

Instituto de Geociências  
Universidade de São Paulo

Trabalho de Formatura - 20/12

**CARACTERIZAÇÃO DE GEOSSÍTIOS COMO REGISTROS DA HISTÓRIA GEOLÓGICA:  
UM ESTUDO EM SÃO SEBASTIÃO-SP COM O USO DE TECNOLOGIAS  
GEOESPACIAIS**

Aluna: Karina de Souza Ibanez  
Orientadora: Maria da Glória Motta Garcia  
Coorientador: Carlos Eduardo Manjon Mazoca

São Paulo  
Novembro 2020

Dedico este trabalho a todas as  
mulheres cientistas que vieram antes mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que fizeram desta jornada a minha jornada. Agradeço à minha grande e querida família, Pai, Mãe, Camila, Susana, Paulo, Anderson e Willian, sem vocês, nada disso seria possível. Agradeço ao Daniel, por ter cruzado meu caminho e feito dele muito mais leve, sua presença foi imprescindível nesses anos todos. Agradeço à Luna, pela companhia nos momentos decisivos, obrigada, Lunita.

Pelos conhecimentos adquiridos ao longo desses cinco anos, agradeço aos grandes professores do Instituto de Geociências, por me mostrarem que descobrir sobre o nosso planeta é o que eu realmente gostaria de aprender e que será um aprendizado constante. Agradeço especialmente aos professores Mário Campos, Renato de Moraes, Gergely, Valdecir, Fábio, Fred, Sônia, Lucelene, Adriana, André, Giannini, Boggiani e Maria Helena. Obrigada pela inspiração e pela paixão em ensinar! Agradeço a todos os funcionários do IGc, especialmente Samuca, Bira e Adriano.

Agradeço à minha querida turma 59, não teria turma melhor para chamar de minha! Agradeço aos amigos de vida que fiz ao longo deste caminho. Quero agradecer a Ocotô por ser minha parceira para todos os momentos e me ensinar tanto! Agradeço aos meus parceiros de Mapeamento Geológico, Lilo e César, vocês são pessoas muito especiais e que fizeram desse período o mais legal possível, haha. Obrigada a meus queridos do grupo “The N”, Pamonha, Miçanga, Rico, Calipso, Nita, Aqua, Chicó, Nay, Laiza, Lilo e Cezar. Os campos e a graduação não seriam os mesmos sem vocês. Obrigada aos parceiros do GGeo e Rolês da Vida e a Fora, Kiwi, Waze, Bibifa, Brisao, Nit, Sisu, Willy. Todos vocês foram muito especiais nessa jornada geológica!

Quero agradecer à minha orientadora Maria da Glória, pela confiança no meu trabalho e pelo contínuo aprendizado ao longo desses anos. Agradeço ao Carlos Mazoca, meu coorientador, pelo grande apoio e conhecimento.

Por fim, agradeço à Karina de 2015, que conseguiu superar grandes desafios para chegar até aqui. É só o começo!

"True appreciation of landscape comes only when one is alive  
to both its beauty and its meaning."

Fritiof Fryxell

## RESUMO

A costa sudeste do Brasil registra em suas feições geológicas uma história evolutiva complexa relacionada com a formação e a ruptura do supercontinente Gondwana Ocidental. A presente pesquisa visa caracterizar o geossítio “Boudins do Ilhote de Camburizinho”, localizado em São Sebastião, de modo a obter subsídios para a valorização do patrimônio geológico da região. O geossítio sintetiza, por meio de seus registros estruturais e petrológicos: (i) os processos colisionais que ocorreram durante a evolução da Faixa Ribeira central no Neoproterozoico, com rochas ortognáissicas com foliação N60°E/75°NW e boudins de biotita anfibolito e granada-biotita xisto altamente deformados; ii) os processos extensionais atuantes durante o rifteamento Mesozóico, representado por um dique basáltico de direção N40°E e um sistema de fraturas direções N53°E e N66°W. A caracterização geológico-estrutural do geossítio foi feita por meio da combinação de técnicas de trabalho de campo clássico com produtos geoespaciais gerados a partir de imagens de alta resolução de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O ortomosaico e o modelo 3D fornecem, respectivamente, registros de vistas ortogonais e tridimensionais, auxiliando na descrição e no entendimento de suas feições. Além disso, tais registros também podem promover a salvaguarda da geodiversidade e a valorização do patrimônio geológico e servir de base para a divulgação geocientífica. Imagens panorâmicas e modelo 3D foram utilizados na geração de um passeio virtual com informações sobre a evolução geológica e a relevância científica do geossítio, podendo ser acessado pelo público em geral visando a disseminação da geodiversidade. Produtos geoespaciais com o uso de VANT como os que foram gerados nesta pesquisa têm sido aplicados em diversas áreas das geociências, razão pela qual foi feita uma análise bibliográfica comparativa a partir da compilação de trabalhos publicados em bases nacionais e internacionais. Esta análise pode ser útil para futuras pesquisas geocientíficas que visam à utilização dessas tecnologias. As principais aplicações e áreas das geociências que as utilizam são áreas tradicionais de obtenção de dados da superfície como geomorfologia, geologia estrutural e geologia de engenharia, entretanto áreas mais diversas estão começando a utilizar estas tecnologias, evidenciando ser uma ferramenta promissora nas pesquisas geológicas. A área de patrimônio geológico é uma das menos frequentes nos resultados. A metodologia utilizada na caracterização do geossítio estudado demonstra a sua alta aplicabilidade e espera-se que este trabalho promova novas pesquisas neste âmbito, sobretudo no que se refere à valorização do patrimônio geológico brasileiro.

## ABSTRACT

The southeastern coast of Brazil records in its geological features a complex evolutionary history related to the formation and rupture of the supercontinent Western Gondwana. This research aims to geologically characterize the geosite "Boudins do Ilhote de Camburizinho", located in São Sebastião, in order to obtain subsidies for the enhancement of the geological heritage of the region. The geosite synthesizes, through its structural and petrological records: (i) the collision processes that occurred during the evolution of the central Ribeira Belt in the Neoproterozoic, with orthogneisses rocks with foliation N60°E/75°NW and highly deformed boudins of biotite amphibolite and garnet-biotite schist; ii) the extension processes active during the Mesozoic rift, represented by a basaltic dike of direction N40°E and a fracture system of directions N53°E and N66°W. The geological-structural characterization of the geosite was made by combining classic fieldwork techniques with geospatial products generated from high resolution images of Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The orthophotomosaic and the 3D model provide, respectively, records of orthogonal and three-dimensional views, assisting in the description and understanding of their features. In addition, such records can also promote the safeguarding of geodiversity and the enhancement of geological heritage and serve as a basis for geoscientific dissemination. Panoramic images and 3D models were used to generate a virtual tour with information about the geological evolution and the scientific relevance of the geosite, which can be accessed by the general public aiming at the dissemination of geodiversity. Geospatial products with the use of UAVs, such as those generated in this research, have been applied in several areas of geosciences, which is why a comparative bibliographic analysis was made from the compilation of works published on national and international bases. This analysis may be useful for future geoscientific research aimed at using these technologies. The main applications and areas of the geosciences that use them are traditional areas for obtaining surface data such as geomorphology, structural geology and engineering geology, however more diverse areas are beginning to use these technologies, showing to be a promising tool in geological research. The geological heritage area is one of the least frequent in the results. The methodology used in the characterization of the geosite studied demonstrates its high applicability and it is expected that this work will promote further research in this area, especially with regard to the valorization of the Brazilian geological heritage.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUÇÃO                                                                                                                                                 | 7  |
| OBJETIVOS                                                                                                                                                  | 8  |
| PATRIMÔNIO GEOLÓGICO - EMBASAMENTO TEÓRICO                                                                                                                 | 9  |
| MATERIAIS E MÉTODOS                                                                                                                                        | 13 |
| 4.1 Geossítio Boudins do Ilhote de Camburizinho                                                                                                            | 13 |
| 4.2 Análise comparativa do uso dos produtos geoespaciais nas geociências                                                                                   | 14 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO                                                                                                                                     | 15 |
| 5.1 “Tectonic geoheritage as records of Western Gondwana history: a study based on a geosite's potential in the central Ribeira Belt, Southeastern Brazil” | 16 |
| 5.2. “Análise comparativa do uso de VANTs e produtos geoespaciais aplicado às geociências”                                                                 | 42 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS                                                                                                                                       | 67 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS                                                                                                                                 | 68 |
| MATERIAL SUPLEMENTAR                                                                                                                                       | 69 |
| 8.1 Listagem dos trabalhos da base de dados internacional                                                                                                  | 69 |
| 8.2 Listagem dos trabalhos da base de dados nacional                                                                                                       | 78 |

## 1. INTRODUÇÃO

Geossítios são locais onde a geodiversidade apresenta alta relevância, ao registrar, por meio de suas feições, importantes processos geológicos que ajudam a melhor compreender a história geológica do nosso planeta. De acordo com Brilha (2016), os geossítios têm, como principal característica, o valor científico, embora outros tipos de valores, como o turístico e o educativo, possam estar presentes. A caracterização geológica dos geossítios é o primeiro passo para determinar a sua relevância científica no contexto de sua evolução. Nesse sentido, a identificação de geossítios e sua associação com os processos geológicos que os formaram são fundamentais na valorização do patrimônio geológico de uma região. A costa sudeste do Brasil registra em suas feições geológicas uma complexa evolução relacionada à formação e à ruptura do supercontinente Gondwana Ocidental. O litoral norte do estado de São Paulo apresenta relevantes afloramentos que caracterizam estas feições e está inserido na porção central da Faixa Ribeira, sendo uma região muito estudada para melhor compreender os processos dúcteis que atuaram durante o Ciclo Brasileiro no Neoproterozoico-Cambriano e os processos de ruptura que atuaram principalmente durante o Jurássico-Cretáceo e que resultaram na fragmentação continental e na abertura do Oceano Atlântico Sul.

