

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Trabalho de formatura: 2021/23

**APLICAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS NA CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS
EROSIVOS: ESTUDO DE UMA VOÇOROCA EM ANHEMBI-SP**

Aluna: Larissa Garbelini

Orientador: Prof. Dr. Vinicius Hector Abud Louro

Coorientador: Tiago Antonelli

São Paulo

Novembro 2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão os quais sempre estiveram ao meu lado me fortalecendo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me propiciou viver com força e saúde ao lado dos que amo.

Ao meu núcleo familiar. Meus pais, Elaine e Marcos, que independente das circunstâncias sempre batalharam para promover meus estudos e estiveram ao meu lado dando suporte e incentivo incondicionais. Uma vida só é pouco para agradecer por tudo que me propiciaram viver. Ao meu irmão e parceiro de vida, Marcos Vinicius e sua companheira Mariane pela ajuda nos diversos contratemplos que vivenciei na graduação. Ao meu companheiro de todos os dias, Gustavo Gomes, por tornar tudo mais leve.

Ao professor Vinicius Louro, por aceitar me orientar, sempre com muita dedicação e parceria. Agradeço por nunca medir esforços para compartilhar conhecimento, sobretudo por depositar a confiança que depositou em mim.

Ao meu coorientador Tiago Antonelli pelo empenho e ensinamentos ao longo do ano. Agradeço a oportunidade única que foi trabalhar em conjunto neste projeto.

Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM e o Instituto de Geociências da USP – IGc - USP pelos materiais disponibilizados para a realização do presente trabalho.

Aos professores do IGCc – USP que lecionam com brilho nos olhos e inspiram seus alunos à busca incessante por conhecimento. Em especial aos professores, Paulo Giannini, Paulo Boggiani, Teodoro Isnard, Valdecir Janasi, Reginaldo Bertolo e à querida Eliane Del Lama.

Aos meus companheiros da GeoJúnior e da Seção de Materiais Didáticos pelas experiências compartilhadas. E à minha equipe do coração, USP Mining Team, pelos momentos enriquecedores que compartilhamos no Brasil, na Inglaterra e nos Estados Unidos.

Aos meus queridos, Santiago Herrera (San), Victor Mafra (Provi), João Gusão (Di), Lúcio Massari (Ri), Mário Kato (Mah) e Amanda Alves (Nini), que com muito carinho, amizade e diversão me acolheram desde o início da graduação. E aos amigos que tive o prazer de me conectar na segunda metade do ciclo universitário, Maria Luísa, Luiz Eduardo, Samara Aguiar, Mariana Goldoni, Vitor Santos, Henrique Albuquerque, Ingrid Moghrabi e tantos outros inesquecíveis que espero ter a honra de poder rever. Agradeço a experiência repleta de companheirismo que fez cada minuto desta jornada valer a pena.

E por fim, a todos que passaram pela minha vida e que direta ou indiretamente contribuíram para que esta trajetória tivesse mais alegria e significado.

EPÍGRAFE

“Se dizia daquela terra que era sonâmbula. Porque enquanto os homens dormiam, a terra se movia espaços e tempos afora. Quando despertavam, os habitantes olhavam o novo rosto da paisagem e sabiam que, naquela noite, eles tinham sido visitados pela fantasia do sonho”.

Crença dos Habitantes de Matimati (Couto, 1993)

RESUMO

Um dos processos erosivos de maior potencial de degradação ambiental, capaz de causar danos sociais e econômicos, é a erosão hídrica de estágio avançado, ou voçoroca. Ao atingir o lençol freático, as voçorocas têm sua capacidade de movimentar grandes volumes de solo intensificada. O carreamento de material erodido pode conter substâncias que, sendo depositadas em águas fluviais e lacustres, alteram a microflora e microfauna, favorecendo a poluição do ecossistema e potencializando eventos de assoreamento. Esta pesquisa caracterizou os primeiros 490 metros de uma voçoroca situada no município de Anhembi – SP, a partir de atributos morfométricos, feições erosivas e por mecanismos de formação. Para isso, foram elaborados modelos tridimensionais de alta precisão geométrica via técnica *Structure from Motion* (SfM) em imagens obtidas via Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT), análises temporais sobre imagens óticas orbitais subsidiadas por espectros de alta resolução em amostras dos solos da voçoroca, imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e InSAR (*Interferometric SAR*). A aquisição aerofotogramétrica em diferentes momentos permitiu estimar o volume de sedimentos carreados no período de estudo. O reconhecimento da erosão proporcionou informações importantes às autoridades responsáveis pelo plano de manejo da bacia hidrográfica do Médio tietê, assumindo que as usem com intuito de minimizar o impacto socioambiental e econômico causados por estas feições.

ABSTRACT

One of the erosion processes of high potential for environmental degradation, capable of causing social and economic damage, is advanced stage water erosion, or gullies. Upon reaching the water table, these gullies have their capacity to move large volumes of soil intensified. Eroded material can carry substances that, if deposited in river or lakebeds, alter their microscopic flora and fauna, favour ecosystem pollution and enhance siltation events. This research characterized the first 490 meters of a gully located at Anhembi-SP. It used morphometric attributes, erosive features, and formation mechanisms. We elaborated highly geometric precise three-dimensional models using the Structure from Motion (SfM) technique. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) supported the image acquisition, temporal analyzes on orbital optical images supported by high-resolution spectra in gully soil samples, SAR (Synthetic Aperture Radar) and InSAR (Interferometric SAR) images. The aerophotogrammetric acquisition at different times allowed us to estimate the volume of sediment carried in the study period. The recognition of erosion provided sensitive information to the authorities responsible for the management plan of the Médio Tietê hydrographic basin, assuming that they use them to minimize the socio-environmental and economic impact caused by these features.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	3
3	ÁREA DE ESTUDO.....	3
3.1	Geologia	3
3.2	Geomorfologia	5
3.3	Pedologia.....	6
3.4	Clima.....	7
3.5	Hidrografia.....	8
4	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	9
4.1	Processos erosivos	9
4.2	Sensoriamento remoto	10
4.3	Fotogrametria	12
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	14
5.1	Structure from Motion (SfM)	14
5.1.1	Classificação da estrutura erosiva.....	19
5.2	Espectroscopia de reflectância.....	20
5.3	Processamento de imagens orbitais – sensores passivos.....	21
5.4	Processamento de imagens orbitais – sensores ativos.....	22
5.4.1	Dados SAR	23
5.4.2	Dados InSAR	24
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
6.1	Caracterização quanto ao tipo e a forma.....	25
6.2	Caracterização quanto ao tamanho	28
6.3	Morfometria	30
6.1	Caracterização das feições erosivas no interior da voçoroca	33
6.2	Evolução temporal	42
6.2.1	Análise dos espectros de amostras	42
6.2.2	Análise dos dados TM e OLI	43
6.2.3	Análise dos dados Sar.....	45
6.2.4	Análise dos dados InSar.....	45
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A extensão compreendida pela Bacia Hidrográfica dos rios Sorocaba e Médio Tietê (SP) é, historicamente, umas das que mais sofre com eventos erosivos. Estes processos ocorrem principalmente no trecho compreendido pela sub-bacia do Tietê Inferior, onde está situado o município de Anhembi. Segundo IPT (2012), este município, inserido na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos rios Sorocaba e Médio Tietê - UGHRI 10 (CBH-SMT, 2019), está cadastrado com mais de 250 focos de erosões na bacia. Estes focos culminam em inseguranças nos sistemas hídricos instalados no referido domínio hidrográfico (e.g. Reservatório de Barra Bonita, a 50 km a noroeste da área de estudo). O Reservatório de Barra Bonita é utilizado para geração de energia, transporte fluvial (Hidrovia Tietê-Paraná), irrigação, turismo, lazer, pesca, abastecimento urbano, entre outros. Embora esteja compreendido em uma bacia alvo de diversos estudos (Teixeira, 2007), necessita de análises mais aprofundadas para subsidiar de modo confiável a previsão da vida útil do reservatório.

Posto isto, este trabalho foca no trecho inicial (primeiros 490 metros) de uma voçoroca de cerca de 2 Km, adjacente à rodovia SP - 147, no município de Anhembi - SP (Fig. 1), por meio de sensoriamento remoto aéreo e orbital. A seleção desta feição se deve a sua dimensão, umas das mais significativas da região, e conexão direta com afluentes de ordem inferior da Bacia Hidrográfica do Médio Tietê. Esta conexão pode permitir que sedimentos carreados pela voçoroca impactem a jusante e assoreiem os afluentes do Rio Tietê, afetando os reservatórios como o de Barra Bonita. Além disso, sua proximidade com a rodovia SP-147 (menos de 30 metros) pode interferir em sua estrutura e estabilidade.

Muitas pesquisas investigam processos erosivos de estágio avançado. Ainda assim, é necessário compreender os fatores de influência e suas interações em escalas espaciais e temporais (Poesen, 2018). Segundo o autor, compreender suas taxas e impactos *in* e *ex-situ*, através da quantificação e caracterização detalhada e veloz, é essencial para a avaliação dos riscos associados a processos erosivos. Assim, o monitoramento e caracterização de eventos (hidro)geológicos utilizando Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs), associados à técnica de *Structure from Motion* (SfM), vêm avançando de forma notável (Garritano et al., 2019; Rademann, 2019; Turner et al., 2015; Warrick et al., 2016). O sucesso destas técnicas se deve ao baixo custo e elevada velocidade de aquisição de imagens aéreas de alta resolução, sobretudo em locais de difícil acesso (Garritano et al., 2019).

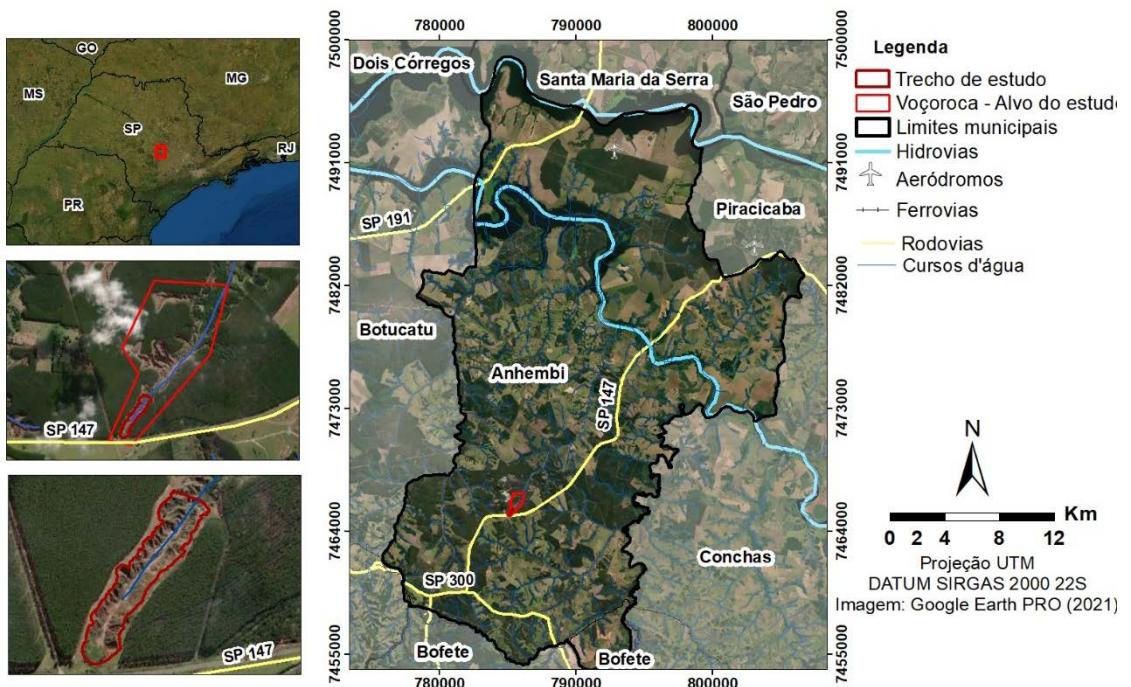


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, com detalhe sobre a voçoroca e o trecho analisado.

O detalhamento de processos modificadores é imprescindível à preservação dos solos e ao dimensionamento dos impactos fomentados pelo mau uso e ocupação do espaço físico natural. A pedosfera (solo) influencia e é influenciada por outros compartimentos do sistema terrestre — biosfera, hidrosfera, litosfera e atmosfera. Mesmo assim, a primeira avaliação global de solos indicou que cerca de 33% do solo no mundo estava moderado a altamente degradado até 2015, com tendências de intenso agravamento futuro (FAO e ITPS, 2015). A degradação é causada principalmente por processos erosivos, sobretudo hídricos, gerando prejuízos à produção e segurança alimentar.

O processo erosivo apresenta também relações com mudanças climáticas, dada a mobilização de grandes quantidades de carbono orgânico do solo. Pode causar impactos na ecologia de rios, lagos e cursos d'água, aumento da poluição por agroquímicos presentes nos solos carreados e assoreamento de rios (FAO e ITPS, 2015). Estes últimos tratam-se da acumulação de sedimentos em reservatórios hídricos, podendo atingir grandes dimensões e de remediamento complexo (Carvalho et al., 2000). A vida útil de um reservatório é o tempo que ele leva para ser assoreado, de modo a não se desenvolver como em seu planejamento inicial. Nesta conjuntura, de acordo com ZEE/IEPA (2008) (apud Santos et al., 2015), a avaliação da vulnerabilidade natural à erosão do solo é um indicador da capacidade de sustentação natural dos ecossistemas. Esta avaliação auxilia a previsão de riscos que impliquem em transformações às condições primárias dos solos, propiciando o planejamento de reservatórios hídricos e atendimento adequado às necessidades da população local.

A deterioração dos sistemas terrestres e seus impactos levaram órgãos ambientais mundiais a ressaltarem a necessidade do manejo sustentável do solo, através do conhecimento científico e tecnológico para preservar o solo do planeta, até mesmo em locais inacessíveis (Lepsch, 2002; FAO e ITPS, 2015). Em vista disso, o uso de VANTs associados à técnica de SfM, é uma opção plausível no estudo de voçorocas.

2 OBJETIVO

Este trabalho teve como objetivo compreender a dinâmica evolutiva e os fatores que condicionam espacialmente uma voçoroca no município de Anhembi (SP; Fig. 1). Neste contexto, caracterizou geomorfologicamente os primeiros 490 metros dessa estrutura, analisando a distribuição e características dos mecanismos de erosão atuantes em seu interior. Foram utilizadas geotecnologias, essencialmente por via remota e de elevada acurácia, promovendo subsídios para pesquisas no restante da feição e na Bacia Hidrográfica do Médio Tietê. Os resultados apresentados dão recursos para que órgãos competentes atuem com medidas de contenção específicas para cada mecanismo erosivo reconhecido.

Para entender a dinâmica da voçoroca, foram realizadas análises de feições erosivas, considerando suas configurações espaciais e influência na configuração e evolução da feição; classificações morfométricas e tipológicas, de acordo com os parâmetros pré-existentes; quantificação de volume erodido, a fim de subsidiar estudos sobre impactos do transporte e deposição de sedimentos no Ribeirão dos Remédios; identificação de condições para o surgimento e evolução temporal da voçoroca.

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 *Geologia*

A área de estudo é localizada no município de Anhembi, próxima às Cuestas Basálticas da Bacia do Paraná. A bacia intracratônica cobre aproximadamente 1,5 milhão de km², com formato ovalado e alongado na direção N-S (Milani et al., 2007). Contém limites erosivos provenientes, predominantemente, de fenômenos geotectônicos meso-cenozóicos, indicando a existência de um depósito originalmente maior. Essa bacia registra uma alternância de fases de acumulação sedimentar e erosão representadas por seis supersequências delimitadas por discordâncias regionais (Milani et al., 2007). São elas as supersequências Rio Avaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano) e Gondwana I (Carbonífero-Eotriássico), de ciclos regressivos e transgressivos paleozóicos; Gondwana II (Triássico), Gondwana III (Neojurássico-Eocretáceo) e Bauru (Neocretáceo) são unidades mesozoicas continentais com associação de rochas ígneas.

Fulfaro et al. (1982 apud Araújo, 2003) descrevem a transição do Permiano ao Triássico como uma mudança do nível de base regional. Essa mudança deveu-se ao soerguimento dos Andes Meridionais e à tectônica positiva do assoalho da Bacia do Paraná. Neste interim, um mar raso (Teresina/Corumbataí) foi ocupado por dunas litorâneas (Pirambóia) e, posteriormente, por dunas de deserto continental (Botucatu).

No município de estudo está presente o Alto Estrutural de Anhembi, caracterizado por uma janela estratigráfica que aflora rochas da Formação Teresina no centro (Permiano) em meio à Formação Pirambóia (Triássico; Fig. 2; Araújo, 2003). No município, os contatos entre as formações Pirambóia e Teresina variam da cota de 460 m até 545 m. A Formação Teresina é composta por siltitos de diferentes colorações, desde cinza amarelados, avermelhados e verde, com camadas tabulares de espessuras de até 2m com estratificações plano-paralelas e cruzadas. Já a Formação Pirambóia (Grupo São Bento) é constituída de arenitos médios e finos em sequências de estratificações cruzadas métricas de grande porte, variando de brancos, cinzas, amarelados e avermelhados.

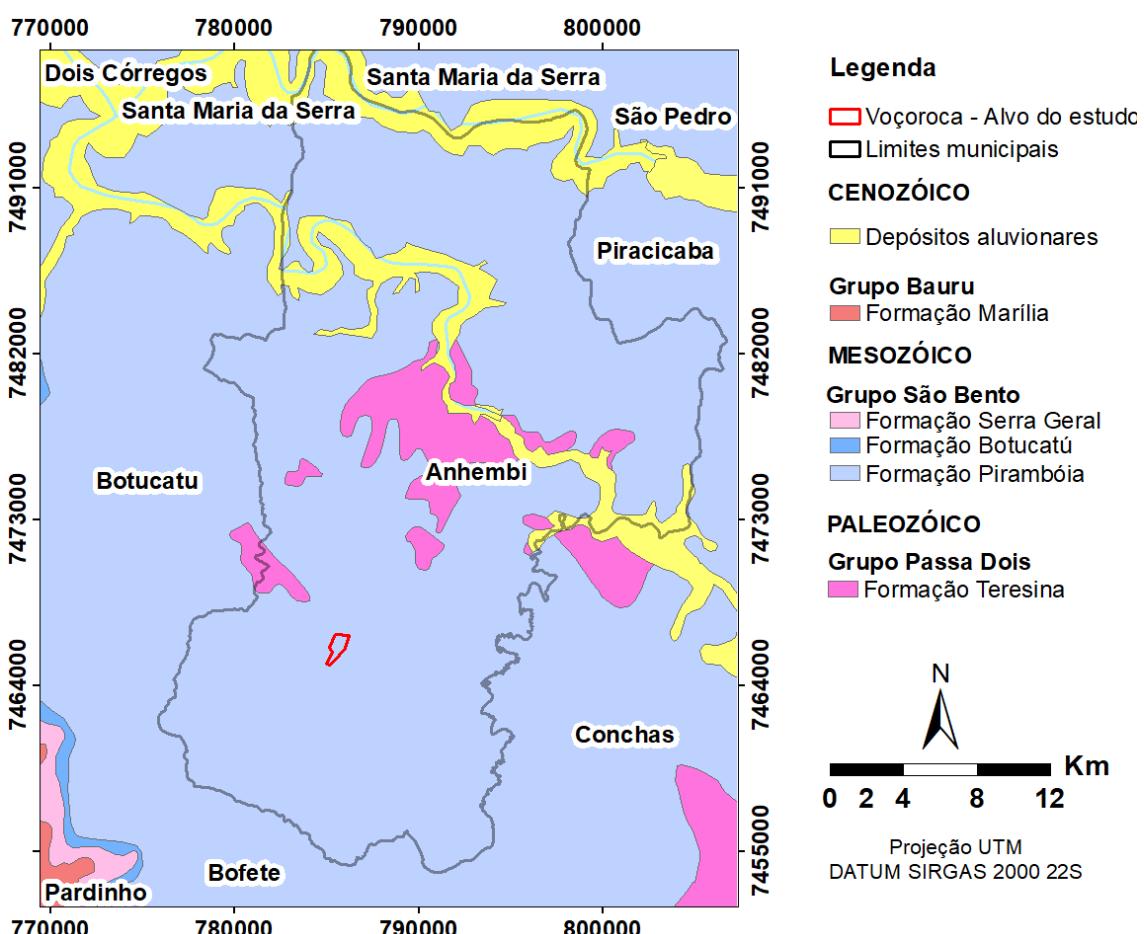


Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo (adaptado de CPRM, 2019).

Na região estudada, a Formação Pirambóia é constituída por deposição eólica e aquosa na sua base e domínio eólico de deposição em condições mais áridas para o topo (Araújo,

2003). Segundo Trentin et al. (2015), arenitos eólicos desta formação são suscetíveis a processos erosivos acelerados, que geram ravinas e voçorocas. No interior da voçoroca é possível identificar o afloramento de um litotipo a partir da cota de 549 metros (Fig. 3), mesma elevação em que os arenitos da Formação Pirambóia são descritos na região (Araújo, 2003). O afloramento na base das encostas predomina na mais baixa vertente do trecho estudado, onde as características erosivas se modificam devido à presença deste litotipo.

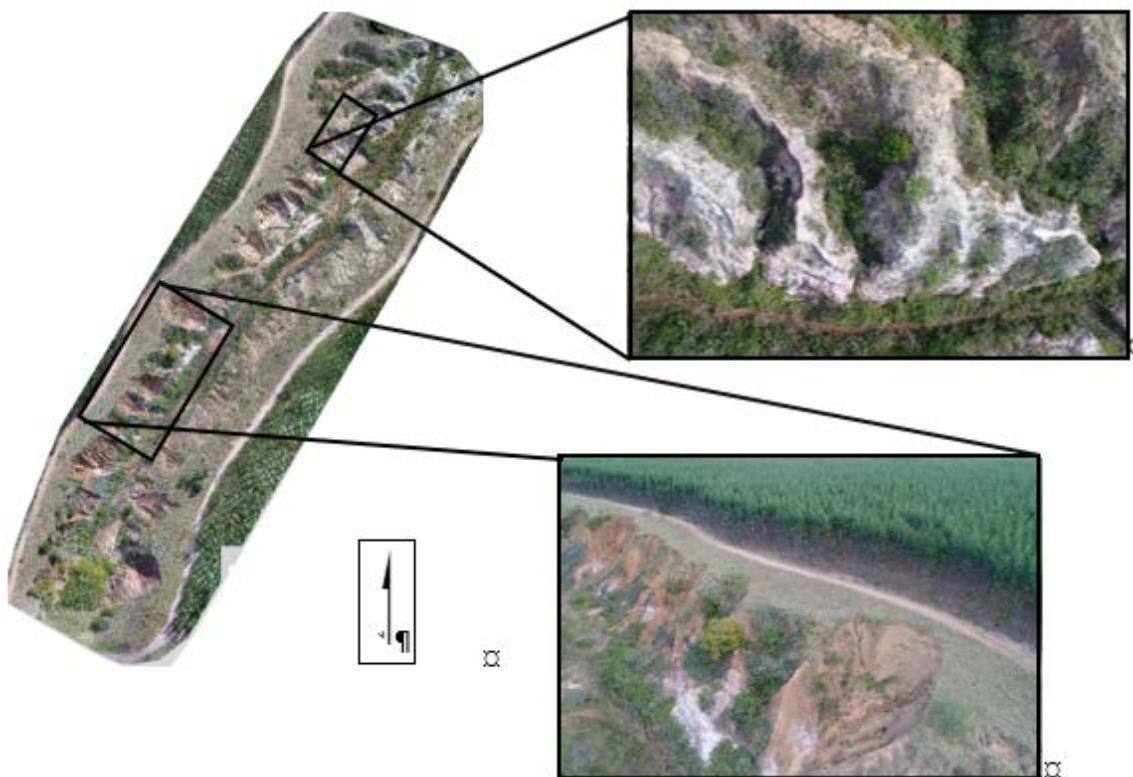


Figura 3 – a) Litotipo aflorante em na mais baixa vertente do trecho de estudo; b) Litotipo aflorante na base do solo na vertente oeste da voçoroca.

