



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

Douglas Ricardo Briske

**MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTOS COMPLEXOS: GEOMETRIA DOS
CORPOS ÍGNEOS E ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS EM
DIQUES MÚLTIPLOS, PONTA DAS ANDORINHAS, PALHOÇA – SC**

Florianópolis

2023

Douglas Ricardo Briske

**MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTOS COMPLEXOS: GEOMETRIA E
ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS EM DIQUES MÚLTIPLOS,
PONTA DAS ANDORINHAS, PALHOÇA – SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Geologia.

Orientadora: Profa. Luana Moreira Florisbal, Dra.

Florianópolis

2023

Briske, Douglas Ricardo

MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTOS COMPLEXOS : GEOMETRIA E
ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS EM DIQUES MÚLTIPLOS, PONTA
DAS ANDORINHAS, PALHOÇA - SC / Douglas Ricardo Briske ;
orientadora, Luana Moreira Florisbal, 2023.

76 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de
Pós-Graduação em Geologia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Geologia. 3. Sistemas Aéreos Pilotados
Remotamente. 4. Fotogrametria. 5. Modelo Virtual de Afloramento.
I. Florisbal, Luana Moreira. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Geologia. III. Título.

Douglas Ricardo Briske

**MODELOS VIRTUAIS DE AFLORAMENTOS COMPLEXOS: GEOMETRIA E
ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS EM DIQUES MÚLTIPLOS,
PONTA DAS ANDORINHAS, PALHOÇA – SC**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 23 de março de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. André Pires Negrão, Dr.
Universidade de São Paulo

Prof. Felipe Guadagnin, Dr.
Universidade Federal do Pampa

Prof. Breno Leitão Waichel, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Geologia.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof.(a) Luana Moreira Florisbal, Dr.(a)
Orientador(a)

Florianópolis, 2023.

In memoriam de Célio Briske.

AGRADECIMENTOS

Com todo o meu coração, quero expressar minha imensa gratidão à minha família por ter acreditado em mim e por ter me dado a oportunidade de buscar conhecimento. Eu não poderia ter feito isso sem vocês. Em especial, meu Pai, Célio, que infelizmente nos deixou cedo demais, mas que foi sempre meu maior incentivador. Ele me apoiou incansavelmente e se orgulhava muito do meu percurso acadêmico. Com sua força e suporte, pude realizar meu grande sonho de ser geólogo.

Não posso deixar de agradecer também a minha incrível orientadora, Luana, por sua paciência, dedicação e entusiasmo pela geologia. Sempre disposta a ajudar e compartilhar seus conhecimentos generosamente. Agradeço igualmente ao professor Breno, que tornou o tempo na universidade mais leve e que me ajudou não só na vida acadêmica, mas também fora dela. E ao professor Fernando, que criou uma oportunidade única em minha vida, que me ajudou ver diferentes geologias ao redor do mundo e mudando a direção do meu caminho.

Aos demais professores, meu profundo reconhecimento por seus ensinamentos cruciais que hoje aplico em minhas atividades como geólogo. Aos amigos da geologia, que sempre estiveram ao meu lado, tanto nos bons quanto nos maus momentos, muito obrigado.

Por fim, não posso deixar de mencionar os programas de fomento a educação superior, em especial a CAPES, que me ajudou durante um bom período do mestrado, Programas assim foram muito importantes e que fizeram parte da minha jornada acadêmica, mudando a mesma e também minha jornada pessoal, como o programa Ciência sem Fronteiras, do qual participei durante o governo da Dilma Rousseff. Embora essa experiência tenha ocorrido durante a graduação, foi fundamental para minha formação, pois me permitiu aprender a língua inglesa, uma ferramenta crucial na busca do conhecimento, em especial no mestrado.

Mais uma vez, muito obrigado a todos que fizeram parte da minha jornada até aqui. Sei que ainda há muito por vir, mas estou profundamente grato por tudo o que já conquistei e por todas as pessoas maravilhosas que encontrei ao longo do caminho.

*“Me quieren agitar
Me incitan a gritar
Soy como una roca
Palabras no me tocan
Adentro hay un volcán
Que pronto va a estallar
Yo quiero estar tranquilo”*

(Trecho da música "Borracho y loco",
de Hombres G e Enanitos Verdes)

RESUMO

O estudo em detalhe de diques básicos, seu papel como condutos magmáticos de Grandes Províncias Ígneas, bem como o entendimento dos mesmos como sistemas complexos demanda cartografia detalhada da geometria dos corpos, suas relações de contato com as rochas encaixantes, bem como a investigação da existência de um ou mais pulsos de magmas que os compõem. Nos últimos anos, uma série de avanços tecnológicos vêm sendo aplicados para aprimoramento de mapeamento de detalhe de afloramentos complexos. Neste contexto, a aerofotogrametria, que é um método de sensoriamento remoto, foi utilizada para geração de um modelo virtual de afloramento visando elucidar a geometria dos corpos magmáticos, bem como a estratigrafia dos eventos que compõem um dique múltiplo pertencente ao Enxame de Diques de Florianópolis na Ponta da Andorinha, Palhoça, SC. O uso de um *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS), também conhecido como "drone", permitiu realizar o levantamento aerofotogramétrico que gerou produtos como ortofotomosaico, modelo digital de elevação e modelo digital de afloramento. Estes produtos foram utilizados em conjunto com ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica para delimitar feições do objeto estudado e reproduzir um mapa de detalhe de alta precisão. A integração da fotogrametria com verificação em campo permitiu a delimitação mais assertiva da distribuição espacial dos diversos pulsos de magma básico e ácido nesta zona de conduto. O modelo digital do afloramento gerado pode também ser utilizado como ferramenta de ensino remoto e apoiar futuras investigações de campo, consistindo numa técnica facilmente replicável e importante para a realização de mapeamento de afloramentos geológicos complexos, com resultados de alta precisão e confiabilidade.

Palavras-chave: Sistemas Aéreos Pilotados Remotamente, fotogrametria, modelo digital de afloramento, Enxame de Diques de Florianópolis.

ABSTRACT

The detailed study of basic dykes, their role as magmatic conduits of Large Igneous Provinces, as well as their understanding as complex systems demands detailed cartography of the geometry of the bodies, their contact relationships with the host rocks, as well as the investigation of the existence one or more magma pulses that compose them. In recent years, a series of technological advances have been applied to improve detailed mapping of complex outcrops. In this context, aerial photogrammetry, which is a remote sensing method, was used to generate a virtual outcrop model in order to elucidate the geometry of the magmatic bodies, as well as the stratigraphy of the events that make up a multiple dyke belonging to the Florianópolis Dike Swarm. at Ponta da Andorinha, Palhoça, SC. The use of a Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), also known as a "drone", made it possible to carry out an aerial photogrammetric survey that generated products such as an orthophotomosaic, a digital elevation model and a digital outcrop model. These products were used in conjunction with Geographic Information Systems tools to delimit features of the studied object and reproduce a high-precision detailed map. The integration of photogrammetry with field verification allowed a more assertive delimitation of the spatial distribution of the different pulses of basic and acidic magma in this conduit zone. The digital model of the generated outcrop can also be used as a remote teaching tool and support future field investigations, consisting of an easily replicable and important technique for mapping complex geological outcrops, with highly accurate and reliable results.

Keywords: Remotely Piloted Aerial Systems, photogrammetry, digital outcrop models, Florianópolis Dike Swarm.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Mapa de localização da área de estudos. Extraído de Florisbal *et al.* (2018)..... 14
- Figura 2 – Mapa geológico do Enxame de Diques de Florianópolis: (A) Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis) modificado de Caruso Jr (1993); (B) mapa geológico da Pinheira e praias de Garopaba modificadas de Bitencourt *et al.* (2008). Suíte Paulo Lopes: (1) Granito Paulo Lopes, (2) Granitoides Garopaba; (3) Granito Tabuleiro; (4) Granito Ilha; Suíte Cambirela: (5) Granito Itacorumbi; (6) Riolito Cambirela; (7) diques basálticos do cretáceo, (8) diques compostos do cretáceo; (9) Sedimentos Cenozoicos. Extraído de Florisbal *et al.* (2018)..... 17
- Figura 3 – Mapa da Provincia Magmática Paraná-Etendeka: distribuição de lavas e enxames de diques de PEMP em uma reconstrução pré-deriva da América do Sul e África. Os números correspondem a idades de aquecimento escalonado $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ (em Ma) de lavas, associadas soleiras e diques (círculos). Estrelas são idades U – Pb, estrela negra de Janasi *et al.* (2011) e dados de estrelas brancas deste estudo. MV = Morro Vermelho, NA = Bacia da Namíbia e CU = Bacia de Cuanzá. Modificado de Janasi *et al.* (2011), Peate (1997) Peate *et al.* (1999, 1992) e Stewart *et al.* (1996). Modificado de Peate *et al.* (1999)..... 19
- Figura 4 – Croqui da Ponta da Andorinha, Praia da Pinheira – SC: as fotos indicadas pelas setas representam as diferentes feições do afloramento. Setor norte: 1) presença de micropórfiros de plagioclásio no centro do dique. 2) a borda do dique apresenta minerais pórfiros. 3) Porções da encaixante dispersa em meio a intrusão, a qual foi erroneamente localizada no croqui. 4) Contato entre diques do primeiro e segundo pulso magmático. 5) Material intrusivo brechado em meio a rocha de matriz enriquecida em material félsico. Modificado de Honorato (2019) e Rodrigues (2021). 20
- Figura 5 – Rede de distribuição 3D de de *magma plumbing* de níveis profundos a rasos na crosta alimentando uma variedade de vulcões. Traduzido de Jerram e Bryan (2018). 23
- Figura 6 – Desenvolvimento de diques: esquema de desenvolvimento de diques em regiões onde o processo de rifteamento é predominante (A) e detalhe (B). Traduzido de Jerram e Bryan (2018)..... 23

Figura 7 – Equipamento RPAS utilizado no levantamento aerofotogramétrico. Fonte: do Autor.....	30
Figura 8 – Planejamento de voo: polígono criado no aplicativo DroneDeploy referente ao aerolevanteamento na Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.....	32
Figura 9 – Fluxograma Metashape: fluxo de trabalho para o tratamento e processamento dos dados baseado nos trabalhos de Westoby <i>et al.</i> (2012), Fonstad <i>et al.</i> (2013), e Smith <i>et al.</i> (2016). Extraído de Saque (2017).	34
Figura 10 – Ortofotomosáico produzido pela fotogrametria. Detalhe 1 - Contato claro entre a rocha hospedeira e o primeiro pulso basáltico. Detalhe 2 - Contato entre o primeiro pulso basáltico (rocha mais escura no lado direito) e o segundo pulso basáltico (rocha clara no lado esquerdo). Detalhe 3 - Brecha de conduto próximo à rocha ácida. Fonte: do Autor.	39
Figura 11 – Modelo Digital de Elevação utilizado na produção cartográfica. Fonte: do Autor.....	40
Figura 12 – Modelo virtual 3D interativo do afloramento Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.....	41
Figura 13 – Vista em planta do Modelo Digital de Afloramento interativo do afloramento Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.....	42
Figura 14 – Vista ortográfica do Modelo Digital de Afloramento gerado. Fonte: do Autor.....	42
Figura 15 – O mapa geológico da Ponta das Andorinhas: A) Contato E do primeiro pulso de magma basáltico com rocha granítica encaixante e margem microporfírica; B) Segundo pulso de magma basáltico com contato nítido com dique anterior e margens afíricas; C) Contato W do primeiro pulso básico com corpos lenticulares de brecha ácida e mistura de magma ao longo do contato N-S com encaixantes graníticas; D) Dique tardio básico mm hospedado no primeiro pulso basáltico; E) Dique basáltico tardio afírico NW-SE; F) Brecha de mistura triangular; G) Veios orientados NW-SE de material fundido com pocket de fusão em porções dilatativas. Fonte: do Autor.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	14
2	GEOLOGIA DA PONTA DA ANDORINHA, PRAIA DA PINHEIRA, SC	16
3	REVISÃO CONCEITUAL	22
3.1	SISTEMAS ALIMENTADORES DE GRANDES PROVÍNCIAS ÍGNEAS ...	22
3.2	RPAS - <i>REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS</i>	24
3.3	FOTOGRAMETRIA.....	25
3.4	<i>STRUCTURE-FROM-MOTION</i> E RECONSTRUÇÃO 3D	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1	EQUIPAMENTOS	30
4.2	PLANEJAMENTO DE VOO E AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	31
4.3	TRABALHO DE CAMPO.....	33
4.4	TRATAMENTO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	33
4.5	CARTOGRAFIA	36
4.6	MODELO DIGITAL DE AFLORAMENTO	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1	ORTOFOTOMOSAICO	38
5.2	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	39
5.3	MODELO VIRTUAL DO AFLORAMENTO	41
5.4	MAPA GEOLÓGICO E ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS 42	
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – MANUSCRITO DO ARTIGO SUBMETIDO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES	56
	ANEXO A – CONFIRMAÇÃO DE SUBMISSÃO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES	76

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico promoveu significativa transformação nas ferramentas e técnicas disponíveis para geólogos, enriquecendo suas atividades tanto em campo quanto em laboratório. Antes destes avanços, a coleta de dados de campo detalhados e a construção de mapas de afloramentos dependiam de técnicas que demandavam trabalho essencialmente manual e quem nem sempre retratavam fielmente as feições observadas, seja com relação à proporção das feições mapeadas, seja o posicionamento acurado de cada uma destas feições. Com a inovação da fotografia digital, através da aquisição de imagens de alta resolução e georreferenciadas, a cartografia geológica avançou muito no que tange à documentação, análise remota e comparação temporal e georreferenciamento. Ainda, a aquisição de imagens de alta resolução serve como ferramenta de educação e divulgação das geociências, possibilitando o uso de recursos de imagens com alta resolução também para estes fins. Estes são alguns exemplos do impacto positivo do progresso tecnológico no campo da cartografia nas geociências.

Zonas de condutos magmáticos podem ser áreas de alta complexidade geológica (Jerram e Bryan, 2018), requerendo levantamentos geológicos detalhados para a construção de modelos evolutivos, sendo isso garantido pela utilização de novas tecnologias.

A aplicação de diferentes geotecnologias, como fotogrametria e modelos virtuais de afloramento, colabora para o levantamento em detalhe de afloramentos rochosos complexos, como os diques localizados na Praia da Pinheira. A análise dos dados geológicos, geoquímicos e geocronológicos apresentados por Florisbal *et al.* (2014, 2018 e Honorato (2019) indica a ocorrência de uma zona de conduto magmático na Ponta da Andorinha, Praia da Pinheira, onde são observados diques básicos e a fusão de rochas encaixantes com migração de produtos de fusão para sítios dilatativos, gerando corpos ácidos e zonas de mistura de magma.

Apesar de existir uma ampla quantidade de dados referente ao afloramento, incluindo um croqui elaborado de forma tradicional, ainda é necessário desenvolver modelos 2D e 3D que ilustrem a morfologia e a disposição dos corpos magmáticos. O descompasso entre dados geoquímica (elemental e isotópica) e geocronológicos com levantamentos de campo dificulta a construção de um modelo evolutivo consistente,

que demonstre claramente a estratigrafia dos eventos magmáticos no tempo e no espaço.

Reconstruir informações de afloramentos de escala quilométrica tem sido feito com sucesso por meio de imagens de satélite e fotografias aéreas (Hubbard et al., 2010; Weissmann et al., 2010). Por outro lado, recursos de escala de detalhe (milímetros a metros) também foram registrados com diferentes técnicas, como digitalização a laser terrestre, GPS diferencial e mosaicos de fotografias (Bellian et al., 2005; Buckley et al., 2008; Hodgetts, 2013; Rarity et al., 2013; Rittersbacher et al., 2013). Embora esses recursos de várias escalas tenham sido descritos com sucesso por geocientistas, os recursos de escala intermediária (metro a quilômetro) muitas vezes são difíceis de caracterizar, pois geralmente estão abaixo da resolução das imagens de satélite e fotografias aéreas, mas maiores e mais complexos do que o que pode ser facilmente registrado com métodos baseados em campo (Chesley et al., 2017).

O afloramento objeto deste estudo pode ser classificado como um afloramento de escala intermediária, sendo assim a obtenção de dados fotogramétricos e a geração de um modelo virtual do afloramento preenche as lacunas deixadas pelas imagens de satélite e pelos estudos de detalhe anterior, permitindo a geração mapas detalhados e modelos tridimensionais. a partir disso, a integração dos dados disponíveis para a área obtidos por Florisbal *et al.* (2014, 2018), Bernardes (2017), Honorato (2019) e Rodrigues (2021), com novos dados estruturais coletados *in loco*, proporciona um avanço na interpretação dos dados do afloramento e o desenvolvimento do modelo evolutivo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é a aplicação de geotecnologias, com enfoque na aquisição fotogramétrica através do uso de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS – *Remotely Piloted Aircraft Systems*) e modelo virtual do afloramento para revalidar croquis de afloramento em detalhe. Um dos resultados deste trabalho é a geração de imagens aéreas de alta resolução georreferenciadas, que permitem a clara representação das feições geológicas e estruturais.

1.1 OBJETIVOS

- (i) Desenvolver modelos em 2D e 3D que ilustrem a disposição espacial e morfologia dos corpos magmáticos.
- (ii) Reconstruir informações de afloramentos de pequena e média escala.
- (iii) Construir um modelo evolutivo que demonstre a estratigrafia dos eventos magmáticos na região estudada.

1.2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

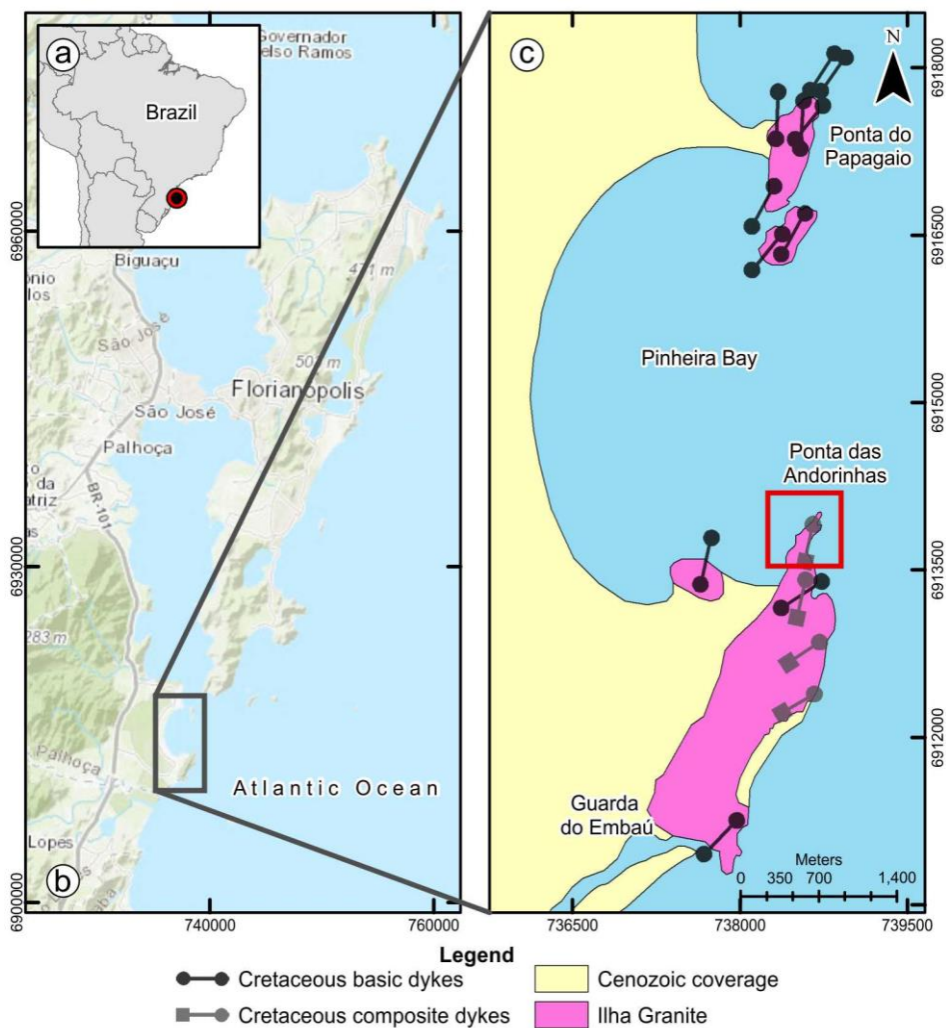


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudos. Extraído de Florisbal *et al.* (2018)

A área estudada está situada no sul da Praia da Pinheira. Constitui um extenso afloramento rochoso conhecido como Ponta das Andorinhas. A Praia da Pinheira é parte do município de Palhoça, localizada na região metropolitana de Florianópolis (Figura 1). Para chegar ao local de estudo, saindo de Florianópolis, é

necessário seguir sentido sul ao longo da rodovia BR-101, e entrar no acesso para a Praia do Sonho (Saída 273). Após, o acesso segue por vias locais, como a Rodovia Evadio Paulo Broering e a seguir através da Servidão N° 1689 para acesso à Praia de Cima (Pinheira). Chegado ao sul da Praia da Pinheira, o acesso à Ponta da Andorinha é realizado por caminhada até o afloramento.