A região tem sido foco de inventários do patrimônio geológico desde 2012, que têm como o principal objetivo identificar geossítios com os melhores registros da história geológica, a fim de compreender, divulgar e preservar para a ciência e para as gerações futuras. Nesse contexto, o geossítio "Boudins do Ilhote de Camburizinho", que faz parte do inventário do patrimônio geológico do estado de São Paulo (Garcia et al., 2018) e do litoral norte (Reverte & Garcia, 2016; Garcia et al., 2019), foi estudado em projeto de iniciação científica pela aluna (Proc. FAPESP 2018/21738-1) e será foco neste trabalho. O geossítio sintetiza grande parte dos processos geológicos que ocorreram durante a evolução do Gondwana Ocidental na Faixa Ribeira central por meio de seus registros estruturais e petrológicos.

Uma das principais técnicas utilizadas na caracterização do geossítio foram as tecnologias geoespaciais a partir de imagens de alta resolução obtidas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O uso combinado destas técnicas com trabalhos de campo clássicos constituiu importante ferramenta na caracterização geológico-estrutural de afloramentos e de mapeamento geológico. Os produtos geoespaciais gerados a partir da técnica de Structure-from-Motion fornecem registros de vistas ortogonais e tridimensionais, auxiliando na descrição e no entendimento de suas feições. Além disso, esses registros também

podem promover a salvaguarda da geodiversidade e a valorização do patrimônio geológico e servir de base para a divulgação geocientífica, tão importante na interação pesquisa-sociedade. Exemplos da utilização destas tecnologias podem ser vistos em <http://www.virtualoutcrop.com/> e <https://v3geo.com/>.

Com base nestas premissas, a presente pesquisa visa apresentar a caracterização do geossítio Boudins do Ilhote de Camburizinho e a metodologia utilizada, bem como os produtos gerados e suas aplicações. Além disso, no âmbito de compreender como tais tecnologias estão sendo utilizadas no meio geocientífico, traçou-se um panorama acerca dos usos do Structure-from-Motion e fotogrametria digital a partir de imagens de VANT em diversas áreas das geociências. Esses dois temas centrais serão apresentados em formato de dois artigos científicos nos resultados deste trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

Este projeto está centrado em dois objetivos principais, os quais serão apresentados em formatos de artigos científicos:

1) Caracterização geológica do geossítio “Boudins do Ilhote de Camburizinho”, localizado em São Sebastião, litoral norte do estado de São Paulo (Fig. 1), por meio dos seguintes passos: i) retrabalhamento de dados obtidos em projeto de iniciação científica pela aluna em 2019; ii) elaboração de produtos geoespaciais a partir do processamento de imagens de VANT de alta resolução; iii) correlação dos dados geológicos obtidos com a história evolutiva no contexto da sua relevância como parte do patrimônio geológico da região; iv) utilização dos produtos gerados como ferramentas no âmbito da pesquisa e na disseminação geocientífica.

2) Análise comparativa da aplicação da fotogrametria digital e Structure from Motion (SfM) com o uso de VANTs em estudos de diversas áreas das geociências. A pesquisa tem como objetivo construir um panorama geral sobre o uso destas tecnologias geoespaciais nas geociências.

Observação: Face às novas condições enfrentadas com a pandemia da COVID-19, estes objetivos foram definidos posteriormente. O objetivo inicial do projeto incluía o estudo de novos locais com feições semelhantes às do geossítio analisado, especialmente de boudinagem, de modo a caracterizar e gerar produtos geoespaciais para obter dados referentes a estas feições.

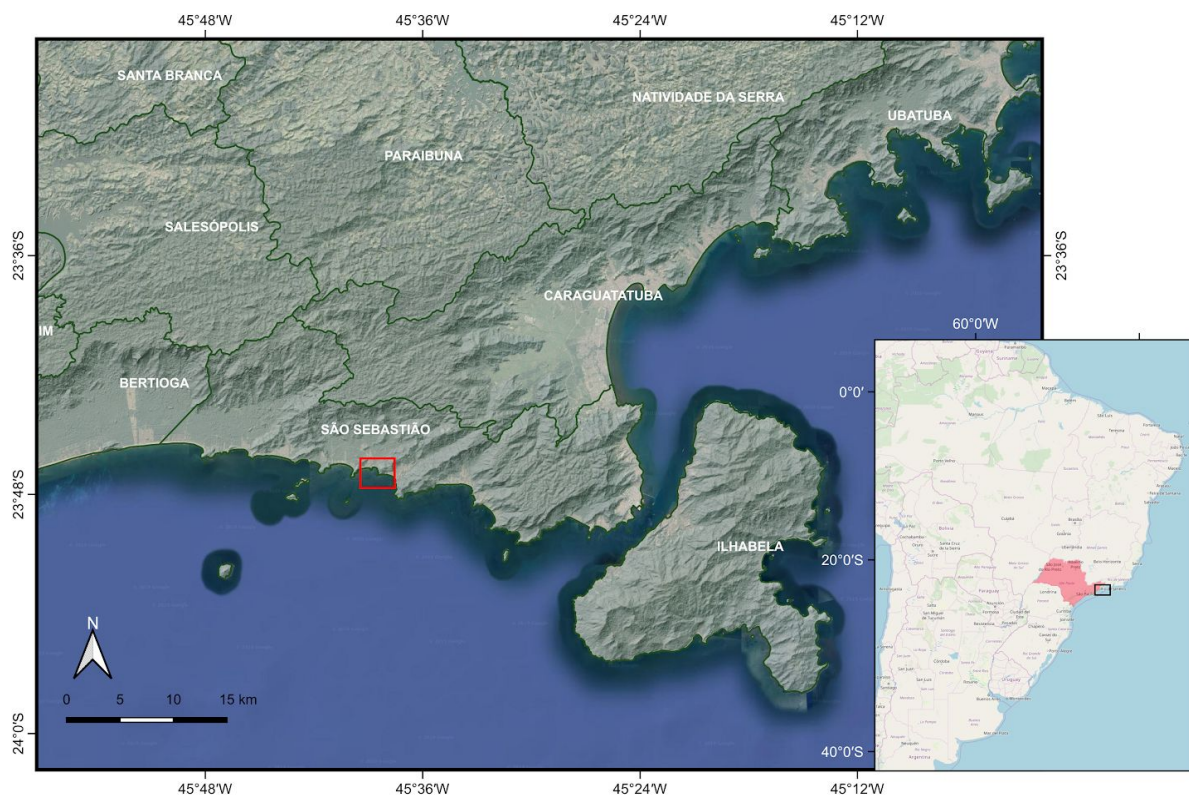


Figura 1: Mapa da região de São Sebastião, indicando o local do geossítio de referência “Boudins do Ilhote de Camburizinho”, localizado na praia de Camburizinho, litoral norte do estado de São Paulo.

### 3. PATRIMÔNIO GEOLÓGICO - EMBASAMENTO TEÓRICO

As pesquisas geocientíficas envolvendo patrimônio geológico vêm crescendo nas últimas décadas no Brasil e no mundo, dada sua importância e necessidade de desenvolvimento. O embasamento teórico acerca deste tema envolve também o entendimento dos termos geodiversidade e geoconservação.

A geodiversidade é um termo que começou a ficar conhecido na década de 90, sobretudo na Conferência de Malvern sobre Conservação Geológica e Paisagística, ocorrida em 1993, no Reino Unido (Gray, 2004). Isto ocorreu logo após a Convenção sobre Diversidade Biológica, acordada na Cúpula da Terra do Rio de Janeiro, em 1992, na qual a publicidade dada ao conceito de biodiversidade atraiu a atenção dos geocientistas atenção pelo fato de que eles também estudam fenômenos muito diversos em nosso planeta (Reynard e Brilha, 2018). A partir daí, a palavra "geodiversidade" foi cunhada independentemente por uma série de geocientistas (Sharples, 1993; Wiedenbein, 1993), visto que sua introdução se tornou quase inevitável. Subseqüentemente, o termo passou a ser usado em todo o mundo e agora é reconhecido internacionalmente.