3.2 Geomorfologia

A área de estudo está situada na Depressão Periférica Paulista, na Zona do Médio Tietê, cujas formas de relevo predominantes são degradações de Morros Baixos, Baixos Platôs Dissecados e Colinas (CPRM, 2019). A região está inserida no contexto morfológico de Morros Baixos (Fig. 4), de moderada a alta suscetibilidade à erosão, amplitudes de 50 a 120 metros e inclinações de vertentes convexas - côncavo entre 5° e 20° (Dantas, 2016). Localmente a voçoroca se configura em um terreno com declividades majoritariamente inferiores a 6%.

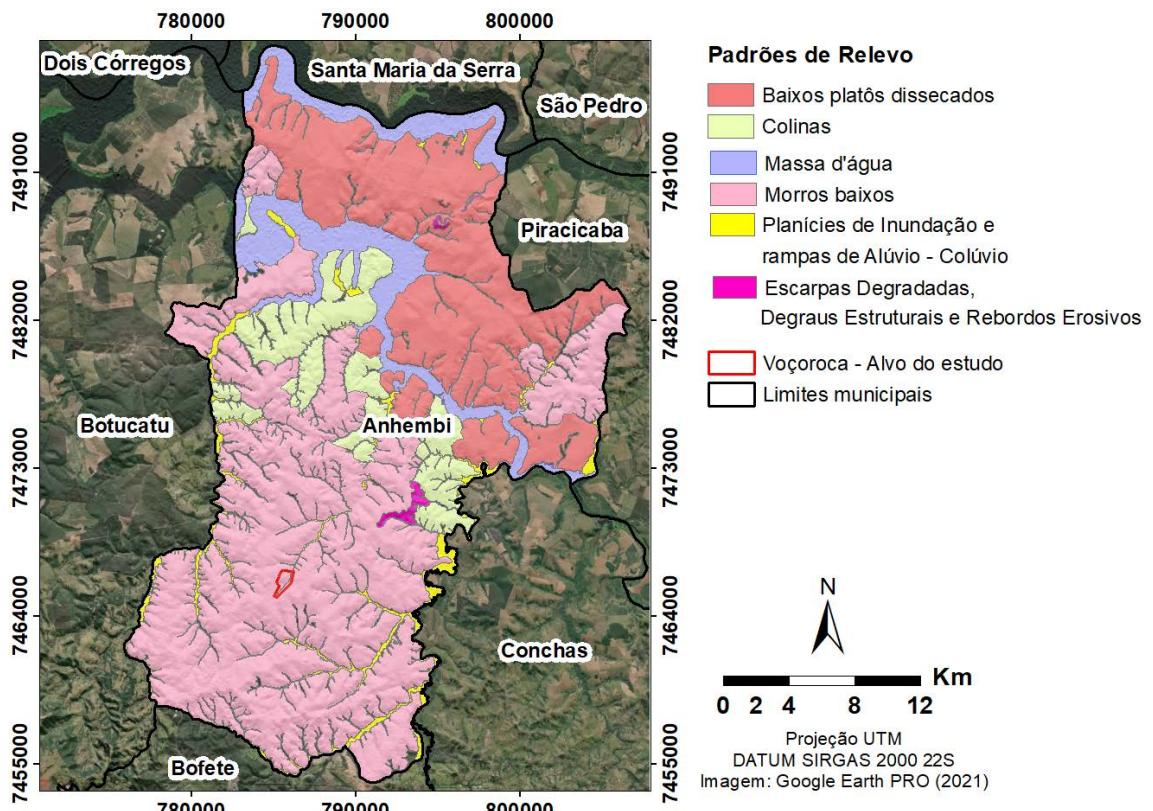


Figura 4 – Mapa geomorfológico da área de estudo (adaptado de CPRM, 2019).

3.3 Pedologia

De acordo com Rossi (2017), o Município de Anhembi é composto majoritariamente por Argissolos Vermelho-Amarelos seguido por Latossolos Vermelho-Amarelos e em menor proporção por Neossolos Quartzrenicos e Gleissolos Háplicos. A associação comum se refere ao Argissolo Vermelho-Amarelo Abrúptico com textura arenosa/média + Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa/média e média, ambos distróficos, com A moderado, e em fase relevo ondulado. Estes Argissolos abrupcitos apresentam um gradiente textural em função do aumento de argila do horizonte superficial A para o subsuperficial B textural (Bt), dificultando a infiltração de água no solo e tornando-o suscetível à erosão (EMBRAPA, 2006).

Os latossolos representam a segunda maior ocorrência no município, especialmente os Latossolos Vermelho-Amarelos, com associação Latossolo Vermelho-Amarelo/Vermelho, distróficos típicos, com A moderado ou fraco, de textura média, álico ou não álico, e em fase relevo suave ondulado e ondulado. Esses solos compreendem perfis muito intemperizados e lixiviados (Rossi, 2017).

Considerando a cor como parâmetro de referência na análise de solos, localmente, o trecho estudado no interior da voçoroca apresenta uma mudança gradual de cor, lateral e em profundidade nos horizontes, gradando do vermelho-amarelo na alta vertente, predominantemente na margem oeste, até o bruno claro-acinzentado na mais baixa vertente

com predomínio na margem leste. A textura dos solos na erosão acompanha a variação de cor descrita, sendo os solos mais avermelhados detentores da textura média/argilosa, enquanto os bruno claro-acinzentados com textura arenosa. Neste sentido, seguindo Oliveira et. al. (2020), considerou-se a ocorrência de transição lateral entre solos similares a Argissolos Vermelho-Amarelos para Neossolos Quartzarênicos na voçoroca estudada.

Embora a presença dos Neossolos Quartzrênicos na paisagem tenha sido representada em menor proporção na região de Anhembi, Rossi (2017) os descreve como Órtico típico, de A moderado, álico e em fase relevo ondulado. Os Neossolos Quartzarênicos são constituídos por sequência de horizontes A-C, sem contato lítico até 50 cm de profundidade. Em maiores profundidades podem apresentar textura areia ou areia franca em seus horizontes até, no mínimo, 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. O conteúdo de quartzo predomina em sua constituição, e baixo teor de minerais alteráveis. Esses solos apresentam baixa capacidade de retenção se água, baixa fertilidade natural, alta decomposição de matéria orgânica, baixa troca catiônica, com estrutura pouco coesa e geralmente de grãos simples. Essas características promovem uma elevada suscetibilidade aos processos erosivos, essencialmente quando seu uso se dá sem a aplicação de práticas de conservação (EMBRAPA, 2018; Castro e Hernani (2015) apud Oliveira et al., 2020). Uma das hipóteses de suas gênese é o espessamento do horizonte eluvial dos argissolos (Gasparetto et al., 2001 apud Oliveira et al., 2020), bem como de uma origem atrelada aos depósitos coluvionares.

Tal sistema pedológico Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarêntico, bem como o afloramento lítico em algumas áreas da voçoroca, conferem erosão diferencial que promove diferenças na fisiografia de cada uma das margens. Essas variações se expressam no grau de entalhamento e ramificação. Na área, os solos avermelhados apresentam maior dissecação, enquanto os solos esbranquiçados são mais suaves (Fig. 3). Onde há afloramento rochoso inicia a ramificação da erosão e delimitação mais evidente do curso d'água.

3.4 Clima

Na classificação de Köppen, cada tipo de clima pode apresentar até três letras, que significam, da primeira para a terceira: (1) a característica geral do clima da região, representadas pelas letras maiúsculas; (2) as particularidades da precipitação da região; e (3) a temperatura média. A letra “C” indica temperaturas do mês mais frio menores que 18°C. A cifra “f” sinaliza clima húmido com precipitação em todos os meses do ano, enquanto a letra “a” indica que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C. No caso da letra “b” ao final, a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C. Segundo esta

classificação, o local em estudo está inserido em um tipo climático *Cfa*, de clima oceânico sem estação seca, com verão quente de temperatura média superior a 18°C (Álvares, 2013).

As precipitações médias mensais foram estimadas a partir de uma série histórica de 1977 a 2006 da estação meteorológica experimental de Anhembi e de séries de 1931-1960, 1961-1990 e 1981-2010 da estação de Avaré – SP, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). Os dados corroboram com a classificação de Köppen para o local de estudo, indicando precipitação ao longo do ano, com período de maior precipitação de setembro a abril e o de menor de maio a agosto.

3.5 *Hidrografia*

A área de interesse está inserida no contexto hidrográfico-político da Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos 10 (UGRHI 10) do estado de São Paulo. A Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI 10) é dividida nas sub-bacias Baixo Médio Tietê, Médio Tietê Médio, Baixo Sorocaba, Médio Sorocaba, Alto Médio Tietê e Alto Sorocaba. Esta bacia está localizada no centro-sudeste do estado de São Paulo, contribuindo com o desenvolvimento de 34 municípios.

Segundo o relatório de situação da UGRHI-10 (CBH-SMT, 2019), as sub-bacias do Baixo Médio Tietê e Alto Médio Tietê e a porção sul da sub-bacia do Baixo Sorocaba apresentam as áreas mais expostas às erosões. A sub-bacia do Baixo Médio Tietê é a que apresenta a menor quantidade de barramentos, tendo a represa de Barra Bonita como responsável pelo transporte da hidrovia Tietê-Paraná. Nesta sub-bacia se situam as maiores áreas de pastagem da UGRHI-10. Estas sofrem com o pisoteamento do gado e a falta de cobertura vegetal, causando aumento da susceptibilidade à erosão.

O mesmo relatório indica que o município alvo deste estudo se enquadra em nível de alta criticidade à erosão. As principais áreas de proteção da UGRHI-10 estão próximas a municípios de maiores índices de criticidade, culminando em esforços de reflorestamento a fim de minimizar os danos. A voçoroca estudada possui em seu leito a nascente do Ribeirão dos Remédios, curso hídrico afluente do Rio Tietê com padrão de drenagem subdendrítico e controle estrutural mais evidenciado nas proximidades com o alto estrutural de Anhembi.

4 EMBASAMENTO TEÓRICO

4.1 Processos erosivos

Processos erosivos se referem à remoção de horizontes superiores do solo ocasionada por agentes naturais ou antrópicos, de natureza física ou química. Os agentes mais comuns são a água e o vento, que dependendo de fatores do meio, propiciam desagregação, transporte e deposição de partículas de solo. Estes fenômenos causados pela água, vento e meio definem as fases da dinâmica erosiva (Lepsch, 2002; Guerra, 2007; Araújo et al., 2008). Esses autores expõem as erosões hídricas como as de maior predominância no Brasil, bem como as de maior potencial de degradação do solo.

As voçorocas representam o estágio mais avançado de erosão. Diferentemente das ravinas, elas detêm alta complexidade de recuperação. Essas feições são caracterizadas por fundos planos e paredes verticais, atingindo longas extensões e profundidade. Ao alcançarem o Horizonte C do solo ou o lençol freático, potencializam suas capacidades de carrear grandes volumes de sedimentos (Lepsch, 2002). Esses eventos podem ter caráter subsuperficial, com formação atrelada à dissolução de minerais, devido às características intrínsecas ao material, e ao regime hídrico, formando dutos que levam ao colapso do teto da feição (Guerra e Botelho, 1996).

O voçorocamento superficial pode ocorrer tanto em áreas urbanas quanto em rurais. Segundo Morgan (2005), as condições que mais favorecem a erosão estão atreladas ao regime pluviométrico e ao uso do solo. O autor destaca o desmatamento, queimadas, superpastoreio e atividades agrícolas em áreas rurais como causas. Em relação ao meio urbano, Guerra e Botelho (1996) evidenciam a construção civil, o desmatamento, e cortes de taludes como os principais propulsores. Já os fatores naturais estão atrelados ao clima, natureza do solo e declividade do terreno (Lepsch, 2002).

A evolução das voçorocas é resultante da sinergia de diferentes mecanismos (sub)superfície (Oliveira, 2007). Porém, considerando que os mecanismos que resultam na erosão avançada são raramente observados no momento em que ocorrem, a identificação de feições erosivas presentes na voçoroca se mostra fundamental em sua caracterização. Essas feições denunciam seus mecanismos formadores e, consequentemente, auxiliam no dimensionamento das medidas de mitigação (DAEE/IPT, 1989 apud Oliveira, 2007).

Oliveira (2007), menciona os seguintes mecanismos como atuantes nos processos erosivos de estágio avançado:

- Erosão por salpico (splash erosion) e a compactação da superfície do terreno através da remobilização de silte e argila;

- O transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial difuso;
- O transporte de partículas por fluxo concentrado;
- A erosão por queda d'água (*plunge pool erosion*);
- O solapamento da base de taludes;
- A liquefação de materiais do solo;
- Movimentos de massa;
- O arraste de partículas por percolação;
- O arraste de partículas por fluxo concentrado em túneis ou dutos.

As feições erosivas comumente encontradas em voçorocas são: pedestais (*demoiselles*), crostas, filetes subverticais, alcovas, pináculos, sulcos e ravinas, dutos de convergência (*piping*), caneluras, marmitas ou panelas (*plunging pool*), quedas de areia, quedas de torrões, costelas e depressões, fendas, movimentos de massa, poças de ressurgência, entre outras. Todas representam diferentes graus de atividade e de evolução erosiva.

4.2 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é uma ciência utilizada para a observação da superfície terrestre, permitindo a aquisição de dados por meio do registro da interação da radiação eletromagnética (REM) com objetos, sem que haja contato físico entre sensor e alvo (Meneses e Almeida, 2019). A REM possui natureza dual, uma vez que se propaga na forma de onda e energia. Maxwell, a partir do modelo ondulatório, formalizou a radiação eletromagnética (REM) como uma onda eletromagnética que viaja no espaço vazio à velocidade de luz, sendo a distância entre dois picos sucessivos da onda, o seu comprimento de onda e, o número de picos que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo, sua frequência. Em 1901, através das observações de Planck, surgiu o modelo corpuscular que a transferência de energia da onda eletromagnética ocorre como o deslocamento de pequenas partículas sem massa, os fótons, quando da interação da onda com a superfície dos materiais (Meneses e Almeida, 2019).

Na dualidade da natureza da radiação eletromagnética, onda e energia são matematicamente expressas por (Meneses e Almeida, 2019):

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{modelo ondulatório; Eq. 1})$$

$$E_{\text{fóton}} = fh \quad \text{ou} \quad E_{\text{fóton}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{modelo corpuscular; Eq. 2})$$

Em que:

$$c = \text{velocidade da luz} \left(299.792.458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right);$$

$$h = \text{constante de Planck} (6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s} \text{ ou } 4,14 \times 10^{-15} \text{ eV.s});$$

$$f = \text{frequência};$$

$$E_{\text{fóton}} = \text{energia adquirida por um elétron ao ser acelerado.}$$

A partir do modelo corpuscular, tem-se que o comprimento de onda e sua energia são inversamente proporcionais, ou seja, pequenos comprimentos de onda resultam em mais energia ao fóton, evidenciando as características corpusculares da luz (Meneses e Almeida, 2019). Quando a REM incide sobre um objeto, dependendo do comprimento de onda e de características do material, parte da REM é absorvida ou transmitida e outra refletida, definindo a reflectância espectral. A Reflectância relaciona a amplitude da onda refletida com a da incidente sobre uma dada superfície (Madeira Netto e Baptista, 2000).

O Sol é uma fonte emissora de REM em todos os comprimentos de onda. Já a Terra, nas condições normais de temperatura e pressão e, consequentemente, acima do zero absoluto (-273°C ou 0K), emite REM predominantemente no infravermelho termal. Sensores ópticos, ou passivos, como câmeras fotográficas e de vídeo, scanners multiespectrais e sistemas de varredura orbitais operam predominantemente em comprimentos de ondas entre 450 nm e 14 µm (entre o visível e o infravermelho termal; Fig. 5; Meneses e Almeida, 2019; Florenzano, 2007).

Já sensores ativos independem da luz solar, emitindo e captando a REM refletida. Utilizam a REM em comprimentos de onda muito maiores, micro-ondas, que os sensores passivos. As micro-ondas não interagem com as partículas de gases da atmosfera, permitindo observações da superfície terrestre mesmo com cobertura total de nuvens. A exemplo dos sensores ativos, tem-se: RADAR, LiDAR, e SONAR, etc. (Florenzano, 2007).

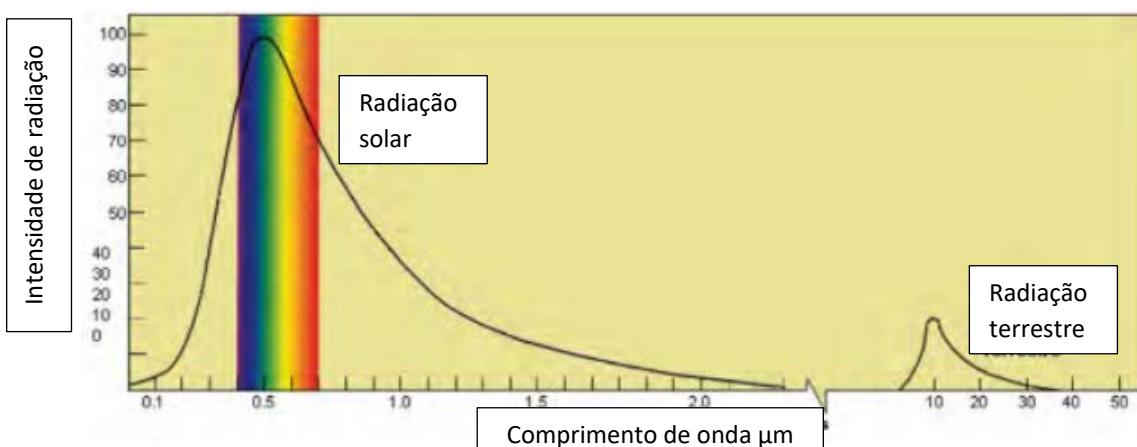


Figura 5 – Distribuição da intensidade da energia emitida pelas fontes naturais de radiação eletromagnética, medidas no topo da atmosfera. Barras indicam a região de comprimento de onda de máxima emitância.

A REM de menores comprimentos de onda (típica em sensores passivos) são eficazes ao discriminar composições de materiais, visto que interagem em nível atômico com suas partes constituintes. Na diferenciação morfológica, maiores comprimentos de onda (fontes artificiais) mostram-se mais aplicáveis ao interagirem com propriedades físicas em macroescala como a constante dielétrica (Meneses e Almeida, 2019).

Radares apresentam um fluxo de trabalho baseado na transmissão de um pulso de radiação por uma antena em direção ao solo. Ao atingir o solo, o pulso se espalha em todas as direções, o retro-espalhamento, do qual uma parte retorna na direção do radar. A antena capta o sinal retroespelhado, registrando sua amplitude, fase, polarização e tempo de retorno. Com isso, os sinais registrados são processados de modo a formar uma imagem da superfície estudada (Nievinsk, 2004).

Dados de sensores ativos, como SAR (Synthetic Aperture Radar), possibilitam a aquisição de imagens bidimensionais independente da luz do dia sem influência direta da atmosfera e da cobertura de nuvens, favorecendo a análise temporal da paisagem de modo a contribuir para o desenvolvimento de estudos de classificação do uso e ocupação do solo e de movimentos gravitacionais de massa (Barbosa et al. 2021).

Os sensores ativos também permitem o uso da Interferometria SAR (InSAR). A interferometria mede distâncias através da diferença de fase entre duas ondas eletromagnéticas, ocasionada pela distância percorrida por cada onda. As diferenças na distância percorrida pela REM entre o sensor ativo e a superfície podem ser processadas de modo a obter elevações (modo estático) ou de deslocamento (modo dinâmico). O primeiro registro de aplicação de INSAR foi em 1974 para mapeamento topográfico, mas somente em 1990, com o satélite europeu ERS-1, que novos e diversificados estudos foram publicados, focando em subsidência do solo e deslizamento de terras (Nievinsk, 2004).

Os sensores tanto passivos quanto ativos podem ser acoplados em diversas plataformas de aquisição, como em satélites orbitais, aviões, VANTs e aparelhos terrestres.

4.3 Fotogrametria

A fotogrametria digital, desenvolvida no final dos anos 1980 com a evolução e automação de câmeras e scanners, faz uso do sensoriamento remoto para a aquisição de grandes quantidades de dados, em alta velocidade e locais inacessíveis (Coelho e Brito, 2007). Fundamentada no fenômeno da estereoscopia, a fotogrametria permite a reconstrução de uma cena tridimensional por meio do conjunto de imagens digitais bidimensionais. Permite também a visualização tridimensional de cenas a partir de imagens com sobreposição lateral mínima de 60% e longitudinal de 30% (Coelho e Brito, 2007).

Structure from Motion (SfM) é uma técnica de imageamento de uma cena tridimensional de alta precisão, a partir de imagens em duas dimensões adquiridas de forma simples por um sensor em movimento. Uma vantagem deste método em relação a fotogrametria tradicional, é que pontos considerados de baixa precisão são automaticamente rejeitados por um algoritmo de inversão, proporcionando resultados mais precisos (Snavely et al., 2006; Bistacchi et al., 2015 apud Viana et al., 2018). Sobretudo, a SfM é capaz de extrair a informação de posição sem necessidade de calibração precisa ou conhecimento prévios da ótica e geometria da câmera, diferenciando ainda mais da fotogrametria digital tradicional (Westoby et al., 2012). Seu processamento é realizado pelo reconhecimento de pontos em comum entre as imagens do conjunto e o cálculo da posição x, y, z de cada ponto, pela construção de uma nuvem de pontos esparsos, pelo refinamento do modelo e geração de uma nuvem de pontos densa. Uma cena é reconstruída digitalmente quando é observada por pelo menos três imagens, sendo este número uma função do tamanho do alvo e da quantidade de sobreposição ajustada.

A iluminação de uma cena interfere nos resultados obtidos com a fotogrametria digital, de modo que a correspondência de pontos pode ser afetada com distorções no modelo 3D. O brilho de superfícies reflexivas, contrastes, sombras e mudanças de albedo de superfície colaboram para tais resultados negativos (Bemis et al., 2014 apud Viana et al., 2018). O modelo tridimensional apresentará maior precisão quanto maior for a sobreposição e consequentemente maior for o número de imagens adquiridas do alvo. O que resulta em produtos de alta densidade de dados, exigindo com isso maior capacidade computacional, dificultando o pós-processamento dos resultados (Viana et al., 2018).

A SfM gera uma um produto dentro de um sistema de referência relativo (Westoby et al., 2012), para se obter dados com informações métricas é necessário realizar imageamento georreferenciado pelo geolocalizador da câmera ou por pontos de controle em solo. Para o georreferenciamento são necessários pelo menos três pontos de controle de solo (*Ground Control Points* - GCPs) adquiridos no terreno estudado por meio de equipamentos GNSS de alta precisão. Os pontos devem ser distribuídos na cena, evitando configuração linear (Viana et al., 2018). Iria (2019) conclui que há uma diferença de até 1,24% na volumetria em levantamentos que não fazem uso de pontos de controles adquiridos em solo, entretanto diminui em 8 horas o trabalho de campo e em aproximadamente 50% do tempo de processamento. Com isso, faz-se necessário a averiguação caso a caso da necessidade de se utilizar os GCPs.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foram utilizados produtos de sensores ativos, imagens de Radar de Abertura Sintética do SENTINEL 1. Bem como de sensores passivos, imagens de câmera de sensor Thematic Mapper (TM) embarcado no Satélite LANDSAT 5 e do Operational Land Imager (OLI) no LANDSAT 8, e para resultados mais precisos e detalhados, imagens de câmera fotográfica digital embarcada em VANT, modelo DJI Phantom 4 Pro disponibilizado pela Divisão de Geologia Aplicada – DIGEAP do Serviço Geológico do Brasil/CPRM.

Para trabalhar com os produtos gerados pelas imagens adquiridas no aerolevantamento foi utilizada a técnica de fotogrametria digital *Structure from Motion* (SfM), e para subsidiar os dados do sensoriamento remoto orbital foram utilizadas as técnicas de espectrometria de reflectância, InSAR, razões de bandas e Análise de Componentes Principais (ACP).

