



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DO USO DE DRONES PARA MONITORAMENTO DE  
EROSÕES NA REGIÃO DE SANTO ANTÔNIO DO LEITE–MG

Matheus Amaral Parreiras

**MONOGRAFIA nº 387**

Ouro Preto, março de 2021



**AVALIAÇÃO DO USO DE DRONES PARA  
MONITORAMENTO DE EROSÕES NA REGIÃO DE SANTO  
ANTÔNIO DO LEITE – MG**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. Issamu Endo

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Prof. Ms. Edson Tazava



# **MONOGRAFIA**

**Nº 387**

## **AVALIAÇÃO DO USO DE DRONES PARA MONITORAMENTO DE EROSÕES NA REGIÃO DE SANTO ANTÔNIO DO LEITE-MG**

**MATHEUS AMARAL PARREIRAS**

*Orientador*

Prof. Dr. Pedro Fonseca de Almeida Val

*Coorientadora*

Dr.<sup>a</sup> Patrícia Mara Lage Simões

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2021/1.

**OURO PRETO**

**2021**

---

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>  
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>  
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>  
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita  
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais  
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Matheus Amaral Parreiras

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

Parreiras, Matheus Amaral

Avaliação do uso de drones para monitoramento de erosões na região de Santo  
Antônio do Leite–Mg / Parreiras, Matheus Amaral - Ouro Preto: UFOP: 2021

Monografia do Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Ouro  
Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

1. Pluviometria. 2. Drone. 3. Voçoroca. 4. Modelos digitais de Elevação. I. Val, Pedro  
de Almeida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de  
Geologia. III. Projeto AV<sup>2</sup>ANTE.

<http://www.sisbin.ufop.br>

# Ficha de Aprovação

---

## TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**TÍTULO:** Avaliação do uso de drones para monitoramento de erosões na região de Santo Antônio do Leite – MG.

**AUTORA:** MATHEUS AMARAL PARREIRAS

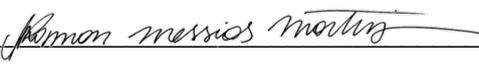
**ORIENTADOR:** PEDRO FONSECA DE ALMEIDA E VAL

**Aprovada em:** 27 de Maio de 2021

### BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Pedro Fonseca de Almeida e Val  \_\_\_\_\_ DEGEO/UFOP

Profa. Dr. Maria Eugênia Silva de Souza  \_\_\_\_\_ DEGEO/UFOP

Prof. Msc. Ramon Messias  \_\_\_\_\_ DEGEO (PPG)/UFOP

**Ouro Preto, 27/05/2021**



## Agradecimentos

---

Agradeço à minha mãe Maria Carla e ao meu pai Ney Marcio, pelo apoio em todos os momentos da formação do meu conhecimento, e a Stefânia Batalha por ser meu amparo.

Obrigado a Jefferson Araújo e a Lume Projetos e Topografia, por emprestarem de bom grado os equipamentos necessários para realização dos trabalhos de monitoramento.

Aos amigos da República Pulgatório que despertaram em mim o desejo pelo conhecimento acerca da arte de conviver, em especial ao “Minduim”, “Che”, “Curirica” e “Preguiça” que me acompanharam inclusive nos trabalhos de campo.

Ao Professor Pedro Val por incentivar minha busca por novidades e me por me auxiliar em desbravar o mundo acadêmico e a Patrícia Simões.

Obrigado as Instituições CNPQ e UFOP que através do programa PIBIC forneceram recursos financeiros e técnicos para realização deste trabalho.

Agradeço a Geoconsultoria Jr, que através dos amigos Philippe, João Henrique, Douglas, Andressa, Leonardo, Wanessa, Raphael e Matheus despertaram em mim o desejo pelo novo, pelo desenvolvimento tecnológico e pela consciência social, principalmente através do Projeto PEGAR - Programa Educacional de Geologia em Áreas de Risco.

Por fim, agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e à Fundação Gorceix, por terem me proporcionado um ensino público superior de qualidade.



# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.3 ÁREA DE ESTUDO .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 MODELAGEM DIGITAL COM DRONE.....	5
2.1.1 Uso e aplicação do VANT para a morfometria.....	5
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE VOÇOROCAS.....	6
2.2.1 Morfologia das Voçorocas .....	6
2.2.2 Processos de Formação das Voçorocas na Região.....	6
2.2.3 Processos Atuantes em Voçorocas.....	7
2.3 ASPÉCTOS PEDOLÓGICOS .....	8
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>9</b>
3.1 COLETA DE DADOS E PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	9
3.2 PONTOS DE CONTROLE.....	9
3.3 MODELAGEM DIGITAL.....	11
3.4 SÉRIE TEMPORAL .....	13
3.5 DADOS PLUVIOMÉTRICOS .....	13
3.6 CLASSIFICAÇÃO MORFOLOGICA DAS VOÇOROCAS.....	14
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>15</b>
4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL GERAL DE EROSÃO E DEPOSIÇÃO .....	15
4.1.1 Cavidade no Norte da Voçoroca do Campo de Futebol.....	16
4.1.2 Canal ao centro da Voçoroca do Campo de Futebol.....	19
4.1.3 Comportamento das Cristas no sul da Voçoroca do Campo de Futebol... 22	
4.1.4 Análise geral da voçoroca Branca.....	23
4.2 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA .....	28
<b>5 DISCUSSÃO</b> .....	<b>31</b>
5.1 EROSÃO E PLUVIOSIDADE .....	31

5.2 CICLOS EROSIVOS.....	32
5.3 CONTENÇÃO DA EROSÃO E RECOMENDAÇÕES .....	33
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>39</b>

## INDÍCE DE FIGURAS

---

<b>Figura 1</b> - Localização de cachoeira do campo .....	2
<b>Figura 2</b> - Mapa Pedológico do município de Ouro Preto.....	4
<b>Figura 3</b> - Coleta de pontos de controle.....	10
<b>Figura 4</b> - Precisão dos dados geográficos .....	11
<b>Figura 5</b> - Posições georreferenciadas .....	12
<b>Figura 6</b> - Classificação morfológica das voçorocas .....	14
<b>Figura 7</b> - Subtração MDE final ao MDE inicial.....	16
<b>Figura 8</b> - Subtração da elevação entre os voos.....	18
<b>Figura 9</b> - <i>Slope</i> , declividade dos MDE's .....	19
<b>Figura 10</b> - Subtração da elevação entre os voos.....	20
<b>Figura 11</b> - MDE's.....	21
<b>Figura 12</b> - Subtração da elevação entre voos .....	23
<b>Figura 13</b> - Subtração da elevação entre os voos.....	24
<b>Figura 14</b> - Mapa de declividade região centro-leste da voçoroca branca .....	25
<b>Figura 15</b> - Subtração da elevação região central da voçoroca branca.....	26
<b>Figura 16</b> - Ortomozaicos da região central da voçoroca branca .....	27
<b>Figura 17</b> - Pluviometria diária.....	28
<b>Figura 18</b> - Pluviometria agrupada por número da chuva .....	29
<b>Figura 19</b> - Ciclo de Avanço Erosivo das Voçorocas.....	33
<b>Figura 20</b> - Imagens aéreas do norte da Voçoroca Branca .....	34

## ÍNDICE DE TABELAS

---

<b>Tabela 1</b> – Especificações dos planos de voo. ....	<b>9</b>
<b>Tabela 2</b> – Pontos de Controle Voçoroca Branca. ....	<b>10</b>
<b>Tabela 3</b> – Pontos de Controle Voçoroca do Campo de Futebol. ....	<b>11</b>
<b>Tabela 4</b> – Classificação clássica das voçorocas estudadas. ....	<b>15</b>
<b>Tabela 5</b> - Erosão por voçoroca x Pluviosidade. ....	<b>31</b>
<b>Dados pluviométricos</b> - .....	<b>43</b>

## Resumo

---

As voçorocas são feições erosivas em encostas que oferecem riscos à segurança de moradores e construções civis. O estudo da distribuição espacial de erosão dentro de voçorocas bem como o seu avanço na cabeceira é importante para prever como estas estruturas podem evoluir em tempos chuvosos e avançar sobre áreas de manejo rural, desencadear a contaminação e assoreamento de leitos a jusante e danificar ruas, moradias, entre outros. O presente trabalho analisa o uso de drones para quantificar mudanças topográficas dentro de duas voçorocas da região de Santo Antônio do Leite, Ouro Preto – MG durante o período de outubro a fevereiro de 2020, utilizando o imageamento aéreo por veículo não tripulado (drone). Avaliou-se, também, a influência das chuvas nas modificações da topografia das feições erosivas. Os resultados revelaram uma correlação entre a pluviometria e mudanças topográficas causadas por erosão e deposição dentro e nas paredes das voçorocas. Especificamente, observou-se que chuvas longas e consecutivas estão associadas a modificações mais expressivas como o preenchimento de cavidades e alargamento de sulcos erosivos, possivelmente pela capacidade de formar correntezas. Por outro lado, chuvas intervaladas por períodos de estiagem estão associadas a feições erosivas superficiais, aparentemente sem grande capacidade de carrear sedimento. Portanto, drones podem ser aplicados para visualizar a forma de deslizamentos e carreamento em locais de difícil acesso além de permitir estudos sobre o papel da intensidade e duração de eventos chuvosos. O monitoramento por drones permite identificar e descrever deslizamentos dentro de voçorocas em menor tempo do que com métodos tradicionais. Concluiu-se que a aplicação de imageamento aéreo por drones pode ser um método robusto para estimar o avanço erosivo das voçorocas em escalas de tempo anuais.

**Palavras-chave:** Drones, Voçorocas, Modelagem, Pluviometria, Monitoramento.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

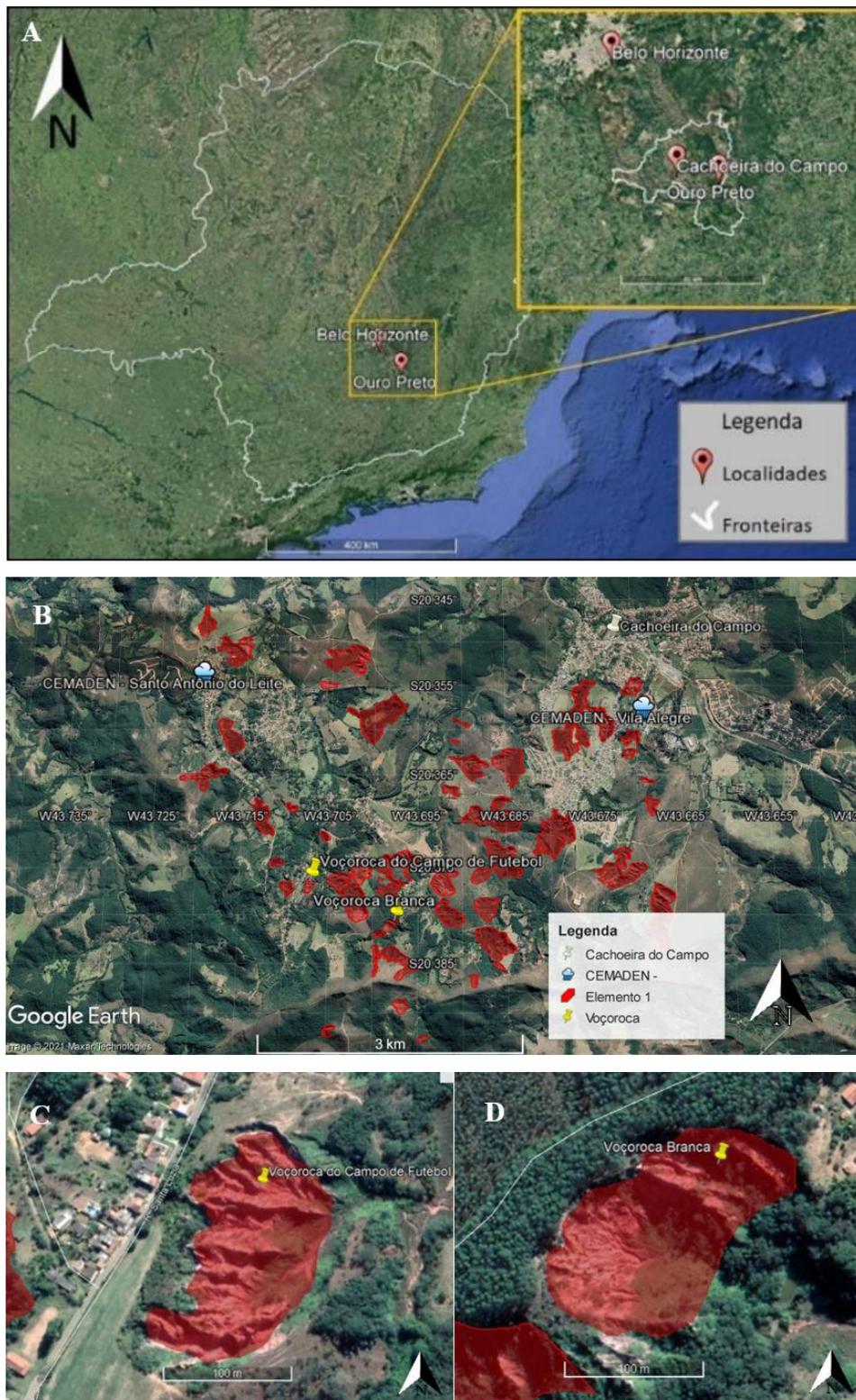
### 1.1 APRESENTAÇÃO

Voçorocas são pontos de escavação e movimentos de massa em encostas que, por sua alta declividade, exposição do solo e baixa coesão do mesmo, estão sujeitas à intensificação da erosão durante períodos chuvosos (Amorim et al. 2001). As voçorocas são feições comuns no sudeste brasileiro e podem ocasionar a perda da maior parte da camada produtiva do solo, impedindo portanto o uso do mesmo para atividades agrícolas e urbanas. Além disso, a alta carga sedimentar em sistemas hídricos pode piorar as condições ecológicas de corpos de água (Sobreira 1998, Bilotta e Brazier, 2008). O avanço de voçorocas sobre as vertentes leva ao aumento do aporte sedimentar e assoreamento de canais fluviais a jusante. Portanto, identificar se as características pluviométricas contribuem para a aceleração deste aporte sedimentar pode ser importante da evolução da qualidade do habitat aquático. Monitorar e pesquisar os mecanismos que contribuem para o avanço de voçorocas é, portanto, importante para a conservação ambiental.

Pluviometria e o impacto de gotas de chuva, percolação de água subterrânea, uso indevido do solo, desmatamento e remobilização do solo são os principais fatores controladores da formação de voçorocas, além de fatores intrínsecos ao meio como declividade do relevo e litologia (e.g. Bacellar et al, 2005; Kirkby e Bracken, 2009). Após a sua formação, a progressão erosiva das voçorocas depende fortemente da declividade de suas paredes, da granulometria do material, da coesão do solo, da precipitação, que leva ao escoamento superficial, e do tipo de rocha (e.g. Prosser e Soufi, 1998; Bacellar et al, 2005). Devido à dificuldade de se mapear sistematicamente os fatores causadores e agravantes dos processos erosivos presentes nas voçorocas, este estudo pretende testar uso da tecnologia de imageamento aéreo na quantificação da erosão.

Como a primeira etapa do Projeto AV<sup>2</sup>ANTE – Avanço de Voçorocas com Veículo Aéreo Não Tripulado, este estudo visa avaliar a aplicação de Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANT, ou drones) na produção de modelos digitais tridimensionais de elevação com alta resolução (< 1 m) para construção de séries temporais da topografia interna das voçorocas. Este trabalho então pretende monitorar a evolução de feições erosivas e compará-las à incidência de chuvas, visto que as feições estudadas estão ativas em uma mesma cobertura pedológica (Bonna, 2011). Para isto, a região escolhida foi limitada ao município de Ouro Preto - MG, distritos de Santo Antônio do Leite e Cachoeira do Campo, pelo fácil acesso e benefício para as comunidades próximas à Universidade. Em inspeção por imagem de satélite, a área apresenta ao menos 56 voçorocas delimitadas na Figura 1A e,

portanto, é propícia para este tipo de análise, além de futuramente poder se beneficiar de monitoramentos sistemáticos.