Segundo Gray (2013), a geodiversidade pode ser definida como a “variedade natural (diversidade) de elementos geológicos (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicos (relevo,

topografia, processos físicos), hidrológicos e solos, incluindo as associações, estruturas, sistemas e contribuições à paisagem”. É um termo de valor neutro descrevendo a variedade de fenômenos abióticos na Terra, o equivalente abiótico da biodiversidade. Por outro lado, o “patrimônio geológico” é um termo carregado de valor usado para identificar elementos específicos da geodiversidade que são selecionados para conservação (Reynard e Brilha, 2018). A diversidade natural é composta por elementos bióticos - a biodiversidade - e elementos abióticos - a geodiversidade. O patrimônio geológico se refere a locais de elevado valor científico da geodiversidade: são os chamados "geossítios", se in situ, ou “elementos do patrimônio geológico” se ex situ (Fig. 2) (Brilha, 2016). Segundo o autor, além do valor científico, o patrimônio geológico também pode conter outros tipos de valores, como o educativo, estético, turístico ou cultural, o que também justifica o seu uso pela sociedade. Os locais nos quais estão presentes outros valores da geodiversidade que não o científico são denominados “sítios da geodiversidade”, se in situ, e “elementos da geodiversidade”, se ex situ (Brilha, 2016). Esta categorização é importante para distinguir o foco das pesquisas desenvolvidas.

O inventário do patrimônio geológico e de sítios da geodiversidade é o primeiro e crucial passo em qualquer estratégia de geoconservação, independentemente do tamanho da área em análise (Brilha, 2016). No entanto, a seleção e categorização da geodiversidade que deve ser valorizada e protegida não é uma tarefa simples, dada a imensa diversidade geológica que ocorre no planeta. O conhecimento e os dados científicos são as informações menos subjetivas e por isso devem ser principalmente utilizadas para selecionar os locais mais relevantes e representativos da história e evolução da Terra. A identificação dos melhores geossítios deve ser feita pela comunidade geocientífica (Brilha, 2016). Neste contexto o inventário e a caracterização do patrimônio geológico mostra-se um importante instrumento de valorização, divulgação e na implementação de estratégias em geoconservação para uso adequado destes locais (Uceda 2000, Wimbledon 2011).

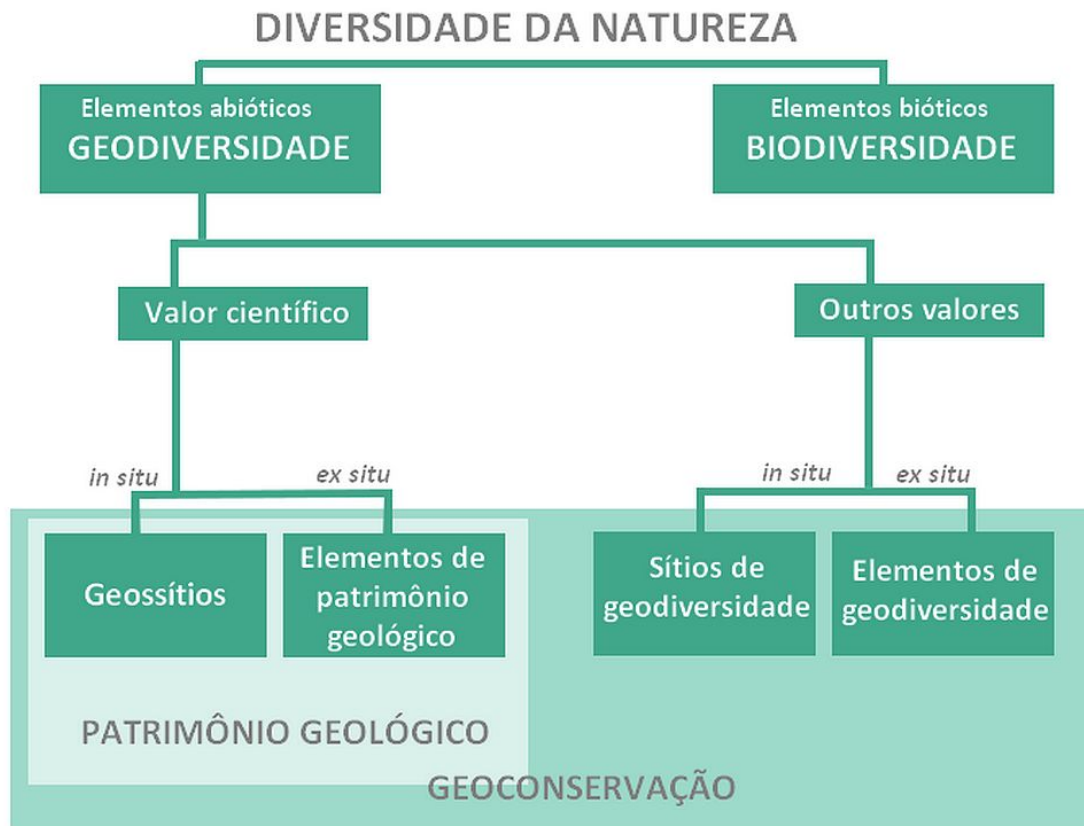


Figura 2: Relações entre geodiversidade, patrimônio geológico e geoconservação, adaptado de Brilha (2016).

Segundo Brilha (2016) o patrimônio geológico deve ser reconhecido por seu valor científico e, a partir disso, quatro critérios devem ser utilizados para a seleção dos geossítios: (i) Representatividade: referente à adequação do geossítio para ilustrar um processo geológico ou característica que traz uma contribuição significativa para a compreensão do tópico geológico, processo, característica ou estrutura geológica; (ii) Integridade: relacionada ao atual estado de conservação do geossítio, levando em consideração os processos naturais e as ações antrópicas; (iii) Raridade: número de geossítios na área de estudo apresentando características geológicas semelhantes; (iv) Conhecimento científico: baseado na existência de dados científicos já publicados sobre o geossítio. para selecionar locais de geodiversidade com valor educacional e turístico, o autor propõe que outros critérios devem ser usados: (i) potencial didático, diversidade geológica, acessibilidade e segurança (para locais com valor educacional) e (ii) cenário, potencial interpretativo, acessibilidade e segurança (para locais com valor turístico).

A identificação, caracterização e gestão dos elementos da geodiversidade que possuem algum tipo de valor podem ser reunidas sob a denominação "estratégias de geoconservação" (Henriques et al., 2011). A geoconservação é, portanto, a prática de conservar, melhorar e promover a consciência das características e processos subjacentes da geodiversidade que têm valor científico, educacional, cultural, estético ou ecológico

significativo (Fig. 2) (Crofts e Gordon, 2015; Prosser, 2013). O escopo principal da geoconservação é a gestão por meio de procedimentos específicos de inventário, avaliação, conservação, valoração e monitoramento (Brilha, 2015; Henriques et al., 2011), visando a implementação em políticas de conservação da natureza e planejamento do uso da terra. É importante ter um método sólido para o inventário de geossítios e sítios de geodiversidade, visto que a seleção de quais elementos da geodiversidade são excepcionais em uma determinada área, sobretudo áreas grandes (países) com alta geodiversidade, pode ser desafiadora (Brilha, 2016). Atualmente é cada vez mais reconhecido que a seleção dos locais mais valiosos para proteção e gestão é de suma importância tanto para a ciência como para outros usos sociais.

A geoconservação é parte integrante da conservação da natureza e a evolução da sua filosofia e prática seguiu amplamente tendências semelhantes (Gray, 2013). No entanto, a geoconservação geralmente não tem sido bem integrada nas iniciativas e políticas de conservação da natureza, nem tem sido tão eficaz quanto a biodiversidade em influenciar as políticas e práticas de gestão ambiental e sustentação dos recursos da Terra (Brilha, 2002; Crofts, 2014). Este fator é prejudicial tanto para a geoconservação como também para os esforços de integração de soluções baseadas na conservação ampla da natureza em políticas e práticas ambientais (Reynard e Brilha, 2018).

As questões que envolvem o patrimônio geológico não estão no foco da agenda política das Nações Unidas, como estão a conservação da biodiversidade e as questões de mudanças climáticas. No entanto, segundo os autores, um grande progresso foi feito na última metade do século em nível nacional e local, especialmente em inventários de patrimônio geológico, gestão, educação e divulgação. Também houve avanços em nível internacional, e as questões da geodiversidade encontram-se na agenda de importantes instituições: com o crescimento dos Geoparques Globais da UNESCO, a proteção dos interesses do patrimônio geológico sob a Convenção do Patrimônio Mundial e o aumento do reconhecimento pela integração do patrimônio geológico e geoconservação por meio de iniciativas da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN).

Ainda assim, no âmbito do desenvolvimento de políticas e estratégias internacionais, há pouco progresso substantivo no reconhecimento e integração da geoconservação em comparação com o rápido progresso feito pela conservação da biodiversidade. Porém, a situação evoluiu consideravelmente e mesmo que ainda haja muito a ser feito no escopo do patrimônio geológico em todo o mundo, há indicadores de que as ações realizadas até agora começam a dar resultados (Reynard e Brilha, 2018).

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Geossítio Boudins do Ilhote de Camburizinho**

Para a geração do artigo científico sobre o geossítio foram utilizados os dados obtidos em projeto de iniciação científica realizado em 2019 (Proc. FAPESP 2018/21738-1). Esses dados foram retrabalhados para produzir resultados mais refinados e uma discussão mais aprofundada. A metodologia para o estudo do geossítio consiste:

1) A caracterização geológica do geossítio foi realizada com a utilização de técnicas tradicionais de mapeamento geológico e produtos geoespaciais obtidos com o processamento de imagens adquiridas por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). O modelo do VANT é o DJI Phantom Pro 4 equipado com câmera de 20 megapixels e GPS para georreferenciamento das imagens. Os produtos geoespaciais foram obtidos a partir da técnica de fotogrametria digital Structure from Motion (SfM) no software Agisoft Photoscan.

