

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Estudo de erosões do tipo *piping* na cabeceira do Córrego Santa
Maria, Brotas/SP**

CARLA CRISTINA MAGALHÃES DE MORAES

Dissertação apresentada ao Programa Geociências
(Recursos Minerais e Hidrogeologia) para obtenção
do título de Mestra em Ciências

Área de concentração: Hidrologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato

SÃO PAULO

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:

Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Magalhães de Moraes, Carla Cristina
Estudo de erosões do tipo piping na cabeceira do
Córrego Santa Maria, Brotas/SP / Carla Cristina
Magalhães de Moraes; orientador Prof. Dr. Edilson
Pizzato. -- São Paulo, 2023.
155 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. erosão. 2. geofísica. 3. erosão interna. 4.
piping. I. Pizzato, Prof. Dr. Edilson, orient. II.
Título.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Estudo de erosões do tipo *piping* na cabeceira do Córrego Santa
Maria, Brotas/SP**

CARLA CRISTINA MAGALHÃES DE MORAES

Orientador: Prof. Dr. Edilson Pizzato

Dissertação de Mestrado

COMISSÃO JULGADORA
Prof^a. Dr^a. Ana Elisa de Abreu
Prof. Dr. José Eduardo Zaine

SÃO PAULO
2023

*Dedico esta obra a todas as mulheres, todas as mães, todas as
pesquisadoras.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edilson Pizzato, por estar sempre à disposição e compartilhar seu conhecimento sobre a área de Geologia.

À CPRM-SGB (Serviço Geológico do Brasil), empresa de que me orgulho muito de fazer parte, por apoiar e financiar parte desta pesquisa.

Também registro minha gratidão aos demais colegas de CPRM-SGB, que muito me incentivaram neste desafio, do GEHITE (Gerência de Hidrologia e Gestão Territorial) e da DISEGE (Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica), em especial ao geofísico Jairo, que além de companheiro de campo, foi muito parceiro em diversos momentos durante o processo de criação deste trabalho.

Ao guru Ferrari, que me fez perder o medo e foi um grande parceiro na nossa pequena expedição. Acredito que fomos os pioneiros ao desbravar essa caverna. E à Viviane, por também toparem o desafio.

À equipe da Meandros Espeleo Clube, pela contribuição no mapeamento da caverna e por me proporcionar conhecer ainda mais detalhes de todo o desenvolvimento interno no maciço.

Ao Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas (*in memoriam*) e ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette, pelas excelentes contribuições durante o desenvolvimento do trabalho.

À Profa. Dra. Mariana Santos, do Departamento de Infraestrutura e Ambiente/FEC/Unicamp, que foi muito gentil localizando arquivos originais da sua publicação, em melhor qualidade.

Ao melhor geólogo da família, Jorge, e à melhor filha, Luísa.

RESUMO

Moraes, C.C.M., 2023, **Estudo de erosões do tipo *piping* na cabeceira do Córrego Santa Maria, Brotas/SP** [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 175 p.

O município de Brotas cresceu sobre os arenitos da Formação Botucatu, que está inserida na área de recarga do Aquífero Guarani. A região de pesquisa é um vetor de expansão da cidade de Brotas, na Bacia do Córrego Santa Maria. A expansão urbana desordenada pode gerar graves consequências ao ambiente; aliada à falta de planejamento no escoamento de águas pluviais e à baixa coesão de alguns terrenos, pode proporcionar o surgimento de voçorocas, cuja evolução pode resultar em riscos geotécnicos para a população ao redor. Nesse sentido, a geofísica possibilita um diagnóstico de produtos da evolução de voçorocas, como o fenômeno de *piping*, que consiste na geração natural de cavidades no solo. Por meio do uso de sensores geofísicos foi possível obter dados subsuperficiais para compor o trabalho, bem como traçar um melhor diagnóstico desses processos erosivos na Bacia do Córrego Santa Maria. Correlacionando os dados geofísicos, foi possível melhor delimitar as cavidades com uma assinatura geoelétrica de alta resistividade, devido à ausência de preenchimento. Os estudos desenvolvidos apontaram a ocorrência de uma série de fragilidades e características naturais que requerem cuidados no uso e na ocupação do solo. A interpretação das seções também identificou as porções saturadas e o topo rochoso. Com análises diretas, também foi possível ver a direção dos fluxos da água e os contornos erosivos de toda a área de estudo. Num segundo momento foi feita uma interpretação da dimensão espacial dos condutos, integrando mapas, seções e dados de subsuperfície, de modo a então revelar o prolongamento e a ramificação de *pipings* em porções mais internas do terreno. Este estudo é relevante para a compreensão dos fenômenos erosivos internos em uma região onde o adensamento urbano está em franca expansão.

Palavras-chave: erosão, geofísica, erosão interna, *piping*.

ABSTRACT

Moraes, C.C.M., 2023, **Study of piping-type erosions at the headwaters of Santa Maria Stream, Brotas/SP** [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 175 p.

The municipality of Brotas has grown over the sandstones of the Botucatu Formation, which is situated within the recharge area of the Guarani Aquifer. The research region serves as an expansion zone for the city of Brotas, located within the Santa Maria Stream basin. Unplanned urban expansion can lead to severe environmental consequences; coupled with poor planning for stormwater drainage and the low cohesion of certain terrains, this can give rise to the formation of gullies. The evolution of these gullies can result in geotechnical risks for the surrounding population. In this context, geophysics offers the ability to diagnose features of gully evolution, such as the phenomenon of piping, which involves the natural formation of cavities in the soil. By employing geophysical sensors, it was possible to gather subsurface data to contribute to the study and gain a better diagnosis of these erosive processes within the Santa Maria Stream Basin. Through correlating geophysical data, the boundaries of cavities were better defined, characterized by a high-resistivity geoelectric signature due to the absence of filling material. The studies conducted identified a series of vulnerabilities and natural characteristics that require careful land use and occupation. The interpretation of sections also pinpointed saturated portions and the bedrock surface. Through direct analyses, the direction of water flows and erosive contours across the entire study area was also discerned. Subsequently, a spatial interpretation of these conduits was carried out, integrating maps, sections, and subsurface data to reveal the extension and branching of piping within the interior portions of the terrain. This study is relevant for the understanding of internal erosive phenomena in a region where urban consolidation is rapidly expanding.

Keywords: erosion, geophysics, internal erosion, piping.

SUMÁRIO

| | |
|--|------------|
| LISTA DE FIGURAS | 11 |
| LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS..... | 15 |
| LISTA DE SIGLAS..... | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 7 |
| 3. CARACTERÍSTICAS REGIONAIS..... | 8 |
| 3.1. Geomorfologia | 8 |
| 3.2. Geologia regional | 11 |
| 3.3. Unidades Aquíferas..... | 13 |
| 4. GEOLOGIA LOCAL | 15 |
| 5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO | 18 |
| 6. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 27 |
| 7. CONSIDERAÇÕES GERAIS..... | 38 |
| 7.1. Detalhamento da área de estudo..... | 41 |
| 7.1.1. Plano diretor de Brotas..... | 44 |
| 7.2. Estudos que indicam as fragilidades do terreno | 48 |
| 8. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA- EROSIÃO | 63 |
| 8.1. Revisão bibliográfica- Erosões internas..... | 71 |
| 8.2. Feições de abatimento | 78 |
| 8.3. A reconstrução do processo erosivo..... | 86 |
| 9. ENSAIOS GEOFÍSICOS..... | 95 |
| 9.1. Processamento dos dados | 98 |
| 9.2. Princípios físicos: geofísica | 102 |
| 9.3. Resultados obtidos pela geofísica | 105 |
| 10. RESULTADOS | 114 |
| 11. CONCLUSÕES | 134 |
| 12. REFERÊNCIAS..... | 141 |
| APÊNDICE I | 146 |
| APÊNDICE II | 149 |

| | |
|-------------------|-----|
| APÊNDICE III..... | 150 |
| ANEXOS | 151 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 – EXEMPLO DE ABATIMENTO DE SOLO NA ÁREA DE PESQUISA (OUT./2019)..... | 2 |
| FIGURA 2 – ÁGUA FLUINDO POR FENDAS DE 1,20M POR 0,50M ABERTAS PELO PROCESSO DE <i>PIPING</i> NA ÁREA DE PESQUISA(MAR./2020) | 3 |
| FIGURA 3 – COLAPSO TOTAL, ABATIMENTO DE TETO DE UMA PORÇÃO DO <i>PIPE</i> NA ÁREA DE PESQUISA (OUT./2019). | 4 |
| FIGURA 4 – DETALHE PARA UM ESCORREGAMENTO NA LATERAL DA VOÇOROCA (OUT./2019)..... | 5 |
| FIGURA 5 – UNIDADES MORFOESTRUTURAIS DO RELEVO..... | 8 |
| FIGURA 6 – UNIDADES MORFOESCULTURAIS DE RELEVO. | 9 |
| FIGURA 7 – CARTOGRAMA DE RELEVO DA CARTA DE SUSCETIBILIDADE (CPRM, 2020)..... | 10 |
| FIGURA 8 – UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS (PERROTTA ET AL., 2005B). | 11 |
| FIGURA 9 – MAPA GEOLÓGICO LOCAL DA ÁREA DE ESTUDO (ADAPTADO PELA AUTORA) | 15 |
| FIGURA 10 – AFLORAMENTO DO ARENITO BOTUCATU NO PONTO DENOMINADO PORTAL DO ARCO, NO LOCAL DE ESTUDO (FOTO:AUTORA)..... | 16 |
| FIGURA 11 – AMOSTRA DE BASALTO ENCONTRADA PRÓXIMA À SEDE DA FAZENDA SANTA MARIA. | 17 |
| FIGURA 12 – LEVANTAMENTO GEOFÍSICO DA LINHA 1. | 28 |
| FIGURA 13 – MAPA PRELIMINAR DOS COLAPSOS E ABATIMENTOS. | 29 |
| FIGURA 14 – LOCALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS (AS FLECHAS INDICAM O SENTIDO DOS CEs). 30 | |
| FIGURA 15 – PONTO QUE FOI DESCARTADO COMO ABATIMENTO E FOI CONSIDERADO COMO BIOTURBAÇÃO. . 32 | |
| FIGURA 16 – AMBIENTE AFÓTICO, COM LÂMINA D’ÁGUA FLUINDO (ALTURA ESTIMADA: 6M)..... | 33 |
| FIGURA 17 – PONTO DA CAVERNA COM CERCA DE 7M DE ALTURA E PRESENÇA DE ALGUMAS RAÍZES. | 34 |
| FIGURA 18 – PONTOS DE SONDAGEM E POÇOS PROFUNDOS. | 36 |
| FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE BROTAS E ÁREA DE ESTUDO..... | 38 |
| FIGURA 20 – HIDROGRAFIA DA REGIÃO | 39 |
| FIGURA 21 – ZONA URBANA DE BROTAS E BAIROS NOS ARREDORES DA ÁREA DE PESQUISA (ADAPTADO DE <i>GOOGLE EARTH</i> – JAN./2019). | 41 |
| FIGURA 22 – ÁREA DE PESQUISA E SEU USO E OCUPAÇÃO (ADAPTADO DE <i>GOOGLE EARTH</i> – MAIO/2018). ... | 42 |
| FIGURA 23 – BAIRRO JARDIM MODELO À ESQUERDA E BAIRRO JARDIM FELICIDADE À DIREITA. PRIMEIRO PLANO: ÁREA DE PASTAGEM E PLANTAÇÃO DE CANA (JUL./2019)..... | 43 |
| FIGURA 24 – ÁREA DE PESQUISA (MATA), ÁREA DE PASTAGEM E OBRAS DO LOTEAMENTO SANTA MARIA, AO FUNDO (JUL./2019)..... | 44 |
| FIGURA 25 – COMPOSIÇÃO ATUAL DA ÁREA COM O PLANO DIRETOR VIGENTE (2020), INDICANDO A ÁREA EM EXPANSÃO DE CONJUNTOS HABITACIONAIS. | 47 |
| FIGURA 26A – CENÁRIO ANTERIOR AO AVANÇO DAS EROSÕES (ADAPTADO DE <i>GOOGLE EARTH</i> – 9 MAR./2007). | 49 |
| FIGURA 26B – CENÁRIO APÓS AVANÇO DAS FRENTE EROSIVAS (ADAPTADO DE <i>GOOGLE EARTH</i> – 1 JUL./2007). | 49 |
| FIGURA 27A – ARREDORES A MONTANTE DA ÁREA DE PESQUISA (1 JUL./2007). | 50 |
| FIGURA 27B – EM 31 DE MAIO DE 2010, O BAIRRO JARDIM FELICIDADE ESTAVA SE CONSOLIDANDO E HAVIA DUAS | |

| | |
|--|----|
| QUADRAS AINDA SEM HABITAÇÕES NO JARDIM MODELO. | 50 |
| FIGURA 27C – CENÁRIO EM 1º DE ABRIL DE 2019, COM AMPLIAÇÃO SIGNIFICATIVA NO NÚMERO DE CASAS E GRANDES OBRAS DE TERRAPLANAGEM. | 50 |
| FIGURA 28 – A GEOMORFOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO (MORUZZI ET AL., 2008, P.17). | 50 |
| FIGURA 29 – EROSÕES LINEARES E RAVINAS QUE AVANÇAM ATÉ PONTO LÍMITROFE DA ÁREA DE PESQUISA, ONDE EXISTE MATA NATURAL (JUL./2019) | 52 |
| FIGURA 30 – EROSÃO LINEAR EVOLUINDO PARA UMA RAVINA EM VIA DE ACESSO PARA A ÁREA DE CULTIVO DE CANA (JUL./2019)..... | 53 |
| FIGURA 31 – MAPA DOS PONTOS DE ABATIMENTO E DE COLAPSO PARCIAL E TOTAL DO TERRENO (IPT, 2009). | 54 |
| FIGURA 32 – OBRAS DO JARDIM SANTA MARIA II (AGO./2021). | 56 |
| FIGURA 33 – PONTO DE ARMAZENAMENTO DE ÁGUA. | 57 |
| FIGURA 34 – CONJUNTO HABITACIONAL JARDIM MODELO (31 MAIO/2010). EM VERMELHO E AMARELO, PONTOS INDICANDO EROSÕES LINEARES. | 58 |
| FIGURA 35 – EROSÃO EXPONDO TUBULAÇÃO DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DOS BAIRROS (AGO./2021). | 59 |
| FIGURA 36 – EROSÃO CAUSADA PELA CHUVA NO JARDIM MODELO (2016). | 60 |
| FIGURA 37 – ÁREA DE REPRESAMENTO DE ÁGUAS AO LADO DO JARDIM SANTA MARIA II (AGO./2021). | 61 |
| FIGURA 38 – DETALHE DO CONTATO SOLO-ROCHA..... | 65 |
| FIGURA 39 – ÁREA REFLORESTADA, COM DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS INCONSOLIDADOS BEM AO LADO DA FRENTE EROSIVA..... | 68 |
| FIGURA 40 – DETALHE PARA MATERIAL DEPOSITADO NA ÁREA REFLORESTADA..... | 68 |
| FIGURA 41 – DINÂMICA DE FORMAÇÃO DE <i>PIPING</i> (ADAPTADO DE JOHN, 1987)..... | 71 |
| FIGURA 42 – (A) ESTADO INCIPIENTE (B) APÓS A EROSÃO TER SE DISTANCIADO CONSIDERAVELMENTE DA NASCENTE (ADAPTADO DE TERZAGHI ET AL., 1996)..... | 73 |
| FIGURA 43 – CAVIDADES DE SAÍDA DE INFILTRAÇÃO NA ZONA DE <i>PIPING/SAPPING</i> DO TRABALHO (HAGERTY, 1992)..... | 74 |
| FIGURA 44 – EVIDÊNCIAS DE <i>SAPPING</i> NAS LATERAIS DA FENDA PRINCIPAL, ZONA AFÓTICA. NA FOTO: FERRARI INDICANDO AS FEIÇÕES..... | 75 |
| FIGURA 45 – FENÔMENO DE SUFUSÃO (ADAPTADO DE JOHN, 1987). | 77 |
| FIGURA 46A – COLAPSO TOTAL CLASSIFICADO POR IPT (2009)..... | 79 |
| FIGURA 46B – MESMA LOCALIZAÇÃO ANTERIOR (FOTO: AUTORA – OUT./2019). | 79 |
| FIGURA 47 – VOÇOROCA MAIS A MONTANTE. | 80 |
| FIGURA 48 – COLAPSOS E ABATIMENTOS NA CABECEIRA DO CÓRREGO SANTA MARIA (JUL./2019). OS NÚMEROS INDICAM AS FEIÇÕES EROSIVAS CADASTRADAS ATÉ ESTA DATA. | 81 |
| FIGURA 49 – DETALHE PARA PONTOS DE ABATIMENTO PRÓXIMOS AO CONJ. HAB. SANTA MARIA II (AGO./2021). | 82 |
| FIGURA 50 – ATUALIZAÇÃO DOS PONTOS DE ABATIMENTO EM (AGO./2021). OS NÚMEROS INDICAM AS FEIÇÕES EROSIVAS CADASTRADAS ATÉ ESTA DATA. | 83 |
| FIGURA 51 – DETALHE DO <i>PIPE</i> A MONTANTE DA RODA D'ÁGUA (AGO./2021). | 84 |
| FIGURA 52 – DETALHE DA VOÇOROCA NORTE (AGO./2021). | 85 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 53 – PONTO DE SAÍDA DO <i>PIPING</i> PRINCIPAL, QUE FORMA UMA CAVERNA NA ÁREA DE ESTUDO. | 86 |
| FIGURA 54 – PONTO 15, CHAMADO DE PORTAL. | 87 |
| FIGURA 55 – VOÇOROCA COM ÁGUA FLUINDO. | 88 |
| FIGURA 56 – PROCESSOS EROSIVOS DO TIPO VOÇOROCAMENTO E <i>PIPING</i> DE SOLO, RESULTANTES DE EROÇÃO HIDRÁULICA E MOVIMENTO DE MASSAS (ADAPTADO DE BERNATEK-JAKIEL E POESEN, 2018). | 89 |
| FIGURA 57 – COLAPSO TOTAL, DE ONDE É POSSÍVEL VISUALISAR O <i>PIPE</i> | 90 |
| FIGURA 58A – MESMO PONTO, MATERIAL RECÉM-DEPOSITADO ORIUNDO DE DESLIZAMENTOS LATERAIS. | 90 |
| FIGURA 58B – VISTA DE DENTRO DO <i>PIPE</i> , COM TETO ABATIDO. | 90 |
| FIGURA 59 – PONTO DE COLAPSO TOTAL, CLARABOIA. | 91 |
| FIGURA 60 – FENDA PRINCIPAL NA VOÇOROCA A MONTANTE. | 94 |
| FIGURA 61 – LOCALIZAÇÃO DOS LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS, LIMITES NA ÁREA DESTACADA (AS FLECHAS INDICAM O SENTIDO DOS CEs)..... | 95 |
| FIGURA 62 – FEIÇÕES DE ABATIMENTO E LOCALIZAÇÃO DAS LINHAS DE GEOFÍSICA. | 96 |
| FIGURA 63 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO DA LINHA 3. | 97 |
| FIGURA 64 – SEÇÃO INVERSA DA LINHA 1. | 100 |
| FIGURA 65 – SEÇÃO INVERSA DA LINHA 2. | 100 |
| FIGURA 66 – SEÇÃO INVERSA DA LINHA 3. | 101 |
| FIGURA 67 – TÉCNICA DA SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL (SEV). | 103 |
| FIGURA 68 – ESQUEMA DO CE, ARRANJO DIPOLO-DIPOLO. | 104 |
| FIGURA 69 – EM AZUL ESTÃO PROJETADAS AS LOCALIZAÇÕES DAS POSSÍVEIS CAVIDADES. | 106 |
| FIGURA 70 – CAVIDADE PRINCIPAL. ENSAIOS GEOFÍSICOS, SEV E LINHA 2, REALIZADOS SOBRE A CAVERNA. | 107 |
| FIGURA 71 – INTERPRETAÇÃO DO MODELO DE CAMADAS DA SEV. | 107 |
| FIGURA 72 – LINHA 1 INTERPRETADA. | 110 |
| FIGURA 73 – LINHA 2 INTERPRETADA. | 111 |
| FIGURA 74 – LINHA 3 INTERPRETADA. | 112 |
| FIGURA 75 – MAPA TOPOGRÁFICO E POTENCIOMÉTRICO INDICANDO A DIREÇÃO DO FLUXO. | 114 |
| FIGURA 76 – TRAÇADO PRELIMINAR DO TÚNEL. | 115 |
| FIGURA 77 – CROQUI DE CAMPO (ESQUEMA REPRESENTATIVO DA AUTORA). | 116 |
| FIGURA 78 – MODELO DE SUPERFÍCIE SIMPLIFICADO. | 116 |
| FIGURA 79 – MODELO SUPERFICIAL PRELIMINAR. | 117 |
| FIGURA 80 – SEÇÃO PRELIMINAR DO TÚNEL PRINCIPAL. | 117 |
| FIGURA 81 – CAVIDADE LOCALIZADA NAS LATERAIS EXTERNAS. | 118 |
| FIGURA 82 – CAVIDADE DE CERCA DE 40CM, PRÓXIMA DA SAÍDA DO TÚNEL PRINCIPAL. | 118 |
| FIGURA 83 – MAIS <i>PIPES</i> , NA FRENTE EROSIVA. | 118 |
| FIGURA 84 – <i>PIPES</i> DE PEQUENO DIÂMETRO NAS LATERAIS; TAMBÉM É POSSÍVEL VER O TÚNEL PRINCIPAL. | 118 |
| FIGURA 85 – <i>PIPE</i> SECUNDÁRIO DE 70 CM, QUE SEGUE AFUNILANDO. NESTE PONTO, A CAVIDADE MAIOR TEM APROX. 6,20M DE ALTURA. | 119 |
| FIGURA 86 – MUDANÇA NA ESTRATIFICAÇÃO E NO FORMATO DOS TÚNEIS E CONDUTOS. | 119 |
| FIGURA 87 – TETO COM FRATURA/FENDA VERTICAL, COM VARIAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO NAS CAMADAS | |

| | |
|---|-----|
| INFERIORES. | 120 |
| FIGURA 88 – INDICANDO AS MARCAS DE VARIAÇÃO DE NÍVEL DE ÁGUA. | 120 |
| FIGURA 89 – CURVA ACENTUADA, FORMANDO UM TÚNEL MENOR PARALELO. | 121 |
| FIGURA 90 – TUBO MENOR, PARALELO AO ANTERIOR. | 121 |
| FIGURA 91 – TRAJETO E EXTENSÃO APROXIMADOS DA CAVERNA. | 123 |
| FIGURA 92 – MODELO TRIDIMENSIONAL PRELIMINAR DA CAVERNA E ABATIMENTOS DE SOLO. | 123 |
| FIGURA 93 – MODELO DE SUPERFÍCIE, INDICANDO PONTOS DE INTERESSE. | 124 |
| FIGURA 94 – PORÇÕES INTERNAS DA CAVERNA DO CÓRREGO SANTA MARIA (FOTOS: LEDA ZOGBI). | 127 |
| FIGURA 95 – TOPOGRAFIA DA CAVERNA DO CÓRREGO SANTA MARIA. | 129 |
| FIGURA 96 – RAIO DE 250M DO CENTRO DA CAVERNA SANTA MARIA. | 131 |
| FIGURA 97 – NASCENTE PRINCIPAL E RODA D'ÁGUA UTILIZADA PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA. | 133 |
| FIGURA 98 – RESIDÊNCIAS CONSTRUÍDAS RECENTEMENTE. AO FUNDO, EM AMARELO, CABECEIRA DO CÓRREGO SANTA MARIA, ONDE ABATIMENTOS DE SOLO SÃO ENCONTRADOS. | 135 |
| FIGURA 99 – FEIÇÕES EROSIVAS DE <i>PIPES</i> ATIVOS A SUDESTE. | 136 |
| FIGURA 100 – PROJEÇÃO DAS CAVIDADES E CAVERNA SOBRE A IMAGEM DO <i>GOOGLE EARTH</i> | 137 |
| FIGURA 101 – LOCALIZAÇÃO DA CAVERNA E ABATIMENTOS DE SOLO. | 138 |
| FIGURA 102 – PERFIL A-A' COM A CAVERNA PRINCIPAL E ABATIMENTOS INDICADOS. | 138 |

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Várias origens relatadas de formação <i>pipes</i> (Pierson, 1983) | 20 |
| Gráfico 1 – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV. | 99 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| APAN | Área de Proteção do Ambiente Natural |
| APP | Área de Proteção Permanente |
| ARG | Área de Restrição Geotécnica |
| CDHU | Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano do Estado de São Paulo |
| CE | Caminhamento Elétrico |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CPRM | Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais |
| DER | Departamento de Estradas e Rodagem |
| EMDB | Empresa Municipal de Desenvolvimento de Brotas |
| EMI | <i>Electro Magnetic Induction</i> |
| ER | Eletrorresistividade |
| ERT | <i>Electrical Resistivity Tomography</i> |
| ETE | Estação de Tratamento de Efluentes |
| GPR | <i>Ground Penetrating Radar</i> (Radar de Penetração no Solo) |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IG | Instituto Geológico do Estado de São Paulo |
| MINEROPAR | Minérios do Paraná S/A - Serviço Geológico do Paraná |
| PATEM | Programa de Apoio Tecnológico aos Municípios |
| PMRR | Plano Municipal de Redução de Riscos |
| PNPDEC | Política Nacional de Proteção e Defesa Civil |
| SEV | Sondagem Elétrica Vertical |
| SGB | Serviço Geológico do Brasil |
| SIAGAS | Sistema de Informações de Águas Subterrâneas |
| ZDB | Zona de Baixa Densidade |
| ZEIs | Zona Especial de Interesse Social |
| ZPR | Zona Predominantemente Residencial |

1. INTRODUÇÃO

O processo de *piping* representa um risco geológico frequentemente subestimado, principalmente devido à sua natureza muito localizada. Aqui entendemos por risco geológico, a probabilidade de ocorrer um processo natural/geológico com danos para o homem. De fato, o *piping* ocorre apenas em circunstâncias particulares e geralmente afeta áreas relativamente pequenas, mas também é sabido que as feições erosivas podem evoluir para uma voçoroca e atingir grandes dimensões. Como é um processo de erosão interna, existe uma grande dificuldade em prever a localização e o momento exato dos colapsos e aberturas de frentes de erosão, o que cria sérios problemas para os planejadores urbanos.

Diversos termos são utilizados para denominar esse processo, sendo os mais usuais: *piping*, erosão interna, erosão em túneis, retroerosão tubular, erosão em dutos, entubamento ou erosão regressiva. Todos eles são utilizados para definir um processo de remoção mecânica de partículas finas do solo por efeito das forças de fluxos concentrados na subsuperfície. Neste trabalho iremos utilizar o termo em inglês *piping* para que não se confunda com outros processos erosivos que começam na superfície e avançam como erosões internas.

O *piping* se dá pela remoção de partículas do interior do solo, formando canais que aumentam em sentido contrário ao do fluxo d'água e provocando colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a voçoroca ou criam novos ramos (Tominaga et al., 2009).

Ainda podemos afirmar que os *pipes* podem ser tanto a causa quanto o produto do ravinamento/voçorocamento, pois essas erosões ou canais podem se formar quando o teto dos tubos colapsa; por outro lado, as ravinas podem desencadear a formação de tubos, aumentando o gradiente hidráulico circundante (Jones, 2004).

Este estudo versa sobre processos erosivos causados pela água subterrânea em uma cabeceira de drenagem, onde a água é um agente importante no transporte das partículas. Compreender os processos erosivos, suas ramificações em subsuperfície e os agentes que intensificam ou retardam o avanço das erosões é muito importante para nortear o processo de uso e ocupação dos solos nas áreas urbanas, bem como os vetores de expansão dos municípios.

Localizar os pontos afetados por erosão interna, os *pipes*, não é uma tarefa fácil, já que eles se tornam visíveis apenas quando o teto das erosões colapsa, ou a entrada

ou saída de um túnel ou fenda é localizada. Em regiões naturais ou antropizadas, localizar essas cavidades de modo direto não é muito eficiente, pois elas se iniciam com pequenos abatimentos (**Fig. 1**) e colapsos na superfície que podem ser imperceptíveis, camuflarem-se em meio à vegetação ou até mesmo serem encobertos por estruturas de concreto de grande porte ou asfalto, no caso de uma estrada ou região urbanizada. Porém, quando acontece um colapso total e um abatimento total do teto da cavidade, grandes perdas materiais e até mesmo fatalidades podem acontecer. Por isso, é muito importante detectar esses processos erosivos em subsuperfície, assim como suas causas e direção de avanços, pois, caso eles não sejam controlados ou estabilizados, podem inutilizar áreas aptas à agricultura, ameaçar obras viárias e áreas urbanas, além de assorear rios.



Figura 1 – Exemplo de abatimento de solo na área de pesquisa (out./2019).

Esse tipo de processo erosivo interno segue de jusante para montante por caminhos preferenciais, como contatos, porções mais friáveis do solo, discontinuidades, juntas de estratificação. O processo erosivo se inicia num ponto de surgência da água e progride regressivamente, carreando os grãos de solo em um filete de água que arrastam os grãos que vão sendo transportados pelos caminhos abertos pela própria erosão, num formato tubular, os *pipes*. Daí o nome *piping* ser bem aplicado, pois se trata de uma retroerosão subterrânea que tem como resultado

um conduto com água fluindo livremente no canal criado, transportando sedimentos (Fig. 2).



Figura 2 – Água fluindo por fendas de 1,20m por 0,50m abertas pelo processo de *piping* na área de pesquisa(mar./2020).

Diferentemente da erosão superficial, cujo avanço é possível acompanhar e medir com apenas observações em campo, no processo de *piping* não é possível ver o carreamento do solo, pois o processo erosivo é interno e acontece dentro do maciço ou solo. O *piping* tem a natureza de um processo de erosão regressiva, pois seu avanço é contrário ao fluxo. Quando há aumento de gradiente hidráulico, nesse ponto ocorre o surgimento da erosão a montante, que progride no interior do substrato. A erosão provoca a remoção das partículas do solo e gera tubos vazios que ocasionalmente colapsam, formando fendas, cavidades e até mesmo cavernas (Fig. 3).



Figura 3 – Colapso total, abatimento de teto de uma porção do *pipe* na área de pesquisa (out./2019).

Esses colapsos também avançam com o escorregamento das laterais do terreno, aumentando o processo de erosão com o aporte da erosão superficial (**Fig. 4**), e evoluem para processos erosivos de grande porte, como as voçorocas, com uma tendência remontante. Os *pipes* por onde a água transita são um reflexo de uma intensa dinâmica erosiva de subsuperfície que pode criar feições de abatimento do solo, tanto nas laterais das vertentes como nas cabeceiras.



Figura 4 – Detalhe para um escorregamento na lateral da voçoroca (out./2019).

Apesar de o *piping* acontecer de forma natural em muitas situações, a expansão urbana desordenada pode potencializar o processo erosivo. A falta do correto ordenamento de águas pluviais em solos de baixa coesão pode proporcionar o avanço de processos erosivos subterrâneos de grande porte, cuja evolução pode resultar em riscos geotécnicos para a população ao redor. Isso ocorre, pois, o fluxo concentrado das águas superficiais podem acelerar o processo erosivo já existente, gerando cortes na superfície em formas de sulcos, que ao se aprofundar podem evoluir para ravinas e posteriormente voçorocas. Este fluxos causam desmoronamentos e aumento das feições erosivas já existentes.

Um trabalho muito importante foi feito na área pelo IPT (2009), que classificou os pontos de abatimento em três categorias: *abatimento*, *colapso parcial* e *colapso total*. Neste trabalho iremos utilizar essa mesma terminologia, apenas complementando com nomes mais usuais de formas de relevo, indicando presença ou não de água fluindo (que dirá se é um *pipe* ativo ou não).

Pesquisas que subsidiem a compreensão do desenvolvimento de processos de erosão interna do tipo *piping*, que são relacionados ao surgimento de voçorocas em cabeceiras de drenagem e fundos de vales, mostram-se necessárias, já que existem

aproximadamente 7.000 voçorocas e ravinas de grande porte no Planalto Ocidental Paulista, segundo IPT (1986, 1988, 1990, 1992 apud Oliveira e Neto, 1994, p. 99).

O crescimento urbano acelerado – com excesso de superfícies impermeabilizadas, que reduzem a infiltração de água das chuvas nas áreas urbanizadas –, a falta de direcionamento de águas superficiais e os desmatamentos, aliados à baixa coesão dos solos e à alta suscetibilidade a erosão dos solos da região de Brotas, podem resultar em riscos geotécnicos para a população. Por isso esta pesquisa se faz importante, tanto para compreender o fenômeno de erosão interna que ocorre na cabeceira do Córrego Santa Maria, como também para analisar sua extensão, seu avanço e seus riscos para a população dos arredores.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo compreender o processo erosivo interno e sua evolução; apresentar os resultados obtidos com a integração dos dados de mapeamento de superfície, geofísica, topografia da caverna e condutos; e gerar um modelo de prolongamento e ramificação de *pipings* em porções mais internas do terreno na Bacia do Córrego Santa Maria. É muito importante o entendimento de como as erosões tubulares se desenvolvem em arenitos da Formação Botucatu, em especial em zonas de expansão urbana, para que o planejamento urbano possa estar atento às fragilidades das bacias hidrográficas com similaridades e suscetíveis ao mesmo processo erosivo, compreendendo também os problemas relativos ao uso e ao manejo inadequados dos recursos solo e água.

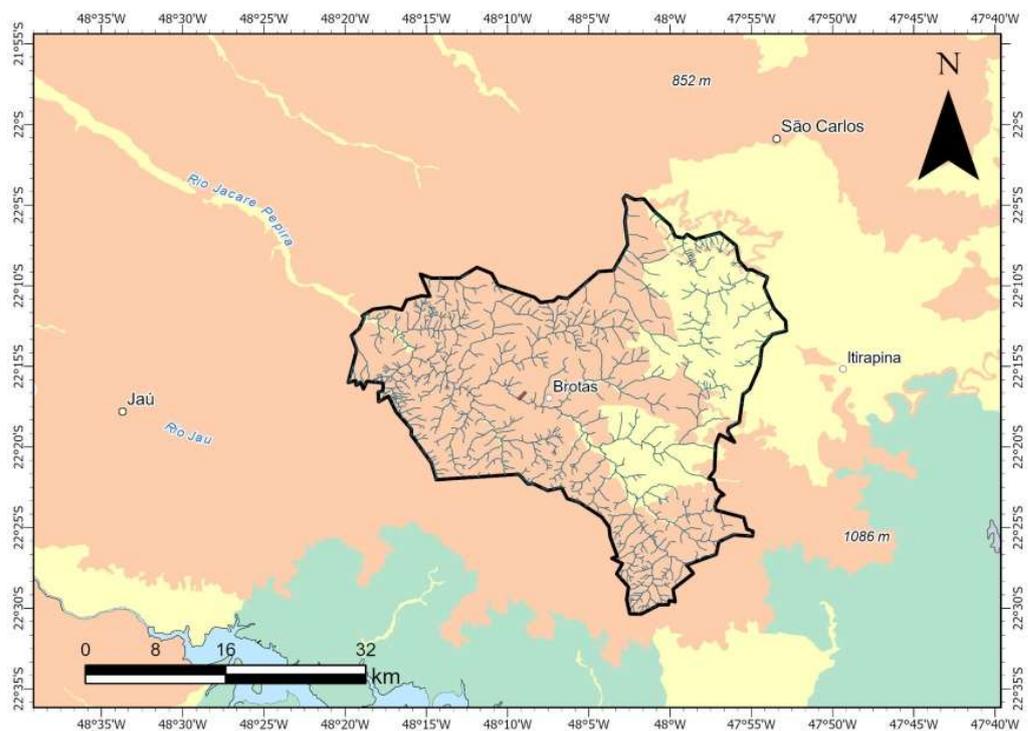
O *piping* é um processo erosivo que gera uma degradação considerável, podendo levar à formação de ravinas e evoluir para voçorocas. Os processos envolvidos no desprendimento de sedimentos das paredes dos *pipes* precisam ser mais bem compreendidos, e o seu reconhecimento é uma etapa crucial para proteger os solos desse tipo de processo erosivo interno.

Uma identificação imprecisa das áreas afetadas pelos *pipings* pode considerar todo o território como inadequado para construção ou, pelo contrário, permitir a urbanização de áreas afetadas pelos abatimentos, sem que haja intervenções necessárias para minimizar ou recuperar parte do processo erosivo.

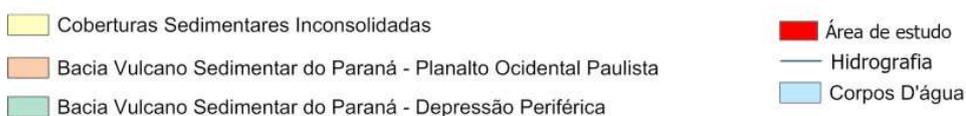
3. CARACTERÍSTICAS REGIONAIS

3.1. Geomorfologia

O Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (Ross e Moroz, 1997) definiu as chamadas unidades morfoestruturais (**Fig. 5**), sendo elas as grandes macroestruturas, como os escudos antigos, as faixas de dobramentos proterozoicos, as bacias paleomesozoicas e os dobramentos modernos e áreas de sedimentação cenozoicas. Na área de pesquisa tais unidades são representadas pela bacia vulcano-sedimentar do Paraná, subdividida em Planalto Ocidental e Depressão Periférica, e pela cobertura de sedimentos inconsolidados mais recentes. Para este trabalho foi utilizada base digital das Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC) do Estado de São Paulo (São Paulo, 2014) que usa como referência os mapas geomorfológico e geológico do Estado de São Paulo de (Perrotta et al., 2005b).



UNIDADES MORFOESTRUTURAIS DE RELEVO - NÍVEL 1



Mapa Base: ESRI/OpenStreetMap - ArcGisPro
Hidrografia e Relevo: UBC- Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico do Estado de São Paulo. INSTITUTO GEOLÓGICO/COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014.
Sistema de Coordenada Geográficas
Datum: SIRGAS2000
Elaboração: Caria Moraes

Figura 5 – Unidades morfoestruturais do relevo.

O município de Brotas está no nordeste da bacia vulcano-sedimentar do Paraná (Fig. 6), no Planalto Ocidental Paulista com as *cuestas* basálticas ou areníticas basálticas. As *cuestas* são formas de relevo bastante peculiares e características das regiões com amplos derrames basálticos, com uma extensa área de domínio sedimentar, de relevo suavizado, interrompido por uma linha sinuosa de escarpas com declive não simétrico, ou seja, suave de um lado e íngreme do outro.

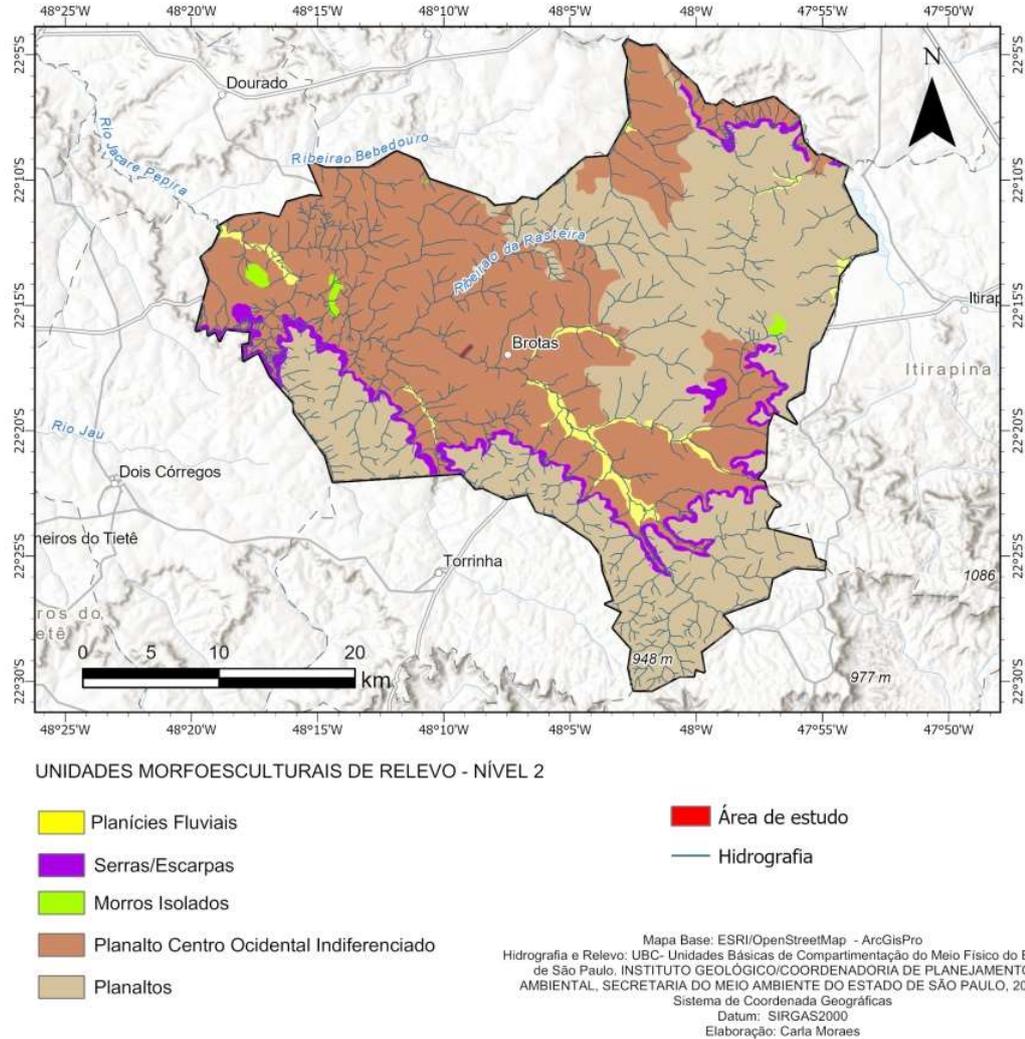


Figura 6 – Unidades morfoesculturais de relevo.

Para entender as formas de relevo é importante compreender que elas são produtos da ação climática ao longo do tempo geológico, com intervenção dos processos tectogenéticos. Dessa forma, as unidades morfoesculturais (Fig. 6) são produtos morfológicos de influência climática atual e pretérita. As morfoesculturas são formadas pelo desgaste erosivo promovido por ambientes climáticos diferenciados tanto no tempo quanto no espaço (São Paulo, 2014).

A morfoescultura é marcada por padrões de fisionomias de relevo desenvolvidas ao longo de muito tempo, através de atividades climáticas que se sucederam no tempo e no espaço, que imprimiram e continuam a imprimir no relevo as suas marcas. Na região de Brotas, estão representadas por planaltos, serras/escarpas e morros isolados. A planície de inundação do Rio Jacaré Pepira é vista somente em uma porção a sul do município, pois a grande velocidade das águas e o aporte de quedas e corredeiras, aliados à geologia predominante no canal do rio, onde a Formação Serra Geral é aflorante, fazem com que não haja uma vasta deposição de sedimentos na região. O mesmo ocorre em demais áreas, com pequenas áreas de planícies fluviais.

Um maior detalhamento das formas de relevo de Brotas foi feito na *Carta de Suscetibilidade* (Fig. 7), indicando também rampas de alúvio-colúvio, depósitos de tálus, escarpas degradadas, vales encaixados, entre outras feições, que são muito importantes para avaliar a suscetibilidade a movimentos de massa e movimentos gravitacionais de massa e inundações (CPRM, 2020).

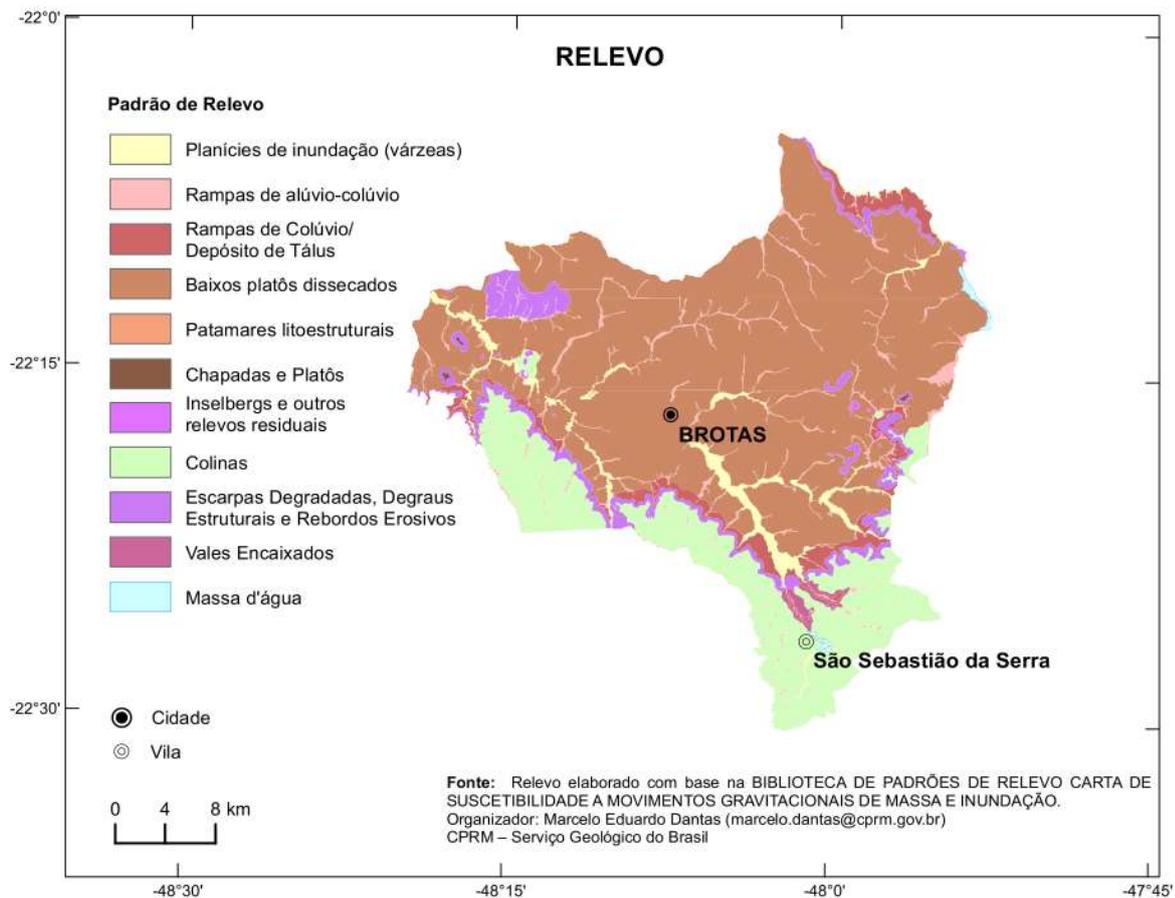
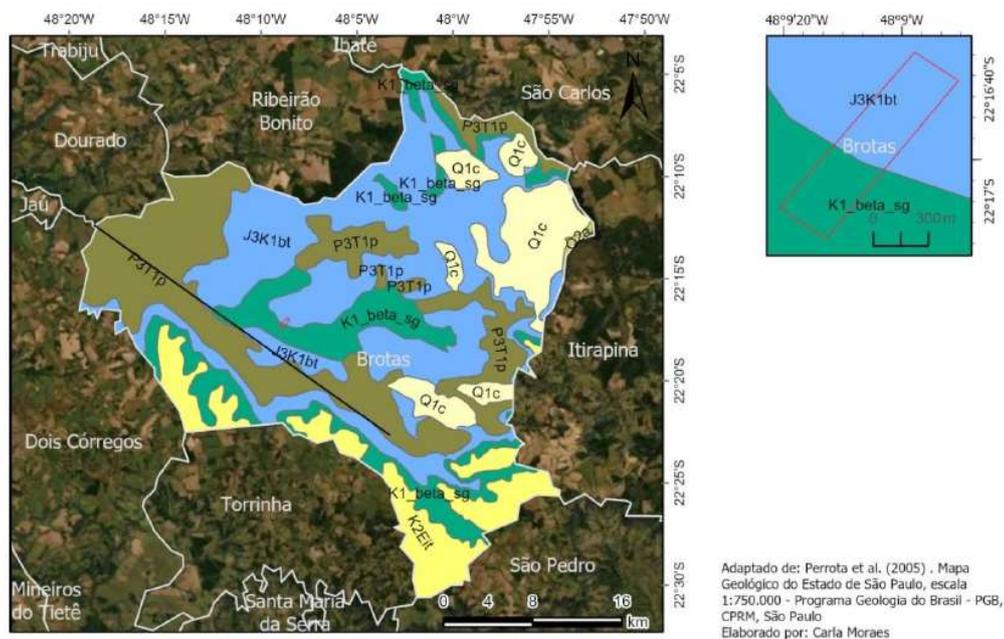


Figura 7 – Cartograma de relevo da Carta de Suscetibilidade (CPRM, 2020).

