume I para volumes II e III, e um aumento no volume IV. Da mesma forma a densidade diminuiu nos volumes II e III, e aumentou no volume IV. Enquanto a porosidade foi menor no volume I e II, aumentando no volume III e IV.

A condutividade hidráulica foi maior no volume II, onde se observou estrutura em blocos subangulares de tamanho médio, enquanto o volume IV apresentou condutividade hidráulica moderadamente lento, e maior teor de argila.

Os valores de índice de Plasticidade entre  $IP=18$  e  $24$ . Os índices de plasticidade e de limite de liquidez foram maiores no volume IV, no qual verificou-se também a maior porcentagem de argila. No perfil 5, os seguintes minerais foram encontrados em todo o perfil: caulinita, hematita, gibbsita, maghemita, quartzo, e argilominerais 2:1. No volume II, III e IV, aparece ilmenita, anatásio, maghemita/manganita.

### **6.3.6 Perfil de alteração P6 Voçoroca das Lontras**

O Perfil 6, apresentou as seguintes características morfológicas:

I - Horizonte A, 0-28 cm, cor bruno avermelhado escuro 2,5YR 2.5/4, textura argilosa, estrutura subangular e granular, de tamanho médio a grande, com grau de desenvolvimento forte, consistência dura, firme quando úmida, plástica e pegajosa, transição plana e gradual, furos biogênicos (cupim), horizonte resistente a penetração com faca, e apresenta fendas de contração.

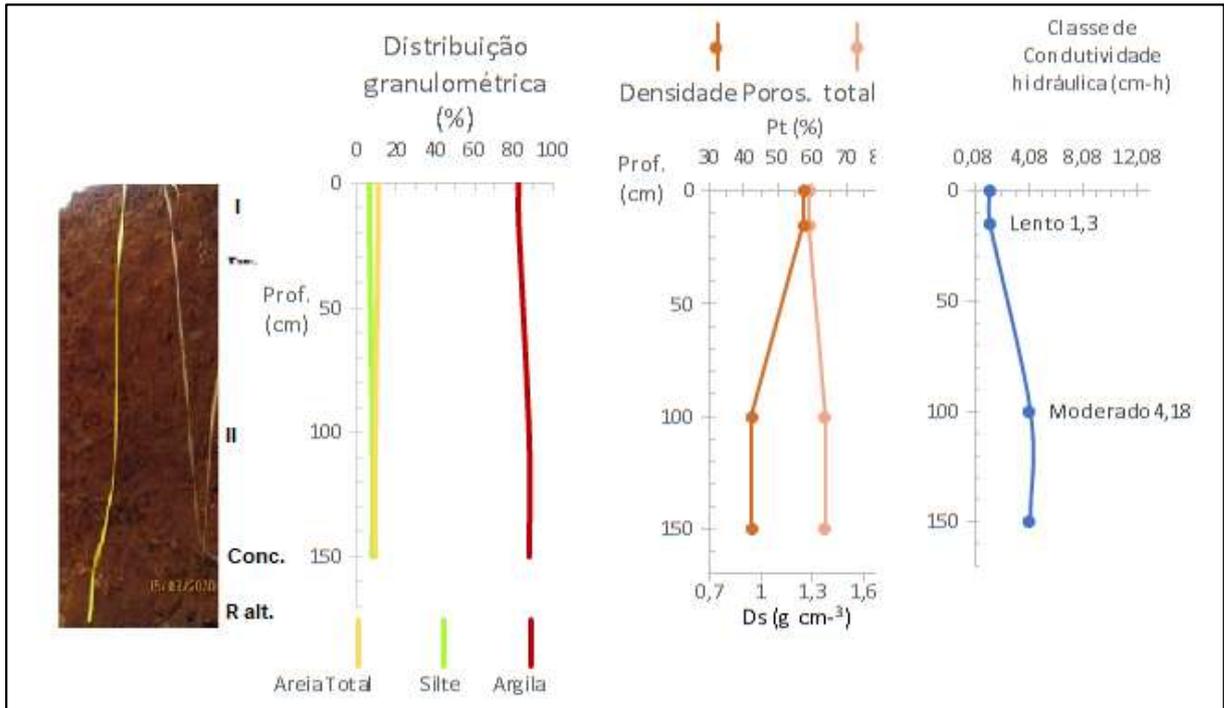
II - Horizonte B 28-150 cor vermelho escuro 2.5 YR 3/6, textura argilosa, estrutura subangranular, média, forte, consistência macia, quando úmida muito friável, plástica e pegajosa, transição ondulada e abrupta.

III- Camada constituída por concreções ferruginosas frequentes, de tamanho grande, dura, forma laminar, contínua e quebrada de cor preta entre 130-150cm, sobre camada de petroplintita contínua 150-170.

No perfil 6, o volume I apresentou valor de argila 82,36%, silte 6,53%, e areia 11,11%. A densidade  $1,25 \text{ g m}^{-3}$ , e porosidade total 59,26% e condutividade hidráulica de  $1,30 \text{ cm h}^{-1}$ . O volume II apresentou teor de argila 87,61%, silte 7,63%, e 9,76%. A densidade neste volume é de  $0,95 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade 63,66%, e a condutividade hidráulica saturada de  $4,18 \text{ cm h}^{-1}$ .

Enquanto no volume I, a condutividade é lenta, mostrando a relação com o maior teor de argila e a densidade do solo, no volume II, a maior permeabilidade deve estar relacionada a estrutura do solo. Por outro lado, a transição abrupta do volume II para o nível de petroplintita que pode impedir a permeabilidade e promover um fluxo lateral.

Figura 50 - Perfil 6, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

No perfil 6, os seguintes minerais foram encontrados em todo o perfil: caulinita, goethita, hematita, gibbsita e quartzo. Argilominerais 2:1 foram encontrados no volume I, e no volume II, ainda foram encontrados maghemita/manganita e anatásio.

A plasticidade no volume I apresenta IP=22, e no volume II um IP=17. Além do alto teor de argila no volume I, o valor do índice de plasticidade neste horizonte deve estar relacionado a presença de argilominerais 2:1, dentre os quais podem estar incluídos argilominerais expansíveis.

### 6.3.7 Perfil de alteração P7 Ravina Sem Passo

Os perfis 7 e 8 (Fig. 51) estão sob cobertura de cultivo temporário. O P7 situado em posição de média vertente a jusante de um ponto de ruptura de declive, onde foi observado basalto vesicular. No perfil 7, no entanto não há exposição da rocha pela erosão. O perfil 8 está localizado na baixa vertente.

O perfil 7 apresenta as seguintes características morfológicas:

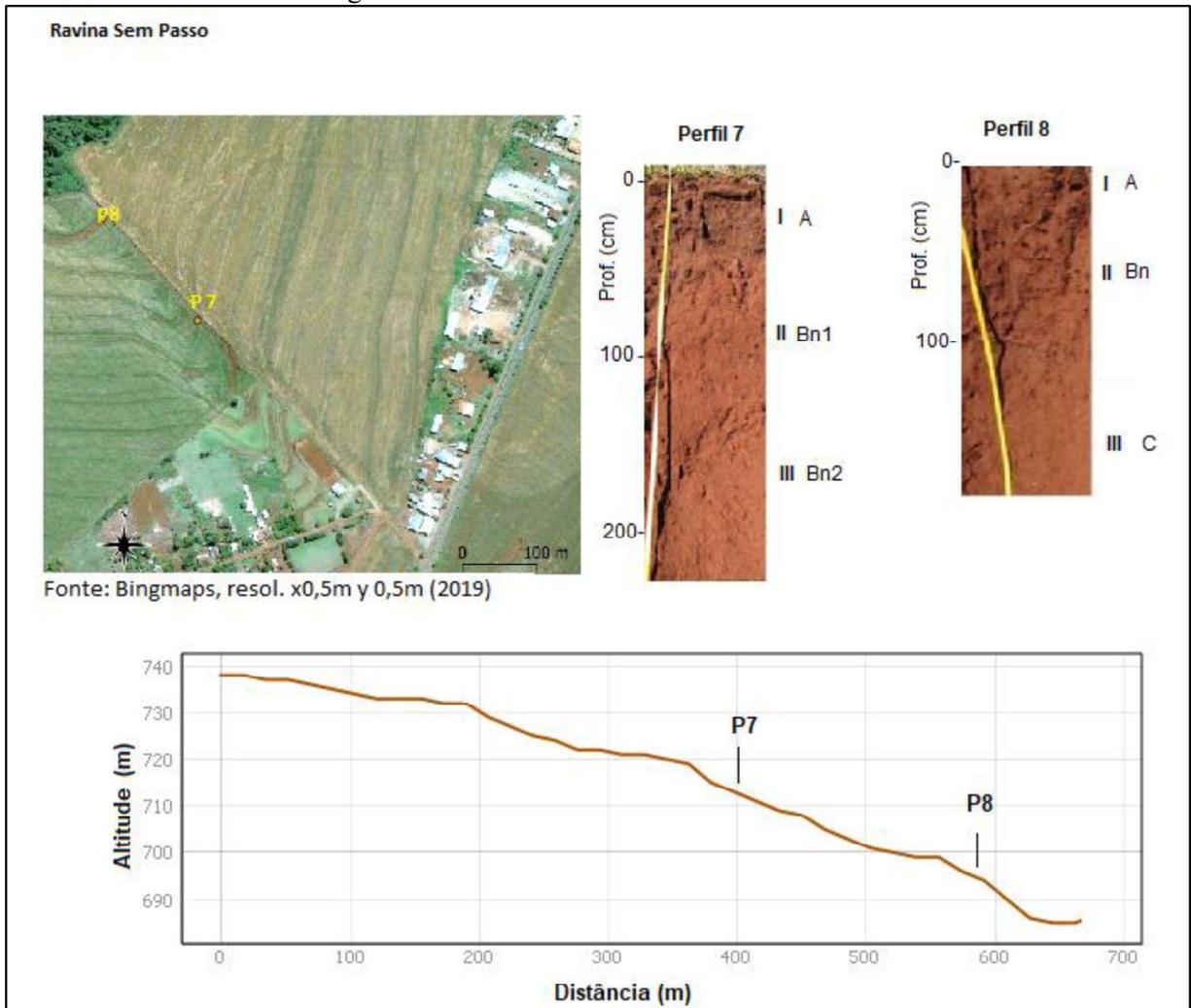
I- Horizonte Ap, 0-40 cm, cor bruno avermelhado escuro 2.5 YR  $\frac{3}{4}$ , textura argilosa, estrutura em blocos subangulares, de tamanho médio, e grau de desenvolvimento forte, consistência

muito dura quando seca, extremamente firme quando úmida, consistência plástica, transição plana e clara.

II - Horizonte B nítico1, profundidade 40-140 cm, cor bruno avermelhado escuro 2.5 YR 2.5/3, textura argilosa, estrutura em blocos subangulares, de tamanho médio a grande, forte, consistência ligeiramente dura, quando úmida é muito friável, plástica e pegajosa, cerosidade pouca.

III - Horizonte B nítico 2, 140-240+ cm, cor vermelho escuro acinzentado 10R 3/4, textura argilosa, estrutura subangular, médio, forte, consistência ligeiramente dura, muito friável quando úmida, plástica e pegajosa.

Figura 51- Vertente Ravina Sem Passo P7 e P8

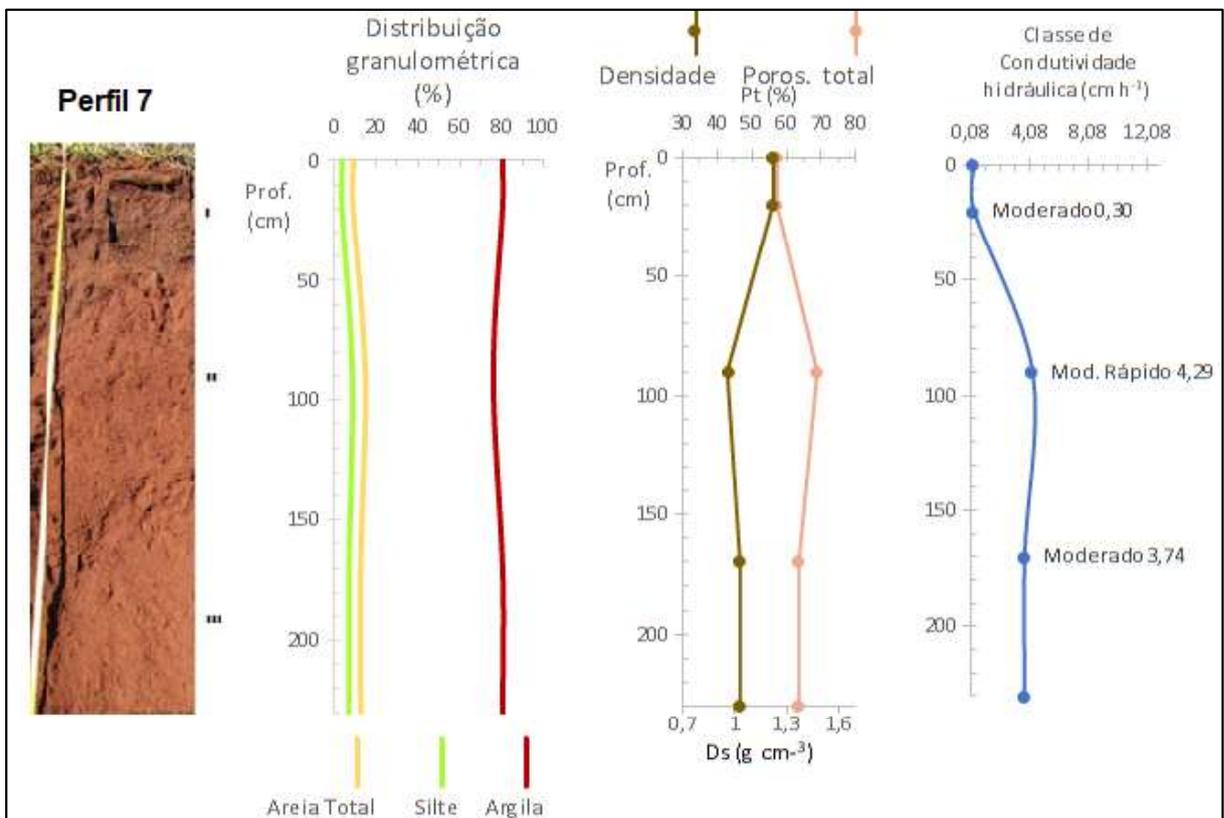


Elaboração: A autora

No perfil 7, o volume I apresentou o maior teor de argila 87,65% do perfil, a maior densidade  $1,22 \text{ g m}^{-3}$ , e a menor porosidade 57%, e condutividade hidráulica de  $0,30 \text{ cm h}^{-1}$ ,

classe lenta. No volume II o teor de argila é de 76,58%, silte 8,89%, e areia 14,53%. A densidade  $0,96 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade total 68,93% e condutividade hidráulica de  $4,29 \text{ cm h}^{-1}$ . O volume III apresenta valor de argila 80,65%, silte 7,08%, e areia 12,27%. A densidade  $1,03 \text{ g m}^{-3}$ , a porosidade total 63,64% e condutividade hidráulica de  $3,74 \text{ cm h}^{-1}$ . Os teores de argila diminuíram nos volumes II e III, houve aumento da porosidade, e apresentaram maior condutividade hidráulica. O volume I deste perfil apresentou um dos valores de maior densidade aparente entre os perfis analisados. Fato que pode estar relacionado a práticas de manejo do solo, que pode causar compactação devido ao uso de maquinários.

Figura 52- Perfil 7, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica



Elaboração: A autora

No perfil 7, os minerais encontrados em todo o perfil foram: caulinita, goethita, hematita, gibbsita, quartzo, e argilominerais 2:1. Além destes foram encontrados no volume I: maghemita, ilmenita, rutilo, anatásio e manganita.