5.1 Structure from Motion (SfM)

A caracterização morfológica e morfométrica do trecho da voçoroca estudada foi realizada a partir do processamento de imagens adquiridas pelo VANT DJI Phantom 4 Pro equipado com câmera de 20 megapixels. Seus produtos foram georreferenciados com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Trimble 5700 L1 do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Os produtos geoespaciais foram obtidos a partir da técnica de fotogrametria digital Structure from Motion (SfM) no software Pix4D (Fig. 6).

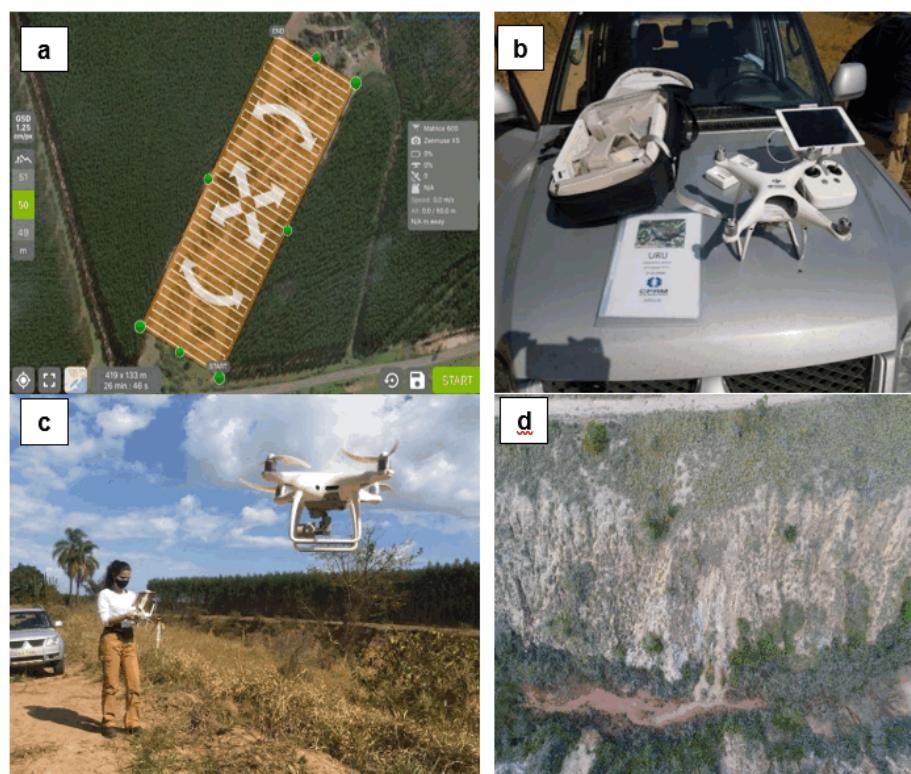


Figura 6 – a) Traçado de voo do VANT no aplicativo Pix4D Field; b) e c) VANT Phantom 4 Pro e início do voo manual; e d) Exemplo de fotografia adquirida em voo manual de uma das vertentes.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros configurados para os dois levantamentos aerofotogramétricos automatizados. Ressalta-se que também foram adquiridas imagens em voos manuais para reconhecimento da área em campo.

Tabela. 1 - Parâmetros configurados no VANT nas duas datas de aquisição

Parâmetros	Configuração dos parâmetros do VANT	
	17/07/2021	24/09/2021
Duração do voo	20 minutos	20 minutos
Número de fotos do voo automático	404	403
Sobreposição frontal	80%	80%
Sobreposição lateral	80%	80%
Altitude de voo	50 metros	50 metros
GSD planejado	1,25 cm/pix	1,25 cm/pix
Angulação da câmera ao longo de todo o voo	90° (NADIR)	90° (NADIR)

Dados dos pontos de controle, identificados como alvos e numerados de 1 a 5 (Fig. 7a, b), foi realizada com dois receptores GNSS nas duas datas de aquisição. Um foi fixado no alvo 1, como base de referência (Fig. 7c), a qual coletou coordenadas durante 4 horas, o que propiciou maior precisão ao ponto, e o outro receptor com aquisições de cerca de uma hora em cada um dos demais alvos referenciados à base (Fig. 7d). Os pontos foram sinalizados de modo que cada um pudesse ser identificado nos imageamentos e então lhes fossem atribuídas as devidas coordenadas para o georreferenciamento dos produtos fotogramétricos.

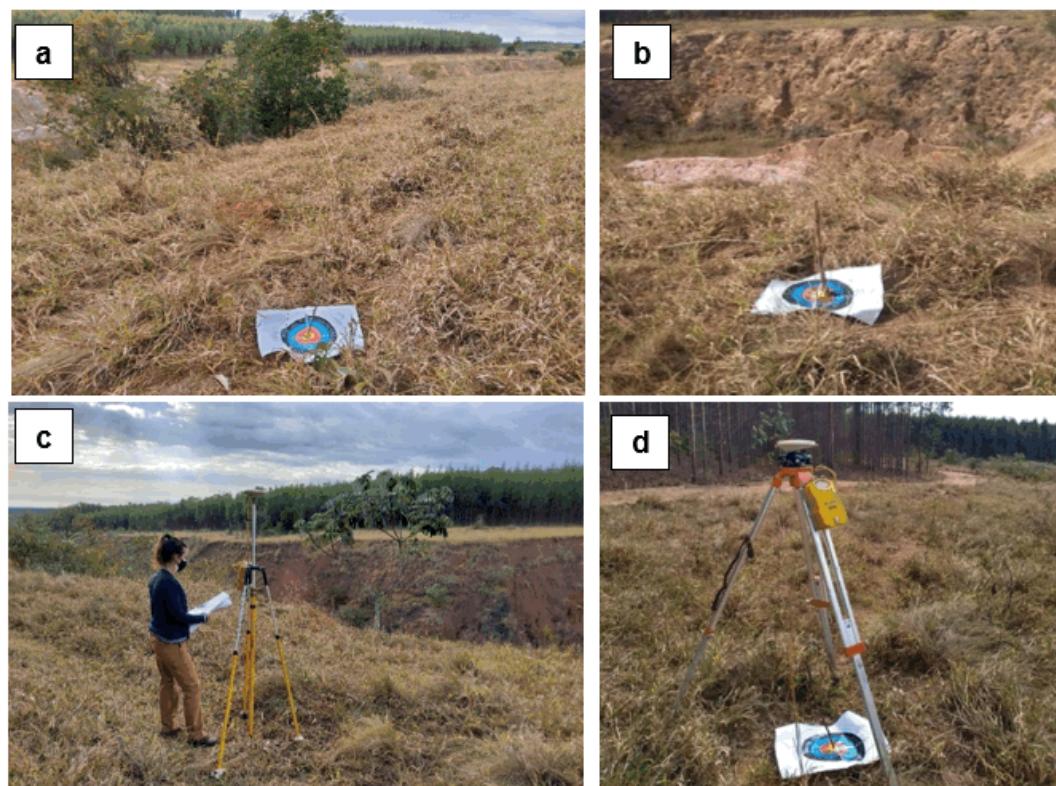


Figura 7 – a) e b) exemplos das marcações dos alvos para a aquisição dos pontos de controle; c) receptor GNSS fixo no alvo 1; d) receptor GNSS móvel, coletando informações em um dos alvos.

O método do posicionamento relativo necessita de um ponto de coordenada conhecida para que os dados sejam processados. Dessa forma foi, primeiramente, realizada a transposição de coordenadas das estações de aquisição da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para um dos alvos. Nesse caso para o alvo 1 (base) onde o receptor GNSS esteve como base de referência. Nesse processamento são necessárias ao menos duas estações para fazer a triangulação do posicionamento com a base (IBGE, 2008). Por se tratar de uma região com elevada densidade de estações de monitoramento e a fim de se obter maior precisão, foram selecionadas oito delas. A distância entre as estações escolhidas em relação à localização da base, denominada de linha de base, foi de cerca de 250 km. Isso se deve ao fato de que para o tempo de rastreio de dados de 4 horas se recomenda optar por estações a uma distância de 100 a 500 km da base para realizar a transposição com eficácia (INCRA, 2012).

Com base nas efemérides obtidas pelas estações, foram processadas as linhas de base e, posteriormente, realizado o ajuste de rede automaticamente e determinando a precisão da coordenada transposta. Desta forma, a coordenada da base foi calculada e ajustada, garantindo a melhor precisão ao alvo 1 (base; Tabela 2). Isso permitiu usar as coordenadas da base como referência para os demais alvos (IBGE, 2008). Deve-se ressaltar que somente as coordenadas do alvo 4 não puderam ser corrigidas através dos dados da base. Neste caso foi utilizada a base de aquisição de Botucatu como referência (28.82 km), o que justifica o maior erro associado a este local.

Tabela. 2 - Coordenadas (WGS 84) e erros dos pontos de controle para as duas datas de aquisição

17/07/2021					
Alvo	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Erro horizontal (m)	Erro vertical (m)
1	S22°53'46.092"	048°13'15.918"	579,6355	0,007	0,055
2	S22°53'38.443"	048°13'10.909"	570,0725	0,003	0,007
3	S22°53'35.045"	048°13'09.453"	568,759	0,004	0,009
4	S22°53'43.137"	048°13'10.738"	574,3641	0,006	0,015
5	S22°53'38.563"	048°13'07.365"	565,4685	0,024	0,065
24/09/2021					
Alvo	Latitude	Longitude	Elevação (m)	Erro horizontal (m)	Erro vertical (m)
1	S22°53'46.797"	048°13'15.954"	580,2098	0,015	0,086
2	S22°53'38.015"	048°13'10.296"	568,7689	0,027	0,096
3	S22°53'34.927"	048°13'09.074"	567,7245	0,022	0,056
4	S22°53'43.188"	048°13'10.725"	574,5825	0,038	0,06
5	S22°53'38.642"	048°13'07.255"	565,7184	0,017	0,036

Com as coordenadas dos pontos de controle, foi conduzido o processamento do imageamento automatizado da voçoroca para os dois períodos. Valendo-se da SfM, as imagens obtidas com sobreposições lateral e frontal de 80% foram submetidas ao

processamento inicial, identificando pontos coincidentes em um grupo de imagens sobrepostas, bem como calculando a partir da localização desses, a posição e orientação da câmera. Esse procedimento gerou uma nuvem esparsa de pontos 3D (pontos com coordenadas X, Y e Z; Fig. 8a). Tal nuvem possibilitou verificar o posicionamento da câmera e das imagens, viabilizando a identificação e georreferenciamento dos alvos delimitados em campo, empregando precisão menor que 10 cm dos pontos de controle (Fig. 8b; Tabela 2).

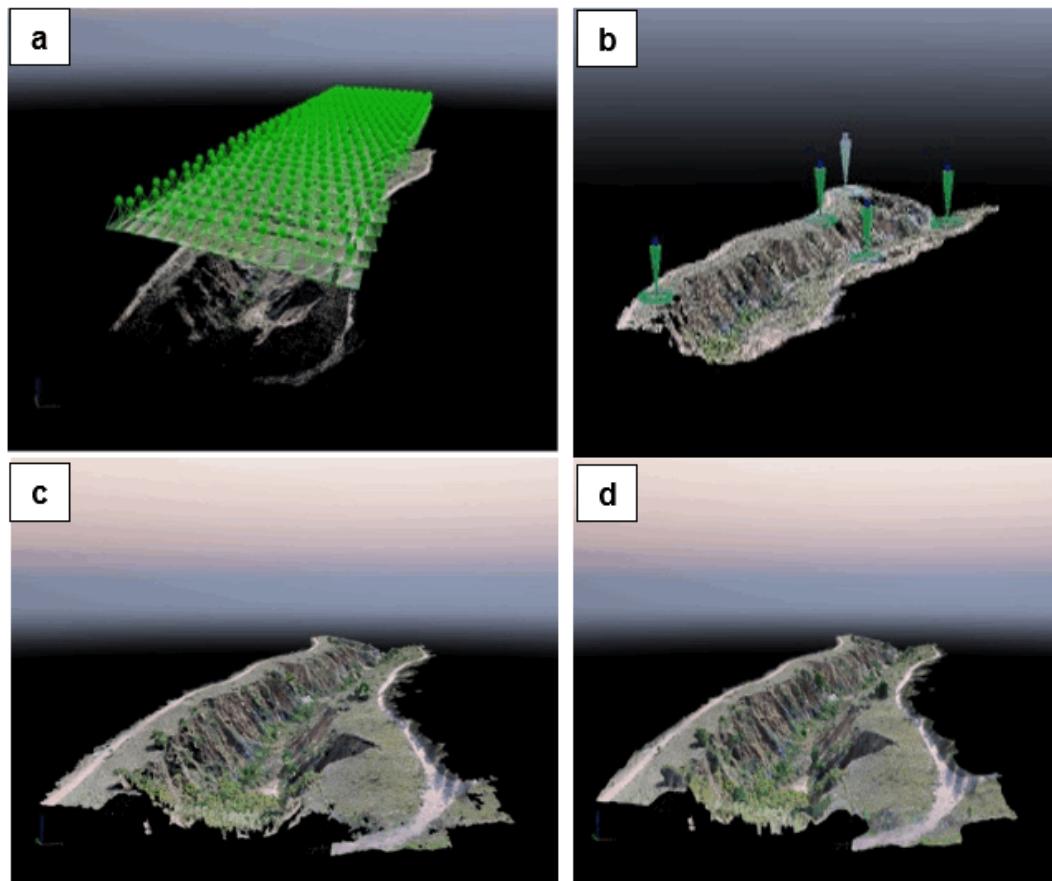


Figura 8 – Aquisição e processamento dos dados coletados por VANT na voçoroca: (a) Posição da câmera, indicada por esferas verdes, sobre uma nuvem de pontos esparsos no programa Pix4D Mapper; b) Posição dos pontos de controle sobre nuvem de pontos esparsos; (c) Nuvem de pontos densa; (d) Malha poligonal texturizada.

Com a configuração dos parâmetros de resolução, foi realizada automaticamente densificação dos pontos, interpolação, estruturação e texturização. Na densificação, uma nova nuvem densa de foi gerada (Fig. 8c). A partir das informações de posição e altitude, foram gerados o modelo 3D (Fig. 8d), constituído de malhas poligonais obtidas pela tesselação de seus pontos, modelo digital de superfície (MDS) e ortomosaico. Por fim, para obter o Modelo Digital do Terreno (MDT), foi realizada a classificação automática da nuvem de pontos (Fig. 9a), a fim de determinar exatamente os pontos de ajuste manual do terreno, com base na diferenciação das cores do modelo, seja: solo, árvores, entre outros. Após a

classificação foi realizada uma filtragem dos pontos que não correspondem ao solo e a interpolação do MDT.

O MDS (Fig. 9b) é o modelo digital de superfície, similar ao MDT. No entanto, o MDS contém os dados de elevação espacial do terreno apresentando a superfície com suas características naturais e artificiais, como vegetação e construções (Isioye e Jobin, 2012), enquanto o MDT se restringe a elevação do terreno. O modelo obtido por VANT possibilitou maior detalhamento da superfície que os modelos disponíveis gratuitamente, isso se deve a maior resolução dos produtos obtidos pelo aerolevantamento (Isioye e Jobin, 2012). Os estudos utilizando MDS processados em MDT (Fig. 9c) podem ser empregados na avaliação de mudanças na superfície do terreno ao longo do tempo por meio da comparação entre MDTs de diferentes momentos (Verdonk, 2015; Báčová et al., 2019 apud Julian e Nunes, 2020).

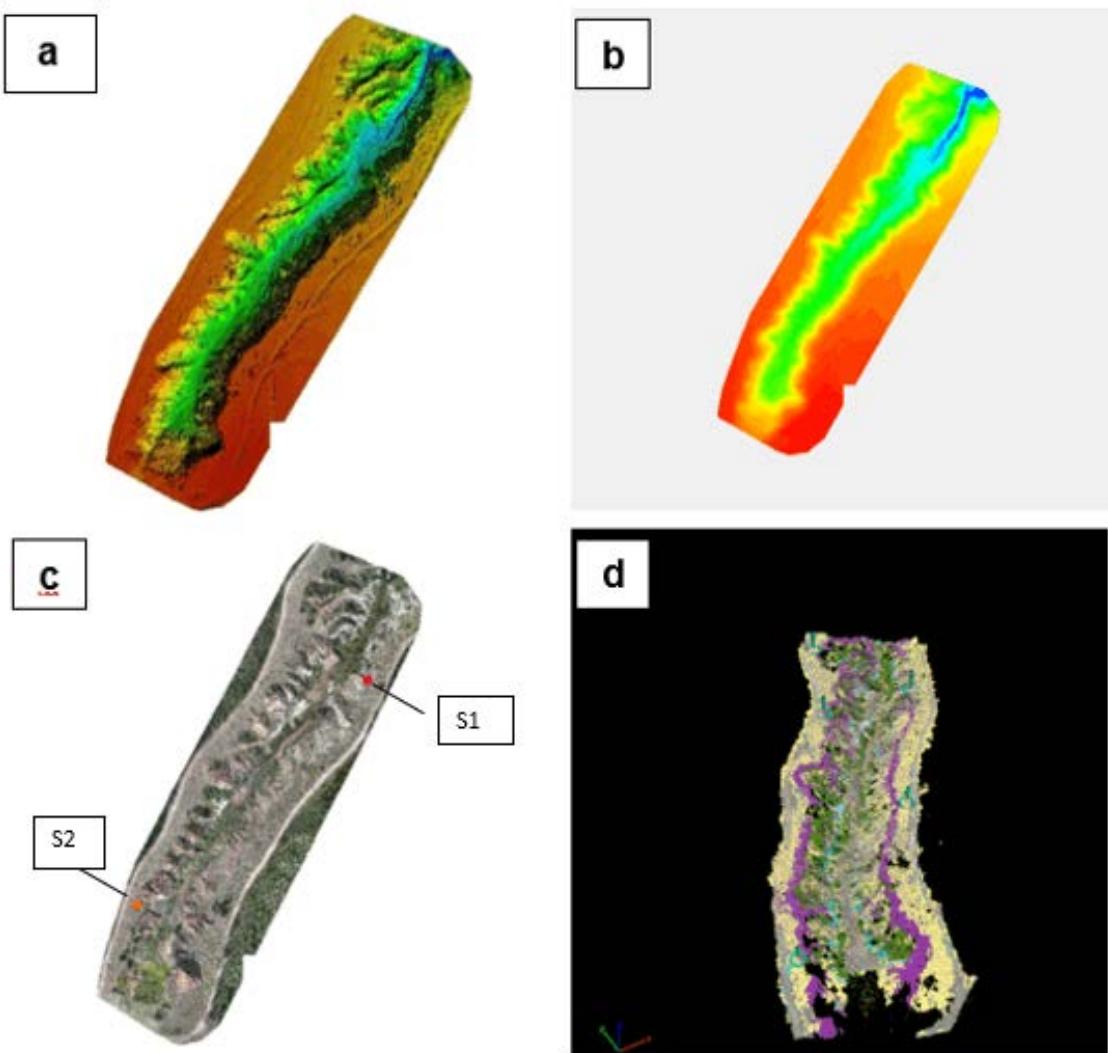


Figura 9 – Aquisição e processamento dos dados coletados por VANT na voçoroca: (a) Classificação das superfícies; b) MDS; (c) MDT com a localização dos pontos de amostragem de solo; e d) Ortomosaico.

O ortomosaico (Fig. 9c) foi construído através da ortorretificação das imagens de MDS. Este último utilizado para eliminar as distorções geométricas e detectar áreas oclusas. Isso permitiu uma visão ortogonal da superfície, representando a área o mais próximo da realidade possível, podendo ser usado para medir distâncias, áreas e direções precisas entre pontos (Shin e Lee, 2021; Fig. 9d).

5.1.1 Classificação da estrutura erosiva

Segundo Ireland (1939 apud Bertoni e Lombardi, 1990), as voçorocas podem ser classificadas pela sua profundidade e pela área da sua bacia. As voçorocas são classificadas como profundas, quando apresentam mais de 5 metros de profundidade; médias, de 1 a 5 metros, e pequenas, com menos de 1 metro. Em relação a área da bacia em que se encontram, elas são caracterizadas como pequenas quando a área de drenagem é menor que 2 hectares, médias, quando de 2 a 20 hectares, e, grandes, quando têm mais de 20 hectares.

O volume total erodido em uma voçoroca também possibilita classificá-la quanto ao seu tamanho servindo como subsídio para a recuperação da área degradada (Vieira, 2008), e mensuração de medidas de mitigação em relação a cursos d'água assoreados. Para classificar o tamanho da voçoroca em relação ao trecho estudado, foram utilizados os parâmetros já estabelecidos por Vieira e Albuquerque (2004) apud Vieira (2008) (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação das voçorocas por tamanho (m^3).

Ord.	Volume erodido	Tamanho
01	Até 999 m^3	Muito pequena
02	De 1.000 m^3 até 9.999 m^3	Pequena
03	Entre 10.000 m^3 e 19.999 m^3	Média
04	Entre 20.000 m^3 e 40.000 m^3	Grande
05	Mais de 40.000 m^3	Muito Grande

A metodologia para o cálculo do volume da erosão (Julian e Nunes, 2020) utiliza servidores sistema de informações geográficas (GIS) para calcular a diferença entre a altitude de uma superfície inferida e o MDT. Para isso, primeiramente, foi considerada as curvas de nível obtidas pelo MDT e a ortofotofo. Então delimitadas, as bordas da voçoroca que têm atribuídas aos seus vértices os valores de altitude do MDT. Com isso, os vértices do limite da voçoroca foram interpolados pelo método linear pela ferramenta TIN (*Triangle Irregular Network*) com resolução de 0,0152 m. Isso permitiu a gerar uma superfície estimada original do terreno em três dimensões. Para executar o cálculo do volume erodido foi calculada a diferença entre as altitudes das duas camadas e multiplica o resultado pela resolução espacial

do MDT, gerando o volume do que está abaixo e acima de superfície original. Para tal, é necessário que os arquivos estejam em formato TIN, portanto o arquivo raster do MDT foi transformado em TIN com a ferramenta *Raster to TIN*.

5.2 Espectroscopia de reflectância

A espectroscopia de reflectância nas regiões do visível (380 – 770 nm), infravermelho próximo (770 – 1400 nm) e de ondas curtas (1400 – 2500 nm) do espectro eletromagnético, foi utilizada com fins vincular a interpretação das imagens orbitais de sensores passivos. Bibliotecas espectrais pré-existentes (Dotto et al., 2019) foram utilizadas para fins comparativos, uma vez que apresentam utilidade para trabalhos de levantamento e mapeamento digital de solo. Seus usos consideraram o fato de que os solos absorvem e refletem a energia eletromagnética em diferentes comprimentos de onda, de acordo com seus atributos físico-químicos, permitindo diferenciá-los entre si (Andronikov e Dobrovolskiy, 1991 apud Demattê et al., 2004). Essa técnica não apresenta necessidade de preparo específico de amostras ou uso de reagentes, sendo mais barata e rápida que análises convencionais de solo (Demattê et al., 2004).

Para a aplicação da espectroscopia nos solos da voçoroca, foram coletadas duas amostras representativas dos horizontes superficiais do trecho da voçoroca estudada (S1 e S2; Fig. 9c). Os dados espectrais das amostras foram obtidos por meio do espectrômetro FieldSpec4 e software RS³ (ASD Inc.) disponibilizados pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. A geometria do sistema foi baseada no posicionamento perpendicular do sensor em relação à amostra, que estava acondicionada em placa de Petri.

O FieldSpec4 permite o cálculo do fator de reflectância, obtido pela razão entre a radiância da amostra e a radiância de uma superfície ideal nas mesmas condições de iluminação e observação (fonte de iluminação halógena, distância e angulação). Como superfície ideal, foi utilizada uma placa espectralon branca como referência absoluta com 100% de reflectância (Bowker et al., 1985; Milton, 1987 apud Cardozo et al. 2011).