3.2. Geologia regional

A região está inserida nas unidades geológicas da Província Paraná, representadas por rochas sedimentares pertencentes ao Grupo São Bento – especificamente, as Formações Botucatu e Pirambóia – e por rochas magmáticas pertencentes à Formação Serra Geral. Mais ao sul temos a Formação Itaqueri. Sobrepostos a elas, temos depósitos quaternários colúvio-eluvionares e aluvionares (Fig. 8).



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

SIGLA - UNIDADE

| | |
|---|--|
|  Q2a - Depósitos Aluvionares |  Falhas geológicas |
|  Q1c - Depósitos Colúvio-eluvionares |  Limites Municipais |
|  P3T1p - Formação Pirambóia |  Área de estudo |
|  K2Eit - Formação Itaqueri | |
|  K1_beta_sg - Formação Serra Geral | |
|  J3K1bt - Formação Botucatu | |

Figura 8 – Unidades Litoestratigráficas (Perrotta et al., 2005b).

De acordo com Zalán et al. (1987, apud Perrotta et al., 2005a), a Formação Pirambóia tem arenitos médios e finos com cores esbranquiçadas, avermelhadas e alaranjadas, com geometria lenticular bem desenvolvida. As estratificações são cruzadas acanaladas de porte grande e laminações cruzadas. Aceita-se, hoje, que a Formação Pirambóia corresponda à evolução de um extenso campo de dunas eólicas. O contato superior com os derrames da Formação Serra Geral é concordante, com ocorrência de camadas do topo da Formação Botucatu interdigitadas nos basaltos da Formação Serra Geral (Assine et al., 1994, apud Perrotta et al., 2005a).

A Formação Botucatu é composta essencialmente por arenitos finos a grossos, de coloração avermelhada, foscos, bem arredondados e com alta esfericidade, dispostos em *sets* e/ou *closets* de estratificações cruzadas, planares ou acanaladas, de médio a grande porte. Os estratos cruzados são compostos, na sua porção mais íngreme, por lâminas alternadas de fluxo e queda livre de grãos que se interdigitam em direção à base, com laminações transladantes cavalgantes. Apresentam alternância de lâminas de arenitos finos e médios, resultando numa bimodalidade textural característica. Têm sido interpretados como depósitos residuais de dunas eólicas crescentes e lineares acumuladas em extenso mar de areia (*sand sea*). A ausência de depósitos de interdunas úmidos permite interpretar a Formação Botucatu como um sistema eólico seco (Scherer, 1998, apud Perrotta et al., 2005a).

A Formação Serra Geral é resultado de intenso magmatismo fissural e intrusões, representado na forma de uma espessa cobertura de lavas, associado a uma extensa rede de diques e múltiplos níveis de soleiras intrudidos na pilha sedimentar. Recobrem mais de um milhão de metros quadrados da Bacia do Paraná, abrangendo toda região centro sul do Brasil e fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina. A Formação Serra Geral constitui, em conjunto com a Formação Botucatu, a denominada Bacia Serra Geral, correspondendo à Supersequência Gondwana III, segundo a concepção de Milani (1997, apud Perrotta et al., 2005a).

Os derrames basálticos da Formação Serra Geral têm textura afanítica e coloração predominantemente escura, apresentando, também, intercalações de lentes e camadas arenosas de textura fina a média, além de estratificação cruzada.

A Formação Itaqueri consiste em membros alternados de arenitos com cimento argiloso, folhelhos e conglomerados, que são eventualmente silicificados e arcoseanos (Perrotta et al., 2005a). É datada entre o Cretáceo e o Paleógeno. Argilas e argilas para refratários são os principais recursos encontrados, sendo ainda

referenciada a ocorrência de diamantes em depósitos aluvionares de rios que drenam essa unidade. O ambiente é definido como fluvial – com a deposição realizada em meio de alta energia –, sujeito a bruscas mudanças de velocidade de transporte, sedimentos clásticos grosseiros (fanglomerados, de ambientes do tipo leques aluviais) (Perrotta et al., 2005a).

Há também sedimentos aluvionares quaternários, presentes nas planícies fluviais das principais drenagens da região (Rio Jacaré Pepira). Nos locais onde predominam os arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia, a erosão é muito intensa.

3.3. Unidades Aquíferas

Sobre os reservatórios de água subterrânea da região, é preciso citar que ali temos muitos aquíferos importantes. Nos basaltos temos unidades fraturadas no município de Brotas (Aquífero Serra Geral), porém os mais representativos são os aquíferos granulares (Botucatu, Pirambóia, Itaqueri) (Lorandi et al., 2014).

O Aquífero Sedimentar do Itaqueri é considerado poroso e livre, com areias de granulação variada e boa transmissividade. De acordo com Lorandi et al. (2014), esse aquífero tem altos valores de permeabilidade e é naturalmente vulnerável à contaminação.

Trata-se de uma formação geológica composta por sedimentos porosos que permitem a passagem da água e, como a água pode fluir livremente através desses poros, é considerado um aquífero livre. A água presente nesse aquífero pode ser facilmente utilizada para abastecimento humano, agricultura e outras necessidades, desde que seja gerenciada de forma sustentável para evitar a exaustão do recurso.

O Botucatu e o Pirambóia são relacionados ao Aquífero Guarani, definido como aquífero sedimentar, poroso e livre, composto essencialmente por arenitos de granulação fina a média. O Aquífero Guarani é composto por diversas camadas de sedimentos, e as formações geológicas de Botucatu e Pirambóia são algumas das camadas que compõem o sistema. Essas camadas são caracterizadas por sua porosidade e capacidade de armazenar água subterrânea. A homogeneidade do arenito facilita o surgimento de poros interconectados que auxiliam no armazenamento de grandes quantidades de água subterrânea (Lorandi et al., 2014).

O trabalho de Lorandi et al. (2019), intitulado *Carta de Unidades Aquíferas do Município de Brotas*, aponta que 85% do município é considerado como área de recarga do Aquífero Guarani, sendo que a maior parte do uso do solo é composta por atividades agrícolas. Aponta, ainda, que estudos desta natureza, que visam a analisar a interferência humana e indicar práticas adequadas de preservação dos reservatórios, tornam-se essenciais para garantir a qualidade e a quantidade de água subterrânea disponível.

A *Carta de Unidades Aquíferas* é uma ferramenta importante para auxiliar na delimitação e na restrição de zonas ao uso e à ocupação, bem como para embasar o planejamento de ações por parte de gestores públicos, em prol da conservação dos recursos hídricos subterrâneos, auxiliando na delimitação e na restrição de zonas para o uso e ocupação do solo, e levando em consideração as características e potencialidades dos aquíferos presentes em determinada região. A delimitação das unidades aquíferas ajuda a compreender a complexidade do sistema aquífero e a gerenciar os recursos hídricos de forma sustentável. Isso permite tomar decisões informadas sobre o uso da água subterrânea, minimizando conflitos entre diferentes usos, como abastecimento público, agricultura, indústria e preservação ambiental. Com base nas características das diferentes unidades aquíferas, a *Carta de Unidades Aquíferas* pode sugerir restrições ou diretrizes para uso e ocupação do solo, desempenhando um papel crucial na gestão responsável e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, bem como ajudando a equilibrar as necessidades humanas e industriais com a preservação dos aquíferos e do meio ambiente.

Estudos sobre os reservatórios aquíferos de Brotas, aliados a estudos mais aprofundados sobre a dinâmica superficial da região, devem ser analisados de forma integral e ampla. Assim se torna possível um melhor direcionamento das diretrizes gerais da política urbana do município, a fim de garantir desenvolvimento sustentável e proteção ao meio ambiente natural.

4. GEOLOGIA LOCAL

Na área de pesquisa, região da Bacia do Córrego Santa Maria, afloram os arenitos da Formação Botucatu, Grupo São Bento. Ao sul temos a Formação Serra Geral (Fig. 9).



UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

SIGLA - UNIDADE

- J3K1bt - Formação Botucatu
- K1_beta_sg - Formação Serra Geral

Área de estudo

Adaptado de: Perrotta et al. (2005) . Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000 - Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM, São Paulo
Elaborado por: Carla Moraes

Figura 9 – Mapa Geológico local da área de estudo (adaptado pela autora)

São arenitos datados do Jura-Cretáceo com granulação fina a grossa, coloração rósea e avermelhada. Sua espessura tem grande variação, com estratificação cruzada, planar ou acanalada (Fig. 10), de médio a grande porte. São interpretados como depósitos residuais de dunas eólicas crescentes e lineares acumuladas em um extenso mar de areia (Perrotta et al., 2005a). Por essas características e por ter grandes porosidade e permeabilidade, os arenitos da Formação Botucatu são

excelentes aquíferos, sendo explotados em diversos estados brasileiros, fazendo parte do denominado Aquífero Guarani.



Figura 10 – Afloramento do arenito Botucatu no ponto denominado portal do Arco, no local de estudo (Foto:autora)

Os basaltos são datados do Cretáceo, com uma diversidade de rochas derivadas de derramamentos basálticos com textura afanítica e de coloração predominantemente escura, apresentando, também, intercalações de lentes e camadas arenosas de textura fina a média, além de estratificação cruzada (Perrotta et al., 2005a).



Figura 11 – Amostra de basalto encontrada próxima à sede da Fazenda Santa Maria.

Em alguns pontos da área encontramos depósitos colúvio-eluvionares. São porções de material transportado que raramente ultrapassam 10m, com camadas formadas por solo e fragmentos de rocha localizados ao longo e no pé das encostas, com muita folha seca e vegetação superficial, sendo bem difícil sua delimitação sem que haja remoção da serapilheira. Logo, tais depósitos não foram alvo de maior detalhamento.

Na confluência do Córrego Santa Maria com o Rio Jacaré Pepira, já na região mapeada como Basaltos e Diabásios da Formação Serra Geral, temos uma área úmida, um alagadiço, mas onde não encontramos deposição de material. Por conta da forma do relevo, o material carregado flui somente no canal principal, sem área de extravasamento, seguindo para o rio principal.

No fundo do vale, nas proximidades do Rio Jacaré Pepira, também existem faixas com deposição aluvionar, não mapeáveis na escala de trabalho. São pequenos depósitos do Quaternário de sedimentos transportados e depositados por influência dos movimentos dos rios. Como o vale do Rio Jacaré Pepira é muito encaixado e as águas possuem alta velocidade e turbidez, a deposição é mínima nas várzeas.

5. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Em 1902, o coronel J. Clibborn, da Marinha Real Britânica, fez o que talvez seja a primeira descrição conhecida de *piping*, em um artigo técnico descrevendo inúmeras falhas de barragens. Nesse trabalho é explicado um fenômeno geotécnico no qual a água que flui através de um solo saturado pode erodir partículas finas do solo, criando canais subterrâneos que podem causar o colapso das estruturas acima, incluindo barragens. Embora o termo *piping* não seja mencionado explicitamente, é descrito o processo de “soprar areia através de orifícios” (Clibborn, 1902, apud Robbins e Van Beek, 2015). A afirmação sobre o fenômeno: “As nascentes no chão de um açude seguem continuamente a retirar areia, sendo então perigosas, pois causam a formação de cavidades longas e contínuas, ao longo das quais as correntes fluirão com maior força e maior poder de transportar areia” (Clibborn, 1902).

Doyle (1903) analisa as constatações de Clibborn e discute sobre os experimentos. Clibborn construiu um tubo horizontal de 90 pés de comprimento (27,4m) e 2 pés de diâmetro interno (aproximadamente 61cm), com um tubo de suporte que podia exercer uma pressão de até 20 pés (aproximadamente 6m). Além disso, havia todos os acessórios para determinar pressões e descargas. Os experimentos provaram que as pressões transmitidas através da areia eram simplesmente determinadas pelo gradiente hidráulico, como já era aceito pela prática. Além disso, as descargas de água de percolação eram muito pequenas (Doyle, 1903, apud Clibborn, 1902). Porém o trabalho não apresentava nenhuma forma preventiva do processo erosivo.

O primeiro estudo para se prevenir a erosão interna foi feito em 1910 por W.G. Bligh, um engenheiro britânico da Marinha Real que também passou um tempo significativo na Índia no final do século XIX. A ele também foi atribuído o uso do termo *piping*: “A segurança de uma estrutura sujeita à pressão da água, fundada em um estrato poroso, pode ser comprometida por um processo gradual de lavagem das partículas de areia pela percolação – denominado de *piping*” (Bligh, 1910, apud Robbins e Van Beek, 2015).

A popularidade do termo para esse tipo de erosão é citada por Fletcher e Karl (1952), que dizem que a palavra *piping* era utilizada por engenheiros e agricultores por muitos anos para um tipo de erosão no qual os subsolos erodem sob a superfície em canais, avançando internamente (*pipes*). Naquele contexto, usaram a palavra

piping para descrever o fenômeno geotécnico em que a água que flui através de um solo saturado e erode partículas finas do solo, criando canais subterrâneos. Essa erosão pode ser particularmente preocupante em estruturas como barragens, onde pode levar a falhas catastróficas.

O termo *piping* ganhou popularidade desde então e é amplamente reconhecido na engenharia geotécnica e em discussões sobre a segurança de infraestruturas como barragens e diques. A descrição e o entendimento de como o *piping* ocorre são fundamentais para o projeto e a manutenção adequados de estruturas que estão sujeitas a esse tipo de erosão. O trabalho também cita que a ação de animais escavadores pode ter sido deflagradora do processo em alguns vales fluviais do Arizona (EUA), como o caso de tocas de roedores. Isso também é levado em consideração na área de pesquisa, já que foram encontradas tocas de tatu e formigueiros que podem fragilizar o subsolo e criar condições para gerar novos caminhos preferenciais da água.

Cinco condições devem estar presentes para que o *piping* ocorra. São elas: 1) Deve existir uma fonte de água; 2) a taxa de infiltração da superfície deve exceder a taxa de permeabilidade em alguma camada do subsolo; 3) deve existir uma camada erodível logo acima da camada de retardo; 4) a água acima da camada de retardo deve ter um gradiente hidráulico para fazê-lo fluir (isso pode ser causado pelo fato de uma camada ter uma inclinação definida ou pelo fato de a própria água se acumular para fornecer a inclinação; a água deve estar sujeita a uma força que a empurra ladeira abaixo em direção à saída); 5) deve haver uma saída para o fluxo de água (Fletcher e Karl, 1952; Fletcher et al., 1954). Aqui, entendemos que a *camada de retardo*, como ele define, é um material não erodível ou impermeável, que pode ou não existir em um cenário favorável ao *piping*; o que deve necessariamente existir são porções mais permeáveis sobrepostas a porções menos permeáveis, ou com regiões de fraturas ou estratificações que favoreçam a concentração do fluxo.

Pierson (1983) relata ocorrências de *piping* em quase todas as regiões do mundo. Demonstrando que não há um único conjunto de fatores iniciais e de desenvolvimento associado à origem e à evolução dessas estruturas, ele resume os principais mecanismos formadores de “*Soil Pipes*” (**Tabela 1**).

Tabela 1 – Várias origens relatadas de formação *pipes* (Pierson, 1983).

| Mecanismo de formação de <i>pipes</i> | Fontes |
|--|--|
| Erosão fluvial subsuperficial retrogressiva promovida por infiltração concentrada com gradiente hidráulico íngreme e solos de baixa coesão – <i>piping</i> , no sentido de engenharia. | Fletcher et al. 1954; Krynine e Judd, 1957; Zaslavsky e Kasiff, 1965; Berry, 1970; Jones, 1971. |
| Rachadura por dissecação do perfil do solo superior, seguida de alargamento no fundo das fissuras por erosão fluvial. | Jones, 1971; Newson, 1976; Laffan e Cutler, 1977; Bryan et al., 1978; Rodda, 1978. |
| Penetração do solo por raízes crescentes que, após a morte e deterioração, deixam aberturas tubulares, denominados <i>canais de raiz</i> . | Lutz e Griswold, 1939; Hursh e Hoover, 1942; Reeve e Kirkham, 1951; Gaiser, 1952; Hoover, 1962; Whipkey, 1965; Aubertin, 1971; Chamberlin, 1972; Beasley, 1976; De Vries e Chow, 1978. |
| Ação escavadora de vermes, insetos e pequenos mamíferos. | Anthony, 1916; Ellison, 1946; Hoover, 1962; Whipkey, 1965; Aubertin, 1971; Price, 1971; Beasley, 1976; Newson, 1976; Lundgren, 1978; Rodda, 1978; Thorn, 1978. |

Esse fenômeno ocorre mais comumente em depósitos aluviais ou em terrenos onde a estratificação natural favorece a concentração do fluxo em estratos mais permeáveis. De acordo com Parker et al. (1990), o *piping* é ainda mais recorrente em materiais fofos e inconsolidados, como alúvios e colúvios argilosos e siltosos, *loess*, cinzas e tufos vulcânicos, mas também pode afetar rochas duras e consolidadas, como xistos, argilitos, siltitos, arenitos e brechas vulcânicas. Para o autor, sedimentos siltosos com 20 a 25% de argila esmectita e alto teor de sódio são especialmente suscetíveis a *piping*.

Parker et al. (1990) citam as causas mais comuns do início do *piping* em áreas secas, como seca sazonal, desnudação da terra e infiltração da drenagem da superfície, auxiliada por atividades humanas como desmatamento, queimadas recorrentes, excesso de pastagem e irrigação excessiva.

Hagerty (1991) diz que, frequentemente, a erosão interna em solos arenosos cria condutos cilíndricos ou tubos, e por isso essa forma de erosão foi chamada de *piping*. Mears (1968, apud Hagerty, 1991) define *piping* como “erosão subterrânea iniciada por águas percolantes que removem partículas sólidas [...] para produzir condutos subterrâneos tubulares”.

Jones (2004) define *piping* em solos (erosão em túneis) como a formação de vazios lineares por fluxo de água concentrado em solos ou sedimentos

inconsolidados, que podem causar o colapso do solo superficial e formar ravinas descontínuas, sendo que ocorrem em todo mundo, variando de poucos milímetros a vários metros de diâmetro. À medida que os tubos se desenvolvem, eles tendem a criar redes de drenagem subterrânea semelhantes aos fluxos superficiais. Esse fenômeno é visto na área da cabeceira do Córrego Santa Maria, com um canal principal da drenagem, que é capturado/confinado em alguns pontos, fluindo em fendas verticais e cavernas, que depois ressurgem em um ponto de saída do maciço e seguem pela superfície.

Em relação ao desenvolvimento, o trabalho de Jones (2004) afirma que ocorrem dois processos importantes. O primeiro está associado à força produzida pela infiltração da água. Essa força precisa ser suficiente para transportar uma parcela do material do estrato infiltrado até o ponto de descarga, que pode ser na encosta de uma colina, na face de um penhasco ou na margem de um rio (como é no caso da área de estudo desta pesquisa), formando um túnel. O segundo processo envolve a expansão progressiva do túnel formado (também chamado de conduto), através da tensão exercida pela água corrente.

Ainda podemos afirmar que os *pipes* podem ser tanto a causa quanto o produto do ravinamento/voçorocamento, pois essas erosões ou canais podem se formar quando o teto dos tubos colapsa; por outro lado, as ravinas podem desencadear a formação de tubos, aumentando o gradiente hidráulico circundante (Jones, 2004).

O *piping* se dá pela remoção de partículas do interior do solo, formando canais que aumentam em sentido contrário ao do fluxo d'água e provocando colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a voçoroca ou criam novos ramos (Tominaga et al., 2009).

O trabalho de Silva (2011) estudou a margem direita do Rio das Pombas, em Guarapuava (Paraná), onde foram identificados processos de erosão em túneis (*pipes*), com feições típicas, tais como subsidência do teto do túnel e estruturas de abatimento, que tendem a evoluir para feições superficiais. O autor afirma que a instalação desse processo erosivo depende de um conjunto de fatores, destacando-se como condicionantes as propriedades da cobertura superficial – tais como: textura, macroporosidade, composição granulométrica, densidade, porosidade e constituintes químicos dos materiais – e aquelas relativas às condições hidrológicas e à topografia da encosta. Buscando-se reconhecer e caracterizar a cobertura superficial do setor de baixa encosta, foram realizadas análises granulométricas, de densidade aparente,

real e porosidade total, construção de topossequências e análises químicas de difração de raios-X. Os resultados indicaram que o material que recobre o setor de baixa encosta, onde aparecem os túneis, apresenta textura arenosa devido às propriedades de microagregação gerada pelo argilomineral gibbsita, deixando o material com porosidade alta e favorecendo, assim, a circulação de água em subsuperfície.

O trabalho de Bernatek-Jakiel and Poesen (2018) salienta que *piping* em solos se desenvolvem em vários climas, litologias, pedologias e usos e ocupações de solo, sugerindo que existem mecanismos diferentes que levam à dispersividade e à erodibilidade dos solos.

De acordo com Nieber et al. (2019), *piping* é um caso extremo de fluxo não uniforme por caminhos preferenciais, a velocidades suficientes para erodir as paredes internas, o que é encontrado em diversos pontos da área pesquisada em Brotas, com várias ocorrências de erosão ativa, sendo evidenciadas por deslizamentos nas laterais dos condutos e pelas feições erosivas.

O *piping* é um processo de erosão de solo iniciado por um fluxo de água subsuperficial concentrado, que pode se desenvolver em paisagens naturais e antropogênicas e causar diversos impactos ambientais. O fenômeno atua como um modificador do relevo, levando à subsidência do solo em uma curta escala de tempo (Bovi et al., 2020). Tais abatimentos generalizados são vistos em diversas regiões nos arredores dos pontos de colapsos conhecidos da Bacia do Córrego Santa Maria, evidenciando uma provável continuidade dos *pipes*, o que se reflete em porções de solo rebaixadas concordantes com a direção inferida pelos tubos.

Reconhecer as fontes de coesão em solos sujeitos a *piping* pode ajudar a compreender o mecanismo de formação do *piping* (Bernatek-Jakiel et al., 2020). Sabemos que a coesão é a força pela qual as partículas conseguem se unir. De acordo com Jones (2004), a coesão é importante na mecânica do solo, pois é um dos dois parâmetros (ao lado do ângulo de atrito interno) que caracterizam a resistência de um solo a uma tensão aplicada (embora os dois parâmetros nem sempre sejam independentes um do outro). Solos coesivos geralmente contêm uma quantidade significativa de argila, que é capaz de cimentar o solo internamente. Por outro lado, a areia seca é denominada não coesiva (pois as partículas são facilmente movidas de forma isolada), com a única resistência ao cisalhamento proveniente do atrito interno das partículas de areia. Quando a areia está úmida (embora insaturada), a tensão

superficial dos meniscos da água entre os grãos fornece uma aparente coesão à areia. Isso é removido quando a areia seca ou fica saturada. As rochas são comumente altas em ambos os parâmetros. A coesão torna-se proporcionalmente mais forte à medida que o tamanho do grão diminui, permitindo que sedimentos de grãos finos (lamas, sedimentos etc.) permaneçam estáveis em encostas de alto ângulo. Esse tipo de entendimento é muito importante para compreender o processo de *piping* na área de estudo, pois é sabido que o controle dos processos erosivos na Bacia do Córrego Santa Maria se dá pelas variações de gradientes hidráulicos e conseqüentemente pelas variações do nível e do fluxo de água, o que faz com que existam grandes variações na coesão do substrato ali encontrado, que é predominantemente de arenitos e seus produtos de alteração.

O trabalho de Bernatek-Jakiel e Poesen (2018) afirma que o *piping* em solos se desenvolve em vários climas, litologias, pedologias, usos e ocupações de solo, sugerindo que existem mecanismos diferentes que levam à dispersividade e à erodibilidade dos solos.

Existem alguns trabalhos que usam técnicas geofísicas para detecção de cavidades em subsuperfície formadas por erosão interna. Dourado et al. (2001) utilizaram gravimetria, eletrorresistividade e radar de penetração no solo (GPR), na região de Descalvado/SP, em arenitos das Formações Pirambóia e Botucatu, obtendo resultados satisfatórios na detecção de cavidades até a profundidade teórica de 15 metros. Os autores afirmam que a heterogeneidade dos terrenos onde se localizam as cavidades e a própria complexidade do alvo (preenchimento, formato, profundidade etc.) fazem com que não exista uma abordagem única que indique qual método geofísico é o mais adequado para a detecção e que, por vezes, a integração de mais de um método geofísico torna-se uma boa solução para localizar e caracterizar cavidades.

Dados de levantamento geofísico por eletrorresistividade feito na Bacia Hidrográfica do Rio Maracujá (Ouro Preto/MG), por Bacellar et al. (2001), sugerem que o crescimento das voçorocas muitas vezes representa feições erosivas antigas, uma prova de que a erosão pode ser recorrente e que tende a avançar pelas mesmas rotas já seguidas anteriormente, certamente devido ao condicionamento hídrico subsuperficial. Isso é bastante visível na área de pesquisa, já que podemos identificar feições erosivas estáveis e *pipings* ativos na mesma região, indicando um evento erosivo pretérito na Bacia do Córrego Santa Maria.

O trabalho de Verachtert (2011) visava compreender que condições precisam ser cumpridas para induzir o *piping* em Flemish Ardennes, na Bélgica. Técnicas-padrão de geofísica não foram bem-sucedidas na detecção de *piping* em solos siltosos que ainda não colapsaram, de profundidade variando entre 0,6m e 0,3m e diâmetro variando de 1,1m a 1,3m. Foi apresentado um estudo de caso para testar a adequação dos métodos *Ground-Penetrating Radar* (GPR), *Electrical Resistivity Tomography* (ERT) e *ElectroMagnetic Induction* (EMI) em uma área perto de Brakel (Bélgica) para identificar *pipings* naturais do solo em uma pequena bacia hidrográfica caracterizada por solos derivados de *loess*.

Um trabalho utilizando a eletrorresistividade (ER), através da técnica de Tomografia Elétrica (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT), caracterizou a distribuição espacial e a conectividade dos túneis em subsolo de 0,04m de diâmetro em uma encosta localizada na floresta experimental da Universidade de Idaho, nos Estados Unidos. Os autores montaram um bloco tridimensional a partir de seções geoelétricas adquiridas com espaçamentos entre eletrodos de 0,22m e 1m. No entanto, a falta de contraste entre os canais e a camada sobrejacente em conjunto com a pouca cobertura de dados nas proximidades de canais maiores limitaram a caracterização efetiva dos alvos. Ao final, os autores concluíram que o uso da ERT seria adequado para detectar túneis de maior porte em meios com maior contraste de resistividade (Leslie e Heinse, 2013, apud Jesus, 2020). Por esse motivo, acreditamos que a área de estudo na Bacia do Córrego Santa Maria utilizou-se de ERT adequadamente, pois os túneis são de grandes dimensões e apresentam alto contraste de resistividade entre os diferentes estratos.

Franzini (2015) estudou a voçoroca do Tucunzinho, em São Pedro/SP, com o uso de eletrorresistividade para compreender melhor o contexto da formação dos *pipes* em relação à geologia local. O resultado demonstrou eficácia na identificação de cavidades no solo, porém sem precisão com relação ao seu formato. Com o conjunto de anomalias e interpretação dos dados foi possível compreender a extensão e a continuidade, bem como relacionar a possíveis eventos geológicos que colaboraram com esse processo.

Carrazza (2016) também estudou essa mesma região utilizando eletrorresistividade para um diagnóstico de produtos da evolução de voçorocas no município de São Pedro/SP, e a integração lateral das seções em mapas de isovalores

para a profundidade de ocorrência das cavidades revelou o prolongamento e a ramificação de *pipings* em porções mais internas do terreno.

Um levantamento foi feito na bacia hidrográfica de Bereźnica Wyżna, nas montanhas Bieszczady (Cárpatos Orientais, Polônia), onde os *pipes* se desenvolvem nos Cambissolos a uma profundidade média de cerca de 0,7-0,8m. Foram utilizados métodos geofísicos para detectar os limites do movimento lateral da água, promovendo o desenvolvimento de *pipes*, além de reconhecer a estrutura interna dos materiais subjacentes. Os estudos combinaram técnicas de mapeamento geomorfológico com ERT e GPR para caracterizar sistemas de túneis em subsolo nas áreas montanhosas do sudeste da Polônia. Como resultado, os dados de GPR sugeriram uma densidade de canais superior à estimada inicialmente pelas técnicas superficiais, e através dos dados de ERT verificou-se que os túneis na área de estudo, correspondentes às zonas de alta resistividade, desenvolveram-se no contato entre o solo e o leito rochoso. Ao final, os autores concluíram que a integração dos métodos geofísicos teve papel importante para estabelecer a densidade e a distribuição do sistema de túneis, detectar a região de ocorrência dos processos erosivos responsáveis pela formação dos canais e reconhecer a estrutura interna dos materiais (Bernatek-Jakiel e Kondracka, 2016).

Intrieri et al. (2018) utilizaram pesquisas geofísicas, medições de microgravidade e eletrorresistividade para estudar uma área propensa a sumidouros de Il Piano (Ilha de Elba, Itália Central). Sugeriram que o bombeamento de água do aquífero cárstico seria o fator desencadeante e que alguns sumidouros causados por cavidades subterrâneas desencadeadas por bombeamento de água induziram o *piping* na cobertura sedimentar.

Bovi et al. (2020) utilizaram-se de testes geofísicos de resistividade de corrente direta (resistividade DC), com seis linhas de tomografia de resistividade elétrica, para mapear os *pipes* e verificar a conexão entre os túneis subterrâneos em uma área de floresta tropical em Piracicaba/SP. Concluíram que, naquele local, o fator decisivo que desencadeia o processo parece ser a presença de uma camada permeável que fica logo acima da camada impermeável, podendo interromper a infiltração da água e facilitar o movimento lateral da água. Os sumidouros causados por cavidades subterrâneas, desencadeadas por bombeamento de água, induziram o *piping* na cobertura sedimentar.

O trabalho de Jesus (2020) fez uso de eletrorresistividade e Radar de Penetração no Solo (GPR) com o objetivo de mapear e caracterizar túneis em subsuperfície no município de Candói/PR. Métodos geofísicos foram aplicados na investigação de cavidades, baseando-se no contraste das propriedades físicas das cavidades e do meio no qual estas se encontram, considerando que o GPR já foi utilizado de forma bem-sucedida para determinar indiretamente a conectividade entre os canais de um sistema de erosão em túneis no subsolo. Além da conectividade, foi possível estimar o diâmetro dos canais preenchidos por água (Holden, 2004 apud Jesus, 2020), portanto esse também foi o método escolhido para uma área em Candói/PR, porém os resultados apresentados não foram satisfatórios naquela pesquisa.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho utilizou-se de métodos superficiais de estudos de erosões, tais como: mapeamento geomorfológico de estruturas de colapso, fotos e imagens aéreas, análise de modelo digital de elevação. Foram realizados: o cadastramento das estruturas de abatimento e subsidência do teto; a caracterização de túneis; o levantamento expedito da encosta; medições sistemáticas; reconhecimento e identificação de feições erosivas e processos. A fim de investigar os túneis em subsolo, são necessárias soluções e metodologias aprimoradas para caracterização geométrica dos canais, identificação de conectividade, controle do desenvolvimento do sistema de túneis em subsolo e detecção de áreas afetadas. Para isso utilizou-se a geofísica.

A primeira visita de reconhecimento da área foi feita em março de 2016, quando se fez uma avaliação de todo o município de Brotas/SP e dos seus vetores de crescimento urbano, com o objetivo de detectar áreas de risco alto e muito alto a movimentos de massa e inundação. Na ocasião, teve-se conhecimento dos processos de abatimento do solo e erosões no Córrego Santa Maria. Desde então o assunto foi tema de pesquisa e interesse, sem ambições acadêmicas.

Em 2019 foi iniciada pela CPRM-SGB a *Carta de Suscetibilidade de Movimentos Gravitacionais de massa e inundações* no município de Brotas. O trabalho de campo foi feito em julho de 2019, em conjunto com uma equipe de pesquisadores e pesquisadoras, como componente da equipe e parte interessada. Naquela ocasião também foi feito um levantamento fotográfico com uso de drone, para melhor reconhecimento da área e arredores, já com foco nos processos erosivos no município de Brotas e também na área de estudo.

Em seguida foi retomada a fase da pesquisa para levantamento de estudos da região, pesquisa bibliográfica sobre processos erosivos existentes, fatores geológicos e condicionantes geotécnicos, hidrogeológicos e pedológicos. Uma pesquisa também foi feita sobre métodos geofísicos para detecção de *pipings*, envolvendo suas facilidades e limitações. Estudos relevantes foram compilados rotineiramente na ferramenta *Mendeley* como forma de armazenamento e também para facilitar as citações bibliográficas.

Após essa etapa foi escolhido o método geofísico da eletrorresistividade para a detecção das cavidades e as atividades de campo foram realizadas de 21 a 24 de

outubro de 2019, com apoio da equipe de geofísica da CPRM-SGB, iniciando-se com abertura de picadas, retirada manual da serapilheira e estaqueamento dos eletrodos. As coordenadas foram registradas com o GPS portátil Garmin 62sc, admitindo-se uma precisão máxima horizontal de 5m e vertical de 10m. Essas são também as precisões dos produtos geofísicos gerados (**Fig. 12**).



Figura 12 – Levantamento Geofísico da linha 1.

A **figura 13** é um produto do reconhecimento preliminar da região para determinar os pontos para ensaio geofísicos, com delimitação dos locais onde os abatimentos do terreno eram visíveis e onde existiam os colapsos e as fendas já conhecidas, para então propor a direção, o sentido e os pontos de interesse dos ensaios geofísicos. Esse trabalho foi feito com GPS de mão e uso de Google Earth.

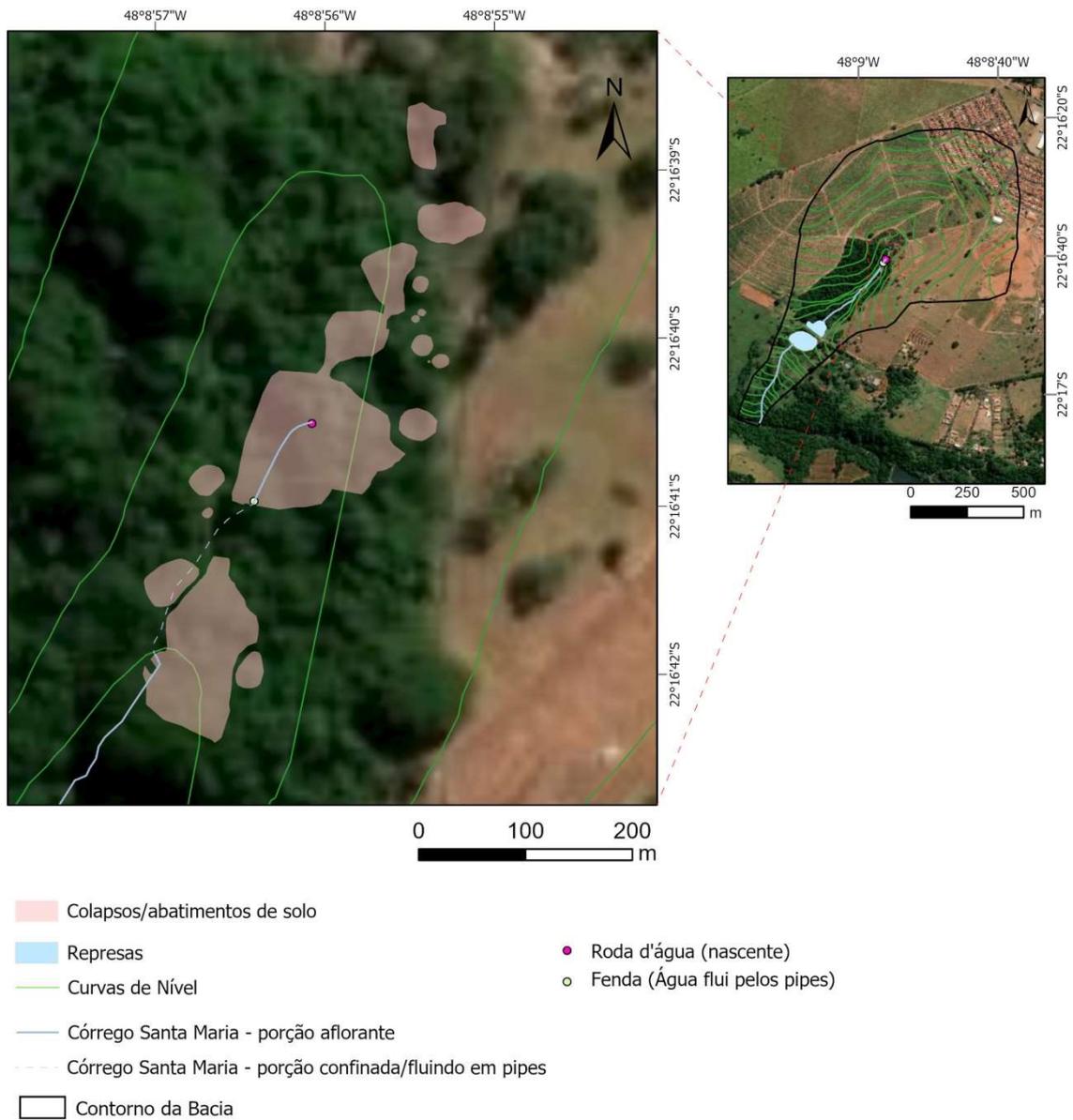


Figura 13 – Mapa preliminar dos colapsos e abatimentos.

Com o uso de métodos geofísicos foi possível obter dados subsuperficiais para um melhor diagnóstico desses processos erosivos. A geofísica é uma ferramenta de investigação indireta que possibilita compreender a evolução de erosões internas, assim como o fenômeno de *piping*. Por meio de medidas de contraste de resistividade elétrica entre o solo e o espaço vazio da cavidade, e da comparação com outros modelos existentes, foi possível detectar alvos de assinatura geoeletrica de alta resistividade, devido à ausência de preenchimento, bem como porções saturadas, topo rochoso e variações do tipo de rocha, deixando o modelo geológico mais preciso.

Utilizando o método de eletrorresistividade (ERM), associado com uso de sondagem elétrica vertical (SEV), esses contatos e profundidade das variações

podem ser calibrados, incluindo também a direção dos fluxos da água. O levantamento de dados históricos, o mapeamento da superfície e da topografia interna da caverna e o acompanhamento dos contornos erosivos também foram etapas muito importantes para compreender o cenário atual da erosão e para acompanhar a previsão do modelo criado.

Foram realizados três caminhamentos elétricos (CEs) e uma sondagem elétrica vertical (SEV) na região. Os CEs foram realizados na tentativa de mapear a localização subterrânea das cavernas e inferir as direções dos fluxos subterrâneos. A SEV foi realizada sobre a principal fenda, com intuito de estabelecer o comportamento geolétrico da cavidade conhecida presente no arenito (**Fig. 14**).

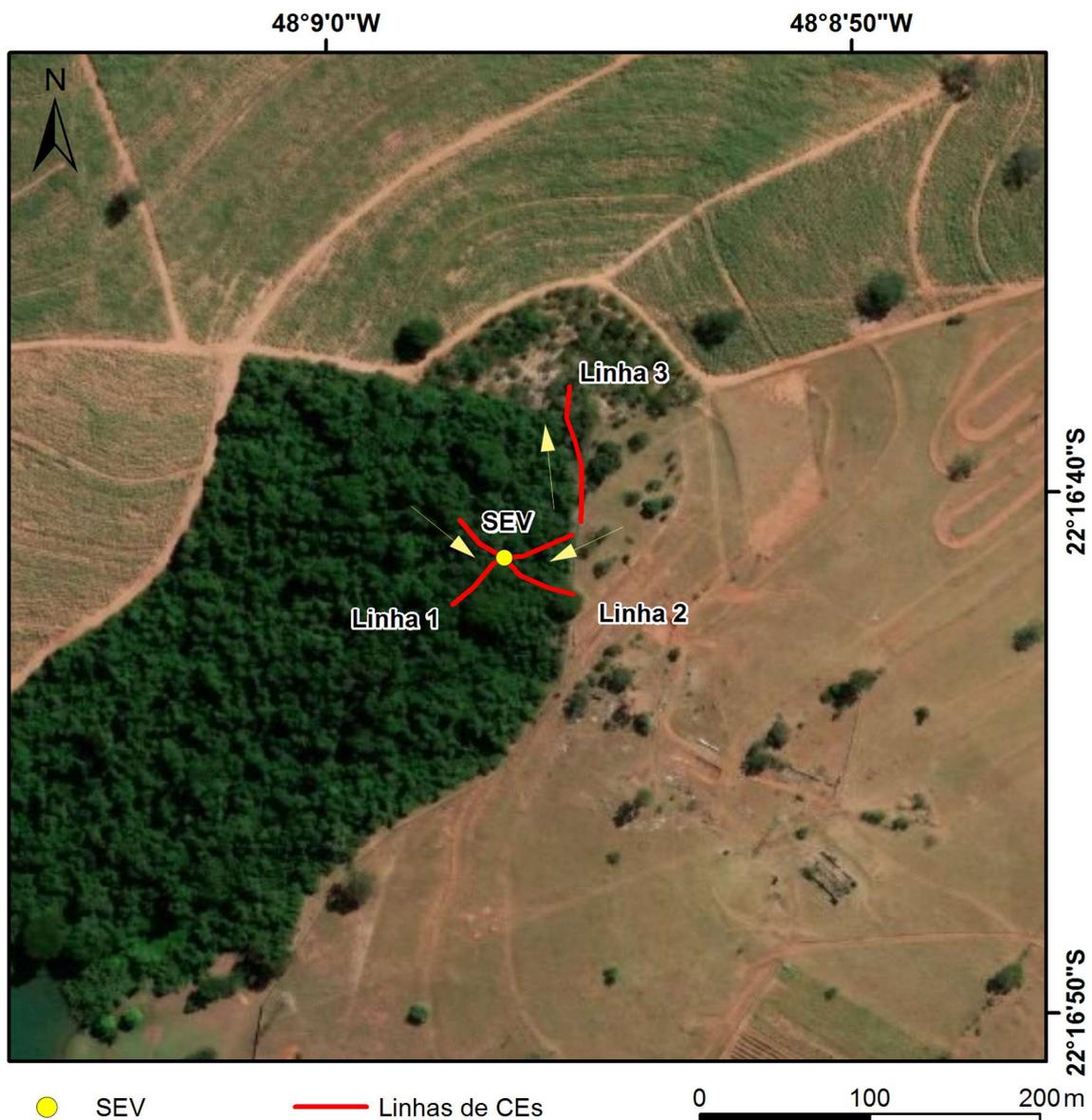


Figura 14 – Localização dos levantamentos geofísicos (as flechas indicam o sentido dos CEs).

No levantamento foi utilizado um equipamento do tipo resistivímetro Syscal Pro, que coleta dados com 10 canais de leitura integrados. Dados do fabricante indicam precisão de leitura de $1\mu\text{V}/0,2\%$, potência de 250w, e que ele é capaz de aplicar 2000vpp de diferença de potencial e 2500mA de corrente elétrica entre os eletrodos A e B.

Para a SEV estavam disponíveis quatro rolos de cabos, sendo dois de 100m e dois de 350m. Para o CE estava disponível um cabo com abertura máxima, entre cada canal, de 5m, com 10 canais de medidas, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos. Os equipamentos auxiliares foram: duas baterias de 12V; eletrodos metálicos para injeção de corrente elétrica e medição do potencial elétrico; cabos para conexões entre equipamento e eletrodos; marretas para fixação dos eletrodos; e trenas para marcar as posições dos eletrodos.

Com uso de GPS de mão também foram mapeados os abatimentos de solo e os colapsos em superfície, para geração de um mapa mais atualizado. Os abatimentos com diâmetro superior a 0,5m foram catalogados com a coleta de três medidas principais – eixo maior, eixo menor e profundidade –, com o uso de trena, GPS e planta topográfica. As feições com diâmetros inferiores a 0,5m não foram catalogadas nessa etapa do trabalho. As rupturas topográficas, bordas de sulcos erosivos e voçorocas também foram mapeadas com GPS de mão e verificadas com um segundo aparelho GPS, para conferência dos dados e melhor acurácia (sempre que possível, buscou-se precisão $<3\text{m}$).