O volume I, apresentou valor de Índice de Plasticidade  $IP = 20$ , altamente plástico. O volume II apresentou  $IP=13$  (mediamente plástico), observa-se que este horizonte apresenta o menor valor de argila 76,58%, evidenciando a relação entre os parâmetros quantidade da fração

argila e Índice de Plasticidade. O volume III apresentou  $IP=14$ , correspondendo a solos mediantemente plásticos.

### 6.3.8 Perfil de alteração P8 Ravina Sem Passo

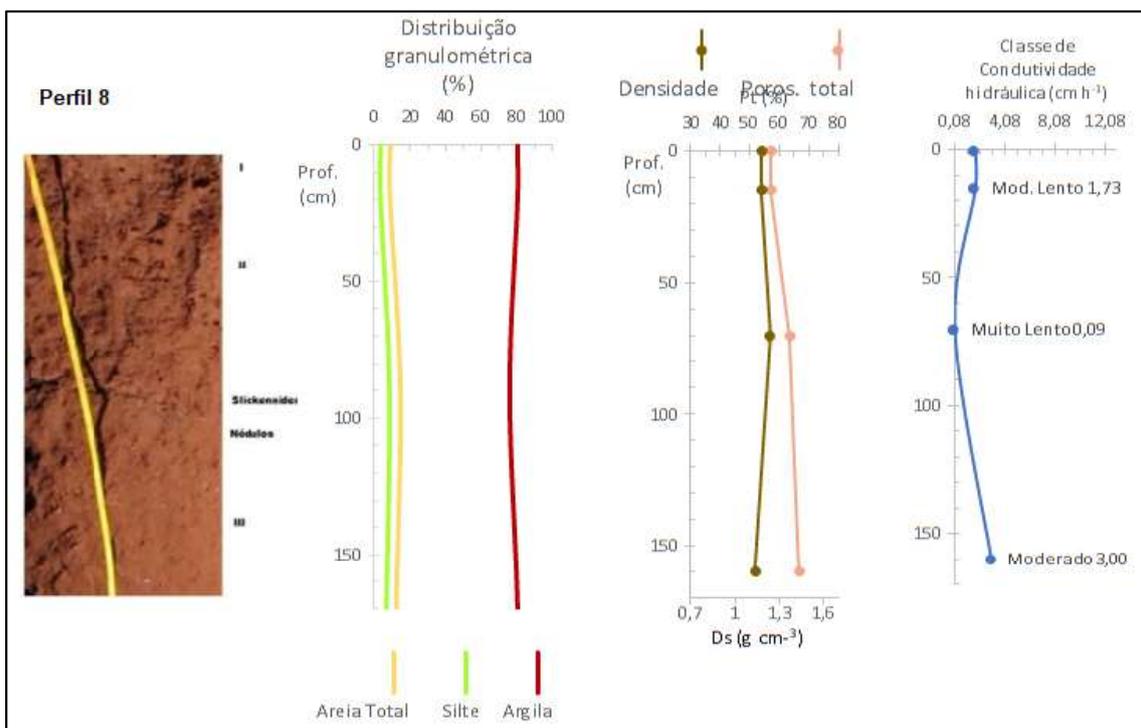
O perfil 8 apresenta as seguintes características morfológicas:

I - Horizonte A, 0-34 cm, cor 10R 3/4, textura muito argilosa, estrutura em blocos subangulares, de tamanho médio e grande, grau de desenvolvimento forte, consistência dura quando seca, firme quando úmida, consistência plástica e pegajosa, transição plana e clara.

II – Horizonte B nítico, 34-105cm, cor 10 R 4/6, textura muito argilosa, apresenta fendilhamentos, estrutura prismática colunar muito grande (mega estrutura), prismática colunar em blocos grandes, muito forte, que se desfaz em blocos subangulares, superfície de fricção *slickensides* 88-93cm, consistência úmida friável, plástica e pegajosa, cerosidade abundante, transição abrupta.

III – Horizonte C, 105-170+ cm, de 105 a 150 é constituído por uma mistura de material pedogenizado, friável, cor vermelho 10 R4/6, consistência úmida friável, plástico e pegajoso, com fragmentos de rocha alterada e de concreções (em torno de 50% da amostra), de 150 a 170+ cm, predomina material pedogenizado.

Figura 53 - Perfil 8, granulometria, densidade, porosidade e condutividade hidráulica



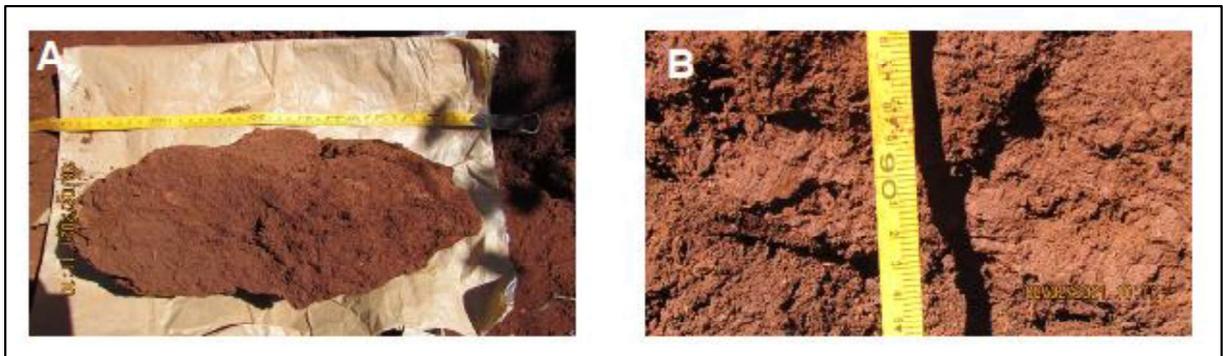
Elaboração: A autora

No perfil 8 o volume I, apresentou 78,37% de argila, 8,54% de silte e 13,09 de areia. A densidade é de  $1,18 \text{ g m}^{-3}$ , porosidade 57,17%, e a condutividade hidráulica na classe moderadamente lenta  $1,73 \text{ cm h}^{-1}$ . O volume II embora tenha apresentado 63,55% de porosidade, o valor de condutividade hidráulica foi de apenas  $0,09 \text{ cm h}^{-1}$  (classe muito lenta).

Observou-se neste perfil, uma diferença nítida quanto a estrutura do solo. O volume II apresenta macroestrutura (Fig. 54 A), com grau de desenvolvimento forte, que ao ser desmanchada se desfaz em estrutura prismática colunar, em blocos de tamanho grande em torno de 6 cm. Segundo EMBRAPA (2015) este tipo de estrutura ocorre em praticamente todos os solos com argilas expansivas, o que deve ter exercido influência na condutividade hidráulica.

Outra característica observada no perfil foi a superfície de fricção “*slickensides*” (Fig.54 B), a qual é produzida pelo deslizamento e atrito da massa do solo, por processos alternados de umedecimento e secagem, devido à forte expansão e contração do material, esse fenômeno é relacionado a argilas expansivas, a alta concentração de argila ou argilominerais interestratificados (EMBRAPA, 2015).

Figura 54 - A) Estrutura prismática grande, B) Superfície de fricção



Fonte: A autora (2021)

Um fator que pode ter exercido influência é a menor quantidade de unidades estruturais, que promovem o movimento da água no solo. Por outro lado, as fendas de contração permitem concentração da água no início das chuvas causando uma saturação temporária, e pode criar caminhos preferenciais, em profundidade.

Já o volume III é caracterizado por material heterogêneo, com espessura de 57cm, constituído por solo de cor semelhante ao horizonte superior, rocha alterada e concreções, diminuindo em profundidade, passando a material fino. Não apresentando estrutura definida em condições de campo (umidade), mas o material solto, friável. O volume III apresentou a menor densidade  $1,14 \text{ g m}^{-3}$ , a maior porosidade 66,68% do perfil, e condutividade hidráulica

3,00 cm h<sup>-1</sup>, classe moderada. Essa maior permeabilidade no volume III, que está próximo a rocha alterada, pode ocasionar fluxo lateral, contribuindo para erosão interna neste horizonte.