A criação de modelos 3D a partir do SfM é baseada no uso de imagens de um objeto estático filmado de diferentes posições. Essas imagens devem ter uma porcentagem mínima de área de sobreposição entre cada foto sucessiva. O fluxo de trabalho básico consiste na identificação de pontos de características comuns entre as imagens, que são usados na criação de uma nuvem de pontos esparsos o suficiente para localizar o ângulo da câmera e a posição em cada foto; subsequentemente, uma nuvem de pontos densa é construída, com um número muito maior de pontos do conjunto de imagens e, finalmente, um objeto tridimensional é criado a partir desses pontos (Westoby et al. 2012). Detalhes do funcionamento desta técnica é descrito no item 5.2.

Os levantamentos de VANT cobriram todo o geossítio, incluindo o banco de areia que forma o símbolo. Um mínimo de 70%-65% de sobreposição entre as imagens foi garantido para seguir o fluxo de trabalho de construção do modelo tridimensional. As imagens foram usadas na criação de um modelo 3D e ortomosaico para visualização detalhada e interpretação do geossítio. Ortomosaicos são produtos obtidos pelo processo de ortorretificação, que é a correção angular dos pixels para a posição vertical, transformando a projeção cônica em uma projeção ortogonal e eliminando assim os efeitos do relevo e da perspectiva na geometria dos feições. Este produto foi utilizado para mapeamento digital e obtenção das medidas das direções das famílias de fraturas no software QGIS.

2) Descrição de campo: Medidas da foliação metamórfica com bússola CLAR, descrição petrográfica e estrutural, coleta de amostras dos litotipos para geração de lâminas delgadas e posterior descrição, no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

3) Revisão bibliográfica do contexto geológico, tanto regional (Faixa Ribeira sul e diques da Formação Serra Geral), como local da região de estudo (município de São Sebastião).

4) Produtos de disseminação geocientífica: Geração de um passeio virtual disponível online, utilizando além do modelo 3D do local, cinco imagens panorâmicas, geradas a partir de imagens de VANT, do geossítio e da paisagem associada da Serra do Mar. O passeio foi gerado no software PanoTour, e foi adicionado botões no passeio para visualização de figuras adicionais com informações geológicas a fim de disseminar a relevância científica do local e de seu contexto geológico, com uma linguagem mais simples e acessível visando o público em geral.

O artigo foi submetido para a revista *Geoheritage* da editora Springer e retornou com a indicação de revisões mínimas. A versão já corrigida é apresentada neste trabalho.

#### **4.2 Análise comparativa do uso dos produtos geoespaciais nas geociências**

Esta análise foi feita a partir de dados bibliográficos existentes e disponíveis online, selecionados a partir de critérios preestabelecidos. A maioria dos trabalhos foram acessados apenas a partir do VPN da Universidade de São Paulo, o qual foi disponibilizado aos alunos excepcionalmente neste ano de pandemia.

O método utilizado para esta análise consiste da seleção de trabalhos de duas bases de dados: (I) internacional e (II) nacional - ambas com foco de trabalhos publicados entre 2012 a 2020. Posteriormente os trabalhos foram categorizados de acordo com três aspectos: (1) principais produtos geoespaciais gerados, (2) principal aplicação direta destes produtos e (3) a área das geociências à qual o trabalho é aplicado.

A seleção dos trabalhos de cada base de dados seguiu critérios específicos:

- A base de dados nacional foi obtida por trabalhos que abrangem: anais de eventos nacionais, trabalhos de formatura, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos de revistas nacionais. Foram pesquisados trabalhos a partir do sistema de busca da CAPES e Google Scholar. A pesquisa se baseou nas palavras-chaves: (i) VANT/drone/aeronave remotamente tripulada; (ii) modelo 3D/virtual/tridimensional de afloramento/ortofotomosaico e (iii) fotogrametria/structure from motion. Os trabalhos selecionados apresentam um ou mais destes termos como palavras-chave do trabalho ou no resumo.
- Para a base de dados internacional pesquisou-se por artigos científicos escritos na língua inglesa, publicados em revistas com revisão por pares, que abordam temas

das geociências e contendo obrigatoriamente uma dessas palavras-chaves referentes a VANTs (no título e/ou no item “*keywords*” do artigo): *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*, *drone*, *UAS (Unmanned Aircraft Systems)* e *RPAS (Remotely Piloted Aerial Systems)*. Outras palavras chaves associadas podem estar presentes, como: *photogrammetry*, *SfM* e *3D digital outcrop*, além das palavras-chaves relacionadas às geociências. Assim, os trabalhos geocientíficos que usaram VANT mas que não utilizam nenhuma palavra-chave ou título do artigo que os refiram não foram incluídos. As bases de pesquisa foram: ScienceDirect, Scopus e Web Of Science.

Esta metodologia também é descrita no artigo apresentado. Além disso, foi feita uma revisão bibliográfica acerca da técnica Structure-from-Motion e fotogrametria digital no contexto geocientífico e do uso de VANTs.

A partir da comparação dos resultados obtidos, interpretações foram geradas e apresentadas.

Pretende-se a submissão para publicação deste artigo em revista nacional, ainda não selecionada. A versão do artigo apresentada nesta monografia é passível de modificações. Itens adicionais podem ser incorporados na versão final.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## **5.1 “Tectonic geoheritage as records of Western Gondwana history: a study based on a geosite's potential in the central Ribeira Belt, Southeastern Brazil”**

### **ABSTRACT**

The geological characterization of geosites is essential in the process of valorization of the geoheritage, as it is the first step to reveal its scientific relevance and to promote geoscience dissemination. The structural and petrological analysis of the geosite "Boudins of the Camburizinho Islet", in the northern coast of Sao Paulo state, allowed the characterization of important geological features that record the complex regional evolutionary history from the Neoproterozoic to the present in the southeastern Brazilian margin. These structures are related to the amalgamation and breakup of the Western Gondwana, represented by ductile structures from the Brasiliano Cycle in the central Ribeira Belt and the Mesozoic brittle deformation. Field techniques associated with geospatial data acquired by UAV were used for geological mapping, structural interpretation, and development of dissemination products for geotourism, including a virtual geological tour. These products proved to be highly effective in both scientific and outreach approaches, justifying its selection as a geosite and opening perspectives on its sustainable use on geotourism and education.

Keywords: Western Gondwana, Geoheritage, Geosite, Ribeira Belt, UAV mapping

### **1. INTRODUCTION**

The use of geosites as records of relevant events in the geological history of the planet has its origins in the IUGS' GEOSITES project (Wimbledon 1996, 2011; Díaz-Martínez et al. 2016). Since then, several countries have carried out geoheritage inventories in order to identify and to protect geological sites that are the focus of scientific studies (Ellis 2011; Brilha et al. 2010; García-Cortés et al. 2018). More restrictive approaches consider as geological heritage only those places with scientific value from the geological point of view; others consider, besides the scientific value, the tourist, educational, cultural values, among others (Brilha 2018). Many of these places show, indeed, a potential for other kinds of activities, such as geotourism and education, which can base further public policies on the sustainable use of the natural environment. Nevertheless, since this definition concerns the necessity of safeguarding those relevant records from being damaged or destroyed, in order to guarantee both representativeness and uniqueness it is crucial that their selection follow definite, solid criteria. Moreover, when dealing with the conservation of Earth's memory, the

ability of a geological site to represent the main episodes involved in its origin and development is an essential principle that should be taken into account.

In Brazil, geoheritage audits have been carried out by means of ad hoc consulting (Schobbenhaus et al. 2002; Winge et al. 2009, 2013), and more recently by systematic inventories (Garcia et al. 2018; Tavares et al. 2020). One of the main challenges is the great size of the country and its geological complexity (Lima et al. 2010), which should be achieved by using the main geological provinces (Almeida et al. 1981) and related global tectonic events. Relevant, world-class geological heritage and associated geotourism and outreach potentials have been described in many Brazilian sites (Guimarães et al. 2018; Zeffass et al. 2020).

In this sense, the southeastern coast of Brazil is part of the Mantiqueira Province (Almeida 1981), more specifically the central Ribeira Belt (Heilbron et al. 2004), being related to a complex evolutionary history that involves the formation and breakup of the Western Gondwana. In the area focused in this study, the northern coast of the state of São Paulo, many outcrops record the processes related to these events, from those that were active during the Brasiliano Cycle in the Neoproterozoic-Cambrian and in the Jurassic-Cretaceous that resulted in the continental fragmentation and the opening of the South Atlantic Ocean to the Quaternary, which resulted in the present landscape. The region has been the focus of geoheritage inventories since 2012 (Garcia 2012; Reverte and Garcia 2016; Garcia et al. 2019a), which allowed the identification of forty-three geosites distributed among eight geological frameworks used to categorize its geological evolution.

One of these geosites is the "Boudins of the Camburizinho Islet". It is part of the inventory of the geological heritage of the state of São Paulo (Garcia et al. 2018) and was chosen because it synthesizes many of the geological processes that took place in the southeastern Brazilian margin by means of significant structural and petrographic records. The geosite allows the correlation between metamorphic rocks, folding and highly deformed metric mafic boudins, which describes extension components associated with the collisional process. In addition, brittle structures such as a basalt dyke and fractures record the early rifting stage of the Western Gondwana. Besides the scientific value, the region itself is a traditional tourism destination, potentially suitable for projects on geotourism with the aim to demonstrate the role of geoconservation on the safeguard of relevant geological sites.