Usando a terminologia indicada pelo IPT (2009), se classificou os pontos de abatimento em três categorias: *abatimento*, *colapso parcial* e *colapso total*., complementando com nomes mais usuais de formas de relevo, indicando presença ou não de água fluindo (que dirá se é um *pipe* ativo ou não).

Alguns pontos com abatimentos não foram levantados quando existiam indícios de ser uma bioturbação (causada por formigueiro, toca de tatus), e pelo menos dois pontos de abatimentos foram encontrados no local e descartados como abatimentos e colapsos erosivos naturais (**Fig. 15**), mas podem ser também considerados como agravantes e indutores do processo na deflagração do *piping*.

Na segunda visita de campo, as principais cavidades, fendas e cavernas foram mapeadas após a detecção de suas entradas ou saídas. Sempre que possível, adentramos os locais para um croqui de detalhe e medidas com uso de trena e GPS

de mão. Em locais onde havia maior risco de abatimento do teto ou algum risco biológico nas proximidades das paredes (aranhas e morcegos), evitou-se avançar nos túneis.



Figura 15 – Ponto que foi descartado como abatimento e foi considerado como bioturbação.

Em março de 2020 foi feita nova visita à área, com a colaboração de dois pesquisadores mais experientes – do Instituto Geológico (IG) e do Serviço Geológico do Brasil (CPRM-SGB) – em adentrar fendas e cavernas, para que fosse possível fazer um reconhecimento mais detalhado do trajeto da água (**Fig. 16**). Na ocasião iniciamos o trajeto pela fenda próxima à roda d'água e saímos no local denominado Portal do Arco, após percorrer o trajeto desde sua entrada até a saída.

Não se tem nenhum relato ou estudo que indique que essa caverna (**Fig. 17**) tenha sido explorada anteriormente, desde sua entrada até a saída. Funcionários da prefeitura de Brotas, na ocasião da execução do parecer técnico do IPT, relataram que, quando os pesquisadores visitaram as áreas, apenas adentraram poucos metros do conduto de saída, próximo ao Portal do Arco.

Em nossa visita, uma nascente e mais alguns pontos de abatimento foram encontrados e inseridos no mapa de abatimentos.

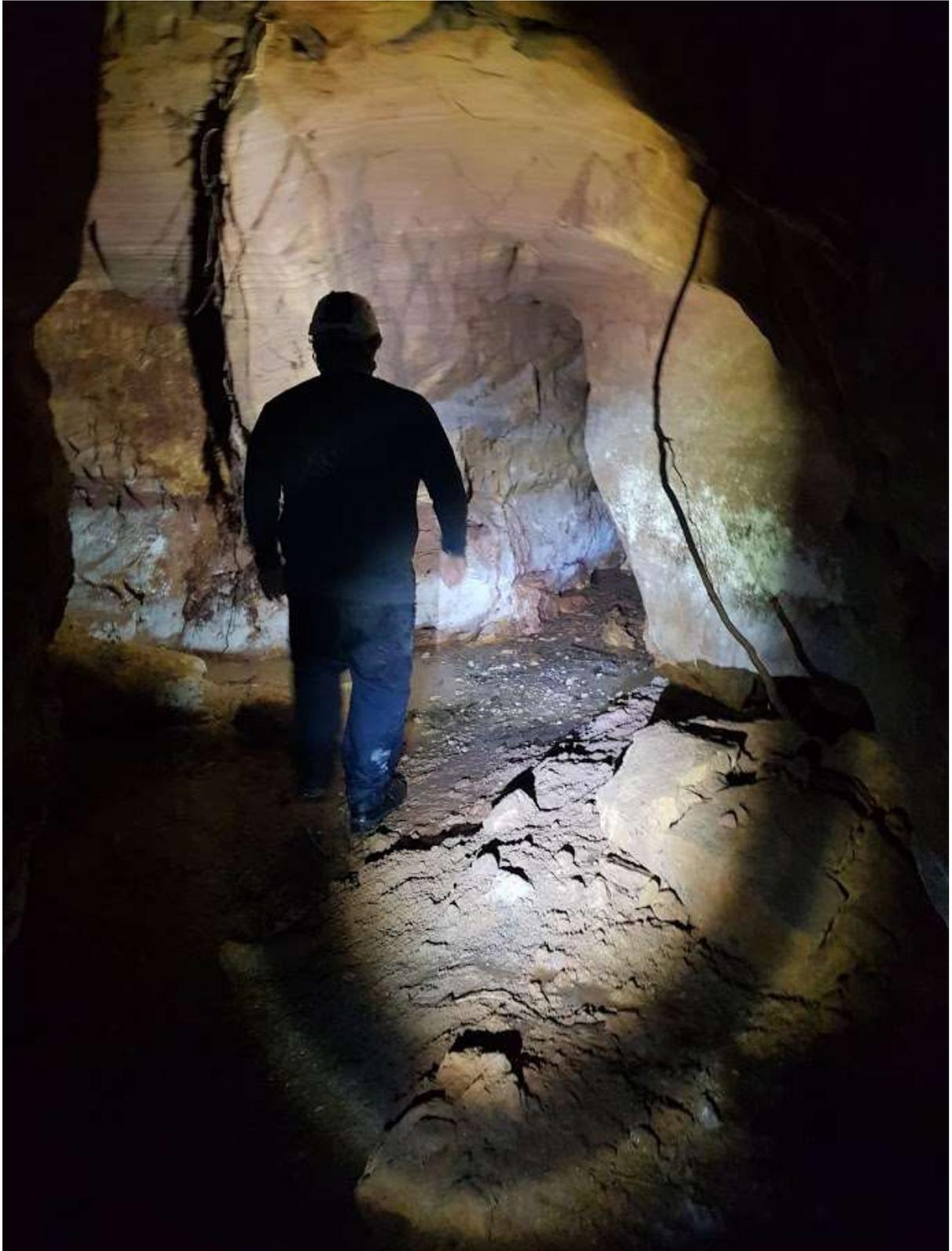


Figura 16 – Ambiente afótico, com lâmina d'água fluindo (altura estimada: 6m).



Figura 17 – Ponto da caverna com cerca de 7m de altura e presença de algumas raízes.

A quarta visita à área se deu em 17 de julho de 2021, com uma equipe de espeleologia da Meandros Espeleo Clube, que de forma voluntária fez a topografia da caverna principal e de canais secundários acessíveis. Com uso de trena a laser da marca LEICA – um modelo que também pode medir inclinação e azimute (Disto-x) –,

diversas medidas são feitas a partir de pontos de amarração, gerando croquis com os devidos avanços com visadas a distâncias variáveis, de acordo com as mudanças nos trajetos e formatos dos condutos, com o uso de um anteparo. O anteparo usado para fazer a medida (cartão plástico) precisa ser posicionado perpendicularmente à visada e exatamente em cima da base. Para esse trabalho foram necessárias três pessoas dedicadas, sendo que o ponta de trena ilumina o anteparo e indica onde se encontra a base; uma pessoa faz as medidas com o aparelho; outra anota numa planilha; uma pessoa também tem a função de croquista e faz o desenho em escala, indicando as mudanças nos trajetos e as dimensões em papel milimetrado. Posteriormente, os dados são tabelados e processados, sendo então gerado o arquivo digital.

Uma quinta etapa da pesquisa de campo ocorreu em 29 de julho de 2021, quando foi feita a conferência em campo dos abatimentos cadastrados, um melhor detalhamento das bordas erosivas e a conferência de contatos geológicos e dados estruturais.

Até então, foram feitas cinco campanhas de trabalho de campo com objetivos diferentes. É importante informar que todo o andamento do trabalho foi bastante impactado pela pandemia de COVID-19, tendo em vista que os trabalhos de campo da CPRM-SGB, bem como os laboratórios e as instalações físicas da Universidade ficaram inacessíveis por muitos meses. Portanto, apenas uma campanha de campo de geofísica foi possível, tendo sido feita em 2019.

Mais recentemente, em agosto de 2023, uma visita à área para verificar avanços nas frentes erosivas concluiu que desde 2019 não houve nenhum avanço significativo nas feições anteriormente cadastradas.

Foram levantados os poços de água subterrânea cadastrados no SIAGAS. No município existem 62 poços e um deles está muito próximo da área de estudo, no Sítio Quinta dos Ipês (poço 3500029158). A prefeitura de Brotas também nos forneceu dados de 22 sondagens a percussão com ensaios SPT executadas pela empresa GEOFURO, localizadas no Jardim Santa Maria II e arredores (**Fig. 18**). A topografia do terreno e também informações de dados de outro poço profundo nesse mesmo local (Poço Santa Maria) também foram fornecidas pela prefeitura. Os dados de localização e tabela de níveis piezométricos das sondagens estão consolidados no **Anexo C**.

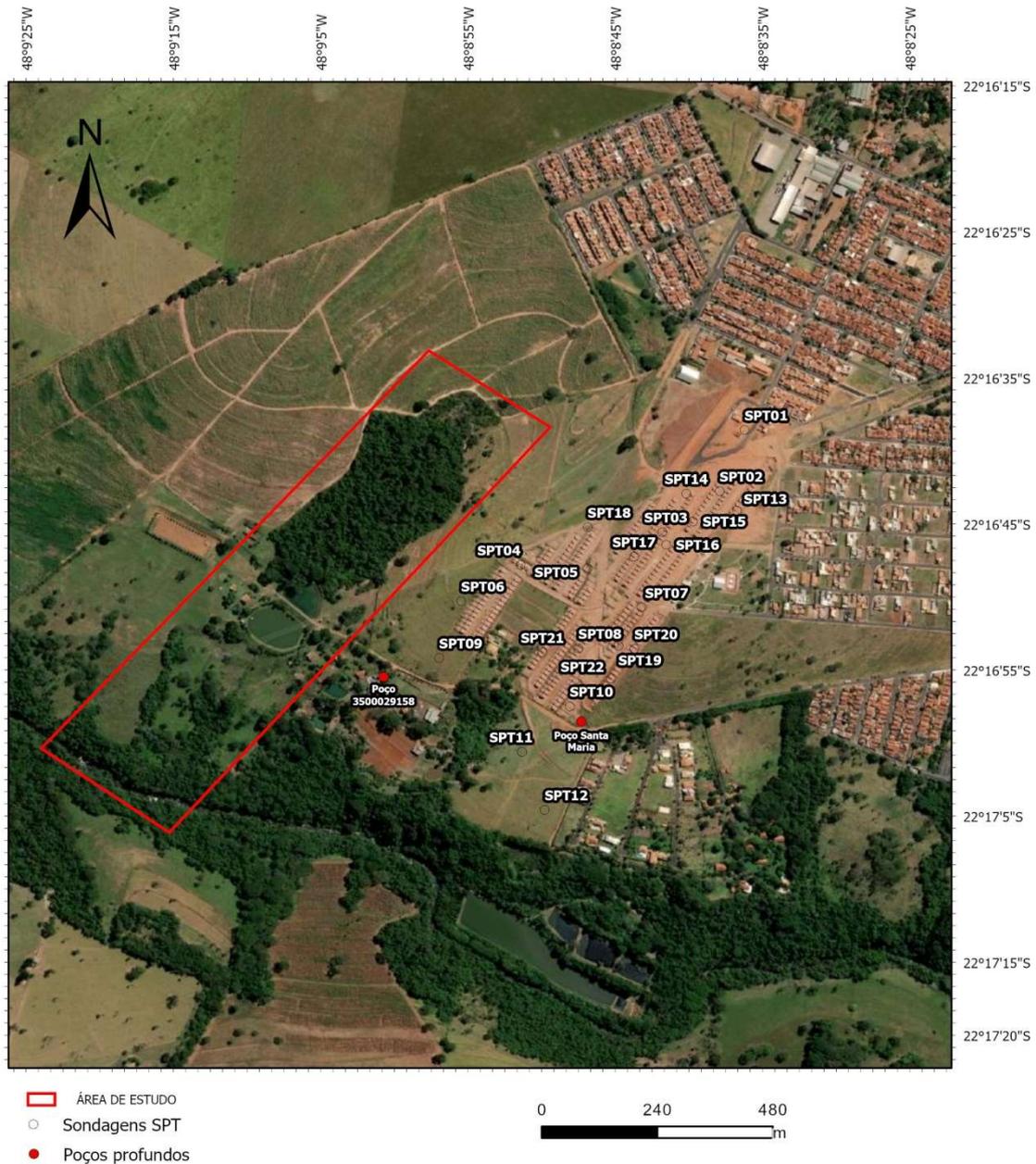


Figura 18 – Pontos de sondagem e poços profundos.

O trabalho de tratamento dos dados iniciou-se com a obtenção do limite geográfico do município de Brotas, o que foi realizado de forma gratuita no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Foram digitalizadas e vetorizadas as informações da carta topográfica Brotas I –SF022-Z-B-III-4-NO-B, elaborada por São Paulo (1980), na escala 1:10.000. Para a atualização dos dados foram utilizadas imagens do *Google Earth*[®] para ajuste da drenagem, das curvas de nível e das estradas vicinais. Assim também foi feito o mapa de uso e ocupação do solo, com dados de campo e auxílio de imagens mais recentes do *Google Earth*[®].

As localizações e dimensões dos colapsos e abatimentos (eixo maior, eixo menor e profundidade) foram determinadas em campo e em seguida espacializadas com uso da ferramenta *Google Earth Pro*[®]. Os dados gerados no formato *.kml* e *.kmz* foram convertidos em seguida para *layers* e *shapefile*. Os dados foram armazenados num banco de dados geográficos no *software ArcGis 10.7.1* e *ArcGis Pro*[®], e posteriormente reprojitados para a projeção *UTM SIRGAS 2000 zona 22S*.

Os modelos 3D de terreno foram feitos com ajuste topográfico em *Autocad* e posterior renderização dimensional com uso de software 3dMAX. A topografia da caverna foi utilizada para ajustes de níveis de topo e base, sendo que a geração cartográfica foi feita também em *Autocad* e posteriormente editada em *CorelDraw* para apresentação dos dados.

7. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A área de estudo está localizada no município de Brotas (**Fig. 19**), no interior do estado de São Paulo, distante 235km da capital e próxima a importantes centros urbanos regionais, como São Carlos e Rio Claro. A cidade pode ser acessada pela Rodovia dos Bandeirantes e pela Rodovia Eng^o. Paulo Nilo Romano.

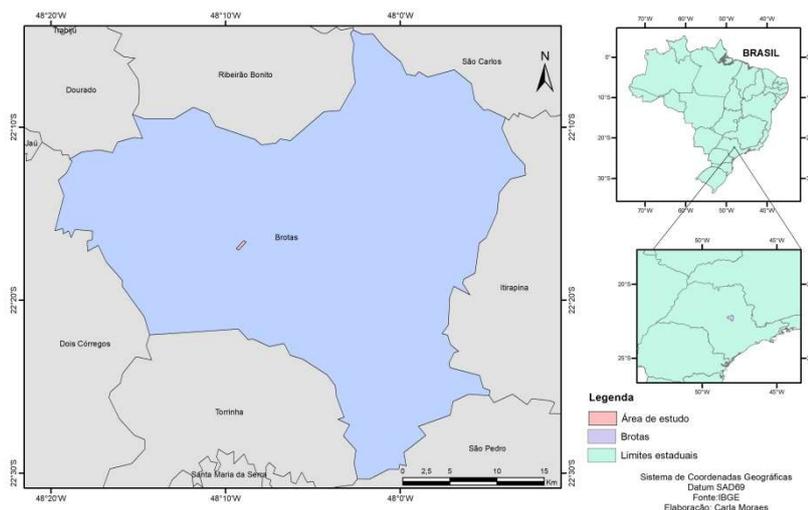


Figura 19 – Localização do município de Brotas e área de estudo.

Brotas é hoje uma estância turística muito importante no estado de São Paulo, com diversos atrativos ligados aos esportes de aventura – como *rafting*, *boia cross* –, por conta da abundância de cachoeiras e quedas d'água, e também ao turismo rural, com passeios por trilhas acessando cursos d'água e mirantes.

O município foi fundado em 1859 e teve sua maior fase de desenvolvimento nas décadas de 1920 e 1930, época da expansão do café para o interior paulista. Sua economia atual ainda é predominantemente agrícola, com destaque para a pecuária e a agricultura, registrando aumento recente da agroindústria da cana a partir da chegada de grandes empresas na cidade, como a *Raízen*.

Hoje Brotas tem população estimada de 24.403 habitantes, de acordo com o Censo IBGE/2019, tendo mais de 80% da população vivendo em área urbana. Em 2010, sua população era de 21.580 habitantes. É uma cidade com crescimento populacional considerável e que recebeu mais de 280 mil turistas no ano de 2017, conforme dados da ABROTUR (Associação de Empresas de Turismo de Brotas).¹

¹ Disponível em: <<https://www.portalmorada.com.br/noticias/turismo/69771/brotas-adota-planejamento-estrategico-em-turismo>>. Acesso em: 4 mar. 2020.

Sobre o regime pluviométrico da região, podemos citar o trabalho de Marcuzzo (2019), que fez uma espacialização de dados pontuais da chuva, com média de 1977 a 2006. O trabalho consistiu em um mapeamento da chuva distribuída mensal e anualmente na região de Brotas, incluindo também São Carlos, Itirapina e áreas na bacia do Rio Grande e do Rio Tietê. Concluiu-se que os meses mais chuvosos, em ordem decrescente, foram: janeiro, com 261,9mm; dezembro, com 247,4mm; fevereiro, com 198,1mm; março, com 177,5mm; novembro, com 167,9mm; e outubro, com 125,7mm.

O município pertence ao Comitê da Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré. O principal rio é o Jacaré Pepira, que também é muito importante para o turismo na cidade, já que ele tem abundância de corredeiras rápidas e quedas d'água. Ele nasce na Serra de Itaqueri, a 960 metros de altitude, e passa pela área urbana de Brotas, desembocando no Rio Tietê em Ibitinga e Itaju.

Na área de estudo existe o Córrego Santa Maria (Fig. 20), tendo sua nascente e seu exutório inseridos dentro da área de estudo, desde o ponto atual de descarga do aquífero, a nascente do Córrego Santa Maria, desaguando no Rio Jacaré Pepira, após percorrer 950 metros.

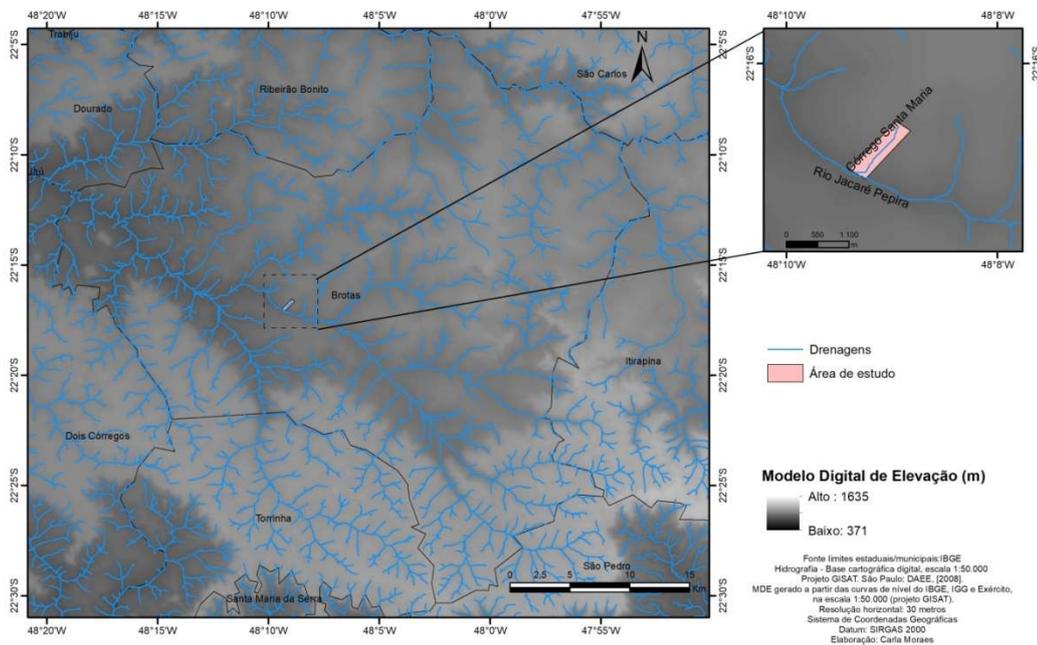


Figura 20 – Hidrografia da região

Em Brotas há predomínio de baixas declividades, de 0 a 5° em baixos platôs dissecados. Esses terrenos possuem um número considerável de feições erosivas instaladas, a citar o rastejo, o ravinamento, o voçorocamento e erosões laminares.

O relevo da região é, em geral, suave, com muitas nascentes e rios com cachoeiras que cortam vales e encostas. Está localizado na Bacia Sedimentar do Paraná e é composto por planaltos tabulares e *cuestas* basálticas. Segundo a Carta Geotécnica do estado de São Paulo feita pelo IPT (Nakazawa et al., 1994) e de acordo com o Mapa de Erosão do estado de São Paulo (Kertzman et al., 1995), a região de Brotas apresenta alta incidência de processos erosivos e alta suscetibilidade à erosão devido à ocorrência de solos arenosos.

Em Brotas há predominância de latossolos do tipo vermelho amarelo, seguidos pelos neossolos quartzarênicos (areias quartzosas), mais suscetíveis à ocorrência de processos erosivos e que são os encontrados na área de pesquisa. Em menores porções são observados latossolos do tipo vermelho e férrico, argissolo, nitossolo, neossolo litólico e gleissolo. A agropecuária extensiva na região fez com que mata nativa fosse suprimida, sendo que restaram poucos locais preservados de Mata Atlântica, cerrados, cerradões e matas galerias que seguem os cursos d'água (Santos et al., 2010, p. 3570, apud Zoneamento ambiental do município de Brotas, 2006).

7.1. Detalhamento da área de estudo

A área de pesquisa está a aproximadamente 2.500 metros do centro da cidade de Brotas, a jusante do Bairro Jardim Modelo, sendo possível acessá-la por estradas de terra em uma plantação de cana ou pelo acesso principal da Fazenda Santa Maria (Fig. 21).



Figura 21 – Zona urbana de Brotas e bairros nos arredores da área de pesquisa (adaptado de Google Earth – jan./2019).



Figura 22 – Área de pesquisa e seu uso e ocupação (adaptado de *Google Earth* – maio/2018).

Um polígono de quatro vértices foi escolhido como alvo para a prospecção de feições erosivas e de abatimentos, englobando áreas com usos e ocupações diversas, para que fosse possível compreender o fenômeno erosivo em diferentes contextos (**Fig. 22**).

Os arredores do Córrego Santa Maria possuem núcleos urbanos, uma grande área com plantio de cana, áreas rurais com pastagens, dois novos grandes núcleos habitacionais, linhas de transmissão e até mesmo uma escola. Todos esses componentes devem ser vistos integrados para a melhor compreensão dos processos erosivos que ocorrem na bacia. É importante lembrar que o planejamento urbano deve sempre estar atento às fragilidades desta bacia hidrográfica para que possamos

compreender os problemas relativos ao uso e ao manejo inadequados dos recursos solo e água.

A região é um vetor de expansão da cidade de Brotas e existem alguns conjuntos habitacionais já consolidados, entre eles o Jardim Modelo, que está a montante da área de estudo, e o Jardim Felicidade, a nordeste da área (**Fig. 23**). Em 2019, as obras para implantação de 482 residências de um programa habitacional ligado ao CDHU (denominado Brotas E) estavam muito avançadas. A conclusão de mais de 300 moradias se deu em 2020. E existe indicação aprovada para mais 146 casas, totalizando 628.

Como visto, a área escolhida está dentro da Bacia Hidrográfica do Córrego Santa Maria, incluindo sua nascente e exutório, que deságua no Rio Jacaré Pepira no sul da área de estudo. Ali também é um ponto de coleta de água que abastece o gado das pastagens próximas e, na nascente, há uma roda d'água instalada pelo proprietário do terreno ao lado para esse fim.



Figura 23 – Bairro Jardim Modelo à esquerda e Bairro Jardim Felicidade à direita. Primeiro plano: área de pastagem e plantação de cana (jul./2019).

A porção mais afetada pelos colapsos e abatimentos de solo fica a jusante do Conjunto Habitacional Jardim Modelo, na cabeceira do Córrego Santa Maria, onde feições erosivas são vistas mais predominantemente nas áreas vegetadas de mata natural, com feições de formato circular, estendendo-se também para porções onde não há vegetação e áreas de pastagem (**Fig. 24**). Os abatimentos ocorrem com maior

intensidade nas proximidades da nascente, em que afloram os arenitos e existem abatimentos de colapso total, expondo processos erosivos (fendas e cavernas) no interior da Formação Botucatu e parciais, onde apenas o desnível no solo é verificado.



Figura 24 – Área de pesquisa (mata), área de pastagem e obras do Loteamento Santa Maria, ao fundo (jul./2019).

7.1.1. Plano diretor de Brotas

O planejamento da expansão dos espaços urbanos tornou-se uma exigência legal através da obrigatoriedade da elaboração de planos diretores. Contudo, faz-se necessário que tais planos sejam constantemente atualizados e, em muitas situações, revistos, principalmente no que tange às possibilidades de uso e expansão urbana.

As diretrizes gerais da política urbana para garantir desenvolvimento sustentável e proteção ao meio ambiente natural, aos patrimônios culturais e à produção de bens de modo sustentável estão amparadas pelo Estatuto da Cidade (Lei nº 10.257/2001). O Estatuto define alguns instrumentos necessários para que haja melhor compreensão do meio físico e sua ocupação, sendo o plano diretor e o zoneamento ambiental documentos muito importantes para a gestão do território. O plano diretor é obrigatório para cidades com mais de 20 mil habitantes, cidades com potencial

turístico, de regiões metropolitanas e em áreas com atividades que possam gerar significativos impactos ambientais.

No ano de 2006, o município de Brotas teve seu primeiro plano diretor apresentado, com informações sobre os vetores de crescimento de suas áreas urbanizadas e diretrizes para uso e ocupação do solo. Em 2007 foi feito o relatório de zoneamento ambiental, contendo análises, considerações e indicações de aptidões para os específicos usos de seu território, inclusive para sua expansão urbana. Nesse plano, a área de pesquisa está fora do novo perímetro urbano proposto, porém está classificada como dentro de uma ZPR (Zona Predominantemente Residencial) e ZDB (Zona de Baixa Densidade), nas proximidades do Rio Jacaré Pepira. Na ocasião, o Conjunto Habitacional Jardim Modelo estava em obras, ainda com residências desocupadas, e as obras do Jardim Felicidade estavam ainda no início.

O trabalho de Santos et al. (2010) analisou o plano diretor da cidade e concluiu que dentro da área definida pelo plano diretor de 2006 como limite para a expansão urbana, os espaços considerados inaptos e de alta aptidão são os de menor proporção, sendo os de baixa e média aptidão a maior parte da área. O mapa de aptidões proposto pelo zoneamento ambiental não levou em consideração o fator *recursos hídricos*, o que certamente aumentaria as áreas consideradas inaptas e de baixa aptidão ao considerar o que define a legislação referente às APPs (Áreas de Proteção Permanente). O trabalho conclui que, naquela ocasião, o plano diretor acabou sendo elaborado sem levar em consideração as indicações dadas pelo estudo de zoneamento ambiental. Isso se deve a uma maior dinâmica e demanda de questões de caráter social e político, resultando na determinação do limite da área de expansão urbana da cidade sem considerar de forma adequada fatores ambientais como solo, geologia e vegetação nativa.

Em 2015, o plano diretor foi revisado, incluindo parte da área de pesquisa como ARG (Área de Restrição Geotécnica), sendo ali proibida a ocupação por edificações, outra parte como APAN (Área de Proteção do Ambiente Natural) e a porção mais a jusante como APP (Área de Proteção Permanente), sendo ali proibida a ocupação por edificações; porém, parte da área foi classificada como ZEIs (Zona Especial de Interesse social) (**Anexo A**).²

² Disponível em: <[http://www.brotas.sp.gov.br/post/plano-diretor-codigo-de-obras-e-posturas\\$6492](http://www.brotas.sp.gov.br/post/plano-diretor-codigo-de-obras-e-posturas$6492)>. Acesso em: 28 fev. 2020.

Em 28 de novembro de 2016 foi apresentada a Lei Complementar nº 0093/2016,³ que determina:

Capítulo III DO ZONEAMENTO, USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Seção I Do Zoneamento

Art. 68 - O Zoneamento e os parâmetros de Uso e Ocupação do Solo foram definidos com os seguintes objetivos:

III – incentivar a ocupação ordenada e de baixa densidade ao longo das margens do Rio Jacaré Pepira, Ribeirão do Gouveia, Córrego da Lagoinha, Córrego Santa Maria e Córrego Lagoa Seca

A referida lei fala em incentivar a ocupação ordenada e de baixa densidade ao longo das margens do Córrego Santa Maria, o que é preocupante, tendo em vista a fragilidade do terreno.

Mais recentemente, em fevereiro de 2019, houve uma nova alteração no plano diretor que aumentou a área de ARG, mas excluiu a de APAN, sendo parte desta incorporada à ARG e outra parte anexada à ZEIs (**Anexo B**).⁴ Esse plano diretor indica as áreas com restrições geotécnicas, sem esclarecer informações sobre as áreas adjacentes e intervenções a serem feitas nos arredores; além disso, já indica mais áreas edificáveis e futuros arruamentos, no chamado Jd. Santa Maria II (**Fig. 25**).

³ Disponível em: <https://ecrie.com.br/sistema/conteudos/arquivo/arquivo_8_20122018120441.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2020.

⁴ Disponível em: <[http://www.brotas.sp.gov.br/post/plano-diretor-codigo-de-obras-e-posturas\\$6492](http://www.brotas.sp.gov.br/post/plano-diretor-codigo-de-obras-e-posturas$6492)>. Acesso em: 28 fev. 2020.



Figura 25 – Composição atual da área com o plano diretor vigente (2020), indicando a área em expansão de conjuntos habitacionais.

Os planos diretores devem acompanhar as mudanças que ocorrem nas cidades e sociedades, fazendo-se necessário que tais planos sejam revistos em algumas situações. O Estatuto das Cidades (2001) afirma que: “Art. 40. O plano diretor, aprovado por lei municipal, é o instrumento básico da política de desenvolvimento e expansão urbana. § 3o A lei que instituir o plano diretor deverá ser revista, pelo menos, a cada dez anos”.

Assim, é sabido que o plano diretor deve ser revisto em inúmeras situações. No caso de Brotas, muitos trabalhos científicos e pesquisas já indicavam que a área prevista para expansão urbana em direção à Bacia Hidrográfica do Córrego Santa Maria não era adequada, portanto é necessário um estudo mais aprofundado da área classificada como de risco geotécnico, bem como dos arredores.

7.2. Estudos que indicam as fragilidades do terreno

Nas áreas com processos erosivos progressivos, uma abordagem histórica é de grande importância, pois propicia analisar as alterações no substrato de determinada região em um longo período de tempo. Para isso, é importante a leitura de estudos feitos na área, fotografias aéreas, cartografias históricas, inspeções de campo de diferentes datas, acompanhamento de marcadores de bordas erosivas. Essas são ferramentas úteis para compreender o avanço do processo erosivo, pois permitem que um amplo intervalo de tempo seja analisado, incluindo sua relação com ao desenvolvimento urbano e as mudanças na taxa de erosão que as alterações no meio físico podem gerar. Compreender as intervenções nos arredores e o que isso gera – como mudanças no fluxo de água, aumento da carga ou variações na permeabilidade do solo – é uma forma de reconstruir o cenário ou gatilhos que podem produzir uma mudança no estilo de erosão e na sua taxa de avanço.

Um dos primeiros trabalhos conhecidos que citam as fragilidades dessa região é uma avaliação da aptidão urbana de Brotas feita por Moruzzi et al. (2008), que diziam que o plano diretor previa a expansão urbana em direção a uma bacia hidrográfica localizada no setor oeste da cidade, com sérios problemas vinculados a processos erosivos lineares, demandando uma reavaliação da expansão na área e concluindo que era necessário remodelar o zoneamento previsto.

De acordo com Moruzzi et al. (2008):

Como as vazões sofreram alterações além da capacidade de coesão do solo desprotegido, fato visivelmente comprovado pelas avaliações *in loco*, o aumento do transporte de solo se dá de forma progressiva apresentando a necessidade de intervenção urgente a fim de conter a perda excessiva de material.

Nas imagens históricas do *Google Earth* disponíveis do ano de 2007, já é possível verificar um rápido avanço da erosão em um curto período de tempo: comparando imagens de 9 de março e 1º de julho de 2007, é possível ver um aumento considerável em uma das frentes erosivas (**Fig. 26a e 26b**).



Figura 26a – Cenário anterior ao avanço das erosões (adaptado de *Google Earth* – 9 mar./2007).



Figura 26b – Cenário após avanço das frentes erosivas (adaptado de *Google Earth* – 1 jul./2007).

O trabalho de Moruzzi et al. (2008, p.14) constatou uma intensa dinâmica dos processos de voçorocamento no período de seis meses de pesquisa, de julho a dezembro de 2007. Podemos concluir, então, que o trabalho se iniciou num cenário similar ao da **Figura 26b**, e que nos seis meses seguintes mais avanços de frentes erosivas foram constatados em sua pesquisa, aumentando as cavidades existentes e possivelmente gerando mais abatimentos de solo na região por erosão interna, os quais não são visíveis nas imagens devido à grande quantidade de mata natural e vegetação. É importante frisar que na época não havia área reflorestada a montante; o que havia era uma pastagem, e os bairros Jardim Modelo e Jardim Felicidade estavam em obras.

Para melhor compreensão do crescimento da urbanização da região e intervenções feitas, podemos observar as imagens disponíveis no *Google Earth*. Na **Figura 27a** vemos o Bairro Jardim Felicidade se consolidando e no Jardim Modelo ainda havia duas quadras sem habitações. Em 2010 houve um aumento da área de cultivo de cana e pastagens, e pela imagem é de se supor que ela foi feita numa fase de colheita da cana (**Fig. 27b**). Imagem de 1º de abril de 2019 mostra ampliação significativa no número de casas no Jardim Felicidade e no Jardim Modelo, bem como grandes obras de terraplanagem para instalação de dois novos conjuntos habitacionais do CDHU; a área revegetada está bem consolidada, já com árvores de grande porte (**Fig. 27c**).



Figura 27a – Arredores a montante da área de pesquisa (1 jul./2007).



Figura 27b – Em 31 de maio de 2010, o bairro Jardim Felicidade estava se consolidando e havia duas quadras ainda sem habitações no Jardim Modelo.



Figura 27c – Cenário em 1º de abril de 2019, com ampliação significativa no número de casas e grandes obras de terraplanagem.

O trabalho de Moruzzi et al. (2008) detalha os processos erosivos durante os seis meses de acompanhamento no ano de 2007, e a **Figura 28** ilustra a área de pesquisa na ocasião, onde uma feição foi caracterizada como voçoroca e é possível localizar oito sulcos erosivos. Nenhuma feição de colapso ou abatimento circular foi detalhada, mas é de se imaginar que já existiam no terreno.

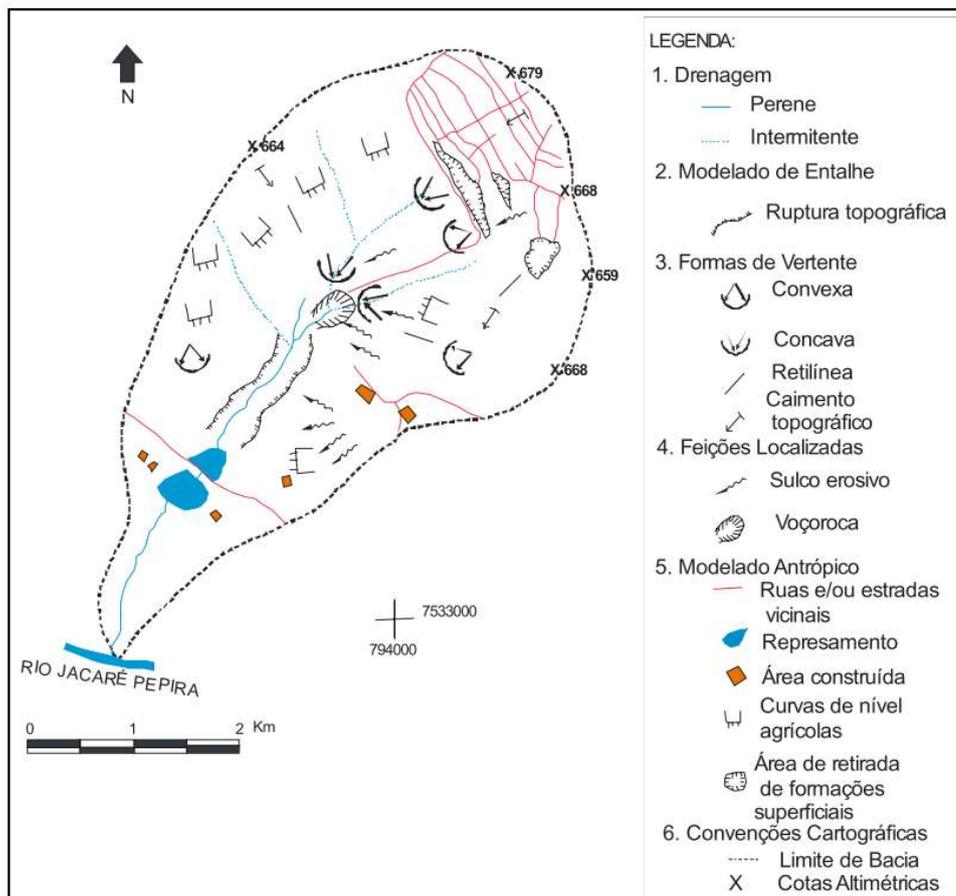


Figura 28 – A geomorfologia da área de estudo (Moruzzi et al., 2008, p.17).

As conclusões apontaram a alteração da cobertura vegetal da bacia como responsável pelo aumento dos problemas erosivos ao redor da nascente, juntamente com as águas oriundas do escoamento superficial direto que convergem para uma vertente que desemboca diretamente na mata onde se encontra a nascente. O trabalho recomendava a ampliação da área recoberta por vegetação e porte arbóreo, bem como o cumprimento da legislação do CONAMA⁵ em relação à área de preservação permanente no entorno de nascentes e cursos fluviais, além recomendar que não houvesse expansão do cultivo da cana na região e que o solo não fosse exposto no período da entressafra (Moruzzi et al., 2008). Dessas recomendações, podemos constatar, houve cumprimento da ampliação da área recoberta por vegetação. Com uso de imagens e sobrevoo com drone, foi possível indicar uma área de aproximadamente 7.500m² de vegetação de porte arbóreo bastante consolidada (**Fig. 27c**), sendo que esse reflorestamento foi feito no ano de 2010, de acordo com informações da prefeitura de Brotas.

Já em 2008, o trabalho de Moruzzi et al. (2008) recomendava conter a expansão da área urbana para esse setor, devido às características locais de materiais litopedológicos e condicionantes hidrológicos. Os resultados da pesquisa indicaram que a bacia possui um terreno não apto ao uso do solo urbano.

Um segundo estudo foi feito no mesmo local em 2009, usando técnicas hidrológicas e simulando cenários para transformação chuva-vazão com diferentes coberturas de solo, a partir do método Hidrograma Triangular para propagação do escoamento superficial. Avaliou-se o escoamento superficial nas áreas degradadas por processos erosivos lineares da microbacia hidrográfica do Santa Maria, para se analisar o escoamento superficial direto, e essa avaliação também concluiu que a área não é apta ao uso urbano e que as atividades agrícolas, já existentes, necessitavam aplicar práticas conservacionistas mais eficientes na contenção do escoamento superficial (Moruzzi et al., 2009).

Aparentemente, um trabalho de manutenção de curvas de nível nas áreas onde há plantação de cana tem sido feito com bastante regularidade, mas isso não impede que existam processos erosivos instalados no local, como mostra a **Figura 29**, obtida em julho de 2019 com auxílio de drone. Tais erosões lineares são recorrentes, mas é difícil mapear seu avanço e as condições de sua ocorrência, já que o terreno é

⁵ Resolução CONAMA nº 302 e 303, de 20 de março de 2002, publicada no *Diário Oficial da União*, n. 90, seção 1, p. 67-68, em 13 de maio de 2002.

constantemente remobilizado por conta do regime de plantio e da colheita da cana; quando ocorrem em vias de acesso, são rapidamente recobertas por solo para que não impeçam a passagem dos veículos.



Figura 29 – Erosões lineares e ravinas que avançam até ponto limítrofe da área de pesquisa, onde existe mata natural (jul./2019)

Uma das recomendações era não deixar o solo das áreas onde há cultivo de cana exposto durante a época de chuva (período de entressafra), o que não foi verificado em nenhuma das visitas em campo, nem em relatos de moradores locais. Mas é de se imaginar que seja muito complicado cobrir uma área de 650.000m² por todo o período de entressafra, logo podemos supor que nesses períodos o solo deve ficar exposto. O trabalho de Moruzzi et al. (2009) verificou que o deflúvio decorrente da cobertura pela cana de açúcar supera as demais condições simuladas no estudo e que a interferência do loteamento poderia ser considerada pouco significativa, mas nenhuma medida pontual simulada foi capaz de atenuar significativamente as condições de escoamento. Concluiu-se que se deve ter uma abordagem integrada do problema, considerando uma combinação de intervenções como a alternativa mais viável do ponto de vista técnico-hidrológico, evitando-se a expansão urbana na direção da drenagem da nascente e fazendo melhorias nas áreas de cana e pastagem (manter curvas de nível e evitar deságue dos volumes escoados na nascente) (Moruzzi et al., 2009).

A partir de uma análise do que foi avaliado, indicando maior contribuição da plantação de cana ao processo erosivo, é de se imaginar que os processos erosivos superficiais (**Fig. 30**), laminares e lineares, que eventualmente evoluem para ravinamentos e voçorocas, podem ser dessa forma explicados, como nos cenários simulados e avaliados em ambos os trabalhos de Moruzzi (Moruzzi et al., 2008; Moruzzi et al., 2009), mas as erosões de jusante para montante do tipo *piping*, que evoluem em alguns casos para voçorocas, podem ter uma contribuição maior das variações de fluxo de água causadas pela impermeabilização do solo e pela falta de ordenamento das águas nos bairros. Atualmente, com ocupação mais adensada a montante e ocupação da vertente leste da bacia e mais estudos que indiquem essa contribuição antrópica devem ser feitos para a região.



Figura 30 – Erosão linear evoluindo para uma ravina em via de acesso para a área de cultivo de cana (jul./2019).

Um trabalho foi feito pelo IPT, no ano de 2009, com o objetivo de analisar os processos de erosão e abatimentos do solo sob o ponto de vista geológico-geotécnico e hidrogeológico, além de estabelecer diretrizes, critérios, intervenções ou ações estruturais e não estruturais para prevenção ou mitigação desses processos. Foi proposta também a delimitação de uma área de segurança para impedir ocupação, circulação de pessoas e proteger o aquífero Guarani (IPT, 2009). O trabalho caracterizou a área, indicando somente a localização dos pontos de abatimento em

três categorias, sem maiores detalhes para suas dimensões e área de abrangência, totalizando 16 pontos de abatimento, 7 colapsos parciais e 6 colapsos totais (Fig. 31).

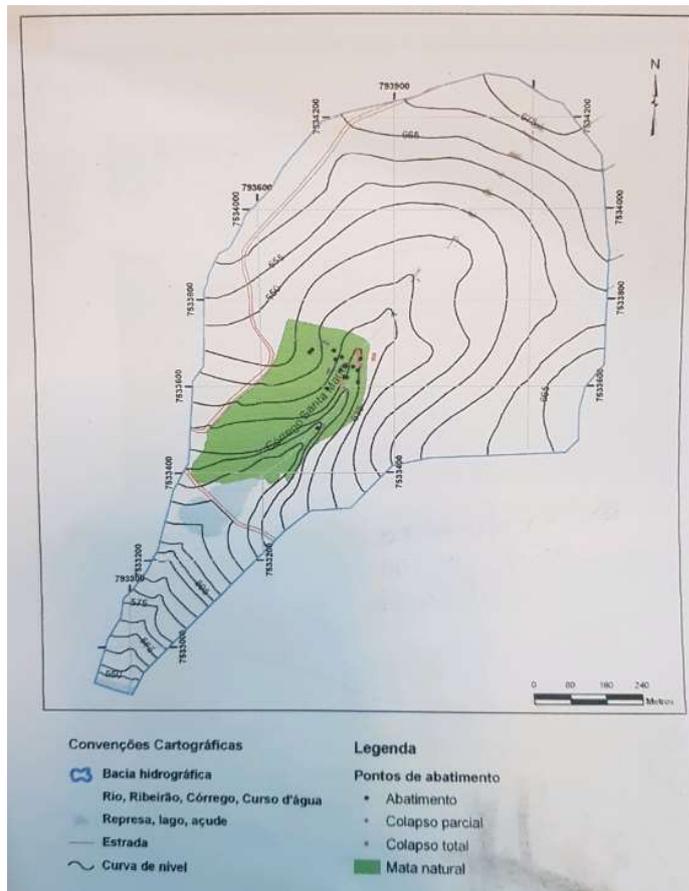


Figura 31 – Mapa dos pontos de abatimento e de colapso parcial e total do terreno (IPT, 2009).

Esse parecer técnico foi resultado do Programa de Apoio Tecnológico aos Municípios e recomendou seis ações específicas para o Córrego Santa Maria após o estudo. A seguir analisaremos as recomendações com relação à situação encontrada atualmente (IPT, 2009).

1. Isolar a área por meio de cerca e avisos alertando sobre os riscos existentes.

Sobre esta recomendação, podemos dizer que ela foi parcialmente cumprida, pois a porção leste está totalmente cercada com tela aramada, estrutura metálica e portões; porém, nas porções norte e oeste não há nenhum impedimento de acesso às áreas, apenas arames em alguns pontos, o que não impede o acesso. Ao longo da plantação de cana não há nenhum tipo de

isolamento, e nenhuma placa indicando os riscos existentes foi encontrada no local.