O Índice de Plasticidade no perfil 8, foi IP= 20% no volume I e IP=24% no volume II, correspondendo a solos altamente plásticos. Os minerais encontrados no perfil 8 foram: caulinita, goethita, hematita, gibbsita, quartzo, e argilominerais 2:1. Além destes foram encontrados no volume I e II anatásio, e no horizonte III, maghemita.

De um modo geral pode-se destacar as seguintes características dos perfis de alteração: as características granulométricas dos materiais que constituem os perfis analisados, demonstram a predominância de frações argilosas em teores superiores a 70%. O perfil 7, foi o único situado em posição de média vertente, todos os outros perfis estudados estão localizados na posição de baixa vertente, ou no fundo de vale como os pontos amostrados na Voçoroca Luiziana, os quais apresentaram maior porcentagem de argila. Essas características vão se refletir em outras propriedades do solo, tais como: o desenvolvimento de estrutura, permeabilidade, e comportamento mecânico.

A condutividade hidráulica apresentou-se predominantemente na classe lenta. Para o índice de plasticidade, a maioria das amostras apresentaram valores de IP > 15 correspondendo a solos altamente plástico, apenas três amostras apresentaram valores correspondentes a solos mediantemente plástico (7<IP<15). Os valores mais altos de plasticidade podem estar relacionados a porcentagem da fração argila e a presença de argilominerais 2:1.

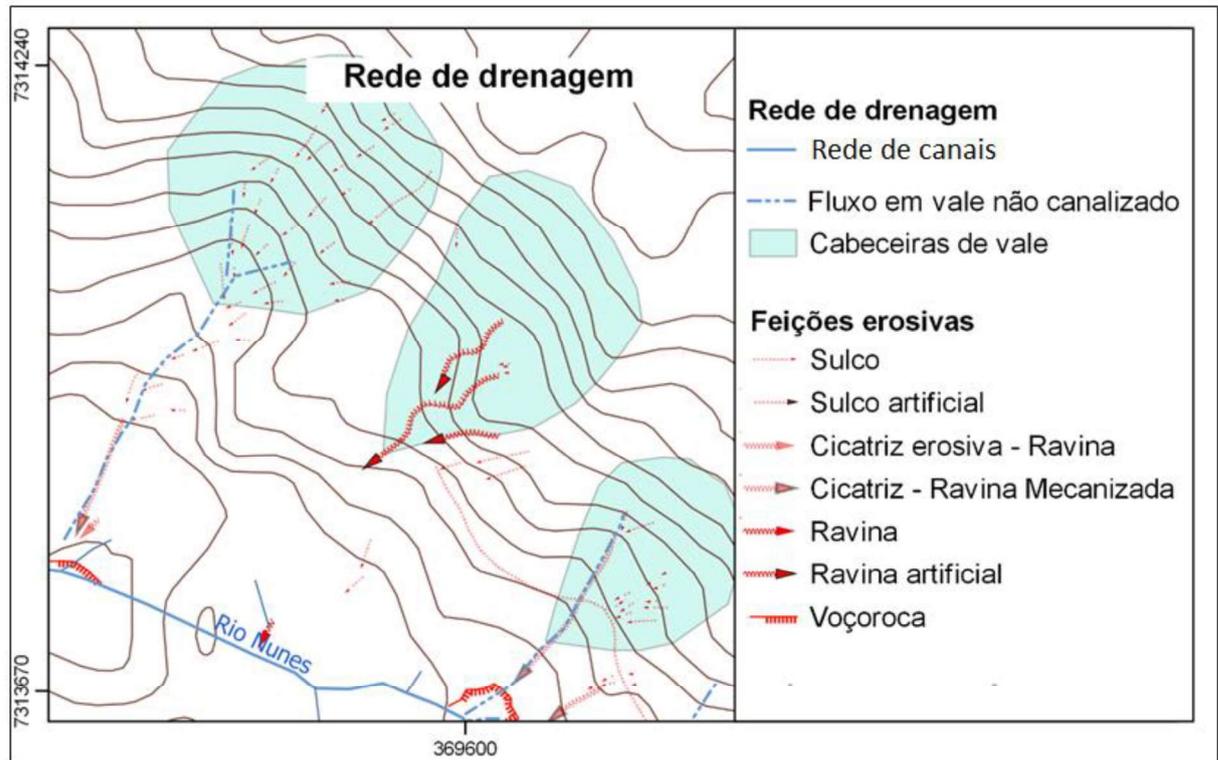
#### 6.4 SÍNTESE DA ÁREA DE ESTUDO

A partir das evidências verificadas em campo e das análises realizadas, faz-se aqui algumas considerações sobre a área de estudo. Os resultados obtidos revelam uma área complexa, tanto em relação às características naturais, quanto pelo uso e ocupação do solo na área estudada. Uma série de fatores contribuíram para o desenvolvimento e aceleração dos processos erosivos.

Em relação ao sistema natural, a rede de drenagem é constituída por uma rede de vales não canalizados e com cabeceiras côncavas na porção superior do rio Nunes. Essas formas favorecem tanto a concentração de fluxos hídricos de escoamento superficial, como a ocorrência de fluxos laterais em subsuperfície. Na cabeceira do rio Nunes por exemplo, os vales não canalizados estão muito próximos entre si, ocorrendo uma convergência de fluxos hídricos que somados ao lançamento de águas pluviais imprime energia para o trabalho erosivo.

Os mapas de processos erosivos mostraram a conexão entre vales não canalizados, o escoamento concentrado e a localização das frentes de expansão da voçoroca (Fig. 55).

Figura 55 - Rede de drenagem e feições erosivas – recorte bacia do rio Nunes



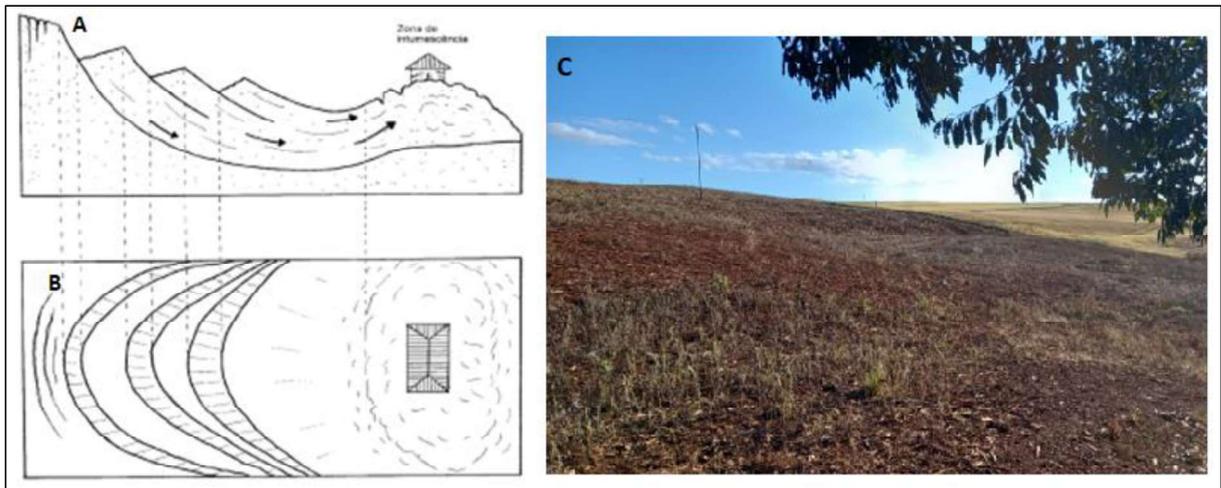
Elaboração: A autora (2022)

Todos os perfis de alteração apresentaram textura muito argilosa, propriedade que confere baixa permeabilidade ao solo. A presença de minerais 2:1 ocorrem na quase totalidade das amostras, os que podem apresentar características expansíveis. Fendas de expansão e contração foram identificadas nos horizontes do solo. Esse fator pode contribuir para o processo erosivo de duas formas: facilitando o fluxo lateral da água entre as fendas quando se inicia as chuvas, possibilitando a remoção do material; promovendo a saturação rápida do solo e a formação de um lençol temporário.