In order to characterize the geosite we use classical fieldwork descriptions and structural interpretation combined with high resolution mapping techniques based on data acquired by unmanned aerial vehicle (UAV) images. These resources have been showing marked suitability for disseminating both geoscientific and nature conservation contents and can be valuable tools when taking into account the basic geoconservation strategies, which include diagnosis (inventory, assessment), conservation (protection and law structure) and

promotion (valorization, dissemination) (Cayla 2014; Cayla et al. 2014; Martin 2014). Considering the scientific knowledge as a prime factor for the identification of a geosite, their use in basic geoscience studies can be conclusive for the inclusion of a given site in a geoheritage inventory. Besides, the adequate delimitation of a geosite as a precise polygonal surface is essential to propose appropriate legislation and management plans for the area. Regarding promotion, many examples of products developed focusing either on specific groups or on science outreach to the general public may be addressed (Santos et al. 2018; Mazoca et al. 2020).

The information produced shed light on parts of the regional evolutionary history, and evidences the geosite scientific relevance and representativeness, as well as its geotourism potential. The data obtained were also used to produce tools and materials for geoscientific dissemination, adding to existing geotourism projects to promote the importance of the conservation of geological sites, along with the safeguarding and valorization of the geological heritage of the northern coast of the São Paulo state.

## **2. GEOLOGICAL SETTING**

The Ribeira Belt constitutes the central segment of the Mantiqueira Orogenic System (Almeida et al. 1981), and resulted from episodes of diachronic collisions involving microcontinents, magmatic arcs and the southern margin of the São Francisco paleocontinent, incorporated into a continental margin system formed along the previously amalgamated São Francisco-Paranapanema crustal block (Brito Neves et al. 1999; Heilbron et al. 2000). This complex, deeply eroded orogenic chain is an important geotectonic unit that occurs for more than 1400 km along the Brazilian atlantic margin, formed during the accretion episodes from which the western sector of the Gondwana paleocontinent originated, in the Neoproterozoic to the Early Paleozoic (Brito Neves and Cordani 1991). These collision events, collectively referred to as the Brasiliano-Pan African tectonic cycle, led to the amalgamation of the Western Gondwana continent, with the closure of the Adamastor paleo-ocean resulting from the collision between the San Francisco and Western Congo cratons.

The stratigraphic units of the Ribeira Belt are characterized by high grade metamorphic rocks and Archean to Neoproterozoic granitoids, showing a complex NE-SW structural trending arrangement of amalgamated terranes, magmatic intrusions and ductile shear zones associated to a dextral transcurrent system resulting from a transpressive tectonics (Ebert and Hasui 1998; Heilbron et al. 2017). According to Heilbron et al. (2008), four

tectono-stratigraphic terrains comprises the Ribeira Belt: the Occidental Terrane, the Paraíba do Sul, the Oriental Terrane and Cabo Frio Tectonic Domain (Fig. 1).

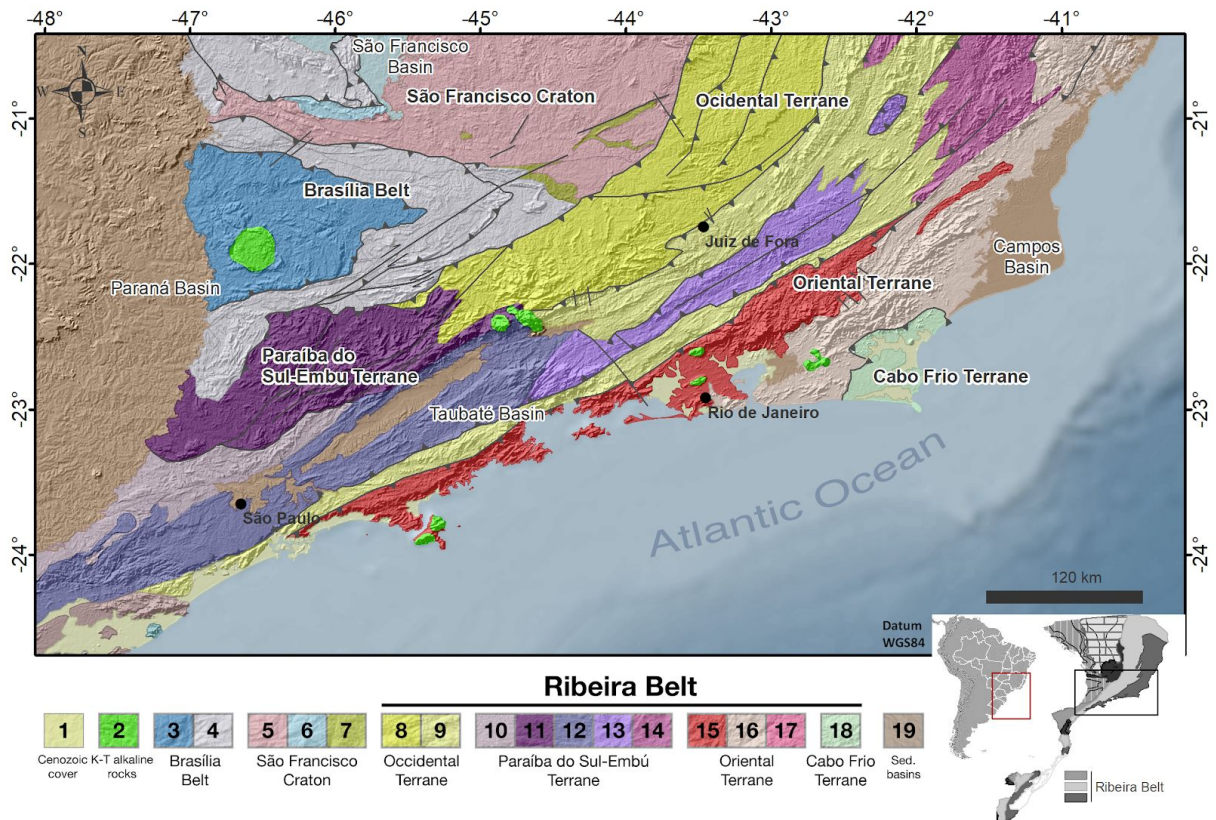


Figure 1: Tectonic framework of the Ribeira Belt and southern Brasília Belt (adapted from Heilbron et al. 2017).

(1) Cenozoic cover; (2) Upper Cretaceous alkaline plutons; E verging units of Brasília Belt (3 to 4): (3) Upper nappes and (4) Lower nappes; São Francisco Craton (5 to 7): (5) Paleoproterozoic to Archean basement rocks, (6) Bambuí group (Neoproterozoic cratonic cover); (7) Mesoproterozoic to Neoproterozoic autochthonous metasediments; Ribeira Belt (8 to 18): (8) Andrelândia Domain; (9) Juiz de Fora Domain; (10) Apiaí Terrane; (11) Socorro-Guaxupé Terrane; (12) Embú Terrane; (13) Paraíba do Sul Terrane; (14) Cambuci terrane; (15) Rio Negro arc (Cryogenian to Ediacaran magmatic arc); (16) Serra da Prata arc (Tonian magmatic arc); (17) Metasedimentary rocks; (18) Cabo Frio Terrane.; (19) Sedimentary basins: Campos, Taubaté and Paraná Basins.

The northern coast of the state of São Paulo is located in the Oriental Terrane, which constituted an allochthonous terrain amalgamated on the active margin represented by the external portions of the proto-Ribeira Belt between 605 and 580 Ma (Heilbron et al. 2008). Other authors adopt different nomenclatures for the Ribeira Belt's stratigraphy. Tassinari and Campos Neto (1988) defined three tectonic domains in the central region of the Ribeira Belt, involving the coast of the state of São Paulo, arranged from NW to SE in São Roque, Embu and Costeiro complexes. The lithotypes that occur in the northern coast of the state of São Paulo are commonly addressed in the literature as the Costeiro Complex. According to Hasui

et al. (1981) this complex is bounded to the south by the coastline, including the islands, and to the north by the Cubatão Fault. The Costeiro complex is mainly constituted by three lithological types, characterized by gneissic-migmatitic rocks, paraderivated rocks and granulitic sequences.

During the Mesozoic the Ribeira Belt underwent tectonic and magmatic processes associated with the continental fragmentation of Western Gondwana and the opening of the south Atlantic Ocean. In the Early Cretaceous, the reactivation of the Brazilian Platform was marked by extension processes associated with the breakup of South American and African continents (Riccomini et al. 2005). Expressive magmatism is associated with this period, notably represented by the Paraná Magmatic Province, which represents an intense tholeiitic magmatism that precedes the initial phases of fragmentation and which emplacement was controlled by the Neoproterozoic structures and the Paraná triple junction (Garda and Schorscher 1996; Coutinho 2008). Ages between 140 and 110 Ma were obtained for diabase dykes associated with this stage (Minioli 1971). An intense, later alkaline magmatism also occurred, which is related to the rift and ocean stages of the Atlantic margin, being represented by stocks and dykes (Riccomini et al. 2005).