2. Criar uma faixa de isolamento de 100 metros de largura no entorno da mata ciliar do Córrego Santa Maria. Esta faixa deverá ser vegetada com gramíneas e espécies vegetais naturais da região.

Sobre este item podemos dizer que houve, sim, um plantio considerável, porém bem aquém do indicado pelo IPT. O chamado *limite de zona de proteção* deveria englobar parte do que é uma plantação de cana e o terreno adjacente, onde há uma pastagem. Atualmente, somente a área circular logo acima da cabeceira tem uma evolução considerável na área vegetada, porém ainda há muito solo exposto, além de material bastante friável e facilmente erodível em algumas clareiras na mata.

3. Proibir a ocupação urbana no restante da bacia de contribuição e incentivar a implantação de culturas protetoras do solo, dando prioridade para culturas orgânicas.

Esta indicação foi feita para que não haja produtos químicos contaminando lençol freático, mas aparentemente nenhuma ação a longo prazo foi feita. A cana de açúcar ainda é a cultura empregada em toda a área a montante da nascente. Parte da área desmatada é hoje utilizada como pasto para gado, e a ocupação urbana segue crescendo exponencialmente. Comparando-se as imagens aéreas do ano de 2010 e as mais recentes, houve a construção de pelo menos mais 65 casas no bairro Jardim Modelo, nos lotes antes desocupados. Toda a encosta oeste, onde hoje estão os novos bairros construídos Santa Maria I e II, foi intensamente antropizada, causando ainda mais danos e processos erosivos superficiais (**fig. 32**), sem o correto ordenamento das águas superficiais e com muito solo exposto erodido.



Figura 32 – Obras do Jardim Santa Maria II (ago./2021).

4. Realizar o controle periódico da qualidade das águas do Córrego Santa Maria.

Sobre esta ação, não há relatos que a coleta esteja sendo feita com regularidade. Ainda encontramos locais de armazenamento de água de chuvas, águas servidas e para coleta e drenagem do terreno adjacente (**Fig. 33**), o que pode ser uma fonte significativa de contaminação dos aquíferos da região.

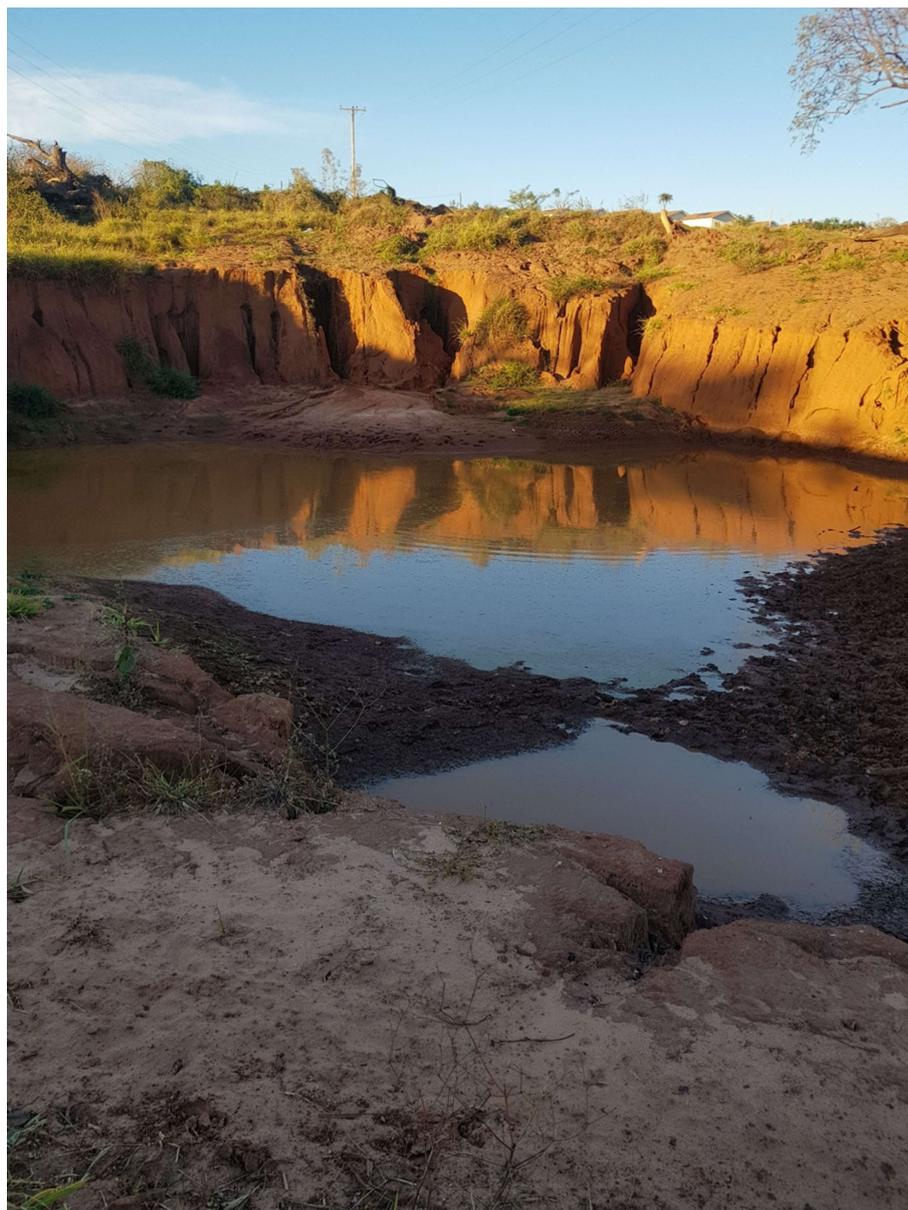


Figura 33 – Ponto de armazenamento de água.

5. Adequar o sistema de drenagem superficial do Bairro Jardim Modelo, pavimentando as ruas com maior declividade, captando e lançando adequadamente as águas pluviais de modo a inibir a ocorrência de processos erosivos lineares a jusante.

Foi feito um trabalho de pavimentação nas ruas onde já havia residências instaladas no ano de 2010, porém, sem canalização e direcionamento adequado das águas. Na ocasião, existiam inúmeros lotes vagos e processos erosivos já instalados que não foram corrigidos (**Fig. 34**).



Figura 34 – Conjunto Habitacional Jardim Modelo (31 maio/2010). Em vermelho e amarelo, pontos indicando erosões lineares.

Algumas falhas que foram detectadas pelo IPT ainda persistem e foram apontadas em visita técnica em 2016, como a falta do correto ordenamento das águas servidas, a ausência ou precariedade de dissipadores de energia, canaletas ou sarjetas inadequadas nas ruas de maior declividade. Em todo o bairro, entre os anos 2016 e 2018, obras de coleta de esgoto e águas pluviais foram feitas, minimizando o problema das águas servidas e diversos pontos de erosão, mas não sanando completamente a questão, pois em eventos de chuva ainda ocorrem danos nos pavimentos e no solo por falta do correto ordenamento das águas superficiais. As tubulações enterradas destinam a água diretamente para o Rio Jacaré Pepira e parte para a ETE (Estação de Tratamento de Efluentes). Essa tubulação foi localizada durante as pesquisas, em ponto com processos erosivos instalados, inclusive uma erosão está avançando a ponto de poder causar danos a todo o sistema de captação de águas de chuva dos bairros Jardim Modelo e Felicidade (**Fig. 35**). Aparentemente, as erosões superficiais no Jardim Modelo estão controladas, mas ainda existe um ponto ou outro onde a falta do correto ordenamento das águas gera danos e é um problema recorrente (**Fig. 36**).



Figura 35 – Erosão expondo tubulação de captação de água dos bairros (ago./2021).



Figura 36 – Erosão causada pela chuva no Jardim Modelo (2016).

6. Regularizar a superfície do terreno da área destinada ao represamento temporário das águas pluviais e executar camada de solo argiloso compactado, de modo a minimizar a infiltração das águas de chuva que escoavam do Conjunto Habitacional.

Sobre este item é importante citar que uma obra de microdrenagem para direcionar o escoamento de águas pluviais e um barramento para represamento temporário das provenientes do conjunto habitacional haviam sido feitos em 2009, mas ambos eram insuficientes e parte da água não fluía para o ponto de captação, sendo que ali era um ponto potencial de infiltração. É sabido que mudanças repentinas de fluxo – ainda mais nesse caso, em que não havia nenhum tratamento de impermeabilização do solo – são muito preocupantes, pois podem agravar o processo erosivo da região. Esse represamento temporário não é mais utilizado, o que contribuiu para melhorias na erosão superficial nos arredores do bairro, porém um novo represamento temporário foi feito durante as obras do Jardim Santa Maria II. Há relatos, inclusive, de extravasamento das águas durante um evento de chuva em que as águas adentraram a propriedade do Sítio Quinta dos Ipês, nas proximidades da Avenida Pedro Saturnino de Oliveira, levando água com muita lama e sedimentos para a

piscina da propriedade. Podemos ver na **Figura 37** que existem tubulações direcionando água para esse ponto e muita erosão nas bordas da área represada.



Figura 37 – Área de represamento de águas ao lado do Jardim Santa Maria II (ago./2021).

O trabalho ainda cita que as águas provenientes da área urbana podem estar com a qualidade comprometida por resíduos orgânicos e inorgânicos (IPT, 2009). Assim, em um substrato com alta porosidade e permeabilidade como é o arenito Botucatu, sua infiltração pode contaminar o lençol freático e, conseqüentemente, o Aquífero Guarani.

Entre inúmeros outros detalhamentos que o parecer técnico do IPT (2009) recomendou para o melhor planejamento da expansão urbana de Brotas, podemos citar a recomendação de desenvolver um mapeamento de todos os pontos de colapso e abatimentos do terreno, que serviria como subsídio para a elaboração de uma cartografia de aptidão e suscetibilidade da área, bem como para a formulação de

orientações e diretrizes para uso e ocupação do solo, envolvendo monitoramento dos processos do meio físico (erosão, colapso etc.).

Em 2016, a CPRM executou o mapeamento de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes, Inundações e Movimentos de Massa em Brotas, realizando uma avaliação de todo o município de Brotas e de seus vetores de crescimento urbano, para detecção de áreas de risco alto e muito alto para movimentos de massa e inundação. Na ocasião, foi feita uma breve descrição do problema de abatimento de solo na Bacia do Córrego Santa Maria. O trabalho concluiu que não existem setores de alto e muito alto risco a enchentes, inundações e movimentos de massa nos bairros Jardim Modelo e Primavera, porém recomendou o constante monitoramento das áreas em relação a novos abatimentos e à expansão das cavidades, também apontando locais de erosões pontuais no Jardim Modelo por falta do correto ordenamento das águas superficiais (Moraes e Tomita, 2016).

Conforme mencionado, em 2020 foi feita a *Carta de Suscetibilidade de Movimentos Gravitacionais de massa e inundações*, indicando que uma feição associada a movimentos gravitacionais de massa e processos correlatos está inserida na área de pesquisa, indicada como “Ravina/boçoroca indicativa de suscetibilidade local/pontual decorrente de processos erosivos, que podem induzir movimentos gravitacionais de massa” (CPRM, 2020).

Podemos concluir observando que inúmeros trabalhos já indicavam fragilidades nos terrenos e que a área destinada para expansão urbana possui problemas de erosão já conhecidos, de modo que este trabalho será uma forma de melhor compreender tais processos erosivos na cabeceira do Córrego Santa Maria, nas proximidades do principal vetor de expansão urbana do município de Brotas.

8. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA- EROSÃO

A erosão é um fenômeno amplamente conhecido, que se resume ao carreamento ou transporte de partículas do solo. Ela é mais conhecida pelas cicatrizes que a erosão superficial deixa no solo, na forma de ravinas, sulcos erosivos ou voçorocas, que é uma erosão tão profunda a ponto de atingir o lençol freático. São inúmeros os agentes que contribuem com o processo erosivo, como no caso da erosão eólica, mais comum em regiões áridas e semiáridas, onde o vento é o agente que transporta e fragmenta as partículas por choque e abrasão. Também podemos citar a erosão glacial, química, costeira, fluvial e pluvial, casos em que a água é um agente importante no processo erosivo.

A erosão laminar (superficial ou em lençol) é um processo de remoção de uma camada de forma gradual, de modo mais ou menos constante, provocado por fluxos hídricos não concentrados. Já a erosão linear tem fluxos concentrados de água que provocam incisões no solo. As erosões lineares de pequeno porte, com cerca de 50 cm de profundidade, são denominadas sulcos. As porções erodidas que ultrapassam essas medidas e não atingem o lençol freático são chamadas de ravinas; ao interceptar o lençol freático a erosão é chamada de voçoroca, bossoroca ou boçoroca (Mortari, 1994).

A erosão do solo não é apenas um processo geomorfológico de dissecação da paisagem, mas um processo de degradação do solo que pode afetar a vida das pessoas ali instaladas e causar danos ambientais. De acordo com o Manual de Geotecnia do Departamento de Estradas e Rodagem (DER, 1991), a erosão é um processo que ocasiona destruição da estrutura do solo e a remoção das suas partículas, sobretudo pela ação das águas, depositando os sedimentos em áreas mais baixas do relevo. Ela tem como peculiaridade o fato de ocorrer em velocidade lenta, com avanço contínuo e progressivo ao longo do tempo.

A água flui de diferentes formas em diferentes tipos de subsolo, geomorfologia e permeabilidade do substrato. É possível ver quando a água flui na superfície em cabeceiras, quando estas se encontram em um ponto de confluência, gerando as principais drenagens, mas o que geralmente acontece quando existe uma nascente de rio é que ali é um ponto de descarga do aquífero, sendo que até aquele ponto a água flui por poros das rochas, planos mais permeáveis, fraturas e fendas.

Quando a água se move no interior do solo, exerce em suas partículas sólidas forças que influenciam no estado de tensões do maciço. Variações no regime de fluxo alteram a tensão efetiva no solo em cada ponto, variando assim os valores de pressão neutra. Solos não coesos ou com baixa plasticidade são mais facilmente erodíveis e com tendência a colapsar, sujeitos ao processo de erosão interna.

Estudos mais aprofundados da *Carta de Suscetibilidade* de Brotas (CPRM, 2020) indicam que mais de 90% da área do município tem relevo suave, predominantemente colinas, baixos platôs e rampas de alúvio-colúvio, formas de encostas convexas com topos amplos – todas essas formas com declividades inferiores a 15°. Tais terrenos possuem um número considerável de feições erosivas instaladas e são, por essência, extremamente suscetíveis à erosão, principalmente em cabeceiras de drenagem, tanto pela forma de relevo, como pela geologia.

Nas porções onde o relevo muda, existe um grande potencial de formação de ravinas e alguns tipos de escorregamentos, especialmente nos pontos onde ocorre a quebra de relevo. Nas porções ainda mais suaves do relevo, como nos topos de colinas, o processo erosivo pode atingir grandes proporções, pois ali o solo, de textura arenosa, geralmente é mais espesso. Em Brotas, há predomínio de baixas declividades, de 0 a 5° em baixos platôs dissecados, e esse é o relevo do polígono escolhido como alvo da pesquisa e também de toda a Bacia do Córrego Santa Maria (CPRM, 2020).

Ao analisarmos os arredores, em algumas vertentes mais íngremes onde há predomínio de arenitos, o que vemos são rochas aflorantes, com uma pequena camada de solo; essa também é a configuração predominante da área de estudo. Em alguns pontos existe uma camada muito fina de solos coluvionares, com depósitos de pequena dimensão. Na área de estudo, o solo é muito raso, por vezes inexistente, de modo que podemos ver uma espessura de solo pequena, variando de 0 a 10cm, sustentado apenas por raízes e matéria orgânica (**Fig. 38**). Em outros pontos, como próximo à fenda, o solo chega a ter 4 metros de espessura, o que se deve principalmente à declividade da região, pois se trata de uma porção suave do relevo.

No município de Brotas, em áreas onde o solo é originário dos arenitos, encontramos solos coluvionares mais espessos apenas em vertentes mais afastadas da área de estudo, nas rupturas negativas de relevo, mas nesses locais também é

possível ocorrer depósitos de tálus, o que pode inviabilizar o terreno para a agricultura e cultivos de grande porte.



Figura 38 – Detalhe do contato solo-rocha.

Processos erosivos modificam a paisagem ao longo do tempo. Compreender tais processos e suas especificidades é algo bem complexo, pois envolve diversos agentes e fatores, como a ação da água, intervenções humanas nos arredores, tipo de solo e comportamento geotécnico do material, além do tipo de cobertura vegetal.

Para melhor entendimento e tomada de decisões, é preciso saber que existe uma dinâmica de formação de solos e taxas erosivas. De acordo com Mortari (1994), quando a dinâmica de erosão e formação do solo é equilibrada, ou seja, o processo de formação compensa a erosão, tem-se a erosão normal ou geológica. Portanto, erosão acelerada é fruto de um desequilíbrio que ocorre quando o processo erosivo é maior do que o processo de formação dos solos (alteração das rochas e de processos pedogenéticos).

Analisando a dinâmica de formação de solos e taxas erosivas em solos arenosos, devemos partir do pressuposto de que o tempo que um solo leva para se formar depende intimamente do tipo de rocha, do tempo necessário para o intemperismo de cada mineral dessa rocha e do clima. O relevo também é fundamental nessa dinâmica, e nas áreas de maior declividade a formação de solos é bem mais lenta, pois ali é um ponto onde a erosão supera a deposição. Em relação à mineralogia das rochas, os minerais primários podem ou não dar origem a argila, que é menos erodível que areia, por exemplo. Como os arenitos são quase predominantemente compostos de quartzo, o solo deles originário é naturalmente pobre e pode ficar mais rico em nutrientes com o decorrer do tempo, com acréscimo de matéria orgânica, quando parte dos minerais se transforma em argila ou quando há porções com cimentação argilosa.

No caso do arenito, a forma do grão de areia também pode dizer muito sobre a erosão dos terrenos. O trabalho de Wu e Caetano-Chang (1992) fez um estudo dos minerais leves e pesados dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu, permitindo a identificação de associações mineralógicas, além de contribuir para a caracterização genética e para o conhecimento das áreas-fonte dessas unidades. Nas amostras coletadas por eles em diversos pontos da Formação Botucatu, foi indicada composição mineralógica de 93 a 99% de quartzo, enquanto na Formação Pirambóia o quartzo varia de 85 a 93%. Seriam os arenitos da Formação Pirambóia subarcóseos submaturos a maturos, enquanto a Formação Botucatu apresenta quartzo-arenitos e subarcóseos maturos a supermaturos.

De acordo com Wu and Caetano-Chang (1992):

Durante o transporte e deposição desses arenitos, os minerais sofreram fortemente a ação abrasiva eólica, eliminando os minerais de baixa dureza. Por sua vez, as condições eólicas de clima árido então vigente propiciaram a preservação de minerais metaestáveis, pouco resistentes ao ataque químico, porém altamente resistentes à abrasão mecânica, como a estaurolita. Ao tempo da deposição da Formação Botucatu, teve lugar um vulcanismo básico

na área-fonte, propiciando o fornecimento de magnetita e ilmenita. As características texturais e composicionais dos minerais leves e pesados dos arenitos das formações estudadas permitem concluir que foram transportados e depositados sobretudo em condições eólica.

Logo, a pouca espessura do solo está intimamente ligada à mineralogia dos arenitos, dando origem aos neossolos quartzarênicos (areias quartzosas), mais suscetíveis à ocorrência de processos erosivos. Os solos se tornam um pouco mais espessos na área de mata natural, com o aporte também de matéria orgânica, o que resulta em uma umidade natural um pouco maior.

Um dos pontos a serem observados na região de Brotas e em outras cidades com cenários similares é que existem muitas pastagens e práticas indiscriminadas de agricultura nas cabeceiras de drenagem, que ficam muito vulneráveis e deterioradas por processos erosivos, alguns em estado avançado. Isso se dá pela remoção da mata nativa, expondo o solo, deixando-o suscetível ao transporte pela ação das águas superficiais e também pela gravidade. Podemos dizer que foi isso o que aconteceu na cabeceira do Córrego Santa Maria, onde havia uma área extensa desmatada utilizada para pastagem e plantação de cana de açúcar, e hoje parte dela foi reflorestada. Isso é claramente observado em imagens aéreas, onde há uma região com depósito recente de areia *lavada*. Com imagens de drone, foi possível inclusive verificar uma área de depósito de sedimentos na área reflorestada, onde aparecem porções mais esbranquiçadas (**Fig. 39**). Isso pode indicar que o solo ainda está sofrendo erosão, apesar da tentativa de reconfiguração da paisagem, e em alguns pontos dessa região podemos encontrar pequenas zonas de acúmulo de sedimentos recém-depositados e inconsolidados (**Fig. 40**).



Figura 39 – Área reflorestada, com deposição de sedimentos inconsolidados bem ao lado da frente erosiva.



Figura 40 – Detalhe para material depositado na área reflorestada.

O início do desenvolvimento urbano de uma região frequentemente resulta em erosão intensa, em especial nas fases de preparação do solo e construção. O solo fica exposto e há grande movimentação de material, obras de terraplanagem, fundações, cortes e aterros. Depois, quando os núcleos urbanos estão instalados, quase sempre há grandes superfícies sendo impermeabilizadas, o que altera a forma como a água superficial e pluvial penetra no solo. Até mesmo o nível freático pode mudar direta ou indiretamente devido a intervenções humanas. Quase sempre, aumentos repentinos nas taxas de erosão são algumas das consequências.

O mesmo conceito pode ser aplicado em áreas utilizadas para alguns tipos de cultura, tomando como exemplo a área utilizada para plantação de cana a montante da frente erosiva: o substrato é frequentemente remexido por arados para o preparo do solo, que é cíclico, com trânsito de máquinas pesadas para colheita.

O solo pode ficar mais compactado, o que diminui sua macroporosidade, após trânsito intenso de veículos pesados por um longo período. Já um solo arado ou movimentado para abertura de curvas de nível fica mais fofo. Essas alterações podem refletir na mudança da capacidade de drenagem do solo, e as variações da compactação podem causar maior erosão. É importante também citar que o evento de colapso desse tipo de estrutura, como os pipes, pode ser adiantado por fatores externos, como sobrecarga de máquinas agrícolas e animais que circulam pelo local, portanto, se faz necessário o conhecimento das áreas com cavidades subterrâneas e cuidado no manejo de grandes equipamentos no local.

Ainda sobre alguns parâmetros, vale citar a avaliação dos princípios de porosidade e permeabilidade, pois a capacidade de drenagem de um solo depende do volume de macroporos e da conectividade entre eles. Um exemplo são os solos argilosos, que apresentam porosidade, porém com predominância de microporos, o que favorece a retenção da água. Solos arenosos, por conta da forma, da mineralogia e dos arranjos dos grãos, têm macroporos, favorecendo a transmissão da água para níveis inferiores. Ou seja, solos arenosos tendem a ser bem drenados e com baixa umidade.

Na cidade de Brotas e região, as áreas com solos mais pobres têm sido utilizadas com mais frequência para plantação de cana, que não requer muitos nutrientes e ocupa regiões mais aplainadas. A área de estudo tem uma característica bem interessante, pois há predominantemente solos derivados de arenito, muito pobres em

nutrientes; já ao sul da área, próximo ao Rio Jacaré Pepira, há solos ricos originados dos basaltos, com alto teor de ferro, cálcio, magnésio e potássio.

A área do canavial, portanto, que ocupa a maior parte da área de contribuição da bacia, tem predomínio de solos rasos e pobres, altamente erodíveis que podem causar o assoreamento dos rios. Assim, além do processo erosivo, existe outro agravante, pois, juntamente com esses sedimentos e a água, alguns produtos químicos e fertilizantes podem ser transportados, contaminando o Aquífero Guarani.

Parker et al. (1990) citam que as causas mais comuns do início do *piping* em áreas secas seriam: seca sazonal, desnudação da terra e infiltração da drenagem da superfície, auxiliada por atividades humanas como desmatamento, queimadas recorrentes, excesso de pastagem e irrigação excessiva. Como a erosão da superfície, a prevenção da erosão interna é melhor do que o controle, mas, na maioria das regiões, pouca atenção é dada para prevenir ou controlar a erosão da subsuperfície.

Terzaghi et al. (1996) mencionam algumas causas de *piping*, como o bombeamento descuidado de um poço aberto ou o tamponamento natural de um corpo de água subterrânea através da erosão de uma margem do rio.

É de se imaginar que na Bacia do Córrego Santa Maria a erosão tem grande influência antrópica, induzida por interferência do ser humano nas últimas décadas, quando a região foi ocupada. Ela está acelerada pelas variações de fluxo de água superficial, combinadas com as variações de porosidade e permeabilidade nos solos a montante da área de estudo, gerando taxas de perda de solo mais altas. Sendo a Bacia do Córrego Santa Maria uma área de recarga do reservatório, analisar essas fragilidades e condições que agravam tal cenário é de grande importância.

Existe uma forte tendência a se afirmar que o *piping* na Bacia do Córrego Santa Maria tem uma grande influência antrópica. No entanto, há trabalhos, como o de Parker (1963), relatando o mesmo tipo de fenômeno de *piping* que se desenvolveu sem a interferência do homem, após um deslizamento de terra natural represar uma massa d'água que, por infiltração, gerou *pipes*. É importante, assim, lembrar que o *piping* é um processo natural em muitas situações, mas que a expansão urbana desordenada pode potencializar o potencial erosivo. A falta do correto ordenamento de águas pluviais em solos de baixa coesão na Bacia do Córrego Santa Maria pode proporcionar o surgimento de processos erosivos subterrâneos de grande porte, cuja evolução pode resultar em riscos geotécnicos para a população ao redor.

8.1. Revisão bibliográfica- Erosões internas

A erosão superficial é esperada numa região como a estudada, e pode ou não ser agravada por fatores externos. Porém, erosão interna numa cabeceira de drenagem, com a formação de uma voçoroca em área de vegetação natural, é algo incomum. Geralmente o que se vê são voçorocas em áreas intensamente desmatadas ou degradadas, e no Córrego Santa Maria ela nasce em uma área de mata fechada e razoavelmente preservada, avançando para montante, onde o solo está desprotegido.

Para explicar o surgimento dessas feições é preciso compreender o fenômeno de *piping*, que é algo que ocorre em situações muito específicas, não acompanhando o desenvolvimento tradicional de processos erosivos superficiais que normalmente avançam de erosões lineares, que então evoluem para ravinas e que eventualmente se tornam voçorocas. Além disso, terrenos estratificados são um condicionante geológico que favorece a ocorrência de *pipings*, pois o fluxo pode se concentrar em uma determinada camada ou estrato.

Logo, o *piping* é um produto da dinâmica interna do maciço, formando tubos vazios por onde a água circula de forma contínua como um filete de água, abrindo estruturas circulares pelo arraste dos sedimentos que são transportados (**Fig. 41**).

Na área de pesquisa, constatamos que o *piping* ocorre em razão da existência de pontos de maior permeabilidade, devido a variações na granulometria do arenito e/ou pequenos falhamentos, fraturas e descontinuidades. Em alguns túneis há um forte controle estrutural e também pelos estratos da rocha, em especial onde a estratificação cruzada é mais marcante. Nesses pontos, a água passa a fluir preferencialmente de forma concentrada. As variações desses fluxos de água passam a erodir o arenito, que é friável, iniciando o processo de formação de cavidades.

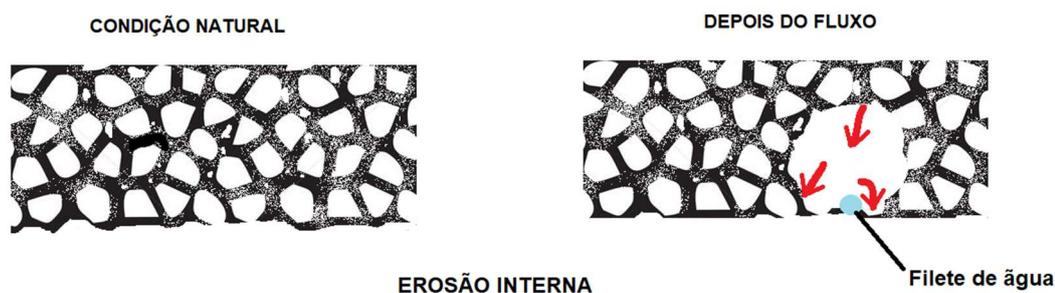


Figura 41 – Dinâmica de formação de *piping* (adaptado de John, 1987).

Para os estudos em fluxos de água subterrânea, é preciso conhecer a Lei de Darcy. As bases desse princípio foram criadas para fluxo subterrâneo em meio poroso (neste caso, o fluxo subterrâneo em um aquífero arenoso granular). Para contemplar o fluxo de fluidos, considerando o fluxo laminar, a inércia pode ser ignorada. Então, temos:

$V=p(h/l)$, onde:

V é a velocidade,

h é a altura piezométrica,

l é o comprimento do fluxo entre dois pontos dados e

p é o coeficiente de permeabilidade do aquífero.

A Lei de Darcy é muito adequada para descrever taxa de fluxo de fluido homogêneo através de meio poroso isotrópico. Ela não é plenamente aplicável ao carste, caracterizado por um meio de porosidade terciária (condutos), ou outros ambientes com porosidade secundária (fissural), pois tais ambientes têm porosidade do meio anisotrópica (Hardt e Pinto, 2009).

Isso provoca uma grande dificuldade quando se tenta elaborar um modelo único. As tentativas para se estabelecer tal modelo resultam numa aplicabilidade localizada. Assim, para elaboração de um modelo que será aplicado a um dado sistema (que não necessariamente se aplicará a outros), é preciso medir o comportamento do fluxo subterrâneo no sistema, avaliar as dimensões dos condutos e suas interconexões, como se dá a recarga do sistema, a porosidade da rocha encaixante, entre outros fatores (Hardt e Pinto, 2009).

É importante compreender o sistema hidráulico da formação do *piping*. Terzaghi et al. (1996) falam que o processo se inicia quando a camada se torna saturada e a carga hidráulica se eleva em direção ao talude mais próximo ou outra frente exposta que, ao cortar a camada permeável, começa a pingar na face do penhasco ou barranco, em sua parte mais permeável. À medida que cada gota de água sai, ela leva partículas dispersas e desagregadas em suspensão. Essa ação, uma vez iniciada, cria um pequeno buraco na face do penhasco: o orifício de *pipe* em desenvolvimento (Fig. 42).

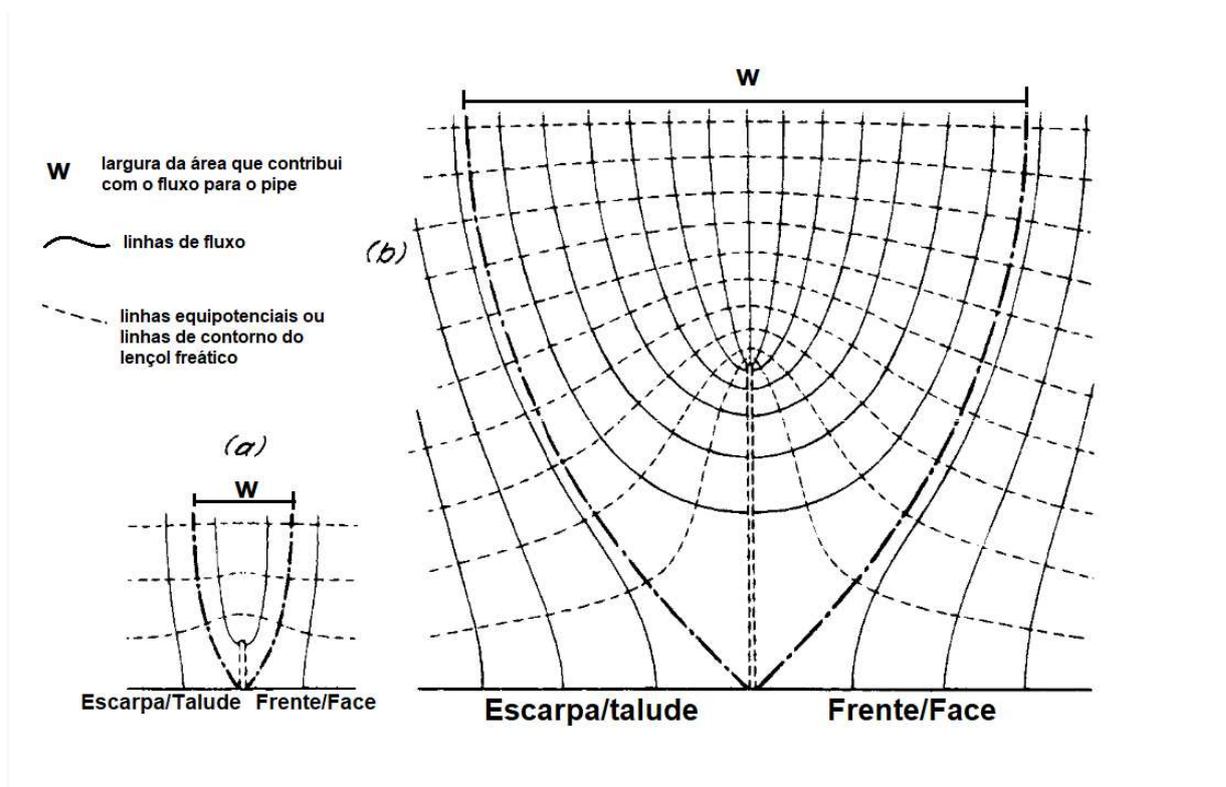


Figura 42 – (a) estado incipiente (b) após a erosão ter se distanciado consideravelmente da nascente (adaptado de Terzaghi et al., 1996).

De acordo com Magri (2013), seriam dois mecanismos de erosão hídrica subsuperficial atuantes em boçorocas: o *piping* e a erosão por vazamento (*seepage erosion*). O *piping* é definido como a ocorrência de migração total das partículas do solo juntamente com a água para uma superfície externa, o que ocorre devido ao fluxo hídrico em macroporos (fissuras, cavidades biológicas, juntas de origem tectônica etc.), gerando forças cisalhantes nas suas margens (Hagerty, 1991a). Tais forças cisalhantes podem provocar o destacamento e o transporte das partículas, fazendo com que o macroporo se alargue até o ponto em que ocorre colapso do material do teto (Coelho Neto, 1994, apud Magri, 2013).

A erosão por vazamento está relacionada com o retorno das águas subsuperficiais à superfície, ou seja, à exfiltração dos fluxos d'água subsuperficiais. Quando o fluxo exfiltrante atinge uma descarga crítica, ele é capaz de deslocar as partículas menores do solo por entre as maiores, provocando um dismantelamento da estrutura do solo, formando vazios no seu arcabouço que podem ocasionar em colapsos e rupturas (Coelho Netto, 1994, apud Magri, 2013).

Na área de estudo, a erosão hídrica subsuperficial mais atuante é o *piping*, gerando diversos tubos pelo carreamento de partículas, mas também vemos

evidências de erosão por vazamento (*seepage erosion*) em alguns pontos, especialmente próximos ao teto da caverna, nas partes onde os túneis são mais alongados e com forma constante, e também nas paredes das voçorocas já existentes. Esses tubos, eventualmente, podem se unir e variações no fluxo de água subterrânea podem acelerar esse processo, formando, então, verdadeiros túneis subterrâneos ou uma rede subterrânea de tubulações.

Há um outro termo, o *sapping*, que é aplicado para casos em que o fenômeno de *piping* ocorre disseminado numa área mais extensa (**Fig. 43**). Na área de estudo há evidências do fenômeno, como se vê na **Figura 44** (Sterrett, 1980; Higgins, 1984, apud Hagerty, 1991).

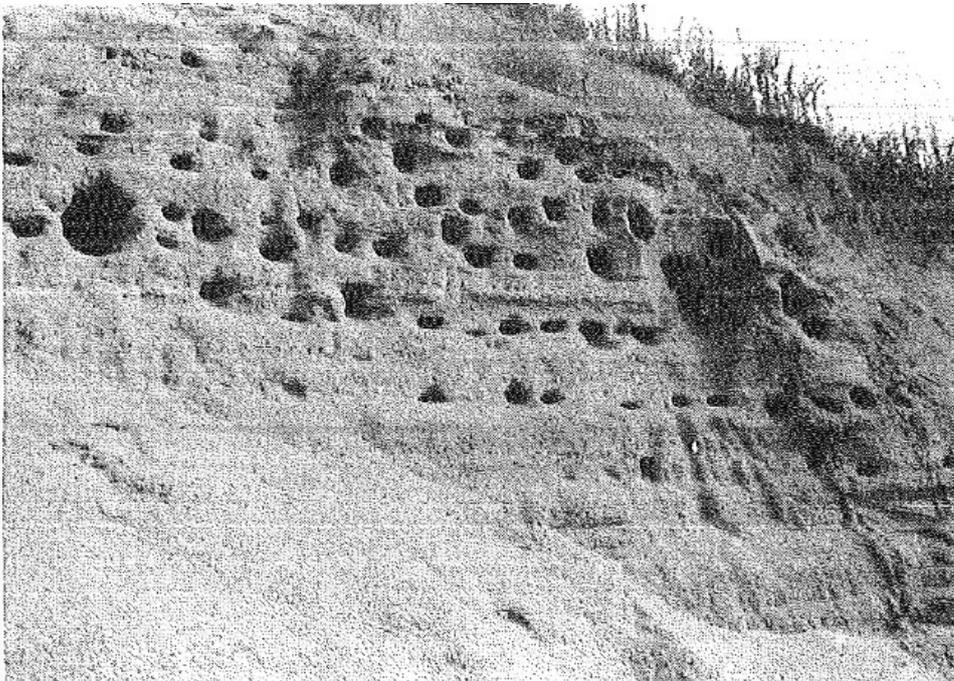


Figura 43 – Cavidades de saída de infiltração na zona de *piping/sapping* do trabalho (Hagerty, 1992).



Figura 44 – Evidências de *sapping* nas laterais da fenda principal, zona afótica. Na foto: Ferrari indicando as feições.

O *piping* ocorre em solos naturais de diversas naturezas, e esse processo se dá em razão do grande volume de água que percola o interior de fraturas e das porções alteradas do solo. Na medida em que o processo evolui, a camada de solo superficial, que possui espessuras reduzidas, passa a não resistir aos esforços solicitantes, iniciando o processo de abatimento superficial do terreno e, em alguns casos, chegando ao colapso total.

Após a abertura dos tubos, as paredes e os tetos dos tubos podem não resistir aos esforços do maciço ou colapsar por diversos motivos, seja por aporte da erosão superficial, de águas de chuvas, bioturbação, influência das raízes das árvores. Esses abatimentos e colapsos seguem alargando e, como resultado dessa dinâmica, temos mais colapsos e escorregamentos das laterais do terreno, podendo, ocasionalmente, atingir o nível freático da região.

Piping e *sapping* foram observados em terrenos glaciais, onde a heterogeneidade dos depósitos do solo pode concentrar o fluxo e onde características secundárias, como juntas em depósitos pré-compactados, também podem levar a fluxo e exfiltração localizados (Hendry, 1982; Hill, 1973; Lawson, 1985, apud Hagerty, 1991). Existem relatos de *piping* em depósitos lacustres que consistem em siltitos e ritmitos quando os depósitos do lago foram expostos por escavação abaixo do lençol freático (Leggett e Bartley, 1953, apud Hagerty, 1991).

Terzaghi et al. (1996) cita fenômenos de *piping* em vários tipos diferentes de solo, porém todos eles tinham duas características importantes em comum. Primeiro, o material sobre o solo erodido sempre possuía pelo menos um traço de coesão, suficiente para formar um teto sobre o túnel de erosão. A segunda característica refere-se ao fato de que a subsidência do teto também ocorre a uma grande distância da extremidade de descarga do túnel. Isso indica que a capacidade erosiva de uma nascente aumenta à medida que o comprimento de um túnel aumenta.

Ao contrário da grande maioria das erosões, ela não se desenvolve somente pela contribuição das águas superficiais, mas também por meio das águas subsuperficiais, e, nesse caso, temos a formação de uma boçoroca/voçoroca ou vossoroca. Quando atingem o lençol freático, as voçorocas podem atingir grandes dimensões e ser de difícil controle.

Para entender melhor o fenômeno de *piping*, precisamos entender que quando a água se move no interior do solo, exerce em suas partículas sólidas forças que influenciam no estado de tensões do maciço. Variações no regime de fluxo alteram a tensão efetiva no solo em cada ponto, variando assim os valores de pressão neutra.

Solos não coesos ou com baixa plasticidade são mais facilmente erodíveis e, quando sujeitos a variações de fluxo de água, podem sofrer erosão interna regressiva (*piping*) ou sufusão, a depender do peso e do tamanho da partícula, do estado de tensão do maciço ou da distribuição granulométrica.

A sufusão é o processo de erosão interna pelo qual as partículas mais finas do solo são destacadas da matriz sólida e transportadas através de constrições pela infiltração (Bonelli e Marot, 2011).

Sufusão ou instabilidade interna é a remobilização das partículas finas, quase sempre em materiais inconsolidados, areias e cascalhos. Na sufusão, as partículas menores se movem no eixo vertical continuamente e se rearranjam nos vazios entre as partículas maiores. Raramente é observada variação de volume das camadas de solo, porém essa erosão interna pode gerar um problema geotécnico em barragens e em projetos de estruturas hidráulicas (**Fig. 45**).

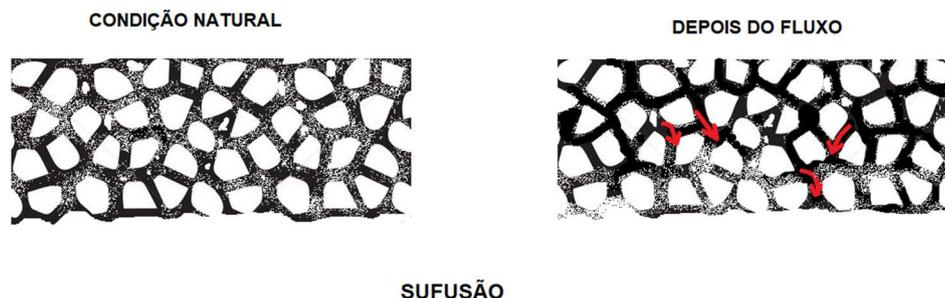


Figura 45 – Fenômeno de sufusão (adaptado de John, 1987).

O arenito Botucatu tem uma faixa muito estreita de variação granulométrica, dentro da fração areia fina e baixa relação fino/grosso, ou seja, é bem homogêneo. Isso se dá pelo ambiente eólico de origem, e essa condição faz com que a sufusão não seja o fator determinante para formar uma cavidade.

Porém, o fenômeno de sufusão não deve ser ignorado, pois a acomodação granular pode ser uma erosão não direcional pretérita que deixou o maciço fragilizado, favorecendo o início do *piping*. Ou até mesmo ser o fenômeno que faz com que haja o abatimento dos tetos das cavidades, juntamente com o aporte da erosão superficial.

Na área de estudo, os tubos formados pela erosão subterrânea em arenitos não são muito profundos e são formados com forte controle estrutural, com percolação de águas por meio de fraturas com carreamento do material, gerando cavernas.

Aqui iremos utilizar termos como cavernas, fendas, cavidades, túneis, *pipes*, entre outros, para representar segmentos do sistema de *piping*. De acordo com Zaine e Perinoto (1996), cavernas seriam quaisquer cavidades naturais, sendo esse um termo genérico independentemente de tamanho, existência ou não de um curso d'água, ambiente afótico ou ornamentação. Outro termo que pode ser utilizado é abismo, local com cavidades com desníveis maiores que 15m e poço para cavidades menores que isso. A caverna pode também receber uma denominação de gruta ou toca, a depender do tamanho dela, pois o limiar é de 50 metros. Pontos de abatimento de teto interconectados por cavernas iremos chamar de claraboias.

Com a evolução do processo de alteração da rocha e erosão subterrânea (vertical e horizontal), são aumentados também os gradientes hidráulicos subterrâneos e a velocidade do fluxo subterrâneo, e assim se dá a progressão do fenômeno, que tem como resultado mais marcante cavernas em arenito e diversas outras feições erosivas que serão mais detalhadas a seguir.

8.2. Feições de abatimento

Foram encontradas, na área de pesquisa, fendas, condutos, cavidades e cavernas que evoluíram a partir de caminhos horizontais preferenciais das águas subterrâneas, que passaram a erodir o subsolo por *piping* e que podem evoluir para condutos verticais que resultam na subsidência do solo e no arraste do material para o seu interior, resultando em feições de depressões e crateras no solo na superfície.

O que se vê de forma disseminada na área são abatimentos circulares. Por esse motivo, alguns autores já chamaram as feições de pseudocarste, pois suas formas na superfície são muito similares às de carstes em carbonatos, em especial, as dolinas (Parker et al., 1990).

Outras feições encontradas na área, a exemplo de córregos que desaparecem e ressurgem – como em sumidouros –, drenagens subterrâneas e abatimentos circulares, como dolinas, podem facilmente ser chamadas de carste ou, no caso, pseudocarste. Olhando as imagens da região, sem conhecer a geologia, as formas são realmente muito similares, mas foram desenvolvidas principalmente pela erosão subsuperficial grão-a-grão de material em grande parte insolúvel, enquanto o verdadeiro carste é formado por molécula-a-molécula, pela remoção de íons dissolvidos de rochas solúveis, como calcário, dolomita e gipso.

E enquanto o carste verdadeiro formado por carbonatos pode durar séculos, as formas do pseudocarste, especialmente as menores, tendem a ser temporárias, e algumas podem ser alteradas facilmente em uma forte tempestade. Algumas frentes erosivas de ravinas ou voçorocas podem recuar mais de 10 metros em um único evento (Parker et al., 1990).

Na área de estudo, os *pipes* variam de poucos centímetros a até mesmo uma verdadeira caverna com pouco mais de 90 metros de comprimento e altura variável (de pouco menos de 1m a 8,60m), com diversas galerias internas, mas com um caminho principal e preferencial, que é por onde a água flui livremente de forma perene. Um mapeamento da topografia da caverna será apresentado nesta publicação.

Comparando algumas fotos do parecer elaborado pelo IPT (2009) com a situação atual, podemos compreender parte do avanços das frentes erosivas e feições encontradas na área. Sempre que possível, em trabalho de campo, foram feitas fotos

com mesmo distanciamento e ângulo, para que tenhamos a mesma vista, porém não tivemos acesso aos arquivos digitais originais, apenas a cópias e fotos reproduzidas, o que prejudicou a qualidade do material aqui exposto. No trabalho apresentado, não houve nenhum detalhamento destes colapsos e abatimentos, nenhum mapa de detalhe, nem mesmo medidas de diâmetros aproximados, portanto, sua escala na data estudada pelo IPT não é sabida. Apenas é possível identificar a localização, de modo que nem sempre podemos estimar o avanço da erosão somente com o uso de imagens.