Os altos índices de plasticidade do solo, faz com que em condições de saturação, somado ao aumento das tensões de cisalhamento condicionado por outros fatores, os solos estejam suscetíveis a movimentos de massa. O aprofundamento da incisão no rio Nunes cria um talude íngreme e a perda de apoio lateral faz aumentar a força cisalhante e a ruptura do solo. Na Voçoroca Luiziana, esse processo se propaga na vertente, sendo perceptível principalmente na vertente esquerda do rio Nunes. Fendas de tração vão se propagando, e em “blocos” o solo se

abate, quando saturado podem ocorrer escorregamentos, a semelhança do modelo (Fig. 56 A e B). A figura C, mostra uma ruptura local da baixa vertente afetada por escorregamento.

Figura 56 – Modelo de escorregamento rotacional: A) Em perfil B) Em planta, B) posição baixa vertente afetada escorregamento.



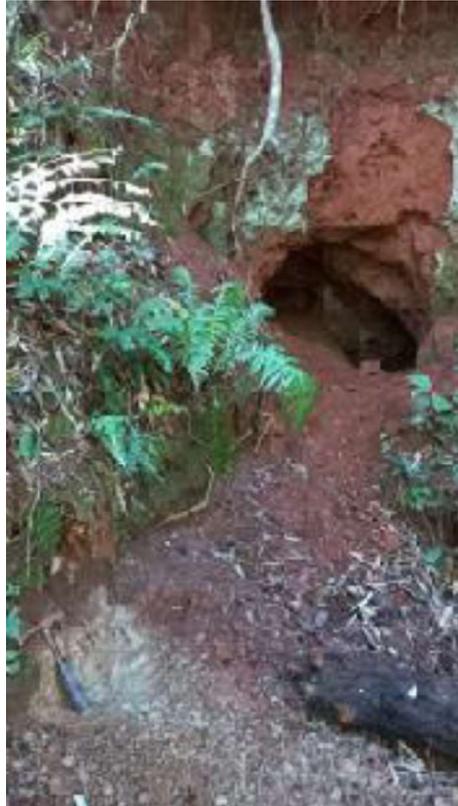
Fonte: Araújo (2017)

Por outro lado, a presença de horizontes endurecidos por óxidos, parece oferecer certa resistência aos perfis espessos, que se mantém em blocos “truncadas” pela erosão linear. A presença de materiais coluviais é outro fator que exerce influência na drenagem do perfil, devido a heterogeneidade do material. Essas diferenças são como favoráveis ao escoamento lateral e o desenvolvimento de túneis erosivos, pelo carreamento de material, fato que foi verificado em campo (Fig.57).

Concreções ferruginosa de forma laminar, continua ou quebrada, foram observadas em diversos pontos da Voçoroca Luiziana. A presença destas concreções, associado a materiais heterogêneos no perfil indicando origem coluvial, também evidenciaram relações com os processos erosivos. Um tubo erosivo, localizado num ponto onde foi identificado erosão ativa em 1980. Acrescenta-se que este túnel está localizado na direção de um eixo de drenagem de um dos vales não canalizado.

Na base do tubo, está presente uma concreção ferruginosa continua de forma laminar, que se desfaz com golpe de martelo. Este nível de concreção, ocorre a 3m de profundidade, correspondendo a base do tubo, onde verifica-se o nível freático. Abaixo deste nível, apresenta material de alteração de cor acinzentada, evidenciando a permanência do nível do lençol.

Figura 57- Túnel erosivo

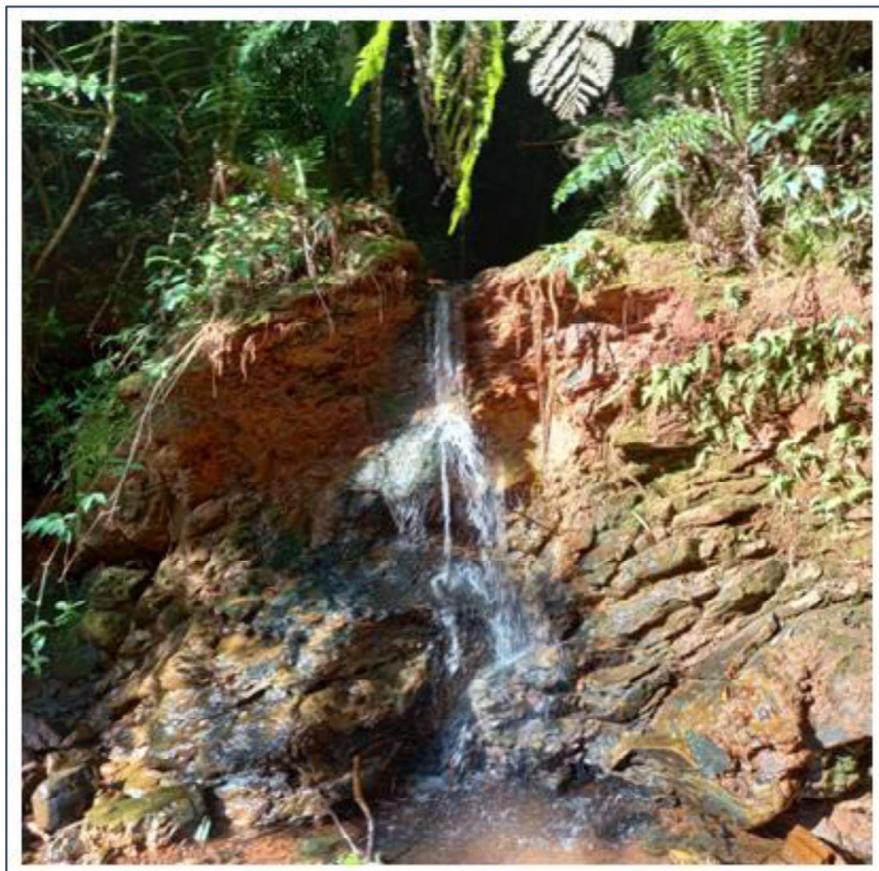


Fonte: A autora

De acordo com Thomas (1994) a crosta endurecida muitas vezes é impermeável, dessa forma os fluxos subterrâneos tornam-se concentrados e frequentemente erodem túneis. Esse perfil não foi amostrado, mas as características observadas, indicam ser material de origem coluvial, o que facilita o fluxo lateral da água devido a heterogeneidade. Não foi observado perda de material na parte externa, entre 2019-2022. Mas na parte interna foi observado material mobilizado (09/2022) de “ramificações” no interior do túnel.

No caso da Voçoroca Luiziana, as frentes de expansão, atingem o substrato rochoso, que revelou exercer um papel importante no condicionamento da drenagem, ao menos no curso superior do rio Nunes. O nível de rocha alterada, composto por brecha vulcanoclástica, oferece baixa permeabilidade, como foi verificado no perfil 3. Nas frentes de expansão da voçoroca, a conexão dos fluxos hídricos concentrados em interação com o fluxo de água subterrâneo contínuo dá origem de fato uma cabeceira de canal, e expõe o nível da brecha (Fig. 58).

Figura 58 - Canal originado pela expansão da voçoroca



Fonte: A autora 2022

Quanto ao papel da vegetação, as raízes das árvores promovem uma resistência mecânica. Diversos “blocos de solo” mobilizados por escorregamentos, permanecem na vertente devido as raízes das arvores que impede por determinado tempo que ocorra a queda de solo. Em alguns caso as raízes das árvores parecem atuar em conjunto com os horizontes endurecidos, mantendo estes “blocos de solo”, mesmo em condições de falta de apoio lateral, em paredes muito abruptas.

O uso da terra para cultivo, com divisas, curvas interrompidas, falta de curvas em nível, e o lançamento de águas da drenagem urbana de forma concentrada aumenta a quantidade da água e conseqüentemente de energia disponível para a ação erosiva, acelerando o processo. Na cabeceira da Voçoroca Luiziana, está localizado o maior tubo de galeria pluvial, que lança água de uma altura de aproximadamente 13 metros. A pressão das águas da galeria pluvial somada às da s águas da rede de drenagem natural confere energia, que vai mobilizando materiais, e abatimentos vão ocorrendo devido ao solapamento causado pelo desgaste resultante da erosão.