A Fig. 10a apresenta o arranjo de aquisição com o FieldSpec4. A geometria de aquisição se deu conforme manual de utilização do espectrômetro, com o sensor a 8 cm de distância ^b da amostra, iluminação externa por lâmpada halógena de 650 W posicionada a 35 cm da amostra e ângulo zenital de 30°, sem interferência de luz natural. Além disso, foram tomadas quatro aquisições a cada 90°, para cada amostra, visando identificar anisotropias. Os espectros analisados (Fig. 10b) apresentaram refletância máxima de 0,54 na amostra S1 e de 0,41 na amostra S2, ambos no comprimento de onda 2106 nm. As reflectâncias mínimas coincidem em ambas as amostras no comprimento de onda 350 nm. Mesmo com reflectâncias diferentes, o comportamento das amostras se assemelha sobretudo após 914 nm.

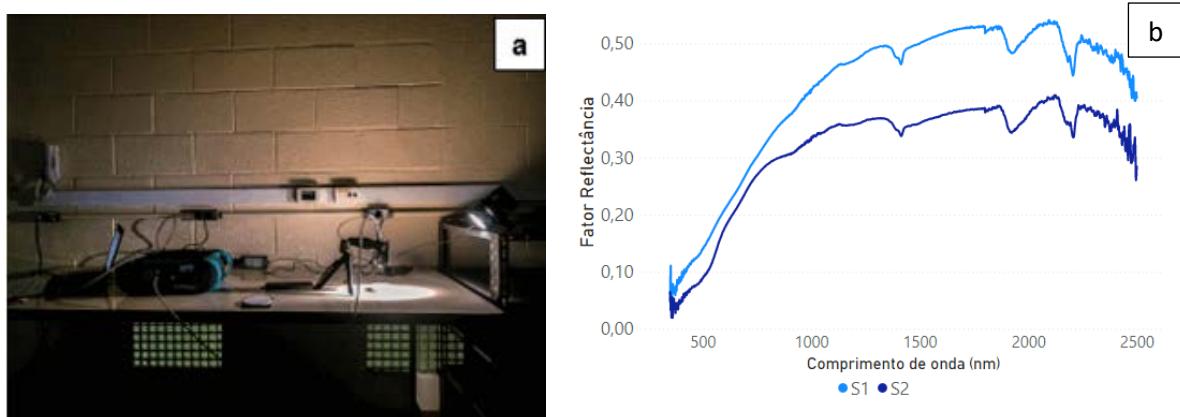


Figura 10 – a) Arranjo de aquisição com o equipamento FieldSpec4; b) Comportamento espectral das amostras de solo S1 e S2, dado pela relação entre reflectância e comprimento de onda.

5.3 Processamento de imagens orbitais – sensores passivos

A análise temporal da voçoroca se deu por meio dos produtos fornecidos pelos satélites Landsat 5 e Landsat 8. O Landsat 5, lançado em março de 1984, foi uma das oito missões da série Landsat desenvolvidas pela Agência Espacial Americana voltadas à observação dos recursos naturais terrestres. O satélite orbitou com dois sensores, o MSS (Multispectral Scanner) com aquisição até 1995 e o Thematic Mapper (TM) até novembro de 2011. Este último projetado para dar suporte às pesquisas de diferentes áreas temáticas, operou com bandas nas regiões do visível, infravermelho de ondas curtas (SWIR) e no infravermelho térmico (TIR) (EMBRAPA, 2020a). Já o Landsat 8, lançado em fevereiro de 2013, dá continuidade na aquisição de imagens orbitando com o sensor TIRS nas bandas espectrais na faixa do infravermelho termal e com o sensor Operational Land Imager (OLI) do visível ao infravermelho de ondas curtas, além de apresentar uma banda pancromática (EMBRAPA, 2020b).

Os dados nas cenas do satélite Landsat 5 TM e do Landsat 8 OLI, foram obtidos para a órbita 220, ponto 76. Cada imagem apresentou resolução espacial de 30 metros nas bandas do azul ao infravermelho de ondas curtas. A resolução radiométrica foi de 8 bits no sensor TM e 12bits no OLI. As imagens foram adquiridas no site do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em 20 épocas distintas, de 1984 a 2021. Com isso foram realizadas diferentes composições de banda de forma a melhor destacar a evolução da erosão e da vegetação que a circunda.

A razão entre bandas permite destacar comportamentos espectrais contrastantes de uma cena, visto que em bandas originais apenas algumas diferenças são evidentes. Desta forma, para a análise do comportamento espectral do alvo de interesse, as bandas foram selecionadas visando feições características de reflectância e absorção, de modo a expressar

os gradientes da curva espectral da cena, favorecendo o realce do que se deseja destacar (Sestini, 1999).

A partir da curva espectral obtida do solo coletado na área de estudo observou-se que a banda espectral correspondente ao SWIR 1 apresentava alta refletância, a qual pode ser utilizada em razões que destacasse o solo, como no caso da razão SWIR1 pela banda correspondente ao do NIR. Além disso, a fim de se destacar a evolução da vegetação foi utilizada a seguinte expressão (NIR – Vermelho) / (NIR = Vermelho), expressão matemática entre bandas utilizada comumente para o cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1973). Trata-se do realce por operações matemáticas entre bandas espectrais utilizado em análises de degradação ambiental.

E a fim de se destacar a drenagem foi empregada a análise por principais componentes entre as bandas do visível, NIR, SWIR1 e SWIR2 presentes nas duas missões utilizadas. Tal análise determina a correlação geoespacial existente entre duas ou mais bandas através da remoção da redundância dos dados multiespectrais (Sousa et. al, 2011). Da correlação das bandas, a 3^a Componente Principal (PC3) (Tabela 4) destacou os efeitos da drenagem, ao ressaltar a banda referente ao comprimento de onda do azul e apresentar absorção no comprimento do SWIR 1.

Tabela 4 – Exemplo de uma das matrizes de autovetores geradas, com destaque para a 3^a Componente Principal (PC3)

Eigenvectors	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6
Band 1	-0.523596	-0.235564	-0.223683	-0.498093	-0.561412	-0.238838
Band 2	-0.452362	-0.121225	0.044539	-0.426725	0.670435	0.383552
Band 3	0.567811	0.210924	0.252846	-0.721468	-0.148209	0.163366
Band 4	0.335684	-0.191033	-0.582635	-0.204508	0.413210	-0.546619
Band 5	0.247902	-0.425410	-0.515760	0.082580	-0.203710	0.665767
Band 6	-0.157063	0.817226	-0.527805	-0.025482	-0.033574	0.164677

Para realizar a composição colorida que melhor realça o solo exposto, a água e a vegetação foi configurado para o canal do vermelho a razão SWIR1/NIR, no canal do verde o resultado do NDVI, e no azul a 3^a Componente Principal (PC3).

5.4 Processamento de imagens orbitais – sensores ativos

Para averiguar a modificação na superfície da erosão em diferentes datas foram feitos processamentos comparativos entre imagens SAR e composições coloridas que ressaltassem modificações temporais, além do auxílio da interferometria para mensurar movimentos. Imagens orbitais do satélite Sentinel 1 foram utilizadas para avaliação morfológica da área. Esta missão composta por pares de satélites especializados, 1-A e 1-B, o primeiro lançado em 2014 e o segundo em 2016 equipados com sensores de abertura sintética (SAR) que operam na banda C (entre 8 a 4 GHz ou 3,8 – 7,5 cm). O lançamento destes satélites visou o

monitoramento de recursos naturais terrestres, desastres naturais, uso e ocupação de terras, ambientes marinhos e clima (EMBRAPA, 2020b).

5.4.1 Dados SAR

Para o processamento dos dados SAR, foram utilizadas duas imagens do satélite Sentinel-1 modo de aquisição Interferometric Wide (IW), com polarização única VV, processadas em Ground Range Detected (GRD) representando apenas a amplitude detectada (as informações de fase são descartadas). As imagens apresentam dados do dia 29 de junho de 2016, imagem mais antiga disponível, e de 27 de julho de 2021, referente ao primeiro campo realizado no trabalho.

O fluxo de trabalho consistiu em diferentes etapas de processamento, estabelecidas para reduzir da melhor forma a propagação de erros e ruídos e aumentar a eficácia no tempo de processamento. Inicialmente foi realizado o recorte da das imagens para um subconjunto de menor área para diminuir o tempo de processamento. Com o tamanho da imagem reduzido procedeu-se com a calibração radiométrica, procedimento que converte valores de pixel digital em retroespalhamento de SAR. Isso torna as imagens de radar de diferentes datas, sensores ou geometrias de imagem comparáveis. A fim de reduzir o ruído foi aplicada a ferramenta *Multi-Looking*, o processo resulta em uma imagem com pixels maiores, reduzindo a resolução espacial da imagem e melhorando a espectral. O *Multi-Looking* se trata da média de múltiplos pixels em cada direção (Braun e Veci, 2021).

Visando eliminar os ruídos granulares causados pela interferência de ondas refletidas de múltiplos dispersores, foi aplicado o *Speckle Filtering* para aumentar a qualidade da imagem reduzindo as granulações. Para ajustar o referenciamento da imagem e minimizar os efeitos de terreno foi realizada a correção de terreno com a ferramenta Range-Doppler Terrain Correction. Como última etapa do fluxo de trabalho de pré-processamento, o coeficiente de retroespalhamento (sem unidade) é convertido em decibéis (dB) usando uma transformação logarítmica. A partir deste processamento, foi obtido um produto cujas imagens obtidas em momentos diferentes na área de estudo foram sobrepostas. Isto permitiu associar as imagens de cada data com os canais RGB do produto de sobreposição (Fig. 11), e então identificar através da combinação de cores as áreas em que houve as maiores mudanças na feição.

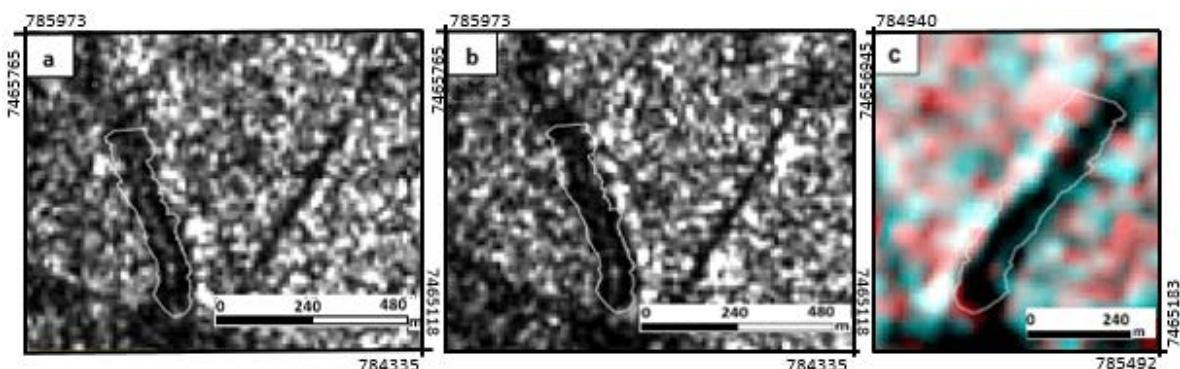


Figura 11 – Datum WGS84/UTM 22S. a) Imagem SAR do dia 29 de junho de 2016; b) imagem SAR do dia 27 de julho de 2021; e c) composição colorida das imagens citas sobrepostas com orientação corrigida com a ferramenta Range-Doppler Terrain Correction. Em que no canal do vermelho foi atribuída a imagem de 2016 e nos canais verde e azul a imagem de 2021.

5.4.2 Dados InSAR

O InSAR foi utilizado para se obter um produto que indique os locais de maior erosão na voçoroca estudada. Para seu processamento foram utilizadas duas imagens SAR do satélite Sentinel-1 modo de aquisição *Interferometric Wide* (IW), com polarização única VV, processadas em *Single Look Complex* (SLC) que contêm amplitude e fase. A amplitude de um pixel se relaciona com a magnitude do retroespalhamento do sinal emitido e a fase com a diferença entre os tempos de emissão dos sinais retroespalhados (Braun e Veci, 2021). As imagens apresentam dados do dia 04 de agosto de 2016, a mais antiga disponível, e de 09 de novembro de 2021, a mais recente até a produção deste texto, respectivamente.

Primeiramente, as imagens foram carregadas no ESA-SNAP, permitindo a visualização da imagem de intensidade com suas três sub-faixas e 9 *bursts* delimitados por contorno preto. Para garantir maior velocidade no processamento, através da ferramenta *S1-TOPS-SPLIT*, foram selecionados apenas os *bursts* 5 e 6 da sub-faixa 2 onde encontra-se a voçoroca. Além dessa seleção foi recortada uma área para um subconjunto de dimensões menores que pôde garantir melhor eficiência ao processo.

Após a delimitação da área a ser processada, as imagens foram co-registradas com a ferramenta *S-1 TOPS Co-registration*. Essa ferramenta permite que uma imagem seja selecionada como principal, ou mestra (*master*), e a outra como secundária, ou serva (*slave*). Desta forma a imagem serva é transformada para que os pixels de mesma posição em ambas as imagens detenham mesma geometria para que retratem o mesmo elemento de resolução no solo (Nievinsk, 2004).

Posteriormente, por meio da ferramenta *Interferogrametry Formation*, foi calculado o interferograma, formado por amplitude e fase. A amplitude é resultado da multiplicação das amplitudes de ambas as imagens principal e secundária, enquanto a fase representa a diferença de fases entre as duas (Braun e Veci, 2021). Para remover as linhas entre os *bursts* é utilizado o operador *S-1 TOPS Deburst* aplicado ao interferograma. O interferograma pôde então ser nivelado removendo a fase topográfica. O operador *Topographic Phase Removal* simula um interferograma com base em um Modelo Digital de Elevação de referência e subtraí do interferograma processado.

A fase interferométrica pode ser corrompida por ruído que propicia perda de coerência, fazendo com o que o padrão de interferência seja perdido (Braun & Veci, 2021). Portanto, para se obter adequadamente a fase, foi o aplicado o *Goldstein Phase Filtering*. Para garantir maior redução de ruídos, foi aplicado o *Multi-Looking* nas bandas de fase e intensidade, processo idêntico ao do processamento dos dados SAR.

No interferograma, a fase interferométrica é ambígua e conhecida apenas na escala de 2π . Para poder relacionar a fase interferométrica com a altura topográfica, foi aplicada a ferramenta *Phase Unwrapping*. A altitude de ambiguidade é definida como a diferença de altitude que gera uma mudança de fase interferométrica de 2π após o achatamento do interferograma. O processo *Unwrapping* soluciona essa ambiguidade integrando a diferença de fase entre os pixels vizinhos, fornecendo uma medição da variação de altitude real. Consequentemente, o resultado deve ser interpretado como uma altura/deslocamento relativo entre pixels das duas imagens, de 2016 e de 2021 (Braun e Veci, 2021).

A fase resultante é um raster contínuo que não apresenta uma medida métrica. Para converter as unidades de radianos de cada pixel em deslocamentos absolutos em metros, foi aplicado o operador *Phase to Displacement*. Ele transforma a fase em mudanças de superfície ao longo da linha de visão em metros (Braun e Veci, 2021). Com isso, os valores positivos significam elevação ou aproximação e valores negativos significam subsidência ou afastamento da superfície.

Por fim, foi realizada a correção de terreno que permitiu geocodificar a imagem corrigindo distorções geométricas de SAR usando um MDE. A geocodificação do terreno envolve o uso de um MDE para corrigir distorções geométricas inerentes, como encurtamento (*foreshortening*), inversão (*layover*) e sombra (Braun e Veci, 2021).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a caracterização da voçoroca foram realizadas análises qualitativas e quantitativas a partir de uma abordagem sistêmica. Com isso, foram caracterizadas feições presentes no interior da erosão, identificado o posicionamento da voçoroca na vertente, caracterizada sua forma vista em planta e sua forma vista em perfil, além de levantamento de dados morfométricos e verificação de mudanças entre os produtos gerados a partir dos dois levantamentos aerofotogramétricos. Adicionalmente, subsidiados por espectrometria, foram analisados dados de imagens de sensores TM e OLI e imagens SAR que colaboraram quanto a compreensão da evolução da feição estudada. A metodologia foi baseada no reprocessamento e observação dos dados gerados pela fotogrametria e pelas imagens orbitais de sensores passivos e ativos.

6.1 Caracterização quanto ao tipo e a forma

Oliveira (1989) propõe a definição de três tipos de voçorocas (Fig. 12a): I) Conectadas, relacionadas ao escoamento concentrado nas partes baixas da encosta, podendo ser

consideradas canais de primeira ordem; II) Desconectadas, encontrando-se na parte superior da encosta, estão ligadas ao escoamento superficial e/ou a movimentos de massa e não estão conectadas a nenhuma rede de drenagem; e, III) Integradas, referindo-se à junção das duas formas anteriores em apenas uma incisão erosiva.

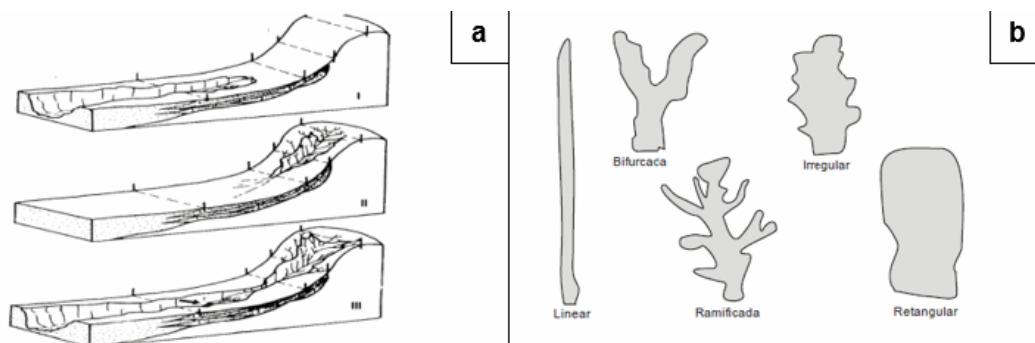


Figura 12 – a) Modelo proposto por Oliveira (1989); b) Padrões propostos por Vieira (2008).

A classificação quanto ao tipo e a forma da incisão erosiva, auxilia na determinação de seu estágio evolutivo, possibilitando inferir seu crescimento. Neste trabalho, a classificação por forma se baseou em Vieira (2008) para auxiliar na compreensão de sua origem. As formas são (Fig. 12b): Linear, quando há uma zona principal de contribuição hídrica; Bifurcada, relacionada à duas zonas de contribuição de fluxo concentrado; Ramificada, caracterizada pela ocorrência de vários canais de drenagem superficiais; Irregular que pode se relacionar à existência de um ou mais fluxos superficiais concentrados; e Retangular que se caracteriza como transitória entre as outras formas existentes, podendo ser definida como forma final da expansão de uma das outras formas descritas.

O trecho da voçoroca deste estudo se apresenta como Integrada, visto que seus primeiros 90 m se encontram em alta vertente, desconectada do escoamento concentrado, e sua extensão restante conectada. Sua forma é irregular (Fig. 13), com a seção transversal da erosão (calha) apresentando uma mudança de formato em "V", de erosões em estágio intermediário, para "U", de estágios mais evoluídos (Oliveira, 2007; Vieira, 2008). Isso se dá pelo avanço da erosão, com a remoção de materiais de baixa coesão promovendo o alargamento das paredes através de alcovas.

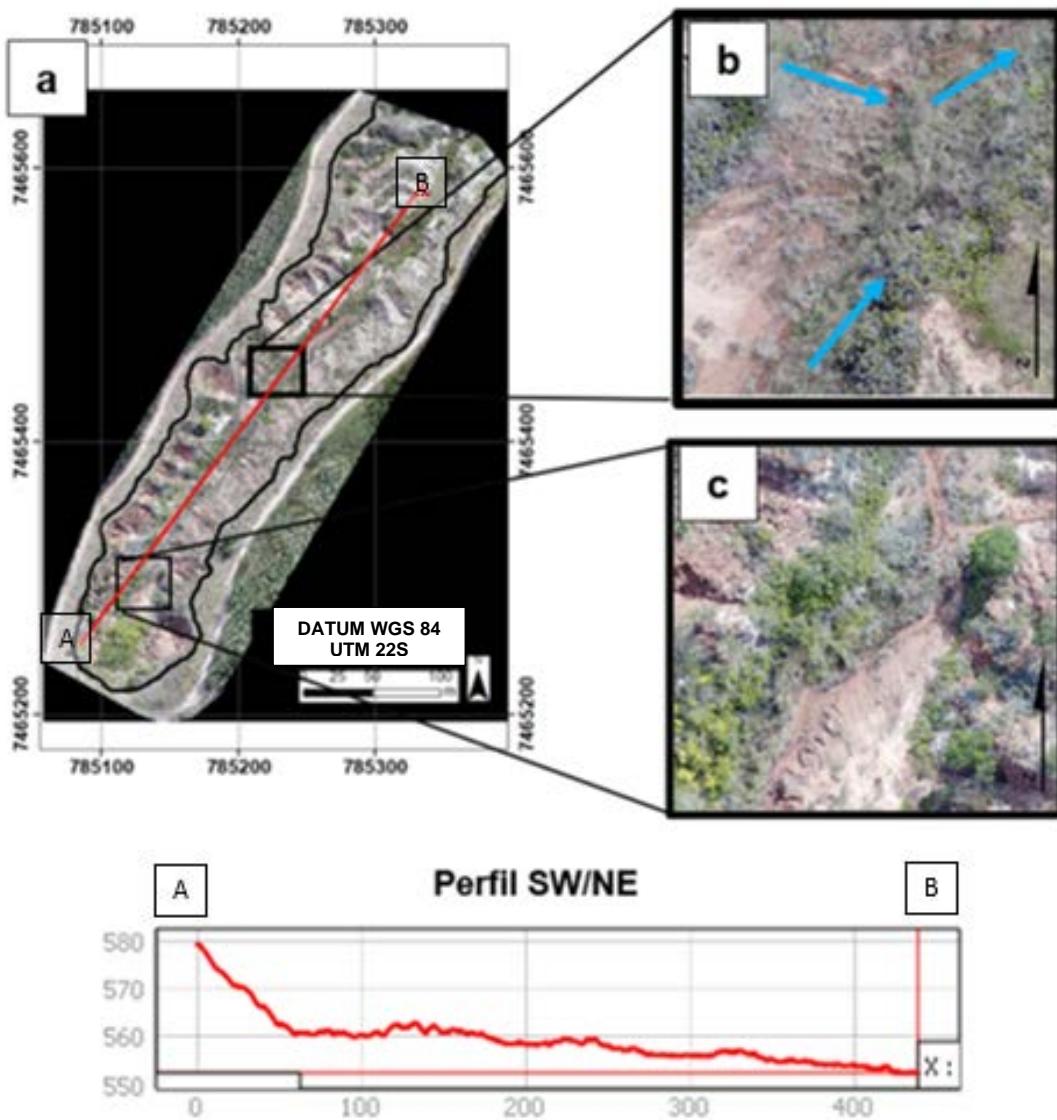


Figura 13 – a) Vista em planta da voçoroca revelando forma aproximada ao padrão irregular e perfil SW/NE; b) escoamento concentrado após o trecho desconectado na alta encosta, indicando padrão integrado; e c) contribuição de dois escoamentos concentrados no trecho na baixa encosta, o que favorece a forma irregular.

Os perfis topográficos transversais realizados sobre o MDT e o MDS revelaram um estágio avançado de evolução (Fig. 14), visto que além dos formatos mais aproximados de calhas em “U”, a voçoroca atinge o nível de base e apresenta cobertura vegetal em alguns trechos. Essa classificação quanto a evolução é corroborada com a definição dos estágios de desenvolvimento de voçorocas de Fendrich et al. (1997). Segundo os autores, a voçoroca evolui da seguinte forma: 1º) formam-se sulcos com escoamento superficial concentrado; 2º) ocorre aprofundamento e alargamento da voçoroca à erosão regressiva formando cabeceira; 3º) ocorre encontro do nível de base da erosão com formação de fundo mais achatado; 4º) a voçoroca começa se estabilizar com abrandamento dos taludes e colonização de espécies vegetais provenientes dos escorregamentos.