2 GEOLOGIA DA PONTA DA ANDORINHA, PRAIA DA PINHEIRA, SC

A área de estudos está situada na porção sul da Praia da Pinheira, SC. Esta região é constituída principalmente por rochas graníticas de idade neoproterozoica, pertencentes à Suíte Cambirela (SC), que são frequentemente seccionadas por diques básicos e compostos de idade Cretácea, vinculados ao Enxame de Diques de Florianópolis (EDF) (Floribal *et al.*, 2014, 2018; Bernardes, 2017; Honorato, 2019), conforme ilustrado na Figura 2.

A Suíte Cambirela (SC) foi definida por Zanini *et al.* (1997) como uma unidade plutono- vulcânica, que constitui parte do volumoso magmatismo alcalino relacionado aos estágios finais do Batólito Florianópolis. A diversidade litológica da unidade compreende rochas plutônicas graníticas e frações vulcanogênicas, como veios e diques graníticos, micrograníticos ou aplo- pegmatíticos (Bitencourt *et al.*, 2008), derrames, tufos e ignimbritos riolíticos (Tomazzoli *et al.*, 2005) os quais foram agrupados como Riolito Cambirela (Zanini *et al.*, 1997). Inicialmente esta unidade era definida por Zanini *et al.* (1997) como Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela tendo o Granito Itacorumbi (GIT) como unidade plutônica e o Riolito Cambirela como uma fração vulcânica. Bitencourt *et al.* (2008) acrescenta o Granito Ilha à Suíte Cambirela, devido à similaridade composicional e relações de campo que atestam a contemporaneidade desta unidade com as unidades vulcânicas na SC, e esta será a definição utilizada neste trabalho.

O Granito Ilha é a principal litologia ocorrente na Praia da Pinheira e constitui a rocha encaixante dos diques do EDF. Este granito é composto por monzogranitos a sienogranitos de textura alotriomórfica, equigranular média a grossa, com teor variável de minerais máficos, caracteristicamente na forma de agregados esparsos intersticiais. Janasi *et al.* (2015) apontam idades U-Pb via LA-MC-ICP-MS de 588 ± 8 Ma para esta unidade. De acordo com Floribal *et al.* (2014, 2018), Bernardes (2017) e Honorato (2019), na região de estudos, o Granito Ilha é frequentemente seccionado por diques básicos e compostos, de 134 Ma, pertencentes ao EDF.

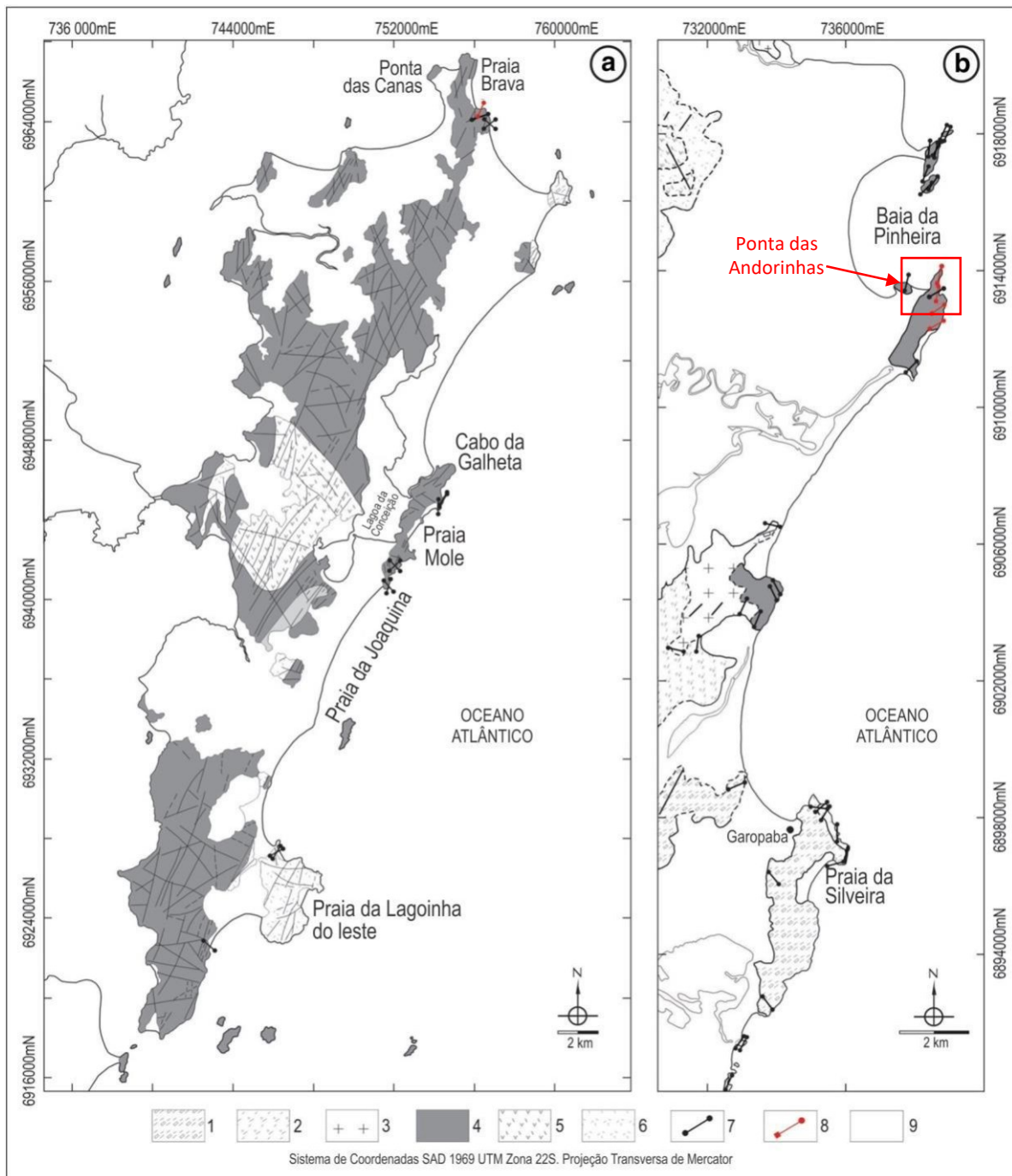


Figura 2 – Mapa geológico do Enxame de Diques de Florianópolis: (A) Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis) modificado de Caruso Jr (1993); (B) mapa geológico da Pinheira e praias de Garopaba modificadas de Bitencourt et al. (2008). Suíte Paulo Lopes: (1) Granito Paulo Lopes, (2) Granitoides Garopaba; (3) Granito Tabuleiro; (4) Granito Ilha; Suíte Cambirela: (5) Granito Itacorumbi; (6) Riolito Cambirela; (7) diques basálticos do cretáceo, (8) diques compostos do cretáceo; (9) Sedimentos Cenozoicos. Extraído de Florisbal *et al.* (2018).

O EDF é parte do volumoso magmatismo da Província Magmática Paraná- Etendeka (PMPE), que em conjunto, perfazem a anteriormente denominada de Formação Serra Geral (Gordon Jr., 1947), renomeado como Grupo Serra Geral (Rossetti et al., 2018) As rochas vulcânicas da GSG compreendem em sua maioria

basaltos toleíticos e andesi-basaltos toleíticos, com dois piroxênios (augita e pigeonita), que correspondem a aproximadamente 90 % do volume total do material extrusivo. Em menor número ocorrem andesitos toleíticos (7%) e rochas ácidas, representadas por riolitos e riodacitos (3%) (Melfi et al., 1988) As rochas ácidas representam uma área de 150.000 km², sendo estas localizadas nas regiões próximas à margem continental e concentradas nas porções superiores da sequência de derrames, logo, há o entendimento de que correspondem às últimas fases de atividade vulcânica na BP (Melfi et al., 1988)

Além dos derrames vulcânicos, a GSG possui uma grande quantidade de diques e soleiras de diabásio representados por três principais grupos: Arco de Ponta Grossa (PR), da Serra do Mar (estendendo-se de Santos ao Rio de Janeiro e no interior até a região do Vale do Paraíba) e de Florianópolis (SC) (Estrela vermelha na Figura 3). O enxame de diques do Arco de Ponta Grossa está alinhado preferencialmente na direção NW e em menor número a NE. Já o enxame da Serra do Mar é caracterizado por estarem alinhados em direções N^o50 – 65^oE, sendo raramente apontadas direções EW e NSNW. Por último, no Enxame de Diques de Florianópolis é notado que a maioria, cerca de 80% dos diques, estão alinhados na direção N30 – 55^o W e subordinadamente, cerca de 20% dos diques estão alinhados a direção N15^o – 45^oW.

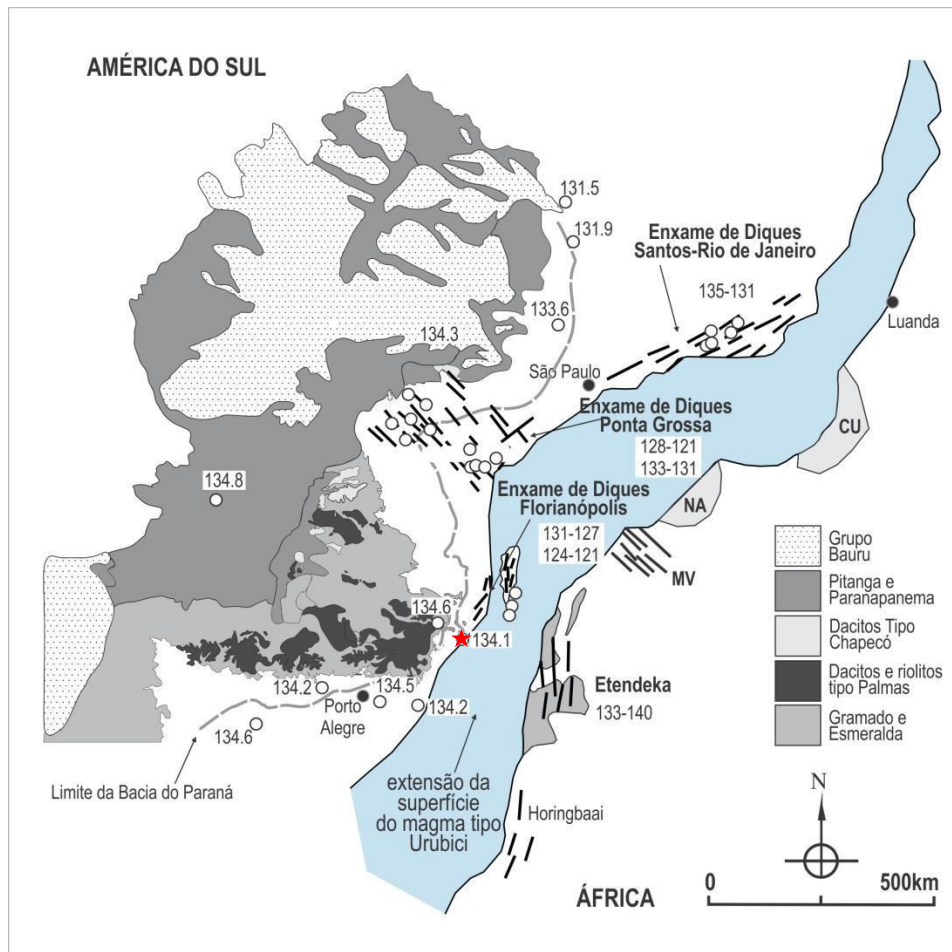


Figura 3 – Mapa da Província Magmática Paraná-Etendeka: distribuição de lavas e enxames de diques de PEMP em uma reconstrução pré-deriva da América do Sul e África. Os números correspondem a idades de aquecimento escalonado $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ (em Ma) de lavas, associadas soleiras e diques (círculos). Estrelas são idades U – Pb, estrela negra de Janasi et al. (2011) e dados de estrelas brancas deste estudo. MV = Morro Vermelho, NA = Bacia da Namíbia e CU = Bacia de Cuanzá. Modificado de Janasi et al. (2011), Peate (1997) Peate et al. (1999, 1992) e Stewart et al. (1996). Modificado de Peate et al. (1999).

Na área de estudos os diques são predominantemente de orientação NE a N-S. Também há predomínio de diques básicos toleíticos, além da ocorrência de diques compostos com bordas básicas e centros traquiandesíticos com alto conteúdo de enclaves máficos microgranulares, atestando a existência de processos de mistura heterogênea de magmas (Floribal *et al*, 2014, 2018). De acordo com estes autores, os diques desta região possuem relações de mútua intrusão com porções fundidas da rocha encaixante, que ora são feições facilmente identificáveis, ora são mais discretas.

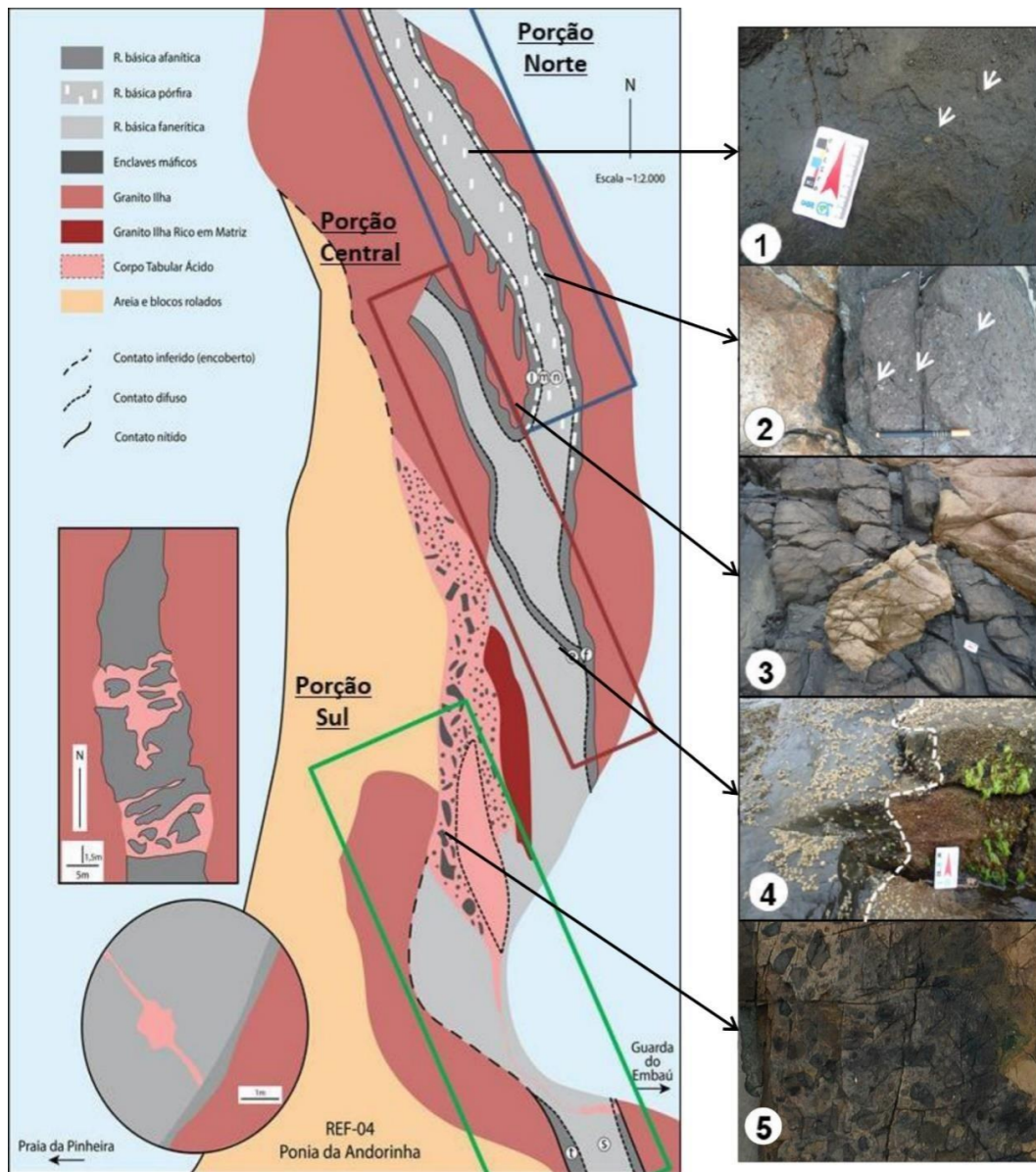


Figura 4 – Croqui da Ponta da Andorinha, Praia da Pinheira – SC: as fotos indicadas pelas setas representam as diferentes feições do afloramento. Setor norte: 1) presença de micropórfiros de plagioclásio no centro do dique. 2) a borda do dique apresenta minerais pórfiros. 3) Porções da encaixante dispersa em meio a intrusão, a qual foi erroneamente localizada no croqui. 4) Contato entre diques do primeiro e segundo pulso magmático. 5) Material intrusivo brechado em meio a rocha de matriz enriquecida em material félsico. Modificado de Honorato (2019) e Rodrigues (2021).

Na Ponta da Andorinha, há a ocorrência de um amplo afloramento de dique básico com evidências de fusão na região de borda do dique e intrusão do material fundido em diversos setores do afloramento (Figura 4). O grau de fusão, bem como as zonas de interação são amplamente variados (Floribal *et al.*, 2014, 2018). Além destas feições há ocorrência de zonas de brechas de mistura, onde a matriz da brecha é constituída de material fundido e os fragmentos são compostos por rochas

básicas de composição e geometria variada; bem como corpos ácidos gerados integralmente pela fusão das rochas encaixantes e que se encaixaram em sítios dilatativos (Florisbal *et al*, 2018; Honorato, 2019).

O levantamento geológico de detalhe apresentado na Figura 4, feito de forma analógica nos anos 2000 demonstra a complexidade do afloramento, que é interpretado por Florisbal *et al* (2014, 2018) como uma zona de conduto magmático. Mesmo com o substancial avanço dos dados e detalhamento estrutural, obtenção de dados de geoquímica e geocronologia em detalhe, como os apresentados por Florisbal *et al* (2014, 2018), Bernardes (2017), Honorato (2019) e Rodrigues (2021), ainda existem muitas dúvidas com relação a morfologia dos corpos ígneos, bem como sua relação espacial. Desta forma, se tornou imprescindível a geração de levantamentos fotogramétricos de alta precisão para geração de modelos robustos, que permitam a integração efetiva de todos os dados disponíveis para o afloramento e resolvam as demandas com relação a cartografia das feições espaciais e morfológicas no mesmo grau de detalhe que se tem os dados temporais e geoquímicos.

3 REVISÃO CONCEITUAL

Esta dissertação abrange temáticas complementares, logo serão apresentados tópicos na revisão conceitual que abordam as características de sistemas alimentadores de Grandes Províncias Ígneas, dada a área de trabalho da dissertação, bem como uma revisão sobre metodologias relacionadas a fotogrametria via uso de RPAS e modelo digital de afloramento para a área estudada.

3.1 SISTEMAS ALIMENTADORES DE GRANDES PROVÍNCIAS ÍGNEAS

Os sistemas alimentadores (*Plumbing systems*) de Grandes Províncias Ígneas (LIP – *Large Igneous Provinces*) consistem em grandes enxames de diques e intrusões associadas, como soleiras e intrusões acamadadas, que muitas vezes constituem as únicas evidências remanescentes que registram um evento vulcânico após este ter sido completamente erodido.