The rocks from the Costeiro Complex are crosscut by mainly ENE-oriented dykes from the Serra do Mar Dykes Swarm. These are basic and intermediate dykes (diabase and diorite) and lamprophyre with alkaline affinity and a possible mantle origin (Garda 1995). According to the author the lamprophyres are probably related to an alkaline magmatism event that would have occurred in the area between the intrusion of the basic and intermediate dykes (130 Ma) and the intrusion of the Ilhabela Syenitic Complex, of 80 Ma. The extensional tectonics generated expressive vertical movements, conditioning the geology and the relief of the region during the Cenozoic, along with the reactivation of the Neoproterozoic shear zones as normal faults, favoring the performance of intense erosive processes and exposing the deep rocks of the crust (Riccomini et al. 2004). According to the author such processes led to the development of the Continental Rift of Southeast Brazil during the Paleogene, generating the adjacent blocks of the mountain ranges of Serra do Mar and Mantiqueira.

## **2.1 Study area**

The geosite "Boudins of the Camburizinho Islet" (Reverte and Garcia 2016; Garcia et al. 2018; Garcia et al. 2019a) is located on the Camburizinho Beach, in the town of São Sebastião, northeastern coast of the state of São Paulo. The region consists essentially of older ortho- and para-derived metamorphic rocks, syn- to late granitoid bodies, basic rocks as dykes and Cretaceous alkaline rocks as stocks and dykes (Fig. 2). These units are part of

the Serra do Mar mountain range geomorphological unit, whilst the Quaternary sediments constitute the Coastal Lowland.

The region's major structure was described as a positive flower associated with the Camburu Shear Zone, a NE-SW dextral Pre-Cambrian structure with tens to hundreds of meters-thick (Campanha and Ens 1993, 1996; Maffra 2000; Dias Neto et al. 2006). Its reactivation at shallow levels during the Cretaceous and later in the Tertiary caused faulting and subsidence of the Juqueriquerê plateau and the generation of cataclastic rocks (Campanha et al. 1994; Salazar-Mora et al. 2011). This shear zone characterizes a tectonic contact that limits the Pico do Papagaio batholith in the north from the syntectonic Juqueí Augen Gneiss (Maffra 2000) and the major paraderivated migmatitic rocks in the south, which constitute the Juqueriquerê plateau (Campanha and Ens 1996).

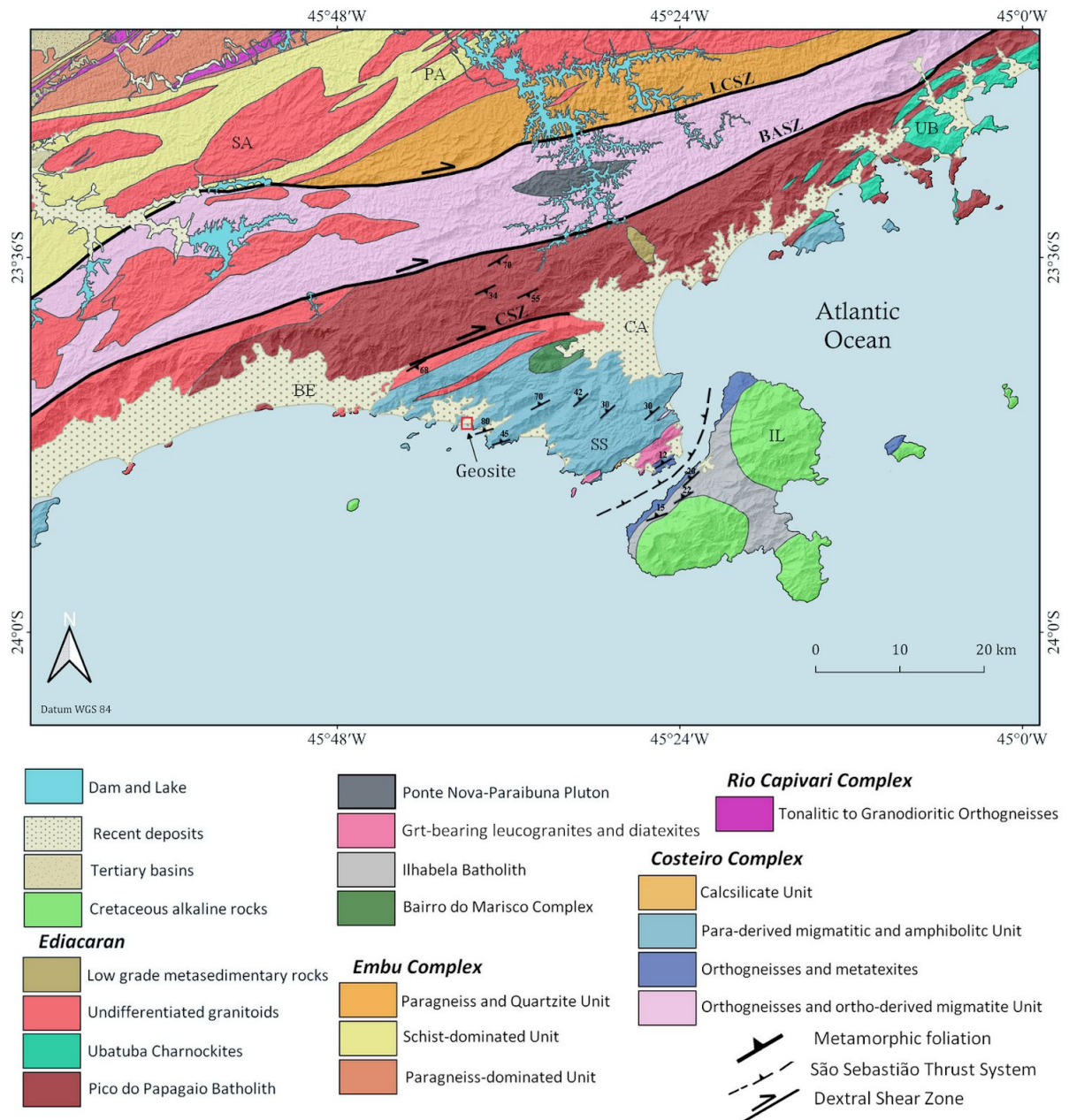


Figure 2: Geological map of São Sebastião region, modified from Meira et al. (2019). Metamorphic foliation after Dias Neto (2001); São Sebastião Thrust System after Maffra (2000). Major dextral shear zones: Lancinha-Cubatão Shear Zone (LCSZ) after Meira et al. (2019), Bairro do Alto Shear Zone (BASZ) and Camburu Shear Zone (CSZ) after Maffra (2000). The geosite location is indicated by the red square. Cities: BE= Bertioiga; CA = Caraguatatuba; IL = Ilhabela; PA = Paraibuna; SA = Salesópolis; SS = São Sebastião; UB = Ubatuba.

Analysis of U-Pb in zircons indicated a proximity of ages between the peak of the regional metamorphism, 570 Ma, and the basic magmatism, 580-590 Ma (Dias Neto et al. 2008, 2009). The amphibolitic bodies still preserve the geochemical characteristics of continental tholeiites, which favors the interpretation of a back-arc basin environment established over continental crust. The lithochemistry of the orthogneiss indicates a REE pattern of depletion in Sr, P-Ti, Ta-Nb, together with the distribution of samples R1-R2 diagram, suggesting an island arc synclinal environment in the generation of these rocks (Dias Neto et al. 2008). In addition, the authors point out isochronic Rb-Sr total rock ages that resulted in 630 Ma and  $\epsilon_{\text{Nd}}$  values between -6 and -7, indicating a magmatic arc produced by partial melting processes of pre-existing continental rocks.

### 3. DATA ACQUISITION AND PROCESSING

The geological characterization of the geosite was carried out with the use of traditional geological mapping techniques and geospatial products obtained with the processing of images acquired by an unmanned aerial vehicle (UAV). The UAV is a DJI Phantom Pro 4 equipped with a 20 megapixel camera and GPS for photo georeferencing. Three-dimensional products were obtained from two-dimensional data using the digital photogrammetry technique Structure from Motion (SfM) (Kurz et al. 2011; Westoby et al. 2012; Carrivick et al. 2016). The imagery was used in the creation of a 3D model and orthomosaics for detailed visualization and interpretation of the geosite.

The UAV survey flight plans covered the entire geosite, including the sand bank that forms the tombolo, the Camburi river, and several portions of the islet comprising either clusters of boudins or other relevant rock features. While larger portions of the site were photographed in higher flight plans (height above 30 m), small areas were registered flying the UAV in low level flights (1 m) resulting in various detailed orthomosaics. Structured semi-automatic surveys following regular linear paths, with the camera shooting the nadir, were conducted using the MapPilot app and favored to produce orthomosaics (Fig. 3a). Manual controlled circular flight plans around the object of interest, with the camera pointing obliquely to the target, produced images that were favored in the construction of the three-dimensional models (Fig. 3b). A minimum 70% overlap among images was attained in

the nadir shooting surveys, and a minimum of 65% overlap was secured in order to follow the three-dimensional model building workflow (Fig. 3c, d).