Segundo Bertoni e Lombardi (1990), as formas das voçorocas variam conforme a constituição do solo, sendo que os solos de consistência uniforme acarretam em paredes da

voçoroca relativamente verticais, e materiais muito friáveis, proporcionam uma maior frequência de desmoronamentos. Já as paredes em formadas de “V” podem ser ocasionadas, segundo os autores, por presença de material mais resistente que os horizontes superficiais o subsolo ou nos horizontes mais profundos.

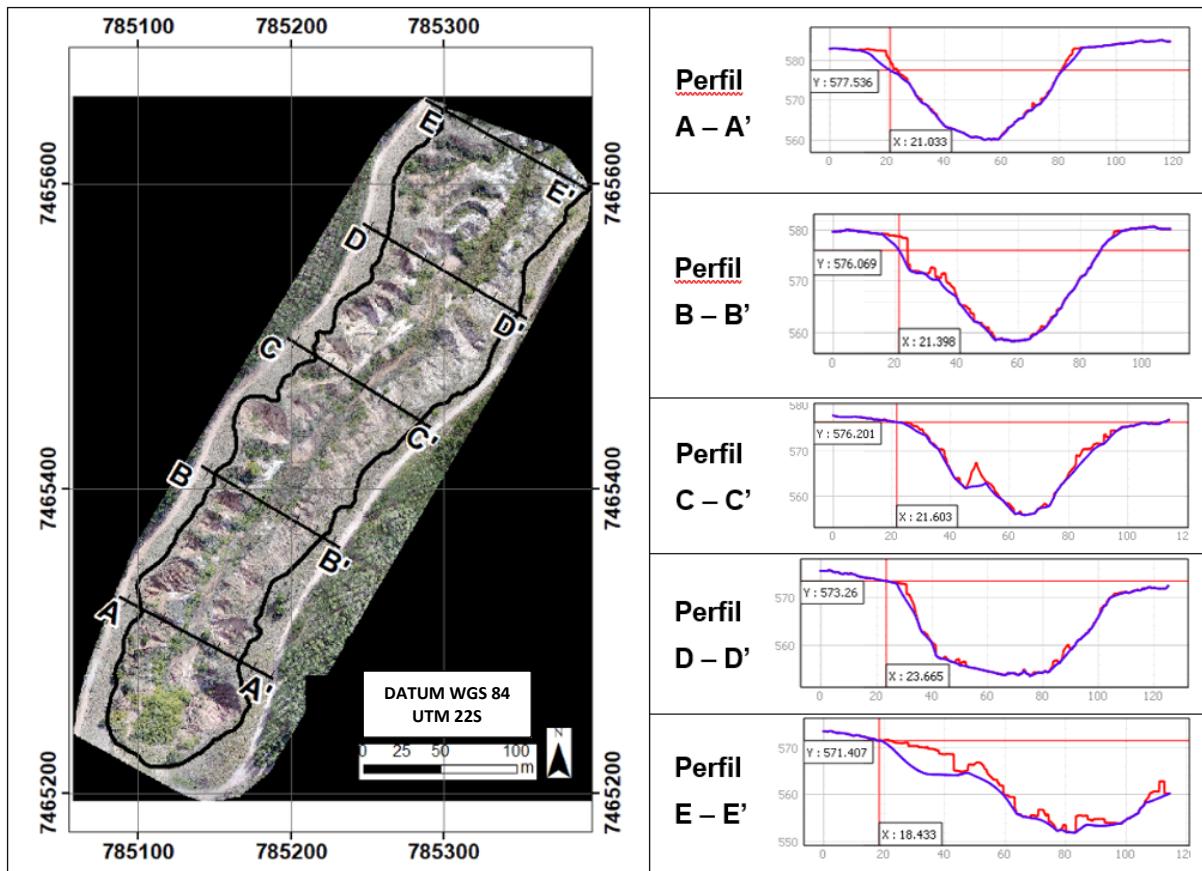


Figura 14 – Perfis topográficos transversais da voçoroca. Em vermelho, o perfil feito através do MDS em que se observa a superfície da vegetação e do solo com maior predominância na baixa vertente. Em azul, o perfil confeccionado a partir do MDT em que apenas a superfície do solo é representada.

6.2 Caracterização quanto ao tamanho

A erosão apresenta comprimento axial de 490 m, área de contribuição de 41.738 m², perímetro da área de contribuição de 1.203 m e profundidade média de 21 m. A Figura 15, apresenta o fluxo de trabalho para o cálculo volumétrico. O resultado obtido foi de 634.652,24 m³ para o modelo da primeira aquisição e de 621.426,42 m³ para o da segunda, o que, de acordo com a classificação de Vieira e Albuquerque (2004), reflete em uma voçoroca de tamanho “Muito grande”.

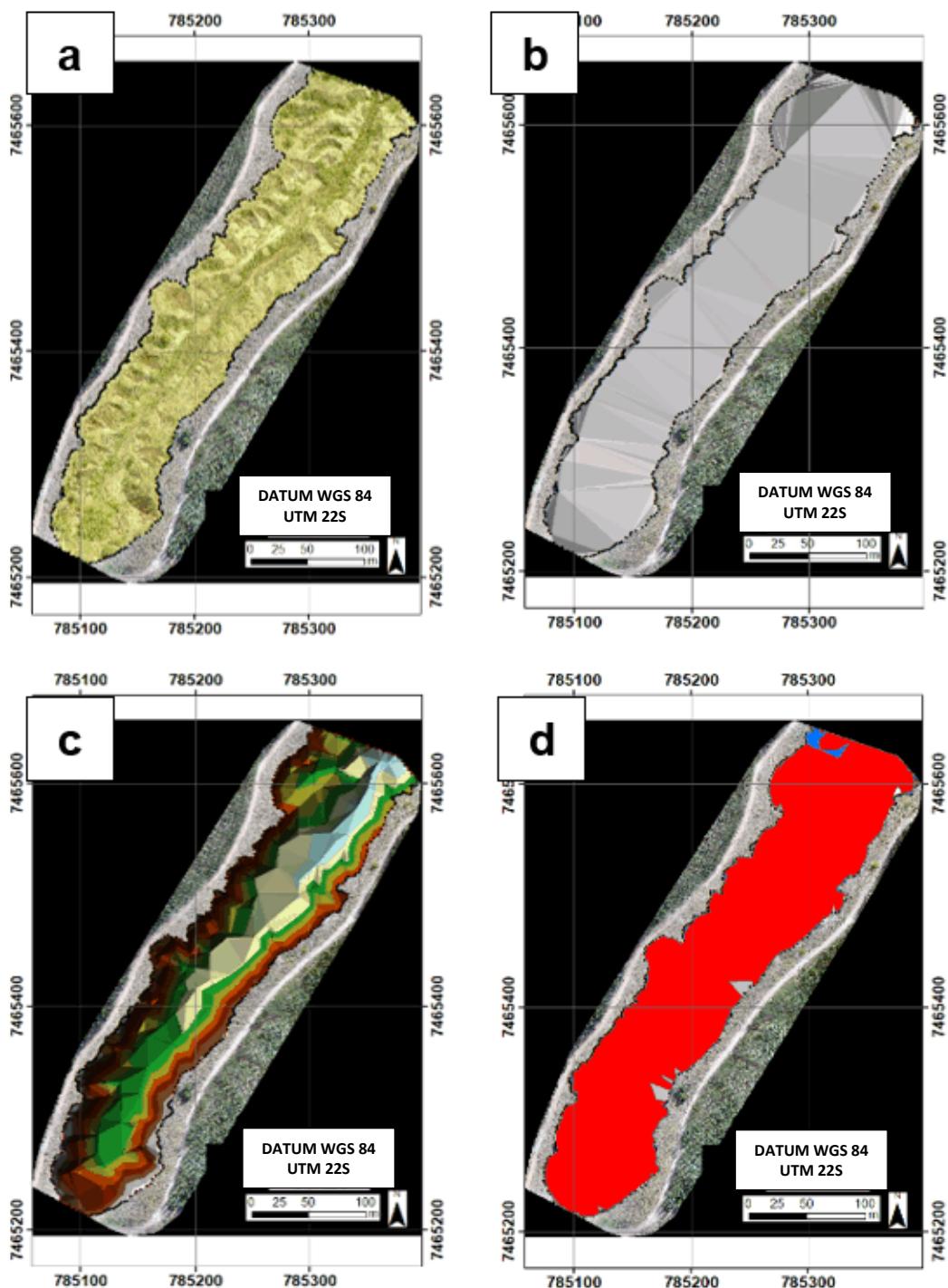


Figura 15 – a) Delimitação vetorial da superfície original estimada em amarelo, e seus respectivos vértices com informação de altitude; b) Interpolação linear em malha triangular dos vértices para gerar uma superfície 3D; c) Transformação do arquivo raster do MDT em TIN; e d) Resultado do cálculo de volume, em vermelho o volume abaixo da superfície original (volume erodido), em azul é apresentada a área cujo volume estaria acima da superfície estimada, e em cinza estaria nas mesma altitude da referência.

A diferença de volume entre as duas aquisições indicou a continuidade da atividade erosiva, porém de baixa capacidade de carreamento dos sedimentos para além de seu limite, resultando na acumulação na baixa vertente, evidenciada pela subtração dos MDTs (Fig. 16a). Considerando que a primeira aquisição aerofotogramétrica foi realizada com em

período que proporcionou maior quantidade de sombra em suas feições, foi realizada uma classificação não-supervisionada com a técnica K-means para destacar os pontos com maior densidade de sombra. A classificação resultou em 2% de área sombreada no MDT da primeira aquisição, majoritariamente associada à vegetação (Fig. 16b).

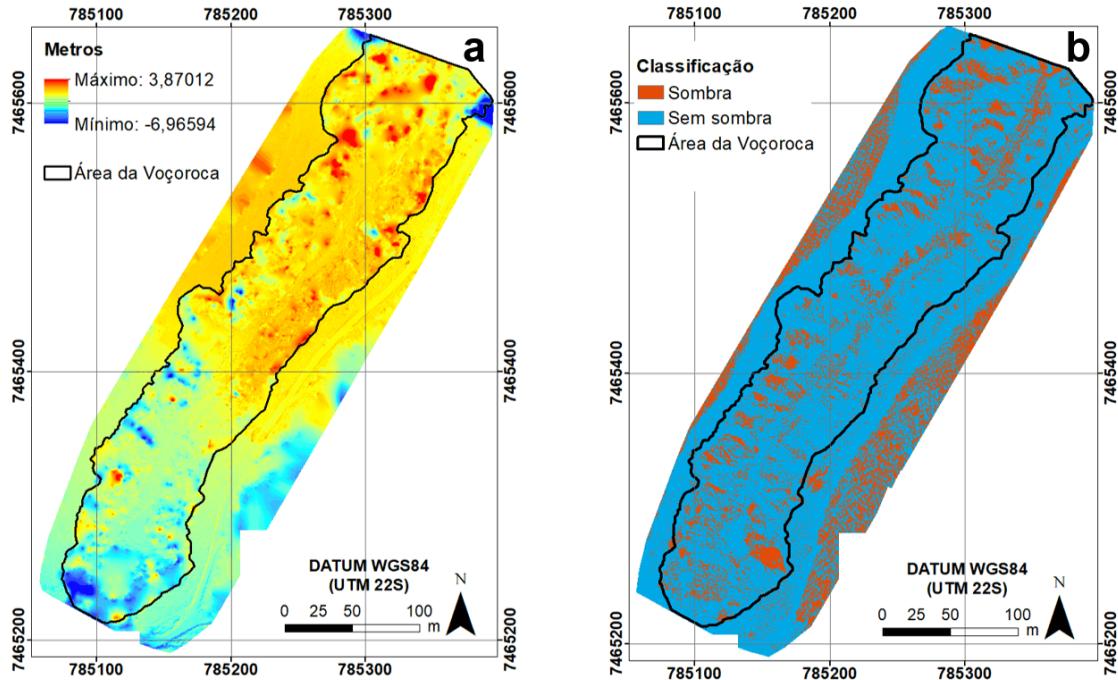


Figura 16 – a) Subtração entre os MDTs de 17/07/2021 e 24/09/2021. Em vermelho são destacados os pontos em que nos modelos da segunda aquisição houve aumento na cota Z do modelo e em azul a diminuição dessa em relação à primeira aquisição; b) Classificação não supervisionada com a técnica K-means. Em vermelho pontos com grande quantidade de sombra.

A classificação da vegetação revelou que na área de estudo a cobertura vegetal é menor que 2%, o que reflete em uma vertente com erosão em estado ativo. Segundo a classificação de Crouch e Blong (1989) apud (Vitte e Mello, 2007), a vertente erosiva se apresenta estável quando há mais de 70% de cobertura vegetal.

6.3 Morfometria

O MDT processado para a voçoroca possui acurácia que atende ao padrão de exatidão cartográfico brasileiro (Decreto n. 89.817 de 20 de junho de 1984, na classe A (1:1000), a de maior qualidade. Os erros médios quadráticos (RMS) obtidos foram de 1 a 4,5 cm no eixo X (leste-este), 0,9 a 1,3 cm no Y (norte-sul), e de 0,7 cm em Z (vertical). Com isso, a qualidade e acurácia dos dados permitiu uma análise coerente dos dados morfométricos da voçoroca.

A análise morfométrica trata da configuração da superfície do terreno, da fisionomia e do dimensionamento das formas de relevo, propiciando a classificação, espacialização e caracterização dos processos erosivos. Seus dados foram obtidos com mapas hipsométrico, de declividade e de orientação das vertentes. Para o mapa hipsométrico foi utilizado o MDE

gerado pela fotogrametria, o qual foi dividido em cinco classes representativas do relevo da área (Tabela 5; Fig. 17a).

Tabela 5 - Classes hipsométricas referente aos componentes topográficos do relevo.

Classes hipsométricas (m)	Área ocupada no terreno (%)	Feições predominantes
546 - 551	4,90	Canal principal começa a ser mais delimitado pelo relevo e apresenta maior volume hídrico
551 - 557	17,20	Relevo plano no leito da voçoroca
557 - 572	45,00	Vertentes erodidas e a porção baixa da encosta sem erosão.
572 - 575	12,11	Porção intermediária da encosta sem erosão
> 575	20,79	Porção alta da encosta sem erosão

A amplitude altimétrica dentro da voçoroca foi de 36 m na parte alta da encosta, especialmente próximo à cabeceira, com altitudes de 551 a 587 m. Na porção intermediária da encosta, a variação foi de 29 m, de 551 a 580 m. Já na porção baixa, a voçoroca apresenta 26 m de amplitude, entre 551 e 577 m. A amplitude da encosta não erodida é menor que 25 metros, de 562 a 587 m ao longo dos 480 m de extensão. Essa amplitude não confere, necessariamente, alta energia para o escoamento de fluxo superficial em sua extensão.

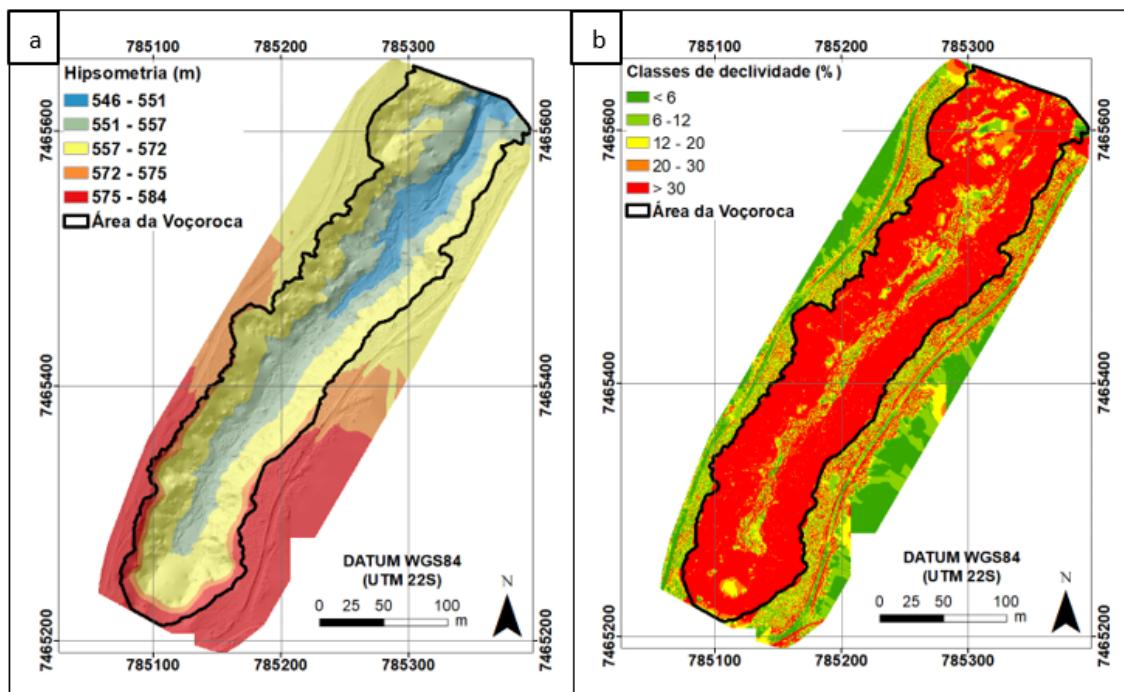


Figura 17 – a) Mapa Hipsométrico; b) Mapa de declividade

Quanto às classes de declividade, foram utilizadas as estabelecidas por Ross (1994), cujos valores são atribuídos a graus de fragilidade ambiental. As classes são menor que 6% (muito fraco), de 6 a 12% (fraco), de 12 a 20% (médio), de 20 a 30% (forte) e maior que 30% (muito forte). A classe de maior ocorrência é referente declividades maiores que 30% (Tabela

6), referentes às vertentes erodidas no interior da voçoroca de maior dissecamento (Fig. 17b), revelando o caráter mais encaixado do sistema de escoamento. A encosta em que se situa a voçoroca apresenta declividades majoritariamente mais baixas, fato que leva à ampliação lateral da voçoroca e a definição de formas retangulares na vista em planta da erosão.

Tabela 6 - Classes de declividade e área ocupada.

Classes de declividade	Área ocupada no terreno analisado (%)
< 6%	15,77
6 - 12%	12,66
12 - 20%	11,86
20 - 30%	10,05
> 30 %	49,67

As orientações das vertentes foram utilizadas para identificar o sentido do cimento das mesmas (Tabela 7; Fig. 18). Foi possível observar um comportamento homogêneo predominante na voçoroca, tendo a margem oeste superfícies com orientações predominantes para sudeste e a margem leste prioritariamente para noroeste. Entretanto, destacam-se alguns pontos de maior heterogeneidade, o que pode favorecer o redirecionamento do escoamento concentrado levando a reformulação das bordas da incisão.

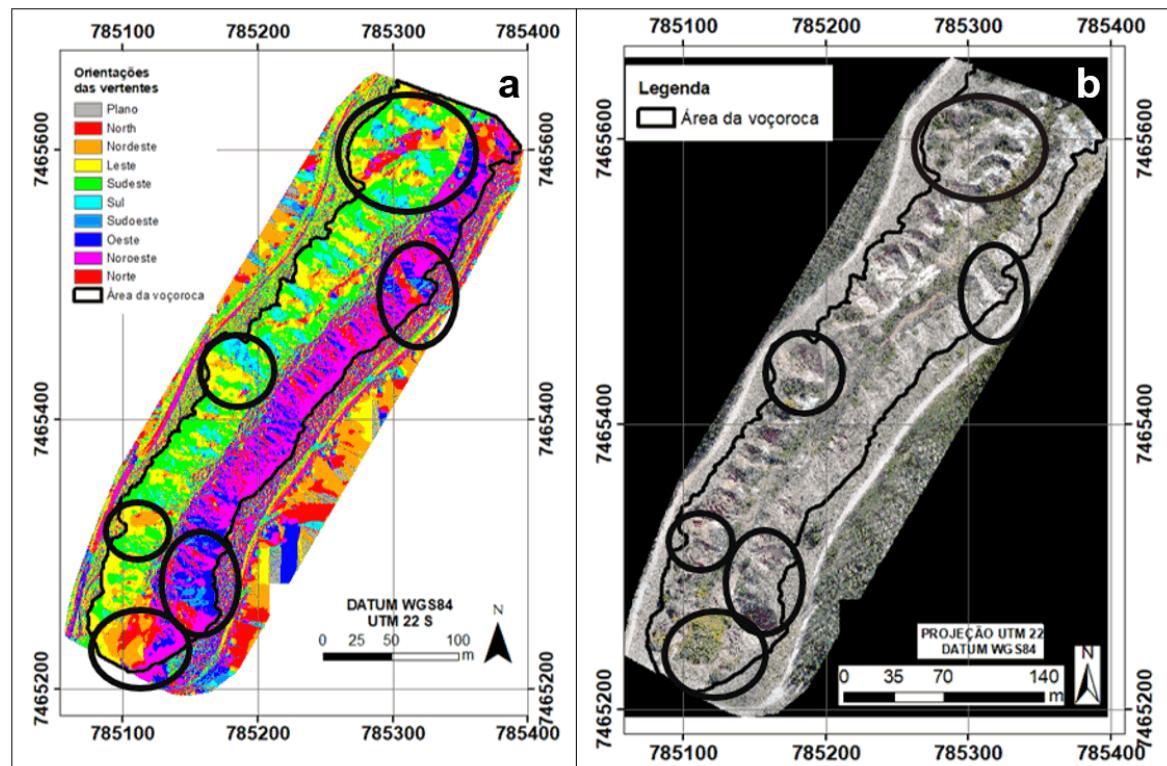


Figura 18 – Mapa de orientação das vertentes. Com círculos são destacadas as áreas com maior heterogeneidade nas orientações.

Tabela 7 - Orientação das vertentes

Orientação	Plano	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oeste	Noroeste
Ocorrência (%)	1,03	12,67	13,91	16,96	16,38	6,57	4,03	9,92	18,52

6.1 Caracterização das feições erosivas no interior da voçoroca

Visando identificar e correlacionar feições e mecanismos, foi realizada a análise dos produtos gerados pela fotogrametria com base nas feições mais comuns propostas por Oliveira (2007). Bastante comum no interior de voçorocas, os *demoiselles* são feições erosivas formadas lentamente pela ação intercalada de *splash erosion*, deslocamento de partículas de solo com a queda de gotas de chuva, e da erosão por escoamento superficial difuso em áreas desprovidas de vegetação (Oliveira, 2007). Trata-se de uma feição esculpida em solos protegidos por objetos como grânulos e seixos de minerais variados que resistem ao efeito *splash* (Carvalho et al., 2006). Oliveira (2007) aponta que, por dependerem da ação da água da chuva, a altura dos *demoiselles* podem ser usadas como parâmetro para estimar a taxa de ablação pluvial da superfície onde são formados. No entanto, no contexto de estiagem em que foram levantados os produtos fotogramétricos, não foram identificadas tais feições na voçoroca. Isso permitiu considerar que a erosividade pluvial não se mantém elevada e constante ao longo do ano, de permitindo a formação e preservação de proeminentes pedestais, inclusive em época de menores índices pluviométricos.

Assim como os pedestais, as crostas são feições fruto do *splash erosion* em solos sem cobertura vegetal, porém sem a intercalação de mecanismos (Oliveira, 2007). Sua frequência depende da recorrência de eventos pluviométricos intensos que deslocam partículas de silte e argila através do impacto de gotas de chuva. Este processo resulta na compactação ou endurecimento da superfície do terreno, diminuindo a infiltração de água e promovendo o aumento do escoamento superficial que causa as incisões erosivas (Oliveira, 2007).

As superfícies encrostadas na voçoroca foram identificadas em maior extensão à jusante do trecho analisado, em ambas as margens, predominando sobre solos franco-arenosos (Fig. 19). Os filetes subverticais são ocorrências comuns em solos pouco coesos em paredes de voçorocas, porém também podem ocorrer em materiais de maior coesão (Oliveira, 2007). Essa feição é possibilitada pelo escoamento superficial concentrado que permite a formação de sulcos, ravinas e alcovas. Na área de estudo, estas feições estão dispostas ao longo da voçoroca, majoritariamente associadas às cicatrizes de escorregamentos (Fig. 20a), com extensões de cerca de 1 a 3 m. Essas feições favorecem o escoamento superficial concentrado, o qual favorece a formação de alcovas e marmitas.