Os diques representam principalmente o componente de transporte vertical do sistema com larguras típicas de alguns metros a algumas dezenas de metros com extensões contínuas comumente observadas de centenas de metros a dezenas de quilômetros (Figura 5); enxames de diques descontínuos podem se estender lateralmente por mais de 1000 km na superfície terrestre. Todas as composições de magma podem formar diques, mas de longe os diques mais comuns e volumetricamente significativos são de composição basáltica (Jerram et al., 2018).

Algumas LIP's são formadas por fluxos basálticos continentais (CFB - *continental flood basalts*), e são associados às fases iniciais de uma separação continental ou rifteamento. Neste contexto, Deckart *et al.* (1998) sugerem que os enxames de diques representam a geometria inicial das atividades tectônicas que afetam a litosfera logo no começo do desenvolvimento de um rifte, porém sua relação espacial e temporal com os CFB são raramente bem compreendidas.

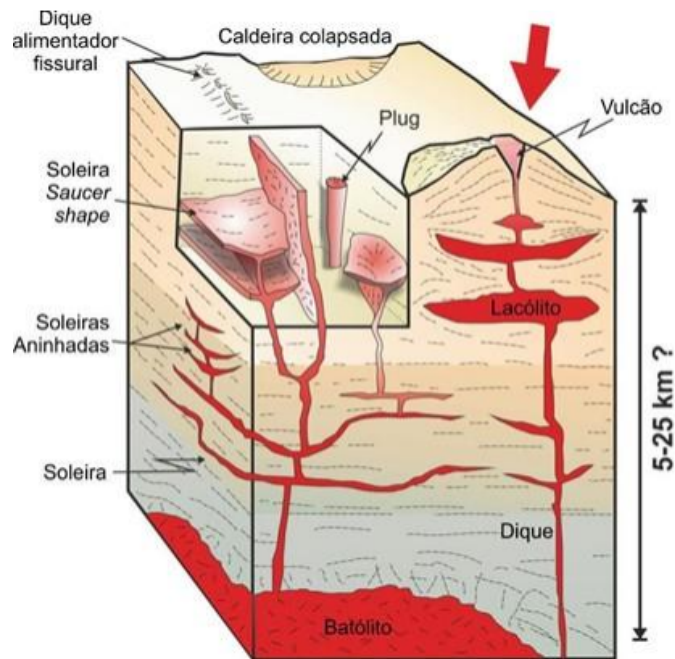


Figura 5 – Rede de distribuição 3D de de *magma plumbing* de níveis profundos a rasos na crosta alimentando uma variedade de vulcões. Traduzido de Jerram e Bryan (2018).

Em áreas onde a crosta terrestre está se espalhando, tanto a geração do *melt* por meio da descompressão, quanto o espaço de acomodação para o magma resultante são encontrados em suas proximidades. As tensões que se acumulam ao longo do rifte são liberadas durante os episódios de rifteamento, quando pulsos de atividade magmática levam à injeção de camadas verticais de magma, formando os diques na crosta (Figura 6).

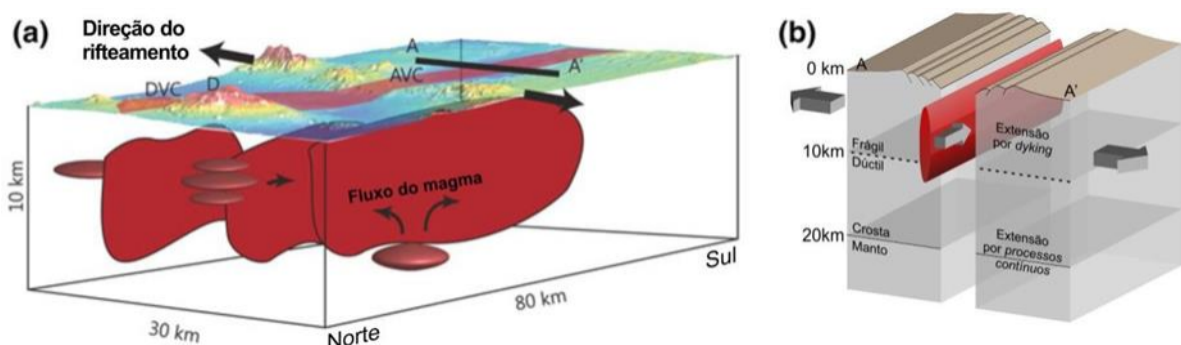


Figura 6 – Desenvolvimento de diques: esquema de desenvolvimento de diques em regiões onde o processo de rifteamento é predominante (A) e detalhe (B). Traduzido de Jerram e Bryan (2018).

O magma é bombeado através da crosta periodicamente e é armazenado em várias posições e profundidades em câmaras magmáticas secundárias. Em seguida, ele pode ascender em condutos verticais (diques) na crosta superior frágil durante a progressão do rifte (Wright et al., 2012) conforme ilustrado na Figura 6.

3.2 RPAS - REMOTELY PILOTED AIRCRAFT SYSTEMS

Os drones têm se destacado como uma opção versátil e eficiente na aquisição fotográfica, superando outros sensores em várias frentes. Sua mobilidade e flexibilidade permitem a captura de imagens em áreas de difícil acesso, como florestas densas ou regiões montanhosas, proporcionando ângulos e perspectivas únicas. Além disso, os drones são mais acessíveis em termos de custo e exigem menos recursos logísticos em comparação com sensores espaciais como o ALOS PALSAR e o ASTER.

Embora o ALOS PALSAR e o ASTER ofereçam recursos valiosos, como a capacidade de penetração em nuvens e vegetação densa, bem como a cobertura em grande escala, é importante destacar que os drones se destacam em termos de adaptabilidade e facilidade de uso. Com o rápido avanço da tecnologia de drones, eles estão se tornando cada vez mais poderosos e capazes de atender a diversas necessidades. Além disso, a capacidade de voar em baixa altitude e capturar imagens de alta resolução permite um nível de detalhe e precisão que outros sensores podem não conseguir fornecer. Os drones ou como também foram conhecidos, VANT's - Veículos Aéreos Não Tripulados (tradução do termo UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), são termos utilizados para se referir a todo e qualquer equipamento que acesse o espaço aéreo sem a presença de um piloto humano a bordo. Atualmente, o termo VANT é considerado obsoleto pela Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), conforme a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI). RPAS, sigla de Remotely Piloted Aircraft System, é o termo técnico e padronizado internacionalmente pela OACI para se referir aos sistemas de aeronaves remotamente pilotadas utilizadas com propósitos não recreativos.

O RPAS é composto por subsistemas, que incluem a aeronave (que pode ser de asa fixa ou multirotor), estação de controle (que pode ser autônoma ou remota), suas cargas, seus sistemas de posicionamento, sistema inercial, sistema de lançamento, recuperação e comunicação. A incorporação dos metadados do Sistema de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS) e sistema inercial à câmera digital, que possibilita a determinação direta dos parâmetros de orientação exterior (posicionamento e atitude da câmera) da fotografia, bem como

uma drástica redução do número de pontos de apoio. O sistema GNSS, por sua vez, proporciona a execução de plano de voo muito próximo do planejado, integrando-se de outras tecnologias, mantem o recobrimento entre fotografias e faixas praticamente constante e com pouca variação na altitude de voo. O sistema inercial no qual a câmera se apoia (gimbal), faz com que os efeitos dos movimentos de direção, asa, proa ou popa da aeronave sejam repassados minimamente para a câmera (Rodrigues, 2016). Estes sistemas implementados nos RPAS, garantem uma sobreposição de imagens quando é feita sua aquisição, o que é de extrema importância para a geração dos produtos.

3.3 FOTOGRAMETRIA

Fotogrametria é definida pela Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento remoto (ASPRS - *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) (1988), como:

“a arte, ciência e tecnologia de se obter de forma confiável informações sobre objetos físicos e do meio ambiente por meio do processo de registro de medidas e interpretação de imagens e padrões de energia radiante eletromagnética e outros fenômenos” (McGlone et al., 2004; Wolf et al., 2014).

De acordo com Aber *et al.* (2019), a fotogrametria tem como objetivo principal fazer medições precisas de objetos tridimensionais (3D) e características do terreno a partir de fotografias bidimensionais (2D). As aplicações incluem a medição de coordenadas; a quantificação de distâncias, alturas, áreas e volumes; a preparação de mapas topográficos e a geração de nuvens de pontos 3D para reconstruções de superfície; Modelos Digitais de Elevação (MDE) e ortofotografias. Além disso, a fotogrametria é quase tão antiga quanto a própria fotografia. Desde seu desenvolvimento há aproximadamente 160 anos atrás, passou de um processo inteiramente analógico, onde técnicas de óptica mecânica mudaram para métodos analíticos baseados na solução de algoritmos matemáticos auxiliados por computador e finalmente à fotogrametria digital baseada em imagens digitais e visão computacional – especificamente *Structure-from-Motion - Multi-View Stereo* (SfM-MVS) – que permitiu avanços significativos na modelagem de superfície 3D a partir de imagens digitais. Especialmente a crescente automação e integração de todas as etapas do fluxo de trabalho fotogramétrico em pacotes de softwares de fácil

manipulação, que tornaram a análise fotogramétrica acessível para não especialistas. Junto com o desenvolvimento de RPAS e tecnologia computacional, houve uma verdadeira revolução na aquisição de geodados3D de alta resolução em termos de velocidade, facilidade e economia, oferecendo novas oportunidades nas geociências.

Conforme Aber *et al.* (2019), existem dois tipos gerais de fotogrametria – aérea (com a câmera montada em uma aeronave) e terrestre (com a câmera na mão ou em um tripé). Fotogrametria terrestre, na qual objeto e câmera estão a distâncias de até 200m, é denominada fotogrametria de curto alcance. De certa forma, a fotogrametria aérea de pequeno formato ocorre entre esses dois tipos, combinando o ponto de vista aéreo com distâncias de objetos próximos e detalhes de imagem elevados.

O processamento dos modelos é feito por meio de transformações geométricas realizadas por equações matemáticas onde são conhecidos os Parâmetros de Orientação Interior (POI) e Parâmetros de Orientação Exterior (POE). Aber *et al.* (2019), define o POI como sendo as características relativas ao sistema óptico e do sensor da câmera obtidos durante o processo de calibração, utilizados para a correção de distorções nas imagens. Por outro lado, o POE, é determinado pela posição espacial da fotografia e orientação angular do centro de perspectiva relativa à superfície no momento da captura. Com esses parâmetros conhecidos, é possível realizar a geração dos Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Ortofotomosaicos.

Conforme Linder (2016), em geral, o MDT pode ser considerado uma representação digital, dada por uma quantidade suficiente de coordenadas tridimensionais (x , y , z). Há vários métodos para levantar esses dados: a partir dos dados de entrada (primários), que podem ser regularmente distribuídos ou não, e depois um conjunto de dados de cobertura de área (secundários), que é criado por interpolação. Dependendo do uso do solo, pode ser diretamente relacionada ao terreno, mas também ao topo de uma casa ou árvore. Por exemplo, partes de imagens que mostram uma floresta densa levarão a uma superfície no topo das árvores. Portanto, conhecemos duas definições diferentes de modelos de elevação: MDT ou às vezes Modelo Digital de Elevação (MDE): Contém valores z situados no topo do terreno real (terra). Esse modelo pode ser usado para derivar linhas de contorno; Modelo Digital de Superfície (MDS): Contém valores “ z ” no topo dos objetos situados

no terreno – telhados, copas de árvore, veículos e objetos temporariamente posicionados. Este modelo é necessário quando as ortofotos são criadas. Gerar ortofotos é o trabalho de geocodificar ou retificar um mapa topográfico digital. Para tal, é necessário pesquisar alguns pontos de controle (x, y), medir suas posições no mapa e usar uma transformação afim de plano simples. A razão pela qual uma abordagem 2D simples leva a bons resultados é o fato de que o mapa foi criado com uma chamada projeção estereográfica, onde todos os raios de projeção são paralelos e retangulares (ortogonais) ao plano de projeção. Mas se quisermos retificar uma imagem aérea temos de lidar com algumas questões específicas, a maioria delas resultantes do relevo (natural ou artificial) e da projeção em perspectiva central, levando a deslocamentos radiais simétricos. Esses são pré-requisitos para visualização estereoscópica e medição 3D, que tornam a retificação algo mais complicado. A solução chamada de ortofoto, é uma representação na mesma projeção como um mapa topográfico (Linder, 2016).

3.4 *STRUCTURE-FROM-MOTION* E RECONSTRUÇÃO 3D

Geralmente, o principal objetivo da abordagem *Structure-from-Motion* (SfM) é a reconstrução de uma estrutura ou morfologia de um objeto tridimensional com alto detalhamento para uma visualização realista. É tipicamente baseado em um conjunto de imagens multiescalares que capturam uma cena com alta sobreposição e em posições aleatórias – sendo tiradas enquanto se move ao redor do objeto (daí o termo “*from-Motion*”). Nem a geometria da câmera, nem sua posição, precisam ser conhecidas a priori. Devido às suas origens na ciência da visão computacional, essa abordagem não leva em consideração as precisões de escala e a posição quando comparada a fotogrametria clássica. Esta metodologia não foi originalmente planejada para fotografia aérea – e, definitivamente, tampouco para as redes de imagens altamente ordenadas e de redundância mínima com direção de visão única que são tão fundamentais na fotogrametria aérea clássica.

A popularização da fotografia digital no início dos anos 2000, o “boom do drone” dos anos 2010 e a crescente popularidade do *Small-Format Aerial Photography* (SFAP) para a criação de dados topográficos de alta resolução levaram a uma rápida

aceitação do SfM pela comunidade geocientífica. Consequentemente, os pacotes de software baseados em abordagens SfM cada vez mais incorporam conceitos, ferramentas e resultados estatísticos comumente usados na fotogrametria aérea clássica para ampliar sua utilização em diferentes contextos e cenários. Assim, os estudos geocientíficos também estão empregando com sucesso SfM na aquisição de fotografia terrestre (Eltner et al., 2016).

O termo *Structure from Motion* foi cunhado originalmente por Ullman (1979) e ganhou notoriedade por meio do trabalho de Snavely et al. (2008), que aplicou o conceito a fotos aleatórias da internet de locais históricos e pontos turísticos conhecidos, conseguindo realizar a sua reconstrução tridimensional de forma acurada. Conforme Smith et al. (2016), a maior parte dos estudos e pacotes de software se utilizam de um fluxo de trabalho combinados que devem ser referidos corretamente como SfM-MVS. Tipicamente, os fluxos de trabalho SfM-MVS têm sido amplamente descritos na literatura geocientífica conforme os trabalhos de Westoby et al. (2012), Fonstad et al. (2013) e Smith et al. (2016).

O primeiro passo deste fluxo é a extração dos pontos-chave de diversas fotografias. Estes pontos-chave são identificados como um pacote de pixels independente da sua escala ou rotação das imagens, o que é comumente feito através do sistema de reconhecimento de objetos desenvolvido por Lowe (2004) chamado de *Scale-Invariant Feature Transform* (SIFT), no qual se atribui valores descritivos para feições únicas. Assim, as feições dos pontos-chave são então combinadas através das múltiplas imagens e assim são filtradas as combinações errôneas ou insuficientes. O processo da SfM usa algoritmos de ajuste de pacote para reconstruir a estrutura da cena 3D e aplicar as orientações internas e externas da câmera simultaneamente. Desta forma, grande número de pontos-chave e a alta sobre determinação das equações de colinearidade permitem a auto calibração das câmeras no processo, mesmo quando nenhum valor de orientação interior inicial é conhecido. O resultado disso é uma nuvem de pontos esparsa em um sistema de coordenadas escalonado arbitrariamente e parâmetros de calibração de câmera estimados, bem como as suas posições. Para uma representação mais detalhada da estrutura da superfície, a nuvem de pontos esparsa é refinada posteriormente, dando origem a uma nuvem densa com correspondência *Multiview-Stereo* (MVS). As imagens são divididas em subconjuntos menores para reduzir a carga computacional com *Clustering View for*

MVS (CMVS) Furukawa *et al.* (2010), e os pontos 3D são obtidos desses clusters individuais, por exemplo, com algoritmos MVS baseados em patch (PMVS) (Furukawa and Ponce, 2010). Esta nuvem de pontos densa pode então ser filtrada manualmente ou automaticamente para remover erros e outliers e classificada pela cor do ponto e sua elevação a fim de se extrair pontos 3D que atendem a restrições específicas (por exemplo, pontos de terra descobertos, semelhantes ao processamento de nuvens de pontos LIDAR – *Light Detection And Ranging*) (Aber *et al.*, 2019).

Como a maioria das aplicações em geociências requer um trabalho onde a escala conhecida e orientação absoluta no espaço são conhecidas, o sistema de coordenadas arbitrário é geralmente transformado em um sistema de coordenadas terrestres do mundo real usando GCPs (*Ground Control Points* – Pontos de Controle Terrestre). As abordagens SfM originais realizam isso em uma transformação de similaridade linear de sete parâmetros separada, após a criação das nuvens de pontos. Assim, erros nos GCPs podem se propagar para esta solução, com efeitos não lineares para distribuição desfavorável de GCP (Fonstad *et al.*, 2013). No entanto, com a crescente adaptação do software baseado em SfM para fluxos de trabalho fotogramétricos clássicos, muitos aplicativos agora permitem incluir medições de controle de solo no processo de ajuste do pacote e refinamento dos parâmetros da câmera (James e Robson, 2012; Smith *et al.*, 2016), ou seja, antes da criação das nuvens de pontos. Como acontece com a fotogrametria clássica, os parâmetros de orientação externa das câmeras podem ser usados como uma alternativa ou adição aos GCPs no ajuste do pacote. A nuvem de pontos densa como um dos primeiros produtos do processo SfM-MVS precisa ser interpolada para uma representação de superfície sem intervalos, por exemplo, a geração de um MDE em formato raster ou em uma malha 3D.

Finalmente, a criação de ortofotomosaicos a partir das imagens de entrada. As grandes vantagens em comparação com a fotogrametria digital tradicional - bem como com a Varredura a Laser Terrestre (TLS) para aquisição de dados pontuais 3D, e provavelmente as principais razões para o sucesso do SfM-MVS nas geociências, são sua relativa facilidade de uso, alta grau de automação e custo relativamente baixo. Códigos de fonte aberta estão disponíveis para todas as etapas do fluxo de trabalho descrito acima, embora o pacote de software SfM-MVS mais amplamente usado atualmente seja um comercial, o Agisoft PhotoScan / Metashape (Aber *et al.*, 2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 EQUIPAMENTOS

O RPAS - Remotely Piloted Aircraft System, utilizado para a aquisição das imagens foi o Mavic 2 PRO da empresa chinesa DJI (Figura 7), de propriedade dos professores orientadores deste trabalho.



Figura 7 – Equipamento RPAS utilizado no levantamento aerofotogramétrico. Fonte: do Autor.

Trata-se de um equipamento compacto e de fácil manuseio e portabilidade. Suas principais especificações técnicas são: peso de 907g, o que o configura como RPAS Classe 3, segundo a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), dimensões (Desdobrado) de 322×242×84 mm (comprimento × espessura × altura), velocidade máxima de 72 km/h, velocidade máxima de ascensão de 5 m/s e velocidade máxima de descenso de 3 m/s, autonomia de 31 minutos de voo, com capacidade de operar a uma distância de até 8 km. O equipamento utiliza sistema de navegação por satélite GPS+GLONASS (GPS = *Global Positioning System*, GLONASS = Sistema de Navegação Global via Satélite em russo) e possui boa precisão (Vertical: $\pm 0,1$ m (com posicionamento visual); $\pm 0,5$ m (com posicionamento por GPS) e Horizontal: $\pm 0,3$ m (com posicionamento visual); $\pm 1,5$ m (com posicionamento por GPS)).

Para controle do RPAS, é necessário a utilização de um dispositivo móvel como *smartphone* ou *tablet* que contenha o aplicativo no qual configurações, planejamento e controle de voo são realizados. Os aplicativos escolhidos foram o

DroneDeploy que permite a realização das tarefas e acompanhamento em tempo real do trabalho de aerolevanteamento e o DJIGO 3.0, aplicativo que permite realizar ajustes de câmera, armazenamento e configurações avançadas na tela do dispositivo móvel. O RPAS ainda possui um controle no qual o dispositivo móvel é acoplado e que permite a realização de manobras e controle manual do equipamento. A câmera se encontra acoplada na plataforma de giro estabilizadora com movimento independente em 3 eixos (inclinação, rotação e giro), denominada gimbal e é equipada com um dispositivo estabilizador que mantém a imagem estável mesmo com o equipamento em movimento. É fabricada pela empresa sueca Hasselblad sendo seu modelo L1D-20c. Elas são equipadas com sensor 1"CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) com 20 megapixels efetivos, com capacidade de tirar fotos com tamanho máximo de 5472 x 3648, possuindo lente FOV (campo de visão) 77° e formato equivalente a 35 mm: 28 mm e abertura f/2.8-f/11 e alcance de disparo de 1 ma. Alcance ISO (Foto) de 100-3200 (Auto) e 100-12800 (Manual).