Na Ravina Sem Passo e na Voçoroca das Lontras, os processos erosivos se desenvolveram principalmente por ação antrópica. As incisões seguem um traçado retilíneo, e

estão localizadas lateralmente ao eixo do vale não canalizado. Quanto a Voçoroca Luiziana, o início do desenvolvimento ao longo do canal de drenagem anterior ao ano de 1980, quando a influência da área urbana era menor ficou evidente. Constatou-se uma desaceleração nos processos erosivos à jusante do rio Nunes, enquanto na parte superior da bacia e na área periurbana houve uma ampliação e aceleração dos processos.

As características geomorfológicas da bacia do rio Nunes, como: cabeceiras côncavas, vales não canalizados, depósitos coluviais, e as características dos perfis de alteração, permite a interpretação, de que este processo erosivo apresenta algumas características semelhante as descritas na literatura. Dentre eles podemos citar pesquisadores da região sudeste, como Moura *et al.* (1991); Coelho Netto (2003), e Paisani *et al.*, (2016); Paisani *et al.*(2017) e Biffi e Paisani (2021) no Paraná, os quais observaram o desenvolvimento de voçoroca em vales colmatados por erosão e sedimentação pretérita, em processos atuais induzidos pela ação antrópica.

Os fatos apresentados nesta pesquisa mostram a importância de estudos permitam um diagnóstico do meio físico a fim de compreender dinâmica dos processos, e possam auxiliar na tomada de decisões. Como os solos de textura argilosas são considerados de baixa suscetibilidade a erosão natural, muitas vezes a possibilidade de erosão é subestimada. No entanto quando expostos a pressão das mudanças de origem antrópicas, estes materiais estão sujeitos a degradação, como o caso aqui exposto. A falta de planejamento e de ações adequadas por parte do poder público agrava a situação, a citar as obras de galerias pluviais inacabadas.

## 7 CONCLUSÕES

O desenvolvimento da voçoroca na área periurbana do município de Luiziana, está relacionado a uma conjunção de fatores naturais e antrópicos.

Quanto aos fatores naturais, a relação entre o escoamento concentrado em vales não canalizados e a expansão da voçoroca evidencia a importância do fator geomorfológico.

A textura muito argilosa dos solos condiciona a baixa permeabilidade, favorecendo o escoamento superficial. A quantidade da fração argila, bem como a presença de argilominerais 2:1, conferem ao solo índices de plasticidade altos, e somado a outros fatores contribui para a ocorrência dos movimentos de massa. Na condutividade hidráulica do solo predominaram valores moderado e lento, e ocorrendo uma variação da permeabilidade nos perfis, o que pode ocasionar fluxo lateral da água, e erosão em subsuperfície.

As propriedades do substrato geológico, constituído por brecha vulcanoclástica alterada exerceu influência na permeabilidade, e carece de estudos mais detalhados quanto a sua distribuição na área de estudo. Horizontes endurecidos oferece resistência, e junto a vegetação tem ainda sustentado alguns perfis “truncados pela erosão” onde estão presentes pequenos canais.

As mudanças de uso do solo, com a retirada da vegetação e a introdução de atividades agropecuárias, implantação de estradas, e implantação da cidade, causaram alteração na hidrologia das vertentes e contribuíram para a aceleração dos processos erosivos. O sistema de drenagem urbana com galerias inacabadas e lançamento concentrado das águas pluviais, sem dissipadores de energia, contribui significativamente para a expansão do processo erosivo.

A profundidade das feições erosivas com margens abruptas, bem como os movimentos de massa, oferece riscos a população, principalmente pela proximidade das habitações.

A pesquisa permite concluir que na Ravina Sem Passo e na Voçoroca das Lontras, os processos erosivos se desenvolveram principalmente por ação antrópica. Na Voçoroca Luiziana o desenvolvimento do processo erosivo foi favorecido pelas características naturais e acelerado pela intervenção antrópica.

Após o conhecimento inicial resultante desta pesquisa, faz-se algumas sugestões. Em relação a pesquisa: monitorar os processos erosivos e manter registro sistemático a fim prevenir a dinâmica ao longo do tempo e fazer previsões; monitoramento da vertente em que predominam os movimentos de massa; estudos mais detalhados dos depósitos coluviais. Em relação as ações necessárias e que compete ao poder público sugere-se: em relação a segurança, a área deve ser isolada pois oferece riscos a população; o sistema de drenagem urbana deve ser

revisto, buscando uma alternativa ao lançamento direto no rio Nunes, como redistribuição dos pontos de lançamento se possível; práticas conservacionistas de manejo do solo, como implantação adequada manutenção das curvas em nível “terraceamento” devem ser estimulada pelo poder público junto aos agricultores. A estabilização dos processos erosivos depende destas ações.

Obras ou práticas de contenção/recuperação que venham ser aplicadas na área deve considerar: as características naturais da área como as áreas de concentração de fluxos, as propriedades do manto de alteração e a drenagem subterrânea.

## REFERÊNCIAS

- AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L. Fraturas desenvolvimento de unidades geomorfológicas côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. *Rev. Bras. Geociências*, v. 22 n.2, 1992. p. 222-227.
- BACCARO C. A. B; SOARES, A. M. The gully formation processes of the basins and their implications on the slopes stability, a relief evolution model on the brazilian savanna domain. *Sociedade & Natureza*, v. 1, n. 1, p. 255-259 2005.
- BACCARO, C. A. D; SILVA, E. P. Os processos de voçorocamentos na bacia do ribeirão Douradinho. *In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 7.,1997, Fórum Latino-Americano de Geografia Física Aplicada, 1., Curitiba. Anais...* Curitiba: Tec Art Editora Ltda., 1997. p. 481.
- BACELLAR, L. A. P.; COELHO NETO, A. L.; LACERDA, W. A. Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, Inglaterra. v. 30, p. 1369-1385, 2005. Doi: 10.1002/esp.1193.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6ª ed. São Paulo: Ícone, 2008.
- BERNARDES, L.M. C. O problema das “frentes pioneiras” no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geografia**, ano XV, v.15, n. 3, p.335-384. 1953. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg\\_1953\\_v15\\_n3.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/115/rbg_1953_v15_n3.pdf)>. Acesso em abril de 2020.
- BERHANE, G.; WALRAEVEENS, K. Geological and geotechnical constraints for urban planning and natural environment protection: a case study from Mekelle City, Northern Ethiopia. **Environ Earth Sci** 69, 783–798, 2013. DOI: 10.1007/s12665-012-1963-x
- BIGARELLA, J.J. e MAZUCHOWSKI, J. **Visão Integrada da Problemática da Erosão**. Curitiba, Associação de defesa e educação Ambiental e Associação Brasileira de geologia de Engenharia, 1985. 320 p.
- BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. Considerações a respeito da evolução das vertentes. **Boletim Paranaense de Geografia**, 16 e 17, p. 85-116, 1965.
- BIGARELLA, J. J., ROSEMARI, D. B.; EVERTON, P. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. v.2. Florianópolis: Ed UFSC, 1996.
- BIFFI, V. H. R.; PAISANI, J. C. Reconstrução morfoestratigráfica e evolução de encosta em unidade de relevo de baixa ordem no Quaternário Superior: o caso da Superfície de Cimeira de Pinhão/Guarapuava – Sul do Brasil. **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 22, nº 3, p.657-691, 2021. DOI:10.20502/rbg.v22i3.2000.
- BOULET, R. Uma evolução recente da Pedologia e suas implicações no conhecimento da gênese do relevo. *In: Anais...III Congresso ABEQUA*. Belo Horizonte, 1992. (Mission ORSTM-Geociência-USP).
- CALEGARI, M. R.; MARTINS, V. M. Relação solo-relevo e erosão no trecho superior da bacia do córrego Guavirá, Mal. Cândido Rondon-PR. *In: Simpósio Nacional de Geomorfologia 5, I*

Encontro Sul-Americano de Geomorfologia UFSM – RS, Santa Maria, 2004. *Anais...*Santa Maria, 2004.

CAPECHE, C. L. Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista. **Embrapa**, Comunicado Técnico, n. 51, 2008.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª ed. v. 1. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234p.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <https://geografiaambiental.files.wordpress.com/2010/12/geomorfologia.pdf>. Acesso: agosto 2019.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**, 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 686p. (tradução de I.F. Lepsch).