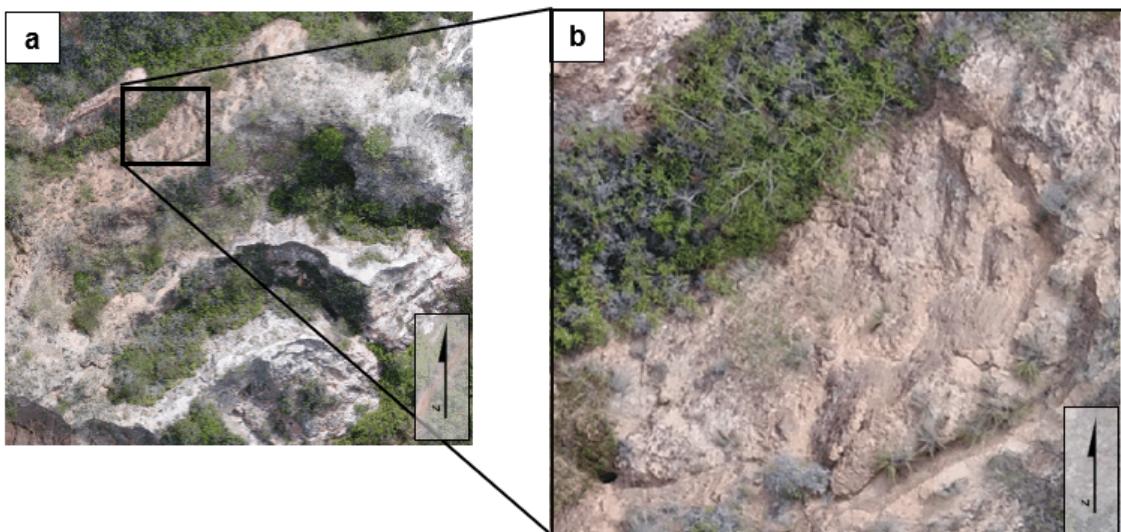


Figura 19 – a) Topo de taludes na margem oeste próximo a baixa vertente da voçoroca, totalizando uma área de cerca de 600 m² com encrustamento da superfície na margem oeste da voçoroca e a jusante do trecho analisado. Está associado a outras feições causadas pelo escoamento superficial favorecido pela crosta; b) Detalhe da superfície encrustada.

Segundo Oliveira (2007), as alcovas de regressão são feições erodidas pelo escoamento superficial na forma de filetes subverticais, pela exfiltração do lençol freático, ou ainda pela combinação dos dois mecanismos. Essas feições foram identificadas em 15 pontos ao longo da voçoroca. As alcovas mais preservadas apresentam teto abobadado e o assoalho preenchido por materiais inconsolidados erodidos da parte superior (Fig. 20b), com diâmetro do eixo maior variando em até 5 m. Na área de estudo, as alcovas estão comumente associadas aos filetes subverticais e às marmitas.

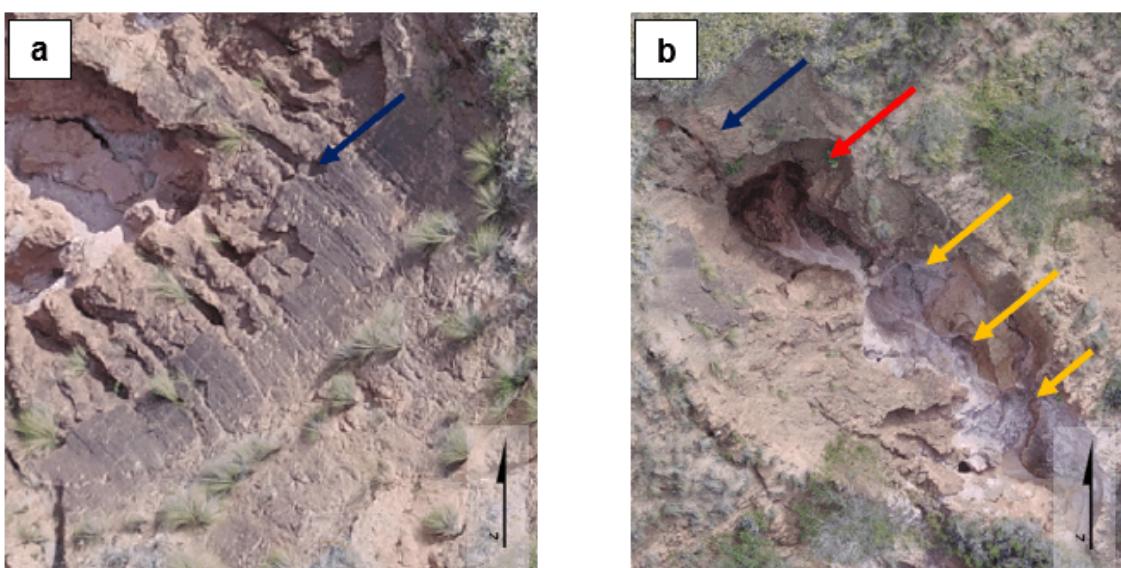


Figura 20 – a) Indicados pela seta azul, filetes subverticais variando de 1 a 2,5m de extensão; b) Indicados pela seta azul, filetes subverticais de até 2,8 m de extensão. Alcova de regressão de 3m de diâmetro no eixo NE/SW, indicada pela seta vermelha, e marmitas coalescentes de até 2,5 m de diâmetro no eixo NE/SW, associadas em cascata, indicadas pelas setas amarelas

As marmitas ou panelas (*plunging pools*; Oliveira, 2007), indicam a ocorrência de erosão por quedas d'água na base de talude ou nos degraus das voçorocas. Em geral, assim como as remanescentes na área de estudo, as marmitas apresentaram geometria ligeiramente dissimétrica, com maior profundidade a montante e menor a jusante e se formam em conjunto no sentido do escoamento da água, como uma cascata de pequenas feições arredondadas conectadas até os níveis mais baixos (Fig. 20b), antecedendo os depósitos de areia liquefeita.

Os pináculos, altos testemunhos isolados no interior da voçoroca, foram identificados nos 200 m finais do trecho analisado (Fig. 21a,b). Essas feições são comumente relacionadas à resistência dos solos à erosão que varia conforme desequilíbrios na estrutura físico-química deles. Solos típicos com essa erosão possuem baixa capacidade de absorção, fazendo-a de maneira muito lenta, caracterizando-se como solos saprolíticos (Bertoni e Leonardi, 1999). Sulcos e ravinas são feições frequentes no interior de voçorocas, o que indica percurso de escoamentos superficiais concentrados (Oliveira, 2007). Na área de estudo essas feições são mais comuns na baixa vertente e em solos mais arenosos (Fig. 21c,d).

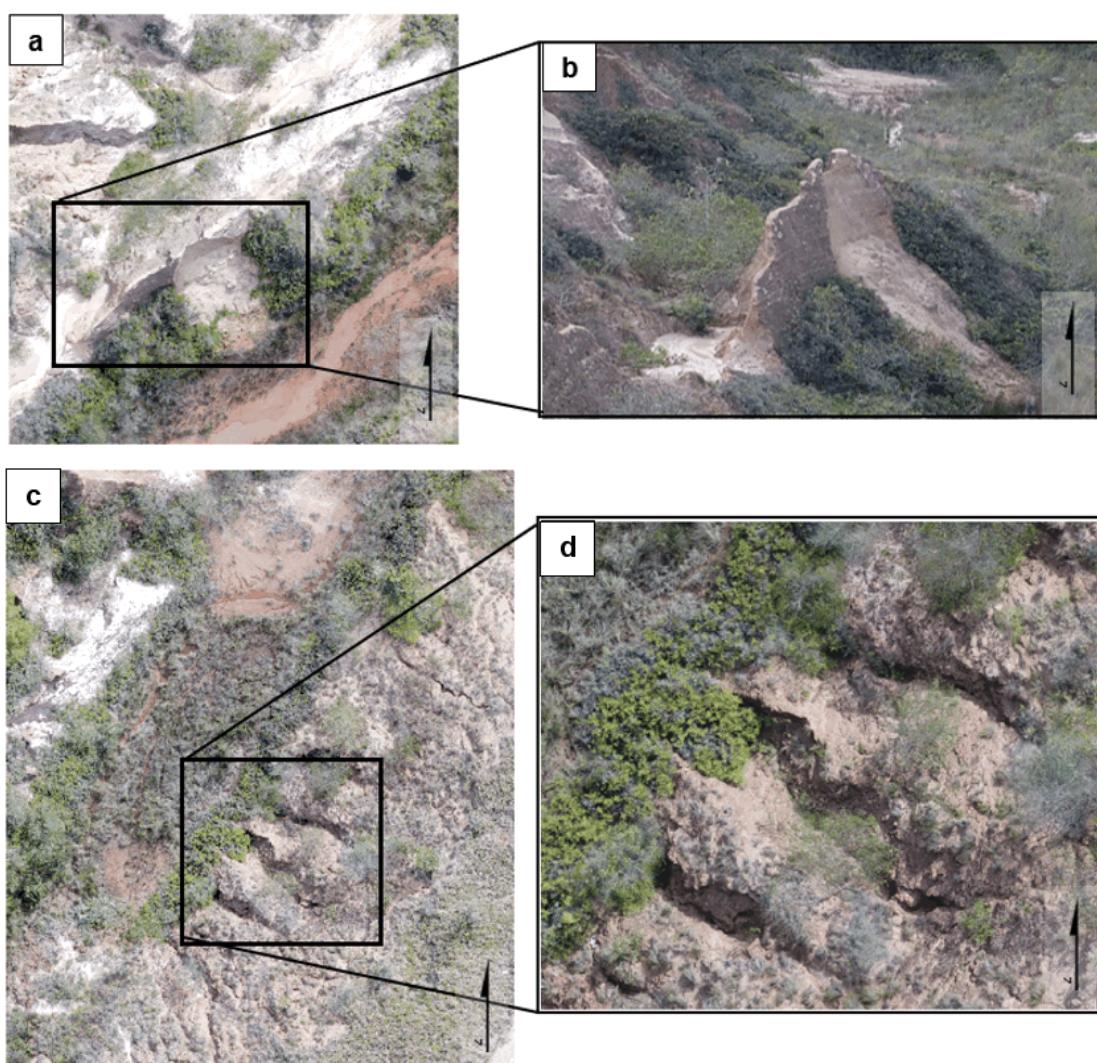


Figura 21 – a) Vista ortogonal de pináculo em saprolito, direção do eixo maior NE/SW, voo automático b) Detalhe do pináculo em saprolito, fotografia aérea em voo manual; c) Vista ortogonal de ravinas na margem oeste da voçoroca; d) Detalhe das ravinas em (c). Elas apresentam de 8 a 13 metros de comprimento.

Dutos e caneluras indicam variações das características mecânicas das coberturas superficiais (Oliveira, 2007). Segundo o autor, os dutos são esculpidos pela convergência de fluxo superficial (quedas d'água) para o interior de fendas ou de macroporos biogênicos, os quais podem interagir com ressurgências na zona de saturação. Para Carvalho et al. (2006), os dutos ocorrem quando o fluxo de água subterrâneo passa a correr em zonas preferenciais de maneira concentrada, provocando a remoção de sedimentos que podem levar ao colapso do teto acima do duto e alargamento da voçoroca (Bertoni e Lombardi Neto, 1990; Oliveira, 2007). Na área de estudo, a presença de dutos biogênicos são abundantes. Esses são encontrados desde a cabeceira da voçoroca até o final do trecho analisado. Eles predominam em porções superficiais favorecendo a infiltração de água da chuva, e são identificados como feições arredondadas que medem cerca de 15 a 30 cm de diâmetro (Fig. 23a, b). Em menor proporção os dutos ocorrem em porções mais baixas (Fig. 23c, d), no contato solo/saprólito, o que favorece a aparição de alcova de regressão (Carvalho et al., 2006). Não foram identificadas caneluras referentes a feições de retrabalhamento do talude com saliente aprofundamento vertical, remetendo-se a um duto aberto.

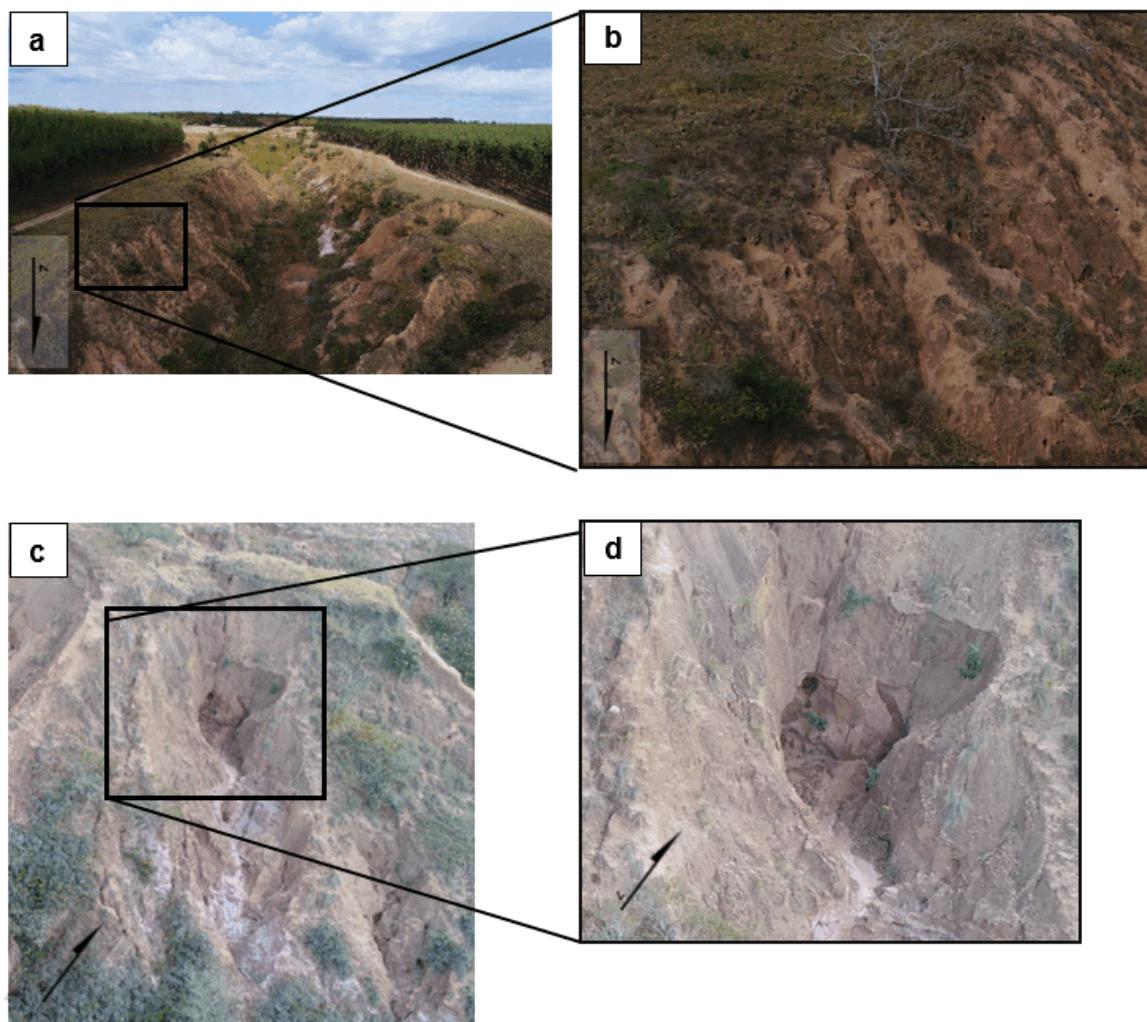


Figura 23 – a) Vista aérea, via fotografia por VANT em voo manual, de dutos biogênicos em talude na margem leste voçoroca; b) detalhe da feição em (a); c) Vista frontal de duto biogênico em alcova em talude na margem oeste voçoroca; d) detalhe da feição em (c).

Em decorrência do movimento de expansão e contração de argilominerais ou pela ação de mecanismos que causam sobrecarga ou solapamento, originam-se trincas ou fendas que dividem o solo permitindo que haja percolação de água oriunda da superfície da encosta. Na área de estudo as trincas predominam nos taludes que sofreram escorregamentos (Fig. 24).

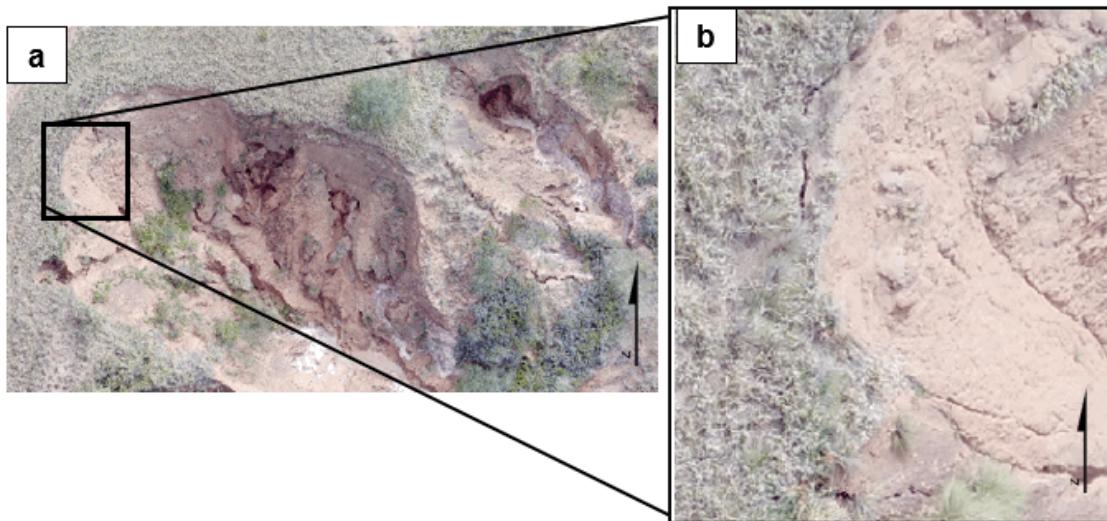


Figura 24 – a) Vista ortogonal de fenda de tração relacionada a um movimento de massa em talude na margem oeste voçoroca; b) Detalhe da feição em (a).

As quedas de areia podem ser provocadas tanto por instabilidades associadas a movimento de massa localizados, quanto pela exposição à chuva e a filetes d'água. O material de baixa coesão e com alto grau de saturação pode sofrer liquefação espontânea se transformando em fluxo (Oliveira, 2007). Na voçoroca foi possível constatar os depósitos liquefeitos possivelmente atrelados a elas (Figura 25).

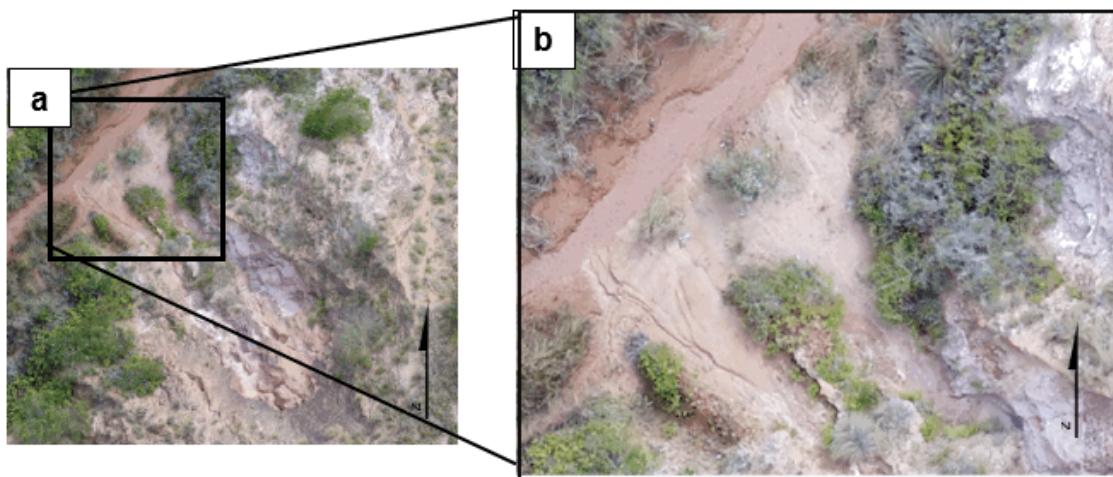


Figura 25 – a) Vista ortogonal de depósito sedimentar liquefeito no sopé de talude na margem leste da voçoroca; b) Detalhe da feição em (a).

Já as quedas de torrões segundo Oliveira (2007), caracterizam movimentos de massa propulsores de solapamento da base de taludes e quedas de material das fendas de tração (Figura 26).

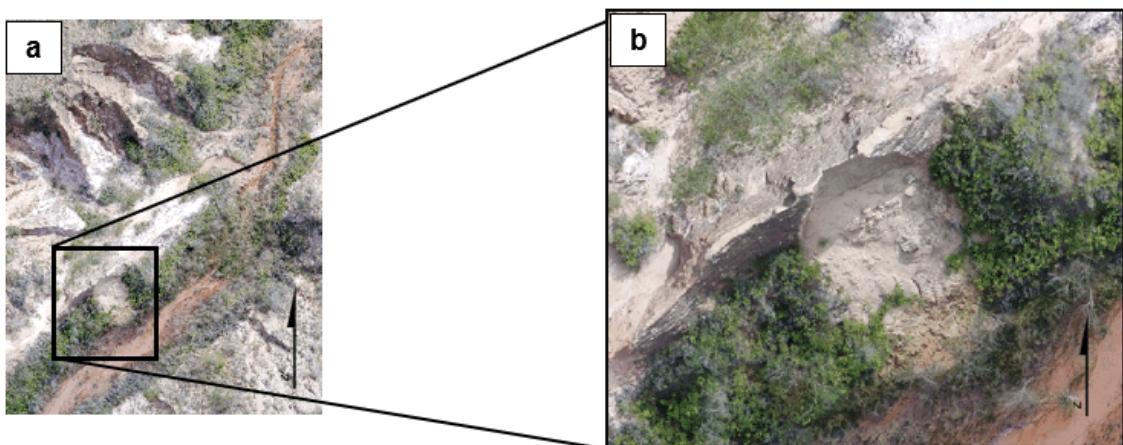


Figura 26 – a) Vista ortogonal de queda de torrões em pináculo no interior da voçoroca, próximo ao curso do lençol aflorante; b) detalhe da feição em (a).

Costelas e depressões, segundo Nascimento (1998) (apud Oliveira, 2007), são feições mais ou menos simétricas que ocorrem em materiais de diferentes origens (aluvial, coluvial, eólico, etc.). Estas indicam variações em profundidade e diferença na resistência dos materiais. Denunciam também a ação de filetes subverticais ou exfiltração do lençol freático, que provocam o arraste de partículas por percolação. No caso da exfiltração (Oliveira, 2007), não ocorrem feições de detalhe, como escamas e filetes. Num processo de intensa desagregação mecânica, a costela poderá evoluir para outras feições, como para marmitas residuais ou alcovas de regressão. As costelas e depressões identificadas na voçoroca são raras e associadas aos sedimentos arenosos na baixa vertente (Fig. 27).