**Figura 1** - A) - Localização de cachoeira do campo em relação a Ouro Preto, Belo Horizonte e ao estado de Minas Gerais. B) Sedes dos distritos de Ouro preto, localização dos pluviômetros, voçorocas identificadas por inspeção visual e localização das voçorocas sobrevoadas (C e D). C)

Voçoroca aqui denominada de “Voçoroca do Campo de futebol”. D) Voçoroca aqui denominada de “Branca”.

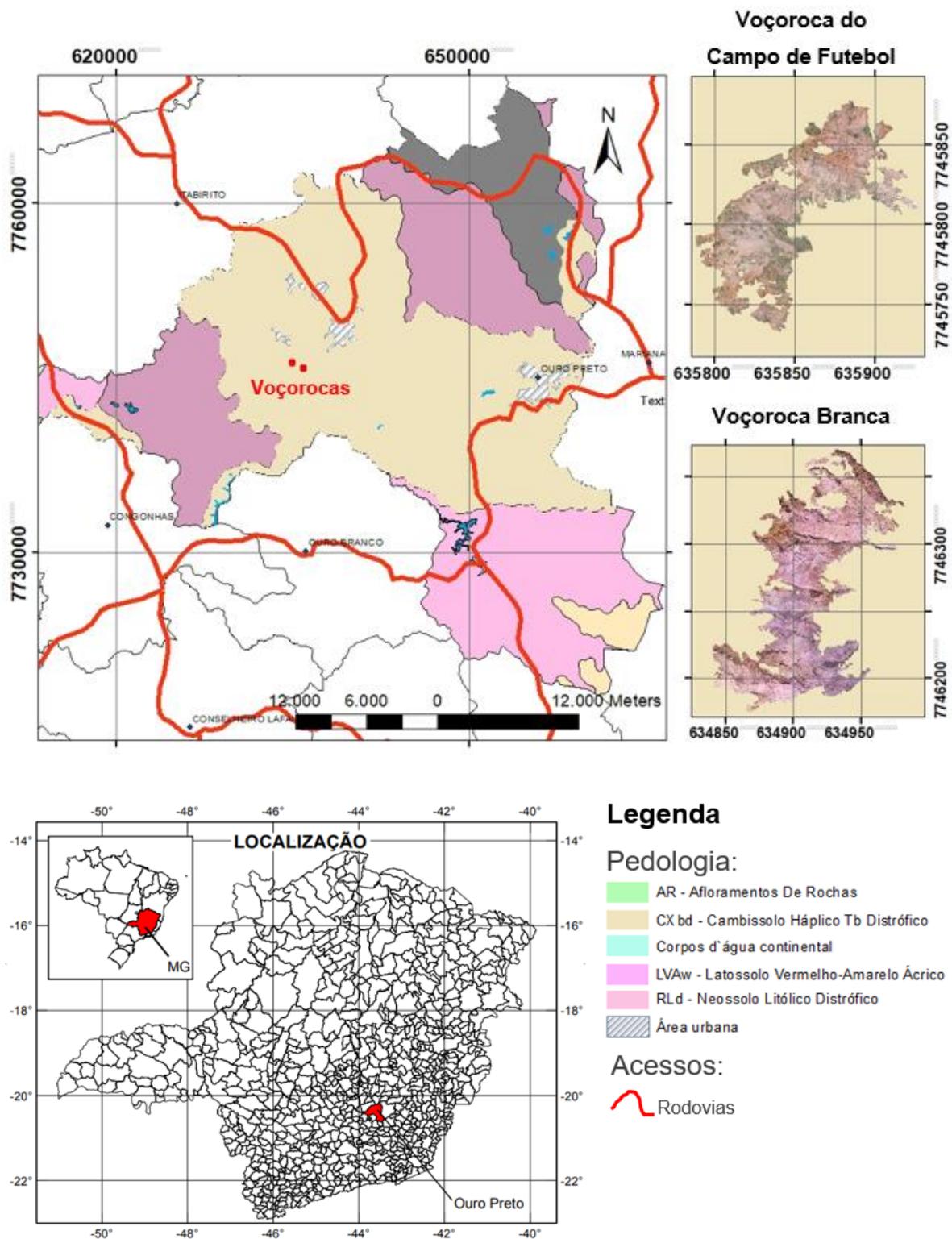
## **1.2 OBJETIVOS**

Este trabalho visa identificar a eficiência do uso de drones no monitoramento de voçorocas em intervalos mensais, durante o período chuvoso. São objetivos específicos:

- Verificar a eficiência da vegetação em conter a erosão e o transporte de sedimentos.
- Determinar possíveis fontes erosivas e deposicionais ao comparar mapeamentos tridimensionais em série temporal.
- Comparar as análises de erosão e deposição a dados pluviométricos e, assim, estudar a correlação entre o avanço das voçorocas e a incidência de chuvas.

## **1.3 ÁREA DE ESTUDO**

Nos distritos de Santo Antônio do Leite e Cachoeira do Campo (Ouro Preto, MG) encontram- o Complexo Metamórfico do Bação. Neste, afloram rochas do embasamento cristalino granito-gnáissico-migmatítico das unidades geológicas do Quadrilátero Ferrífero (Herz 1970). Tal complexo é caracterizado como gnaisse Funil e tem como características básicas a composição global granodiorítica com bandas tonalíticas e granitóides ricos em quartzo (Salaroli, 1999; Bacellar, 2000). Estas rochas formam um substrato altamente intemperizado, friável em superfície e propício à erosão por processos superficiais. Segundo Bacellar et al (2005), a distribuição aleatória de voçorocas desenvolvidas sobre o Complexo Bação resultou da ocupação indevida do solo pelos europeus no final do Século 17. A topografia da área de estudo é caracterizada pelo típico relevo de mares de morros que, segundo Santos (2002), são encostas suaves de topos convexos, circundados por morrotes com vertentes mais íngremes. As voçorocas avançam sobre estes morros de topo convexos escavando cambisolos (Figura 2).



**Figura 2** – Mapa Pedológico do município de Ouro Preto com a localização das duas voçorocas estudadas, realçadas em vermelho. À direita, zoom de cada voçoroca. Zona 23k, coordenadas UTM - Sirgas 2000. Adaptado do levantamento Pedológico de Bonna (2011).

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

#### 2.1 MODELAGEM DIGITAL COM DRONE

Os modelos digitais de elevação são amplamente utilizados no estudo comparativo de grandes áreas para monitoramento de queimadas, ocupação urbana, plantio dentre outros (Souza, 2018). Por outro lado, o seu resultado no monitoramento de pequenas regiões não é tão comum devido a baixa resolução de satélites e a distância entre a área de estudo e os sensores que possibilitam baixo ângulo de visada e consequentemente erro alto no eixo Z. Com o surgimento do Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), a resolução dos modelos digitais melhorou e possibilitou a análise de regiões menores, mas com maior detalhe. Apesar disso, a construção de séries temporais de modelos gerados com drones destinados ao monitoramento de uma área ainda é pouco comum.

##### 2.1.1 Uso e aplicação do VANT para a morfometria

Os VANTs são equipados com sistemas globais de navegação, unidades de medição inercial que, associados a outros sensores, conseguem determinar a localização espacial com muito baixo custo de aquisição (BRAZ, 2015). Apesar de os erros espaciais relacionados a estes sensores serem expressivos por sua simplicidade e por fatores complicadores como correntes de ar e pareamento com satélites, o dispositivo *Gimbal*, que é um estabilizador de câmera, permite a captura uniforme de imagens, além de um ótimo mapeamento do percurso. Com a possibilidade de pré-programar vôos, o trabalho de campo é facilitado, permitindo a coleta de muitos dados em pouco tempo.

A partir de imagens aéreas da mesma localidade tiradas do sensor em movimento (*drone*), reconstrói-se a forma tridimensional do terreno. Esta técnica, chamada de *Structure from Motion*, utiliza automaticamente a trajetória percorrida pelo sensor e sobrepõe as bordas de imagens, identificando a posição relativa entre centenas de fotografias (Dellaert *et al.*, 2000). A técnica reconstrói a geometria das cenas através de um processo chamado *bundle adjustment*, que ajusta todo o conjunto de imagens sobrepostas simultaneamente. Quanto maior a sobreposição, melhor a captura da geometria tridimensional (Westoby *et al.*, 2012). O georreferenciamento da imagem é feito com um GPS tipo RTK (*Real Time Kinematic*) posicionado em pontos de controle.

Para corrigir os erros associados ao sistema de localização embutido do drone e a elaboração de um modelo digital de alta precisão, são necessárias ortofotos. Estas fotos são referenciadas nos eixos X,

Y e Z com azimute focal, além de dados 3D de alta precisão de pontos de controle presentes nas fotografias (Westoby 2012). Devido a sobreposição fotográfica estes pontos podem ser identificados manualmente por toda a cena e então ser reprocessados através de um software como o *Agisoft*, por exemplo. O reposicionamento das ortofotos simultaneamente gera a reconstrução do modelo interativamente através de um modelo estatístico quadrático não linear (Snaveley, 2008).

## **2.2 CARACTERIZAÇÃO DE VOÇOROCAS**

### **2.2.1 Morfologia das Voçorocas**

Uma das principais causas da erosão dos solos é a erosão hídrica, que pode ser dividida em laminar e linear, as erosões lineares podem se desenvolver em encostas dando origem a sulcos, ravinas e voçorocas nesta ordem (Santos 2002).

As ravinas são comumente definidas como canais erodidos por fluxos superficiais que podem ser suprimidos por lavoura normal, já as voçorocas são feições com canais de paredes laterais íngremes e platôs que podem possuir outros canais, diferenciadas de ravinas principalmente por seu perfil escalonado, normalmente variam em tamanho de profundidades de 0,5 m até 25 m ou 30 m (Charlton, 2008), mesmo que em muitos trabalhos não seja feita distinção entre ravinas e voçorocas.

A erosão atuante neste tipo de formação é causada tanto por gravidade quanto por escoamentos superficiais ou percolação de águas subterrâneas, podendo apresentar inclusive surgências d'água, fluxos estes que podem ser efêmeros ou não.

### **2.2.2 Processos de Formação das Voçorocas na Região**

Voçorocas são iniciadas após a criação de irregularidades topográficas anômalas ou degraus (steps) que progridem para feições escavadas profundas (Kirkby e Bracken, 2009). Quando da formação natural, este step pode ser iniciado por impactos de gotas de chuva e/ou formação de sulcos de drenagem na superfície por escoamento superficial (Overland flow ou fluxo hortoniano), além de movimentos de massa (Montgomery e Dietrich, 1994; Prosser e Soufi, 1998) e fluxo de água subterrânea em pipes e sulcos (Bacellar et al, 2005). Quando da formação antrópica, o uso indevido do solo, perfurações descontroladas e a remoção de vegetação são fatores que levam à criação de steps que podem resultar posteriormente na formação de voçorocas.

Associadas a áreas de relevo ondulado e solo espesso, a erosão de maneira geral é um processo natural e sua evolução aos estágios mais avançados é comum em regiões áridas, semiáridas ou em

regiões tropicais em que a exposição de rochas cristalinas ao intemperismo apresenta fino horizonte superficial de solo resistente a erosão, e logo abaixo um horizonte saprolítico muito espesso que é muito susceptível a erosão (Sobreira, 1998). Portanto é necessário que haja uma supressão da camada mais superficial do solo para desencadear processos mais desenvolvidos de erosão.

Segundo Faria (2018), o princípio das ocupações de terras da região de Minas Gerais foi marcado pelo desmatamento para produção de carvão e seguido pelas coivaras, queimadas para limpar terrenos e adubá-los para o plantio subsequente. A remobilização do horizonte superficial solo para plantio causa vulnerabilidade a processos erosivos, e a exposição de horizontes mais susceptíveis, formação de sulcos e irregularidades que podem nuclear ravinas e voçorocas. A pressão populacional crescente na região, que é associada ao ciclo do ouro, quando somada a fatores naturais de susceptibilidade que são os cambisolos e latossolos espessos associados a relevos ondulados e combinados com a percolação de água subterrânea são os principais fatores responsáveis pelo surgimento do alto número de voçorocas na região de estudo (e.g. Bacellar et al, 2005).

### **2.2.3 Processos Atuantes em Voçorocas**

A ocorrência de chuvas propicia os escoamentos superficiais e, também, altera temporariamente o nível freático, o que estimula os fluxos subterrâneos. Combinados, os efeitos da chuva contribuem para o avanço das voçorocas atingindo em profundidade o lençol freático e induzindo as surgências d'água (DAEE, 1989).

As feições erosivas estudadas neste trabalho se desenvolveram em predominantemente no saprólito, que é o horizonte de solo mais susceptível a erosão presente na região. Segundo Sobreira (1998), é muito friável e vulnerável à força da chuva. Por este motivo e por motivos logísticos, não foram feitas distinções dos solos no interior as voçorocas estudadas.

Bergonse (2011) dividiu em as erosões atuantes nas voçorocas em 6 subtipos:

- 1) Escavações na base (seepage hollows) decorrentes do próprio peso do material (Bradford e Piest, 1980);
- 2) Escavações na base ocasionada por fluxos de água;
- 3) Alargamento de canais (e.g. Seeger et al., 2009).
- 4) Escavações na base associadas a mudanças de nível hídrico do poço, formando bacias de impacto (plunge-pool) (Oostwoud et al., 2000);
- 5) Formação e colapso de caneluras originadas de escoamento superficial, subsuperficial e do impacto da precipitação (fluting) (Crouch e Blong, 1989; Brooks et al., 2009);

- 6) Fraturas que circundam a montante os limites superiores das paredes e da cabeceira, associadas à alívios de tensão e possivelmente a ciclos de humedecimento e secagem do solo (Collison, 2001; Oostwoud e Bryan, 2001).

As feições erosivas supracitadas foram comparadas às identificadas no presente trabalho e associadas a incidência de chuva no mesmo período.

### **2.3 ASPÉCTOS PEDOLÓGICOS**

Os solos são definidos segundo seus horizontes mais relevantes, do topo à base, de acordo com suas características físicas e químicas (Santos, 2018). Segundo Bonna (2011), a região que engloba este trabalho possui latossolos argilosos espessos nas áreas baixas e cambissolos nas encostas de morros (Figura 2).

Os latossolos possuem horizonte superficial ou subsuperficial raso e espesso, resultando da intemperização intensa dos constituintes minerais primários ou mesmo secundários, menos resistentes. Possui presença marcante de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, com movimento inexpressivo deste argilominerais de argila.

Já os cambissolos possuem pedogênese pouco avançada mas possui minerais de rocha secundarizados com a quase ausência da estrutura rochosa, em seu horizonte de solo mais expressivo, o horizonte saprolítico. As características latossólicas podem ser percebidas neste solo, porém em espessura incipiente próximo a superfície (Santos, 2018). Suas propriedades físicas tornam esse o solo mais propício ao desenvolvimento de erosões

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COLETA DE DADOS E PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Neste estudo, a técnica *SfM* foi aplicada para imagear as formas tridimensionais das voçorocas para a construção de séries temporais de modelos digitais do terreno. Com uma câmera GoPro acoplada ao drone Phantom 3 Advanced (DJI) (Figura 4A), foram feitos voos cruzados nas voçorocas Branca e do Campo de Futebol. Os voos foram planejados através do aplicativo Pix4Dcapture com altitude de 36 metros a partir da cabeceira de cada voçoroca. Usando câmera com sensor CMOS, fotos de 12 megapixels foram capturadas (ver Tabela 1). Após cada voo, aplicou-se a técnica Structure from Motion (SfM) com o programa Agisoft Metashape Professional 1.5.2 para construir um modelo digital tridimensional a partir de um imageamento de intervalo (range imaging) (Westoby et al. 2012; Carrivick et al. 2016). Este procedimento foi aplicado para criar Modelos Digitais de Elevação (MDE's) de cada voçoroca em momentos diferentes, possibilitando, então, a construção de uma série temporal.