CHATELIN, Y. **Les sols ferrallitiques**. Tome III-L'alteration. Initiations-Documentatios Techniques, ORSTOM, Paris, 1974, 144p.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. *In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B (Orgs.) 2º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

COELHO NETTO, A.L. Evolução de cabeceira de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): A formação e o crescimento da rede de canais sob controle estrutural”. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, n.2, 2003, p.118-167.

COLAVITE, Ana Paula. **As transformações históricas e a dinâmica atual da paisagem de Corumbataí do Sul – Paraná**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

CUNHA, J.E. **Funcionamento hídrico e suscetibilidade erosiva de um sistema pedológico constituído por Latossolo e Argissolo no município de Cidade Gaúcha-PR**. 2002. Tese (Doutorado em Geografia física) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de São Paulo, 2002.

CUNHA, J.E.; CASTRO, S.S.; SALOMÃO, F.X.T. Comportamento erosivo de um sistema pedológico de Umuarama, Noroeste do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.943-951, 1999.

DANIEL, C. **A. Erosão urbana – um estudo de caso**. 2007. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Faculdade Estadual de Ciências e Letras de Campo Mourão, 2007.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. The channel head. *In: BEVEN, K. e KIRKBY, M. (eds.) Channel Network Hydrology*. John Wiley, Chichester, p. 175-219, 1993

DUNNE, T. Formation and controls of channel networks. **Progress in Physical Geogrpny**. v. 4, p.211-239, 1980.

DUNNE, T. Hydrology, mechanics and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. *In* Higgins C.G.; Coates, D.R. (Eds.), Groundwater Geomorphology, **Geological Society of America**. Special Paper 252, p.1-28, 1990.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). **Banco de Dados Geográficos do Exército**. Versão 3.0. 2013. Disponível em: <<http://www.geoportal.eb.mil.br/mediador/>>. Acesso em: jul. 2019.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Brasília: EMBRAPA, 2017. 573 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 5ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

FERNANDES, A. J.; MALDANER, C. H. Análise das Fraturas nos Basaltos de Ribeirão Preto, SP: Aplicação à Elaboração de Modelo Hidrogeológico Conceitual. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. Geol. USP, Sér. cient., São Paulo, v. 11, n. 3, p. 43-64, 2011.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C. P. Movimentos de Massa: uma Abordagem geológico-geomorfológica. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 1 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123-186.

FILIZOLA, H. F.; BOULET, B. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil) and analogy to the slope evolution. **Geomorphology**, n.16, p.77-86, 1996.

FIORI, C. O.; SOARES, P.C. Aspectos Evolutivos das Voçorocas. **Notícias Geomorfológicas**. Campinas, v.16 n.32, p. 105-114, 1976.

FLORENZANO, T. G.(org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 320p.

GASPARETTO, N.V.L, NAKASHIMA, P. NÓBREGA, M.T. Caracterização do meio físico; subsídio para o planejamento urbano e periurbano. Cidade Gaúcha. Convênio SUCEAM/DGE-UEM. Relatório final, 1995.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Edgard Blücher, São Paulo, 1984.

GONÇALVES, N. M. M. **Transformações mineralógicas e estruturais relacionadas à alteração hidrotermal e intempérica de rochas vulcânicas básicas da Bacia do Paraná setentrional** – região de Ribeirão Preto – SP, Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências-USP, São Paulo, 1987. 212p.

HACK, J. T.; GOODLETT, J. C. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians. **Geological Survey professional Paper**. Printing Office, v. 347 p. 1-66, 1960. DOI 10.3133/pp347

HUGGETT, R. J. **Fundamentals of Geomorphology**. 2. ed. New York: Taylor & Francis e-Library, 2007. 482P. Master e-book.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Sistema de Informações Hidrológicas**. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Sistema-de-Informacoes-Hidrologicas>. Acesso em: novembro, 2022.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOCIÊNCIAS. SEMA-ITCG. GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Projeto “**Cobertura Aerofotogramétrica do Estado do Paraná**”. Fotografias Aéreas. Escala 1:25.000. Ano de 1980.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de Pedologia: guia prático de campo**. 3º ed. Rio de Janeiro: 2015, 134 p.

IWASA, O. Y.; ALMEIDA FILHO, G. S.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; RODRIGUES, E.; OLIVEIRA, A. M. S.; KERTZMAN, F. F.; GOUVEIA, M. I. Análise de ocorrências de ravinas e boçorocas na bacia do Pardo Grande. **Atas... II Simpósio de Geologia do Sudeste**, São Paulo, 1991.

KALLÁS, F.; SANT’ ANA, L. C. F. Análise ambiental da causa da voçoroca urbana localizada no município de Luiziana-PR. **Fórum...XIV Fórum Ambiental Alta Paulista**, 1348- 1358, 2018. ISBN: 978-85-68242-76-6

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. *In*: BLACK, C. A. *et al.* (Eds). **Methods of soil analysis: part 1: physical and mineralogical Properties, including statistics of measurement na samplinh**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 770p.

LICHT O.A.B.; ARIOLI, E. E. A photographic atlas of the architecture, low geometry and morphology, and facies of the Serra Geral Group (Paraná Igneous Province) in the state of Paraná, Brazil. **Boletim Paranaense de Geociências**, v.76, p. 1-69, 2020.

LICHT O.A.B.; ARIOLI, E.E. **Mapeamento geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná**. Nota Explicativa. ITCG, Curitiba, 2018. 316 p.

LUCE, C. H; WEPLE, B.C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 26, p.111-113, 2001.

LUIZIANA. **Lei complementar nº 28, de 6 de dezembro de 2017**: dispõe sobre o parcelamento do solo para fins urbanos no município de Luiziana e dá outras providências. Luiziana: Prefeitura Municipal de Luiziana.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 3ªed. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002.

MACHADO, M. S.; MEZZOMO, M. D. M.; MORGANA, S. G. Relação entre drenagem urbana e processos erosivos: estudo de caso em Campo Mourão-PR. **Terr@Plural**, v.11, n.1, p. 141-155, 2017.

MEIS, M. R. M.; MONTEIRO, A. M. F. Upper Quaternary rampas: Doce river valley, SE Brazilian Plateau. *Zeit. Geomorph*, v.23, p.132-151, 1979.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução a Geologia de Engenharia**. 3ª ed. UFSM. Santa Maria, 2007. 307p

MARQUES FILHO, P. L.; CORREIA, P. C.; LEVIS, P.; ANDRADE, C. A. V. Características usuais e aspectos peculiares do manto de alteração e transição solo-rocha em basaltos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA*, 3., 1981, Itapema. *Anais...* Itapema: SG, ABGE, v. 2, p. 53-72, 1981.

MARTINS, V. M. Caracterização morfológica e da circulação hídrica dos solos da cabeceira de drenagem do Córrego Bom Jesus no município de Cidade Gaúcha-PR. (**Dissertação de Mestrado**).DG/FFLCH/USP, 2000, 135p.

MELFI, A. J. **Lateritas e Processos de Laterização**. (Aula Inaugural de 093/1994). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos. USP. 1997.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Blackwell Publishing, Inglaterra, 3.ed. 2005. 304p.

MORESCO, M. D.; CUNHA, J. E. Setorização morfopedológica e indicadores de riscos à erosão. **Revista Geografia, Londrina**, 12 , n. 2, p. 97-110, 2003.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Blackwell Publishing, Inglaterra, 3.ed. 2005. 304p

MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R.J., MCINTYRE, K., BREWER, T.R. ; ALTSHUL, H.J. Soil erosion survey of the central part of the Swaziland Middleveld. **Soil Technology**, v.11, 263–89, 1997.

MOURA, J. R. S.; PEIXOTO, M. N. O.; SILVA, T. M. Geometria do relevo e estratigrafia do quaternário como base à tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro – médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 21, n. 3, p. 255-265, 1991. DOI 10.25249/0375-7536.1991255265.

NAKASHIMA, P. **Cartografia dos Sistemas Pedológicos do Noroeste do Paraná – distribuição e subsídios para o controle da erosão**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1999.