Figura 46a – Colapso total classificado por IPT (2009).



Figura 46b – Mesma localização anterior (Foto: Autora – out./2019).

O ponto da **Figura 46a** foi classificado (IPT, 2009) como um abatimento que evoluiu para um colapso total situado no limite externo da área vegetada. Atualmente, esse local está com uma configuração diferente. O que era antes uma estrutura circular, com as suas bordas intactas e solo/rocha exposto, hoje é uma feição com bordas irregulares, que se une a duas feições menores e uma maior (**Fig. 46b**). O que antes era a superfície, com cobertura vegetal intacta, hoje não existe mais. A superfície entre esse ponto e o início do sopé da vertente colapsou, em alguns lugares totalmente, em outros por escorregamentos laterais contínuos. Porém, não existem indícios de movimentação recente, o que indica que essa frente erosiva está estável há algum tempo, pois tem vegetação de grande porte instalada e não foi encontrado nenhum escorregamento atual nas laterais.

A **Figura 47** ilustra a voçoroca principal, que faz parte do sistema de voçorocas da foto anterior, com abatimentos em diferentes níveis, sendo esse ponto o que expõe o nível d'água por cerca de 20 metros, até o ponto que adentra a fenda.



Figura 47 – Voçoroca mais a montante.

Atualmente, nesse local existe uma feição erosiva de grande porte, com alguns pontos com abatimento total (Ponto 11); acima da nascente, temos abatimentos menores: alguns totais, expondo a água fluindo em *pipes*; outros parciais, onde somente o desnível é verificado.

Um mapa foi gerado em 2019, com melhor detalhamento dos contornos erosivos e também a localização de mais uma nascente e uma drenagem perene, que flui parcialmente para um *pipe*, como um sumidouro (ponto 17 e 18). Na **Figura 48** foram descritas 18 feições de abatimento (com diâmetro superior a 0,50m), incluindo colapsos totais e parciais e um trajeto aproximado do *pipe*, baseado em observações.



Figura 48 – Colapsos e abatimentos na cabeceira do Córrego Santa Maria (jul./2019). Os números indicam as feições erosivas cadastradas até esta data.

Em observações posteriores, verificou-se que os pontos 17 e 18 (**Fig. 48**) aparentam maior atividade recente, pois sua configuração mudou bastante durante o intervalo de pouco mais de um ano (entre 2019 e 2021). Nesse local verificamos o avanço da nascente de água para leste, com erosões no talude. Sua forma, antes mais arredondada, agora está mais irregular. O canal da água, antes capturado por um túnel raso de cerca de 20cm de diâmetro, hoje já está totalmente abatido. Isso é bastante preocupante, pois esse cenário indica uma possibilidade de abertura de novos túneis a montante dessa nascente, o que precisa ser investigado mais intensamente no futuro, já que tais direção e sentido apontam áreas hoje habitadas, a

cerca de 160m desse ponto (**Fig. 49**). A última visita feita na área de pesquisa, em 2023, indica pouco ou nenhum avanço, em comparação ao cenário de 2021.



Figura 49 – Detalhe para pontos de abatimento próximos ao Conj. Hab. Santa Maria II (ago./2021).

O ponto 3 (**Fig. 48**) foi subdividido após mapeamento de superfície mais detalhado, em que foi possível verificar um limite interno das erosões de forma circular e, então, dividir em três pontos com bordas definidas. Nessa região vemos colapsos totais, com água fluindo livremente a mais de 8m de profundidade. Na **Figura 50**, tais pontos estão indicados pelos números 20, 21 e 22.

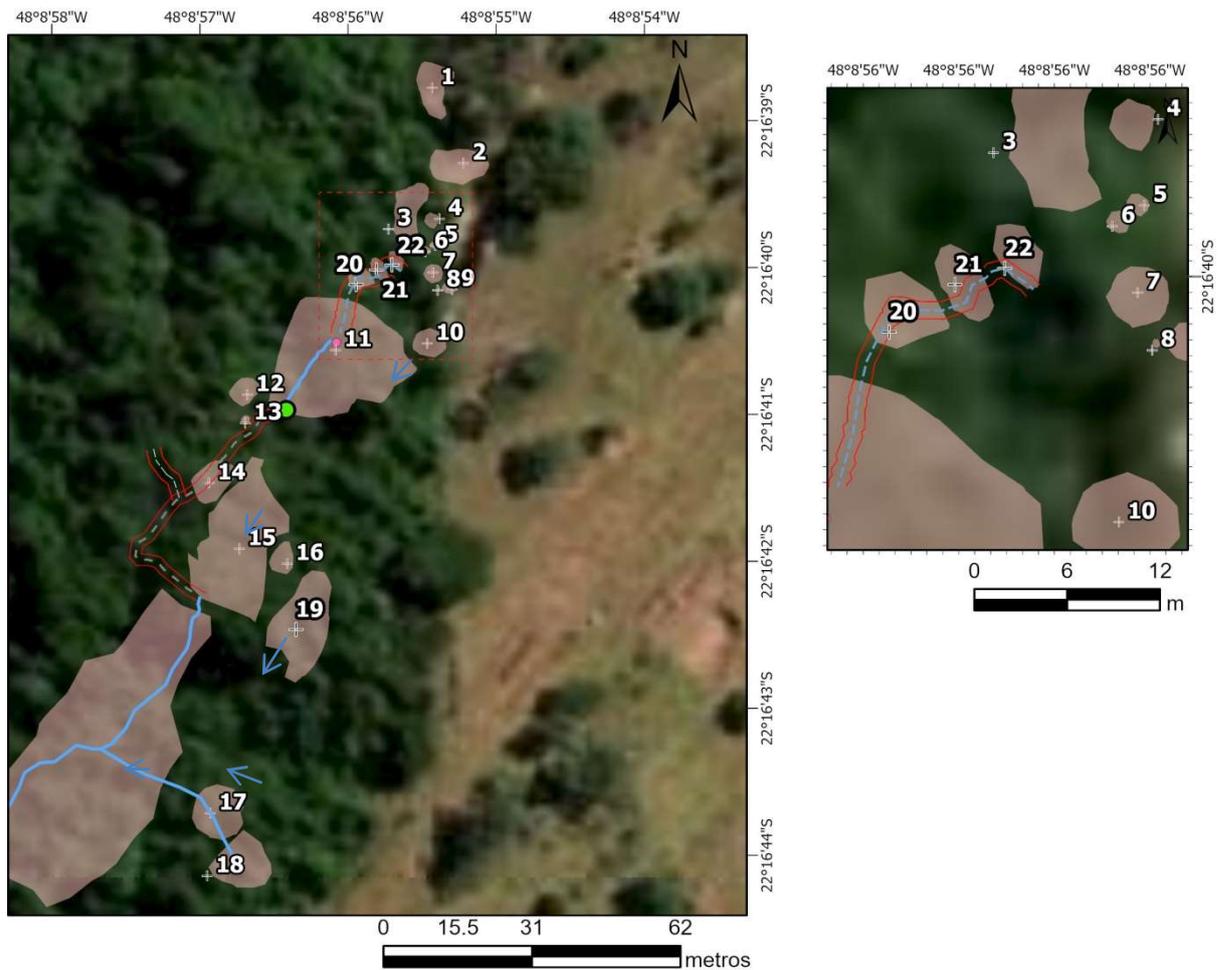


Figura 50 – Atualização dos pontos de abatimento em (ago./2021). Os números indicam as feições erosivas cadastradas até esta data.

Observe que o traçado do rio também foi detalhado em mapeamento feito em 2021. Esse é o resultado final, apontando 22 feições de abatimento e dois sistemas de *pipes*, sendo um principal, de cerca de 90 metros, com um canal secundário interno de aproximadamente 12m de desenvolvimento, e diversos menores não mapeáveis nessa escala (**Fig. 50**). No segundo sistema de *pipes*, a montante da nascente (pontos 20, 21 e 22), temos três claraboias interconectadas entre si, de profundidade média de 8m, por túneis muito estreitos, sendo possível acesso apenas por equipe de espeleologia muito experiente e de pequeno porte físico. Tais pontos foram totalmente

explorados, mas não topografados, na ocasião do trabalho da equipe da Meandros. Neles, os túneis seguem para leste e depois sudeste (ponto 22), e distam 300m das moradias (Fig. 51).

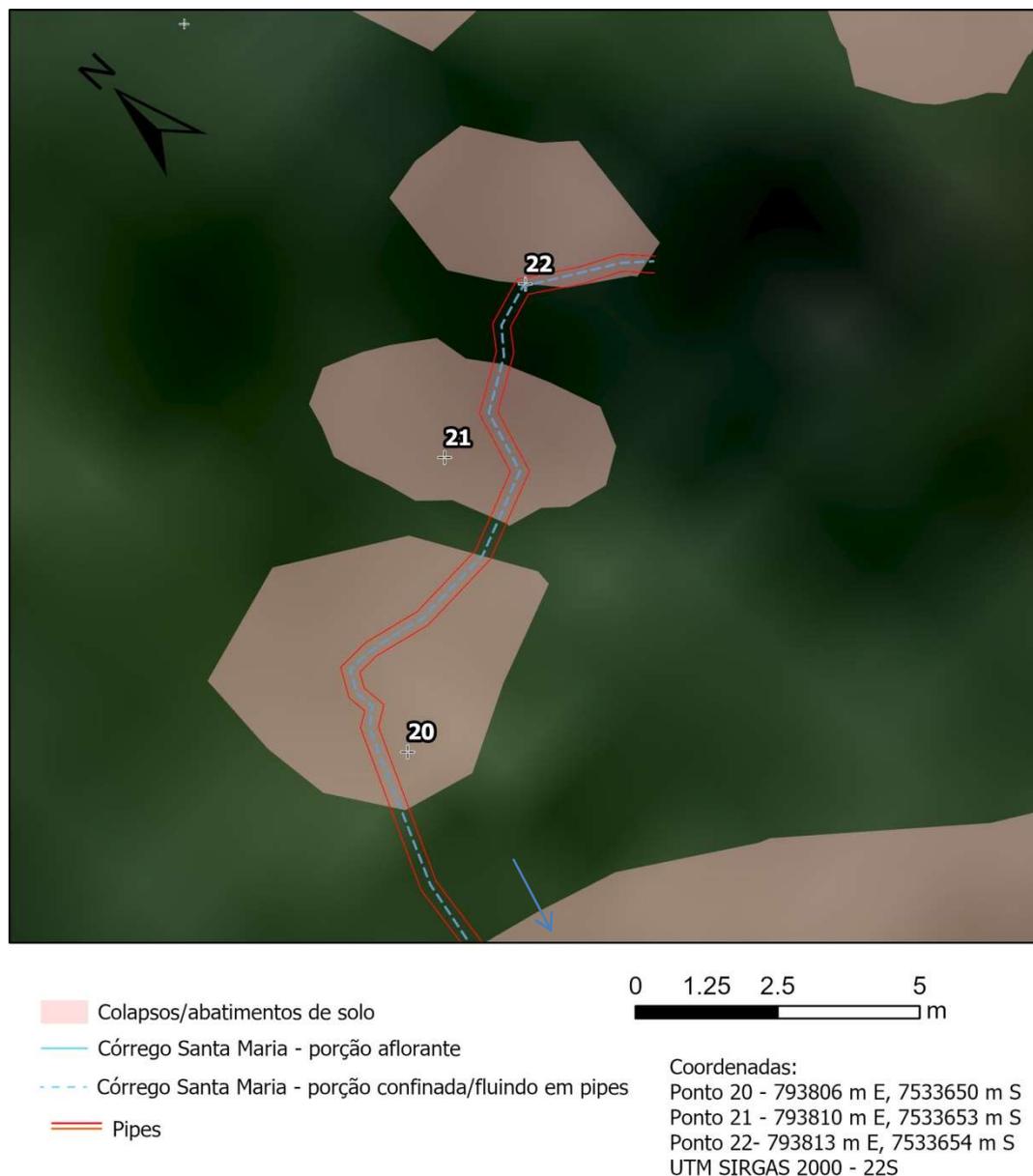


Figura 51 – Detalhe do pipe a montante da roda d’água (ago./2021).

No geral, as feições erosivas estão estáveis, sem abatimentos novos, com vegetação já consolidada. O ponto 11 segue avançando no eixo menor apenas para oeste, por desabamento das laterais da voçoroca; e no eixo maior segue remontando, com pontos visíveis de erosão e desabamento nas proximidades da roda d’água/nascente (Fig. 52).



Figura 52 – Detalhe da voçoroca norte (ago./2021).

Todos os demais pontos de abatimento já existiam em 2019, estando relativamente estáveis e com vegetação de grande porte instalada. As exceções são os já citados pontos 17 e 18, em cuja configuração vimos uma significativa alteração, tanto na forma, como no aporte de água fluindo da nascente. No ponto 11, acima descrito, numa última visita feita em 2023 foi possível verificar pouco ou nenhum avanço nas frentes erosivas, em comparação com 2021. A numeração desses pontos foi mantida, alterando apenas o formato/diâmetro das feições erosivas. Um mapa de detalhe com informações, coordenadas e localização dos pontos de abatimento estão no **Apêndice II e III**.

8.3. A reconstrução do processo erosivo

De acordo com Hagerty (1991), as cavidades formadas por *piping* não se formam, a menos que haja um ponto de saída no qual a água possa fluir, desalojar as partículas e transportar os grãos. E é partindo desse princípio que podemos reconstituir a história evolutiva das feições da área. Observando as frentes erosivas e a paisagem, e localizando os pontos de saída dos *pipes* já é possível compreender alguns processos. Na **Figura 53** conseguimos identificar o ponto de saída da água da caverna, uma superfície mais antiga, um paleocanal, um nível de erosão tubular mais antigo e o canal atual do rio fluindo além do *pipe*, que é no mesmo nível topográfico da cavidade. Também temos *pipes* secundários de pequeno diâmetro. Na parte superior da imagem, temos o ponto 15, chamado de Portal.



Figura 53 – Ponto de saída do *piping* principal, que forma uma caverna na área de estudo.

Com isso, é possível afirmar que o processo erosivo é de longa data. Podemos, inclusive, tentar reconstruir os diversos caminhos que a água percorreu, bem como processos envolvidos que deixaram suas marcas no relevo e nos testemunhos da região.

O Portal, claramente, é uma feição antiga de drenagem, um paleocanal ou até mesmo um ponto de descarga de *piping* pretérito (**Fig. 54**). Hoje o local se encontra seco, não havendo nenhum curso d'água perene em nenhuma época do ano, sendo toda ela capturada num nível inferior. Ou seja, a caverna que forma o *piping* principal corre logo abaixo desse ponto, a cerca de 2m.



Figura 54 – Ponto 15, chamado de Portal.

A forma e o relevo final encontrados no topo da cabeceira do Córrego Santa Maria (ponto 11) podem ser explicados como um processo de ravinamento que evolui para uma voçoroca (**Fig. 55**), mas, ao analisarmos todo o contexto da região de formação de abatimentos, podemos concluir que a feição encontrada é produto de uma erosão interna, que ocorre em diversos outros pontos da bacia.

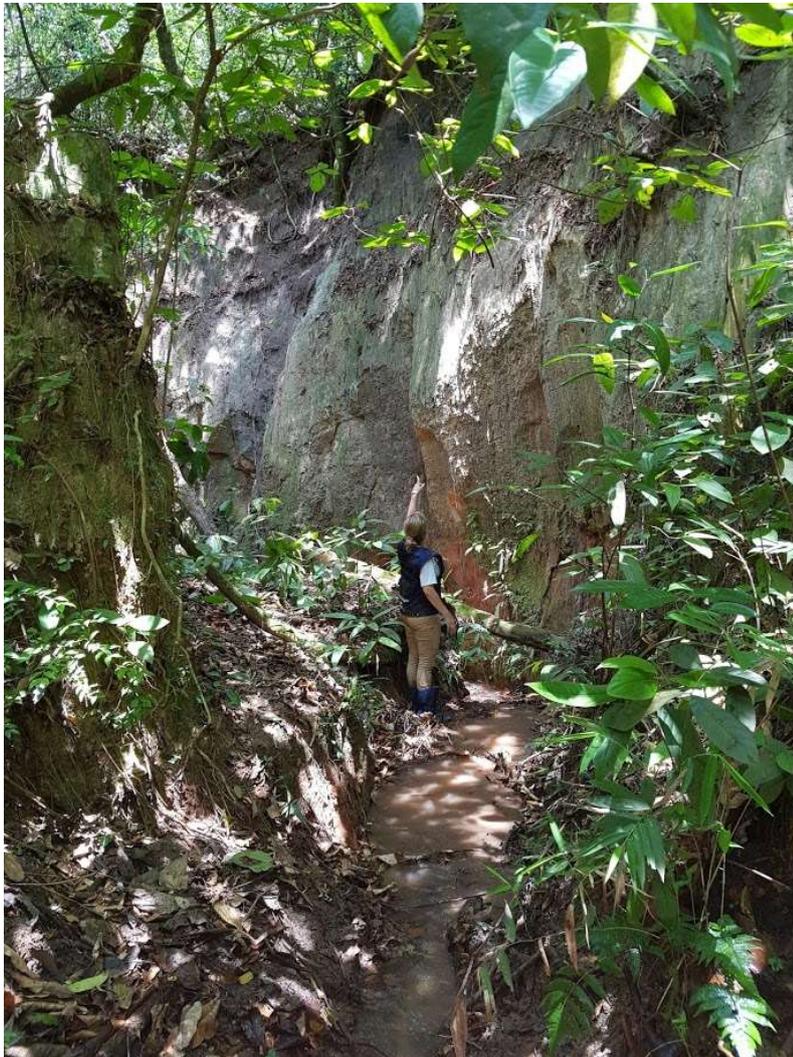


Figura 55 – Voçoroca com água fluindo.

Processos de formação de erosões como as ravinas são iniciados e transformados não apenas por processos de erosão da superfície, mas também por outros subterrâneos, como o *piping* (Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018). Logo, o que vemos na região e o que possivelmente aconteceu foi um abatimento de um tubo, que avançou com quedas e deslizamentos laterais para uma feição erosiva de grande porte do tipo voçoroca (**Fig. 56**).

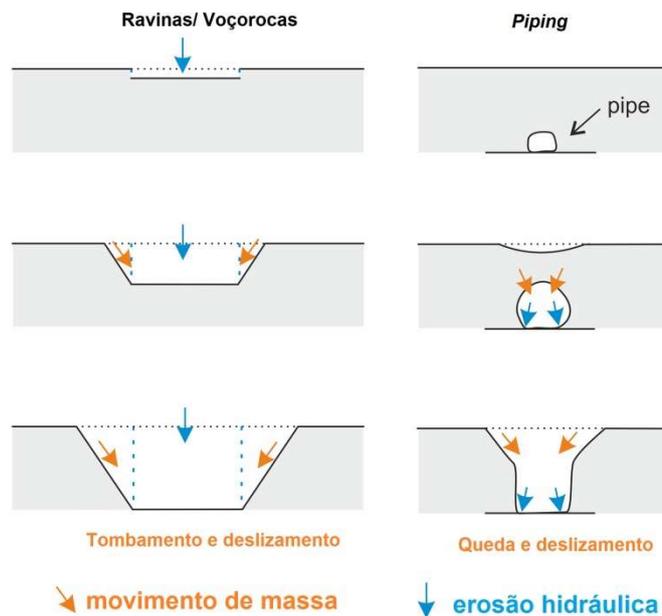


Figura 56 – Processos erosivos do tipo voçorocamento e *piping* de solo, resultantes de erosão hidráulica e movimento de massas (adaptado de Bernatek-Jakiel e Poesen, 2018).

Podemos fazer esse tipo de afirmação porque não encontramos uma erosão linear ou ravinamento evidente a montante da nascente. O que vemos ali é uma vegetação razoavelmente preservada e diversos colapsos circulares alinhados.

Como exemplo, temos um abatimento encontrado a menos de 15 metros dessa voçoroca, onde já existe o colapso total do teto e foi possível caminhar até o ponto do desabamento ou fazer uma descida verticalmente (chamada de claraboia). Na superfície existe uma forma de funil, com eixo maior de 10m e menor de 8m, e a profundidade do solo estável até o teto abatido foi estimada em 7m (**Fig. 57**).



Figura 57 – Colapso total, de onde é possível visualizar o *pipe*.



Figura 58a – Mesmo ponto, material recém-depositado oriundo de deslizamentos laterais.



Figura 58b – Vista de dentro do *pipe*, com teto abatido.

Depois, tendo outra perspectiva, ao caminhar pelo túnel (**Fig. 58a**), foi possível estimar a profundidade em relação ao nível da água fluindo no *pipe*, que nesse ponto não passa de 20cm de lâmina d'água. Assim, o vazio foi estimado em 5m, com espessura variável, de acordo com a forma de funil (**Fig. 58b**), e cerca de 6m de solo até o ponto da borda da feição circular denominada claraboia (**Fig. 59**).

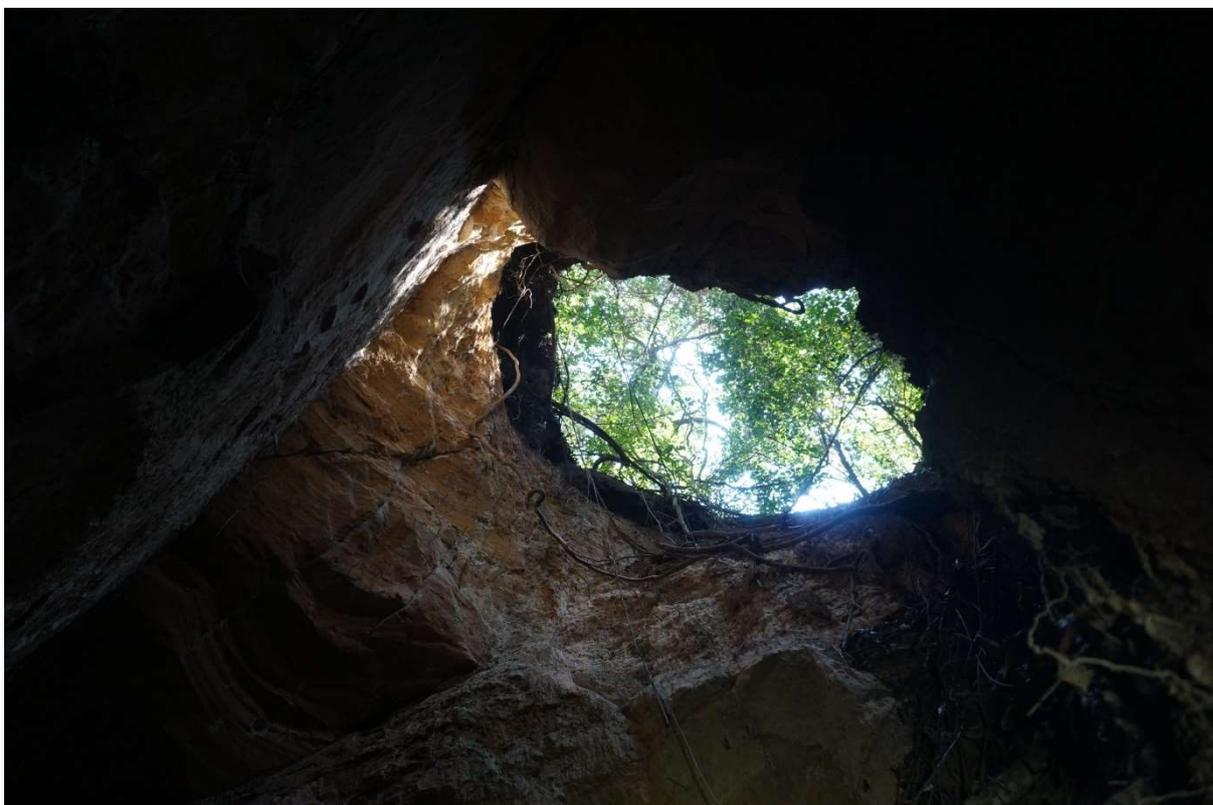


Figura 59 – Ponto de colapso total, claraboia.

Esse local é próximo da intersecção de duas linhas de geofísica, sendo então um ponto interessante para a calibração dos dados e conferência, além de um ponto de observação para compreender a erosão interna. Ao remover e transportar os grãos de um maciço, ele fica fragilizado, pois sua estrutura interna é cortada, deixando o solo solto e ainda mais erodível. Além disso, a formação de cavidades prejudica a estabilidade dos estratos localizados logo acima dos vazios. De acordo com Hagerty (1991), tensões de cisalhamento são criadas nas camadas inferiores, formando rachaduras paralelas à margem, e nas faces podemos ter deslizamentos (queda de blocos ou placas).

Nesse processo, alguns blocos e lajes que caem ficam com sua massa enfraquecida e, portanto, mais erodível. A presença de blocos ou lajes de grande porte ao longo do canal também causa interferência significativa no fluxo e representa

barreira que aumenta o volume temporariamente num período de inundação. O fluxo turbulento em torno das massas deslocadas, que podem inclusive gerar obstrução parcial do canal, aumentará a remoção de partículas em estratos mais elevados, o que pode gerar o colapso dos tetos.

Também existem evidências de *pipings* a montante da voçoroca (ponto 11), onde em pelo menos três pontos encontramos água fluindo em níveis aproximados da atual nascente, que é cerca de 1 metro acima do ponto mais fundo da voçoroca. Com as informações da geofísica foi possível inferir a direção e a profundidade desse *pipe*, que será detalhado num modelo mais completo de pontos com evidências de cavidades tubulares. Essas informações também foram validadas em campo em excursão com equipe de espeleologia, que conseguiu adentrar em algumas fendas muito estreitas, antes detectadas apenas na geofísica.

Sobre a área de pesquisa, podemos então afirmar que, além da erosão superficial nos arredores, em especial nas áreas atualmente utilizadas para plantio de cana, temos um processo de erosão interna (*piping*) disseminado pela cabeceira do Córrego Santa Maria, avançando para as encostas leste e oeste, em *pipings* secundários (*sapping*). Tal erosão é provocada pela concentração de água do nível freático, que avança formando esses tubos, os quais são evidenciados na superfície pelos colapsos e abatimentos no terreno. Em diversos pontos podemos verificar onde houve colapso total com abatimento de teto, com desabamentos laterais que alargaram e seguem erodindo como uma voçoroca, além de novos ramos de tubos. Ali, esses tubos seguem ativos e remontando, e existem evidências de que havia um nível, já erodido, que foi em algum momento capturado.

Nas proximidades da nascente temos muitos descalçamentos, desmoronamentos e solapamentos de laterais, o que indica que naquele ponto, tanto no eixo maior, quanto no menor, ainda há um processo ativo de erosão. Seguindo para montante o processo avança, mas de forma menos intensa, pois nas laterais houve uma estabilização (ponto 3) onde hoje não existe mais água fluindo, talvez após intervenções nos bairros Jardim Modelo e Felicidade. De todo modo, vestígios dos tubos ainda existem, bem como abatimentos circulares, porém a vegetação arbórea está consolidada, com muita vegetação nas laterais dos taludes, indicando estabilidade por um período considerável.

São diversos caminhos que a água segue, como exemplificado na da **Figura 60**, bem próxima à nascente, onde a água flui no canal formado dentro de uma feição

erosiva do tipo voçoroca. A partir desse ponto a drenagem adentra uma fenda, que provavelmente se formou por retroerosão, e isso pode ser explicado por existir mais um nível conhecido de base erosiva no local. Logo, é de se imaginar que onde existem feições de abatimentos e colapsos totais na superfície do terreno é o caminho feito pela água em subsuperfície ou foi, em algum momento.



Figura 60 – Fenda principal na voçoroca a montante.

9. ENSAIOS GEOFÍSICOS

Indicamos três Caminhamentos Elétricos (CE) e uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na região da Bacia do Córrego Santa Maria. Os CEs foram realizados na tentativa de mapear a localização subterrânea das cavidades e inferir as direções dos fluxos subterrâneos. A SEV foi realizada sobre a principal fenda, com intuito de estabelecer o comportamento geolétrico da cavidade conhecida presente no arenito (Fig. 61).

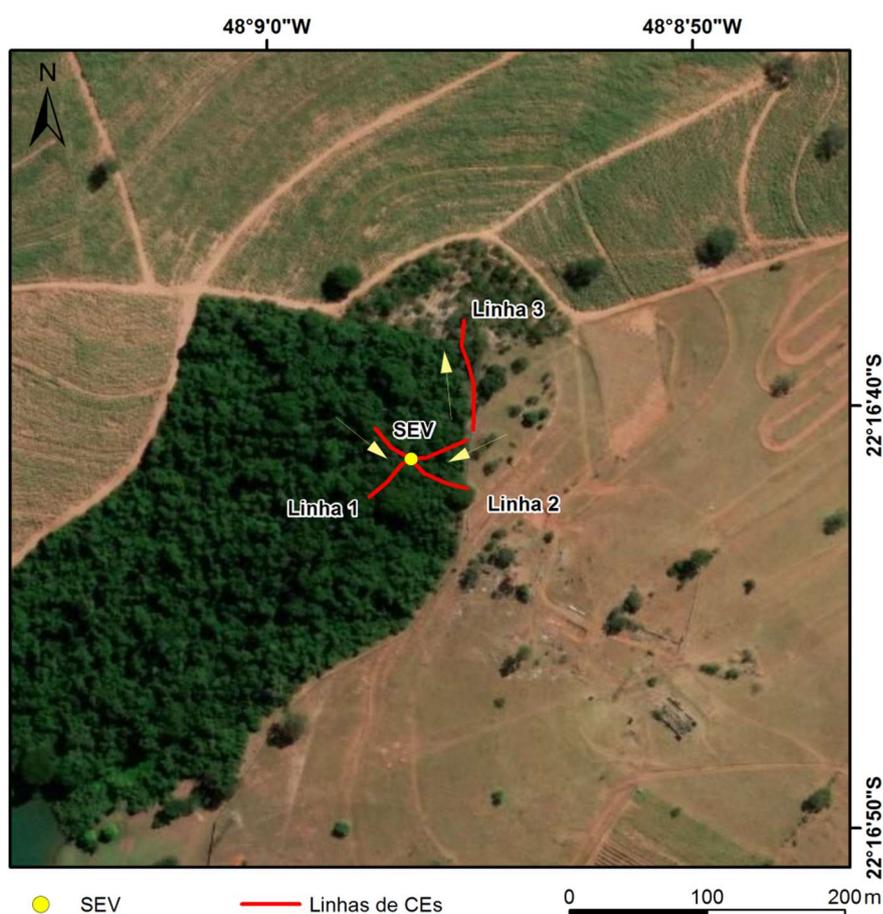


Figura 61 – Localização dos levantamentos geofísicos, limites na área destacada (as flechas indicam o sentido dos CEs).

O ponto da SEV também é o ponto de intersecção das linhas 1 e 2. A direção e trajeto dessas linhas foram escolhidos primeiramente por serem pontos de acesso mais fáceis, sem risco de queda para a equipe. Nesse caminho também havia possibilidade de abertura de uma trilha para transportar os equipamentos, além de serem pontos de interesse já conhecidos e que, de acordo com o mapeamento superficial de colapsos e abatimentos, seriam apropriados para interceptar alguns

pontos. É importante lembrar que as linhas foram traçadas de acordo com as 18 feições erosivas conhecidas na época, a fim de detectar a continuidade dos condutos (Fig. 62).

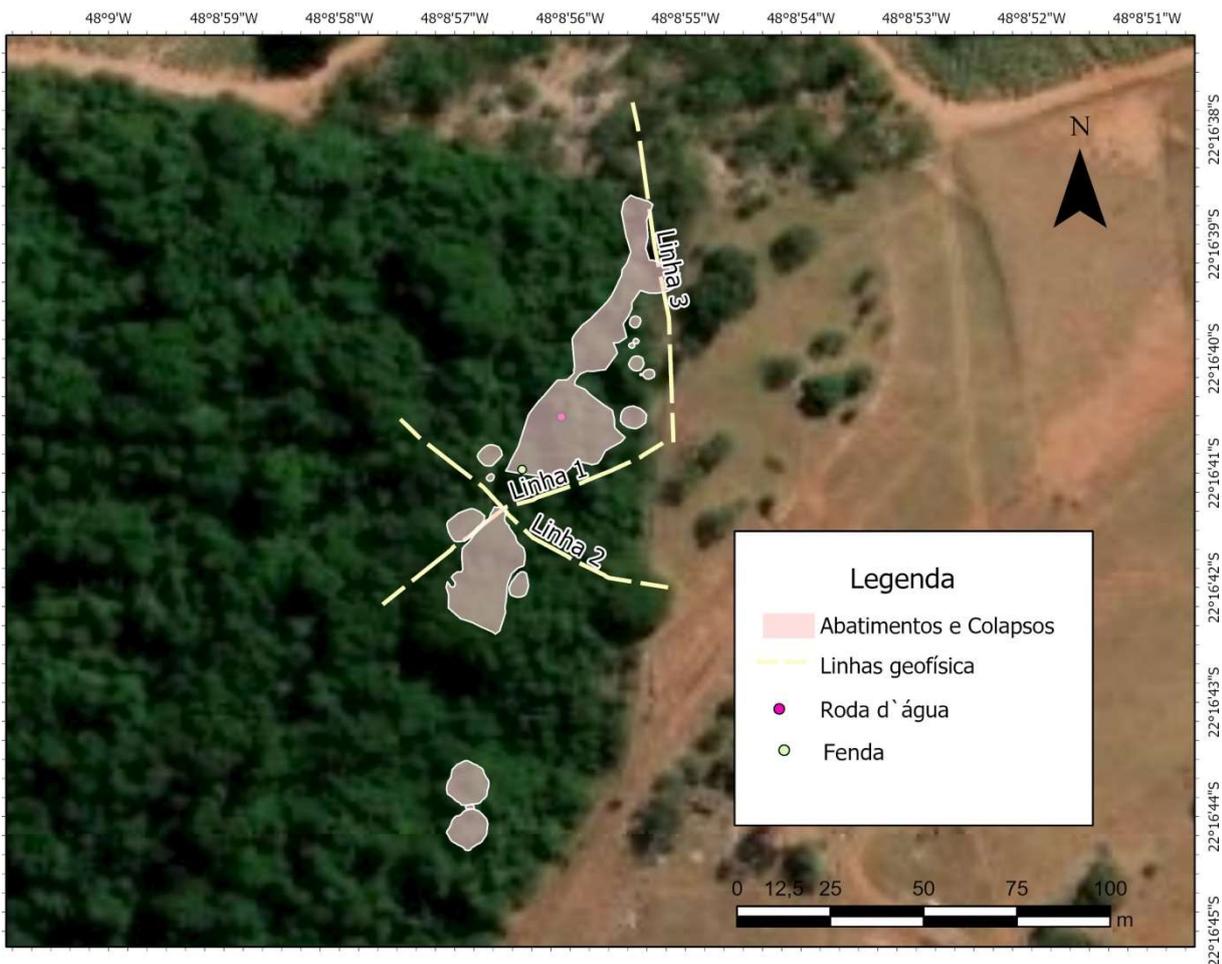


Figura 62 – Feições de abatimento e localização das linhas de geofísica.

Os estudos geofísicos envolvem medidas de propriedades físicas na região de interesse no campo. No levantamento foi utilizado um equipamento do tipo resistímetro Syscal Pro, para a SEV estavam disponíveis quatro rolos de cabos, e para o CE estava disponível um cabo com abertura máxima, entre cada canal, de 5m, com 10 canais de medidas, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos (Fig. 63).



Figura 63 – Caminhamento elétrico da linha 3.

Após coletados, os dados podem ser analisados e interpretados. Nesses processos utilizam-se várias ferramentas matemáticas que vêm a ser, basicamente, filtros para eliminar ruídos (sinais indesejáveis que se somam ao sinal procurado), avaliação do desvio ou erros nas medidas (teoria da propagação de erro), elaboração de mapas de iso-valores ou de anomalias, ou outro tipo de cálculo que permita transformar a leitura de uma grandeza física em outra grandeza de interesse que não pode ser medida diretamente.

Os métodos elétricos utilizam correntes contínuas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Neste trabalho foi utilizado método de eletrorresistividade a fim de estudar discontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos previstos. No método de eletrorresistividade, correntes elétricas geradas artificialmente são introduzidas no solo e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície.

9.1. Processamento dos dados

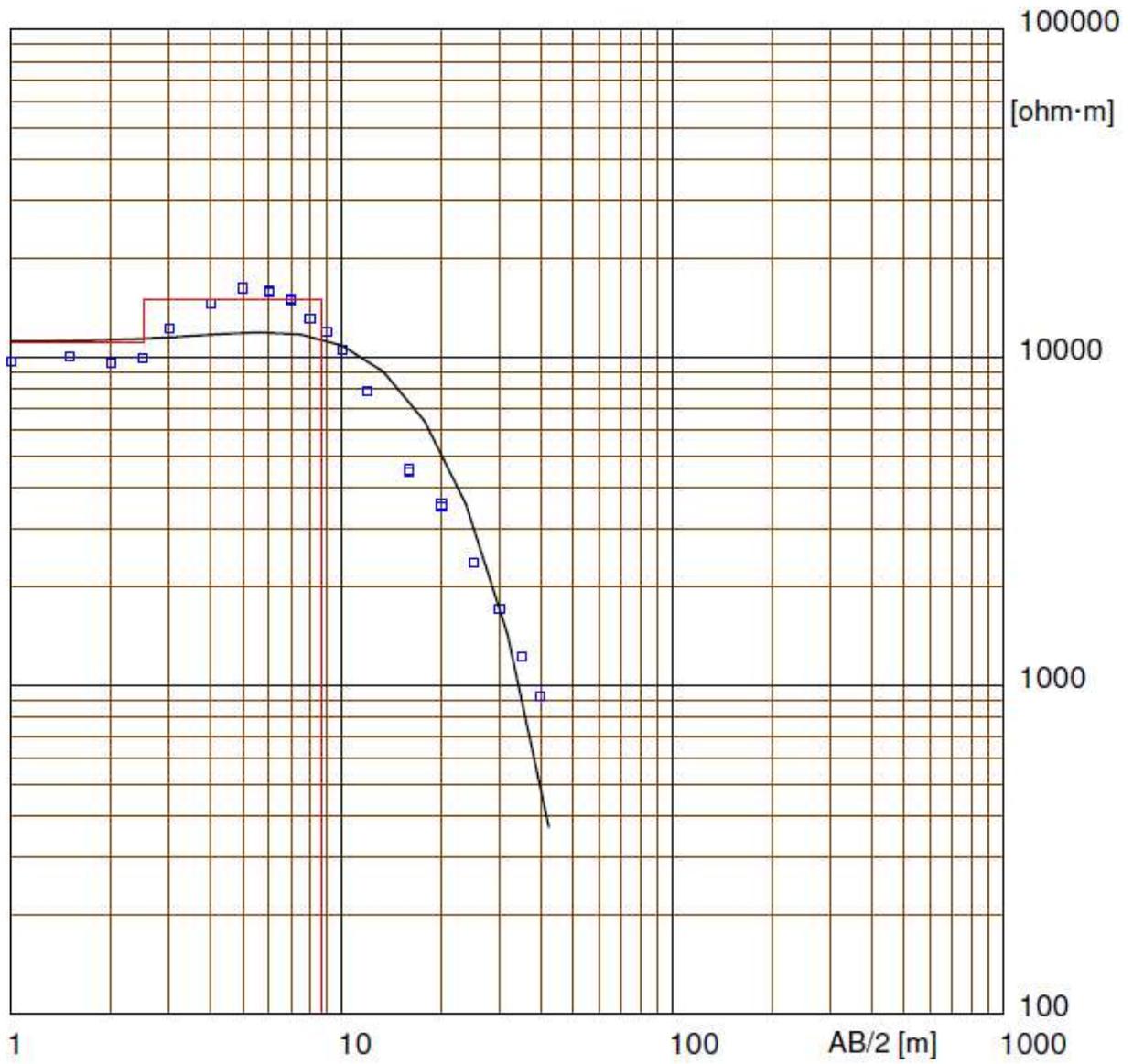
Para o processamento dos dados da SEV foram utilizados os *softwares* Prosys II⁶ e WinSev.⁷ O método de inversão utilizado foi automático, realizando pequenas intervenções manuais na espessura das camadas, na tentativa de ajustar o modelo do modo mais coerente possível com a espessura do afloramento visto no campo. A inversão da SEV (**Gráfico 1**) resultou em um modelo de três camadas geelétricas.

Para o processamento dos dados do CE foram utilizados os *softwares* Prosys II e Res2dinv.⁸ O método de inversão utilizado foi o robusto. As seções inversas de resistividade elétrica são vistas nas **Figuras 64, 65 e 66**.

⁶ Prosys II, versão 03.11.02. (desenvolvido por IRIS Instruments).

⁷ WinSev versão 6.3 (desenvolvido por W-GeoSoft).

⁸ Res2dinv; versão 3.4, 2D Resistivity and IP Inversion (desenvolvido por Geotomo Software Malaysia).



Location X = 793776 Y = 7533607 Z = 642 Azim = 0

| Model | | | |
|-------------|-----------|-------|----------|
| Resistivity | Thickness | Depth | Altitude |
| [ohm·m] | [m] | [m] | [m] |
| 11175 | 2.5 | | 642 |
| 14990 | 6.2 | 2.5 | 639.5 |
| .009 | | 8.7 | 633.3 |

Gráfico 01 – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV.

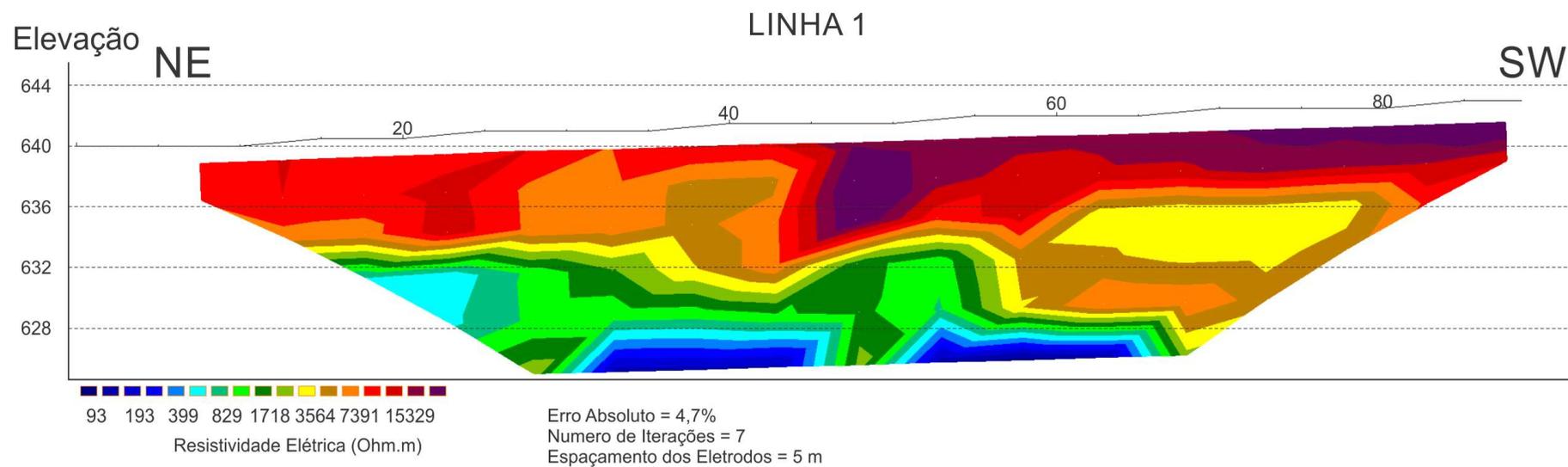


Figura 64 – Seção inversa da linha 1.

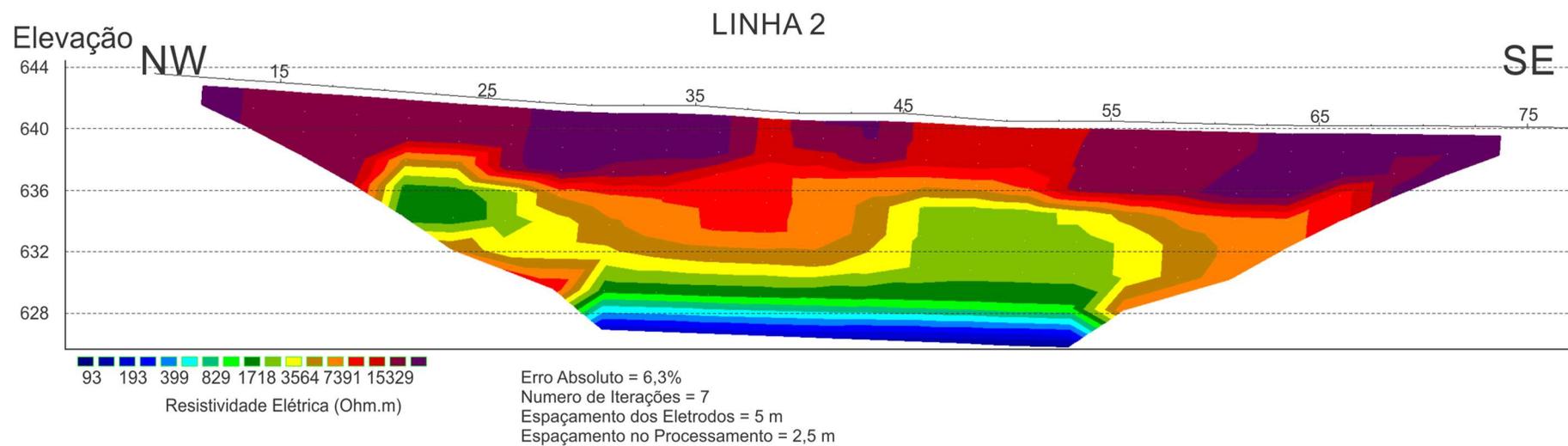


Figura 65 – Seção inversa da linha 2.