**Tabela 1** – Especificações dos planos de voo.

Voçoroca	Nº voos	Área do Polígono	Nº Fotos por voo	Pixel (cm)	Altitude (m)	Sobreposição entre ortofotos
Campo de Futebol	4	(178x69) m <sup>2</sup>	192	1,5	33	70% - 80%
Branca	3	(120x67) m <sup>2</sup>	133	1,5	33	70% - 80%

#### 3.2 PONTOS DE CONTROLE

Para alcançar um erro inferior a dois pixels é indicado o uso de 20 a 30 pontos de controle por quilômetro quadrado (Souza, 2018). Por se tratar de uma área inferior a 0,013km<sup>2</sup> mas com declividade acentuada foram captados 7 pontos de controle em ambas as voçorocas com um GPS RTK JAVAD TRIUMPH-1M (Figura 3) (Tabela 2 A e B). Após aproximadamente uma hora de captação em um ponto fixo, o GPS atingiu a precisão com sigma de 0,002 (mgs) latitude; 0,008 (gms) longitude e 0,010 m na altitude, este georreferenciamento foi pós corrigido através do serviço gratuito do IBGE Posicionamento

Parreiras, M. A. 2021, Avaliação do uso de Drones para Monitoramento de erosões na Região de Santo Antônio do Leite-MG por Ponto Preciso (PPP), (Figura 4A-C). Todos os outros pontos de controle obtidos com o GPS RTK e foram corrigidos em relação a esta base via sinal de rádio.



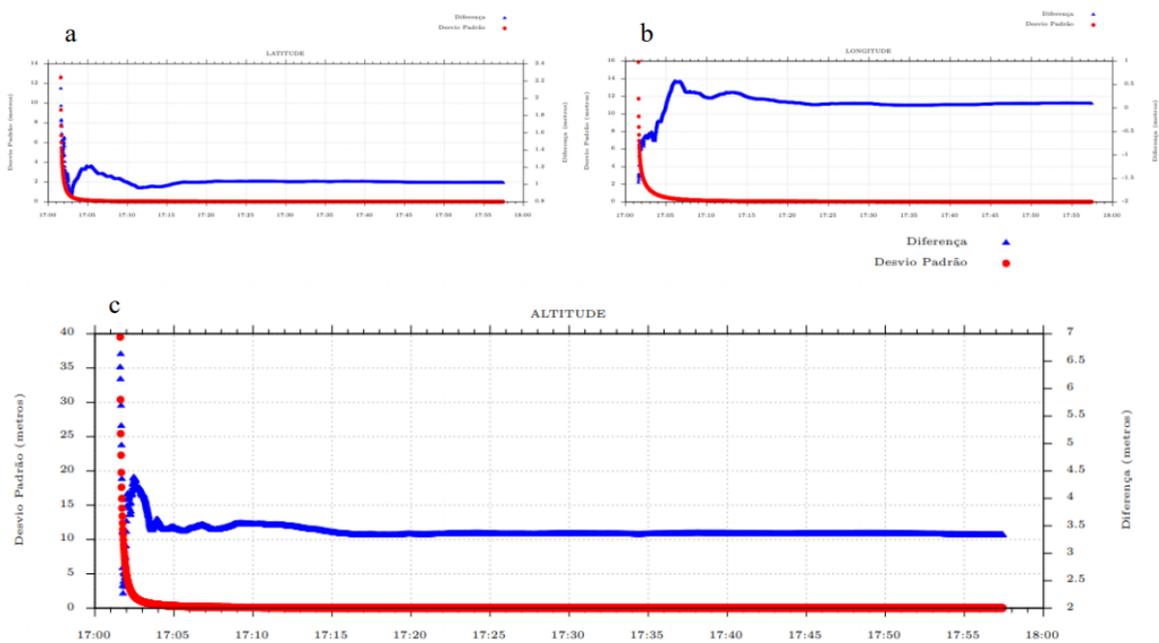
**Figura 3** – A)-Drone Phantom 3 Advanced (Fonte: DJI Technology); B) Coleta de pontos de controle com GPS RTK.

**Tabela 2** – Pontos de Controle Voçoroca Branca.

Nome	X	Y	Z
pc1	7.745.849.642	635.840.687	1.154.598
pc2	7.745.881.539	635.886.578	1.150.693
pc3	7.745.864.607	635.929.415	1.145.400
pc4	7.745.870.769	635.962.499	1.141.518
pc5	7.745.878.270	635.943.951	1.144.700
pc6	7.745.834.188	635.815.463	1.157.149
pc7	7.745.810.888	635.799.844	1.159.754
pc8	7.745.775.060	635.784.504	1.161.831

**Tabela 3** – Pontos de Controle Voçoroca do Campo de Futebol.

Nome	X	Y	Z
pc_01	7.746.239.642	634.869.980	1.125.622
pc_02	7.746.270.613	634.870.568	1.126.648
pc_03	7.746.358.893	634.919.104	1.122.617
pc_04	7.746.176.273	634.929.523	1.109.734
pc_05	7.746.161.985	634.859.944	1.121.769
pc_06	7.746.287.450	634.975.965	1.089.652
pc_07	7.746.225.164	634.945.786	1.099.482

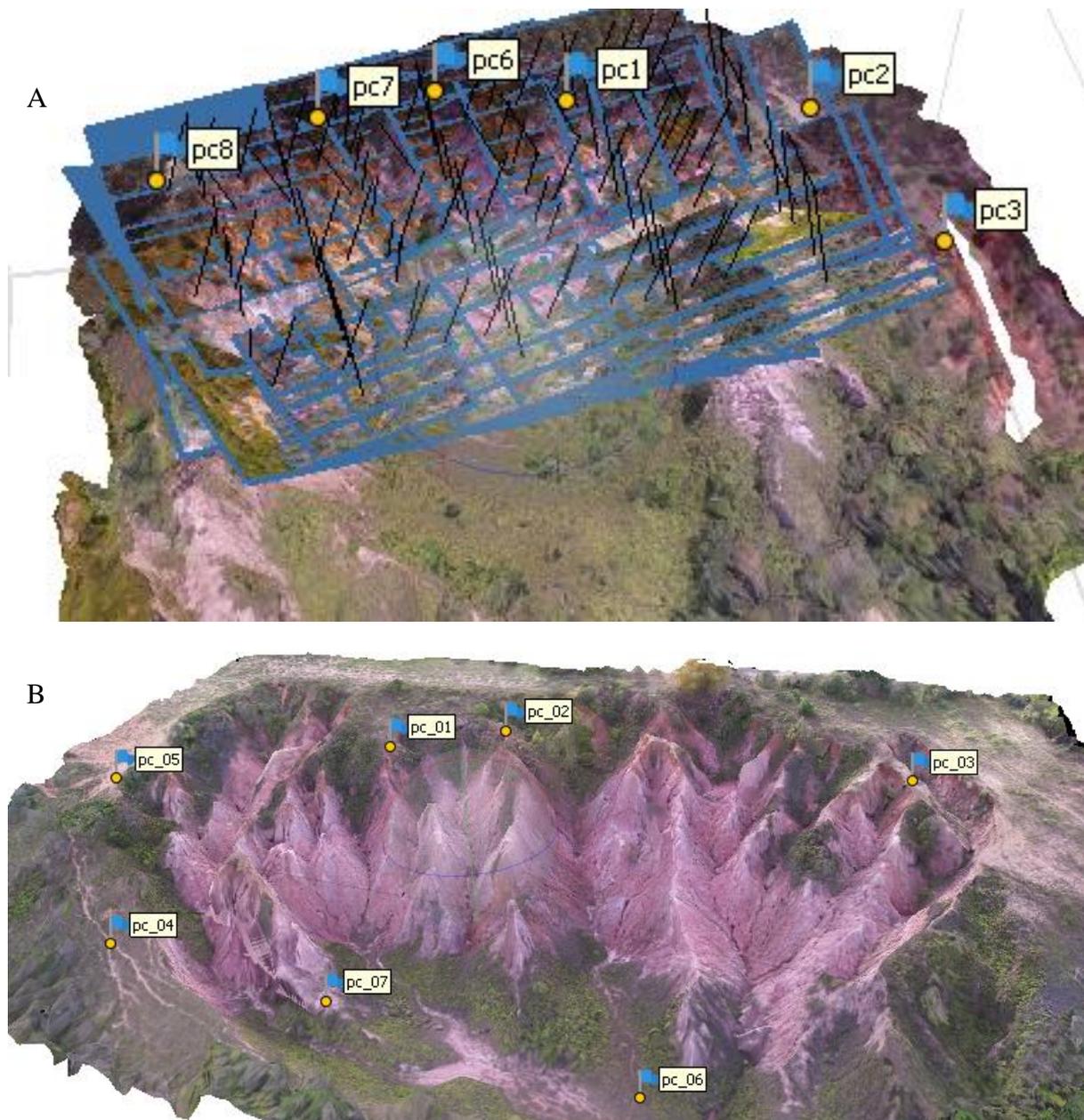


**Figura 4** - Precisão dos dados geográficos obtidos com GPS RTK. A) Latitude; B) Longitude; C) Altitude. Linha vermelha representa o desvio padrão e linha azul a diferença, ambos em função do tempo. Gráficos de correção de coordenada do Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) – IBGE, processado em: 10/02/2020 19:49:41.

### 3.3 MODELAGEM DIGITAL

Após a criação da nuvem de pontos, as imagens são agrupadas em um ortomosaico. Como cada imagem corresponde a um voo diferente, a sobreposição espacial entre as imagens foi feita com identificação visual de pontos em comum entre elas (Figura 5). Os pontos de controle foram localizados espacialmente no ortomosaico de fotos preliminar no *Agisoft Metashape Professional 1.5.2* e indicados por meio de balizadores naturais como cupinzeiros, troncos derrubados, trilhas de terra além de marcações instaladas com PVC reutilizado. Para uma dupla correção, utilizou-se a ferramenta de

georreferenciamento do software ArcGIS 10.6.1 a fim de eliminar deformações e inclinações. Para tanto foram utilizados um mínimo de 15 pontos coincidentes para cada modelo e espalhados uniformemente em todas as áreas das voçorocas para uma correção espacial adequada. Foi então aplicada uma correção quadrática de primeira ordem polinomial às imagens utilizando os mesmos pontos como referência. A performance desta correção foi verificada visualmente.



**Figura 5** – A) Posições georreferenciadas de todas as fotos realizadas no Voo 2 sobre a Voçoroca Branca; B) Posição dos pontos de controle após a correção do MDE relativo ao quarto voo sobre a Voçoroca do Campo de Futebol.

Os modelos digitais atingiram uma precisão entre 1,6 e 2,59 cm/pix e redimensionados para o padrão de 2,6 cm/pix. Após estas correções, foram extraídos Modelos Digitais de Elevação (MDE) ortomozaicos de cada voo. Em seguida, os dados de elevação em alta resolução foram então utilizados para construir: (i) mapas de declividade (ferramenta *Slope* no software *ArcGIS*), (ii) de diferença altimétrica (ferramenta *Minus* no software *ArcGIS*). Com isto, foram quantificadas as modificações das formas em séries temporais e determinadas as taxas de erosão e deposição entre cada voo. Estes dados foram então comparados com as taxas de precipitação obtidas independentemente.

Os mapas de diferenças altimétricas consistem na subtração dos modelos digitais mais antigos dos modelos obtidos de voos subsequentes, obtendo assim um mapa de diferença altimétrica entre cada voo. Após esta rotina, identificou-se um deslocamento vertical entre balizadores estáticos nos MDEs. Entendendo isto como o erro associado à medida, o valor nulo foi atribuído a estes através do *ArcGis* para fixar os três modelos numa mesma altitude. Assim, foi possível identificar qualitativamente pontos de diferença altimétrica entre os voos. Como o intervalo de variação nula é de 40 cm variando de -20 cm a 20 cm, a análise dos resultados considerou uma precisão de  $\pm 20$  cm no eixo Z.

### 3.4 SÉRIE TEMPORAL

Ao todo, foram realizados 7 (sete) voos, 4 (quatro) sobre a Voçoroca do Campo de futebol (Figura 1C) e 3 (três) sobre a Voçoroca Branca (Figura 1D), entre os meses de outubro de 2019 e fevereiro de 2020, para registrar modelos digitais ao decorrer do período de chuvoso brasileiro. Os voos foram realizados entre o período das 10:30 às 14:30, para maior incidência solar sobre a superfície estudada.

Dadas as limitações da utilização de VANTs, por motivos de instabilidade climática o Voo 2 a ser feito na voçoroca Branca no dia 24/10/2019 foi cancelado e, portanto, os dados da Voçoroca Branca foram processados apenas com os voos dos demais dias (Voo 1, Voo 3 e Voo 4). As tabelas de dados refletem esta adaptação (Tabela 5).

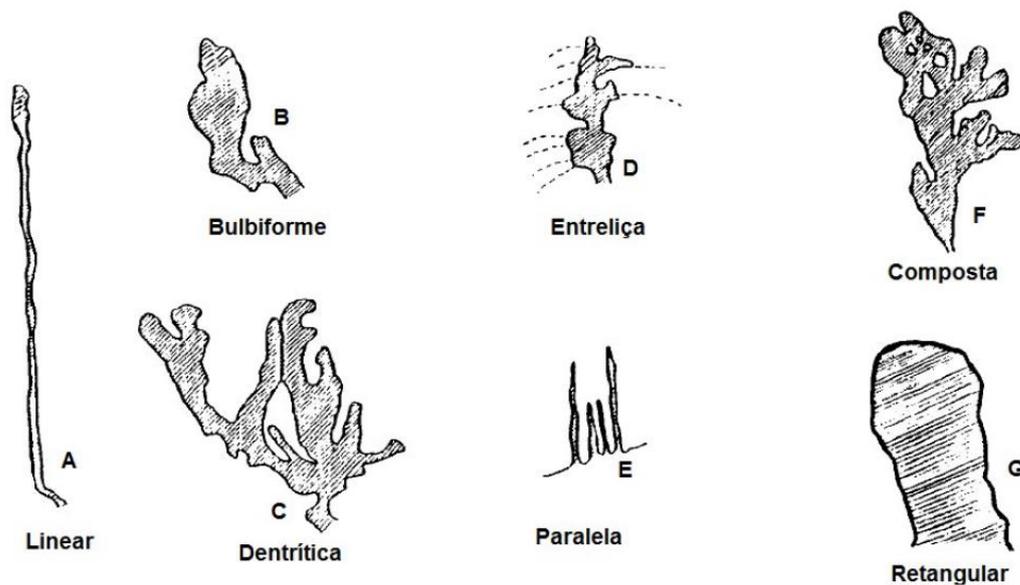
### 3.5 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Foram coletados dados pluviométricos das estações eletrônicas automáticas de Vila Alegre e de Santo Antônio do Leite, ambas pertencentes à Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, que capta valores nulos a cada hora, e valores de chuva a cada 10 minutos. As chuvas acima de 10 mm<sup>3</sup> separadas no tempo por até 6 horas de qualquer outra precipitação foram consideradas eventos pluviométricos individuais (Wischmeier & Smith, 1978). Sendo assim, pancadas de chuva cuja

soma de precipitação ficou abaixo de 10mm<sup>3</sup> não são consideradas chuvas, e períodos de estiagem menores que seis horas não encerram uma chuva, sendo assim considerados períodos de chuva.

### 3.6 CLASSIFICAÇÃO MORFOLOGICA DAS VOÇOROCAS

As imagens aéreas permitiram uma classificação preliminar das voçorocas quanto à forma. Para isto, seguiu-se a classificação de Ireland et al (1939): a) Linear, que contém apenas o canal principal; b) Bulbiforme, que apresentam a expansão do canal na forma de bulbos; c) Dendrítica, que apresenta evolução considerável de canais adjacentes; d) Treliça, que apresenta evolução em forma de ramificações; e) Paralela, em que os canais formados obedecem um padrão erosivo paralelo; f) Composta, que apresenta uma associação das outras formas; g) Retangular, que apresenta evolução uniforme do canal principal (Figura 6).