4.2 PLANEJAMENTO DE VOO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para o planejamento do voo foi utilizado o aplicativo DroneDeploy versão Android (Também é possível realizar o planejamento pelo website do aplicativo). Nesse software mobile é possível definir o polígono que delimita a área em que se deseja adquirir o material fotográfico, permitindo escolher parâmetros como a quantidade de linhas de voo e a direção destas linhas, sobreposição lateral e longitudinal das imagens e altura de voo. O polígono foi definido com intuito de recobrir todas as feições importantes do afloramento, conforme ilustrado na Figura 8.

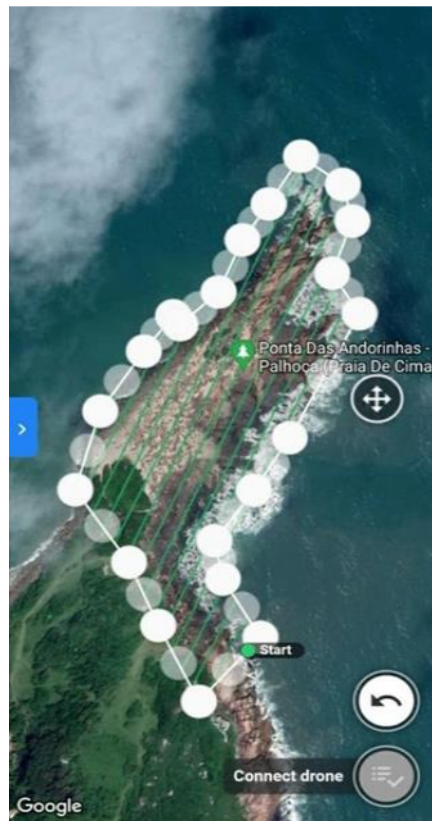


Figura 8 – Planejamento de voo: polígono criado no aplicativo DroneDeploy referente ao aerolevanteamento na Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.

Todo o processo foi realizado por meio do aplicativo que faz a decolagem do RPAS, realiza o aerolevanteamento e pousa o mesmo, sem maiores interferências do operador. Durante o voo, seu posicionamento e os dados obtidos são mostrados em tempo real na tela do dispositivo móvel, gravando os dados instantaneamente devido a integração dos dados inerciais e dados GNSS para a navegação e determinação da posição exata de cada imagem no instante de sua aquisição.

O planejamento do campo envolveu diversos fatores importantes para o sucesso da aquisição. Esses fatores incluem condições climáticas e vento, disponibilidade de satélites, horário de aquisição e especificamente no local, deve-se monitorar as condições de maré. Na tabela 1 se encontram os parâmetros utilizados no voo deste projeto.

Configurações de voo	
Altura do voo	60 metros
Velocidade do voo	3 m/s
Sobreposição frontal	75 %
Sobreposição lateral	70 %
Número de imagens obtidas	866
Área total do aerolevanteamento	6 Hectares
Tempo total de voo	27m 24s

Tabela 1 – Parâmetros utilizados e características obtidas do voo da área de estudo de caso.

4.3 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi dividido em duas etapas. A primeira etapa de trabalho consiste no planejamento de voo e aerolevanteamento fotogramétrico, que consiste na aquisição de inúmeras aerofotografias, as quais foram utilizadas para aquisição dos dados aerofotogramétricos da área selecionada. Essa primeira etapa foi realizada no dia 15 de março de 2021. Na segunda etapa de campo, em julho de 2021, foram levantados dados geológicos de detalhe e estruturais do afloramento com a finalidade de documentar as variações nas orientações dos contatos entre as diferentes unidades geológicas com auxílio do ortofotomosaico produzido a partir do primeiro aerolevanteamento. Estes dados integrados foram utilizados como parâmetros para a construção do Modelo Digital de Afloramento (*Digital Outcrop Model – DOM*) e do mapa geológico.

4.4 TRATAMENTO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Na etapa de laboratório, o material fotográfico adquirido passou por uma triagem onde fotografias que apresentavam borrões ou falhas foram imediatamente descartadas. Na sequência, as fotografias foram submetidas ao software Metashape da empresa Agisoft (Licença TRIAL) o qual possui diversas funcionalidades, incluindo a triangulação das fotografias aéreas ou terrestres, permitindo a exportação dos dados para outro software relacionados a fotogrametria, gerando nuvem de pontos, malha irregular (TIN - *Triangulated Irregular Network*), modelo digital de elevação e ortofotomosaico. As etapas realizadas no processamento dos dados pelo software Metashape são apresentadas a seguir na Figura 9.

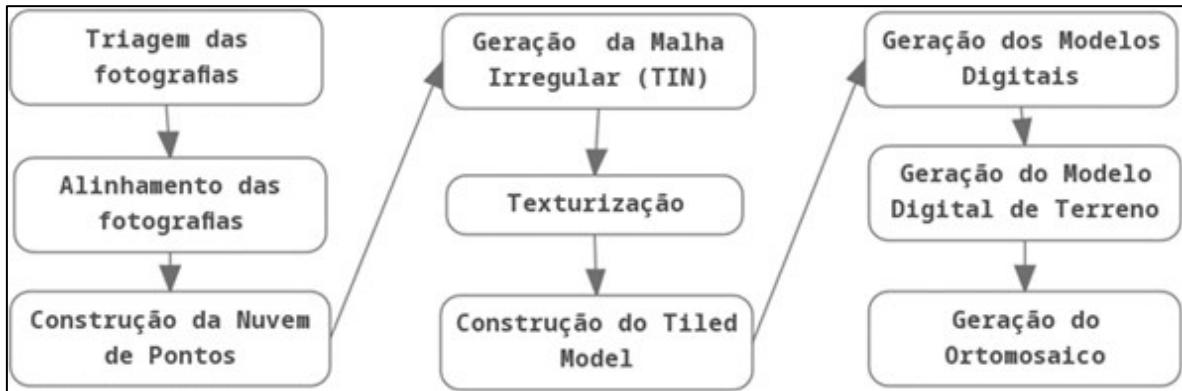


Figura 9 – Fluxograma Metashape: fluxo de trabalho para o tratamento e processamento dos dados baseado nos trabalhos de Westoby *et al.* (2012), Fonstad *et al.* (2013), e Smith *et al.* (2016). Extraído de Saque (2017).

No aerolevanteamento foram obtidas 976 fotografias, porém após a triagem, um número considerável de imagens, sendo que elas praticamente eram fotografias do oceano, somente 886 imagens foram submetidas ao processamento no *software*, das quais 866 foram validadas e alinhadas pelo *software*. Para o processamento assumiu-se como desconhecido o POI da câmera, determinados através de uma auto calibração realizada de maneira automática, com valores estimados de POI e POE. O *software* necessita apenas das informações contidas no metadado EXIF (*Exchangeable Image File Format*) das fotografias (resolução da imagem, distância focal; coordenadas do centro da foto).

Foram necessários 6 dias e 14 horas para realização de todo o processamento das imagens, alinhamento das fotografias, geração das nuvem de pontos esparsa, mapas de profundidade, nuvem de pontos densa, modelo 3D, textura, modelo digital de elevação e ortofotomosaico. A primeira etapa realizada pelo *software* é caracterizada pelo alinhamento das fotos através de um algoritmo que busca identificar pontos e padrões homólogos entre as imagens e orientar as mesmas em um sistema de coordenadas arbitrário, possibilitando a geração de uma nuvem de pontos esparsos seguindo a sequência de trabalho de Saque (2017). Esse processo é denominado de foto triangulação, que é uma técnica fotogramétrica que determina as coordenadas da área em relação a um referencial de terreno. Logo após, são gerados os *tie points* ou pontos fotogramétricos que tem como função materializar o sistema de coordenadas deste terreno.

Na realização deste trabalho, não foram utilizados pontos de controle no levantamento das fotografias aéreas. Conforme Silva *et al.* (2015), a fim de se obter

resultados confiáveis e precisos, para levantamentos aerofotogramétricos, deve-se fazer o uso de pontos de controle para orientar pontos em comum as diferentes imagens durante o processamento fotogramétrico.

Entretanto, apoiado no trabalho de Sopchaki *et al.* (2018) que ao realizar aerolevantamento com equipamento RPAS com e sem a utilização de pontos de apoio e com a rotina automatizada pelo software Agisoft PhotoScan atualmente representado pelo Agisoft Metashape, verificou que os produtos gerados se enquadram dentro dos padrões estabelecidos pelo Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) Classe A, onde o erro na exatidão se torna desprezível.

A segunda etapa do fluxo de trabalho foi caracterizada pela geração de nuvem de pontos densa. Nessa etapa, o objetivo foi adensar a nuvem de pontos gerada pelo alinhamento das fotografias, onde o software aumentou a quantidade de pontos na nuvem, diminuindo os espaços vazios para obtenção da melhor representação da área mapeada. Primeiramente, foi formada uma nuvem de pontos esparsa a partir das coordenadas encontradas na primeira etapa. Logo após, a malha densa foi obtida por meio de todas as imagens, gerando-se uma malha poligonal 3D. O algoritmo presente no software é o responsável pela densificação desses pontos. A correlação das imagens, permitiu que as feições presentes nas imagens fossem geradas de forma automática, onde ocorreu a interpolação destas e a geração da nuvem de pontos densa, a qual foi georreferenciada com coordenadas tridimensionais (x, y, z) (Silva et al., 2015).

A terceira etapa realizada foi a estruturação dos pontos a partir da filtragem e da classificação da nuvem de pontos, onde foi gerada a malha irregular. Esse método de estruturação cria as superfícies a partir de pontos espaçados irregularmente, adaptando a densidade de pontos detectados no processamento de obtenção de pontos homólogos. À medida que aumenta a irregularidade do relevo, aumenta também a densidade de pontos e por consequência a densidade de triângulos da grade irregular (Saque, 2017). A partir dessa etapa, foi possível representar de forma fidedigna o terreno mapeado em três dimensões, permitindo a sua representação através de MDS e do MDT. O processo de texturização e geração do *Tiled Model* são fundamentais para a melhoria do aspecto visual do produto.

4.5 CARTOGRAFIA

A produção cartográfica é um dos produtos mais importantes deste trabalho e a atualização cartográfica foi concebida a partir da aquisição fotogramétrica e dados geológicos prévios e novos dados obtidos em campo. Um dos produtos gerados a partir do processamento das imagens no software Metashape é o ortofotomosaico formado por todas as imagens ortoretificadas. A partir deste ortofotomosaico foi trabalhado em conjunto com os croquis realizados por Honorato (2019) a fim de se refinar suas informações, tomando por base a escala real do afloramento, a relativa facilidade de se separar principais litologias por meio do ortofotomosaico, uma vez que as rochas intrusivas e a encaixante possuem características texturais visualmente distintas, dessa forma ajustando os apontamentos dos croquis na produção do novo mapa.

O software utilizado na etapa da cartografia é o ArcGIS PRO (Versão Estudante). Nele foram inseridos o ortofotomosaico e o modelo digital de elevação (MDE). A partir do MDE, foi produzido o sombreamento. Nesta primeira fase do trabalho cartográfico as feições foram separadas de acordo com os aspectos visuais do ortofotomosaico sendo o afloramento dividido nos seguintes elementos principais: Granito Ilha, Primeiro pulso basáltico e suas margens resfriadas (contendo cristais pórfiros), Segundo pulso basáltico, Corpos e bolsões ácidos (produtos de fusão), Diques de diabásio tardios (que em algumas porções tem espessuras milimétricas).

A fim de se melhorar a cartografia, foi realizada uma segunda etapa de campo. Nesta etapa foram verificadas as consistências e inconsistências entre os croquis feitos de forma analógica e os dados obtidos por fotogrametria. Nesta etapa os dados geológicos foram consistentes e atualizados e novos dados estruturais de detalhe foram coletados. Estes dados serão integrados na geração de modelos 3D.

4.6 MODELO DIGITAL DE AFLORAMENTO

O Modelo Digital de Afloramento foi obtido após a etapa de processamento fotogramétrico. Como subproduto deste processamento foi gerado um bloco sólido 3D que pode ser exportado em diversos formatos e um *Tiled Model*.

Na etapa seguinte do modelamento realizada após a segunda etapa de campo, foi feita a validação dos dados da cartografia, pela distinção das diferentes unidades geológicas, de acordo com o croqui de Honorato (2019), e conseqüentemente o detalhamento do mapa geológico, dado que este modelo serve de apoio a interpretação do afloramento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a etapa de processamento das imagens obtidas pelo aerolevanteamento utilizando RPAS na Ponta das Andorinhas, foi possível obter os seguintes produtos: Modelo Digital do Afloramento, Modelo Digital de Elevação, Ortofotomosaico, e por fim o Mapa Geológico de detalhe.

5.1 ORTOFOTOMOSAICO

O ortofotomosaico, um produto crucial proveniente do aerolevanteamento, é um instrumento fundamental para o estudo de características distintivas de afloramentos geológicos, bem como para a criação de modelos cartográficos a partir dessas observações. É reconhecido como um produto de elevada qualidade, visto que as imagens obtidas apresentam poucos artefatos - áreas do ortofotomosaico que dificultam a identificação de características ou causam distorções - e possuem uma alta resolução de 1,19 cm/pixel, conforme ilustrado na Figura 10.

Durante anos, o afloramento em estudo não foi adequadamente capturado por imagens de satélite, devido à sua resolução não ser suficientemente alta para diferenciar as litologias com um nível de detalhe comparável ao obtido neste trabalho. Isso realça o valor da utilização do ortofotomosaico em investigações geológicas, como um dos produtos da fotogrametria, permitindo uma análise mais minuciosa e detalhada dos componentes de um afloramento.

A visualização de contatos retilíneos entre rocha encaixante e o dique no Detalhe 1 da Figura 10, permitiu inferir que estes contatos estão paralelos aos planos de fratura da encaixante, bem como o desenvolvimento de embainhamentos e porções da encaixante dispersos em meio ao dique. Essa visualização se dá além deste fator por causa do contraste entre as duas litologias. Já no Detalhe 2, o que temos é um menor contraste, ainda assim visível entre o dique do primeiro pulso (esquerda da imagem) e o dique do segundo pulso (direita da imagem). No caso do Detalhe 3, é possível verificar outra diferença de texturas contrastantes, nesse caso causado por material intrusivo brechado (rocha máfica) disperso em meio ao material félsico proveniente da fusão das rochas encaixantes.

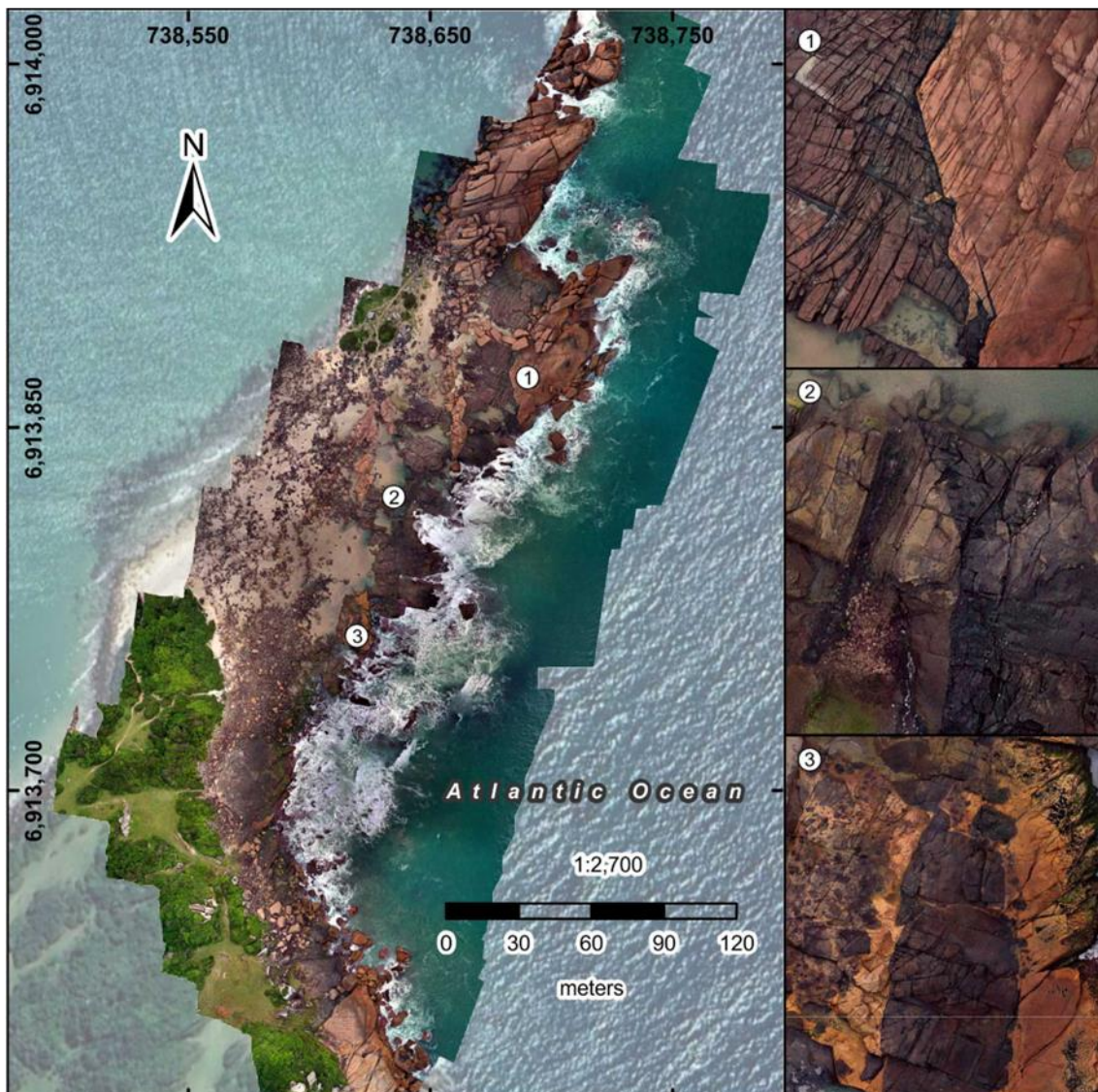


Figura 10 – Ortofotomosáico produzido pela fotogrametria. Detalhe 1 - Contato claro entre a rocha hospedeira e o primeiro pulso basáltico. Detalhe 2 - Contato entre o primeiro pulso basáltico (rocha mais escura no lado direito) e o segundo pulso basáltico (rocha clara no lado esquerdo). Detalhe 3 - Brecha de conduto próximo à rocha ácida. Fonte: do Autor.

5.2 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é outro produto gerado durante o processamento fotogramétrico. Ele é indispensável na fase de análise e produção cartográfica, uma vez que ele permite delimitar de forma consistente verificar padrões de fraturas e sua relação com os contatos entre as litologias e a geomorfologia do afloramento proposto.