NÓBREGA, M. T. **Características e mecanismo de estabilização de solos tropicais com cal e cimento em pista experimental**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. DOI:10.11606/T.44.1995.tde-16112015-133834.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos Erosivos e Preservação de Áreas de Risco de erosão por Voçorocas. *In: Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações*. GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Orgs). Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

OLIVEIRA, M. A. T.; MEIS, M. R.M. Relações entre geometria do relevo e formas de erosão linear acelerada (Bananal, SP). *In: Geociências*. nº 4. São Paulo, p.87-99, 1985.

PAISANI, J. C.; FACHIN, A.; PONTELLI, M. E.; OSTERRIETH, M. L.; LOPES-PAISANI, S. D.; FUJITA, R. H. Evolução de paleocabeceira de drenagem do Rio Chopinzinho (Sul do Brasil) durante o Quaternário Superior. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 1, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i1.735.

PAISANI, J. C.; LOPES-PAISANI, S. D.; OSTERRIETH, M. L.; PONTELLI, M. E.; FUJITA, R. H. Dinâmica de rampa de colúvio na superfície de Palmas/Água doce durante o Quaternário Tardio - Bases para compreender a evolução das encostas no planalto das araucárias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 4, p. 783–799, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i4.1247.

POLIVANOV, H.; BARROSO, E. V. Geotecnia Urbana. *In*: GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia Urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 280p.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretações e aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192p.

RODERJAN, C.V.; GALVÃO, F.; KUNIYOSHI, Y.S.; HATSCHBACH, G.G. As unidades fitogeográficas do Estado do Paraná, Brasil. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.1, n.24, p. 75-92, 2002.

RUHE, R. V. **Geomorphology: Geomorphic Processes and Surficial Geology**. Boston: Houghton Mifflin, p. 87-123, 1975.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos processos erosivos. *In*: GUERRA, T.A.J.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G. (Org.). **Erosão e Conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 229-265, 1999.

SALOMÃO, F. X. T. Solos do Arenito Bauru. *In*: PEREIRA, P. V.; FERREIRA, E. M.; CRUZ, M. C. P. (Orgs.). **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal, FCAV-UNESP/SBCS, 1994. 253p.

SALOMÃO, F. X.T. **Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 200p.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5ªEd. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100p.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F. da.; ROSS, J. L. S. Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. Ano 7, n. 2, p.03-12, 2006.

SATO, A. M. **Influência do manejo de plantios de eucalipto na hidrologia e erosão: bacia do rio sesmaria, médio vale do rio Paraíba do Sul**. 2012. Tese (Doutorado-PPGG) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. 177 p.

SCHOLTEN, T. Hydrology and erodibility of the soils and saporlite cover of the Swaziland Middleveld. **Soil Technology**, v.11, p.247–262, 1997.

SCHOLTEN, T.; FELIX-HENNINGSSEN, P.; SHOTTE, M. Geology, soils and saporlites of the Swaziland Middleveld. **Soil Technology**, v. 11, p.229-246, 1997.

SOUZA, M. L. **Proposta de um Sistema de Classificação de Feições Erosivas Voltados à Estudos de Procedimentos de Análises de Decisões Quanto a Medidas Corretivas, Mitigadoras e Preventivas: aplicação no município de Umuarama (PR), 2001.** Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista Julho de Mesquita Filho, Rio Claro, 2001.

SOUZA, V.; GASPARETTO, N. V. L. Avaliação da erodibilidade de algumas classes de solos do município de Maringá -PR, por meio de análises físicas e geotécnicas. **Boletim de Geografia**, Universidade Estadual de Maringá (UEM), n.28, 2010. p. 5-16.

SILVA, I. M.; SOUZA, G. F.; LUPINACCI, C. M. Construção dos símbolos geomorfológicos para cartografia de detalhe em SIG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, nº 4, p.2011-2021, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2201

SILVA, V. B.; FORTES, E. O uso de produtos de sensoriamento remoto na análise espaço-temporal: relevância de fotografias aéreas para análise de processos erosivos e alternativas metodológicas. **Terra Didática**, v.18 (Publ. Contínua), 1-6, e022037, 2022. DOI 10.20396/td.v18i00.8671355.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics**. New York: Wiley & Sons, 1994.

TSUKAMOTO, Y.; OTHA, T.; NOGUCHI, H. Hydrological and geomorphological studies of debris slides on forested hillslopes in Japan. *International Association of Hidrological Scientists Publication*, v. 137, p. 89-98, 1982.

YOKOO, E. N. **A dinâmica das frentes de ocupação territorial na Mesorregião centro-ocidental paranaense**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2013.

YOKOO, E.N.; SERRA, E. Planos de Colonização Oficial na Mesorregião Centro Ocidental Paranaense. **Geomae**, Campo Mourão, v.9, n.1, p.13-29, 2018.

ZAMUNER, L. D. Erosão Urbana em Maringá-Pr: o caso do Parque Florestal dos Pioneiros – Bosque II. **Dissertação de Mestrado**. Universidade estadual de Maringá - Centro de ciências Humanas, Letras e Artes-Departamento de Geografia. Maringá, PR,  
ZAPAROLI, F. C. M.; NÓBREGA, M. T. Processos erosivos na cabeceira do Ribeirão Pinguim (Sarandi/Maringá - PR). *In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*, 2006, Goiânia. **Anais...VI Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Goiânia: Sem, p. 1-11, 2006.

## APÊNDICE

Apêndice 1 – Tabela de dados físicos e geotécnicos

		A	S	AT	DS	PT	CH	LL	LP	IP
<b>P1</b>	I	78,59	8,3	13,11	1,08	62,07	0,91	62	43	19
	II	89,91	4,51	5,8	1,04	55,99	0,48	70	51	19
	III	94,71	2,08	3,22	1,09	58,15	0,12	81	60	21
	IV	86,28	5,02	8,7	1,01	64,97	0,6	75	56	19
<b>P2</b>	I	84,75	5,17	10,08	1,09	64,61	0,87	75	52	23
	II	97,93	1,63	0,44	1,05	67,12	0,64	87	59	28
	III	90,04	4,01	5,95	0,88	70,25	2,31	74	52	22
	IV	89	3,82	7,18	0,96	60,66	1,76	65	50	15
	V	78,62	7,74	13,64	0,92	69,53	0,09	-	-	-
<b>P3</b>	I	92,91	2,93	4,16	0,96	72,44	4,57	75	45	30
	II	99,48	0,52	0	0,98	64,03	3,85	81	58	23
	III	92,05	2,89	5,06	-	-	-	72	54	18
	IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	V	90,43	5,4	4,46	1,17	64,77	0,65	76	50	26
	VI	83,22	7,32	9,46	1,02	66,61	2,02	58	47	11
<b>P4</b>	I	99,52	0,48	0	1,04	65,68	1,77	75	54	21
	II	96,19	2,91	0,9	1,1	56,09	1,12	75	53	22
	III	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	IV	97,53	2,02	0,45	1,04	47,19	1,18	86	57	29
<b>P5</b>	I	88,66	3,5	7,84	0,98	50,28	4,94	59	41	18
	II	85,32	5,22	9,46	0,94	51,73	11,99	60	40	20
	III	84,05	7,11	8,84	0,93	75,62	3,25	63	44	19
	IV	92,14	3,1	4,76	1,5	60,81	1,38	70	46	24
<b>P6</b>	I	82,36	6,53	11,11	1,25	59,26	1,3	61	39	22
	II	87,61	7,63	9,76	0,95	63,66	4,18	61	44	17
	III	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>P7</b>	I	87,7	3,55	8,75	1,22	57,19	0,3	59	39	20
	II	76,58	8,89	14,53	0,96	68,93	4,29	49	36	13
	III	80,65	7,08	12,27	1,03	63,64	3,74	54	40	14
<b>P8</b>	I	78,37	8,54	13,09	1,18	57,17	1,73	58	38	20
	II	86,84	4,94	8,22	1,24	63,55	0,09	64	40	24
	III	81,58	4,46	13,96	1,14	66,68	3	-	-	-

Elaboração: A autora (2022).