**Figura 6** – Classificação morfológica das voçorocas proposta por Ireland et al (1939).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL GERAL DE EROSIÃO E DEPOSIÇÃO

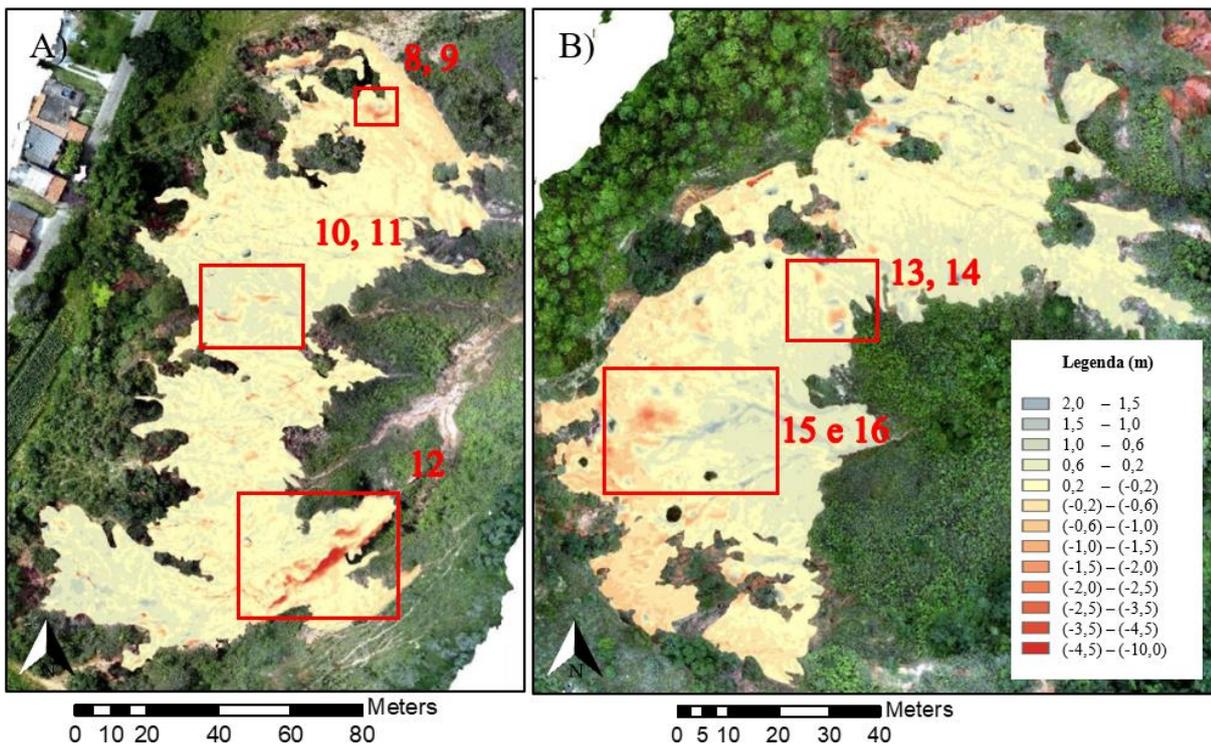
Em geral, observa-se que as paredes íngremes das voçorocas são regiões mais propícias à erosão ao passo que o centro das voçorocas são regiões neutras, hora com deposição, hora com erosão (Figura 7 A e B). Em ambas as voçorocas, observou-se a formação de canaletas erosivas na parte baixa delas, além de cavidades que são rapidamente preenchidas por sedimentos.

As voçorocas foram medidas e depois classificadas de acordo com Ireland et al (1939) conforme dispostos na Tabela 2. Estas delimitações desconsideram áreas vegetadas no interior das voçorocas. Existem pontos de erosão a montante dos modelos obtidos e pontos de deposição a jusante deles, portanto é importante ressaltar que as informações coletadas não correspondem à movimentação total da voçoroca, mas sim apenas os valores captados para as áreas não vegetadas dentro das voçorocas. No entanto, estes valores registram movimentações de massa expressivas nestas feições, como mostram as Figuras 7 A e B.

**Tabela 4** – Classificação clássica das voçorocas estudadas.

<b>Voçoroca</b>	<b>Área projetada em plano</b>	<b>Ponto Mais Baixo</b>	<b>Desnível Máximo</b>	<b>Tipo</b>
<b>Campo de Futebol</b>	10613,781m <sup>2</sup>	1058,67m	38,73m	Dendrítica
<b>Branca</b>	6899,347m <sup>2</sup>	1084,90m	49,96m	Retangular

Para ilustrar em detalhe a progressão temporal, foram selecionadas as áreas marcadas em vermelho na Figura 7.



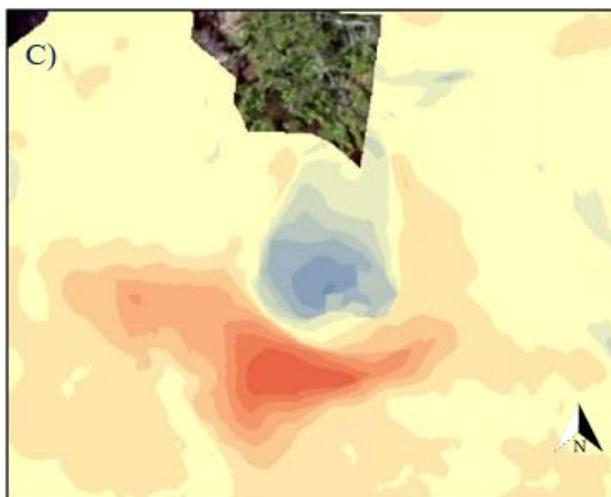
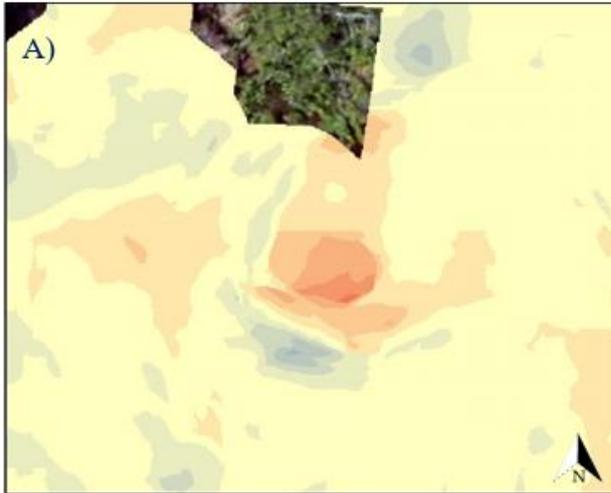
**Figura 7** – Subtração MDE final ao MDE inicial, onde os tons de azul representam deposição e os de vermelho erosão. A) Voçoroca do Campo de Futebol; B) Voçoroca Branca. Os quadros vermelhos realçam as regiões das Figuras 8-14.

Pode-se perceber também um crescimento vegetativo que condiz com o esperado da estação de verão, que é relevante na distorção do MDE indicando falsas deposições. Estes erros foram filtrados na geração dos modelos de subtração bem como para gerar todas as tabelas deste trabalho. Na Voçoroca do Campo de Futebol, por exemplo, sua característica dendrítica contribuiu para uma persistência maior da vegetação em suas cabeceiras. Mesmo que essas não impeçam o processo erosivo, esta região foi excluída das análises numéricas deste trabalho.

#### 4.1.1 Cavidade no Norte da Voçoroca do Campo de Futebol

Desníveis acentuados tanto em cavidades circulares quanto nos cursos de um canal ocasionam erosões radiais que se propagam a montante, ou seja, evoluem por erosão remontante (Figuras 8-10). Isto ocorre devido à alta energia concentrada em pequenas cascatas no leito do canal e nas paredes que o confinam. Dentro destes pequenos canais confinados pode haver, também, o efeito denominado bacia de impacto conforme Bergonse (2011), que gera incisões verticais do leito do canal e que possui fluxo intermitente de água (Figura 8). As irregularidades (degraus, ou *steps*) ao longo dos canais são rapidamente eliminadas por erosão remontante. Isto é claramente observado nos gráficos de diferença altimétrica entre voos que mostram a propagação de frentes erosivas em direção às paredes da voçoroca (Figuras 8 a 10) e de declividade que mostram a suavização dos leitos.

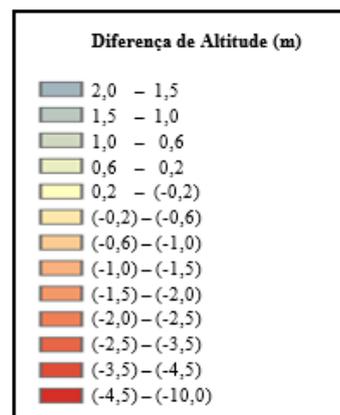
Assim como em canais, estruturas em forma de cavidade também não perduram, pois o aumento da declividade imediatamente a montante associado a escavação da parede na base propicia a rápida erosão das mesmas (Figuras 8 e 9).



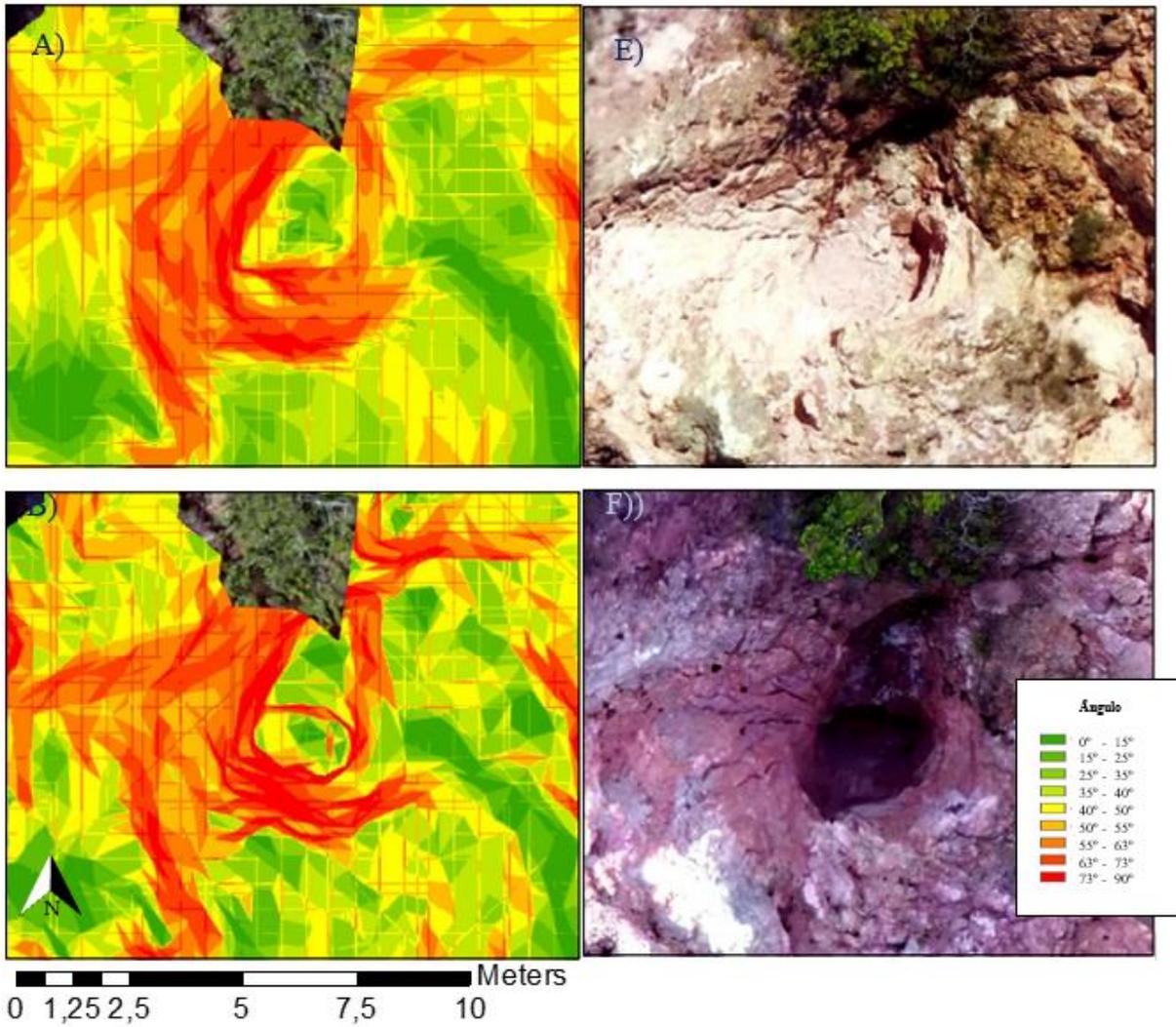
0 1,25 2,5 5 7,5 10 Meters

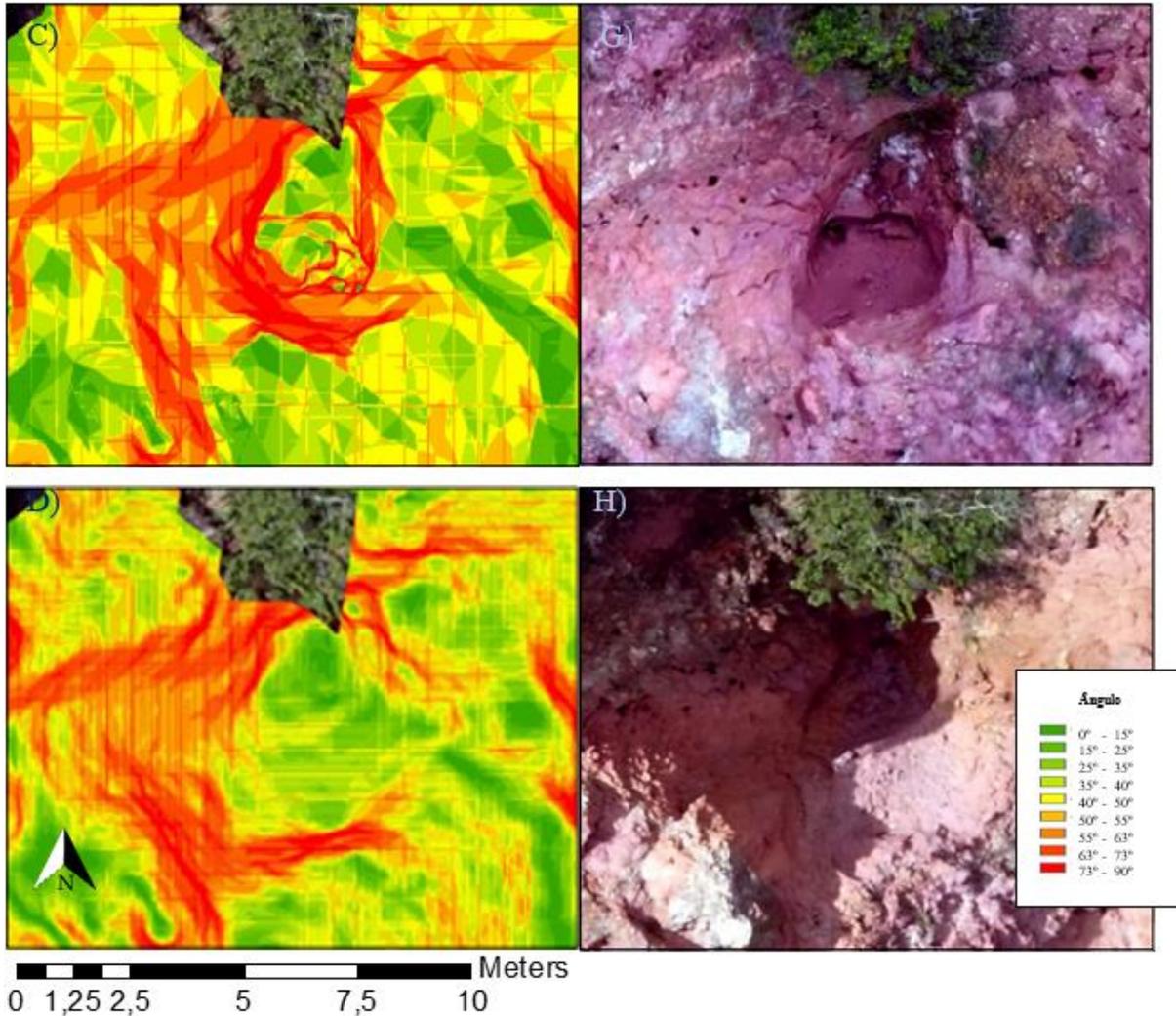


0 10 20 40 60 80 Meters



**Figura 8 de A ate C** - Subtração da elevação entre os voos : A)2-1; B)3-2; C)4-3. Observa-se que o sepamento da base em A resulta no desmoronamento presente em C.