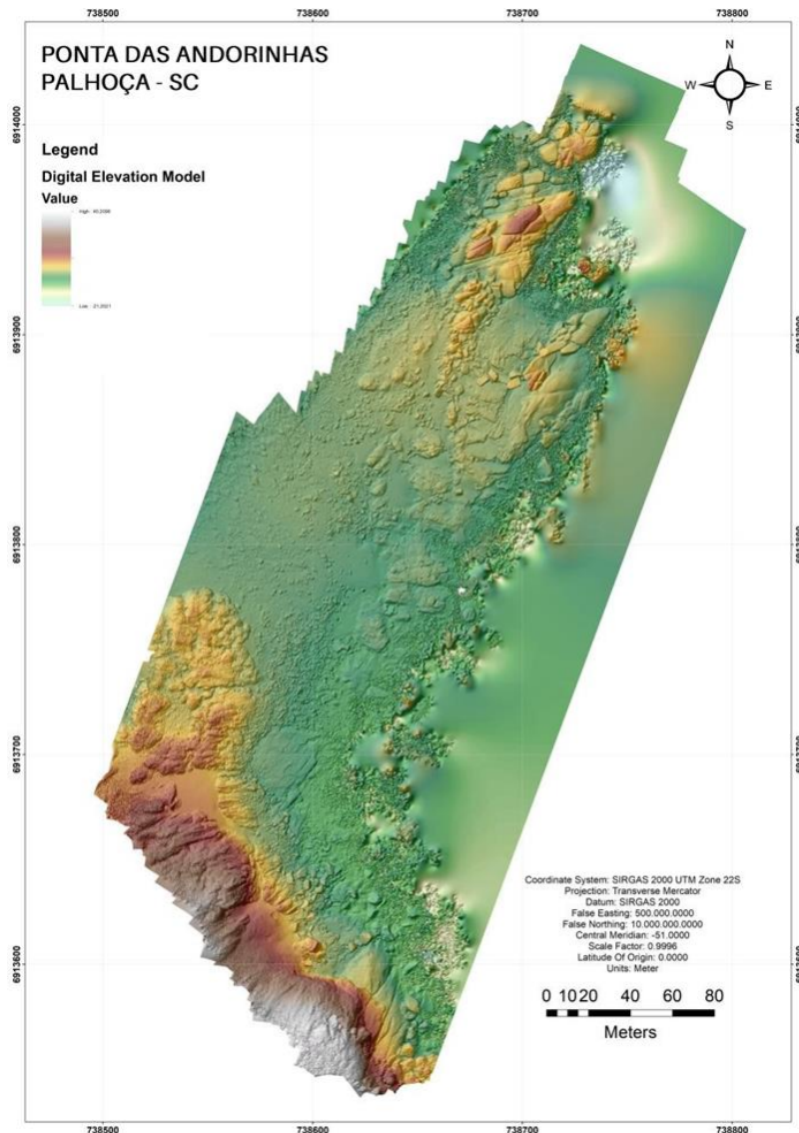


Figura 11 – Modelo Digital de Elevação utilizado na produção cartográfica. Fonte: do Autor.

É percebido neste modelo a geração de diversos artefatos nas porções dispostas próximo aos corpos d'água. Isso se deve ao constante movimento causado pela rebentação das ondas no local, o que por consequência gera diversos ruídos nessas porções, mas que não comprometem de maneira significativa o objetivo deste trabalho. É a partir do MDE que se obtém o raster de sombreamento que é uma ferramenta auxiliar importante na análise do afloramento por meio do ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica, pois permite visualizar padrões de fraturamento, e que junto ao DEM ajudou na confecção do mapa isométrico da Figura 11.

5.3 MODELO VIRTUAL DO AFLORAMENTO

O Modelo Virtual do Afloramento foi gerado a partir da terceira etapa do processamento fotogramétrico no software Metashape denominada Construção de Malha Irregular (TIN). Nessa fase foi aplicado o processo de texturização e geração do *Tiled Model*, o que gerou um modelo de alta resolução (1,19 cm/pixel) do afloramento (Figura 12).

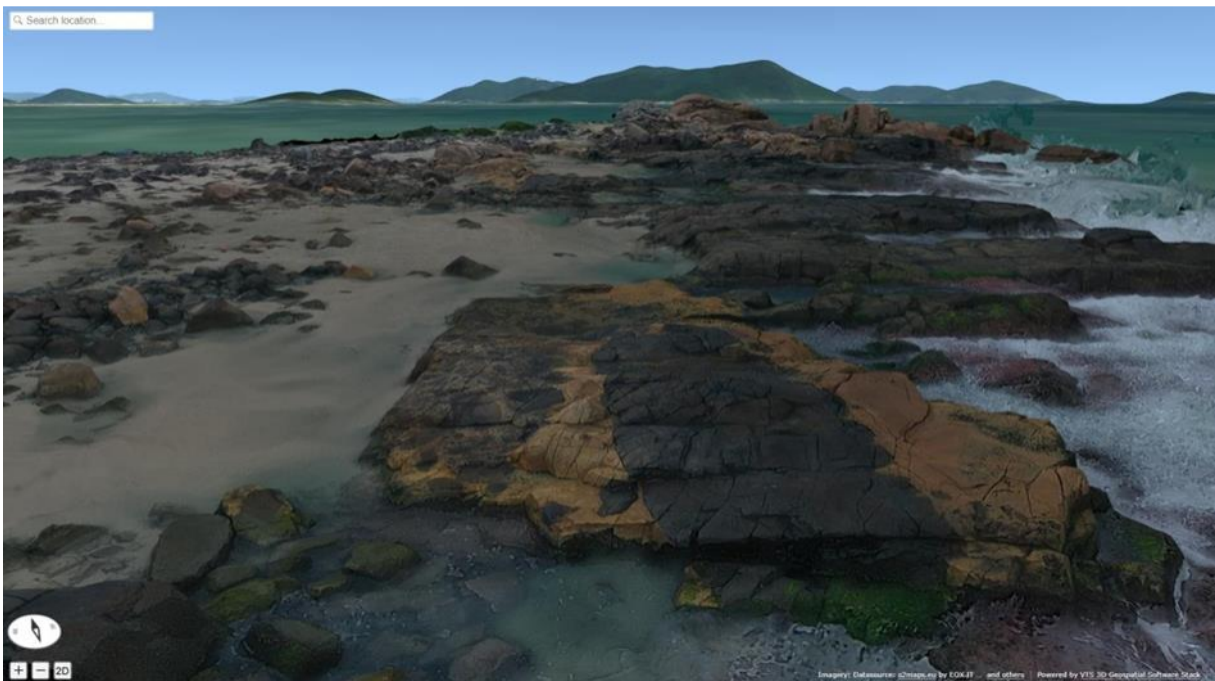


Figura 12 – Modelo virtual 3D interativo do afloramento Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.

Esse modelo foi fundamental para a avaliação e geração do mapa geológico do afloramento. A alta resolução obtida nessa etapa do trabalho, permite que o afloramento fosse explorado de forma remota e assim fazer inferências acerca da geometria e feições geológicas importantes, como no exemplo da Figura 13, onde é possível verificar padrões de fraturamento que acompanham a rocha encaixante e as intrusões dos diques, bem como o embainhamento da rocha intrusiva na encaixante e partes da encaixante que foram deslocadas para dentro do dique.



Figura 13 – Vista em planta do Modelo Digital de Afloramento interativo do afloramento Ponta das Andorinhas. Fonte: do Autor.

A possibilidade de ter um modelo digital do afloramento, permite maiores chances de visualizar as características únicas, bem como um panorama (Figura 14) do afloramento que poderiam passar batidas somente com as limitadas análises em campo.

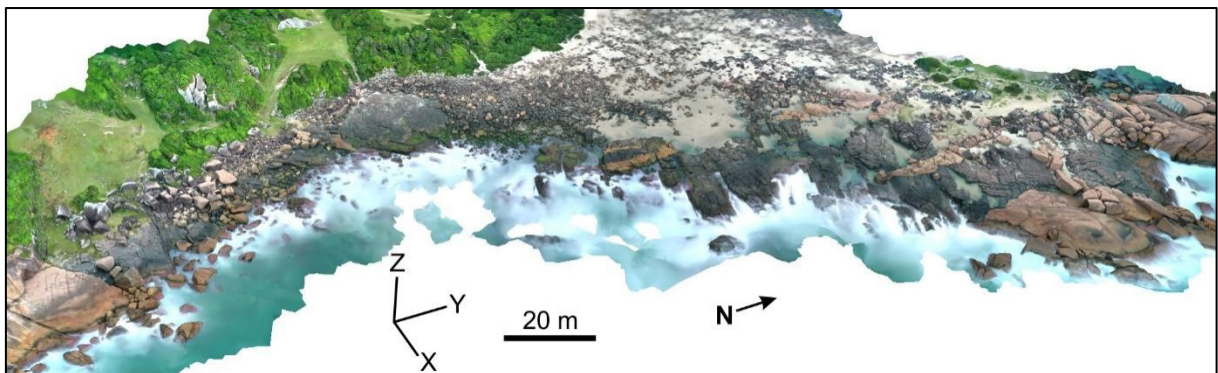


Figura 14 – Vista ortográfica do Modelo Digital de Afloramento gerado. Fonte: do Autor.

5.4 MAPA GEOLÓGICO E ESTRATIGRAFIA DOS EVENTOS MAGMÁTICOS

O mapa geológico detalhado do afloramento da Ponta das Andorinhas é um produto muito importante, concebido a partir da fotogrametria, geração do ortofotomosaico e DOM, validado com dados de campo. Este mapa reproduz as

dimensões e proporções do afloramento de forma fidedigna e permitiu corrigir distorções e eventuais feições geológicas não cartografadas por métodos tradicionais. Ele foi produzido com base nos dados levantados e verificações de campo na segunda etapa de campo, a qual utilizou o ortofotomosaico gerado na primeira etapa como auxílio.

Uma análise abrangente da ortofotomosaico e do DOM revela variações significativas na textura das diferentes litologias presentes. As comparações entre o primeiro e o segundo pulso basáltico mostraram menor contraste nas variações de textura, já que quando comparado estes diques e rocha encaixante alto contraste foi verificado. Além disso, o padrão de fratura na rocha encaixante está de acordo com os contatos com as intrusões, especialmente na porção norte do afloramento. Essas observações reforçam a hipótese de que as texturas e padrões de fratura são resultados da implantação das intrusões na rocha encaixante. A presença de padrões de fratura concordantes é uma forte evidência da atividade tectônica que levou à formação dessas intrusões. Algumas características, como a brecha do conduto, podem ser medidas e contadas. Em geral, as observações fornecem valiosas informações sobre a história geológica e os processos que moldaram o afloramento.

O ortofotomosaico auxiliou na identificação de litologias e características geológicas no mapa preliminar, devido às diferenças texturais entre rochas graníticas e diques. A verificação de campo foi realizada para confirmar essas informações e permitiu a recuperação da geometria do afloramento, tornando possível atribuir contatos com alta confiabilidade no novo mapa geológico (Figura 15).

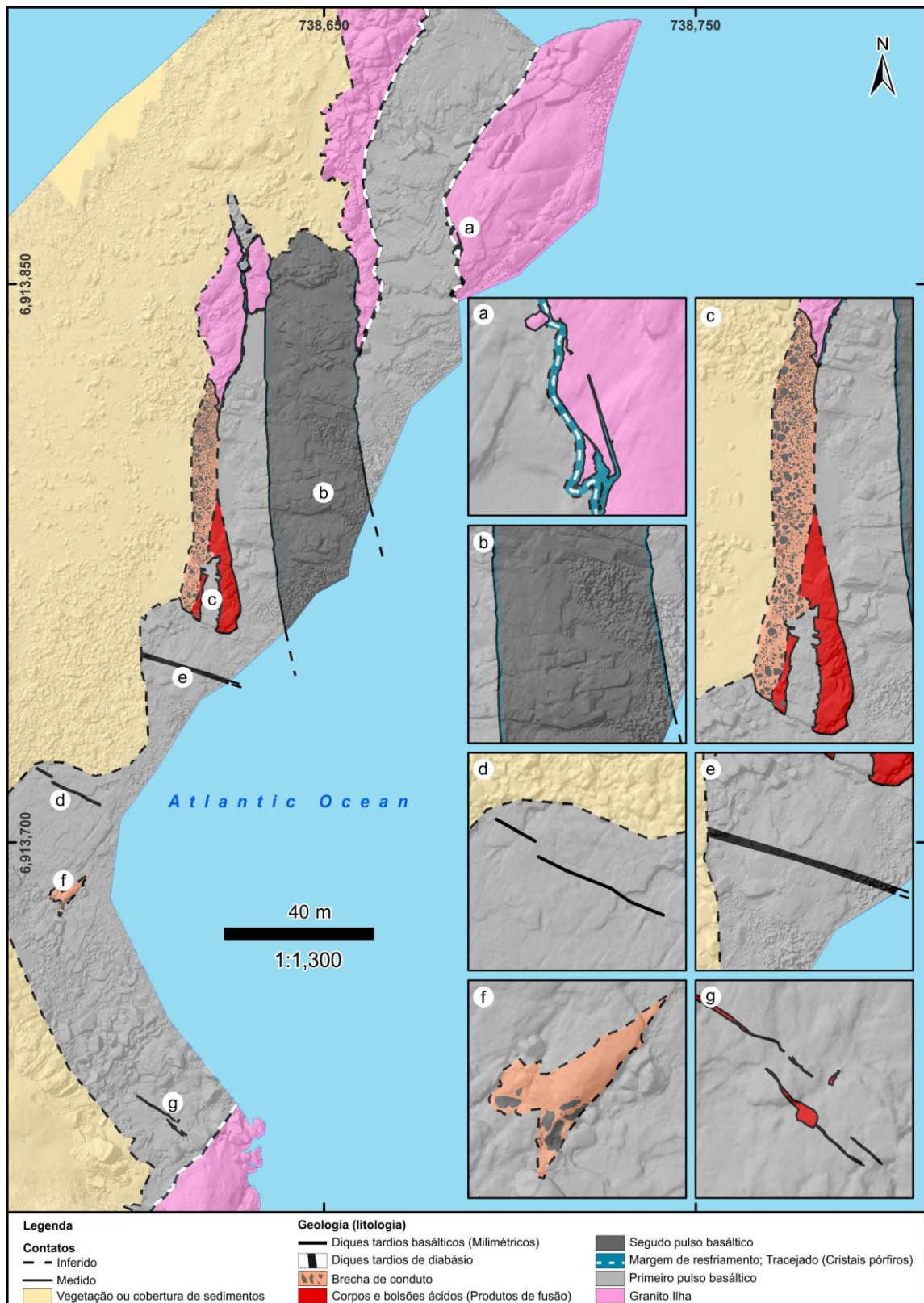


Figura 15 – O mapa geológico da Ponta das Andorinhas: A) Contato E do primeiro pulso de magma basáltico com rocha granítica encaixante e margem microporfírica; B) Segundo pulso de magma basáltico com contato nítido com dique anterior e margens afíricas; C) Contato W do primeiro pulso básico com corpos lenticulares de brecha ácida e mistura de magma ao longo do contato N-S com encaixantes graníticas; D) Dique tardio básico mm hospedado no primeiro pulso basáltico; E) Dique

basáltico tardio africano NW-SE; F) Brecha de mistura triangular; G) Veios orientados NW-SE de material fundido com pocket de fusão em porções dilatativas. Fonte: do Autor

Em geral, a principal vantagem do mapa geológico do afloramento feito a partir do ortofotomosaico e do DOM em comparação com os mapas produzidos por estudos anteriores é a melhor delimitação da geometria do afloramento em geral e dos corpos ígneos, e as relações de contato, especialmente quando as características texturais são homogêneas, como para os contatos entre os diferentes diques básicos que compõem o afloramento.

A seção norte apresentava direções aproximadas de diques NW-SE e a ocorrência de múltiplos diques era apenas inferida sem qualquer possibilidade de estabelecimento de relações de corte verdadeiras (Figura 4). O novo mapa (Figura 15) mostra que existem pelo menos 3 pulsos distintos de magma básico preenchendo este dique múltiplo. O primeiro pulso de magma é representado por um dique NE-S com margens porfiríticas (linhas tracejadas na Figura 15a), que por sua vez é cortado por outro pulso básico N orientado com margens africanas (Figura 15b). Apesar de uma pálida diferença textural ser visível entre os dois pulsos basálticos, foi somente possível em campo confirmá-los e atribuí-los com confiança ao mapa, verificando a margem resfriada presente, tanto na borda oeste quanto na borda leste com o segundo pulso, melhorando os dados da cartografia anterior.

Diques básicos africanos de tamanho pequeno, orientados para o noroeste, cortam o primeiro pulso (Figura 15d e 15e). Como não observamos que eles cortam o segundo pulso, é difícil estabelecer o momento da implantação desses diques menores em relação a este.

Na parte central do afloramento, onde observamos uma complexa interação entre o material fundido remobilizado das rochas encaixantes juntamente com uma brecha de mistura de magma (Figura 15c), observa-se que essas feições foram superestimadas em seu tamanho/escala e geometria nos croquis anteriores. Isso é especialmente notável para o corpo ácido, e as relações de contato deste com as demais unidades foram também melhor delimitadas. Tanto o corpo ácido lenticular quanto a brecha possuem orientação N-S (Figura 15.a), assim como o dique básico com margens africanas que consiste no segundo pulso basáltico no afloramento (Figura 15.a). Todos esses pulsos de magma são hospedados pelo primeiro pulso basáltico (o dique basáltico com margens porfiríticas) principalmente em sua direção de fratura

principal, sugerindo que uma importante fase de extensão N-S ocorre e permite a colocação de tais magmas distintos provavelmente ao mesmo tempo. O corpo ácido N-S é o resultado do material fundido das rochas encaixantes e a brecha de mistura magmática é o resultado da mistura (mingling) de material fundido com materiais básicos, uma vez que os fragmentos encontrados na brecha de mistura são muito variáveis, como fragmentos angulares e enclaves máficos microgranulares arredondados, de vários tamanhos, inseridos numa matriz félsica. Os fragmentos de rochas máficas variam em textura (equigranular, média a fina, e alguns fragmentos com textura afanítica) sugerindo que o material fundido encontrado na região vem de porções mais profundas onde poderia coletar fragmentos de rochas básicas em uma câmara magmática de nível raso, consistindo em uma brecha de conduto magmático. A ocorrência desses corpos de material fundido remobilizados também é identificada na região de contato W do primeiro pulso basáltico com o maciço granítico, onde provavelmente não só o gradiente térmico foi importante para desencadear tal processo de fusão, mas também porque é uma importante descontinuidade adequada para o desenvolvimento de porções dilatativas e a colocação do magma. Por outro lado, o contato E do primeiro dique não possui feições que denunciem fusão das encaixantes, pois os contatos são abruptos, retos e não há modificação textural significativa das encaixantes que atestem qualquer efeito de fusão. Assim, interpretamos o contato W como a parte principal onde se concentra o material fundido. Além disso, outra feição importante foi mapeada devido ao ortofotomosaico identificado na porção sul do afloramento Ponta das Andorinhas (Figura 15.f), onde observamos um corpo triangular de composição ácida com fragmentos básicos, muito semelhante à brecha encontrada na parte central. Essa é outra feição que não havia sido cartografada nos croquis anteriores, e que se destacou por suas notáveis diferenças de textura em relação à rocha encaixante.

Na parte sul, conseguimos mapear as injeções ácidas NW, que são bolsões de fusão conforme já identificado nos croquis anteriores.

Por fim, o novo mapa mostra que o primeiro pulso basáltico é orientado N-NE e possui margens porfiríticas, este pulso básico possui fraturas N-S e E-W e na porção norte essas fraturas são curvadas na direção NE, seguindo a inflexão da intrusão para NE (Figura 15). Esses padrões de fraturas foram identificados apenas no ortofotomosaico e são bem distintos do segundo pulso básico, que possui margens

afíricas e que apresentam principalmente fraturas lineares E-W e N-S (Figura 10). Tais características foram essenciais na distinção dos limites dos distintos pulsos de magma básico e podem ser usadas para rastrear a entrada de múltiplos pulsos básicos que compõem diques complexos. A ocorrência de corpos ácidos, bolsões de fusão e brechas foram identificadas hospedadas apenas nas margens W no primeiro dique basáltico, assim como os diques tardios milimétricos Figura 15. Como não observamos nenhuma relação de corte de corpos ácidos, diques tardios ou brechas de mistura com o segundo pulso básico, também orientado N-S, interpretamos que a colocação de material fundido (com ou sem interação com material básico) e o segundo pulso básico foram colocados ao mesmo tempo e controlados pela mesma fratura que controlou o posicionamento do primeiro pulso basáltico, onde ocorrem porções dilatativas canalizando magmas distintos em um ambiente raso.

6 CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho demonstram que os produtos da fotogrametria, são efetivos na produção de mapas de detalhe e modelos para o afloramento estudado. Produtos como o Modelo Digital de Elevação garantem que o aerolevante represente de forma fidedigna a topografia da área estudada, um produto de qualidade superior ao levantamento pontual por meio de equipamentos como estação total e possuem uma resolução consideravelmente maior que produtos disponíveis oriundos de imagens de satélite, podendo chegar a escalas centimétricas.