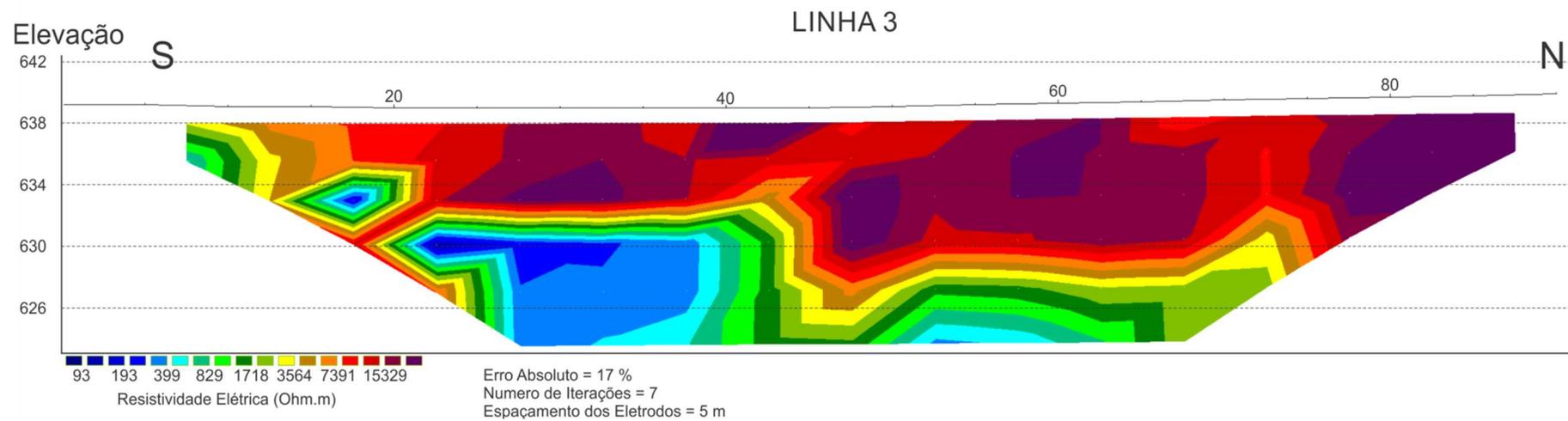


Figura 66 – Seção inversa da linha 3.

As pseudo-seções medidas, calculadas e as seções invertidas dos CEs encontram-se no **Apêndice I**.

9.2. Princípios físicos: geofísica

A resistividade elétrica é uma das propriedades físicas mais variáveis. A maior parte dos minerais formadores das rochas é isolante, e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela presença de íons nas águas dos poros. Assim, o aumento da porosidade e do conteúdo de sais é o principal fator que diminui resistividade de rochas. Secundariamente, outro fator é a presença de argilo-minerais, minerais sulfetados e granulação grosseira.

A resistividade elétrica é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I},$$

onde (I) é a corrente elétrica introduzida no solo, (ΔV) é a diferença de potencial medida e (K) é um fator geométrico que depende das técnicas e arranjos utilizados nos levantamentos. Como visto, as técnicas de campo utilizadas foram a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE), que possuem diversos arranjos.

A técnica da SEV consiste numa sucessão de medidas de um parâmetro geoeletrico efetuadas a partir da superfície do terreno (investigação 1D com observação da variação vertical da resistividade elétrica). São injetadas correntes (I) no solo através de dois eletrodos nos pontos A e B, e é medida a diferença de potencial (ΔV) entre os outros dois eletrodos nos pontos M e N (**Fig. 67**).

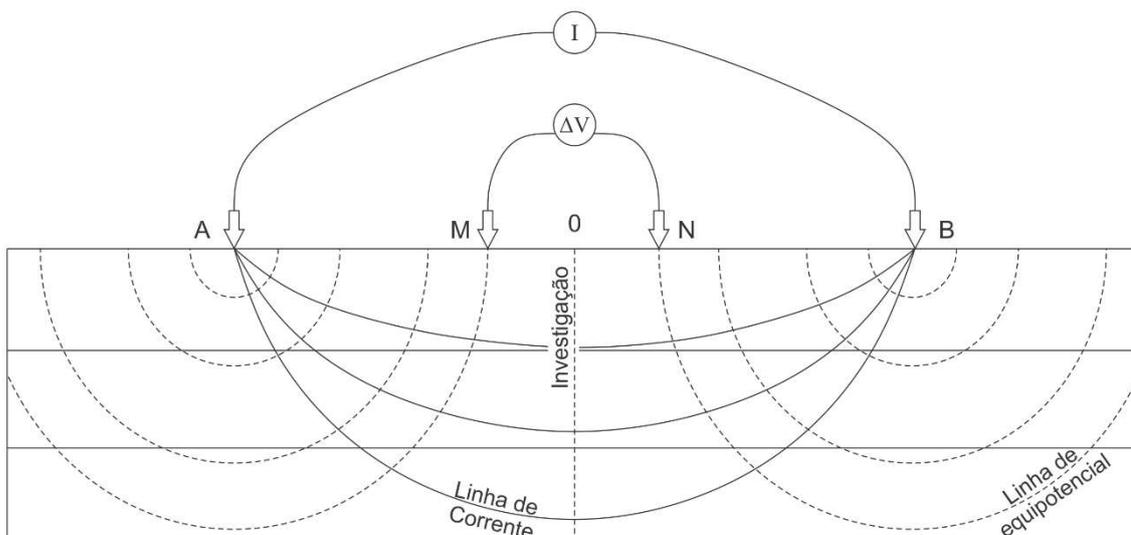


Figura 67 – Técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

Uma vez que se conhecem as distâncias \overline{AM} e \overline{AN} , pode-se medir a corrente (I) injetada e a diferença de potencial (ΔV), bem como calcular a resistividade aparente (ρ_a), a partir da seguinte equação:

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

O arranjo utilizado foi o Schlumberger, em que os eletrodos (AB) são afastados do centro do arranjo a cada leitura, investigando de forma cada vez mais profunda, e os eletrodos (MN) se mantêm fixos. As leituras desse arranjo estão menos sujeitas às variações laterais no parâmetro físico medido, às irregularidades na superfície topográfica e a ruídos produzidos por fontes (Braga, 2016).

Na SEV, utilizando-se o arranjo Schlumberger, a profundidade teórica de investigação é de $\frac{1}{4}$ da distância entre os eletrodos de injeção de corrente A e B. Neste trabalho, utilizamos a distância \overline{AB} variando de 2 a 80m, ou seja, investigamos profundidades variando de 0,5 a 20m de profundidade.

A técnica do CE se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoeletrico, obtido com base em medidas efetuadas na superfície do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB. Por meio dessa técnica, investigam-se, ao longo de linhas, as variações laterais do parâmetro físico a uma ou mais profundidades determinadas; com isso, a direção da linha de investigação

permanece fixa e o centro do arranjo AMNB varia com o seu desenvolvimento. Para o desenvolvimento dessa técnica, podem ser usados vários tipos de arranjos de desenvolvimento, como Schlumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.

O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo, em que os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (**Figura 68**). Tal arranjo apresenta vantagem em relação aos outros arranjos por ser um arranjo simétrico, o que facilita o melhor posicionamento de uma anomalia.

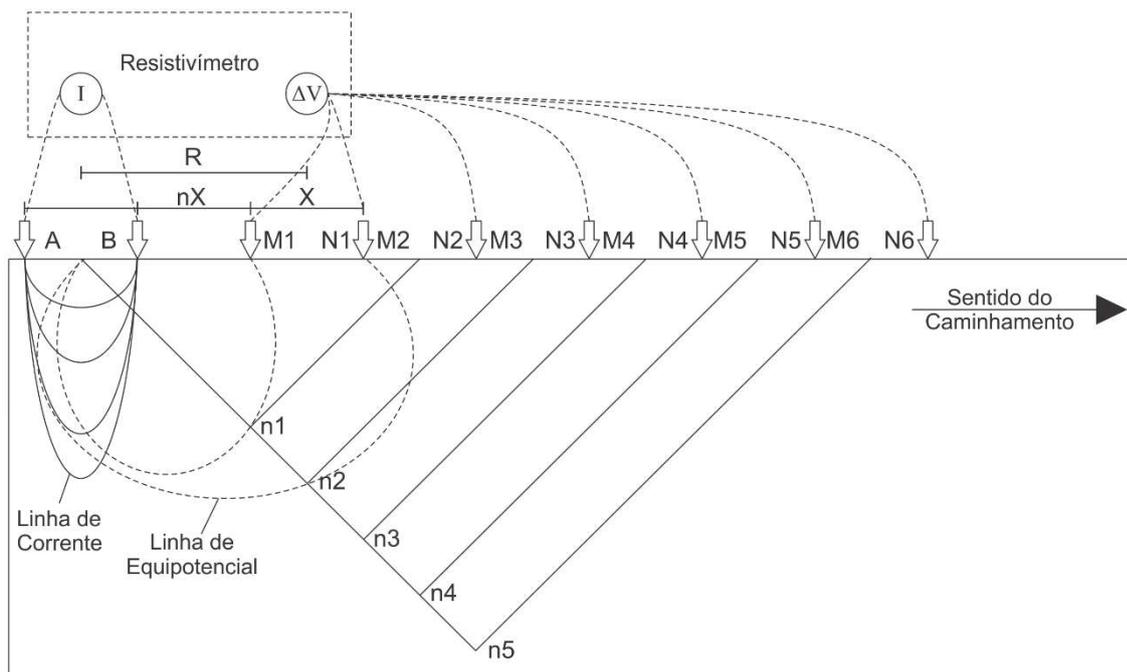


Figura 68 – Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo.

Esses parâmetros foram escolhidos visando obter maior profundidade de investigação e melhor resolução possível.

Assim, é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a), com a seguinte equação:

$$\rho_a = 2\pi GX \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

com

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$

em que: (X) é o espaçamento dos dipolos (AB) e (MN) adotado; (n) é o nível de investigação correspondente (Braga, 2016).

No levantamento foi utilizado um cabo com espaçamento de 5m entre os eletrodos. Estavam disponíveis 10 dipolos de recepção (MN), dispostos simultaneamente ao longo do sentido de aquisição de dados, correspondendo a 10 níveis de investigação por medida realizada. Ao final de cada medida, todo o conjunto avançava 5m, onde o eletrodo A era removido e reposicionado na posição do eletrodo B, o eletrodo B era reposicionado na posição do eletrodo M1, e assim sucessivamente, até um novo eletrodo ser posicionado no solo.

Tal geometria permite gerar um perfil de CE com profundidade teórica fixa de aproximadamente 15m de profundidade. A extensão do perfil é limitada à quantidade de avanços que foram realizados em cada CE.

9.3. Resultados obtidos pela geofísica

Nas regiões onde ocorre a ausência de material/cavidades, o fluxo de corrente elétrica é dificultado, pois o ar é um excelente isolante elétrico. Os perfis de eletrorresistividade mostraram boa correlação e indicaram as possíveis localizações dessas cavidades, inferidas por áreas com valores muito elevados da resistividade elétrica.

A linha 2, que possui cavidade conhecida localizada aproximadamente na posição 30m do CE, estabeleceu o parâmetro utilizado para extrapolar os resultados para os demais CEs. As regiões que apresentam valores anômalos de resistividade foram projetadas em superfície, exibindo a provável localização das cavidades na área estudada (**Fig. 69**).

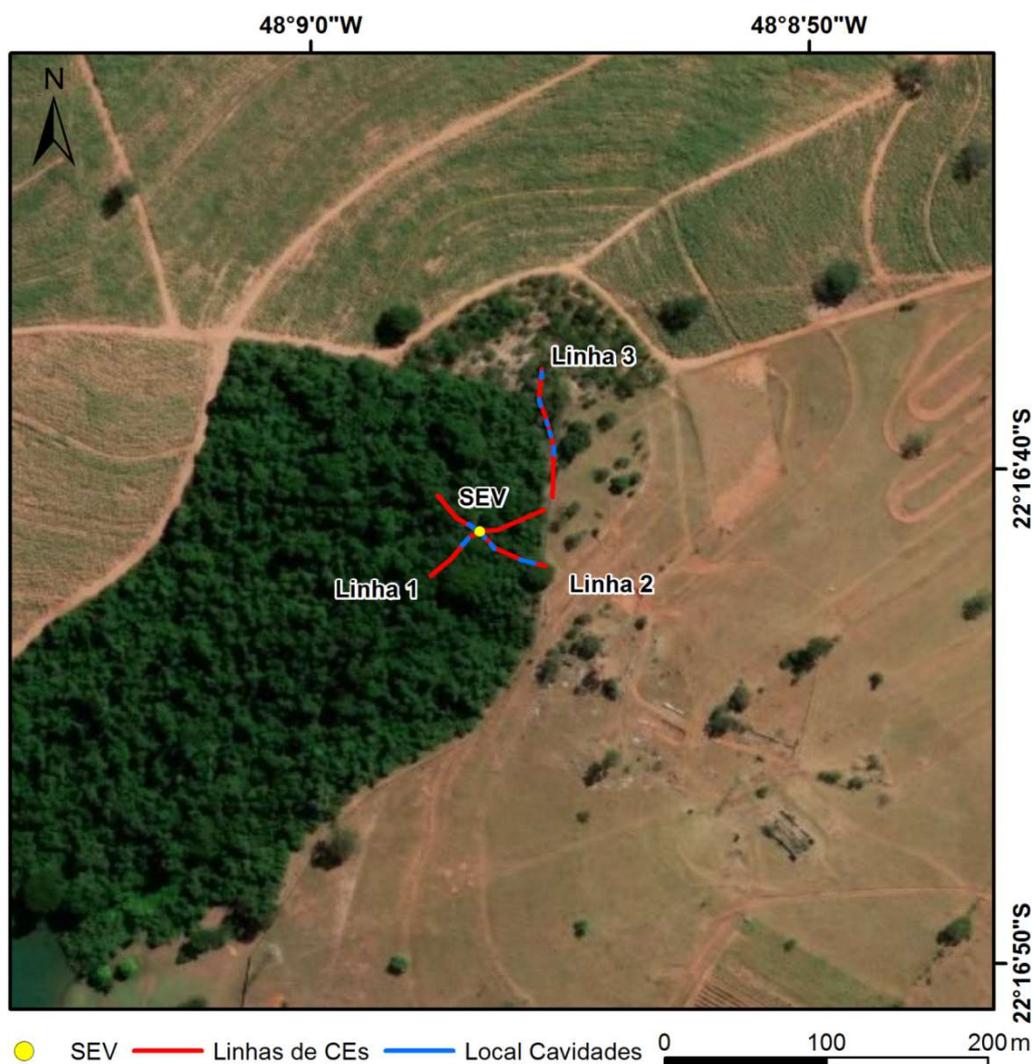


Figura 69 – Em azul estão projetadas as localizações das possíveis cavidades.

As anomalias geolétricas indicam a presença de muitas cavidades, o que sugere que a área é uma zona de convergência de águas subterrâneas que percolam por caminhos preferenciais, esculpindo galerias pelo fenômeno de *piping*. O mais provável é que nas regiões onde os fluxos se encontram ocorram os maiores fenômenos de abatimentos e os maiores colapsos. O processo erosivo ocorre com mais intensidade dentro da principal drenagem da área.

O contexto geológico verificado nos afloramentos e os valores de resistividade indicam que a litologia é constituída basicamente por areias e arenitos (Telford et al., 1990), o que é coerente com o que foi observado em campo e mapeado em locais de afloramentos e abatimentos.

A primeira camada geolétrica foi correlacionada com areias e/ou arenitos secos; a camada seguinte, com resistividade acima de 12.000 ohm.m, foi

correlacionada com a cavidade previamente conhecida (**Figura 70**); e a última camada foi correlacionada com areias e arenitos não secos e/ou saturados.



Figura 70 – Cavidade principal. Ensaios geofísicos, SEV e linha 2, realizados sobre a caverna.

A SEV apresenta modelo geoeletrico de três camadas, interpretadas conforme modelo da **Figura 71**.

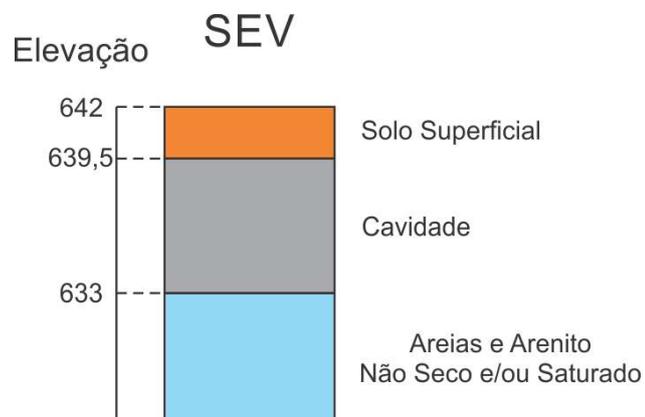


Figura 71 – Interpretação do modelo de camadas da SEV.

Na etapa de inversão, o processamento de dados da SEV é realizado presumindo-se a condição ideal onde os modelos de camadas geelétricas estão dispostos em planos, paralelos e horizontais. Uma cavidade subvertical inserida em uma ou mais camadas pode afetar a qualidade dos resultados da geofísica. Como se sabe que ali existem estratificações cruzadas e acanaladas, além de plano paralelas, e como o modelo pode não apresentar um bom ajuste entre os dados medidos e os calculados, a interpretação desses resultados deve ser muito cuidadosa.

Neste trabalho, eram conhecidas a localização e a espessura da cavidade e do pacote maciço sobre a fenda. Tais parâmetros foram utilizados no ajuste, mas a confiabilidade da profundidade do contato entre a caverna e a litologia não seca e/ou saturada é baixa, pois o modelo apresenta baixa sensibilidade. É importante ter em mente que a execução da SEV foi relevante para entender a resposta da resistividade elétrica de uma cavidade dentro de uma litologia arenosa. Assim sendo, os dados foram conferidos em campo para validação.

Logo, o contexto geológico foi muito importante para a interpretação da correlação da SEV realizada sobre a cavidade. Os valores de resistividades orientaram a interpretação dos perfis com três principais horizontes: solo arenoso seco, solo arenoso e/ou arenito não seco (umidade proveniente de franja capilar e/ou evapotranspiração) e solo arenoso e/ou arenito saturado (Telford et al., 1990).

No primeiro horizonte, os perfis apresentam algumas descontinuidades laterais e faixas com resistividade elétrica acima de 12.000 ohm.m. Conforme correlacionado na SEV, essas descontinuidades devem estar associadas aos topos das cavidades. A contribuição lateral dos espaços vazios deve criar corpos resistivos mais largos do que realmente são. Assim, essas zonas com anomalias resistivas indicam as áreas com maior potencial de localização do topo das cavidades, e não exatamente sua dimensão.

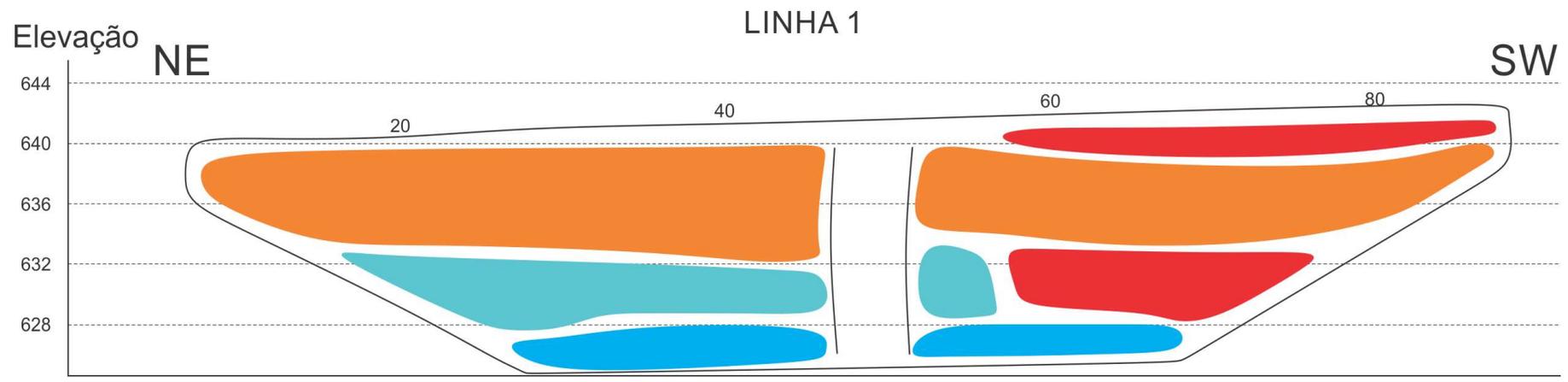
A linha 1 (**Fig. 72**) apresenta região anômala, com altos resistivos, entre as posições 45 e 55m do CE. Esse trecho de 10m está situado próximo à área onde foi verificada a principal cavidade em campo. Como a cavidade é muito alongada verticalmente, a faixa resistiva verificada entre as posições 60 e 80m do perfil deve estar associada a um *artefato*: um *corpo* obtido no modelo resultante da inversão, não necessariamente condizente com a realidade (Dahlin e Zhou, 2004).

Gandolfo (2007, apud Zhou e Dahlin, 2003) estudou as fontes de erro comuns observadas em levantamentos 2D de eletrorresistividade: as que se dão devido ao

erro no posicionamento dos eletrodos, e aquelas relacionadas às leituras nas medidas de potencial (devido a mau contato de eletrodos, isolação precária de cabos, presença de ruídos intrínsecos à área, problemas instrumentais e de operação incorreta de equipamentos). Com relação ao primeiro fator, podem ocorrer erros da ordem de 10% quando utilizados pequenos espaçamentos entre eletrodos. A presença desses dados ruidosos (facilmente verificados na pseudo-seção) acarreta o aparecimento de *artefatos* no modelo obtido por inversão, podendo levar a interpretações errôneas dos resultados. Por esse motivo, algumas observações feitas durante a expedição em campo foram fundamentais para a conferência dos pontos indicados.

A linha 2 (**Fig. 73**) apresenta três regiões anômalas. A primeira fica entre as posições 27 e 37m, trecho que compreende o ponto em que ficou posicionado o centro da SEV. A segunda e a terceira zona ficam entre as posições 40 e 45m e 62 e 75m. Tais posições ficam próximas a abatimentos vistos no solo e que podem chegar a mais de 2m de profundidade.

A linha 3 (**Fig. 74**) apresenta cinco regiões anômalas e esse perfil é o que apresenta o maior erro na inversão, de 17%. Vários abatimentos vistos na superfície do solo na proximidade dessa linha indicam que, na região, existem várias cavidades próximas, o que afeta a qualidade dos dados. Esse perfil apresenta maior possibilidade de conter artefatos, podendo causar interpretações equivocadas. Assim, foram sinalizados apenas os centros das anomalias, localizadas nas posições 30, 42, 47, 60 e 85m.



- Solo Arenoso Seco
- Solo Arenoso e/ou Arenito Não Seco (Franja Capilar e/ou Evapotranspiração)
- Solo Arenoso e/ou Arenito Saturado
- Artefato Resistivo (Criado no Processamento)
- Descontinuidade Lateral (Cavidade)

Figura 72 – Linha 1 interpretada.

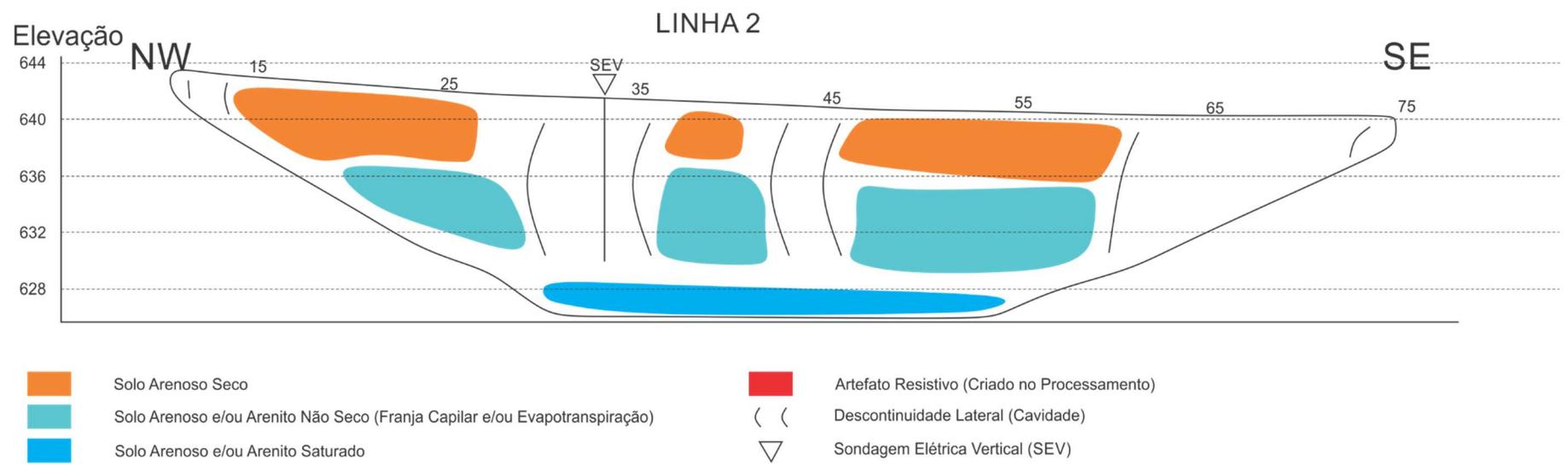


Figura 73 – Linha 2 interpretada.

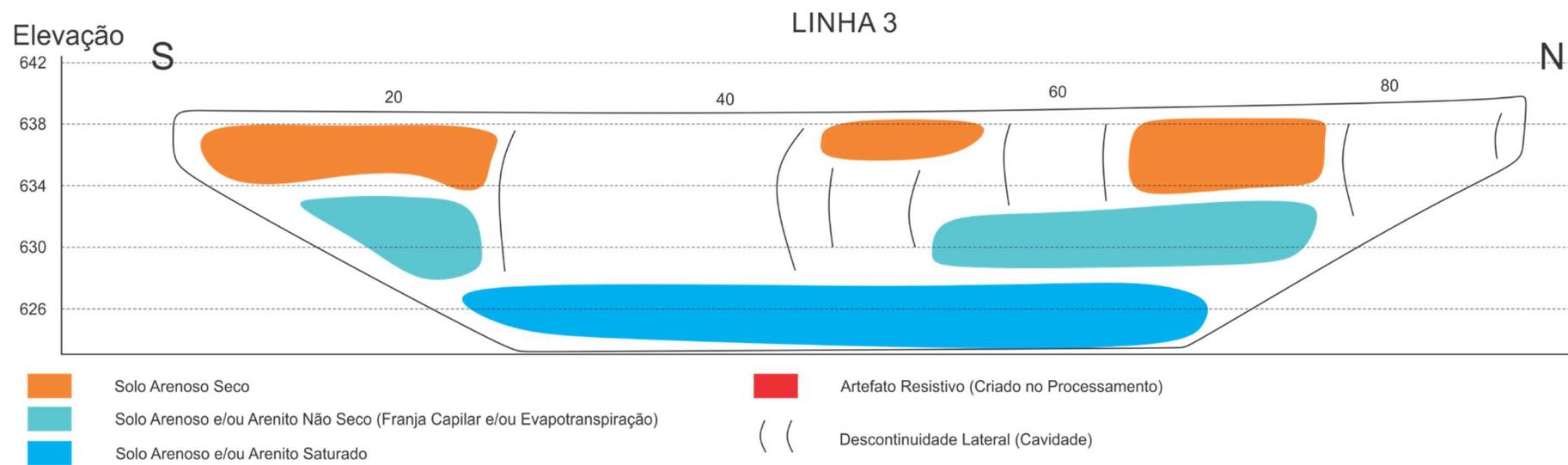


Figura 74 – Linha 3 interpretada.

Já foi feita a correlação entre os dados geofísicos e cavidades em que há uma assinatura geolétrica de alta resistividade, possivelmente devido à ausência de preenchimento, o que foi confirmado em atividade de campo de reconhecimento das cavidades. Foi possível também identificar porções saturadas, topo rochoso, fluxo da água.

10. RESULTADOS

Após a compilação dos dados de campo, indicando os principais contornos erosivos e cursos d'água na área-alvo, foram-nos fornecidos os dados de sondagem da área dos arredores, onde hoje está o Conjunto Habitacional Santa Maria II (**Anexo C**). Gerou-se, então, um mapa topográfico do terreno e um mapa potenciométrico, com as linhas de fluxo direcionadas para a área de pesquisa, mostrando que essa vertente tem contribuição importante para a Bacia do Córrego Santa Maria (**Fig. 75**).

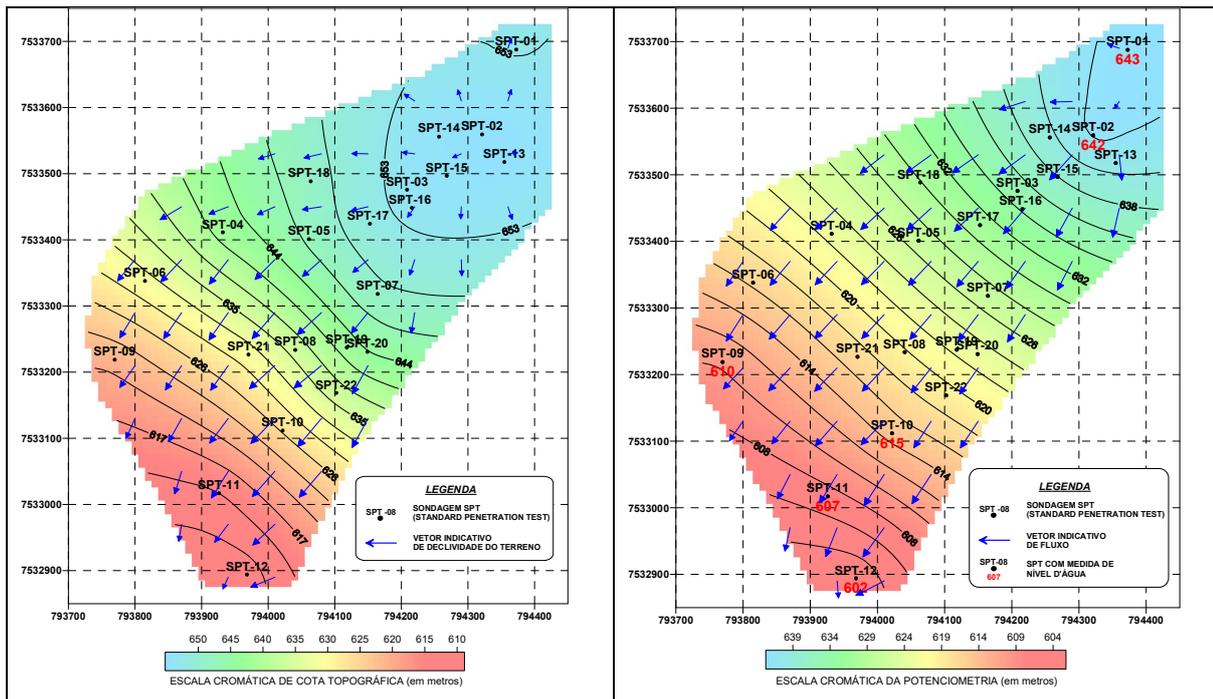


Figura 75 – Mapa topográfico e potenciométrico indicando a direção do fluxo.

Após execução dos ensaios geofísicos, e com as informações dos pontos de descontinuidade lateral indicados pela geofísica (linhas 1 e 2) em mãos, um primeiro traçado do túnel principal foi gerado durante uma expedição de campo pela fenda. Nesse traçado foi possível indicar o trajeto aproximado da água e a largura das paredes, os quais foram em seguida espacializados e convertidos em *shapefile* (**Fig. 76**).

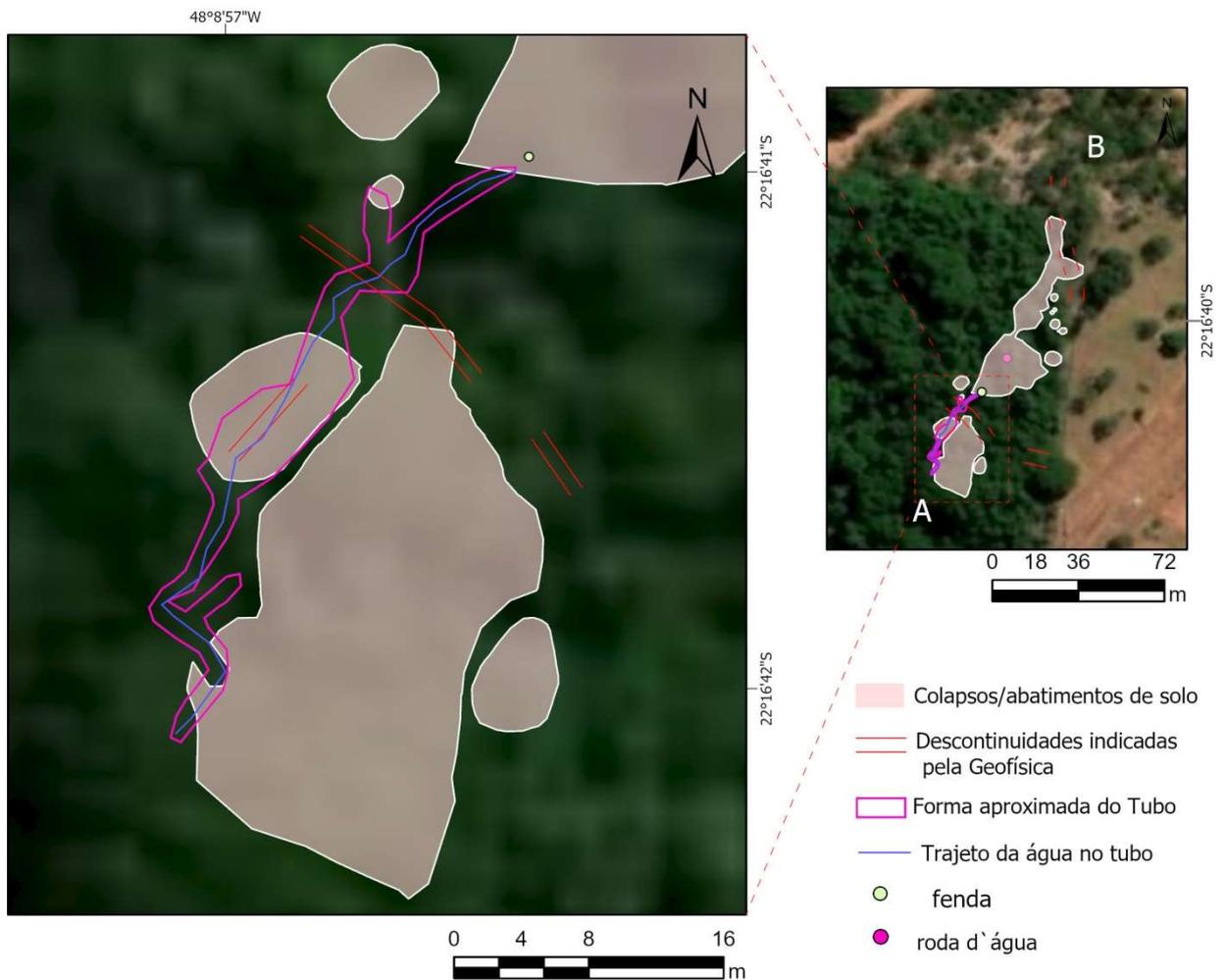


Figura 76 – Traçado preliminar do túnel.

Elaboramos um croqui de campo de uma seção aproximada A-B (**Fig. 77**). Assim foi possível uma melhor compreensão das feições em subsuperfície e seus reflexos na topografia, bem como detalhamento do desnível e alturas estimadas de teto e base da caverna. As informações disponíveis eram apenas referentes à topografia ajustada, dados de GPS de mão de pontos de entrada e saída, abatimentos conhecidos, visadas de bússola de alguns acessos, fotografias e vídeos da primeira expedição. Dessa seção, uma outra mais ampliada foi gerada, englobando a área do rio a jusante para representar o desnível e obter uma espessura de solo adequada para representar os demais túneis internos que foram posteriormente inseridos. Essa seção foi utilizada como base para os perfis tridimensionais.

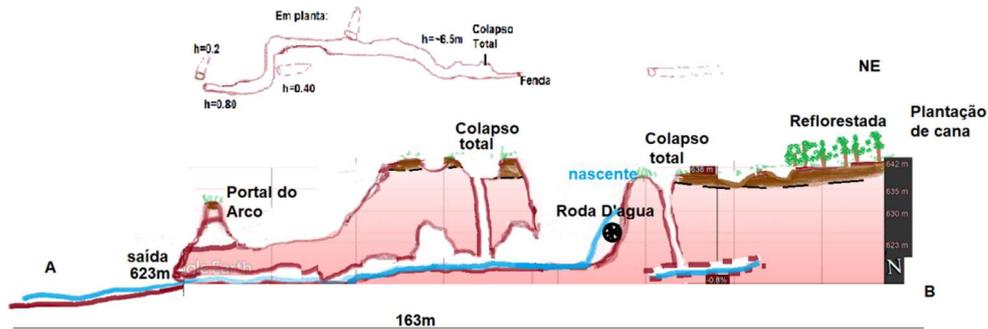


Figura 77 – Croqui de campo (esquema representativo da autora).

As *shapfiles* foram convertidas em DWG e ajustadas no Autocad com a topografia. Os abatimentos e feições erosivas foram desenhados de forma manual com as angulações de taludes e colapsos, que foram anotadas em caderneta de campo. Algumas extrusões foram baseadas em seções, fotos com escala e imagens da caverna. Um modelo superficial simplificado de feições e abatimentos foi criado (Fig. 78).

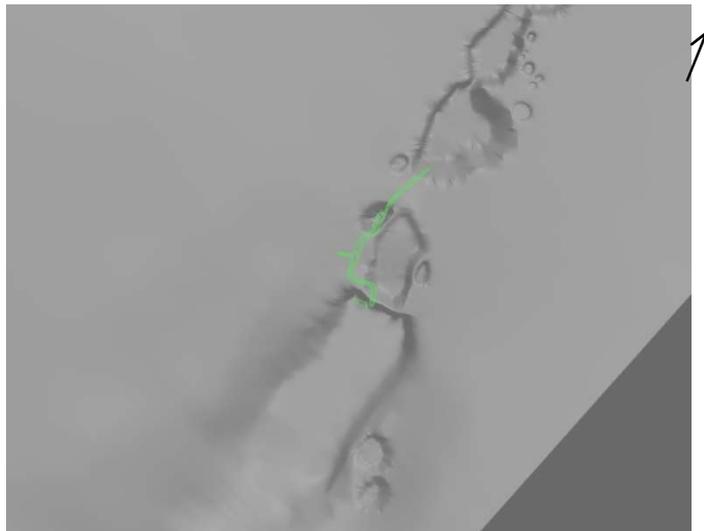


Figura 78 – Modelo de superfície simplificado.

No modelo de superfície gerado no Datamine Studio 3.0 (Fig. 79), foi sobreposta uma seção aproximada do *piping* principal. A partir daí, a seção do túnel foi melhorada, ajustada pouco a pouco, interpolando-se com os pontos de superfície conhecidos e colapsos no trajeto. Assim, alguns trechos foram ajustados novamente, pois eram mais alongados, já que o perfil A-B feito em campo não detalhou algumas reentrâncias e ondulações que foram mais bem visualizadas após espacialização.

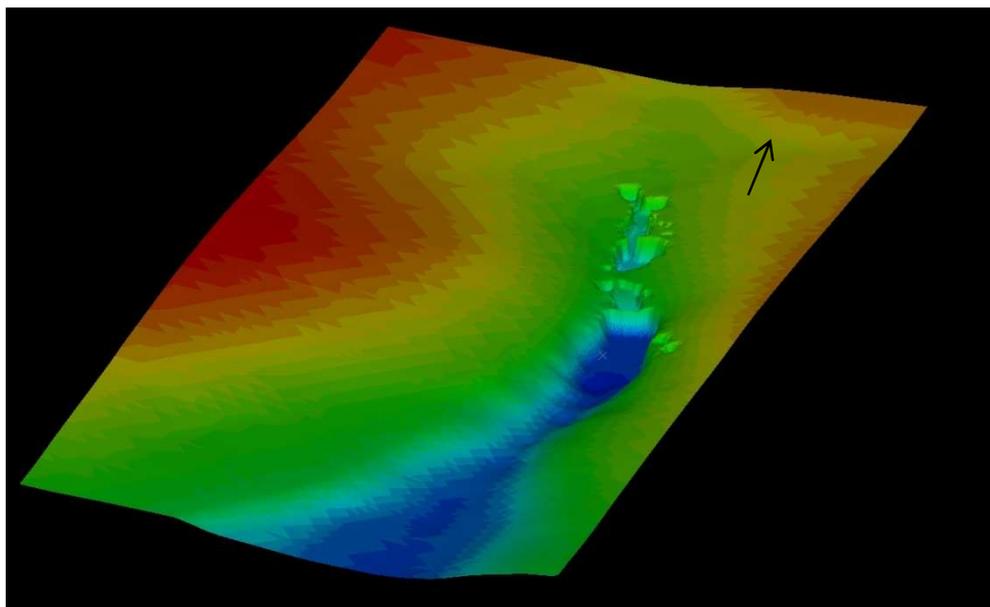


Figura 79 – Modelo superficial preliminar.

Após visita exploratória com equipe de espeleologia, toda a seção principal do túnel foi contemplada, bem como alguns túneis secundários internos e externos. Os túneis secundários de menor dimensão encontrados e não explorados (por serem inseguros e com diâmetros menores de 40cm) foram catalogados pontualmente, com direção e extensão estimados. Como resultado preliminar, foi interpretado um sistema de *pipings* ativos, com um túnel principal, uma caverna de 96 metros de comprimento (**Fig. 80**).

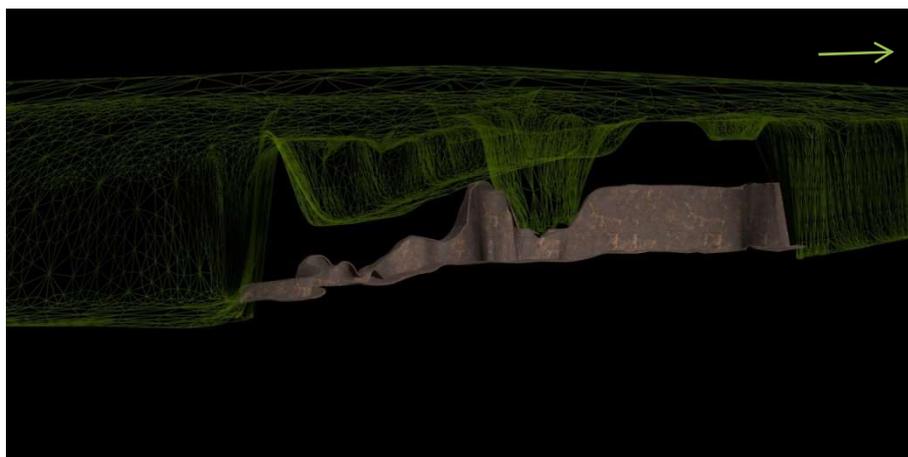


Figura 80 – Seção preliminar do túnel principal.

Alguns túneis secundários com diâmetros menores que 40cm se encontram secos, sem evidências de águas fluindo recentemente, sendo intersecções de dois planos ortogonais do arenito (**Fig. 81**). Outros são mais arredondados e com umidade ou água em seu interior, provavelmente configurando *pipes* ativos ou caminhos

preferenciais em eventos de chuva, de infiltração mais localizada (Fig. 82, 83 e 84). Estes foram apenas vistos em campo, mas não incluídos no modelo final, devido ao seu pequeno desenvolvimento.



Figura 81 – Caverna localizada nas laterais externas.



Figura 82 – Caverna de cerca de 40cm, próxima da saída do túnel principal.



Figura 83 – Mais *pipes*, na frente erosiva.



Figura 84 – *Pipes* de pequeno diâmetro nas laterais; também é possível ver o túnel principal.

Já dentro da caverna principal, algumas mudanças no trajeto da água subterrânea e conseqüentemente nas direções dos túneis foram observadas e representadas. Em alguns pontos de convergência e ramificações dos *pipings*, existe uma mudança na estratificação bem marcada. Na **Figura 85** temos um tubo menor e abatimentos recentes de teto. Nesse mesmo local, a estratificação apresenta uma mudança, tornando-se acanalada e cruzada (**Fig. 86**), em contato com camadas sub-horizontais, com intercalação de arenitos mais amarelados e vermelhos; há amplitude lateral e no teto, de modo a formar um verdadeiro salão interno, sendo esse um dos pontos mais amplos.

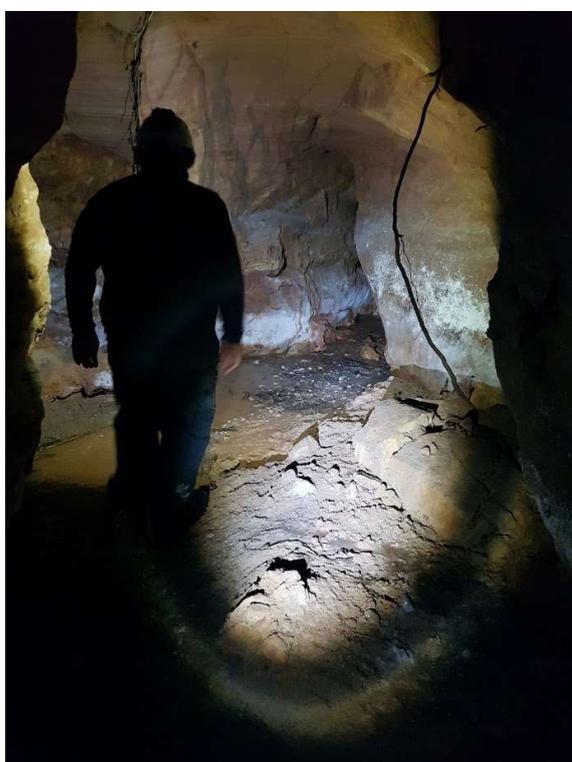


Figura 85 – Pipe secundário de 70 cm, que segue afunilando. Neste ponto, a cavidade maior tem aprox. 6,20m de altura.