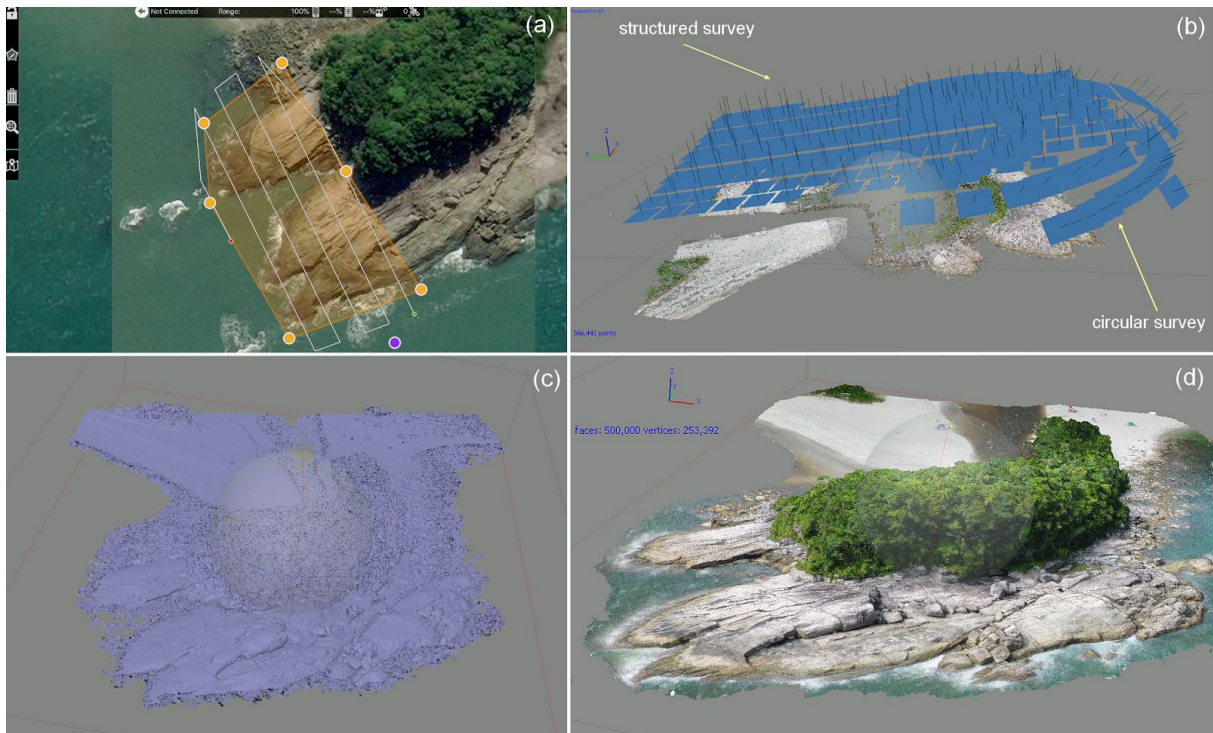


Figure 3: Data acquisition and processing of UAV images from the geosite: (a) flight path of a structured survey in the MapPilot app; (b) Camera angle and position, indicated as blue rectangles, over a sparse point cloud in Agisoft Metashape. Yellow arrows indicate the position of a structured and a circular survey; (c) Dense point cloud; (d) Textured polygonal mesh with 500,000 faces.

The creation of 3D models from SfM is based on the use of images of a static object shot from different positions. These images must have a minimum percentage of overlap area between each successive photo. The basic workflow consists of the identification of common feature points among the images, which are used in the creation of a sparse point cloud enough to locate the camera angle and the position in each photo; subsequently a dense point cloud is built, with a much higher number of points from the set of images, and finally a three-dimensional object is created from these points (Westoby et al. 2012). In Agisoft Metashape the 3D model is built as a polygonal mesh textured with a photomosaic made from the image set. The orthorectified mosaics are products obtained by the orthorectification process, which is the angular correction of the pixels to the vertical position, transforming the conical projection into an orthogonal projection and thus eliminating the effects of the relief and perspective on the geometry of the features. Spatial resolution of the orthomosaics ranges from 2.25 cm, for the largest mosaic covering the entire geosite, to 4 mm for a coverage of the south sector of the islet, and ~1 mm for detailed portions surveyed

in low level flights. These products were used to make linear measurements and photo interpretation in QGIS without angular distortions.

Additionally, extra flight surveys were performed around the islet to obtain panoramic images that were used to create a virtual geological tour of the geosite. In the panoramic surveys the UAV followed a pattern in which it became stationary at a chosen height, then point to a specific direction and shoot photos in different camera angles, adjusting only its gimbal accordingly, next the UAV would turn around its axis by some degrees and start the pattern again but pointing to a different direction until completion of a 360° coverage. This method of shooting the upper, mid and lower part of a scene, turn and shoot them again in another direction, is offered in drone controlling apps such as Litchi, which was used in the survey. The set of panoramic images was produced using a panorama stitching software (Kolor Autopano), and post-processed using an image editor software (Adobe Photoshop). The virtual tour was built using Kolor Panotour, and it links the 360° panoramas in a designed coherent order.

Measures of metamorphic foliation and rock descriptions were made in the field. Rock samples were collected for proper microscopic and petrographic analysis. The geological map of the geosite was generated by combining field data and the geospatial products.

## **4. RESULTS**

### **4.1. Geological characterization**

In addition to the field data, ductile and brittle features were characterized with the use of the high resolution orthorectified images. The general view of the geosite and associated features obtained allowed the observation of patterns that are not well defined only with the field description. The islet is oriented in the NE-SW direction and is approximately 200 meters long and 120 meters wide and a local geological map was generated compiling the field and orthorectified image data (Fig. 4). The outcrop is not structurally and petrologically homogeneous, showing different rock textures and structures in different portions. The main relevance of the geosite is related to the records of distinct tectono-metamorphic events in the geological history of the area. Granitic-gneissic rocks are the main lithotypes and show structural features related to collision and strike-slip tectonics. The most remarkable structural feature is the high concentration of metric, stretched dark boudins, oriented parallel to the main axis of the islet's geometry and also to the main foliation. Two main fracture sets and a basalt dyke of approximately 80 meters-long and 4 meters-thick crosscut the whole set. The northeastern portion of the dyke is eroded and covered by gneiss blocks. The tombolo links the islet to the Camburi river plain in the mainland.

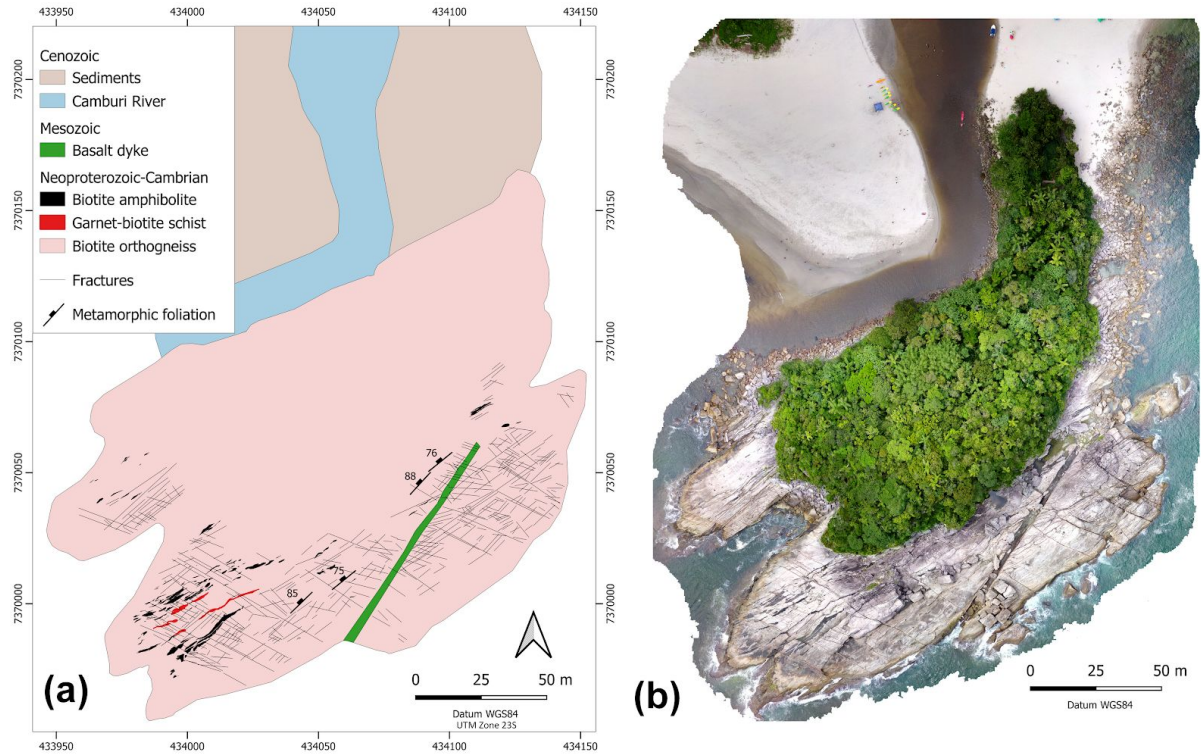


Figure 4: The geosite: (a) geological map of the geosite, generated combining the field and geospatial data; (b) the orthomosaic is a product that allows the correct measuring of linear structures and the general view of the geosites' geological features.