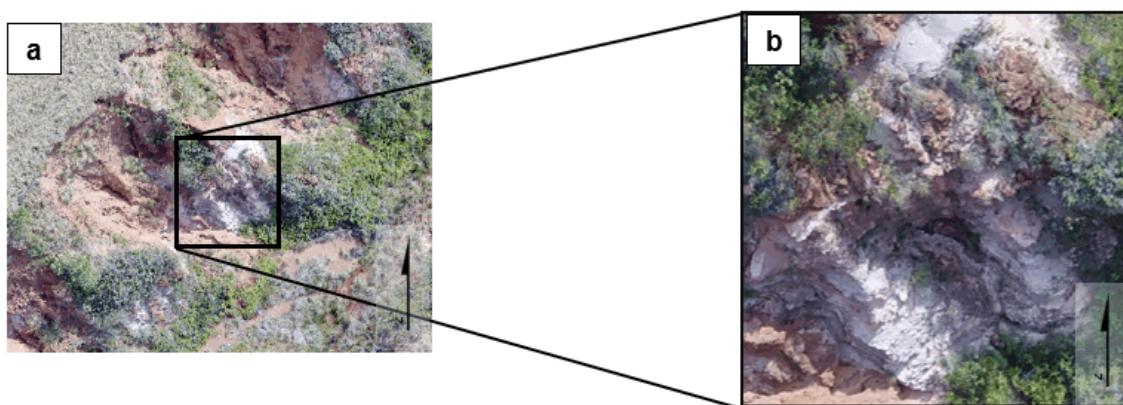


Figura 27 – A) Vista ortogonal de costelas e depressões na base do talude da margem oeste voçoroca; b) Detalhe das feições em (a).

Os movimentos de massa constituem as feições de extensão a montante ou ao alargamento das incisões erosivas (Oliveira, 2007). Essas feições são comuns nas vertentes da voçoroca como escorregamentos planares (translacionais), os quais ocorrem nos planos de fraqueza da rocha alterada e são favorecidos pela saturação. Em menor proporção, os escorregamentos rotacionais (*slumps*), decorrentes do solapamento basal, permanecem com

vegetação superior mesmo depois da queda. Esses movimentos foram identificados a partir dos resíduos deixados imediatamente abaixo das bordas da incisão (Fig. 28).

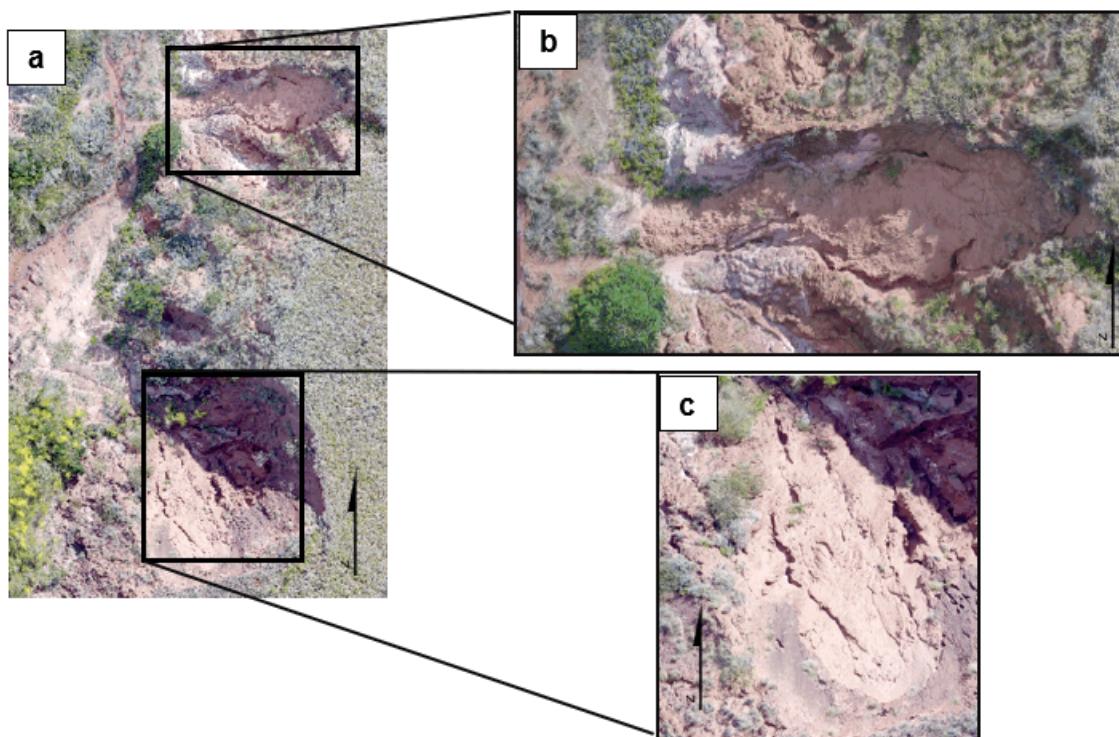


Figura 28 – a) Vista ortogonal de movimentos de massa na margem leste da voçoroca, planar e rotacional; b) Escorregamento rotacional em detalhe; c) Escorregamento planar em detalhe.

Poças de ressurgência do lençol freático não foram identificadas no local de estudo. Sua identificação é fundamental para a adequação de projetos de correção de voçorocas (Oliveira, 2007). Tratam-se de zonas depressivas e relativamente simétricas, distantes das bordas de incisão, o que não permite a confusão com marmitas. As feições de detalhe, denominadas escamas, também não foram identificadas na voçoroca. Elas indicam a atuação lenta da água ao remover partículas finas, expondo frações grosseiras nas paredes e evidenciando locais de menor atividade erosiva. As feições identificadas são sumarizadas na Tabela 8, onde foram associadas aos seus respectivos mecanismos de formação, e espacializadas na Fig. 29.

De modo geral, as feições são mais diversificadas nas regiões com menor cobertura vegetal, em especial próximo a cabeceira da erosão. Os resultados obtidos revelam forte atuação de escoamentos superficiais e a variação na resistência dos materiais constituintes da voçoroca. Por outro lado, ressalta-se a predominância de dutos, especialmente biogênicos. Essas feições são as de maior ocorrência na área, predominando em horizontes superficiais nas paredes da voçoroca, e quando em horizontes subsuperfícias estão associados às alcovas, revelando ação de erosão por queda d'água que propicia a expansão desses e aumenta a capacidade de transporte de material erodido, favorecendo o colapso do material do teto por fluxos subsuperficiais, o que pode levar à ampliação da voçoroca. Esses dutos

podem atingir centenas de metros enfraquecendo o solo e estabelecendo regiões de percolação preferencial (Fendrich et al., 1997).

Tabela 8 - Resumo das feições identificadas, mecanismos associados e ocorrência

Feições	Mecanismos	Ocorrência
Pedestais	Salpicamento intercalado com a remoção de partículas pelo escoamento superficial	Não identificados
Crosta	Salpicamento	Maior ocorrência nos solos mais arenosos
Filetes subverticais	Escoamento superficial	Alta frequência de ocorrência
Alcovas	Escoamento superficial em filetes subverticais e/ou infiltração do lençol freático	Alta ocorrência, associada aos filetes subverticais
Pináculos	Deslocamento de partículas por impacto de gotas de chuva.	Raros
Sulcos e ravinas	Transporte de partículas por fluxo concentrado	Ocorrência associada aos solos mais arenosos
Piping	Erosão por fluxos concentrados em túneis ou dutos. Interações entre erosão por queda d'água e eventuais ressurgências de zonas de saturação	Alta ocorrência, predominante nos horizontes mais superficiais do solo.
Caneluras	Erosão por queda d'água (plung pool erosion).	Não identificadas
Marmitas/panelas	Interação entre erosão por queda d'água e fluxos de adesão	Ocorrência associada às alcovas.
Quedas de areia	Liquefação espontânea de materiais inconsolidados e não coesivos	Ocorrência intermediária. Média e alta vertentes.
Quedas de torrões	Movimento de massa	Baixa ocorrência
Costelas e depressões	Ação de filetes subverticais e exfiltração do lençol freático	Baixa ocorrência. Associadas a baixa vertente
Fendas	Movimento de massa	Associadas aos movimentos de massa
Movimentos de massa	Diminuição a resistência ao cisalhamento/ aumento as tensões cisalhantes. Escoamento superficial ou solapamento da base por ressurgência de lençol freático	Ocorrência associada aos solos mais argilosos. Média e alta vertente.
Poças de ressurgência	Ressurgência do lençol freático	Não identificadas
Escamas	Deslocamento de partículas por impacto de gotas de chuva.	Não identificadas

Destaca-se que as feições identificadas no interior da incisão foram registradas no período de estiagem onde os contornos exibidos já não estão mais bem delimitados como os que forma em seguida de períodos chuvosos. Assim, feições oriundas de erosão por queda d'água como alcovas e marmitas acabam por apresentar alterações em suas bordas.

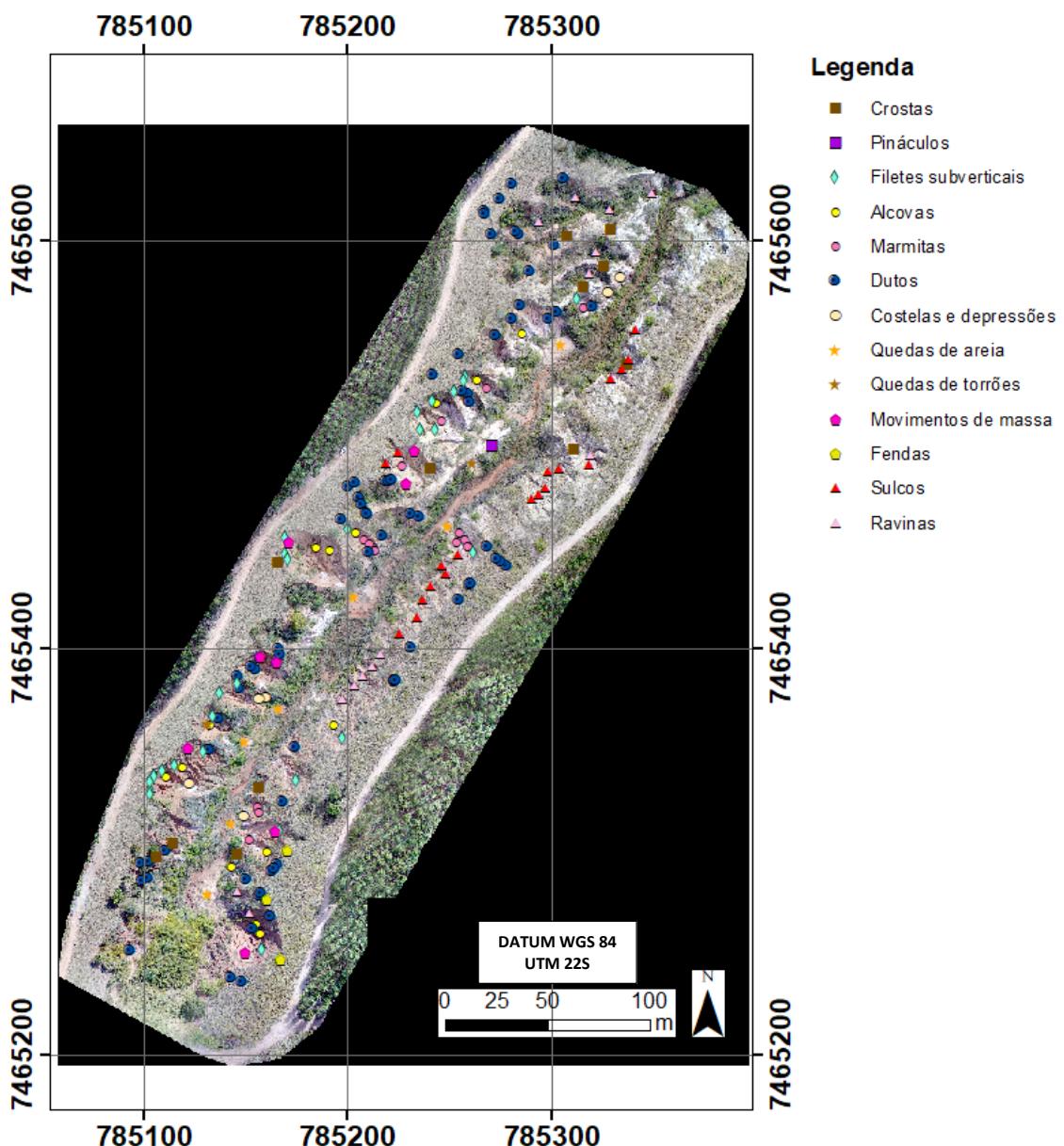


Figura. 29 – Espacialização das feições observadas na voçoroca

A comparação entre o modelo 3D, ortomosaico, MDT e MDS da primeira aquisição aerofotogramétrica (17/07/2021) com a segunda (24/09/2021) realçou modificações sutis (Fig. 30) em feições anteriormente classificadas, como o preenchimento de algumas alcovas e panelas, bem como a maior dissecação de sulcos e destaque de fendas nas bordas.

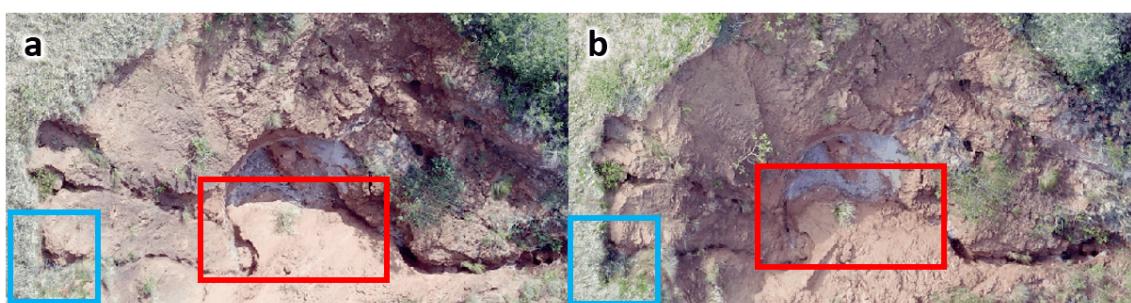


Figura 30– Exemplo de mudança erosiva entre os dois períodos de aerolevantamento a) alcova em vermelho e cicatriz de erosiva em azul. a) orotofoto de 17/07/2021; b) orotofoto de 24/09/2021, nota-se sutil aumento no conteúdo sedimentar no interior da alcova e aumento na cicatriz erosiva.

6.2 Evolução temporal

6.2.1 Análise dos espectros de amostras

Constatou-se que o solo S1 (representado em campo pelo de coloração mais clara) apresenta maior reflectância que o solo S2 (representado em campo por coloração avermelhada). Mesmo assim há um comportamento bastante semelhante entre os dois, corroborando com análise tático-visual em que se distingue ambos essencialmente por suas texturas e colorações, decorrente de um mesmo material geológico.

Considerando a classificação de curvas espectrais de solos (Dotto et al., 2019) e as curvas espectrais das amostras (Fig. 31a), observa-se que ambos os solos apresentam absorção em formato “V” em 2200 nm, com alto de reflectância em comprimentos imediatamente menores. Esse comportamento é típico da presença de caulinita em solos. Já no intervalo entre 760 e 1150 nm, observa-se um aspecto côncavo na curva espectral, apenas em S2, indicando a presença de óxido de ferro. Porém, a mesma apresenta-se atenuada neste intervalo, o que pode indicar a presença de matéria orgânica.

Segundo Dotto et. al (2019), solos podem ser diferenciados conforme suas curvas espectrais. Dessa forma, o solo S1 coletado na voçoroca do presente estudo se assemelha a SEC 5 da figura e o solo S2 a SEC 4 (Fig. 31b). Esses solos são referidos como:

- SEC 4: Baixo teor de areia, argila média e silte, baixo carbono orgânico, alta fertilidade, altas temperaturas – em torno de 26 °C – e precipitação anual, alto balanço hídrico do solo e potencial evapotranspiração localizado em baixa altitude;
- SEC 5: Alto teor de areia e baixo teor de argila e silte, baixo teor de carbono orgânico, baixa fertilidade, temperatura anual em torno de 22 °C, alta precipitação anual e balanço hídrico do solo, alto potencial de evapotranspiração localizado e elevado.

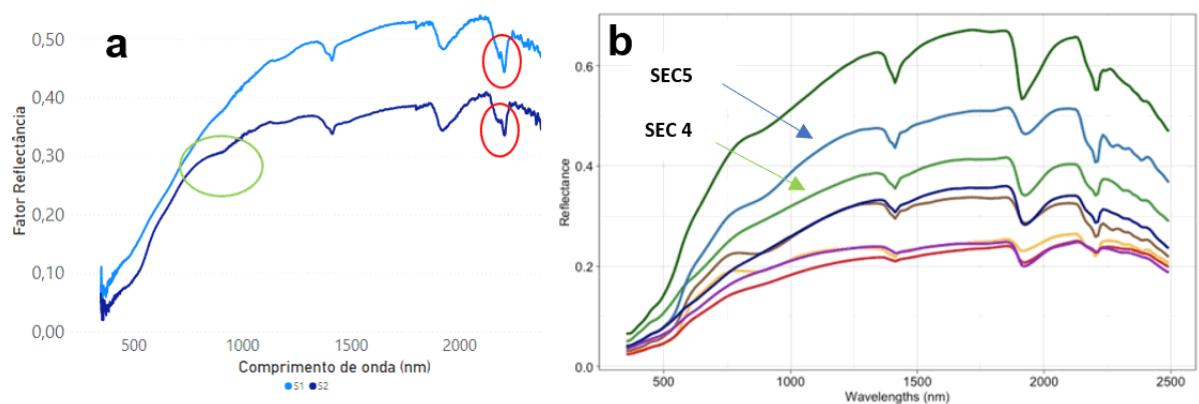


Figura 31 – a) Curvas espectrais dos solos coletados na voçoroca de estudo, em vermelho a feição indicativa de Caulinita e em verde de óxidos de ferro.; b) Curvas espectrais de diferentes solos (extraído de Dotto et al., 2019).

6.2.2 Análise dos dados TM e OLI

Utilizando as curvas espectrais dos solos da voçoroca como referência, foi composta uma série temporal com os sensores TM e OLI, com datas de 1984, 1986, 1988, 1990, 1993, 1995, 1997, 2000, 2002, 2004, 2005, 2006, 2008, 2010, 2011, 2015, 2016, 2017, 2020 e 2021 (Figura 32). Nesta série é possível identificar que a região apresenta mata ciliar com maior consolidação a partir do ano de 1990 (cor verde próxima a drenagem), predomínio solo exposto até 2005 (cor magenta) e, em 2006, o surgimento de áreas cobertas por cultura de eucalipto (cor verde uniforme). A cultura de eucalipto se consolida a partir de 2008, quando ainda não há transformação lateral na macroconfiguração da erosão.

Figura 32– Evolução temporal da área de estudo com imagens do sensor TM (de 1984 a 2011), do sensor OLI (2011 a 2021) e atual da plataforma GoogleMaps (Nov/2021).

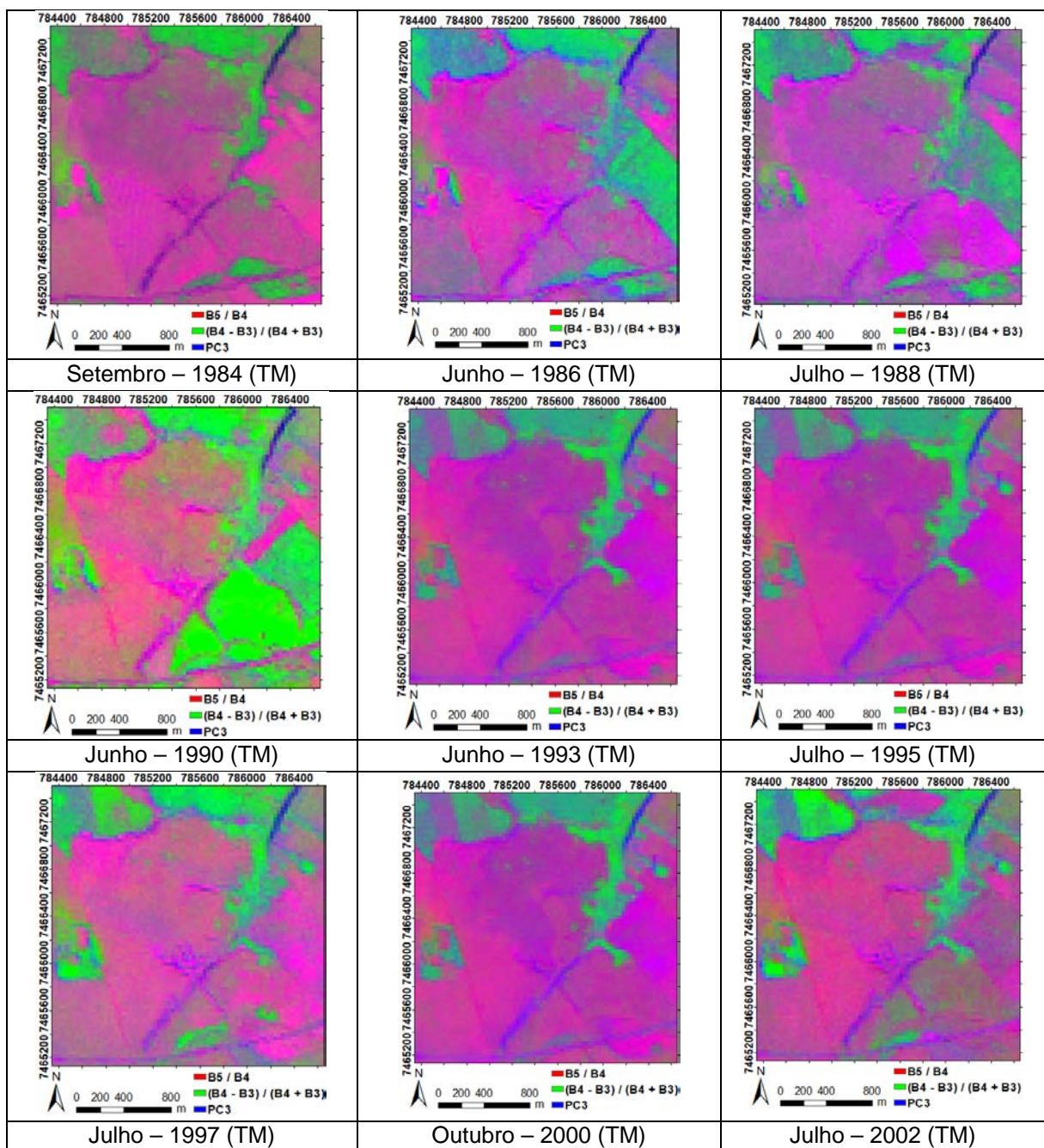
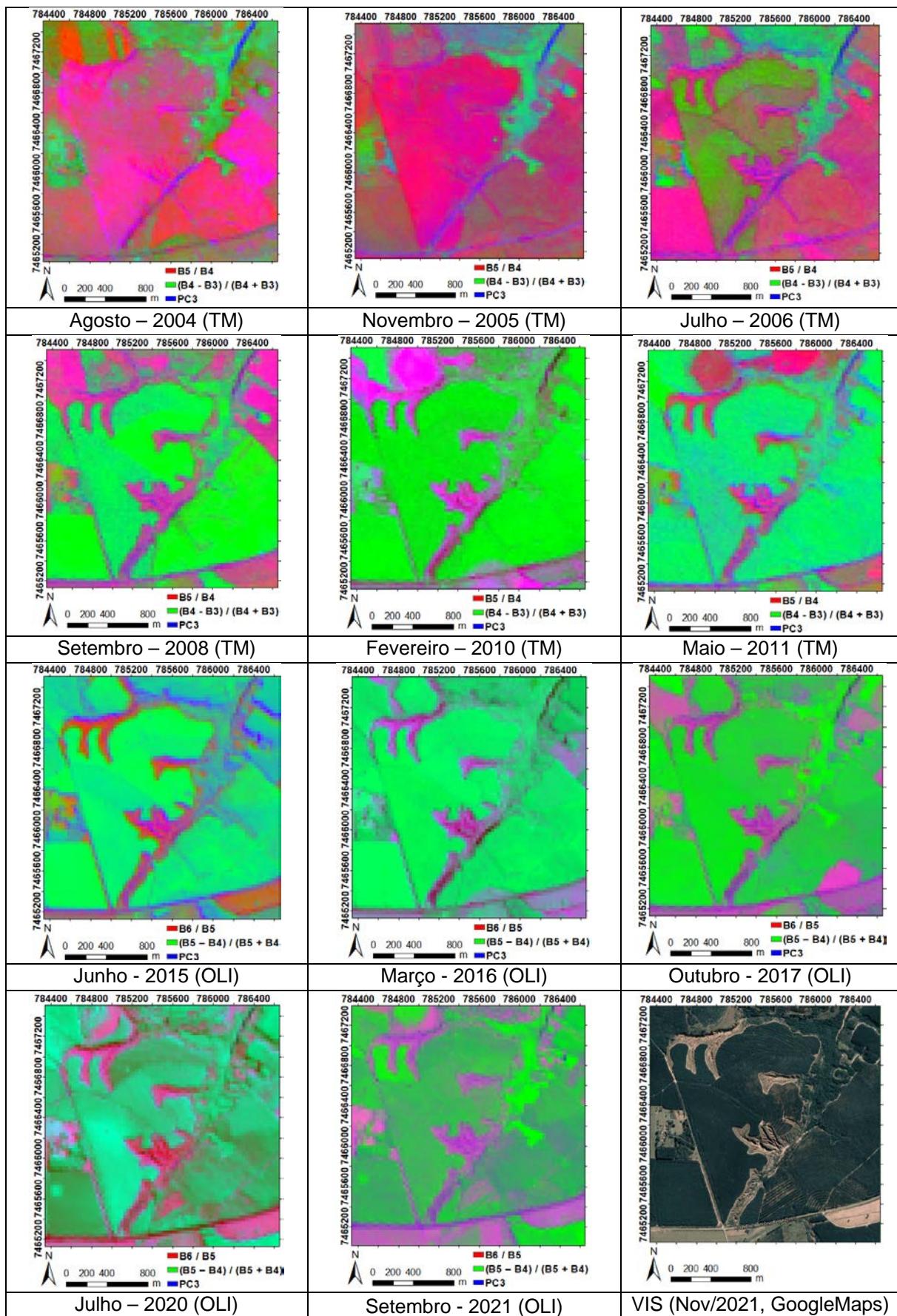


Figura 32 – Continuação...