O ortofotomosaico, produto do processo de ortorretificação das fotografias, permite visualizar e delimitar de forma consistente a morfologias, diferentes unidades geológicas e feições importantes do afloramento, como relações de corte dificilmente identificáveis em campo, o que permitiu o estabelecimento da estratigrafia dos eventos magmáticos na construção deste afloramento complexo. Diferentemente de técnicas menos avançadas como reprodução por meio de croquis ou produtos de sensoriamento remoto com resoluções mais baixas, a fotogrametria por meio de RPAS, garante alta qualidade e maior detalhe das feições, bem como garante que as morfologias e escalas sejam mantidas o mais próximo da realidade, além de permitir o acurado georreferenciamento destas feições.

Outro produto muito relevante é o Modelo Digital do Afloramento proposto. Essa representação virtual que pode ser visualizada em 2D e 3D, permite que o geocientista possa visitar o afloramento por meio de computador. Esse tipo de aplicação se mostra importante especialmente por que o pesquisador pode visualizar áreas onde pode haver risco a segurança ou mesmo a impossibilidade de se chegar por meios normais. Outro ponto importante é que trabalhos como esse tem como resultado uma importante fonte de material auxiliar na educação e ensino a distância ou mesmo atividades de divulgação científica.

Apesar do afloramento estar localizado em uma área que possui diversos problemas intrínsecos, como oscilações de maré, que recobre boa parte de sua exposição durante longos períodos; necessidade de monitoramento das condições climáticas e de voo, verificou-se que essa técnica é facilmente replicável, de baixo custo e é possível fazer uso novas tecnologias como esta para reconstruir modelos tridimensionais e produzir mapas dos afloramentos de interesse, revisitando estudos

anteriores, com intuito de se aumentar a confiança acerca das feições geológicas dos locais estudados.

A integração dos dados deste estudo com os dados geológicos prévios permitiu não apenas a melhoria da cartografia geológica, bem como a compreensão dos eventos magmáticos e evolução deste importante sistema de conduto de magmas que constitui o EDF.

REFERÊNCIAS

- Aber, J.S., Marzolff, I., Ries, J., Aber, S.E.W., 2019. Small-format aerial photography and UAS imagery: Principles, techniques and geoscience applications. Academic Press.
- Bellian, J.A., Kerans, C., Jennette, D.C., 2005. Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research* 75, 166–176. <https://doi.org/10.2110/jsr.2005.013>
- Bernardes, E.G., 2017. Estudo das auréolas termiais e processos de fusão gerados na interface diques básicos Cretáceos do Enxame de Diques de Florianópolis e encaixantes graníticas Neoproterozoicas do Batólito Florianópolis. Praia da Pinheira, SC. 2017 (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Bitencourt, M.F., Bongioio, E.M., Philipp, R.P., Morales, L.F.G., Rubert, R.R., Melo, C.L., Luft Jr., J.L., 2008. Estratigrafia do Batólito Florianópolis, Cinturão Dom Feliciano, na região de Garopaba-Paulo Lopes, SC. *Pesquisas em Geociências* 109–136.
- Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D., Kurz, T.H., 2008. Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations. *J Geol Soc London* 165, 625–638. <https://doi.org/10.1144/0016-76492007-100>
- Chesley, J.T., Leier, A.L., White, S., Torres, R., 2017. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sediment Geol* 354, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.013>
- Coutinho, J.M.V., 2008. Dike swarms of the paraná triple junction, Southern Brazil. *Geologia USP - Serie Cientifica* 8, 29–52. <https://doi.org/10.5327/z1519-874x2008000200003>
- Deckart, K., Féraud, G., Marques, L.S., Bertrand, H., 1998. New time constraints on dike swarms related to the Paraná-Etendeka magmatic province, and subsequent South Atlantic opening, southeastern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 80, 67–83. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(97\)00038-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00038-3)
- Dering, G.M., Micklethwaite, S., Thiele, S.T., Vollgger, S.A., Cruden, A.R., 2019. Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study

- of dikes: Best practises and future potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, 148–166. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics* 4, 359–389. <https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Florisbal, Luana Moreira, de Assis Janasi, V., de Fatima Bitencourt, M., Nardi, L.V.S., Marteleto, N.S., 2018. Geological, geochemical and isotope diversity of ~ 134 Ma dikes from the Florianópolis Dike Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 355, 181–203. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.002>
- Florisbal, L.M., Heaman, L.M., de Assis Janasi, V., de Fatima Bitencourt, M., 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dike Swarm, Paraná-Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on precise U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 289, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.11.007>
- Florisbal, L. M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Marteleto, N.S., 2018. Geological, geochemical and isotope diversity of ~ 134 Ma dikes from the Florianópolis Dike Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 355, 181–203. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.002>
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf Process Landf* 38, 421–430. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 32, 1362–1376. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2009.161>
- Gordon Jr., O., 1947. Classificação das formações gonduânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. *Boletim DNPM-DGM*, 1, 374-385.

- Herz, N., 1977. Timing of spreading in the South Atlantic: Information from Brazilian alkalic rocks. *Bulletin of the Geological Society of America* 88, 101–112. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<101:TOSITS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<101:TOSITS>2.0.CO;2)
- Hodgetts, D., 2013. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: A review. *Mar Pet Geol* 46, 335–354. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.02.014>
- Honorato, A.R., 2019. *Geologia, Petrografia e Geoquímica das Rochas Ácidas da Ponta da Andorinha, Praia da Pinheira - SC: Processos de Fusão de Crosta Rasa.*
- Hubbard, S.M., Fildani, A., Romans, B.W., Covault, J.A., McHargue, T.R., 2010. High-relief slope clinoform development: Insights from outcrop, magallanes Basin, Chile. *Journal of Sedimentary Research* 80, 357–375. <https://doi.org/10.2110/jsr.2010.042>
- James, M.R., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J Geophys Res Earth Surf* 117. <https://doi.org/10.1029/2011JF002289>
- Janasi, V. de A., de Freitas, V.A., Heaman, L.H., 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth Planet Sci Lett* 302, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.005>
- Jerram, D.A., Bryan, S.E., 2018. Plumbing Systems of Shallow Level Intrusive Complexes. *Advances in Volcanology* 39–60. https://doi.org/10.1007/11157_2015_8
- Jerram, D.A., Dobson, K.J., Morgan, D.J., Pankhurst, M.J., 2018. The petrogenesis of magmatic systems: Using igneous textures to understand magmatic processes, *Volcanic and Igneous Plumbing Systems: Understanding Magma Transport, Storage, and Evolution in the Earth's Crust.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809749-6.00008-X>
- Linder, W., 2016. *Digital photogrammetry: A practical course, fourth edition, Digital Photogrammetry: A Practical Course, Fourth Edition.* <https://doi.org/10.1007/978-3-662-50463-5>
- Lowe, D.G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *Int J Comput Vis* 60, 91–110. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>

- McGlone, J., Mikhail, E., Bethel, J., 2004. Manual of photogrammetry: American society for photogrammetry and remote sensing. Bethesda, MD.
- Melfi, A.J., Piccirillo, E.M., Nardy, A.J.R., 1988. Geological and magmatic aspects of the Paraná Basin an introduction., in: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (Eds.), The Mesozoic Flood Volcanism of Tha Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. IAG-USP, São Paulo, pp. 1–13.
- Peate, D.W., 1997. The Paraná-Etendeka province. Geophysical Monograph Series 100, 217–245. <https://doi.org/10.1029/GM100p0217>
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.M.S., Rogers, N.W., Turner, S.P., 1999. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Parana Flood Basalt Province and implications for the nature of 'Dupal'-type mantle in the South Atlantic Region. *Journal of Petrology* 40, 451–473. <https://doi.org/10.1093/petroj/40.3.451>
- Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Vulcanology* 119–139.
- Rarity, F., van Lanen, X.M.T., Hodgetts, D., Gawthorpe, R.L., Wilson, P., Fabuel-Perez, I., Redfern, J., 2013. LiDAR-based digital outcrops for sedimentological analysis: Workflows and techniques. *Geol Soc Spec Publ* 387, 153–183. <https://doi.org/10.1144/SP387.5>
- Rittersbacher, A., Buckley, S.J., Howell, J.A., Hampson, G.J., Vallet, J., 2013. Helicopter-based laser scanning: a method for quantitative analysis of large-scale sedimentary architecture. *Geological Society, London, Special Publications* 387, 185–202. <https://doi.org/10.1144/sp387.3>
- Rodrigues, A.A., 2016. Uso De Veículos Aéreos Não Tripulados Para Mapeamento E Avaliação De Erosão Urbana (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Goiás.
- Rodrigues, G.C., 2021. Estudo das múltiplas intrusões do dique básico Cretáceo da Pontas da Andorinhas, Praia da Pinheira, Palhoça, SC (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., Scherer, C.M.S., 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical

- framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 355, 98–114. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>
- Saque, P.F., 2017. LEVANTAMENTO FOTOAÉREO VIA DRONE : ESTUDO DE CASO NA PEDREIRA SÃO JORGE (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Paraná.
- Silva, C.A. da, Vandesteen, M., Souto, S., Duarte, C.R., Bicho, C.P., Antonio, J., Sabadia, B., 2015. AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DOS ORTOMOSAICOS E MODELOS DIGITAIS DO TERRENO GERADOS PELO MVANT / DNPM Accuracy Assessment of Orthomosaics and Digital Terrain Models Generated By μ VANT / DNPM. *Revista Brasileira de Cartografia* 7, 1479–1495.
- Smith, M.W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J., 2016. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Prog Phys Geogr* 40, 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Snively, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *Int J Comput Vis* 80, 189–210. <https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Sopchaki, C.H., Paz, O.L. de S. da, Graça, N.L.S. de S., Sampaio, T.V.M., 2018. Verificação Da Qualidade De Ortomosaicos Produzidos a Partir De Imagens Obtidas Com Aeronave Remotamente Pilotada Sem O Uso De Pontos De Apoio. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*. <https://doi.org/10.5380/raega.v43i0.56564>
- Tomazzoli, E.R., Mizusaki, A.M.P., Lima, E.F., Félix, A., Figueiredo, A.M.G., 2005. Rochas ácidas associadas ao Enxame de Diques Florianópolis na ilha do Arvoredo e na ilha de Santa Catarina (sc): dados geocronológicos preliminares., in: *Anais Do III Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados*.
- Ullman, S., 1979. The interpretation of structure from motion. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 203, 405–426.
- Viana, C.D., Grohmann, C.H., Busarello, M. dos 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. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201800201898>
- Weissmann, G.S., Hartley, A.J., Nichols, G.J., Scuderi, L.A., Olson, M., Buehler, H., Banteah, R., 2010. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems. *Geology* 38, 39–42. <https://doi.org/10.1130/G30242.1>

- 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* 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wolf, P.R., Dewitt, B.A., Wilkinson, B.E., 2014. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. McGraw-Hill Education.
- Wright, K.A., Davies, R.J., Jerram, D.A., Morris, J., Fletcher, R., 2012. Application of seismic and sequence stratigraphic concepts to a lava-fed delta system in the Faroe-Shetland Basin, UK and Faroes. *Basin Research* 24, 91–106. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2011.00513.x>
- Zanini, L.F.P., Branco, P.M., Camozzato, E.E., Ramgrab, G.E., 1997. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Florianópolis (Folha SH.22-Z-D-V) e Lagoa (Folha SH.22-Z-D-VI). Brasília.

APÊNDICE A – MANUSCRITO DO ARTIGO SUBMETIDO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES

Using RPAS photogrammetry to improve geological mapping of complex outcrops.

Douglas Ricardo Briske^{a*}, Luana Moreira Florisbal^a

^aPrograma de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Trindade, 88040-970, Florianópolis, SC, Brazil

*Corresponding author: D.R., Briske

E-mail address: briske.dr@gmail.com

Abstract:

High resolution digital outcrop models have been successfully applied in the investigation of complex outcrops, since they are able to improve our photogrammetry interpretation of crosscut relations, the identification of detailed features, and highlights important structural relations that are crucial for the understanding of stratigraphy of the geological events. In this study, we used a Remotely Piloted Aerial System (RPAS) photogrammetry and Structure from Motion (SfM) workflow to provide materials such as Digital Outcrop Models (DOM) and Orthophotomosaics, which are products of this advanced photogrammetry technique. Our main goal is to apply such techniques to improve the understanding of the emplacement of multiple basic dikes from the Florianópolis Dike Swarm in the coastal region of Santa Catarina, Brazil. The high-resolution DOM was used to better constrain the lithological contacts, stratigraphic relations, and geometry of each feature present in a complex outcrop, where multiple basic magma batches, mixing breccia and melting of the country rocks occur. Our aim is to understand how the lithological contacts succeeded, the stratigraphic relations and the geometry of each feature that developed on the outcrop and see if those relations reflect the hypothesis and analogical mapping of the previous studies. Its ease of workflow implementation allows geoscientists to access this useful tool, which can provide important insights for the geological understanding of outcrops, because it is easy to plan, acquire, and process data. Nevertheless, it can reach places that are unsafe or unreachable by other techniques. Furthermore, this is considered a

low-cost technique in terms of hardware and software to produce Digital Outcrop Models. The results acquired on this research by the survey show how the photogrammetric acquisition can contribute to a substantial upgrade in the detailed cartography demanded for the area to unravel the complex stratigraphy of the magmatic events and structural scenario. The development of this work showed that SfM use and practice on geosciences can be a powerful tool to develop DOM that can be crucial to better understand complex outcrops, and how it significantly improved the detailed mapping and understanding of the outcrop. The significance of this research is that the method can be replicated on similar outcrops and will help to understand other outcrops that lack accurate detailed cartographical material. This work provides a powerful tool for geoscientists to access and understand complex outcrops, which can be difficult to reach or have limited cartographical data. Additionally, it is a cost-effective method that can be used to produce detailed Digital Outcrop Models, making it a valuable resource for understanding the geology of a region. This research provides a valuable contribution to the field of earth sciences and has the potential to improve the understanding of similar outcrops in the future.

Key-words: Remotely Piloted Aerial System, photogrammetry, digital outcrop models, Florianópolis Dike Swarm.

1. INTRODUCTION

The role played by dikes in the ascent, transport, and emplacement of magmas along the crust is crucial, mainly in the investigation of the plumbing systems of Large Igneous Provinces. Dikes outcrops are three-dimensional and contain important information in different scales. Thus, the detailed cartography of such intrusions are main points for the understanding of the mechanism of emplacement, the identification of pulses that fulfil the fractures and give rise to composite or multiple dikes and their crosscut relations.

Recovering the information of large-scale features (kilometers to tens of kms) have been successfully done by satellite imagery and aerial photography (Hubbard et al., 2010; Weissmann et al., 2010). On another hand, small to intermediate-scale features (millimeter to meter) have been also recorded with different techniques such as terrestrial laser scanning (TLS), differential GPS, and photography mosaics (Bellian

et al., 2005; Buckley et al., 2008; Hodgetts, 2013; Rarity et al., 2013; Rittersbacher et al., 2013). Although those multiple-scale features have been successfully described by geoscientists, intermediate-scale features (meter to kilometer) are often difficult to characterize as these features are normally under the resolution of satellite imagery and aerial photos, but larger and more complex than what can be easily recorded with field-based methods (Chesley et al., 2017).

One tool that helps to overcome the characterization problems inherent to the gap between centimetric to kilometric scale features is the generation of Digital Outcrop Models, which are photorealistic three-dimensional representations of a geological outcrops. Allied with orthophotomosaic generation, those tools enable the remote description and analysis of multiscale features and, occasionally, access outcrops that are unsafe or unreachable. The geometry may be recovered, and those features can also be measured due to this model be a georeferenced product (Viana et al., 2018). By using Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), it is possible to effectively gather images quickly at a relative low cost (Westoby et al., 2012). These images can then be compiled and processed quickly using the SfM method, which combines photogrammetry and 3D computer vision algorithms (Smith et al., 2016; Snavely et al., 2008).

The popularization of digital photography in the early 2000s, the “drone boom” of the 2010s, and the growing popularity of Small-Format Aerial Photography (SFAP) for creating high-resolution topographic data led to rapid acceptance of SfM by the geoscientific community. Consequently, software packages based on SfM approaches increasingly incorporate concepts, tools and statistical results commonly used in classical aerial photogrammetry to extend their use in different contexts and scenarios. Thus, geoscientific studies are also successfully employing SfM in terrestrial photography acquisition, especially using RPAS (Eltner et al., 2016). SfM and RPAS will not replace existing techniques for data collection, but their implementation offers a relatively easy and effective way to enhance traditional methods (Chesley et al., 2017).

Considering the major role of dikes is the transport of magma from source and/or storage reservoirs to eruption sites on Earth’s surface and the role played by them as the feeders of volcanic piles, the use of SfM and RPAS for the mapping of such conduits represent a powerful toll on the detailed cartography of its stratigraphical and structural features. Geometry, connectivity, and internal textures of dikes preserve

information related to dike emplacement, linkage, and magma flow dynamics. The lack of high-quality field data limits our ability to develop new insights. Through the emergence of RPAS, photogrammetry, and other sensor technologies, we can collect data at higher density and with greater precision in the field (Dering et al., 2019).

In such context, the coastal region of Santa Catarina has several Eo-Cretaceous basic dikes of the Florianópolis Dike Swarm that are intrusive in the granitic rocks of the Florianópolis Batholith. The outcrop of Ponta da Andorinha, Pinheira Bay (SC), have basic and composite dikes (134 Ma) (Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018) that are hosted by the Ilha Granite (590 Ma). The contacts of the dikes with the host granite are variable, from straight and sharp to sinuous and interfingered, attesting mutual intrusion relationships (Honorato, 2019; Rodrigues, 2021). While many studies were conducted in the area, that attest the existence of multiple pulses into the basic dikes, interaction of molten country rock material with basic rocks into the conduit, still doubts rest about the geometry of such intrusion, the contacts of the molten parts and remobilized molten material and the zones of interaction of basic and felsic magmas. Due to the multi-scale features and the intermediate size of the outcrop, the real geometry of the outcrop and the crosscut relations both concerned the researchers and caused problems for the establishment of the stratigraphy of magmatic events of the area.

This study aims to demonstrate that the use of photogrammetric techniques helps to develop digital outcrop model which can shed lights into the understand and recover the detailed geometries of the outcropping rocks and specially to improve the stratigraphic and structural understanding. This goal is reached by the interpretation of the stratigraphy by comparing previous studies of the area and checking the geology on field with the material described in the literature, to fulfil some gaps and to unravel hidden features that have never been spotted and that are key spots for future geochemical and geochronological investigations.

2. GEOLOGICAL SETTING AND PREVIOUS DATA

The study area is located southern to ILHA DE SANTA CATARINA Florianópolis in the southern portion of Pinheira Bay, SC (Fig 1a, b). The outcrop consists mainly of granitic rocks of Neoproterozoic age, belonging to the Cambirela Suite (SC), which are sectioned by basic and composite dikes of Cretaceous age,

related to the Florianópolis Dike Swarm (FDS) (Bernardes, 2017; Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018; Honorato, 2019), as illustrated in figure 1c.