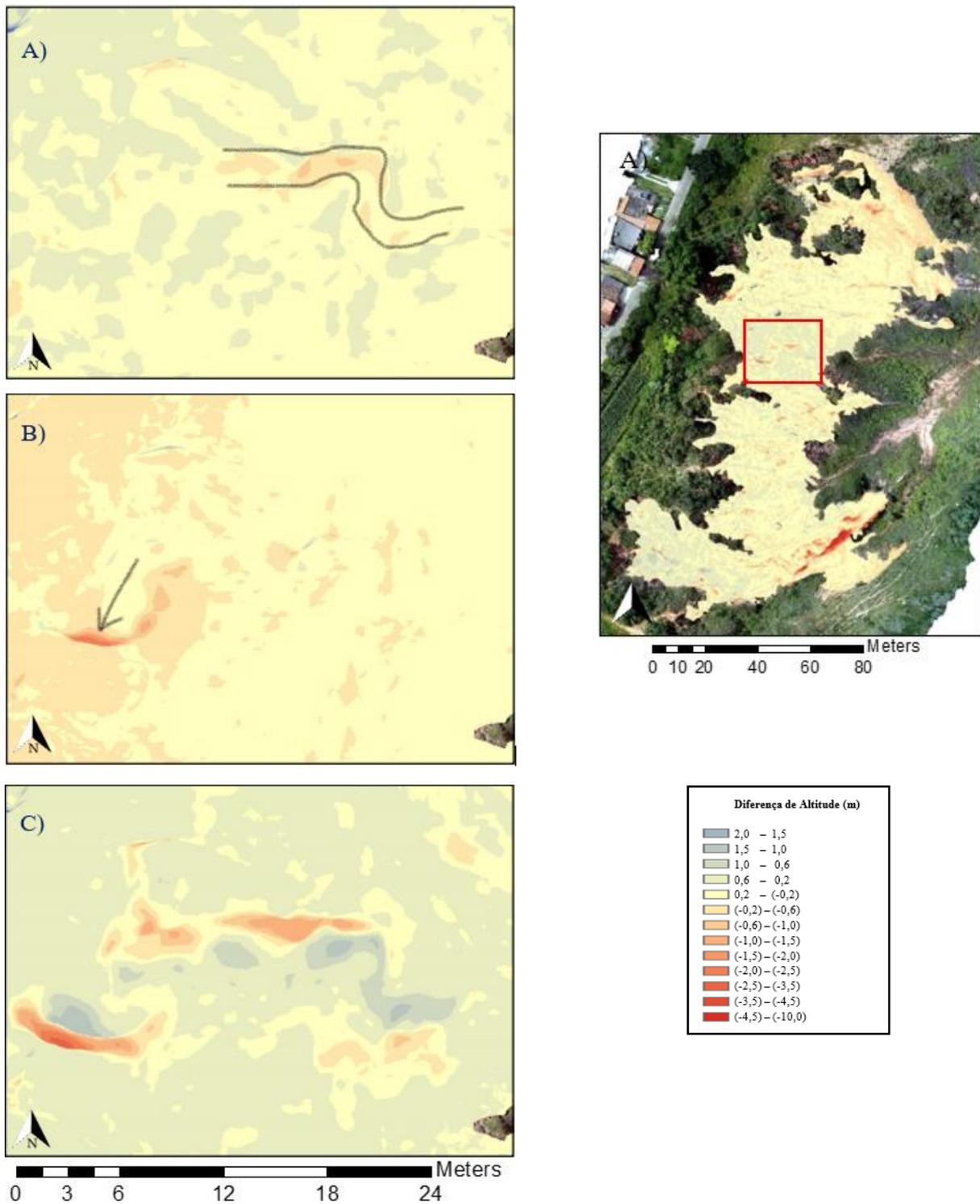




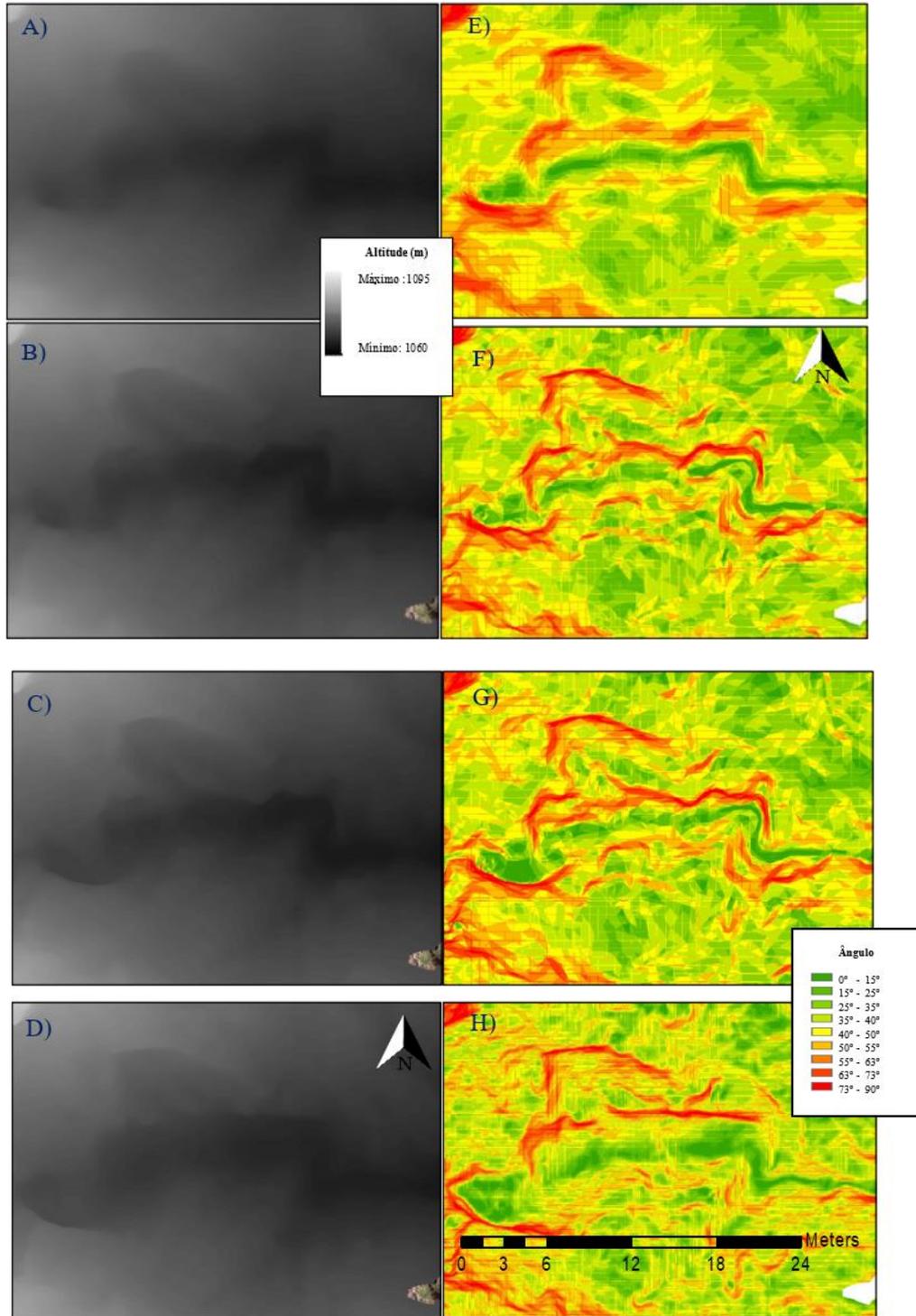
**Figura 9 de A ate H** - *Slope*, declividade dos MDE's, dos voo 1 ao 4 respectivamente e Ortomozaicos dos mesmos logo a direita. Note a expansão radial da zona de alta declividade entre os painéis C e D, evidenciando a cavidade como um ponto de nucleação. Neste caso, o fluxo hídrico principal vem de noroeste na voçoroca. As erosões observadas na parede oeste da cavidade são acompanhadas de deposição e preenchimento da mesma. Juntamente, há a suavização do canal que escoia a cavidade na direção leste/sudeste (verde).

#### 4.1.2 Canal ao centro da Voçoroca do Campo de Futebol

Em alguns canais sem um desnível acentuado no leito do mesmo, observa-se a escavação distribuída longitudinalmente ao longo do canal (Figura 10 e 11). Este padrão é semelhante à maneira como se desenvolvem as cavidades (Figuras 8-9). É interessante notar que a erosão das paredes que confinam o canal se expande na direção remontante, alargando o canal (Figuras 11 E-H). Isto pode ser atribuído à evolução das porções íngremes de cada subárea, as quais aumentam a potência erosiva no local, seja em formato radial (Figura 8-9) ou longitudinal (Figura 10-11). Analogamente observa-se na região oeste da Figura 10 B o surgimento de um sulco que acentua uma erosão em cunha em 11 C.



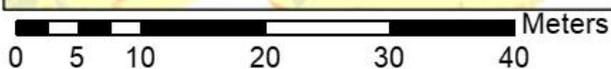
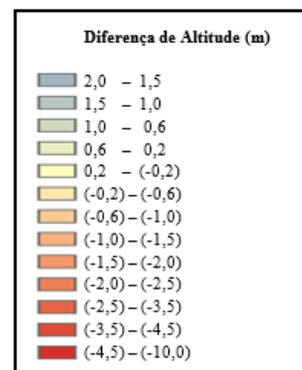
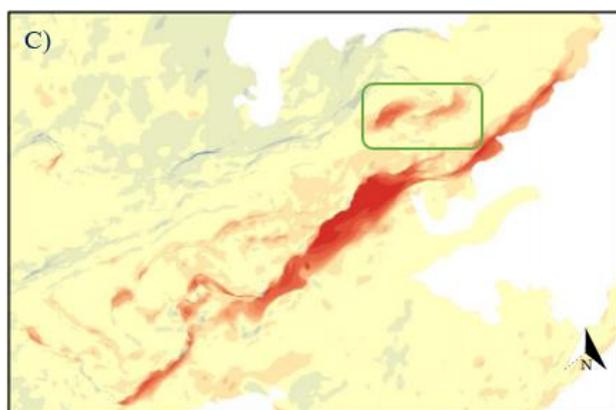
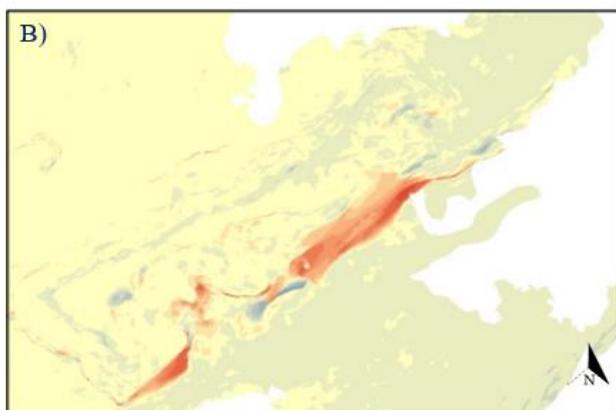
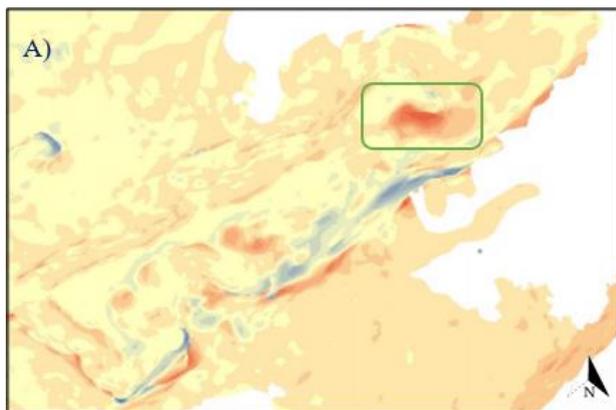
**Figura 10 de A até C** - Subtração da elevação entre os voos nos tempos: A)2-1; B)3-2; C)4-3. Note a evolução dos canais em C, sempre associadas a escavação das bases realçadas **em A e B, como premissa**. Neste caso, o fluxo hídrico principal vem de oeste na voçoroca. As erosões observadas nos exemplos citados propiciam a rápida iniciação de canais de escavação que possuem paredes erodidas (vermelho) e canais preenchidos (azul).



**Figura 11 de A até H - MDE's, de A até D respectivamente e declividade dos mesmos logo abaixo (E até H). Note as zonas de alta declividade paralelas ao canal principal se propagando radialmente, ou seja, progressivamente se distanciando do canal.**

### 4.1.3 Comportamento das Cristas no sul da Voçoroca do Campo de Futebol.

Na porção sul da voçoroca do Campo de Futebol, o comportamento evolutivo da erosão que acentua a declividade das bordas de um canal e precede erosões mais expressivas pode ser observado na área realçada pelo retângulo verde (Figuras 12A e 12C). Já na parte central, foco da visualização, observa-se um grande desmoronamento de um dos lados de uma crista da voçoroca, que pode ser relacionado a erosões na base, anteriores aos períodos de sobrevoo, ou associado a taludes com inclinação negativa, que não pode ser registrada pelos MDE's. A variação das declividades e escavações nas bases de taludes íngremes podem indicar erosões e agradações futuras.



**Figura 12 de A até C** – Subtração da elevação entre voos nos tempos: A)2-1; B)3-2; C)4-3. Desmoronamentos progressivos das cristas longitudinais. Realçado em verde, evolução erosiva desencadeada em A e continuada em C.

#### **4.1.4 Análise geral da voçoroca Branca**

Em todas as análises da Voçoroca Branca também é possível notar deposições expressivas (tons azulados na escala de cores), as quais estão associadas a erosões imediatamente a montante (Figuras 13 a 16). Na Figura 13 A e 14 A e B, por exemplo, a erosão circular que une dois pontos erosivos e acentua a declividade nas bordas da cavidade também acompanham uma deposição de sedimentos no interior da mesma, possivelmente proveniente da erosão das paredes da cavidade e de outros pontos imediatamente a noroeste.

Nas feições da Figura 15 pode-se observar a evolução de uma erosão sentido norte, sempre escavando os pontos mais baixos aumentando assim a declividade, que acaba por desencadear deslizamentos imediatamente a montante. Observamos também que a massa proveniente destes deslizamentos é responsável pelo preenchimento de inúmeros sulcos (Figura 16).