6.2.3 Análise dos dados Sar

Com o produto do processamento das imagens SAR, foi possível notar uma alteração das paredes da voçoroca nos anos de 2016 a 2021 (período com imagens disponíveis para a análise). Áreas menos erodidas apresentaram menor reflexão na imagem de 2016, sugerindo vertentes menos dissecadas, com uma morfologia possivelmente mais plana favorecendo uma reflexão aproximadamente espelhada. Já a morfologia mais recente se revelou mais dissecada, se aproximando de um refletor frontal obtuso ao permitir refletir mais sinal na direção do sensor. Ao construir uma composição com essas duas imagens na forma $R = 2016$, $G = B = 2021$, a cor ciano (verde + azul) indicou regiões onde em 2016 eram menos dissecadas que em 2021, ou seja, mais erodidas atualmente (Fig. 33). Portanto, a voçoroca se manteve ativa no período analisado e em quais porções foram as maiores atividades. A coloração escura indica baixa reflexão em ambas as dadas, podendo ser associada a reflexão espelhada da água e do solo plano no fundo da voçoroca ou ainda a uma zona de sombra, dada a verticalidade das paredes da feição e presença de vegetação alta ao redor.

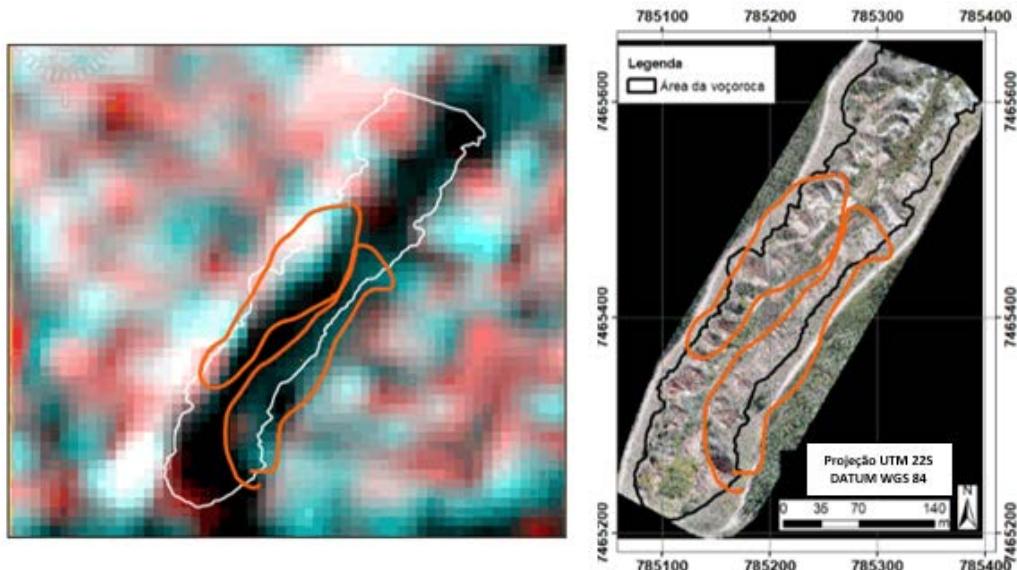


Figura 33 – Composição colorida da imagem SAR, em ciano áreas alteradas em 2021, em preto áreas que se mantiveram com mesmo comportamento refletor e em vermelho áreas em que hoje apresenta menor dissecação. Delimitado em laranja áreas de maior alteração nos últimos 5 anos.

6.2.4 Análise dos dados InSar

Com o InSAR foi possível traçar perfis longitudinais nas áreas mais alteradas, indicadas no item anterior, além de um perfil central (Fig. 34) comparando imagens entre 2016 e 2021. O Perfil 1 revela uma diferença na elevação de cerca de 3,9 cm. Os perfis 2 e 3 indicam uma diferença 5 cm entre as áreas de menor e maior elevação. Todos os perfis indicam maiores elevações da superfície a montante. Além disso, o Perfil 2 revela a menor deposição (em azul) na mesma região em que o lençol d'água aflora mais intensamente (a 280 metros da cabeceira, nas altitudes de 546 a 551 m), o que pode ser resultado da maior energia de

transporte na mais baixa vertente e menor na mais alta onde os sedimentos são erodidos, mas pouco transportados. Isso é possível de ser visualizado através da diferença entre os valores presentes nos gráficos. As áreas com valores menos positivos indicam menor deposição, e as com valores mais positivos, maiores deposições que culminaram na elevação da superfície estudada. Ressalta-se que na cabeceira da voçoroca, distante das margens laterais, os valores de deslocamento positivo podem refletir o crescimento de vegetação.

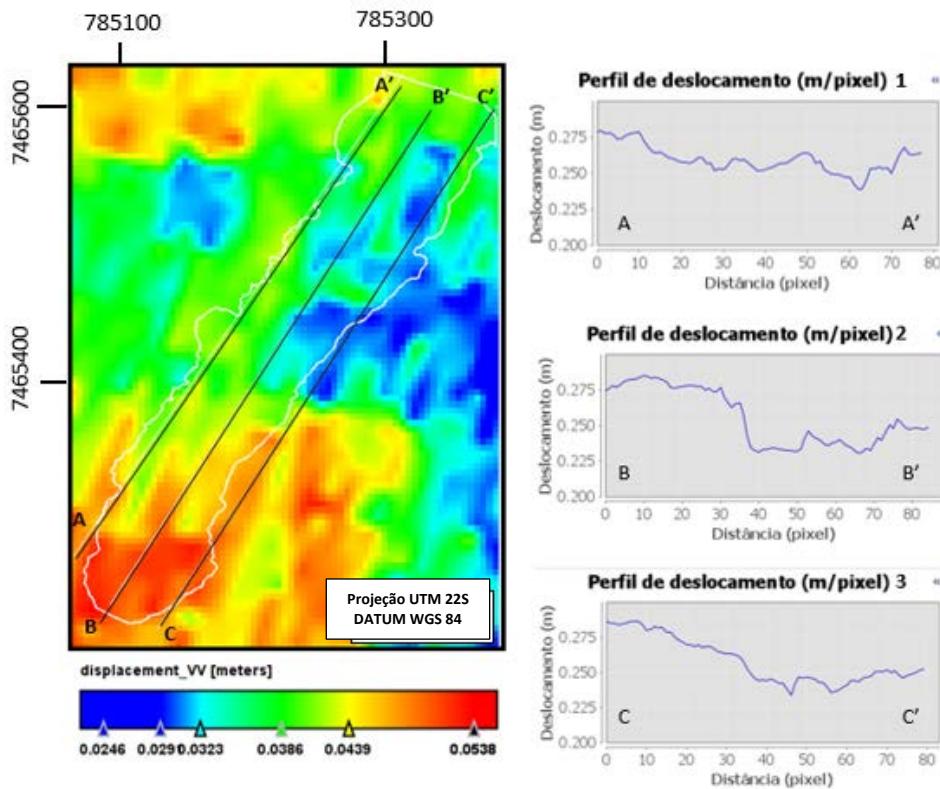


Figura 34 – Interferometria em imagens SAR de 2016 e 2021. Os perfis longitudinais indicam a variação entre a superfície do terreno e o satélite em relação ao período de estudo. A área indicada em vermelho revela uma variação de cerca de 4,9cm em profundidade em relação a jusante, onde houve menor aprofundamento, já a área próxima à cabeceira da erosão, indicada em laranja, revela um aprofundamento de 2,5 cm

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A voçoroca estudada está a menos de 30 metros da rodovia SP - 147, no município de Anhembi – SP com conexão direta com o Ribeirão dos Remédios, afluente de ordem inferior da Bacia Hidrográfica do Médio Tietê. Possibilitando que os sedimentos erodidos impactem a jusante e assoreiem os afluentes do Rio Tietê, afetando os reservatórios como o de Barra Bonita. Além elevar os riscos quanto à estrutura rodoviária em suas adjacências.

A geologia e pedologia configuram à erosão duas margens com características diferentes. Onde há o afloramento rochoso, na base da margem oeste e na porção baixa da encosta, ocorre maior heterogeneidade nas direções das vertentes. A voçoroca apresenta uma transição lateral entre solos que se assemelha a transição Argissolo vermelho-amarelo

na alta encosta para Neossolo Quartzarênico na baixa encosta. Em relação a transição lateral de solos ao longo da feição, é perceptível a predominância nos solos semelhantes ao Argissolos Vermelho-amarelos de orientações de vertentes que se convergem e refletem em um aspecto de entalhamento mais profundo, enquanto sobre os solos semelhantes aos Neossolos Quartzarênicos há maior homogeneidade nas orientações das faces erosivas.

A heterogeneidade nas direções de vertentes pode favorecer nesses locais o redirecionamento do escoamento concentrado levando a reformulação das bordas da incisão, como a ramificação presente na margem oeste na baixa encosta, e o aprofundamento das feições erosivas como ocorre nos solos de textura média/argilosa. As feições erosivas no interior da voçoroca são mais diversificadas nas regiões com menor cobertura vegetal, sobretudo onde predominam os solos que se assemelham aos Argissolos. Os resultados obtidos revelam forte atuação de escoamentos superficiais e a variação na resistência dos materiais constituintes da voçoroca. Por outro lado, os dutos biogênicos quando em horizontes subsuperficiais estão associados às alcovas, revelando ação de erosão por queda d'água que propicia a expansão desses e aumenta a capacidade de transporte de material erodido. Isto pode favorecer o colapso do material do teto por fluxos subsuperficiais, e levar à ampliação da voçoroca essencialmente quando em períodos chuvosos que elevam o nível de base.

A voçoroca estudada é do tipo integrada, irregular, de porte “Muito grande”, com extensão estudada de 490 metros, direção NE/SW com saprolito possivelmente originado de arenitos da Formação Pirambóia aflorados na cota de 549 metros. Possui seus primeiros 90 metros em alta vertente, desconectados do escoamento concentrado, e sua extensão restante conectada. Apresenta forma de estágio avançado de evolução com calha em forma próxima de “U” e cobertura vegetal presente, porém menor que 2%, o que a caracteriza como vertente com erosão em estágio ativo. Seu volume nas duas aquisições (Julho/2021 e Setembro/2021) esteve acima de 600.000 m³, com 634.652,24 m³ na primeira aquisição e de 621.426,42 m³ na segunda.

A variação na amplitude da encosta não erodida foi menor que 30 m, variando de 557 a 584 m ao longo 490 m de extensão, não conferindo necessariamente alta energia para o escoamento de fluxo superficial em sua extensão. A encosta em que se situa a voçoroca apresenta declividades majoritariamente mais baixas, fato que leva à ampliação lateral da voçoroca e a definição de formas retangulares na vista em planta da erosão.

Quanto à evolução temporal da erosão, foi possível constatar que a mesma já existia em 1984 cercada por áreas de pastagem (solo exposto), tento desenvolvido mata ciliar com maior consolidação a partir de 1990. Sua configuração erosiva se desenvolve com maior intensidade até 2006 quando há o surgimento de áreas cobertas por cultura de eucalipto, sendo essa consolidada a partir 2008. Em escala de maior detalhamento, revelou que embora

a cultura de eucalipto possa ter desacelerado o avanço lateral, ela está ativa, o que corrobora com as classificações quanto às formas.

O comportamento da feição ao longo dos anos de 2016 e 2021 sugere que, embora esteja ocorrendo erosão nas paredes da voçoroca, a energia de transporte não se mostra intensa o suficiente até a cota de 551 metros para carrear grandes quantidades de sedimentos para além de sua área de contribuição hídrica, o que acaba por acumular material em seu interior. Além disso, tal comportamento contribui com o entendimento de que dentre os mecanismos erosivos presentes da erosão existe forte atuação de escoamento superficial. Neste período houve modificações sutis em algumas feições anteriormente classificadas, como o preenchimento de algumas alcovas e panelas, bem como a maior dissecação de sulcos e destaque de fendas nas bordas da incisão. A presença sedimento depositado *in loco* refletiram a baixa ação de carregamento hídrico dos sedimentos.

A técnica SfM mostrou-se simples podendo ser reproduzida com facilidade e agilidade por pessoas não especialistas em fotogrametria. Porém a aquisição deve ser realizada com cautela, uma vez que se deve considerar até mesmo o horário de levantamento devido ao posicionamento do sol, visto que a presença de zonas de sombra pode afetar a qualidade dos dados produzidos. Com isso, é sugerido que o acompanhamento evolutivo de voçorocas a partir da SfM seja realizado com maior número de aquisições, a fim de se considerar os efeitos de sombra, bem como obter maior amostra de dados que em diferentes taxas pluviométricas. Esta recomendação soma-se aos produtos deste trabalho como subsídios para ações privadas e governamentais para a mitigação, controle e remediação de voçorocas na região do interior do estado de São Paulo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvares C.A., Stape J.L., Sentelhas P.C., De Moraes Goncalves J.L., Sparovek G., 2013, Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 6, 711–728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Araújo, C.C. de, 2003, Gênese das ocorrências de arenito asfáltico da borda leste da Bacia do Paraná, SP [Tese de Doutorado]: Universidade de São Paulo, 135 p.
- Araújo, G.H.S., Almeida, J.R., Guerra, A.J.T., 2008, Gestão ambiental de áreas degradadas: Rio de Janeiro, Bertrand Brasil., 320 p.
- Barbosa, F. L. R., Guimarães, R. F., Carvalho, O. A. D., & Gomes, R. A. T, 2021, Classificação do uso e cobertura da terra utilizando imagens SAR/Sentinel 1 no Distrito Federal, Brasil. Sociedade & Natureza, 33 p.
- Bertoni, J., & Lombardi Neto, F., 1990, Conservação do solo. Ícone. São Paulo.
- Braun, A., & Veci, L., 2021, TOPS Interferometry Tutorial, Array System: https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel%20Tutorial_v2.pdf (acessado Agosto 2021).

- Carvalho, N.O., Filizola Júnior, N.P., Santos, P.M.C., Lima, J.E.F.W., 2000, Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios: Brasília, ANEEL, 140 p.
- Carvalho, J. C., Sales, M. M., de Souza, N. M., & da Silva Melo, M. T. (Eds.), 2006, Processos erosivos no centro-oeste brasileiro: Finate, p. 464.
- Cardozo, F. D. S., Shimabukuro, Y. E., Pereira, G., & Silva, F. B., 2011, Using remote sensing products for environmental analysis in South America. *Remote sensing*, 3(10), 2110-2127.
- CBH-SMT – Comitê das Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba e Médio Tietê, 2019, Relatório de situação dos recursos hídricos. UGRHI 10. Ano base 2018.
- Coelho L. e Brito J. N, 2007, Fotogrametria digital. Rio de Janeiro, EdUERJ, 196 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2019, Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Anhembi, SP: CPRM, <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/21477>. (acessado Abril 2021).
- Dantas, M.E., 2016, Biblioteca de padrões de relevo do território brasileiro: CPRM, p. 54, doi:10.2307/j.ctv233n8p.11.
- Demattê, J. A. M., Genú, A. M., Fiorio, P. R., Ortiz, J. L., Mazza, J. A., & Leonardo, H. C. L., 2004, Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39, 1219-1229.
- Dotto, A. C., Demattê, J. A., Viscarra Rossel, R., & Rizzo, R., 2019, Soil classification based on spectral and environmental variables. *SOIL Discussions*, 1-20.
- Embrapa - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2006, Sistema brasileiro de classificação de solos: Rio de Janeiro, EMBRAPA-SPI, 306 p.
- Embrapa, 2020a, Sentinel - Missão Sentinel. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/sateliares-de-monitoramento/missoes/sentinel>>. (acessado em Setembro 2021).
- Embrapa, 2020b, Sentinel - Missão Sentinel. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/sateliares-de-monitoramento/missoes/sentinel>>. (acessado em Setembro 2021).
- FAO, ITPS, 2015, Status of the World's Soil Resources (SWSR): Main Report: Itatly, Food and agriculture organization of the United Nations and intergovernmental technical panel on soils, 650 p.
- Fendrich, R. et al., 1997, Drenagem e controle da erosão urbana. Curitiba: Champagnat. 4^a ed., 486 p.
- Florenzano, T. G., 2007, Iniciação em sensoriamento remoto. Oficina de textos.
- Garritano, F., AugustineFullen, M., M., 2019, Unmanned Aerial Vehicle for monitoring gully erosion in Rio de Janeiro State: EGU General Assembly Conference Abstracts, v. 21.
- Guerra, A. J. T., Botelho, R. G. M., 1996, Características e propriedades dos solos relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos.
- Guerra, A.J.T., 2007, O início do processo erosivo. In Guerra, A. J. T; Silva, A. Botelho, R.G M. (organização), in Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p. 17–340.
- IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008, Recomendações para Levantamentos Relativo Estático – GPS: Rio de Janeiro.

INCRA - Instituto Nacional de colonização e reforma agrária, 2012, Manual técnico de posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais: Brasília, 33 p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. Disponível em:<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em Março de 2021.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2012, Cadastramento de pontos de erosão e inundação no Estado de São Paulo: Relatório Técnico no 131.057-205: Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE.

Iria, V. M., 2019, Validação do georreferenciamento em volumetria obtida por aeronave remotamente pilotada RPA em voçoroca no município de Anhembi - SP.

Isioye, A. O., & Jobin, P., 2012, An Assessment of Digital Elevation Models (DEMs) From Different Spatial Data Sources: Asian Journal of Engineering, Sciences & Technology, v 2(1).

Julian, C., & Nunes, J. O. R., 2020, Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. Marília/SP-Brasil: Revista Brasileira de Geomorfologia, v.21 n.4.

Lepsch, I.F., 2002, Formação e Conservação dos Solos: São Paulo, Oficina de Textos, 178 p.

Madeira Netto, J. da S., Baptista, G.M. de M., 2000, Reflectância espectral de solos: Planaltina, DF, Embrapa Cerrados, 55 p.

Meneses, P. R., de Almeida, T., de Mello Baptista, G. M., 2019, Reflectância dos materiais terrestres. Oficina de textos.

Milani, E.L., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, I. A., França, A.B., 2007, Bacia do Paraná: Boletim de Geociências da Petrobrás 15 (2), p. 265 – 287.

Morgan, R.P.C., 2005, Soil erosion and conservation: Malden, Blackwell Science Ltd, 304 p.

Nievinski, F. G., 2004, Interferometria por radar de abertura sintética (InSAR).

Oliveira, M.A.T, 1989, Erosion disconformities and gully morphology: a threedimensional approach. Catena,v 16, 413 p.

Oliveira, M. A. T., 2007, Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçoroca. In: Guerra, A. J. T.; Silva, A. S. da; Botelho, R. M.. (orgs.) Erosão e Conservação dos solos: conceitos temas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

Oliveira, J. G., Santos, L. J. C., & Calegari, M. R., 2020, Relação solo-relevo em sistema pedológico Argissolo-Neossolo Quartzarênico na região noroeste do estado do Paraná: caso de Amaporã. Revista Brasileira de Geomorfologia, 21(3).

Poesen, J. Soil erosion in the Anthropocene, 2018, Research needs. Earth Surface Processes and Landforms,, v.43, p.64–84.

Rademann, L. K., 2019, Identificação e caracterização dos mecanismos erosivos atuantes na voçoroca do areal no município de Cacequi/RS com auxílio de veículo aéreo não tripulado.

Ross, J. L. S., 1994, Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. Revista do departamento de geografia, 8, 63-74.

Rossi, M., 2017, Mapa pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado: Instituto Florestal,<https://www.infraestruturaeambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/>.(acessado Abril 2021).

- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W., 1973, Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. Proceedings...Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center,, v. 1, pp. 309-317. 1973
- Santos, E. S., & da Cunha, A. C., 2015, Análise de cenários hidrossedimentométricos para estimar taxas de assoreamento e vida útil do reservatório da UHE Cachoeira Caldeirão no Rio Araguari/AP-Brasil. Biota Amazônia (Biote Amazonie, Biota Amazonia, Amazonian Biota), 5(3), 88-97.
- Sestini, M.F., 1999, Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-Landsat e SIG. São José dos Campos, 140 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais / INPE.
- Shin, Y. H., & Lee, D. C., 2021, True Orthoimage Generation Using Airborne LiDAR Data with Generative Adversarial Network-Based Deep Learning Model. Journal of Sensors.
- Sousa, A. M., Mesquita, P., Gonçalves, A. C., Marques da Silva, J. R., & Silva, L. L., 2011. Detecção de vegetação arbórea através de segmentação e classificação orientada a objecto de imagens multiespectrais de alta resolução (Quickbird).
- Teixeira, F. J., Loureiro, D. D. T., Albertin, L. L., Maia, J. L., & Mauad, F. F., 2007. Previsão de vida útil do reservatório de Barra Bonita utilizando digitalização de mapas e comparação batimétrica. Revista Minerva, 4(ja/ju 2007), 1-10.
- Trentin, R., de Souza Robaina, L. E., & Scicoti, A. A. V., 2015, Determinação dos litótipos aflorantes na bacia hidrográfica do rio Ibicuí, RS. Geografia Ensino & Pesquisa, 19(2), 75-90.
- Turner, D.; Lucieer, A.; Jong, S.M, 2015, Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). In: Remote Sens, 7, 1736-1757. doi:10.3390/rs70201736.
- Viana, C. D., Grohmann, C. H., Busarello, M. D. S. T., & Garcia, G. P. B., 2018, Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion-Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. Brazilian Journal of Geology, 48, 839-852.
- Vieira, A.F.G.; Albuquerque, A.R.da C., 2004,. Cadastramento de voçorocas e análise de risco erosivo em estradas: BR-174 (Trecho Manaus – Presidente Figueiredo). In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. (Anais). Santa Maria: UGB/UFSM. p. 50-65
- Vieira, A. F. G., 2008, Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais.
- Vitte, A. C., & de Mello, J. P., 2007, Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem, 2(2).
- Warrick, J.A.; Ritchie, A.C.; Adelman, G.; Limber, P.W , 2016, New techniques to Measure Cliff Change from Historical Oblique Aerial Photographs and Structure-from-Motion Photogrammetry, In: Coastal Research, Journal, 33(1):39-55.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M., 2012, “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications: Geomorphology, v. 179, p. 300–314, doi:10.1016/j.geomorph.2012.08.021.