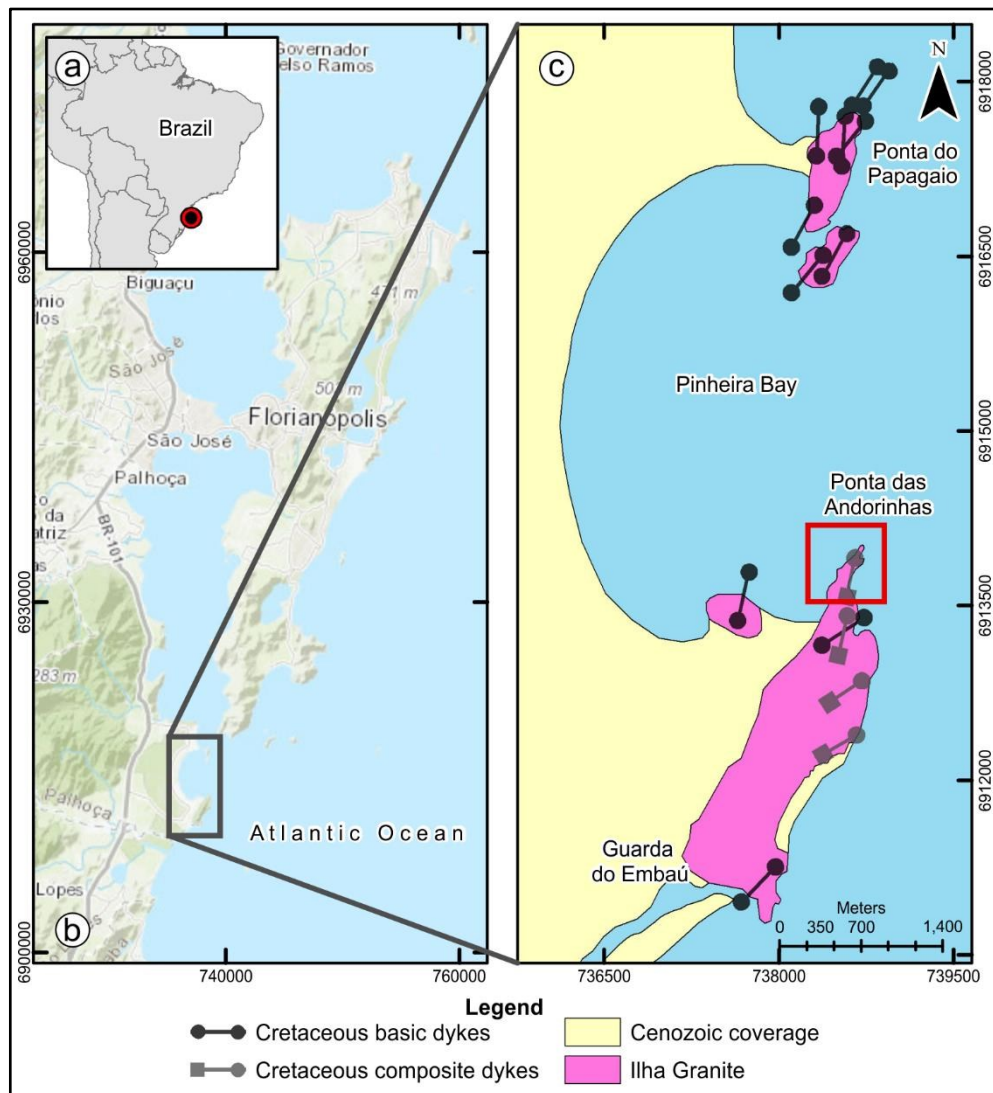


Figure 1. a) Study area location in Brazil, b) Google Earth Image illustrating Pinheira Bay location, c) Geological Map of Pinheira Bay, study area highlighted in the southern portion.

The Ilha Granite is the main lithology in Pinheira Bay. In the studied area, this granite is composed of leucomonzogranites to syenogranites of allotriomorphic texture, medium to coarse grained, equigranular, with low content of biotite (3-5%). Janasi et al. (2015) present U-Pb ages via LA-MC-ICP-MS of 588 ± 8 Ma for this unit. According to Florisbal et al (2014, 2018), Bernardes (2017) and Honorato (2019), in the study region, the Ilha Granite is a leucogranite frequently sectioned by Cretaceous basic and composite dikes related to the Florianópolis Dike Swarm (FDS), besides mixing breccia and acidic tabular bodies related to the melting of the country rocks.

The FDS is part of the voluminous magmatism of the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PMPE), which together with the lava pile and other dike swarms make up the so called Serra Geral Group (Rossetti et al., 2018).

In Brazil, there are three main dike swarms: Arco de Ponta Grossa (PR), Serra do Mar (extending from Santos to Rio de Janeiro and inland to the Vale do Paraíba region) and Florianópolis (SC). The Ponta Grossa Dike Swarm is $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ trending, perpendicular to the present-day coastline, and developed along a prominent arch structure that separates the other two coast-parallel dike swarms (Santos-Rio de Janeiro, oriented $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, considered the North Arm, and Florianópolis, oriented $N15^{\circ}-45^{\circ}E$, denominated South Arm). The arrangement of those dike swarms is interpreted as a triple junction where the Ponta Grossa swarm would correspond to the failed arm of the rift that led to the separation of the African and South American continents (Coutinho, 2008; Herz, 1977).

In the study area, the dikes are predominantly NE to N-S oriented. There is also a predominance of tholeiitic basic dikes, in addition to the occurrence of composite dikes with basic edges and trachyandesitic centers with a high content of microgranular mafic enclaves, attesting to the existence of mingling (Florisbal et al., 2014, 2018). Most basic dikes in this region have interfingering and/or diffuse contacts with molten portions of the host rock (Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018), which are either easily identifiable or more discrete features.

At Ponta das Andorinhas, there is a vast outcrop of basic dike with clear evidence of melting close to dike contacts and intrusion of molten material in several sectors of the outcrop. The degree of melting as well as the zones of interaction are widely varied (Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018). In addition, mixing breccia zones, where the breccia matrix is made up of the country rocks molten material with fragments of basic rocks with varied textures and geometries, as well as acidic bodies generated entirely by the melting of the host rocks that fill dilative sites (L. M. Florisbal et al., 2018; Honorato, 2019). are also found close to dike contacts. Still, geochemical and detailed geological mapping attest for the existence of at least two magma pulses into the basic dike, as illustrated on figure 2.

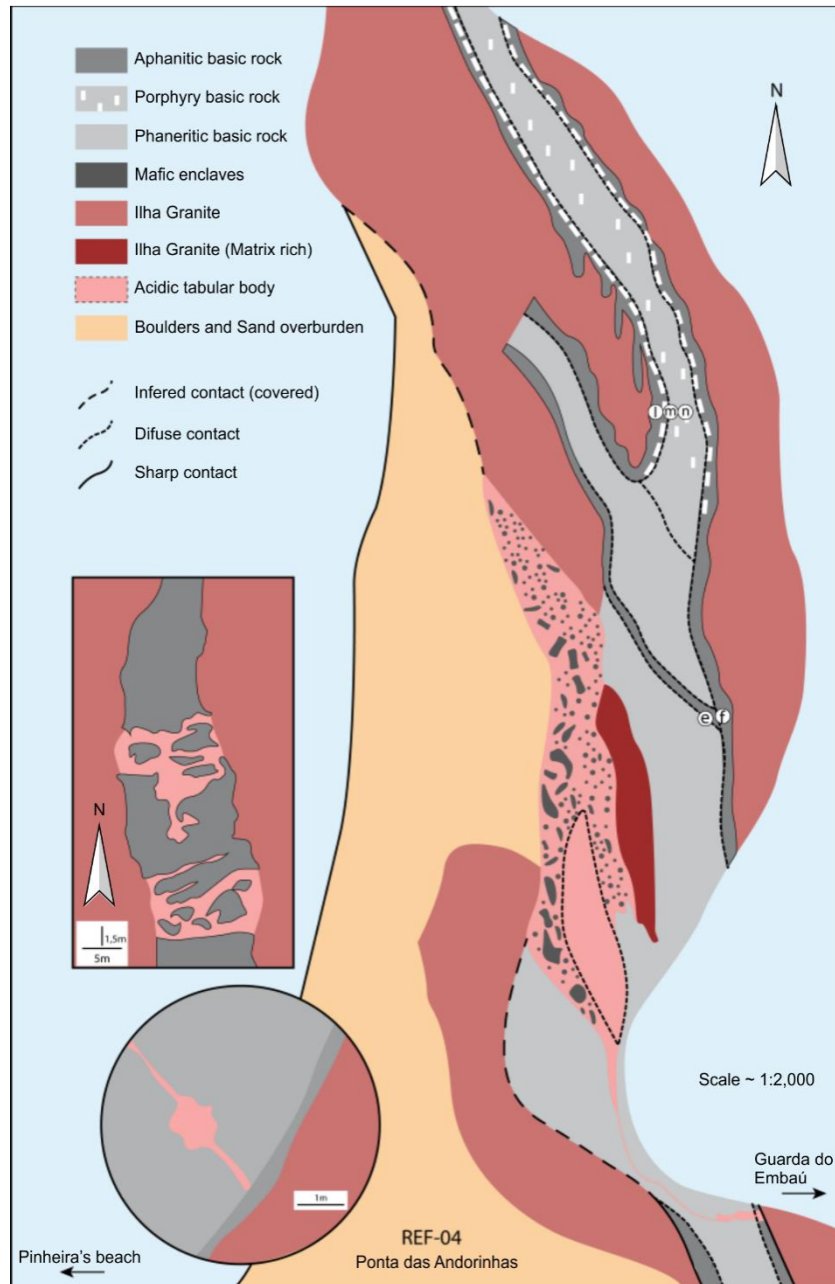


Figure 2. Sketch produced by previous studies illustrating the complexity of the studied outcrop and the uncertainties (dashed lines) related to the contacts cartography and crosscut relations.

The detailed geological survey, conducted by regular cartography methods was firstly produced in the early 2000's (Fig. 2) and has been updated based on field, petrography, geochemical, geochronological data from (Bernardes, 2017; Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018; Honorato, 2019; Rodrigues, 2021) The sketch illustrated on figure 2 demonstrates the complexity of the outcrop, which is interpreted by (Florisbal et al., 2014; L. M. Florisbal et al., 2018) as a magmatic conduit zone and part of the plumbing system of the Paraná Magmatic Province. Even with the

substantial advances given by those previous studies still many doubts remain, mostly regarding the geometry of the igneous bodies, as well as their spatial relations. In such context, it became essential the acquisition of high-resolution photogrammetric surveys for the generation of robust virtual outcrop models and orthophotomosaics, which allow the effective integration of all available data for the outcrop and solve the demands regarding to the cartography of spatial and morphological features in the same degree of detail that temporal and geochemical data were presented previously.

3. ANALYTICAL PROCEDURES

This study was carried out by the acquisition of the data, processing of photographic material using the SfM technique, GIS and DOM analysis, field validation, interpretation and comparison of the features with previous studies.

3.1. Planning and Image Acquisition

The on-site study was conducted in March 2021 due to the need of matching weather and tide level features since the outcrop is close to the sea. The acquisition was made at the end of the day, between 05:27-06:28 p.m., while the tide was rising, and the weather was cloudy, so light condition was diffuse, and the maximum height of the flight was 60 meters. Due to the reliability of equipment's geolocation system (Sopchaki et al., 2018), it was chosen to not use any ground point control.

The equipment used for the acquisition of the images was the DJI Mavic 2 PRO. Its main technical specifications are weight of 907g, dimensions (Unfolded) of 322×242×84 mm (length × thickness × height), with a maximum speed of 72 km/h, maximum ascent speed of 5 m/s and maximum descent speed of 3 m/s, autonomy of approximately 30 minutes of flight, with the ability to operate at a distance of up to 8 km. The equipment uses GPS+GLONASS satellite navigation system (GPS = Global Positioning System, GLONASS = Global Navigation Satellite System in Russian) and has good accuracy (Vertical: ± 0.1 m (with visual positioning); ± 0.5 m (with GPS positioning) and Horizontal: ± 0.3 m (with visual positioning); ± 1.5 m (with GPS positioning)).

To operate the RPAS, it was necessary to use a mobile device that contains the app in which configurations, planning and flight control are performed. The chosen applications were DroneDeploy, which allows the execution of tasks and real-time

monitoring of the aerial survey work, and DJIGO 3.0, an application that allows camera, storage and advanced settings to be adjusted on the mobile device's screen. The RPAS also has a control in which the mobile device is connected, and which allows maneuvering and manual control of the equipment. The camera is attached to the stabilizing swivel platform with independent movement in 3 axes (tilt, rotation and swivel), called a gimbal, that keeps the image stable even when the equipment is in motion. That camera is manufactured by the company Hasselblad and its model is the L1D-20c. It is equipped with a 1" CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sensor with 20 effective megapixels, which took photos with a maximum size of 5472 x 3648, having a 77° FOV (field of view) lens and a format equivalent to 35 mm: 28 mm and f/2.8-f/11 aperture and 1 m shooting range ISO range (Photo) of 100-3200 (Auto) and 100-12800 (Manual).

3.2. Data Processing

The Orthophotomosaic, Digital Elevation Model (DEM) and Digital Outcrop Model were produced using Agisoft Metashape Professional (version 1.6.5). The workflow (Fig. 3) used for this step was based on the studies of Westoby et al. (2012), Fonstad et al. (2013), and Smith et al. (2016). A screening of the photos was conducted before the processing step, since the outcrop is close to the sea, and some photographs would show only features like the water body, which were excluded prior to the data processing, because they do not contribute to the photogrammetric products. From the survey, 865 out of 886 photographs were automatically aligned using 324,064 tie points (sparse cloud) that were determined by a point-matching algorithm used by the software.

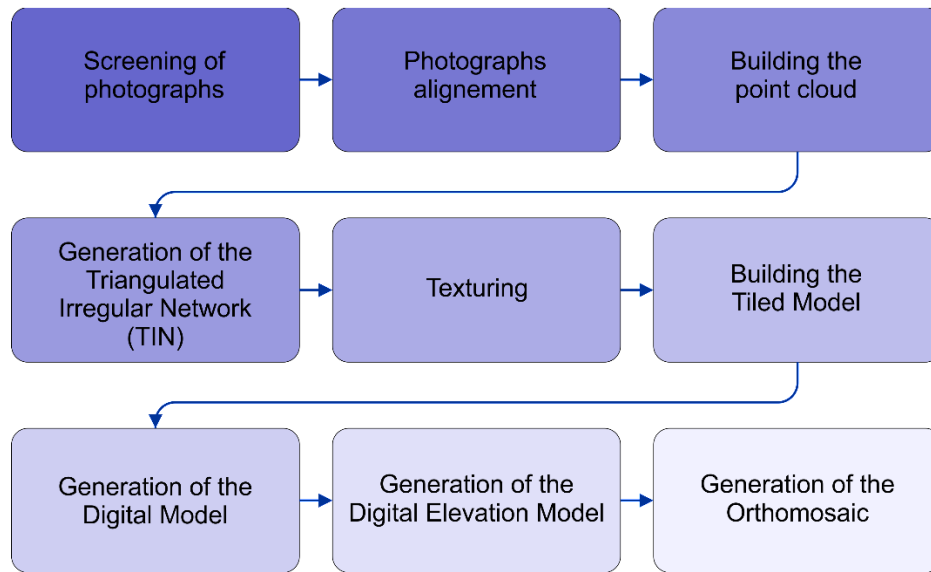


Figure 3. Data processing steps based on the workflow of Westoby et al. (2012), Fonstad et al. (2013), and Smith et al. (2016).

3.3. Interpretation and Analysis

The Orthophotomosaic (GeoTIFF) and DEM (Raster) files were imported into the ESRI ArcMap for analysis using the Spatial Analyst toolset. A hillshade raster produced from the original DEM was generated to analyze different characteristics of interest within important regions of the outcrop, which was created to assist viewing the topographic characteristics in relation to the terrain. The morphological and textural features present in the orthophotomosaic allowed to separate mostly of the lithologies just by using these products.

Most of the analysis was based on the textural characteristics due to the differences between the lithologies and their morphological aspects, supported by the DOM analysis (Fig. 4).

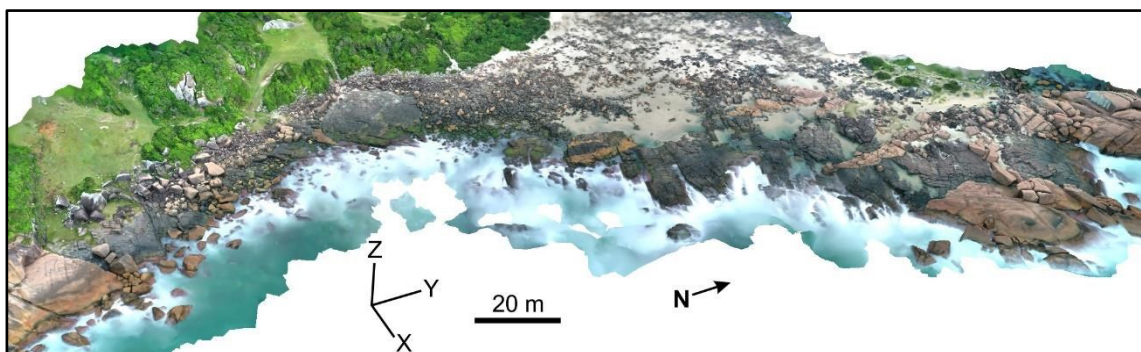


Figure 4. Orthographic view of the Digital Outcrop Model generated.

3.4. Field work validation

After analysis of the orthophotomosaic generated, with help of GIS tools, a preliminary geological map (1:2.700 scale) was built up, with help of the sketch map made by Honorato (2019) and Rodrigues (2021), to create a generalized geological map, allowing to do an in-situ verification with this material and individualize the most important features. To evaluate if the information generated by this product was correct and check for any inconsistency or features that were missing in the DOM, especially due to their small size. With this tool we collected valuable field data that were missing on the previous studies, like late dikes that were too small or too similar in texture to be differentiated from the country rock and were not visible in the orthophotomosaic. The confirmation of the geometry was based on field features such as fracture patterns, texture and heterogeneity of lithologies that helped to define “real” contacts with high degree of precision.

4. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we present the results and discussion about the data processing, collected by the survey that generated a high-resolution orthophotomosaic (Fig. 5 - original resolution 1.19 cm/pix) and the DOM for the proposed outcrop which allowed the GIS analysis and to define the morphology of the outcrop and consequently produce a more precise geological map (Fig. 6).

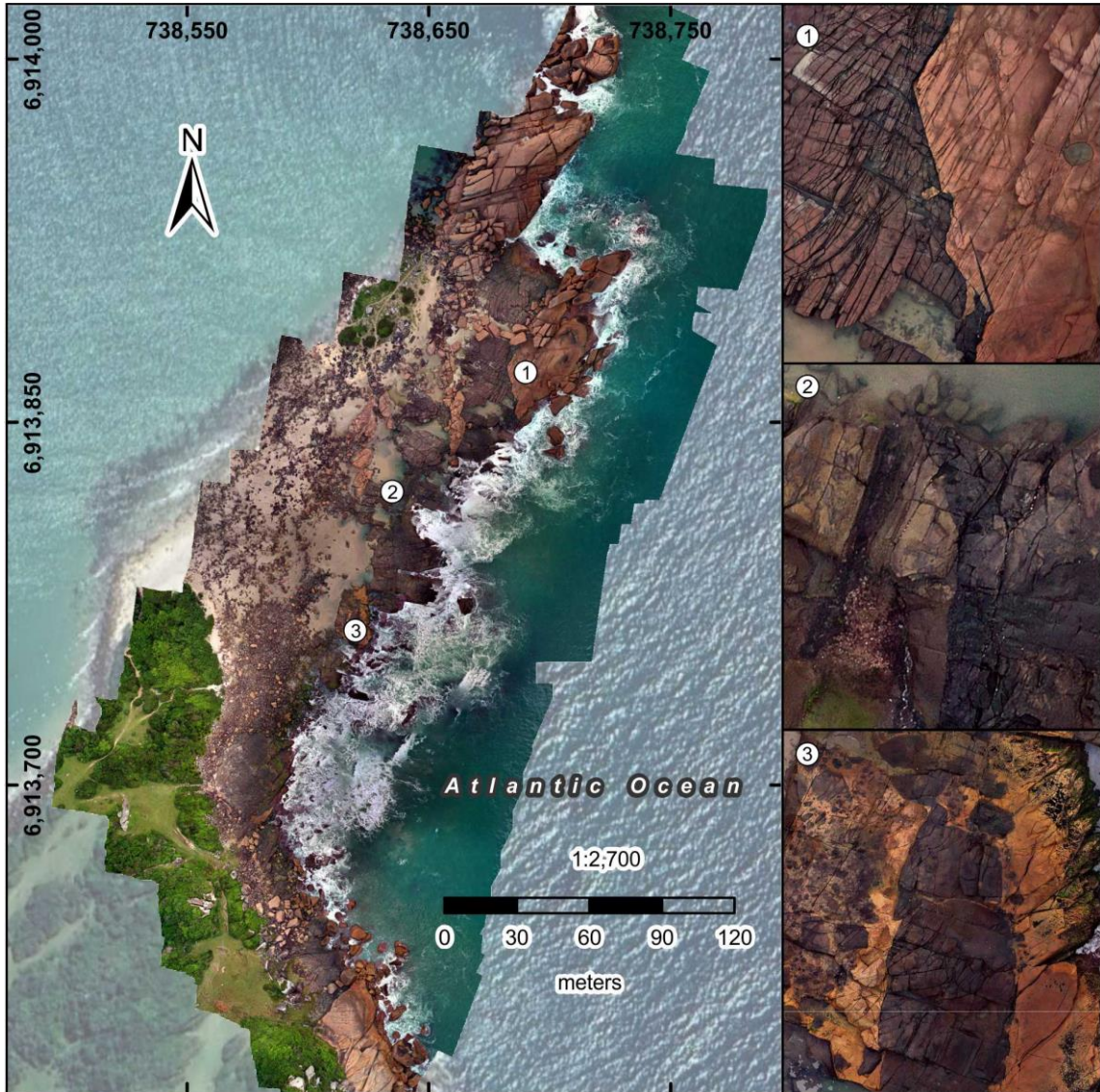


Figure 5. Orthophotomosaic produced by the Structure-from-Motion photogrammetry. Detail 1 – Clear contact between host rock and first basaltic pulse. Detail 2 – Contact between the first basaltic pulse (darker rock on the right side) and the second basaltic pulse (pale rock on the left side). Detail 3 – Conduit breccia next to the acidic rock.