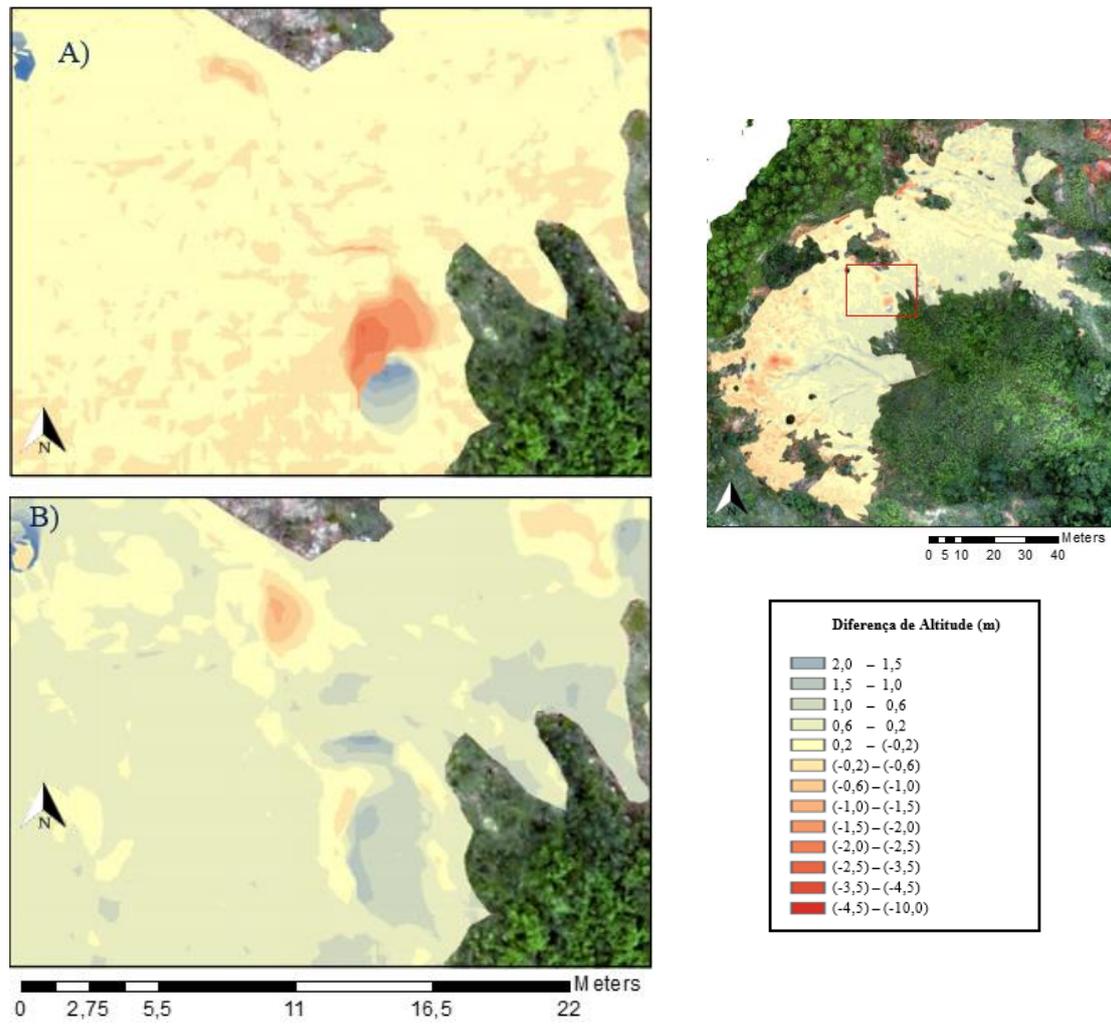
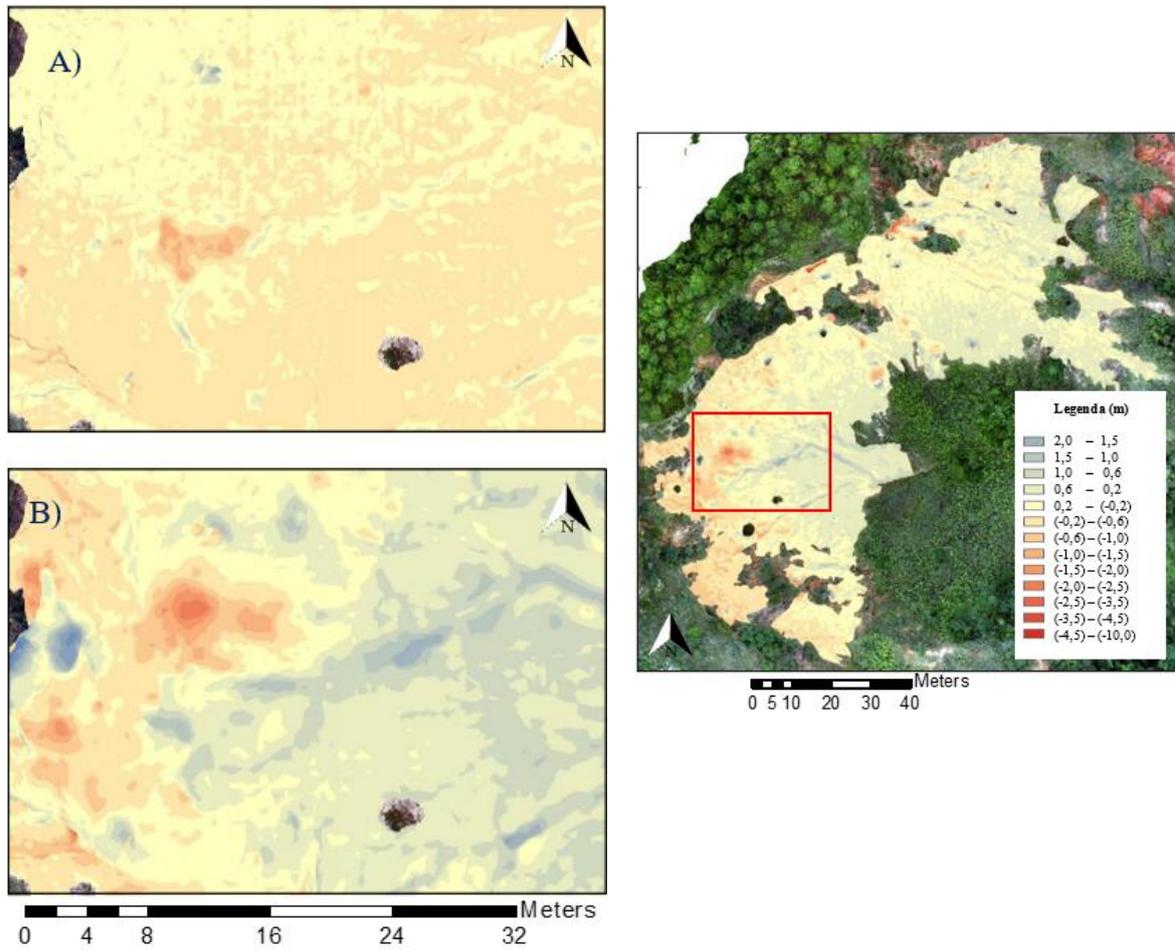


Figura 13 A e B - Subtração da elevação entre os voos nos tempos: A)2-1; B)3-2. Observa-se que em A inicia-se um movimento erosivo, com deposição imediatamente a montante, que em B é suprimido por um grande volume deposicional.



**Figura 14 de A até C** – Mapa de declividade região centro-leste da voçoroca branca. Observe-se que a intensa deposição nessa região mais baixa abranda todas as declividades em 3.

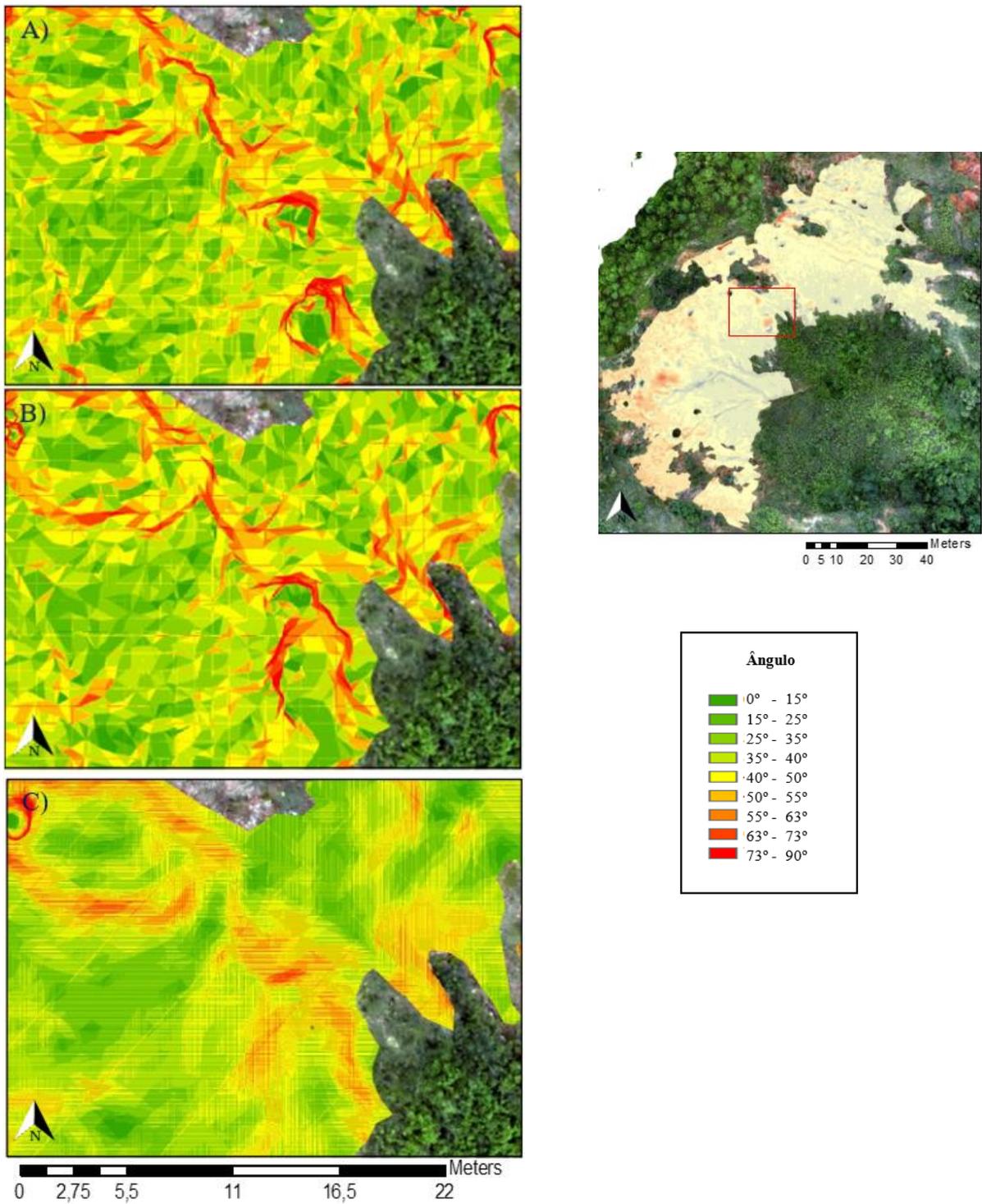
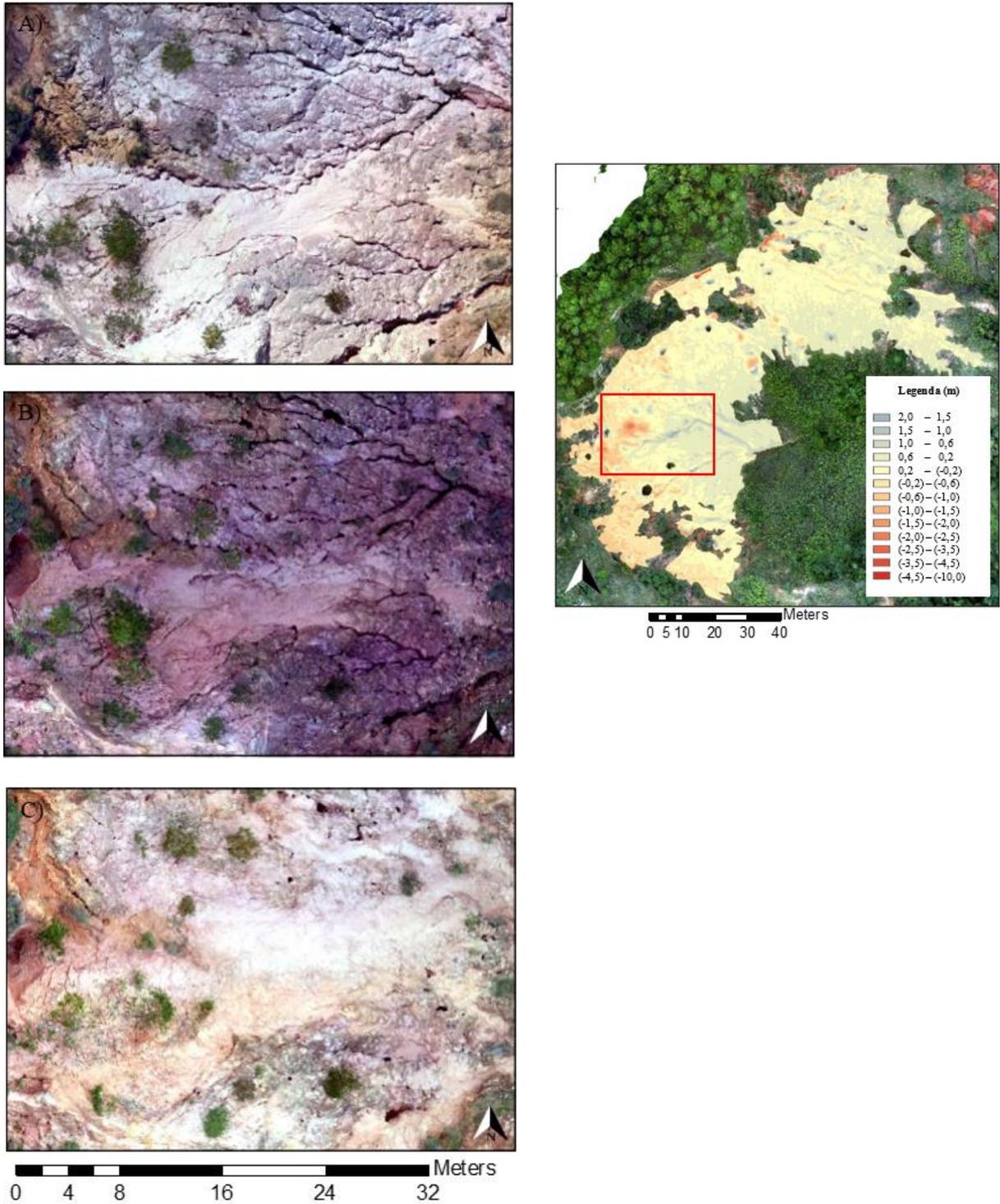


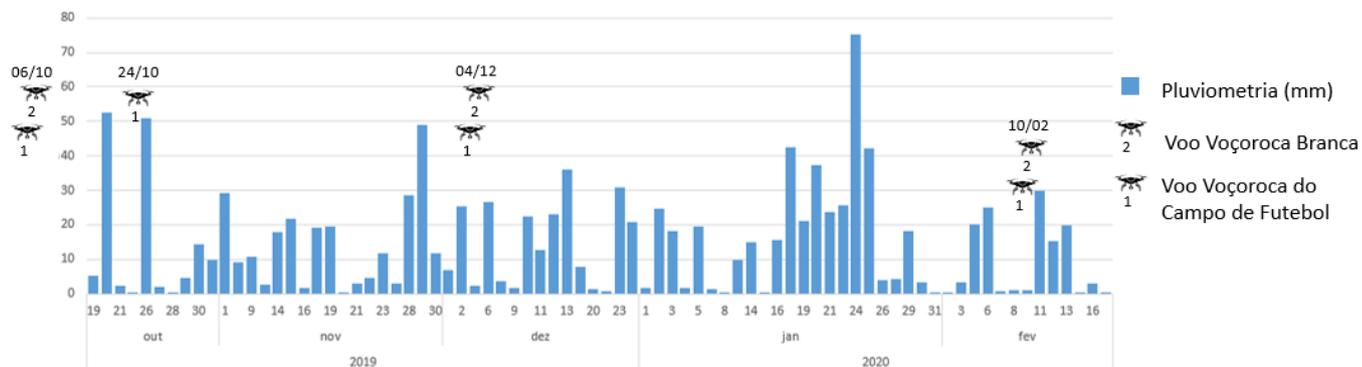
Figura 15 A e B - Subtração da elevação região central da voçoroca branca, entre os voos A)2-1; B)3-2.