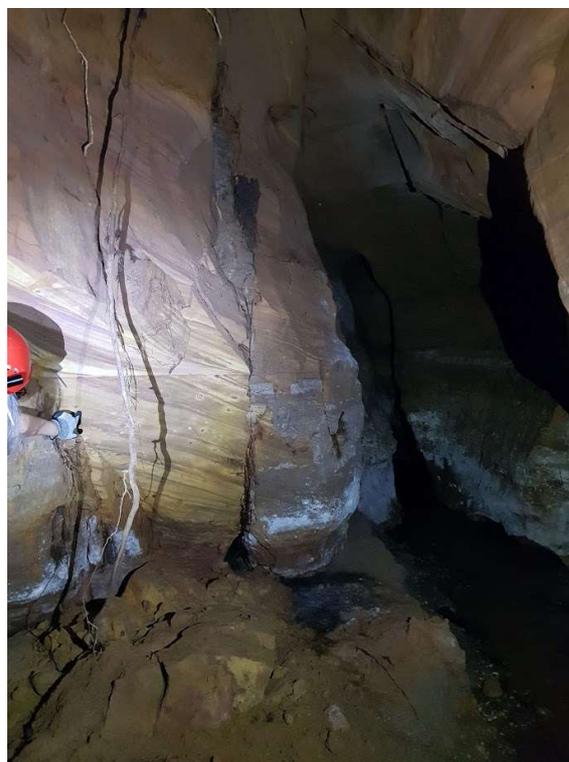


Figura 86 – Mudança na estratificação e no formato dos túneis e condutos.

Depois, o tubo afunila novamente e segue em uma reta; no teto, temos uma fenda vertical bem estreita, com arenitos de coloração mais amarelada e rosada, granulação mais grosseira e estratificação mais marcada (**Fig. 87**). Nas porções em que há uma abertura maior, com erosão mais intensa, temos um arenito avermelhado, com granulometria fina e estratos sub-horizontais, além de algumas porções de arenito maciço. Nesse ponto, o tubo tem um formato de gota e algumas marcas esbranquiçadas, que devem indicar variações de níveis d'água (**Fig. 88**), inundações

temporárias, que nesse ponto de estreitamento parecem ultrapassar 1,60m nos eventos mais intensos. No teto também vemos marcas ondulares e circulares que podem indicar um fluxo turbulento de água ou pequenos tubos de *pipes*. Pela forma e pela posição encontradas, elas foram interpretadas como marcas deixadas pela água em períodos anteriores, quando o nível de base era diferente, e não como tubos de *pipes*.

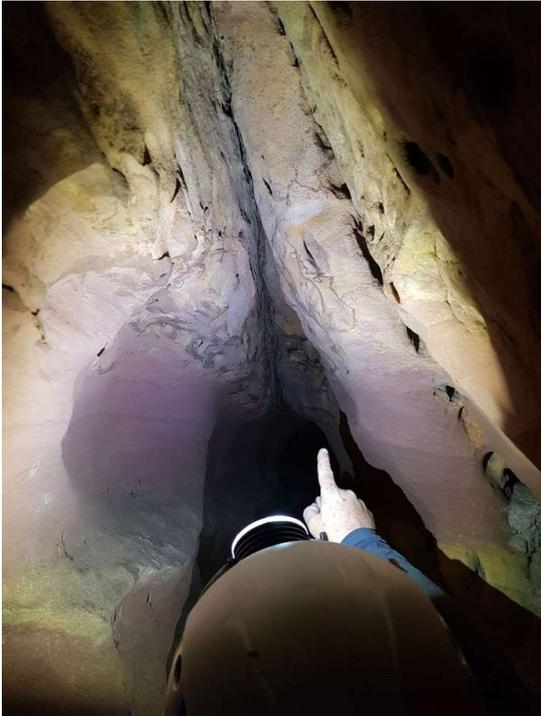


Figura 87 – Teto com fratura/fenda vertical, com variação do processo erosivo nas camadas inferiores.

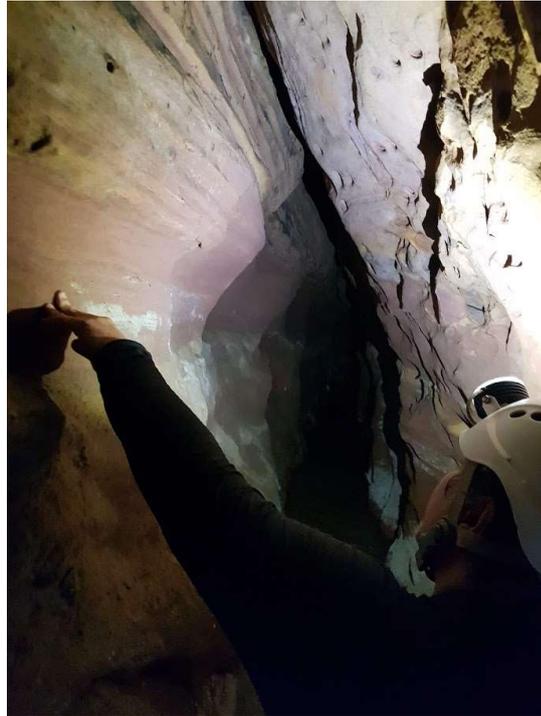


Figura 88 – Indicando as marcas de variação de nível de água.

Nos túneis mais alongados e com forma mais constante, quase sempre lembrando uma gota, verificamos um forte controle estrutural e uma variação granulométrica marcante, que é evidenciada pela forma como a erosão avança nos diferentes estratos. Estas observações foram feitas em campo e com medidas de bússola, que foram depois indicadas espacialmente nos modelos gerados.

Essa forma foi apresentada em croqui, juntamente com medidas de bússola e a direção dos tubos e podem indicar sistemas de fraturas alinhados ou falhas que permitiram a formação dos *pipes* nos estratos onde eles se instalaram inicialmente. O que provavelmente acontece são falhamentos de gravidade, reflexos dos falhamentos principais onde a drenagem do Rio Jacaré Pepira está encaixado. Tais falhamentos

medidos em campo, com sentido NE, seriam condizentes com o sistema de *piping* principal e perpendiculares ao do Rio Jacaré Pepira, que é SE-NW.

IPT(2009) cita um fraturamento com direção N40E em porções friáveis do arenito e na parte superior do Portal do Arco, o que coincide com a direção medida em campo. Esse seria um fraturamento associado (tração/alívio), com direção N40E, reflexo da movimentação tectônica (falhamento), resultando no afundamento da Formação Serra Geral (aflorante no sul da área) e na ascensão da Formação Botucatu, onde se encontram os tubos. Evidências desse fraturamento associado, predominantemente N-NE, foram encontradas em pelo menos três pontos dentro do *pipe* (fenda, conduto antes da curva, conduto de saída) e em dois pontos fora dele, no Portal do Arco (superior e inferior).



Figura 89 – Curva acentuada, formando um túnel menor paralelo.



Figura 90 – Tubo menor, paralelo ao anterior.

Depois, o túnel faz curva de cerca de 90 graus, tornando-se um pouco mais estreito; sua altura varia de 1m a 2,40m (**Fig. 89**). Quase na saída do túnel, temos outra curva de aproximadamente 90 graus bastante evidente, com largura similar, mas com altura máxima de 1,40m que segue afinando até sua saída. Nessa mesma direção existe um túnel de cerca de 60cm (sendo então paralelo ao anterior), que seria

uma segunda ramificação que segue ativa, com água fluindo também, como se nesse ponto existissem dois sistemas paralelos de túneis (**Fig. 90**).

Nesse trajeto, as marcas esbranquiçadas estão em uma porção inferior, perto da lâmina d'água, juntamente com marcas de ondulação nas paredes, as quais seguem erodindo, especialmente nas curvas, como num meandro de um rio: erodindo de um lado e depositando do outro. Porém, por conta do desnível natural do terreno e da variação dos fluxos, o material depositado é carregado quando há aumento repentino da água. Podemos, então, fazer essa analogia quando encontramos uma estrutura como alguns tubos pretéritos, como meandros abandonados, mas, na verdade, seriam *pipes* que foram capturados por outros, sendo esta uma forma de interpretar algumas feições.

Outra interpretação que se pode fazer das áreas onde os tubos fazem curvas, desvios dos *pipes*, é que ali pode existir a presença de camadas de menor permeabilidade que retardam o fluxo e promovem um fluxo lateral. Se esse fluxo lateral surgir em outra frente ou talude, teremos outra surgência ou nascente, ou então o fluxo segue lateralmente até encontrar uma outra camada mais permeável e seguir o processo erosivo no sentido preferencial, o que provavelmente ocorreu nessa porção do maciço.

Outra hipótese para a água seguir outro caminho é ela ter encontrado um sistema de fraturamento associado de alívio, ou então reflexos do sistema de falhamento principal da área, que é condizente com a direção encontrada SE-NW que o túnel faz por cerca de 6 metros, depois voltando à direção principal NE (**Fig. 91**).

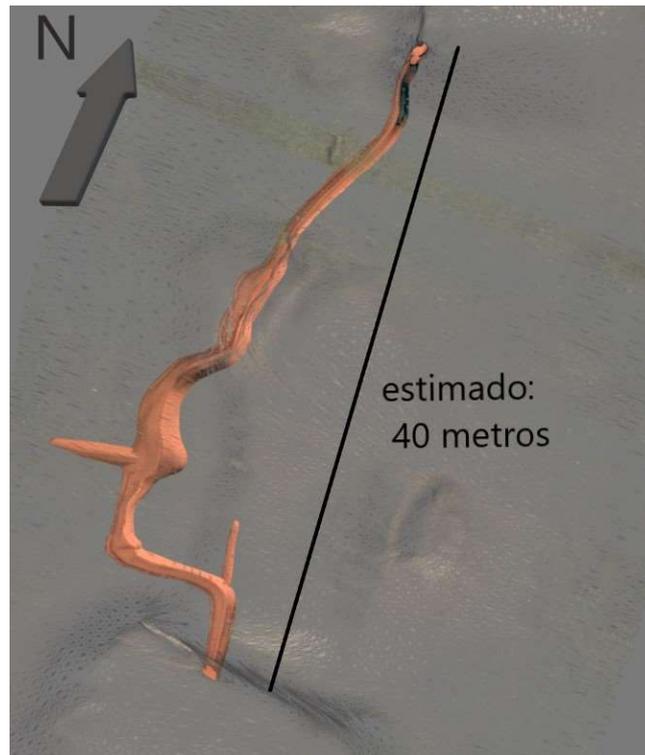


Figura 91 – Trajeto e extensão aproximados da caverna.

Para compreender os trajetos da água e cavernas existentes, um modelo tridimensional da caverna e das superfícies foi criado, usando a topografia do terreno, ajustada manualmente na área da bacia e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) dos arredores (**Fig. 92**).

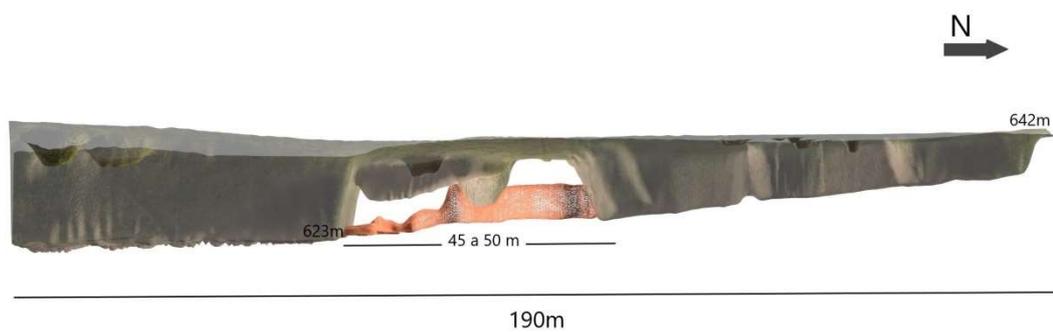


Figura 92 – Modelo tridimensional preliminar da caverna e abatimentos de solo.

A partir do ponto de descarga (saída do túnel) a água flui superficialmente em uma drenagem, o Córrego Santa Maria. Outra nascente, a leste, une-se à drenagem principal (**Fig. 93**).

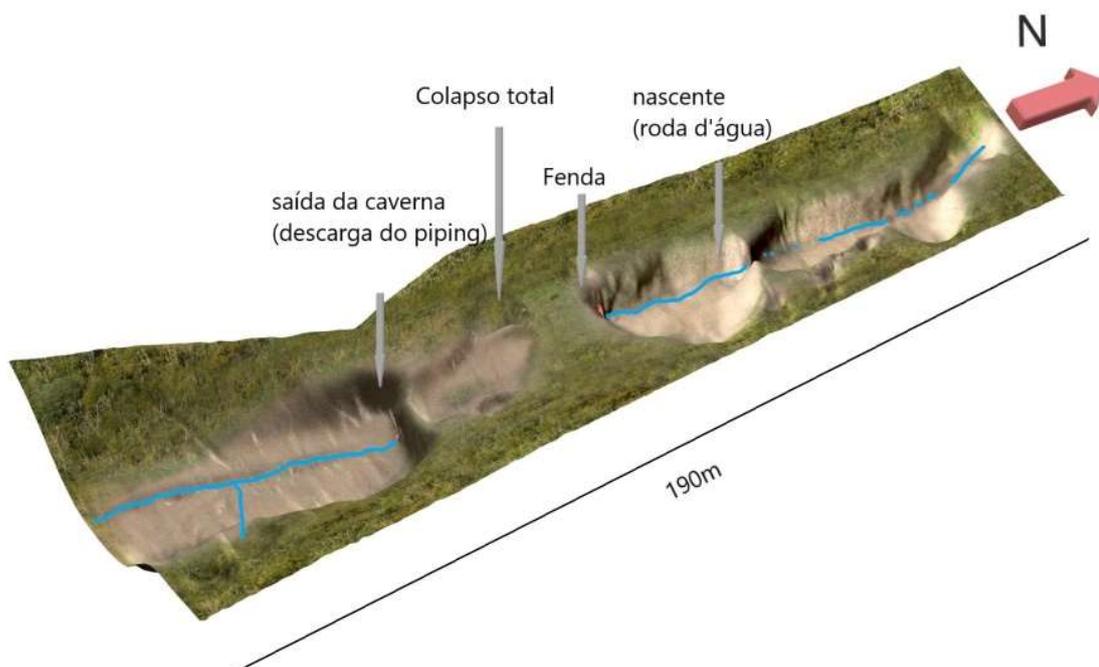


Figura 93 – Modelo de superfície, indicando pontos de interesse.

Os dutos encontrados na área de descarga da caverna apresentam umidade constante; em períodos de recarga, observa-se a saturação total ou parcial do solo e exfiltração de água no túnel, com geração de fluxo concentrado.

No trajeto, a jusante, ainda existe uma pequena barragem, utilizada para captação de água (22K 0793727x7533517), e depois o Córrego Santa Maria é represado em dois pontos, na Fazenda Santa Maria, e segue seu trajeto até desembocar no Rio Jacaré Pepira.

Muitas pesquisas mostram que o *piping* é significativo no início de um padrão de drenagem (Bunting, 1961; Dunne, 1980; Jones, 1971, 1987, apud Hagerty, 1991) e podemos ver muitos reflexos disso na área estudada. Grande parte das conclusões de que o *piping* é uma forma de dar origem a uma drenagem regional é motivada pela demonstração de que o escoamento é um componente muito importante no sistema hidrológico de uma bacia hidrográfica (Born et al., 1979; Jones, 1987; Kirkby e Chorley, 1967; Sloan, 1972, apud Hagerty, 1991). Alguns pesquisadores chegaram a especular que a infiltração é o fator dominante na formação de sistemas regionais de drenagem (Zaslavsky e Sinai, 1981, apud Hagerty, 1991). Essas afirmações são facilmente aplicadas nas áreas já expostas pela erosão, na cabeceira, sendo ali um

ponto conhecido de confluência dessas drenagens e também dos fluxos subterrâneos. Os *pipes* seguem NE-SW, mesma direção da drenagem do Córrego Santa Maria, desde o momento que ele se torna um canal superficial até seu exutório.

Na área de pesquisa, constatamos que o *piping* ocorre em razão da existência de pontos de maior permeabilidade, devido a variações na granulometria do arenito e/ou pequenos falhamentos, fraturas e descontinuidades. Em alguns túneis há um forte controle estrutural e também pelos estratos da rocha, especialmente onde a estratificação cruzada é mais marcante. Em tais pontos, a água passa a fluir preferencialmente de forma concentrada. As variações desses fluxos de água passam a erodir o arenito, que é friável, iniciando o processo de formação de cavidades.

Nas proximidades da nascente temos muitos descalçamentos, desmoronamentos e solapamentos de laterais, o que indica que, naquele ponto, tanto no eixo maior, quanto no menor, ainda há um processo ativo de erosão. Seguindo para montante, o processo segue na cabeceira, mas de forma menos intensa, pois nas laterais houve uma estabilização do processo (ponto 2). Ali hoje não existe mais água fluindo, talvez após intervenções nos bairros Jardim Modelo e Felicidade, mas vestígios dos tubos ainda existem, abatimentos circulares, porém a vegetação arbórea está consolidada, sobretudo nas laterais dos taludes, indicando estabilidade por um período considerável. Na última visita à área, em agosto de 2023, pouco ou nenhum avanço das frentes erosivas foi detectado em comparação à análise feita em 2021.

Tanto o modelo de terreno ajustado como as curvas de nível originais indicam um desnível de 15 a 20 metros, desde o início das primeiras feições erosivas na cabeceira da Bacia do Córrego Santa Maria até o ponto de saída do *pipe* principal. Verachtert (2011) afirma em seu trabalho que, para que exista ocorrência de *piping*, é necessário certo gradiente de inclinação em combinação com uma área de contribuição suficientemente grande, embora o gradiente hidráulico seja mais importante que o gradiente de inclinação da superfície. Solos que favorecem a ocorrência de lençóis freáticos altos/empoleirados, dando origem a numerosas nascentes, também são muito suscetíveis a esse tipo de erosão interna. Outros fatores que criam um fluxo de água concentrado, como deslizamentos, drenos quebrados, atividade biológica de minhocas e pequenos mamíferos, também podem contribuir para uma situação hidrológica favorável para *piping*.

Moreira (2016) salienta que a evolução de cavernas em arenito se dá mais comumente por erosão, que é responsável pelo contínuo alargamento dos condutos, mas que poderia haver uma primeira fase dissolutiva com a remoção do cimento silicoso, unindo os grãos de quartzo, ou mesmo a dissolução das bordas dos cristais de quartzo, fazendo com que estes se soltem. Nesse sentido, a ação erosiva da água removeria os grãos, alargando os condutos e originando as cavernas.

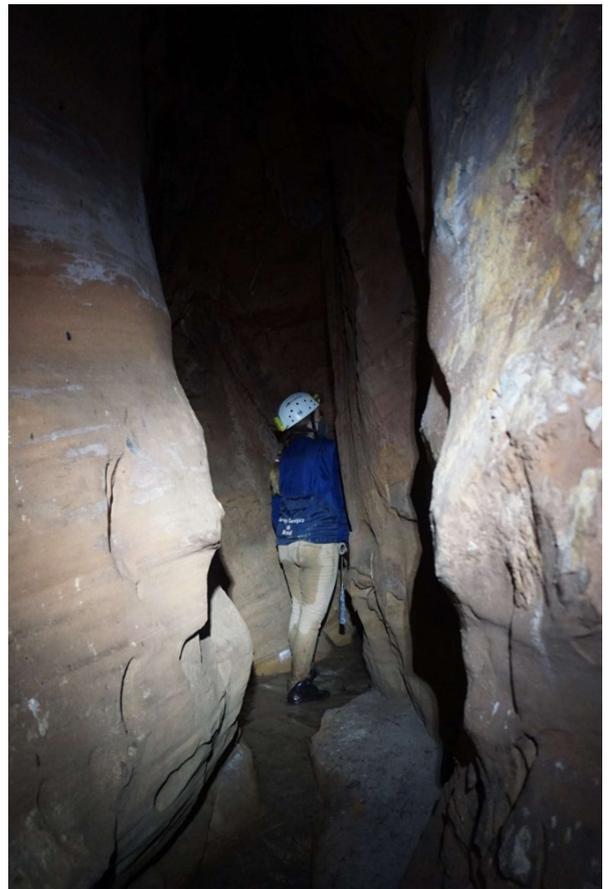
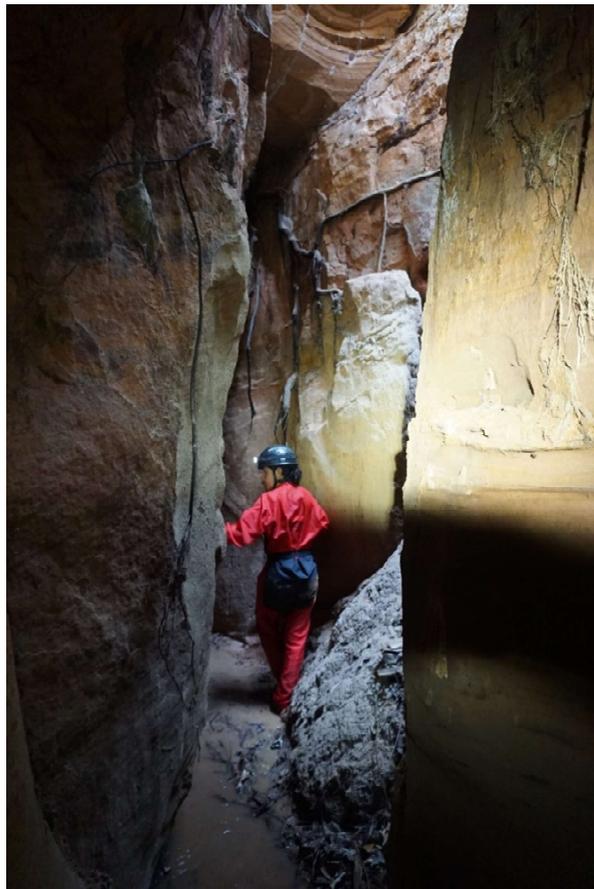
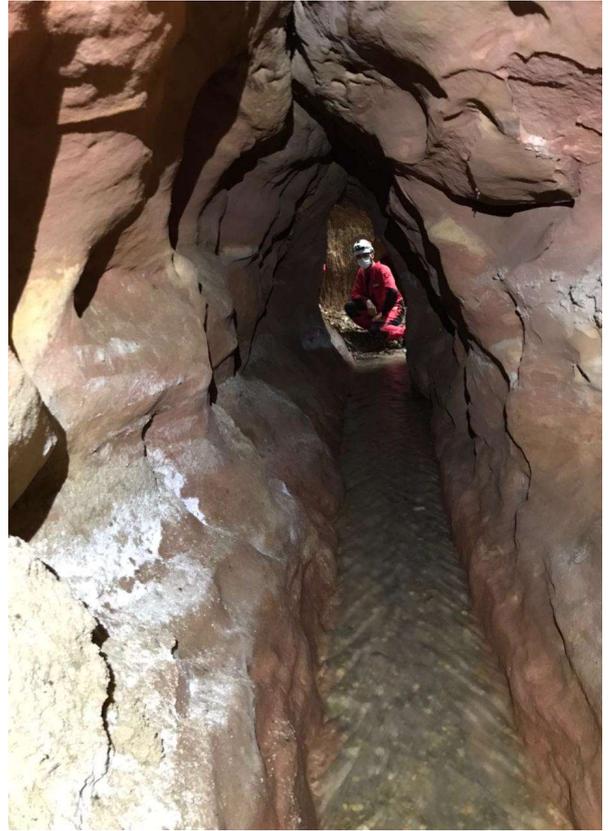


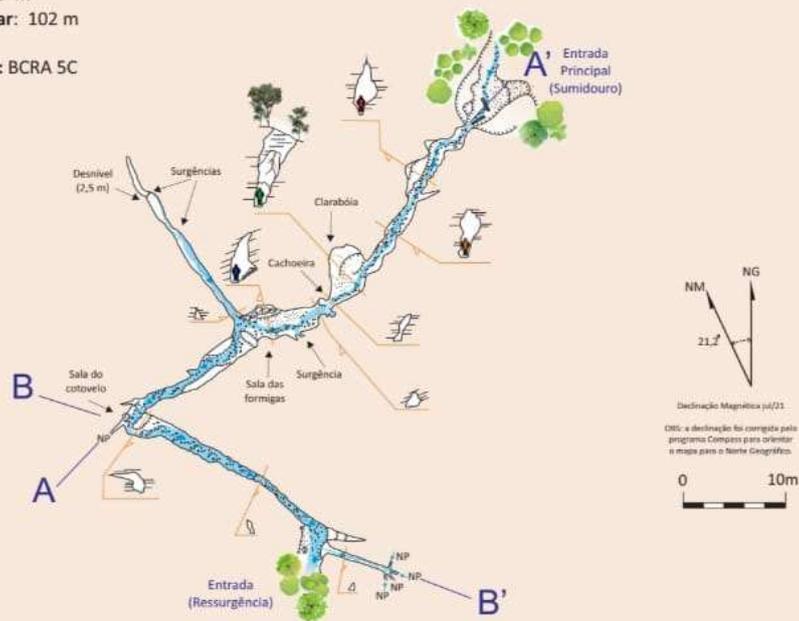
Figura 94 – Porções internas da Caverna do Córrego Santa Maria (Fotos: Leda Zogbi).

Na área de pesquisa, as cavernas estão na Formação Botucatu, em arenitos róseos altamente friáveis. De acordo com Spoladore et al. (2007), trata-se de litologias altamente friáveis, o que facilita a instalação de fenômenos erosivos. Os autores dizem que são descritas diversas cavernas areníticas nos arenitos das Formações Pirambóia e Botucatu, e que uma característica importante é a presença de estratificação cruzada e pode ser frequentemente em cunhas, tangencial e acanalada, o que acontece em diversos pontos da área de estudo.

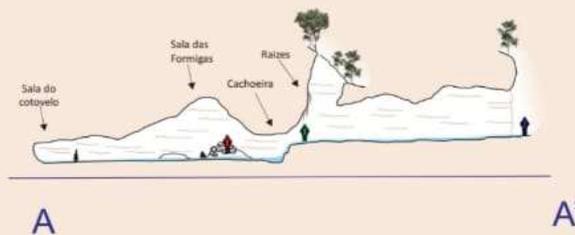
**Caverna do
Córrego Santa Maria
R*SP-
Brotas, SP**

Coordenadas UTM:
22K 793.802 / 7.533.629
Alt: 629 m
Datum: WGS84
Precisão: ± 6 m

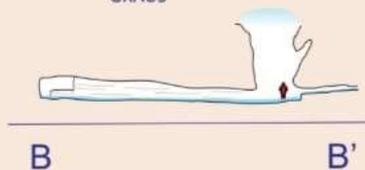
Projeção Horizontal: 96 m
Desenvolvimento Linear: 102 m
Desnível: 10 m
Precisão da topografia: BCRA 5C
Litologia: Arenito.



PERFIL GIRO +40 GRAUS



PERFIL GIRO +330 GRAUS



Topografia realizada em 17/07/2021.

Equipe: Cristiana Lucena, Eduardo Piazzentim, Leda Zogbi

Mapa : Leda Zogbi

Figura 95 – Topografia da Caverna do Córrego Santa Maria.

Essa caverna foi topografada juntamente com esta pesquisa e posteriormente cadastrada, em 5 de agosto de 2021, na ocasião desta pesquisa, no sistema CANIE (Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas), como Caverna do Córrego Santa Maria (nome do cadastro CNC SBE, número do cadastro SP-852, Lat 22° 16' 41" S : Lng 48° 8' 56" W), código 028123.00001.35.07902) (**Fig. 95**). Ela é um patrimônio ambiental relevante e é importante lembrar que todas as cavernas no território brasileiro pertencem à União (Governo Federal), havendo legislação específica para orientar o seu uso. As normas de cadastramento são as mesmas para cavidades calcárias e não calcárias. O trabalho de Martins (1984, apud Zaine e Perinoto, 1996) propõe que, a partir de 10m de desenvolvimento, uma caverna não calcária possa ser cadastrada, uma vez que são muito menos frequentes que as calcárias (cerca de 8%, segundo a SBE – Sociedade Brasileira de Espeleologia).

De acordo com Archela e Spoladore (2007), as cavidades naturais em arenito são menores quanto ao desenvolvimento total, quando comparadas com as cavernas calcárias. Além disso, sua ornamentação em espeleotemas é relativamente rara a inexistente.

A Resolução CONAMA nº 347, de 10 de setembro de 2004, criou o CANIE, com procedimentos de uso e exploração do patrimônio espeleológico nacional. Tal Resolução estabelece que empreendimentos potencialmente poluidores ou degradadoras do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente. A área de influência deve ser definida por órgão ambiental competente. Enquanto não houver definição, essa área deverá ser de, no mínimo, 250m ao redor de toda a extensão da área ocupada pela caverna (CONAMA, 2004). Se avaliarmos esse perímetro indicado no ponto de saída da caverna, uma parte do Conjunto Habitacional Santa Maria II estaria dentro da área crítica, com pelo menos 10 unidades habitacionais no interior dessa região, como mostra a **Figura 96**.

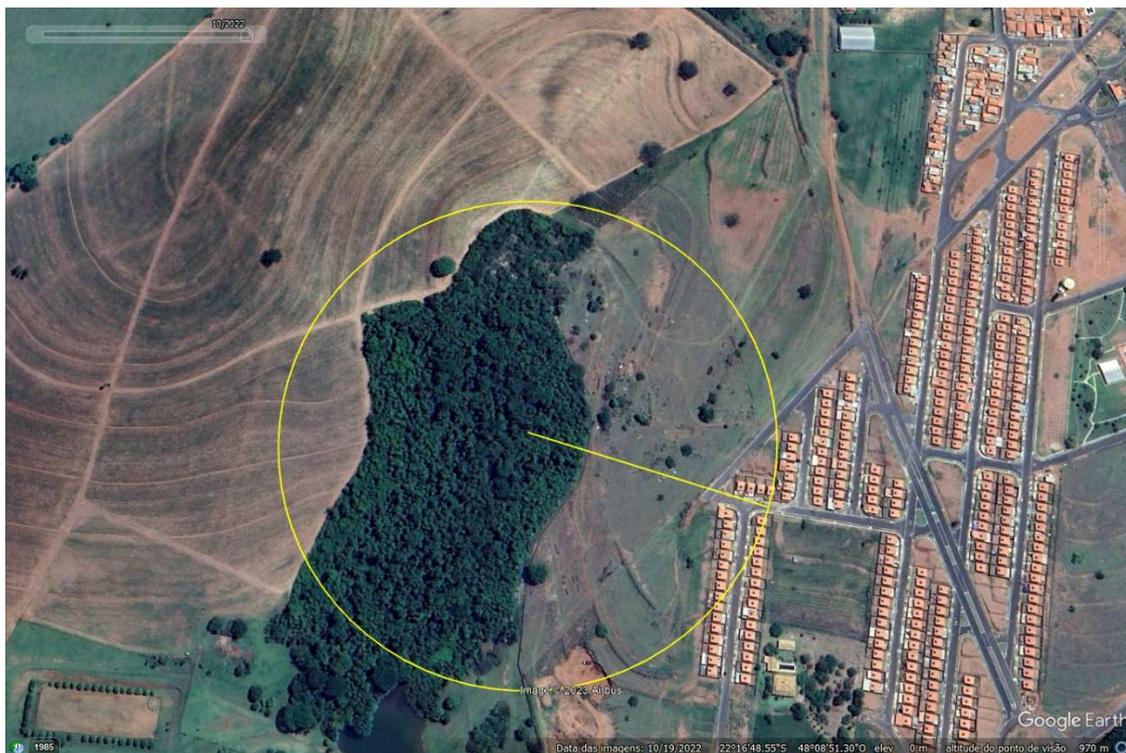


Figura 96 – Raio de 250m do centro da Caverna Santa Maria.

No estado de São Paulo, existem 816 cavidades cadastradas no CANIE, sendo somente uma localizada em Brotas, identificação que se deu apenas por advento desta pesquisa.

Sobre o processo erosivo na área, que deu origem a cavernas, colapsos e fendas, podemos afirmar que se trata de um processo erosivo interno do tipo *piping*, que é produto de variações de fluxo de água para a Bacia do Córrego Santa Maria. Inúmeros estudos já apontavam a influência antrópica na evolução recente dessas erosões, indicando a área utilizada para cultivo de cana como potencial indutora e a ocupação do topo da Bacia pelos bairros Jardim Modelo e Jardim Felicidade. Em 2020, após execução de parte deste trabalho e ampliação da área ocupada pelo Jardim Santa Maria I e II, novos pontos de abatimento, antes desconhecidos, foram localizados. Isso reforça a influência antrópica nesses abatimentos e colapsos, que seriam um reflexo da erosão interna de tipo *piping* causada pela variação de fluxos de água.

Embora o processo ocorra naturalmente no tempo geológico (Bacellar et al., 2001), grande parte das voçorocas ativas resulta de atividades antrópicas mal planejadas, bem como do avanço da urbanização e da retirada de cobertura vegetal natural, configurando um problema ambiental e geotécnico recorrente em todo o país.

Pela forma conhecida de avanço de voçorocas, que crescem tanto no eixo maior, quanto no eixo menor, podemos também afirmar que a voçoroca a montante, apesar de apresentar feições de estabilidade nas laterais externas, está ativa em sua área central. Ali vemos água fluindo, bordas sofrendo desabamentos e tubos de erosão interna paralelos e perpendiculares ao eixo maior da voçoroca. Logo, podemos concluir que esse avanço pode, eventualmente, voltar a seguir em direção ao Jardim Modelo, remontando e, eventualmente, atingindo o bairro. Hoje sabemos que também existem evidências de tunelamento para leste, em direção ao Bairro Santa Maria. Como a erosão é um processo lento e contínuo, prever esse tipo de situação, numa escala de tempo, depende de muitos fatores, entre eles saber o quão intenso é o aporte das atividades humanas nesse processo.

Acompanhar o avanço dessas frentes erosivas e erosões internas é muito importante, avaliando rotineiramente o risco e a zona de isolamento a ser proposta. Formas de minimizar o avanço podem conter uma abordagem que envolva intervenções na área, como replantio e revegetação dos arredores, melhoria na captação e no escoamento das águas superficiais, ou então nenhuma intervenção, fazendo nenhuma alteração nos arredores. Em áreas com esse tipo de processo erosivo, às vezes ser conservador é recomendado, pois até mesmo o plantio e a abertura do solo para reflorestamento podem ser ainda mais prejudiciais, já que podem abrir novos caminhos preferenciais para a água, até mesmo por avanço de raízes na subsuperfície. Seria importante reconstruir o cenário pretérito, bem anterior ao replantio a montante, para saber o quanto ele influenciou na estabilização do processo nas laterais externas, ou se isso não foi o fator determinante.

É preciso avaliar também os pontos de captação de água na drenagem, tanto na nascente como nas barragens. Na nascente principal já existe um processo erosivo intenso, tanto que um cano de PVC mais longo foi instalado para que a água chegasse até a roda d'água, pois parte do talude foi erodido (**Fig. 97**). Ali também existem fendas e fraturas, abatimentos e até mesmo uma feição que podemos chamar de *abismo*, pois existe um abatimento, de 8 metros, com três *pipes* ativos alinhados, logo acima da nascente.



Figura 97 – Nascente principal e roda d'água utilizada para captação de água

Durante a etapa de campo, buscaram-se evidências de abatimentos em todo o polígono da área de estudo, sendo então gerado um mapa atualizado, incluindo mais uma nascente e mais pontos de colapsos e abatimentos. Detalhes das feições de abatimento na superfície estão no **Apêndice II**.

11. CONCLUSÕES

De forma geral, os *pipings* são identificados por métodos de superfície que não fornecem parâmetros como forma, distribuição e profundidade. Com o mapeamento dos contornos erosivos, associado ao uso de geofísica e mapeamentos diretos, foi possível estimar a cobertura do solo sobre a estrutura e a distribuição dos canais em subsuperfície, além de delimitar potenciais áreas para o colapso.

O sistema encontrado na Bacia do Córrego Santa Maria corresponde a um estágio avançado de evolução de processos erosivos do terreno, mas que podem aumentar com o tempo. E o crescimento do sistema de *pipings* pode resultar em mais instabilidades no terreno e abatimento de túneis.

Os resultados obtidos com a integração de dados da geofísica, com mapas, seções e dados de subsuperfície, revelaram o prolongamento e a ramificação de *pipings* em porções mais internas do terreno na Bacia do Córrego Santa Maria, com maior detalhamento na cabeceira, onde são encontrados em maior número. Durante os trabalhos de campo foram encontradas erosões internas tubulares do tipo *piping* se desenvolvendo em arenitos da Formação Botucatu mais a jusante, onde existem outras nascentes de água, que eram desconhecidas até então. É importante um estudo mais completo para verificar indícios de outras ramificações de *piping* nessa região, nas proximidades do Conjunto Habitacional Santa Maria I e II.

Os resultados foram combinados em um bloco 3D e a análise dos produtos gerados permitiu: 1) identificar a distribuição e a direção dos canais subterrâneos; 2) delimitar uma área afetada pela presença do sistema de túneis com risco de colapso. Os resultados sugerem a possível identificação de conexões entre os canais secundários e o canal principal do sistema de túneis em subsuperfície.

Os dados da geofísica sugeriram uma densidade de canais superior à estimada inicialmente pelas técnicas superficiais; a integração dos métodos geofísicos teve papel importante para estabelecer a densidade e a distribuição do sistema de túneis, detectar a região de ocorrência dos processos erosivos responsáveis pela formação dos canais e reconhecer a estrutura interna dos materiais.

O que vemos na Bacia do Córrego Santa Maria é uma identificação imprecisa das áreas afetadas pelos *pipings* ou um desconhecimento da sua existência por parte

dos responsáveis pela gestão de áreas com fragilidades ambientais. A implantação de grandes conjuntos habitacionais a montante, no Jardim Modelo e, mais recentemente, no Jardim Santa Maria I e II, indica que a influência da urbanização e consequentes mudanças no regime de água subterrânea foram desconsideradas ao se indicar a área um terreno apto para um adensamento populacional para obras de interesse social.

O aporte recente de mais 300 residências na vertente leste da área pode refletir em mais abatimentos de solo, já que a variação de fluxo subterrâneo é evidente em áreas urbanizadas e parte das casas está na área de contribuição da bacia e para o surgimento de *pipings* a variação de gradiente pode ser um fator deflagrador. Já existem novas residências que estão inseridas a menos de 250 metros da caverna principal, não respeitando o que a Resolução nº 347, de 10 de setembro de 2004, do CONAMA, indica como indica a **Figura 98**.



Figura 98 – Residências construídas recentemente. Ao fundo, em amarelo, cabeceira do Córrego Santa Maria, onde abatimentos de solo são encontrados.⁹

Os abatimentos de solo a montante da área são sabidos pelo município, porém a continuidade da caverna e abatimentos a jusante, uma outra nascente e até mesmo um sumidouro, indicando um segundo nível de *pipes* numa cota mais baixa, não são

⁹ Disponível em: <<https://www.brotas.sp.gov.br/habitacao-emd-brotas/fotos-emdb/loteamento-santa-maria>>.

mencionados em nenhum relatório ou trabalho anterior. Análises visuais de pontos de abatimento e posição desses elementos, indicam a possibilidade de existir um túnel formado por erosão interna, avançando em direção ao Conjunto Habitacional Santa Maria II. Ali encontramos duas feições erosivas circulares a sudeste, de *pipes* ainda ativos, e uma segunda nascente de água, indicando a possibilidade abertura de novas frentes erosivas nesse ponto indicado **(Fig. 99)**.

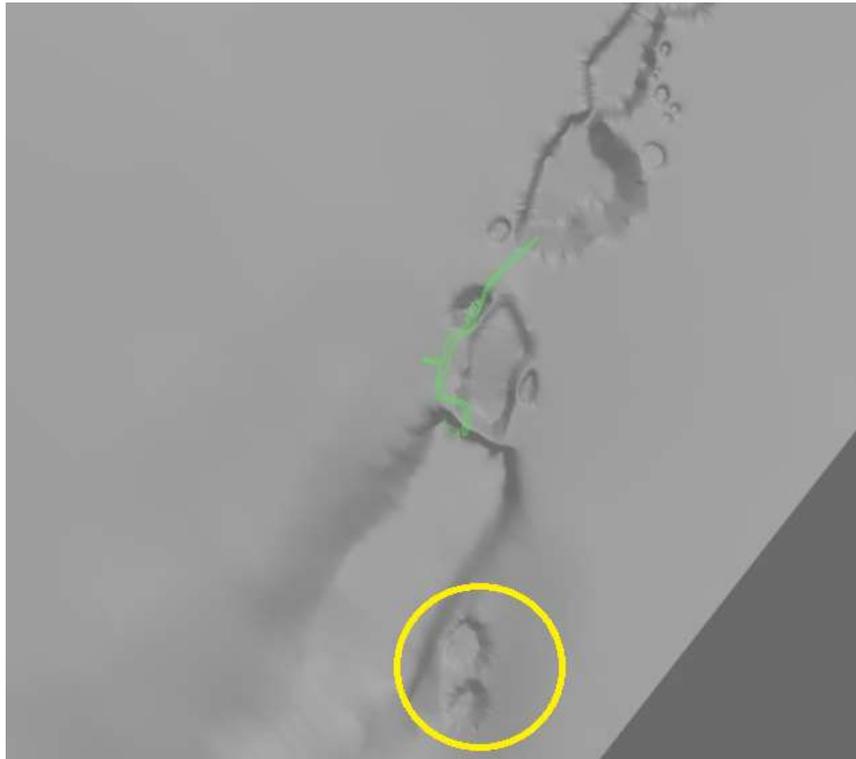


Figura 99 – Feições erosivas de *pipes* ativos a sudeste.

Atualmente, essas evidências de abatimento estão a cerca de 180 metros das casas, mas, como a erosão é remontante, pode, eventualmente, avançar para mais em direção ao conjunto habitacional mais a norte, no Jardim Modelo ou a leste para onde o Conjunto Habitacional Santa Maria está implantando **(Fig.100)**.

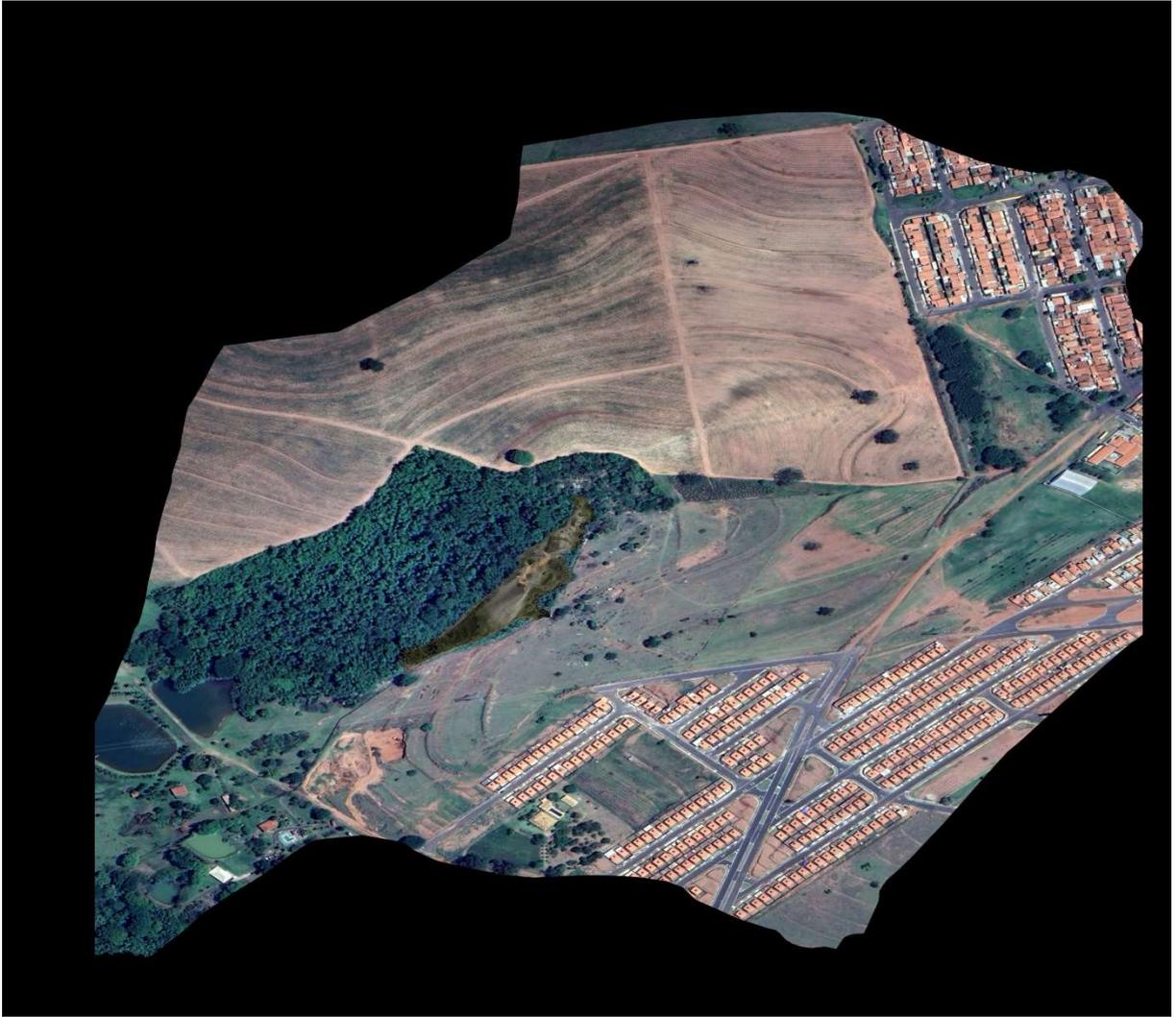


Figura 100 – Projeção das cavidades e caverna sobre a imagem do *Google Earth*.



Figura 101 – Localização da caverna e abatimentos de solo.

Hoje sabemos que a caverna principal tem mais de 90m de comprimento (com suas reentrâncias e curvas do túnel), e o perfil A-A' indica uma região ampla com abatimentos cadastrados (Fig. 101 e 102).