The outcrop under study has an approximate major axis length of 400 meters, with a predominant N-NE orientation and a width of 100 meters. Through the generation of a geological map of the outcrop, we were able to accurately identify and map the contacts and geometries of the distinct rock units present, as well as uncover previously unrecorded geological features.

A comprehensive analysis of the orthophotomosaic and Digital Outcrop Model (DOM) reveals significant variations in the texture of the different lithologies present. A comparison of the first and second basaltic pulses reveals slight variations in texture (Fig. 5 – Detail 2), whereas a comparison of dikes and host rocks reveals highly contrasting textures (Fig. 5 – Detail 1). The fracture pattern observed in the host rock

is in concordance with the contacts between the host rock and the intrusions, particularly in the northern portion of the outcrop (Fig. 5 – Detail 1). This observation is not unexpected and serves to reinforce the hypothesis that the observed textures and fracture patterns are the result of the emplacement of the intrusions within the host rock. Furthermore, the presence of concordant fracture patterns serves as strong evidence for the tectonic activity that led to the formation of these intrusions. Some of the features such as the conduit breccia, due to the high resolution can be measured and counted (Fig. 5 – Detail 3). Overall, the observations made through the orthophotomosaic, and DOM provide valuable insights into the geologic history of the outcrop, and the processes that have shaped it.

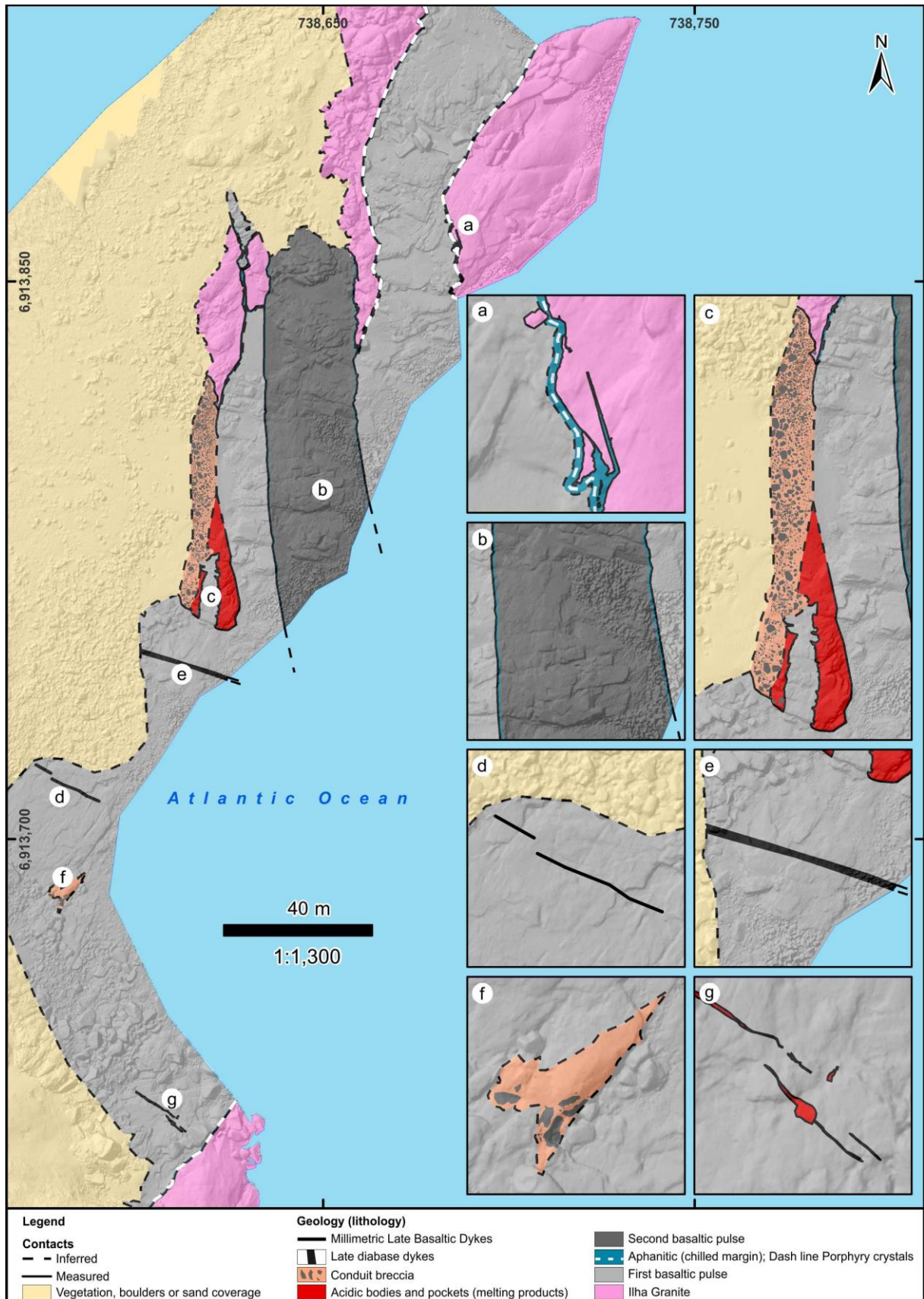


Figure 6. New geological map of the Ponta das Andorinhas outcrop with detailed features. a) E contact of the first basaltic magma pulse illustrating sharp and straight contacts with the granitic country rock, the margin is microporphyritic and some apophysis are aphyric; b) N-S second basaltic magma pulse

with sharp contacts with the host previous basaltic dike, this dike have aphyric margins; c) W contact of the first basic pulse with emplacement of lenticular bodies of acidic and magma mixing breccia along the N-S contact with the granitic host rocks; d) disrupted cm-sized late basic dike hosted in the first basaltic pulse; e) NW-SE aphyric late basaltic dike; f) triangular shaped mixing breccia; g) NW-SE oriented veins of molten material with a melt pocket in dilative sites.

Due to the clear textural differences between granitic rocks and dikes, the orthophotomosaic helped to assign most of the lithologies and features previously identified on the preliminary geological map. During the verification fieldwork a checking of geological, structural and stratigraphic features was carefully conducted. Field observations were used to complete the geological map and recuperate an accurate geometry of the outcrop (Fig. 6) where before some contacts were diffuse or inferred, we successfully assigned them with a high degree of confidence.

In general, the main advantage of the geological map made from the orthophotomosaic in comparison with the maps produced by previous studies is the accuracy of the geometries and crosscutting relations, especially when the textural features are homogenous, as for the contacts between basic dikes.

In the northern portion the dikes directions were approximately NW-SE, and the occurrence of multiple dikes was just inferred without any possible establishment of true crosscutting relations (Fig. 2). The new map (Fig. 6), shows that we have at least 3 distinct basic magma batches fulfilling the fracture, where the first magma pulse is represented by a NE-S dike with porphyritic margins (dashed lines on Fig 6a), crosscut by another N oriented basic pulse with aphyric margins (Fig 6b). Despite a pale textural difference was visible between the two basaltic pulses, in the field it was possible to confirm and confidently assign it to the map, by checking the chilled margin present, in both west and east edges with the second pulse, improving the previous field data.

Minor cm sized aphyric basic dikes NW oriented crosscut the first dike (Fig. 6d and 6e), as we do not observe them crosscutting the second major dike it is hard to establish the timing of the emplacement of those minor dikes in relation to that.

In the central part of the outcrop, where we observe a complex interplay between the remobilized molten material from the country rocks together with a magma mixing breccia (Fig 6c), we observe that those features were overestimated in their size/scale in the previous maps, especially for the acidic body, and the contacts

relations between them are now corrected. Both the lenticular acidic body and the mixing breccia are N-S oriented (Fig 6a), as well as the basic dike with aphyric margins that consist in the second basaltic pulse in the outcrop (Fig. 6a). All this magma pulses are hosted by the first basaltic pulse (the basaltic dike with porphyritic margins) mainly on its major fracture direction, suggesting that a N-S important extension phase occur and allow the emplacement of such distinct magmas probably at same time. The N-S acidic body is the result of molten material from the country rocks and the magma mixing breccia is the result of mixing and mingling of molten material with basic materials, since the fragments found in the mixing breccia are very variable, such as angular fragments and rounded microgranular mafic enclaves, of various sizes, set in a felsic matrix. The mafic rocks fragments vary on texture (equigranular, medium to fine, and some fragments with aphanitic texture) suggesting that the molten material found in the region come from deeper portions where it could collect fragments of basic rocks in a shallow level chamber to the top, consisting in a conduit breccia. The occurrence of those remobilized molten material bodies is also identified on the W contact region of the first dike with the granitic country rock, where probably not only the thermal gradient was important to trigger such melting process but also because it's an important discontinuity suitable for development of dilative sites and emplacement of magmas. On the other hand, the E contact of the first dike have no features that denounces melting of the country rocks, since the contacts are sharp, straight and there is no significant textural modification of the country rocks that attest any melting effect. So, we interpret the W contact as the main part where the molten material concentrate. Moreover, another important feature was mapped due to the orthophotomosaic is identified in the south portion of the Ponta das Andorinhas outcrop (Fig. 6f), where we observe a triangular shaped body of acidic composition with basic fragments, very similar to the mixing breccia found in the central part. That is another feature that was missing in the maps from the previous works, and it was spotted due to its remarkable texture differences from the country rock.

In the southern part, we managed to map the NW acidic injections, that are melting pockets as showed in the previous maps.

At last, the new map shows that the first basaltic pulse is N-NE oriented and have porphyritic margins, this basic dike have N-S and E-W fractures and in the northern portion those fractures are curved to NE direction, following the inflection of the intrusion to NE (Fig. 5). These fractures patterns were only identified in the

orthophotomosaic and are very distinct of the second basic dike that have aphyric margins and that have mainly E-W and N-S linear fractures (Fig. 5). Such features were prior essential in the distinction of the basic magma pulses limits and can be used to track complex multiple basic dikes. The occurrence of acid bodies and melt pockets and mixing breccias were only identified hosted in the first basaltic dike, as well as the very thin late dikes (Fig. 6). The major bodies are identified as N-S bodies mainly parallel to the W contact of the first dike and late dikes and minor acidic bodies and melt pockets are E-W oriented, both controlled by the main fractures directions identified in the first basic dike (Fig. 5 and 6). As we do not observe any crosscut relation of acidic bodies, late dikes or mixing breccia with the second basic dike, also oriented N-S, we interpret that the emplacement of molten material (with or without interaction with basic material) and the second basic dike were emplaced at same time and controlled by the previous fracture of the first basaltic dike that had focused dilative sites channeling distinct magmas that were set in a shallow magma chamber close to the emplacement site.

5. CONCLUSION

The RPAS photogrammetry has proven to be a reliable and low-cost tool to map complex outcrops and recovery its morphology, since its high-resolution allows to spot multiscale features from a view that we cannot access from the ground because they are unsafe or unreachable.

With the detailed Orthophotomosaic and the Digital Outcrop Model produced, it was possible to reveal the “real” morphology of the outcrop, and its main features in a quality that outstands the accuracy of the sketching materials produced by previous studies. The analysis of the material produced by the survey, allied with the literature allowed to define the geology, structural and stratigraphic sequence of the igneous intrusions, clarifying the geometries of the rock bodies and helping to understand and better constrain the magmatic pulses emplacement in the outcrop.

The most significant finding is the clear identification of the primary and secondary dikes and its morphologies, that were not clearly well defined on previous studies, and how they are related to the host rock. In the new geological map, every single feature mapped on the outcrop is represented according to the actual scale and proportion.

As it worked on this study, we strongly recommend that any geological outcrop survey should be followed by a fieldwork verification to check the outcropping rocks where some inconsistencies can be spotted, and the lithological contacts can be validated. This is important because, as we could see, some features may be neglected due to their small size, textural characteristics, or any other limitation of the photogrammetric acquisition, a problem that is intrinsic to the multi scale factors of outcrop mapping.

This study shows the importance of high-quality material to unravel the complex construction of dikes from the Florianópolis Dike Swarm that are more commonly multiple dikes constructed by many magma pulses than common dikes constructed by single pulses, as highlighted by Florisbal et al (2018). Such high-quality complex outcrop maps, accurately georeferenced, associated with geochemical and geochronological investigation are important to investigate the role played by dikes as the plumbing system of LIPs and to constrain the stratigraphy of magmatic events in the conduits. Also, the exact identification of remobilized molten material, its interaction with basic material and with the dikes is a key feature for the investigation of contamination processes in the dikes and its effects in the lava pile construction.

ACKNOWLEDGMENTS

This research received financial support from the Brazilian National Research Council (CNPq, Universal Program 404212/2016-6), Santa Catarina State Research Foundation (FAPESC, 2021TR000668) and the São Paulo State Research Foundation (FAPESP, 19/22084-8) granted to L. M. Florisbal. The paper is part of Douglas Ricardo Briske MSc thesis who received financial support by scholarship from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). We are grateful to Antonio Marcon Borges, Felipe Manfredini Peruchi, Erico Albuquerque dos Santos, and Amós Martini for their valuable contributions to the fieldwork.

REFERENCES

- Bellian, J.A., Kerans, C., Jennette, D.C., 2005. Digital outcrop models: Applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research* 75, 166–176.
<https://doi.org/10.2110/jsr.2005.013>
- Bernardes, E.G., 2017. Estudo das auréolas termais e processos de fusão gerados na interface diques básicos Cretáceos do Enxame de Diques de Florianópolis e encaixantes graníticas Neoproterozoicas do Batólito Florianópolis. Praia da Pinheira, SC. 2017 (Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Buckley, S.J., Howell, J.A., Enge, H.D., Kurz, T.H., 2008. Terrestrial laser scanning in geology: Data acquisition, processing and accuracy considerations. *J Geol Soc London* 165, 625–638.
<https://doi.org/10.1144/0016-76492007-100>
- Chesley, J.T., Leier, A.L., White, S., Torres, R., 2017. Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sediment Geol* 354, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.03.013>
- Coutinho, J.M.V., 2008. Dike swarms of the paraná triple junction, Southern Brazil. *Geologia USP - Serie Científica* 8, 29–52.
<https://doi.org/10.5327/z1519-874x2008000200003>
- Dering, G.M., Micklethwaite, S., Thiele, S.T., Vollgger, S.A., Cruden, A.R., 2019. Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dikes: Best practises and future potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, 148–166.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.018>
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Imagebased surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics* 4, 359–389.
<https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>
- Florisbal, L.M., Heaman, L.M., de Assis Janasi, V., de Fatima Bitencourt, M., 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dike Swarm, Paraná-Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on precise U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 289, 140–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.11.007>
- Florisbal, L.M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Marteleto, N.S., 2018. Geological, geochemical and isotope diversity of ~ 134 Ma dikes from the Florianópolis Dike Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 355, 181–203.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.08.002>
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E., 2013. Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf Process Landf* 38, 421–430.
<https://doi.org/10.1002/esp.3366>
- Herz, N., 1977. Timing of spreading in the South Atlantic: Information from Brazilian alkalic rocks. *Bulletin of the Geological Society of America* 88, 101–112.
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<101:TOSITS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<101:TOSITS>2.0.CO;2)

- Hodgetts, D., 2013. Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: A review. *Mar Pet Geol* 46, 335–354.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.02.014>
- Honorato, A.R., 2019. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Rochas Ácidas da Ponta da Andorinha, Praia da Pinheira - SC : Processos de Fusão de Crosta Rasa.
- Hubbard, S.M., Fildani, A., Romans, B.W., Covault, J.A., McHargue, T.R., 2010. Highrelief slope clinof orm development: Insights from outcrop, magallanes Basin, Chile. *Journal of Sedimentary Research* 80, 357–375.
<https://doi.org/10.2110/jsr.2010.042>
- Rarity, F., van Lanen, X.M.T., Hodgetts, D., Gawthorpe, R.L., Wilson, P., Fabuel-Perez, I., Redfern, J., 2013. LiDAR-based digital outcrops for sedimentological analysis: Workflows and techniques. *Geol Soc Spec Publ* 387, 153–183.
<https://doi.org/10.1144/SP387.5>
- Rittersbacher, A., Buckley, S.J., Howell, J.A., Hampson, G.J., Vallet, J., 2013. Helicopter-based laser scanning: a method for quantitative analysis of large-scale sedimentary architecture. *Geological Society, London, Special Publications* 387, 185–202.
<https://doi.org/10.1144/sp387.3>
- Rodrigues, G.C., 2021. Estudo das múltiplas intrusões do dique básico Cretáceo da Pontas da Andorinhas, Praia da Pinheira, Palhoça, SC (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Rossetti, L., Lima, E.F., Waichel, B.L., Hole, M.J., Simões, M.S., Scherer, C.M.S., 2018. Lithostratigraphy and volcanology of the Serra Geral Group, Paraná-Etendeka Igneous Province in Southern Brazil: Towards a formal stratigraphical framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 355, 98–114.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2017.05.008>
- Smith, M.W., Carrivick, J.L., Quincey, D.J., 2016. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Prog Phys Geogr* 40, 247–275.
<https://doi.org/10.1177/0309133315615805>
- Snavey, N., Seitz, S.M., Szeliski, R., 2008. Modeling the world from Internet photo collections. *Int J Comput Vis* 80, 189–210.
<https://doi.org/10.1007/s11263-007-0107-3>
- Sopchaki, C.H., Paz, O.L. de S. da, Graça, N.L.S. de S., Sampaio, T.V.M., 2018. Verificação Da Qualidade De Ortomosaicos Produzidos a Partir De Imagens Obtidas Com Aeronave Remotamente Pilotada Sem O Uso De Pontos De Apoio. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*.
<https://doi.org/10.5380/raega.v43i0.56564>
- Viana, C.D., Grohmann, C.H., Busarello, M. dos 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.
<https://doi.org/10.1590/2317-4889201800201898>
- Weissmann, G.S., Hartley, A.J., Nichols, G.J., Scuderi, L.A., Olson, M., Buehler, H., Banteah, R., 2010. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems. *Geology* 38, 39–42.
<https://doi.org/10.1130/G30242.1>
- 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* 179, 300–314.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

ANEXO A – CONFIRMAÇÃO DE SUBMISSÃO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES



Douglas Briske <briske.dr@gmail.com>

SAMES-D-23-00083 - Confirming your submission to Journal of South American Earth Sciences

Journal of South American Earth Sciences <em@editorialmanager.com>

13 de fevereiro de 2023 às 11:00

Responder a: Journal of South American Earth Sciences <support@elsevier.com>

Para: Douglas Ricardo Briske <briske.dr@gmail.com>



This is an automated message.

Using RPAS photogrammetry to improve geological mapping of complex outcrops.

Dear Mr. Briske,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of South American Earth Sciences. It has been assigned the following manuscript number: SAMES-D-23-00083.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/sames/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of South American Earth Sciences

More information and support

You will find information relevant for you as an author on Elsevier's Author Hub: <https://www.elsevier.com/authors>

FAQ: How can I reset a forgotten password?

https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/

For further assistance, please visit our customer service site: <https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>

Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about Editorial Manager via interactive tutorials. You can also talk 24/7 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email

This journal uses the Elsevier Article Transfer Service. This means that if an editor feels your manuscript is more suitable for an alternative journal, then you might be asked to consider transferring the manuscript to such a journal. The recommendation might be provided by a Journal Editor, a dedicated Scientific Managing Editor, a tool assisted recommendation, or a combination. For more details see the journal guide for authors.

#AU_SAMES#

To ensure this email reaches the intended recipient, please do not delete the above code