**Figura 16 de A até C** - Ortomozaicos da região central da voçoroca branca. A) Vôo 1; B) Vôo 2; C) Voo 3. Note que entre os sulcos presentes nos voos 1 e 2 se encontram preenchidos no voo 3. Isto ocorre após o movimento de massa nas áreas fontes que gera sedimento que são em seguida depositados no interior da voçoroca.

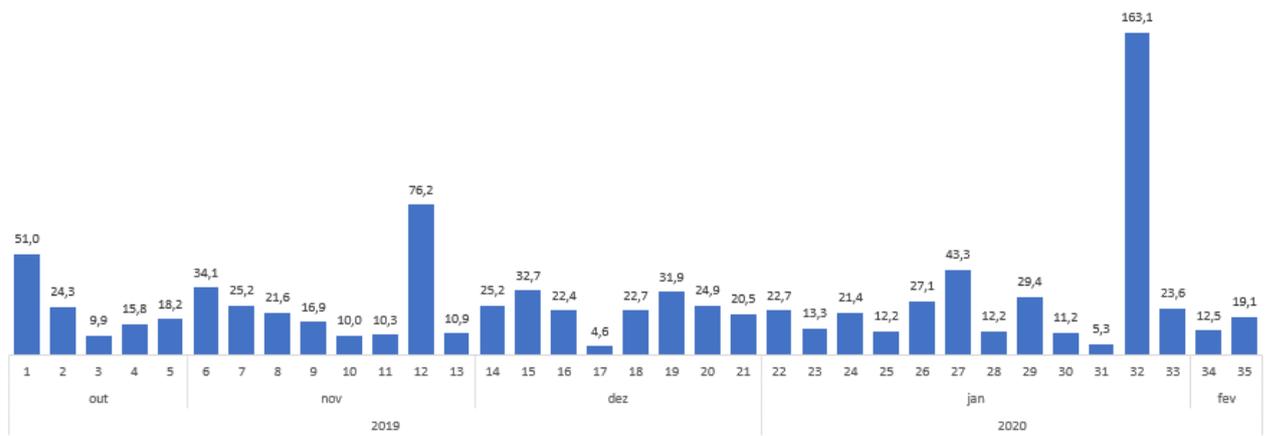
## 4.2 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA

As informações pluviométricas foram coletadas durante o período estudado e estão dispostas na Figura 17, que também registra as datas referente a cada voo. Os dados pluviométricos foram tratados como indicado por Wischmeier & Smith (1978) e redistribuído temporalmente segundo o gráfico de chuva (Figura 18). Sua análise foi realizada paralelamente aos registros erosivos.



**Figura 17** - Pluviometria diária entre Outubro/2019 e Fevereiro/2020, e datas dos Voos em cada uma das voçorocas. (Observa-se a maior chuva desde que são feitas medições entre os dias 16 e 25 de janeiro de 2020).

Com base nos dados das estações meteorológicas de Santo Antônio do Leite e de Córrego Alegre, foram identificados 40 eventos de chuvas que ocorreram entre os voos 1 e 3, os quais duraram quase metade do tempo total de chuva do período entre os Voos 3 e 4 (Figura 18). Este último período, por sua vez, registra a quantidade de 21 chuvas. Este padrão é evidente na série temporal de pluviosidade (Figura 17), mostrando a extensa duração das chuvas no período entre os Voos 3 e 4. A precipitação média por hora de chuva é similar entre os dois períodos supracitados. Porém, a principal diferença entre eles é: entre os Voos 1 e 3, os eventos chuvosos possuíam intervalos de períodos de estiagem ao passo que entre os voos 3 e 4 os eventos chuvosos foram longos, e possivelmente, suficientes para saturar o solo em longos períodos de precipitação constante.



**Figura 18** – Pluviometria agrupada por número da chuva no período, meses e anos relacionados para facilitar compreensão cronológica (gráfico feito com dados do quadro anexado no apêndice).



## CAPÍTULO 5

### DISCUSSÃO

Grandes movimentos de massa na parte interna das voçorocas estão associados a movimentos menores que alteram a declividade localmente e desestabilizam regiões imediatamente a montante. Foi possível dividir os processos erosivos em dois tipos, um onde se desenvolvem erosões basais e movimentações menos expressivas, relacionadas a períodos de chuva comum com estiagem frequente, e outro durante períodos de chuva perene onde ocorrem deslizamentos em cunha capazes de transportar volumes mais expressivos.

#### 5.1 EROSÃO E PLUVIOSIDADE

Observa-se que chuvas intensas e de curta duração e/ou com estiagens longas entre si são importantes para desencadear processos erosivos mais expressivos ao ocasionarem escavações nas bases dos taludes dentro da voçoroca. Porém, elas provocam um resultado erosivo global muito inferior ao ocasionado por chuvas perenes e, ainda, deposições distribuídas por toda região da voçoroca. Portanto, no período entre os Voo 1 e 3 observa-se a incompetência das chuvas em carrear o material desagregado para fora da voçoroca quando comparado ao período subsequente, já que os dados volumétricos da tabela não podem ser analisados de maneira absoluta. Apesar de haver incertezas nos dados quantitativos (ver Discussão), os dados de erosão total revelam uma relação entre o balanço de massa dentro de cada voçoroca e a pluviosidade da região (Tabela 5).

**Tabela 5** - Erosão por voçoroca x Pluviosidade.

Voçoroca	Tipo de Análise	Voo 1 ao 2	Voo 2 ao 3	Voo 3 ao 4	Voo 1 ao 4
Campo de Futebol	Erosão total (m <sup>3</sup> )	-1208,9	7,954	-1772,6	-1410,38
	Deposição total (m <sup>3</sup> )	988,043	1442,402	528,783	0,00231
	<b>Total</b>	<b>-220,85</b>	<b>924,448</b>	<b>-1243,82</b>	<b>-1410,38</b>
Branca	Erosão total (m <sup>3</sup> )	-262,015		-2947,4	-2115,06

	Deposição	1369,18	593,194	873,361
	<b>Total</b>	<b>1107,165</b>	<b>-2354,21</b>	<b>-1241,7</b>
<b>Pluviometria (das Chuvas)</b>	Nº de Chuvas	1	39	61
	Pluviometria (mm <sup>3</sup> )	50,99	298,32	925,31
	Horas de chuva	29:30:00	156:20:00	502:00:00
	Média(mm <sup>3</sup> /h)	1,728	1,908	1,84

. As áreas erodidas nos períodos de chuvas intermitentes, Voo1 ao 3 são uniformemente espalhadas por toda voçoroca. É importante destacar que o polígono de análise não abrange toda área interna a voçoroca, devido a necessidade de ignorar as áreas vegetadas.

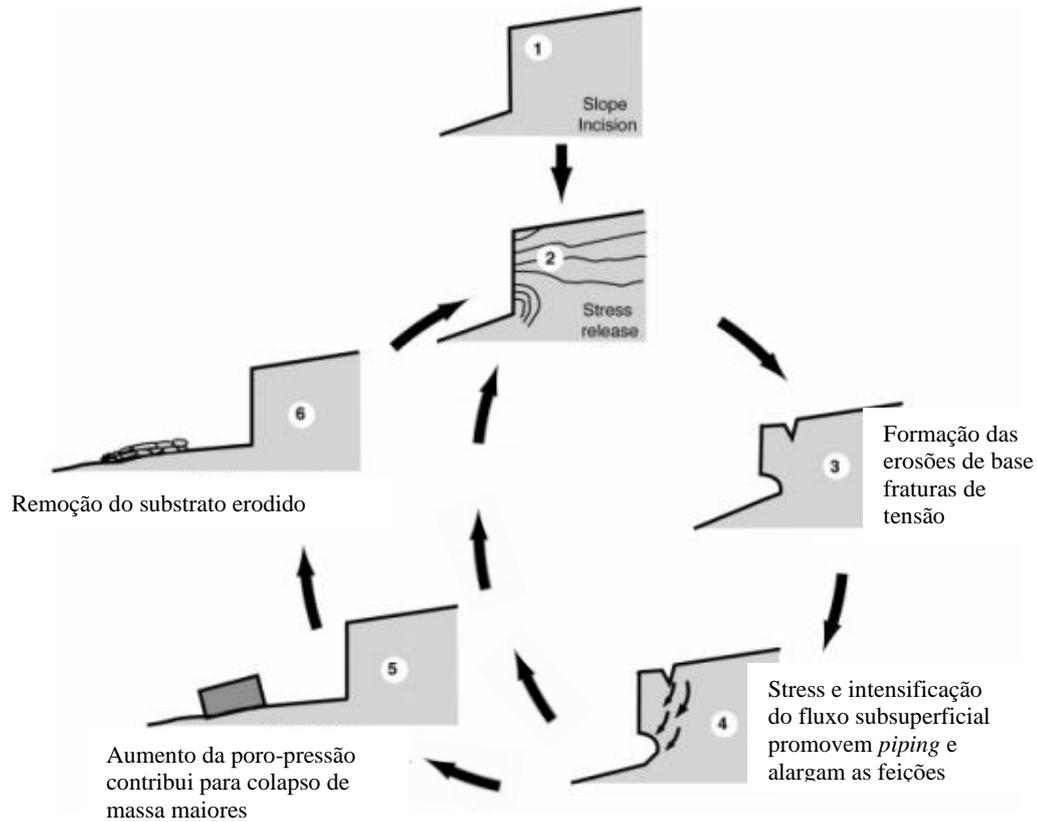
Outro fator que contribui para a erosão se mostrar menor que a deposição em períodos de chuvas espaçadas e intensas é a hidratação do sedimento transportado. Materiais argilosos apresentam aumento volumétrico de até 140% após serem desagregados (Ricardo e Catalani, 1990). Portanto, períodos de estiagem longos podem refletir a desidratação e desagregação do material argiloso, proporcionando também pequenas ranhuras muito visíveis nas Figuras 16 A e B.

## 5.2 CICLOS EROSIVOS

As feições erosivas encontradas e suas evoluções temporais progridem de maneira semelhante ao ciclo de avanço erosivo das Voçorocas proposto por Collison (2001). Por isso este trabalho sugere a existência de duas possibilidades erosivas, uma que ocorre durante chuvas convencionais de curta duração, possivelmente sem saturar o solo, responsáveis por erosões nas bases dos taludes como evidenciado em (3) ou acentuando as declividades (Figura 16).

Este tipo de chuva, entretanto, não é competente o suficiente para transportar o sedimento que desmorona das paredes da voçoroca, o que encurta o ciclo, como sugerido pelas setas do *loop* (Figura 20). No caso de chuvas de longa duração, o ciclo se completa e proporciona a ocorrência de movimentos de massa em cunha bem como o carreamento dos materiais erodidos (5 e 6). Isso pode ser interpretado pela saturação do solo depois de longos períodos de chuva, o que inibe a infiltração e permite tanto fluxos superficiais maiores quanto fluxos subterrâneos intensificados pela elevação do nível freático. A Figura 19 mostra, também, os dois tipos de erosão de base observados nos MDEs deste estudo. Por

exemplo, em (3) a erosão de base que escava o sopé dos taludes e em (5) a erosão que acentua as declividades, ambas se desenvolvem de baixo para cima, ou seja, são remontantes. Por vezes estas podem ser ocasionadas por fluxos de água superficial ou subterrânea ou simplesmente pelo peso da coluna de material posicionada logo acima.

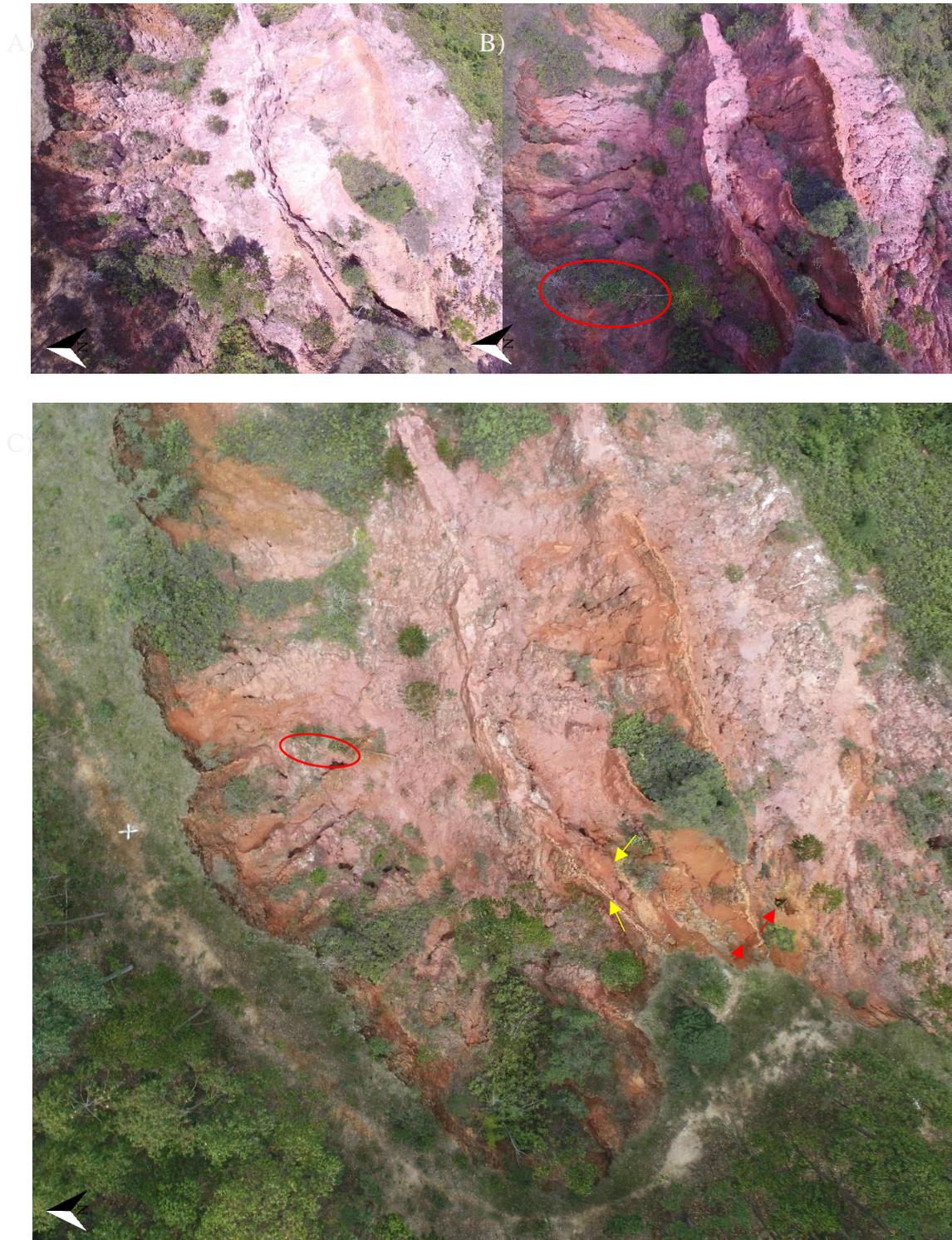


**Figura 20** - Ciclo de Avanço Erosivo das Voçorocas - As linhas presentes em 2 representam regiões de mesma tensão (adaptado de Collison, 2001).