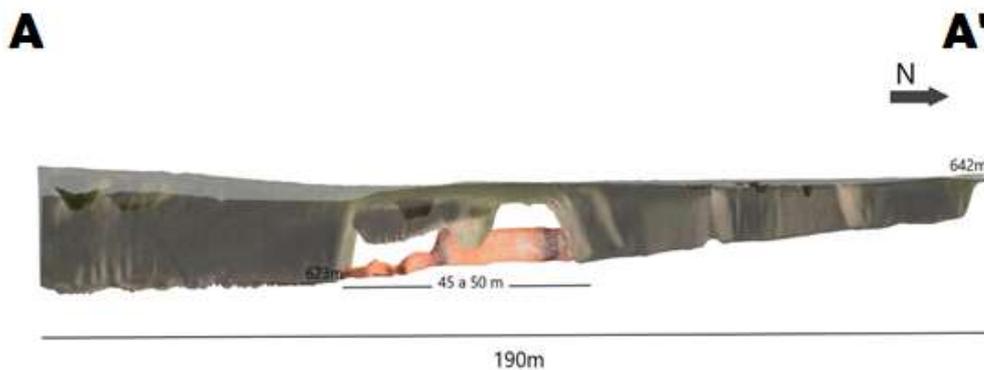


Figura 102 – Perfil A-A' com a caverna principal e abatimentos indicados.

Como Terzaghi et al. (1996) afirmam que a subsidência do teto também ocorre a uma grande distância da extremidade de descarga do túnel, seria importante avaliar a extensão desse túnel mais a jusante, onde fica a segunda nascente, tanto para melhor localizar o ponto de descarga, como para analisar sua extensão nas vertentes em direção ao bairro, pois um túnel pode estar sendo erodido justamente nessa direção.

Mais estudos são necessários para compreender a gravidade e a extensão do processo de *piping* na região sudeste, o que não foi motivo de detalhamento deste trabalho. Porém, a extensão dos *pipes* próximos à nascente e à cabeceira já demonstra uma situação agravada por influência antrópica. Outras drenagens em Brotas podem apresentar *piping* e o uso de ferramentas geofísicas como a Eletroresistividade podem trazer algumas respostas. Este estudo teve bastante sucesso em indicar a presença de túneis e pode ser aplicado em outros terrenos com as mesmas características para a detecção de cavidades similares.

A importância deste trabalho está intimamente ligada à gestão territorial de Brotas e pode servir como diretriz para a prevenção de desastres, planejamento e ordenamento territorial. É muito importante repensar a ampliação da área urbana nesse vetor, pois já é sabido que o aumento da impermeabilização da área de recarga do aquífero pode agravar o processo erosivo, com maior erosão superficial. Isso se dá pela expansão das áreas urbanas, com a retirada da cobertura vegetal do solo, com compactação e asfaltamento. Essas atitudes contribuem para a ocorrência de enxurradas e enchentes, pois a água da chuva não infiltra no solo impermeabilizado, e escoar com maior velocidade pelas ruas.

Apesar do crescimento de vegetação nos níveis externos da voçoroca (onde fica a roda d'água), indicativo de um período de estabilidade do processo erosivo, novos pontos de abatimento nas vertentes foram encontrados a sudoeste, justamente em direção aos novos residenciais. É importante um detalhamento e acompanhamento destas frentes erosivas já existentes, e novos estudos para avaliar as novas frentes erosivas que estão se formando internamente.

É importante lembrar que, como indicam as redes de fluxo (Terzaghi et al., 1996), há um aumento da área de captação da nascente à medida que o túnel de erosão aumenta. Assim sendo, o crescimento urbano acelerado nos arredores dessa bacia precisa ser estudado com maior detalhamento, bem como formas de prevenir o avanço desse processo erosivo. Afinal, sabe-se que a capacidade erosiva de uma

nascente aumenta à medida que o comprimento de um túnel aumenta, de modo que podemos ter reflexos disso nas vertentes e cabeceiras. É sabido também, que a prefeitura municipal de Brotas já pleiteou a implantação de mais residências nesta mesma encosta, ainda mais próximas da nascente dos pontos de abatimentos ativos.

A área de estudo é, antes de mais nada, uma excelente fonte de informações sobre fenômenos erosivos internos em solos naturais, especialmente o *piping*. Uma caverna caminhável de cerca de 96 metros com um sistema ativo, erodindo dia a dia, com perfis belíssimos do arenito Botucatu. Um geosítio de interesse geológico único, de grande potencial científico e bem preservado, apesar de suas fragilidades naturais.

Apenas um estudo hidrogeológico detalhado, juntamente com mais informações subterrâneas e maior detalhamento de outros *pipes*, pode ajudar planejadores a delimitar a área de risco e identificar os possíveis fatores desencadeantes, possibilitando a implementação de políticas de redução de riscos.

12. REFERÊNCIAS

- Archela, E., Spoladore, Â., 2007, Tipologia gênica de cavidades naturais e sua ocorrência no estado do paraná: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 29^o, Ouro Preto, MG, Anais, p. 415-426.
- Bacellar, L.A.P., Netto, A.L.C., Lacerda, W., 2001, Fatores condicionantes do voçorocamento na Bacia Hidrográfica Do Rio Maracujá, Ouro Preto, *in* Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 7^o, Goiânia, GO, p. 1-8.
- Benahmed, N., Bonelli, S., 2012, Internal erosion of cohesive soils: laboratory parametric study: ICSE6 Paris, p. 1041-1048.
- Bernatek-Jakiel, A., Bruthans, J., Vojt šek, J., Stolarczyk, M., Zaleski, T., 2020, Sediment detachment in piping-prone soils: Cohesion sources and potential weakening mechanisms: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 45, p. 3185-3201, doi:10.1002/esp.4959.
- Bernatek-Jakiel, A., Kondracka, M., 2016, Combining geomorphological mapping and near surface geophysics (GPR and ERT) to study piping systems: *Geomorphology*, v. 274, p. 193-209, doi:10.1016/j.geomorph.2016.09.018.
- Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J., 2018, Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs: *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 1107-1128, doi:10.1016/j.earscirev.2018.08.006.
- Bitar, O.Y., 2015, Guia Cartas Geot cnicas orienta es b sicas aos municípios - IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, p. 1-28.
- Bonelli, S., Marot, D., 2011, Micromechanical modeling of internal erosion: *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, v. 15, p. 1207-1224, doi:10.1080/19648189.2011.9714849.
- Bovi, R.C., Moreira, C.A., Rosolen, V.S., Rosa, F.T.G., Furlan, L.M., Helene, L.P.I., 2020, Piping process: Genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach: *Geoderma*, v. 361, p. 114101, doi:10.1016/j.geoderma.2019.114101.
- Braga, A.C. de O., 2016, Geofísica aplicada: métodos geol tricos em hidrogeologia (T. G. F. Arthur Pinto Chaves, Cylon Gonç lves da Silva, Doris C. C. K. Kowaltowski, José Galizia Tundisi, Luís Enrique Sánchez, Paulo Helene, Rozely Ferreira dos Santos, Ed.): São Paulo-SP, Oficina de Textos.
- Brasil, Presidência da República, Casa Civil, 2001, Lei N. 10.257, de 10 de julho de 2001- Estatuto das Cidades: *Diário Oficial da União*, p. 1-16.
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm.
- Brasil, 2001, Lei Federal n  10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constitui o Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências, Brasília,
http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10257.htm (acessado em 12 Junho 2009).
- Brasil, 2016, Lei complementar n  0093/2016,
https://ecrie.com.br/sistema/conteudos/arquivo/arquivo_8_20122018120441.pdf (acessado em 06 Març o 2020)
- Carrazza, L.P., 2016, Identifica o de cavidades em voçoroca por meio da aplica o do método geofísico da eletrorresistividade: Unesp - Universidade Estadual Paulista, 64 p.
- Clibborn, J., 1902, Experiments on The Passage of Water through Sand, *in* Roorkee, India, Thomason College.
- CONAMA, 2004, Resolu o N  347, de 10 de setembro de 2004.: Programa

- Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, p. 1-4, <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452> (acessado Julho 2020).
- CPRM, 2020, Carta de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação - Município de Brotas-SP - Escala 1:100.00 - CPRM-Serviço Geológico do Brasil, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21628> (acessado Abril 2020).
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004, A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays: *Geophysical Prospecting*, v. 52, p. 379-398, doi:10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x.
- DER, 1991, Taludes de rodovias - Orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas (Manual de Geotecnia), p. 388.
- Dourado, J.C., Malagutti Filho, W., Braga, A.C.O., Nava, N., 2001, Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletrorresistividade e GPR: *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 19, p. 19-32, doi:10.1590/s0102-261x2001000100002.
- Doyle, P., 1903, *Indian Engineering* (C. E. Pat. Doyle, Ed.): Calcuta, v. 27, 416 p.
- Fletcher, J.E., Harris, K., Peterson, H.B., Chandler, V.N., 1954, Piping: *American Geophysical Union*, v. 35, doi:10.1002/2013EO25.
- Fletcher, J.E., Karl, H., 1952, Soil Piping: *Progressive Agricultural in Arizona*.
- Franzini, I.T., 2015, Identificação de Cavidades Naturais por Meio de Eletrorresistividade na Região de São Pedro (SP): UNESP - Rio Claro (SP), 48 p.
- Gandolfo, O.C.B., 2007, Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa: Universidade de São Paulo, 215 p.
- Goodarzi, E., Shui, L.T., Ziaei, M., Haghizadeh, A., 2010, Estimating probability of failure due to internal erosion with event tree analysis: *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 15, p. 1-14.
- Guerreiro, J.V.R., Lorandi, R., Moschini, L.E., Gomes, A.A.T., Lollo, J.A. de, 2019, Carta de unidades aquíferas do município de Brotas, SP, Brasil: subsídios ao planejamento territorial: 12º Seminário Águas Subterrâneas.
- Hagerty, D.J., 1991a, Piping/Sapping Erosion. I: Basic Considerations: *J. Hydraulic Eng.*, v. 117, p. 991-1008.
- Hagerty, D.J., 1991b, Piping /sapping erosion ii; identification-diagnosis: *J. Hydraul. Eng*, v. 117, p. 1009-1025.
- Hardt, R., Pinto, S.D.A.F., 2009, Carste em litologias não carbonáticas: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 10, doi:10.20502/rbg.v10i2.134.
- Intrieri, E., Fontanelli, K., Bardí, F., Marini, F., Carlà, T., Pazzi, V., Di Filippo, M., Fantí, R., 2018, Definition of sinkhole triggers and susceptibility based on hydrogeomorphological analyses: *Environmental Earth Sciences*, v. 77, doi:10.1007/s12665-017-7179-3.
- IPT, 2009, Análise geológico-geotécnica e hidrogeológica dos processos erosivos situados na bacia hidrográfica do córrego Santa Maria - Parecer Técnico 17 506-301.
- IPT, 2013, Cadastramento de pontos de erosão e inundação no Estado de São Paulo: Relatório Técnico n.131.057-205, v. B1-1/189.
- Jesus, F.A.N. de, 2020, Caracterização de Sistema de Canalização em Solo Basáltico através de ERT e GPR: Aplicação em área Agropastoril: Universidade de São Paulo, 63 p.
- John, N.W.M., 1987, *Geotextiles*: Blackie, 347 p.

- Jones, J.A.A., 2004, *Encyclopedia of Geomorphology* (A. S. Goudie, Ed.): London, Taylor and Francis Group, London Routledge Publication.
- Kertzman, F.F., Oliveira, A.M.S., Salomão, F.X.T., Gouveia, M.I.F., 1995, Mapa de erosão do estado de São Paulo: *Revista do Instituto Geológico*, v. 16, doi:10.5935/0100-929x.19950008.
- Lorandi, R., Lollo, J., Guerreiro, J.V.R., 2014, Carta de unidades aquíferas aplicada ao zoneamento (geo) ambiental-Estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Claro (SP).
- Magri, R.A.F., 2013, Análise da suscetibilidade à erosão da região do Médio Rio Grande (MG): Universidade de São Paulo, doi:10.1016/j.bbapap.2013.06.007.
- Marcuzzo, F.F.N., 2019, Mapeamento da chuva distribuída mensal e anual e hietograma: *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, p. 7-10, doi:ISBN:978-85-17-00097-3.
- Moraes, C.C.M. de, Tomita, S.A., 2016, Delimitação de Áreas em Alto e Muito Alto Risco a Enchentes, Inundações e Movimentos de Massa - Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Departamento de Gestão Territorial - DEGET, Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação.
- Morais, F., Bacellar, L.A.P., Sobreira, F.G., 2007, Avaliação da susceptibilidade de solos gnaissicos à erosão subsuperficial: *Sociedade e Natureza, Uberlândia*, v. 19, p. 233-241.
- Moreira, A.C., 2016, Caracterização espeleológica preliminar da caverna Capixaba (Casa de Pedra) - PR 274 - Tamarana/PR: Universidade Estadual de Londrina para obtenção do título de Bacharela em Geografia.
- Morgan, R.P.C., 2005, *Soil Erosion & Conservation*/R.P.C. Morgan - 3. edition (N. S. R. Institute & C. University, Eds.): Blackell Publishing, 304 p.
- Mortari, D., 1994, Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Distrito Federal: Universidade de Brasília, 200 p.
- Moruzzi, R.B., Braga, R., Cunha, C.M.L. da, 2008, Avaliação da aptidão para a ocupação urbana: Um estudo de caso a partir de condicionantes geomorfológicos e hidrológicos: *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 12, p. 13-23.
- Moruzzi, R.B., Cunha, C.M.L. da, Braga, R., 2009, A questão do escoamento superficial em áreas degradadas por processos erosivos lineares: a importância de uma estratégia de análise: *Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal*, v. 6, p. 73-88.
- Nakazawa, V.A., Freitas, C.G.L. de, Diniz, N.C., 1994, Carta geotécnica do Estado de São Paulo, escala 1:500.000 [material cartográfico]: IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Departamento de Ciência e Tecnologia.
- Nieber, J.L., Wilson, G.V., Fox, G.A., 2019, Modeling Internal Erosion Processes in Soil Pipes: Capturing Geometry Dynamics: *Vadose Zone Journal*, v. 18, p. 1-13, doi:10.2136/vzj2018.09.0175.
- Oliveira, A.M. dos S., Neto, J.P. de Q., 1994, Depósitos tecnogênicos induzidos induzidos pela erosão acelerada no planalto ocidental paulista: *Boletim Paulista de Geografia*, n. 73, p. 91-123.
- Parker, G.G., 1963, Piping, a geomorphic agent in landform development of the drylands: *International Association of Scientific Hydrology Publication*, v. 65, p. 103-113.
- Parker, G.G., Higgins, C.G., Wood, W.W., 1990, Piping and pseudokarst in drylands: *Special Paper of the Geological Society of America*, v. 252, p. 77-110, doi:10.1130/SPE252-p77.

- Pastore, E.L., 2009, Risco geológico em obras civis: Revista Brasil Engenharia, v. 592, p. 110-115, <http://www.portaldageotecnia.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Risco-Geologico-em-Obras-Civis-Revista-Engenharia.pdf>.
- Perrotta, M.M., Marconato, A., Turra, B.B., Salvador, E., Chierigati, L.A., D'Agostino, L.Z., Perrotta, M.M., 2005a, Programa Geologia Do Brasil: Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:750.000: 173 p.
- Perrotta, M.M., Salvador, E.D., Lopes, R. da C., D'Agostino, L.Z., Peruffo, N., Gomes, S.D., Garcia, M. da G.M., Filho, J.V. de L., 2005b, Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa Geologia do Brasil - PGB, CPRM.
- Pierson, T.C., 1983, Soil pipes and slope stability: Quarterly Journal of Engineering Geology, v. 16, p. 1-11, doi:10.1144/gsl.qjeg.1983.016.01.01.
- Riha, J., Jandora, J., 2015, Pressure conditions in the hole erosion test: Canadian Geotechnical Journal, v. 52, p. 114-119, doi:10.1139/cgj-2013-0474.
- Robbins, B.A., Van Beek, V.M., 2015, Backward erosion piping: A historical review and discussion of influential factors: Association of State Dam Safety Officials, Dam Safety.
- Ross, J.L.S., Moroz, I.C., 1997, Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo: FFLCH/USP; IPT; FAPESP, 1997, p. 18, 2 v., 64 p.
- Santos, M.R.R. dos, Ranieri, V.E.L., Montañó, M., 2010, Considerações sobre as indicações do plano diretor frente ao zoneamento ambiental para a área de expansão urbana do município de Brotas - SP: I Congresso Brasileiro de Organização do Espaço e X Seminário de Pós-Graduação em Geografia da UNESP/Rio Claro, p. 3570-3582.
- São Paulo, 1980, Carta topográfica - Brotas I: SF-22-Z-B-III- 4-NO-B - escala 1:10.000: Secretaria de Estado e dos Negócios do Interior.
- São Paulo, 2014, Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC), p. 28, http://s.ambiente.sp.gov.br/cpla/Ficha_Tecnica_UBC_v2.pdf.
- Silva, W.B. da, 2011, Caracterização da cobertura superficial em encosta na bacia do rio das pombas, Guarapuava-PS: bases para entendimento da gênese erosiva em túneis: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 77 p., http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1197/1/Wellington_Barbosa_da_Silva.pdf.
- Silva, W.B. da, 2017, Origem e evolução de túneis em formações superficiais derivadas de basalto em clima subtropical úmido, Candóí, Paraná: Universidade Federal de Santa Catarina, 227 p.
- Spoladore, A., 2005, Províncias e Distritos Espeleológicos areníticos do Estado do Paraná: Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Espeleologia.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781139167932.
- Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., 1996, Soil Mechanics in Engineering Practice (John Wiley & Sons Inc, Ed.): 534 p.
- Tominaga, L.K., Santoro, J., Amaral, R., 2009, Desastres Naturais: conhecer para prevenir: 196 p.
- Verachtert, E., 2011, Soil piping in a temperate humid climate, The Flemish Ardennes (Belgium): Katholieke Universiteit Leuven, 1222 p.
- Wu, F.-T., Caetano-Chang, M.R., 1992, Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo: Revista do Instituto Geológico, v. 13, p. 58-68, doi:10.5935/0100-929x.19920004.

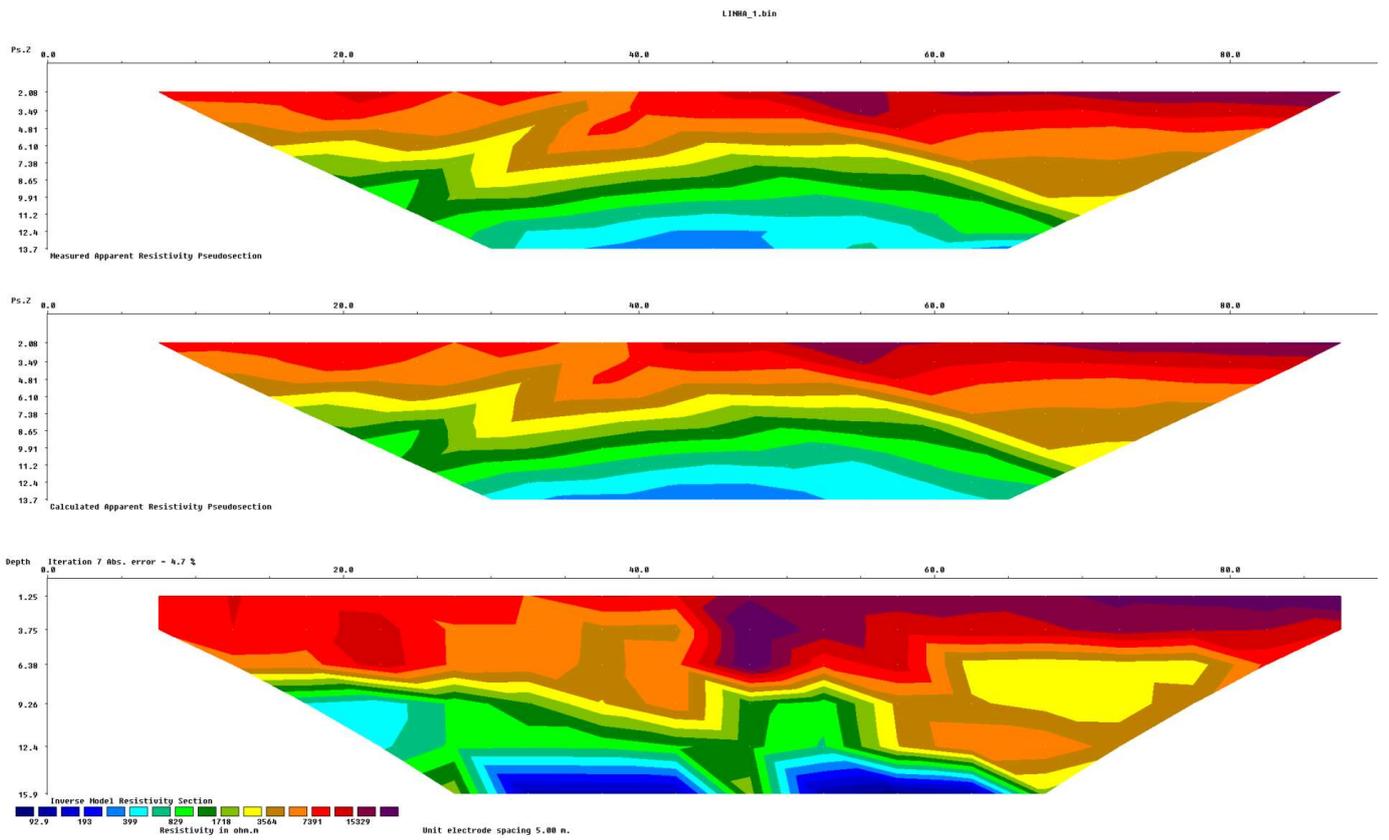
Zaine, M.F., Perinoto, J.A.. J., 1996, Patrimônios Naturais e História Geológica da Região de Rio Claro - SP, p. 91.

APÊNDICE I

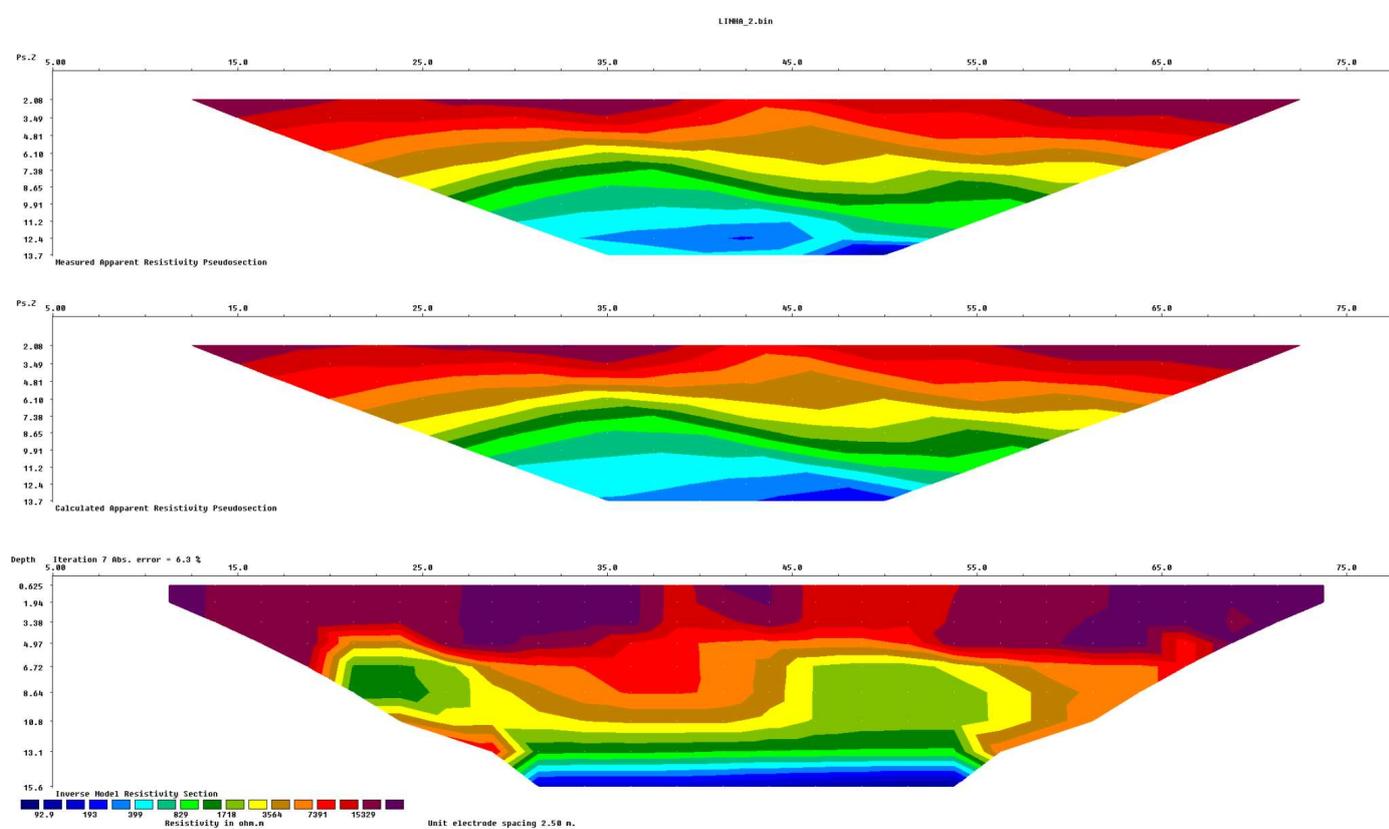
Field data and calculated values

| MN/2 [m] | AB/2 [m] | DeltaV [mV] | I [mA] | K [-] | Resistivity [ohm·m] |
|-------------|-------------|----------------|-----------|----------|------------------------|
| .2 | 1 | 150228.6 | 117 | 7.54 | 9681 |
| .2 | 1.5 | 112335.3 | 194 | 17.36 | 10052 |
| .2 | 2 | 36884 | 120 | 31.1 | 9559 |
| .2 | 2.5 | 26647.4 | 131 | 48.77 | 9921 |
| .2 | 3 | 24010.3 | 138 | 70.37 | 12244 |
| .2 | 4 | 16328.6 | 140 | 125 | 14579 |
| .2 | 5 | 7954.3 | 96 | 196 | 16240 |
| .2 | 6 | 6574.7 | 117 | 282 | 15847 |
| 1 | 6 | 40444.4 | 116 | 54.98 | 16044 |
| .2 | 7 | 4361.1 | 111 | 385 | 15126 |
| 1 | 7 | 26043.8 | 110 | 75.4 | 14941 |
| 1 | 8 | 19547.6 | 124 | 98.96 | 13057 |
| 1 | 9 | 15206.8 | 134 | 126 | 11968 |
| 1 | 10 | 8982.5 | 112 | 156 | 10471 |
| 1 | 12 | 6642.9 | 158 | 225 | 7917 |
| 1 | 16 | 2853.2 | 214 | 401 | 4475 |
| 4 | 16 | 10262 | 213 | 94.25 | 4547 |
| 1 | 20 | 1087.4 | 160 | 627 | 3566 |
| 4 | 20 | 3713.1 | 160 | 151 | 3510 |
| 4 | 25 | 2540.5 | 256 | 239 | 2375 |
| 4 | 30 | 1029.9 | 210 | 347 | 1704 |
| 4 | 35 | 524.8 | 204 | 475 | 1224 |
| 4 | 40 | 303.7 | 204 | 622 | 927 |

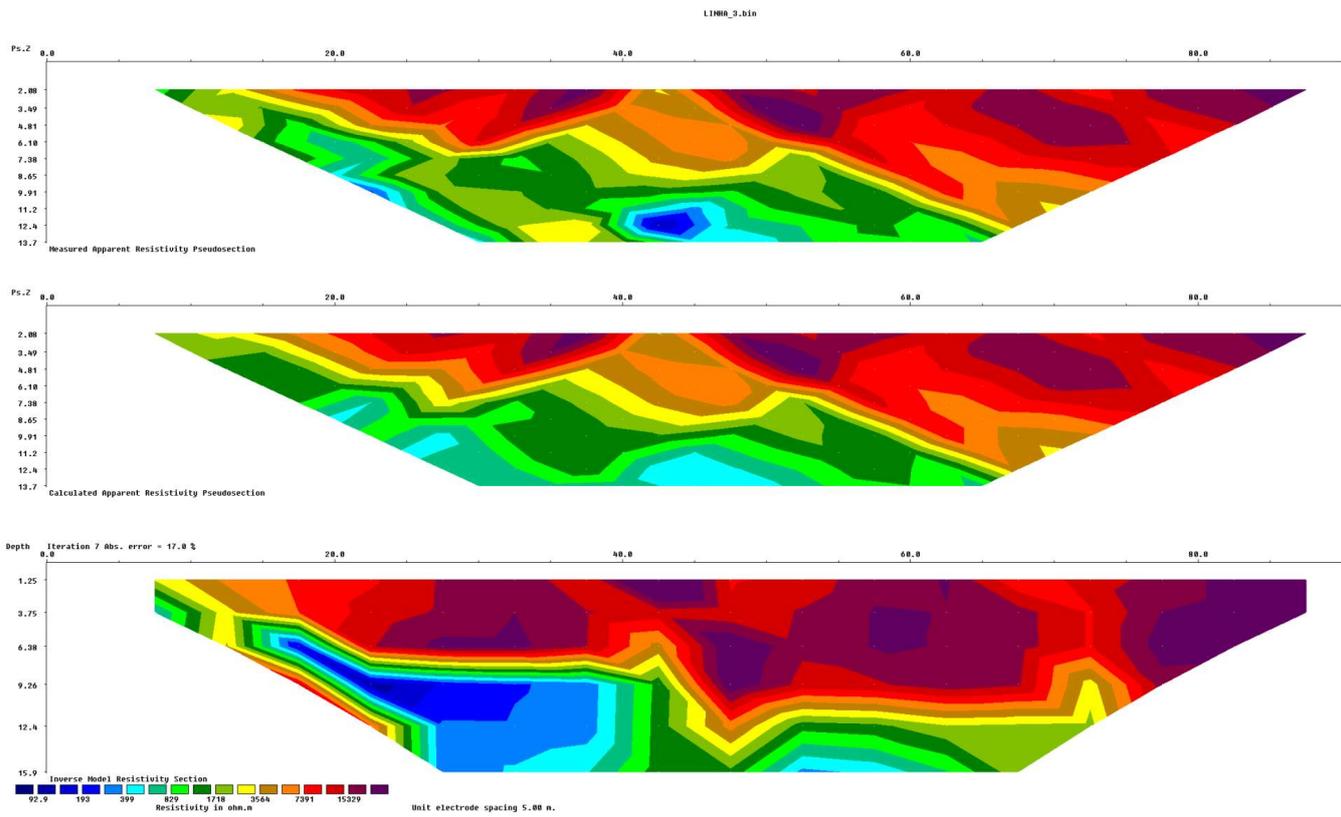
Dados da SEV.



Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1.

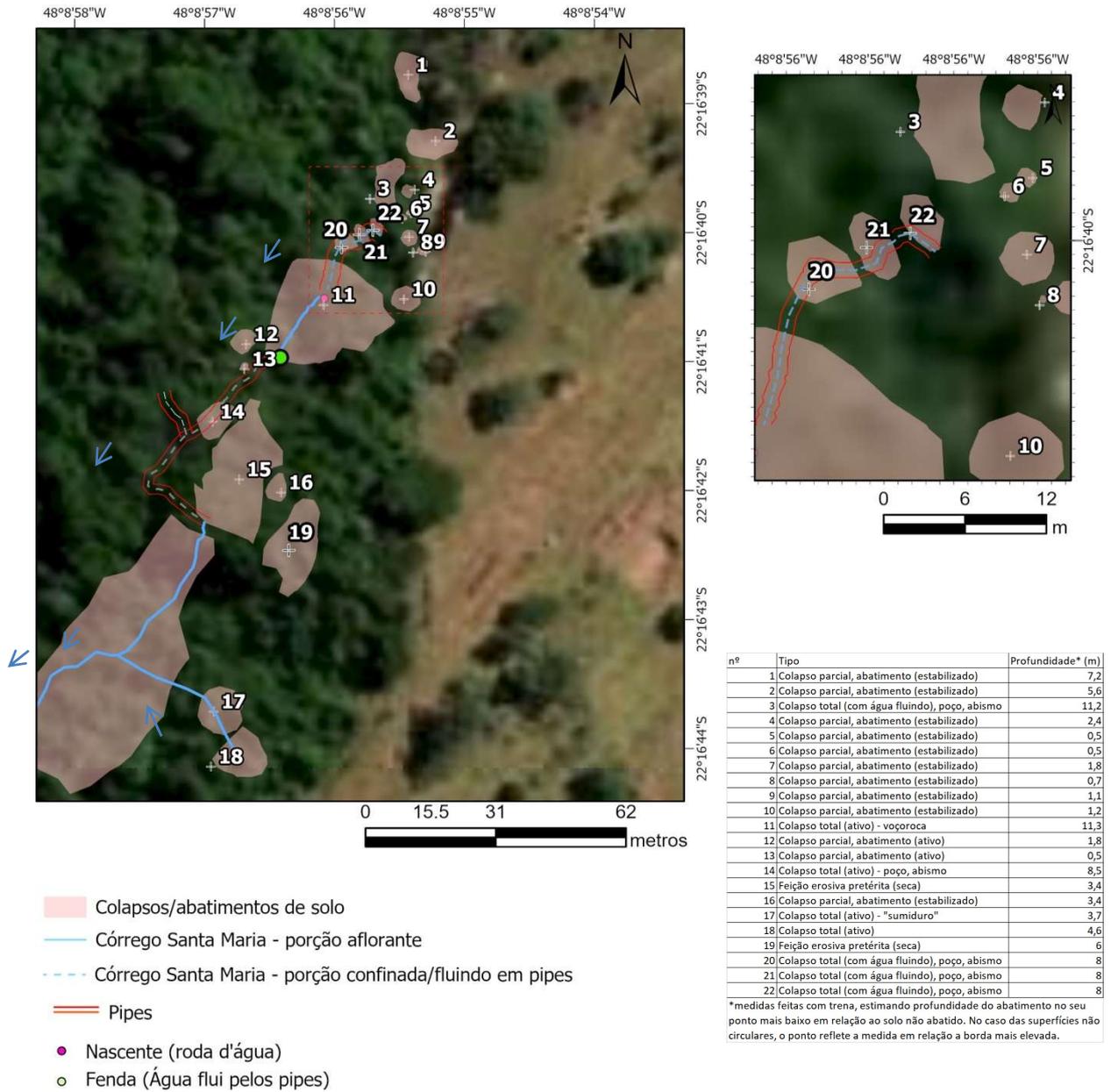


Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2.



Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 3.

APÊNDICE II



Localização dos pontos de abatimento e colapso

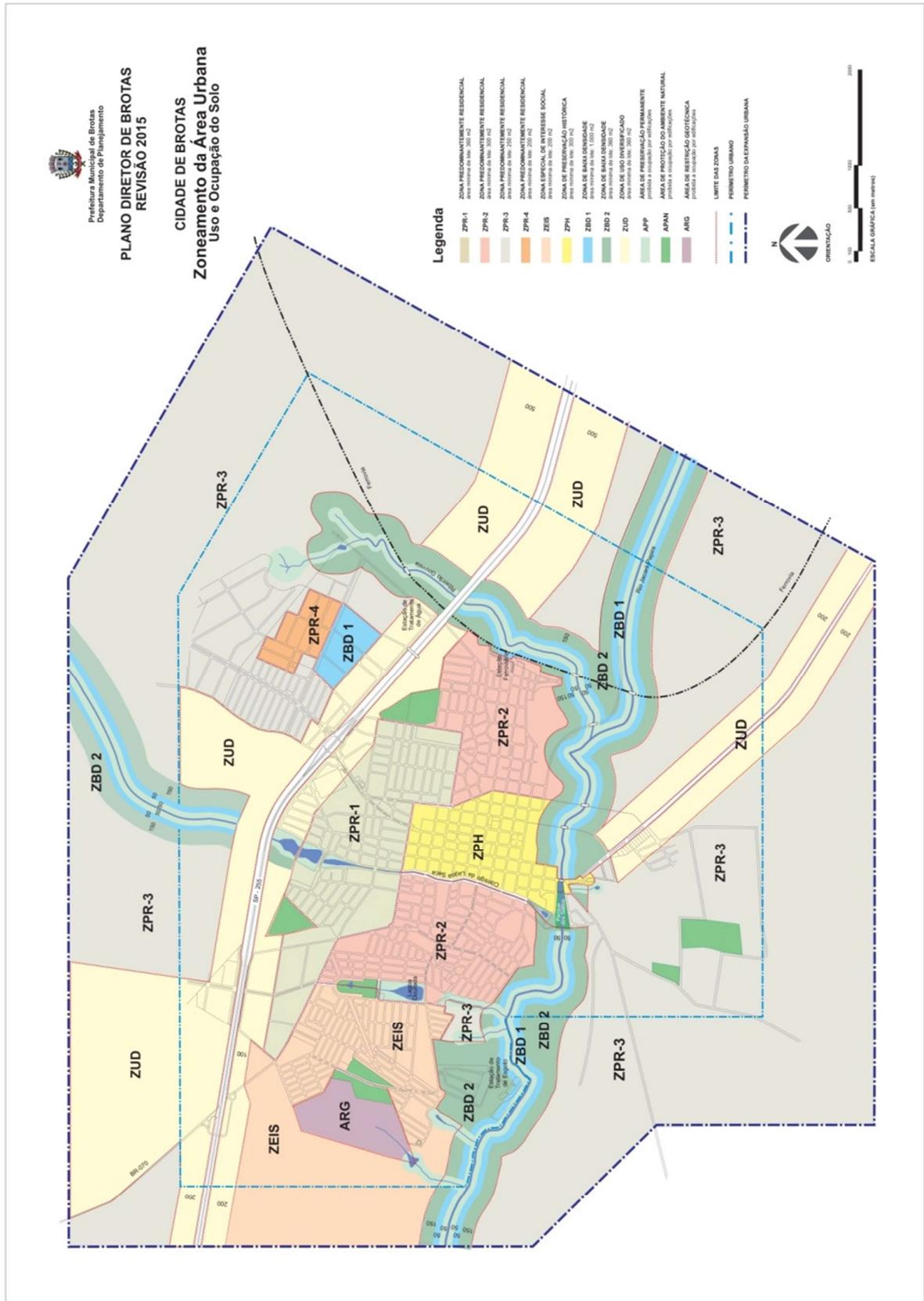
APÊNDICE III

| nº | Tipo | Longitude UTM (22K) | Latitude UTM | Profundidade* |
|----|--|---------------------|----------------|---------------|
| 1 | Colapso parcial (estabilizado) | 793821.48 m E | 7533690.94 m S | 7,20m |
| 2 | Colapso parcial (estabilizado) | 793827.23 m E | 7533675.04 m S | 5,60m |
| 3 | Colapso total (com água fluindo), poço, abismo | 793812.47 m E | 7533661.51 m S | 11,20m |
| 4 | Colapso parcial (ativo) | 793822.37 m E | 7533663.50 m S | 2,40m |
| 5 | Colapso parcial (ativo) | 793821.43 m E | 7533657.93 m S | 0,5m |
| 6 | Colapso parcial (ativo) | 793819.50 m E | 7533656.61 m S | 0,5m |
| 7 | Colapso total (ativo) | 793820.93 m E | 7533652.28 m S | 1,80m |
| 8 | Colapso total (ativo) | 793821.73 m E | 7533648.52 m S | 0,70m |
| 9 | Colapso total (ativo) | 793824.54 m E | 7533648.66 m S | 1,10m |
| 10 | Colapso total (ativo) | 793819.53 m E | 7533637.42 m S | 1,20m |
| 11 | Colapso total (ativo) - voçoroca | 793801.75 m E | 7533636.36 m S | 11,30m |
| 12 | Colapso parcial (ativo) | 793784.53 m E | 7533627.33 m S | 1,80m |
| 13 | Colapso parcial (ativo) | 793784.01 m E | 7533621.43 m S | 0,50m |
| 14 | Colapso total (ativo) - poço | 793776.76 m E | 7533609.01 m S | 8,50m |
| 15 | Feição erosiva pretérita (seca) | 793782.37 m E | 7533595.12 m S | 4,70m |
| 16 | Colapso parcial (ativo) | 793791.57 m E | 7533591.84 m S | 3,40m |
| 17 | Colapso total (ativo) – “sumidouro” | 793775.70 m E | 7533539.85 m S | 3,70m |
| 18 | Colapso parcial (ativo) | 793774.86 m E | 7533526.72 m S | 4,60m |

*medidas feitas com trena, estimando profundidade do abatimento no seu ponto mais baixo em relação ao solo não abatido. No caso das superfícies não circulares, o ponto reflete a medida em relação a borda mais elevada.

ANEXOS

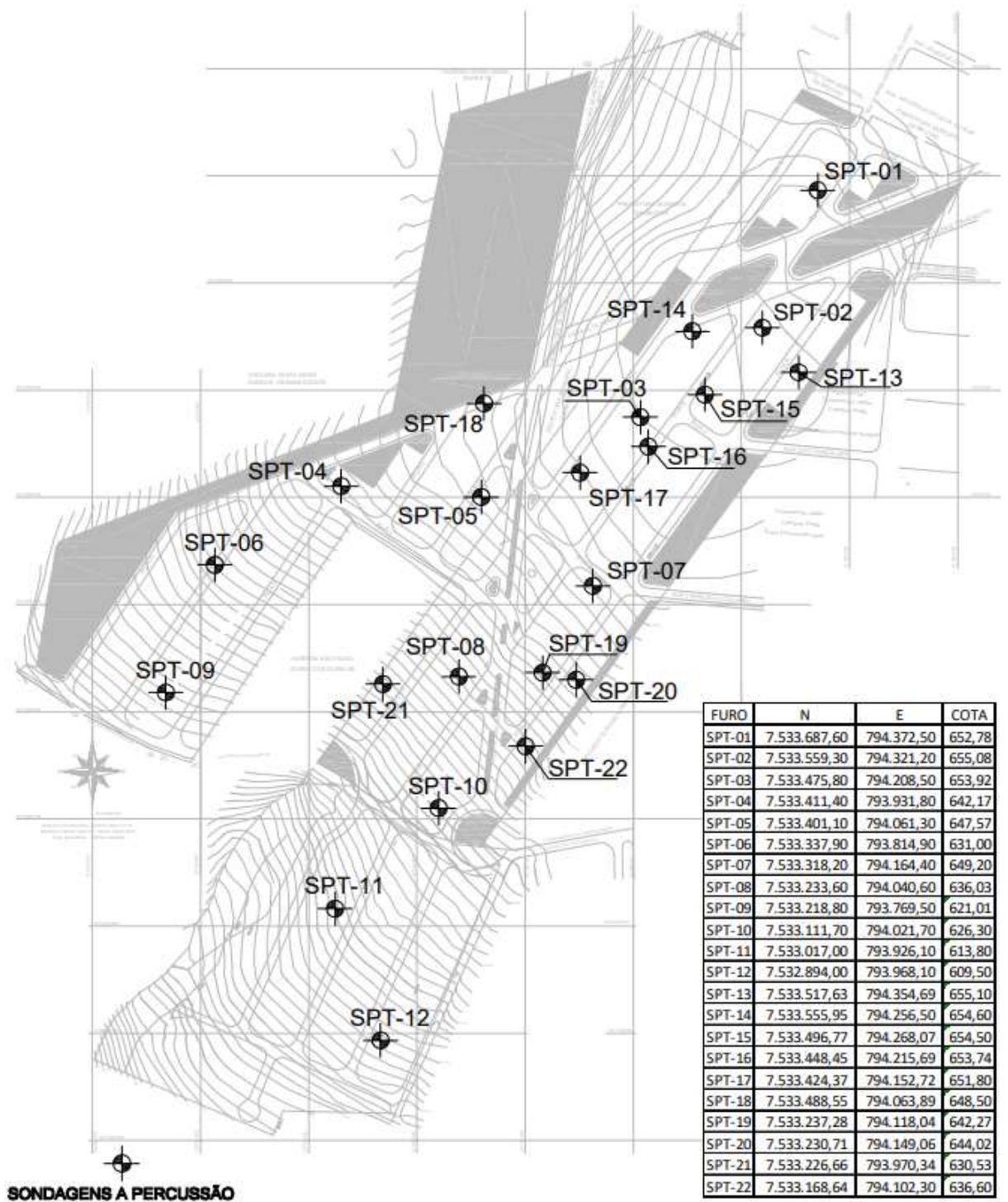
ANEXO A



ANEXO C

Localização sondagem na área do Conjunto Habitacional Santa Maria II e dados de nível d'água

| FURO | N | E | COTA (m) | NA-estático (m) | Nível Piezométrico (m) |
|--------|--------------|------------|----------|-----------------|------------------------|
| SPT-01 | 7,533,687.60 | 794,372.50 | 652.78 | 10.22 | 642.56 |
| SPT-02 | 7,533,559.30 | 794,321.20 | 655.08 | 12.7 | 642.38 |
| SPT-03 | 7,533,475.80 | 794,208.50 | 653.92 | SECO | |
| SPT-04 | 7,533,411.40 | 793,931.80 | 642.17 | SECO | |
| SPT-05 | 7,533,401.10 | 794,061.30 | 647.57 | SECO | |
| SPT-06 | 7,533,337.90 | 793,814.90 | 631 | SECO | |
| SPT-07 | 7,533,318.20 | 794,164.40 | 649.2 | SECO | |
| SPT-08 | 7,533,233.60 | 794,040.60 | 636.03 | SECO | |
| SPT-09 | 7,533,218.80 | 793,769.50 | 621 | 10.74 | 610.26 |
| SPT-10 | 7,533,111.70 | 794,021.70 | 626.3 | 11.48 | 614.82 |
| SPT-11 | 7,533,017.00 | 793,926.10 | 613.8 | 6.54 | 607.26 |
| SPT-12 | 7,532,894.00 | 793,968.10 | 609.5 | 7.1 | 602.4 |
| SPT-13 | 7,533,517.63 | 794,354.69 | 655.1 | SECO | |
| SPT-14 | 7,533,555.95 | 794,256.50 | 654.6 | SECO | |
| SPT-15 | 7,533,496.77 | 794,268.07 | 654.5 | SECO | |
| SPT-16 | 7,533,448.45 | 794,215.69 | 653.74 | SECO | |
| SPT-17 | 7,533,424.37 | 794,152.72 | 651.8 | SECO | |
| SPT-18 | 7,533,488.55 | 794,063.89 | 648.5 | SECO | |
| SPT-19 | 7,533,237.28 | 794,118.04 | 642.27 | SECO | |
| SPT-20 | 7,533,230.71 | 794,149.06 | 644.02 | SECO | |
| SPT-21 | 7,533,226.66 | 793,970.34 | 630.53 | SECO | |
| SPT-22 | 7,533,168.64 | 794,102.30 | 636.6 | SECO | |



Localização dos furos de sondagem no loteamento Santa Maria II