### 5.3 CONTENÇÃO DA EROSÃO E RECOMENDAÇÕES

A vegetação presente próxima das bordas das voçorocas impediu que fossem gerados modelos que incluíssem estas áreas. Logo, não foi possível medir o avanço das cabeceiras já que os modelos comparados foram recortados em polígonos idênticos para realização das comparações. No entanto, pode-se perceber o avanço das bordas por inspeção visual dos ortomosaicos (Figura 19). A vegetação associada à parte mais alta das voçorocas, seja natural ou de plantio, mostrou-se ineficiente o que sugere a inutilidade de programas de plantação em ravinas em expansão via movimentos de massa nesta voçoroca. Isto é observado tanto nos modelos, que demonstram deposições expressivas imediatamente a jusante da mata, associadas a chuvas persistentes entre os voos 3 e 4, quanto nas fotografias que exibem erosões se sobrepondo a vegetação (Figura 19A-C). Estas observações corroboram os estudos de Betts

et al. (2003), que verifica que a vegetação só consegue sobressair sobre a erosão dentro de voçorocas em regiões de baixo declive quando estas já estão em estágio de inatividade.



**Figura 19** – Imagens aéreas do norte da Voçoroca Branca, voo sentido W-L. A) Voo 1; B) Voo 2. A elipse destaca a queda de Eucalipto de cerca de 9m, ocasionada pelo avanço de um canal que desaterra o sopé do mesmo; C) Voo 3. Neste caso, a elipse mostra a queda de um eucalipto

de 3 metros. As setas amarelas mostram deslizamentos que soterraram parcialmente arbustos enquanto as setas vermelhas mostram deslizamentos que transportam arbustos.

Por último, a falta de aferições in-situ da erosão com métodos alternativos impediu a calibragem dos dados de erosão obtidos com o VANT. Assim, o objetivo de utilizar dados volumétricos para uma análise quantitativa precisa não foi alcançado. O uso de estacas e pinos de erosão para calibração podem ser úteis para conferência dos dados em estudo futuros (Guerra 1996). Os pinos devem ser utilizados também como pontos de controle. Portanto, é importante fixá-los em regiões de fácil visualização e nos momentos de voo realçá-los com um PVC ou cal, junto ao solo, de maneira que estes não interfiram no processo erosivo. Já as estacas devem ser utilizadas para o controle da erosão em regiões vegetadas, podendo ser associadas ou não ao uso dos pinos nestas áreas.



## **CAPÍTULO 6**

### **CONCLUSÕES**

---

O uso do VANT para produção de MDEs foi bem-sucedido e revelou zonas de erosão e deposição dentro das voçorocas. Com o objetivo de comparar os comportamentos erosivos internos as voçorocas, este estudo identificou que a evolução da superfície no interior destas feições erosivas é dinâmica, muda rapidamente na escala temporal de dias a meses e depende da duração e intensidade de chuvas. Feições erosivas como movimento de massa, deslizamento gravitacional desencadeado possivelmente pela presença de água e pela escavação do leito e paredes dos canais são feições e processos que podem ser identificados com as medidas feitas com o VANT. O monitoramento das voçorocas com o uso de um VANT se mostrou promissor para estudos desta natureza, pois permitiu uma modelagem evolutiva comparativa de maneira prática, porém são necessários cuidados adicionais para uma análise quantitativa robusta. De toda maneira, as feições erosivas identificadas são coerentes e seguem padrões de erosão remontante esperados em áreas de erosão de canais e encostas. O monitoramento contínuo pode auxiliar na validação das teorias evolutivas das voçorocas. Porém é necessário o desenvolvimento de um método sistemático para aperfeiçoar a calibragem de dados de erosão e deposição. É evidente, ainda, a importância de se classificar os eventos chuvosos para entender melhor os processos erosivos. Monitorar, também, a saturação do solo durante os períodos estudados permitirá estabelecer relações de causa e efeito em estudos futuros.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Ab'Saber, A. N. (1986). As boçorocas de Franca. *Revista da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Franca*, **1**(2): 5-27p.
- Amorim, R. S. S.; Silva, D.; Pruski, F. F.; Matos, A. T. (2001). Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, [online]. 2001, vol.5, n.1.124-130p.
- Bacelar, L. A. P., Coelho Netto, A. L., Lacerda, W. A. (2005) Controlling factors of gullying in the Maracujá Catchment, Southeastern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. **30**, 1369-1385p.
- Bacelar, L. A. P. (2000). Condicionantes geológicas, geomorfológicas e dos mecanismos de voçorocamento na bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG. COPPE/UFRJ, 225 p.
- Bergonze R. (2011). Formas Processos e Padrões na Erosão por Ravinamento Para um Enquadramento Teórico Corrente. Lisboa, PT. Finisterra, XLVI, **92**, 2011. 99 120p.
- Betts, H.D., Trustrum, N.A. and Rose, R.C.D. (2003), Geomorphic changes in a complex gully system measured from sequential digital elevation models, and implications for management. *Earth Surf. Process. Landforms*, **28**: 1043-1058p. doi:10.1002/esp.500
- Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research*, **42**(12), 2849-2861p.
- Bradford J M, Piast R F (1980) – Erosional development of valley-bottom gullies in the upper midwestern United States. In Coates D R, Vitek J D (eds.) *Thresholds in Geomorphology*. George Allen & Unwin: 75-101p.
- BRASIL. Lei no 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. *Diário Oficial da União, Brasília*. as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996.
- Braz, A. M., Josué, P. S. B., et al (2015). Análise da Aplicação de VANT na Atualização de Cadastro Florestal com Uso de Pontos de Controle. João Pessoa-PB, Brasil. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE*, 545p.
- Brooks A P; Shellberg J G, Knight J, Spencer J (2009) Alluvial gully erosion: an example from the Mitchell fluvial megafan, Queensland, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**: 1951-1969p.
- Castillo, C., Gómez, J. A. A. (2016). Century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*. vol. **160** 300-319p.
- CEMADEN. (2020). Pluviômetros Automáticos. DISPONÍVEL em: <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#> Acesso em: 17 de Junho de 2020.

- Parreiras, M. A. 2021, Avaliação do uso de Drones para Monitoramento de erosões na Região de Santo Antônio do Leite-MG
- Collison A J C (2001) The cycle of instability: stress release and fissure flow as controls on gully head retreat. *Hydrological Processes* **15**: 3-12p.
- Charlton. R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. Oxon, UK, 223p.
- Crouch R J, Blong R J (1989) Gully sidewall classification: methods and applications. *Z.Geomorph*, **33** (3): 291-305p.
- DAEE (1989). Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas. Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE/IPT. São Paulo, 92p.
- Drummond. F. N. (2006). Caracterização e Quantificação dos Processos Erosivos de uma voçoroca na bacia do Riacho Manoel Félix no Complexo Metamórfico do Bação, Quadrilátero Ferrífero – MG. Tese de Mestrado. UFOP. Ouro Preto.
- Faria A. S.; Araújo F. M e Ferreira Jr L. G. (2018). Detecção automática de desmatamentos no bioma cerrado: desafios para o monitoramento sistemático. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás (UFG). Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/8380>, acessado em janeiro de 2021.
- Guerra, A. J. T. (1994). Processo erosivos nas encostas. IN: Geomorfologia uma atualização de bases e conceitos. Cunha, S.B. e Guerra, A. J. T. (org.) Rio de Janeiro. Bertrant Brasil. 2aed 149-209p.
- Guerra, A.J.T. (1996) Processos Erosivos nas Encostas. In: Cunha, S.B. e GUERRA, A.J.T. (orgs). Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 345p.
- Guerra, A. J. T. Silva, A. S. Botelho, R. G. M. (2000) O início do processo erosivo. In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações... (eds). Rio de Janeiro. Bertrand Brasil. 340p.
- Guidicini, G. e Nieble, C.M. (1976). Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Sao Paulo. Editora Edgard Blucher. 170p.
- Herz N. (1970). Gneissic and igneous rocks of the Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil. U.S Geological Survey Professional Paper, 641-B:1-58
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Tan, J., Xie, P. (2019) NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). USA. [https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document\\_files/IMERG\\_ATBD\\_V06.pdf](https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V06.pdf).
- Ireland, H.A.; Sharpe, C.F.S.; Eargle, D.H.(1939). Principles of gully erosion in the Piedmont of South Carolina. US Department of Agriculture Technical Bulletin, n. **633**.142 p.
- Kirkby M. J. e Bracken L. J. (2009). Gully processes and gully dynamics. UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, **34**: 1841-1851p.
- Montgomery, D. R., and Dietrich, W. E. (1994), A physically based model for the topographic control on shallow landsliding, *Water Resour. Res.*, **30**( 4), 1153– 1171p, doi:10.1029/93WR02979.
- Oliveira, A. M. dos S.; Brito, S. N. A. (1998). Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). 586p.

- Oostwoud W. D, Bryan R (2001) Gully-head erosion processes on a semi-arid valley floor in Kenya: a case study into temporal variation and sediment budgeting. *UK. Earth Surface Processes and Landforms*, **26**: 911-933p.
- Oostwoud W. D. Poesen J, Vandekerckhove L, Guesquierem M (2000) Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment. *Catena*, **39**: 147-167.
- Prosser, I. P., and Soufi, M. (1998), Controls on gully formation following forest clearing in a humid temperate environment, *Water Resour. Res.*, **34**( 12), 3661– 3671p, doi:10.1029/98WR02513.
- Ricardo, H.S. e Catalani, G. (1990). *Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavação de Rocha*. São Paulo Ed. Pini, 2ª edição, p.668.
- Salaroli, I. S. (1999). *Mapeamento litoestrutural da região de Santo Antônio do Leite, Ouro Preto, MG*. Ouro Preto. Relatório 253 - UFOP/DEGEO.
- Santos, C.A. dos; Sobreira, F. G.; Coelho Neto, A. L. (2002). Comportamento hidrológico superficial e erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, Distrito de Ouro Preto - MG. *Ouro preto. Revista Escola de Minas*, v.**55**, n. 4.
- Santos H. G. et all (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos -5ª ed*. Brasília - DF, EMBRAPA. 356p.
- Seeger M.; Marzoff I. e Ries J. B. (2009). Identification of gully-development processes in semiarid NE Spain. *Z.Geomorph. N.F.*, **53** (4): 417-431p.
- Selby, M.J. (1993). *Hillslope Materials and Process*. Oxford. Oxford University Press. P.451.
- Snavely, N., (2008). *Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections*, unpublished PhD thesis, University of Washington. USA.
- Sobreira, F. G. (1998). *Estudo das erosões de Cachoeira do Campo, Ouro Preto, MG*. FAPEMIG. 130p.
- Souza G. (2018). *Análise Da Influência Das ConFigurações Dos Pontos De Apoio E Do Voo Na Acurácia De Ortofotomosaicos Elaborados a Partir De Dados De VANT*. Dissertação de Mestrado, UFRGS. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/179640>
- Stein, D. P.(1995). Diagnóstico de erosão. IN: 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Bauru-SP. Anais do 5º Simpósio Nacional de Controle de Erosão. ABGE, P.123.
- Vanmaercke, M., Poesen, J., Van Mele, B., et al. (2016). How fast do gully headcuts retreat?. *Earth-Science Reviews*. vol. **154**. P336-355.
- Wischmeier, W. H. e Smith, D.D.(1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Washington, D.C, United States Department of Agriculture. 58p.
- Westoby. M. J.; Basington, J.; Glasser, N. F.; Hambrey, M. J.; Rreynolds, J. M. (2012) Structure-From-Motion' Photogrammetry: A Low-Cost, Effective Tool For Geoscience Applications. *Geomorphology* 179p.



## Apêndice(s)

### Dados pluviométricos - No período de 16/10/2019 até 10/10/2020

Voo	Nº Chuva	Data de início	Data Fim	Total (mm³)	Duração (h)	Média (mm³/h)	Média por captura (mm³/cap)	Máxima (mm³)	Mínima (mm³)
2	1	19/10/2019 20:20	21/10/2019 01:50	50,99	29:30:00	1,73	41,48	5,49	0,1
3	2	26/10/2019 01:00	26/10/2019 10:10	24,25	09:10:00	2,65	0,66	7,455	0,1
3	3	26/10/2019 16:30	27/10/2019 01:50	9,89	09:20:00	1,06	0,28	1,67	0
3	4	28/10/2019 15:20	28/10/2019 19:50	15,75	04:30:00	3,5	1,43	5,215	0
3	5	30/10/2019 16:50	31/10/2019 07:50	18,17	15:00:00	1,21	0,29	0,785	0
3	6	01/11/2019 13:50	02/11/2019 03:00	34,05	13:10:00	2,59	0,54	1,08	0,1
3	7	14/11/2019 19:30	15/11/2019 02:40	25,18	07:10:00	3,51	0,65	1,28	0,1
3	8	15/11/2019 06:20	16/11/2019 03:50	21,59	21:30:00	1	0,23	0,39	0,1
3	9	18/11/2019 12:20	19/11/2019 01:50	16,87	13:30:00	1,25	0,3	0,69	0
3	10	19/11/2019 16:40	20/11/2019 00:20	10,02	07:40:00	1,31	0,39	0,69	0
3	11	22/11/2019 22:20	23/11/2019 10:20	10,28	12:00:00	0,86	0,23	0,395	0
3	12	28/11/2019 15:50	29/11/2019 08:50	76,23	17:00:00	4,48	0,85	1,67	0,1
3	13	30/11/2019 06:00	30/11/2019 18:00	10,91	12:00:00	0,91	0,22	0,39	0
3	14	01/12/2019 20:00	02/12/2019 10:20	25,16	14:20:00	1,76	0,38	0,69	0
4	15	05/12/2019 17:30	07/12/2019 10:50	32,75	41:20:00	0,79	0,25	0,785	0
4	16	10/12/2019 07:20	10/12/2019 20:30	22,45	13:10:00	1,7	0,33	0,59	0,1
4	17	11/12/2019 03:20	11/12/2019 12:20	4,58	09:00:00	0,51	0,19	0,295	0,1
4	18	11/12/2019 15:50	12/12/2019 08:30	22,69	16:40:00	1,36	0,35	0,885	0
4	19	13/12/2019 18:20	14/12/2019 03:20	31,91	09:00:00	3,55	0,68	1,275	0,1
4	20	23/12/2019 01:20	23/12/2019 09:10	24,88	07:50:00	3,18	0,57	1,08	0,2
4	21	24/12/2019 00:20	24/12/2019 20:20	20,53	20:00:00	1,03	0,27	0,59	0
4	22	02/01/2020 15:40	03/01/2020 02:20	22,69	10:40:00	2,13	0,38	0,69	0,1
4	23	03/01/2020 09:20	03/01/2020 20:00	13,32	10:40:00	1,25	0,37	0,985	0
4	24	05/01/2020 06:20	05/01/2020 14:20	21,37	08:00:00	2,67	0,61	1,87	0,1
4	25	10/01/2020 16:00	10/01/2020 23:10	12,19	07:10:00	1,7	0,47	1,575	0,1
4	26	14/01/2020 15:30	15/01/2020 01:20	27,14	09:50:00	2,76	0,7	2,065	0
4	27	16/01/2020 19:20	17/01/2020 21:20	43,28	26:00:00	1,66	0,46	1,275	0
4	28	19/01/2020 16:50	19/01/2020 21:00	12,19	04:10:00	2,92	0,64	1,57	0,295
4	29	20/01/2020 16:40	21/01/2020 04:20	29,38	11:40:00	2,52	0,54	0,985	0,1
4	30	22/01/2020 19:10	22/01/2020 22:00	11,21	02:50:00	3,96	1,02	3,74	0,195
4	31	23/01/2020 02:20	23/01/2020 07:40	5,34	05:20:00	1	0,24	0,395	0,1
4	32	23/01/2020 12:40	26/01/2020 06:20	163,11	65:40:00	2,48	0,58	2,755	0

4	33	28/01/2020 18:20	29/01/2020 17:50	23,61	23:30:00	1	0,34	1,275	0
4	34	05/02/2020 11:20	05/02/2020 15:50	12,5	04:30:00	2,78	0,62	1,475	0,1
4	35	06/02/2020 18:00	07/02/2020 03:10	19,1	09:10:00	2,08	0,49	0,79	0

---