#### 4.1.1 Collisional and ductile features

The host rock is a fine- to medium-grained pink-gray biotite orthogneiss with gneissic foliation and millimetric to centimetric gneissic banding, varying from incipient to well defined (Fig. 5a). The general texture is predominantly lepidogranoblastic, with granoblastic domains defined by quartz, k-feldspar and plagioclase, and lepidoblastic domains defined by biotite, which sometimes occurs as aggregates (Fig. 5b). Centimetric- to decimetric pegmatite injections are common, with crystals up to 5 cm and composed of k-feldspar, plagioclase, quartz and locally with biotite and garnet.

The main foliation is high angle, locally subvertical (average N60°E/75°NW), and it is axial-plane to close-to-tight upright folds with sub horizontal axes that affect all the islet lithotypes. These folds are mainly visible in its perpendicular plane, when marked by pegmatitic layers (Fig. 5c), being responsible for the gneissic banding. Migmatitic features such as schlieren and folded structures can be observed locally (Fig. 5d), being characterised by deformed mafic and felsic portions preserved from the high angle deformation that occurs in the rest of the islet. Rootless, isoclinal folds are also observed within the migmatitic domain and characterises the foliation transposition (Fig. 5e). No

recrystallization texture was observed in the thin section, and k-feldspar predominates (Fig. 5f).

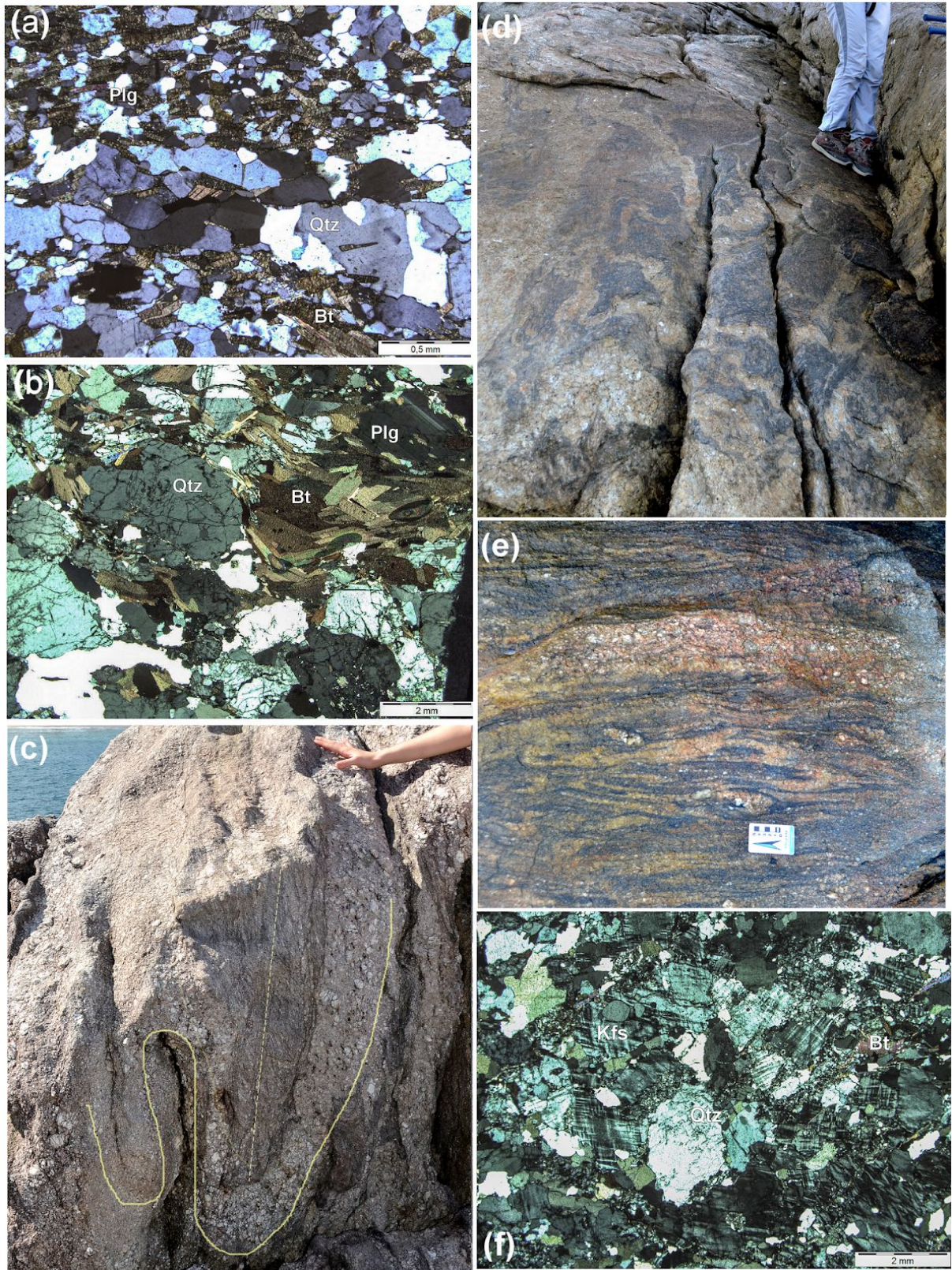


Figure 5: Collisional and ductile features: The host rock. (a) thin section of the biotite orthogneiss in crossed polars-XP, showing its main textures and the millimetric gneissic banding; in (b) a lepidoblastic aggregate of biotite occurs; (c) biotite orthogneiss with a folded pegmatitic layer. The metamorphic foliation is axial plane of

these close-to-tight upright folds; (d) migmatitic features of the host rock in the eastern domain of the islet, schlieren and folded structure; (e) isoclinal folding within the migmatite portion; (f) thin section of the migmatitic portion of the rock, in crossed polars-XP, showing no recrystallised texture and high concentration of k-feldspar.

The southwestern domain of the islet is marked by a high concentration of strongly stretched, metric- to decametric boudins that reach up to 15 meters in length. The boudins are parallel to the main foliation, being the result of later extension of mafic layers. They are also associated with the same folding phase of the host rock and thus present the same foliation, folded together with the orthogneiss, as seen in tridimensional view (Fig. 6a). The boudins are composed of two types of dark coloured metamorphic rocks, biotite amphibolite and plagioclase-quartz-garnet-biotite schist. Biotite amphibolite is the predominant lithotype (Fig. 6b), being medium- to fine-grained with predominantly lepidonematoblastic texture, defined by biotite and hornblende crystals strongly oriented according to the main foliation. Locally granoblastic texture is defined by recrystallized plagioclase and quartz crystals (Fig. 6c). The hornblende crystals show local poikiloblastic texture, with quartz and titanite inclusions and are commonly associated with biotite. These boudins show millimetric to centimetric compositional banding of felsic quartz-feldspar layers associated with centimetric- to metric pegmatitic domains and typically millimetric felsic domains. These domains occur predominantly as pinch-and-swell structures (Fig. 6d) and folds, with commonly poly-harmonic folding due to variations of competence and thickness of the felsic compositional banding (Fig. 6e).

To a lesser extent, plagioclase-quartz-garnet-biotite schist boudins also occur (Fig. 6f). The matrix is medium- to coarse-grained and with centimetric garnet porphyroblasts (around 1 - 3 cm). It is dark-colored and composed of approximately 45% of biotite, with subidioblastic crystals oriented according to the main foliation. Oriented biotite crystals compose the main lepidoblastic texture. Granoblastic felsic domains are defined by quartz and plagioclase. Garnet (around 15%) is present both in the matrix, as smaller crystals, and as porphyroblasts rotated in relation to the main foliation, with pressure shadows and quartz recrystallization. Poikilitic texture with quartz inclusions record the internal foliation, however the continuity with the external foliation is not well defined (Fig. 6g). Acicular-shaped opaque minerals occur associated with the oriented biotite crystals.



Figure 6: Collisional and ductile features: The boudins. (a) biotite amphibolite boudins can be seen in three dimensions. The host rock and the boudins present the same folding phase that generates the high angle foliation; (b) biotite amphibolite boudins; (c) thin section in plane-polarized light of the biotite amphibolite, showing its main textures and mineralogy: nematoblastic texture defined by hornblend crystals and lepidoblastic texture defined by biotite crystals. Granoblastic texture is also present by mostly plagioclase crystals; (d) common centimetric felsic domains boudinanted - these forming pinch and swell structures; (e) poli-harmonic folding due to variations of competence and thickness of the felsic compositional banding; (f) plagioclase-quartz-garnet-biotite

schist boudins; (g) thin section of the schist boudin in crossed polars-XP showing its main lepidoblastic texture defined by biotite crystals and the porphyroblastic texture defined by centimetric poikilitic rotated garnet crystals.

#### **4.1.2 Extensional and brittle features**

The outcrop shows highly fractured portions, with two main nearly orthogonal joints sets, which geometric distribution was mapped with the use of the high resolution orthophotomosaic (Fig. 7a) and show average directions of N53°E and N66°W (Fig. 7d). Notice that the direction of the basaltic dyke does not fully coincide with the general direction of the NE-SW fractures, configuring a slight obliquity of 13°.

In the east side of the islet a large (around 3 meters wide and 80 meters long), N40°E-oriented basalt dyke occurs (Fig. 7a). The northeastern portion of the dyke is eroded, and its border disappears under blocks of the host gneiss. It is highly fractured, with internal fractures chiefly associated with its cooling process (Fig. 7b). The rock is very fine-grained and the main textures are hypocrySTALLINE and subophitic marked by ripidiform plagioclase surrounded by augite (Fig. 7c).

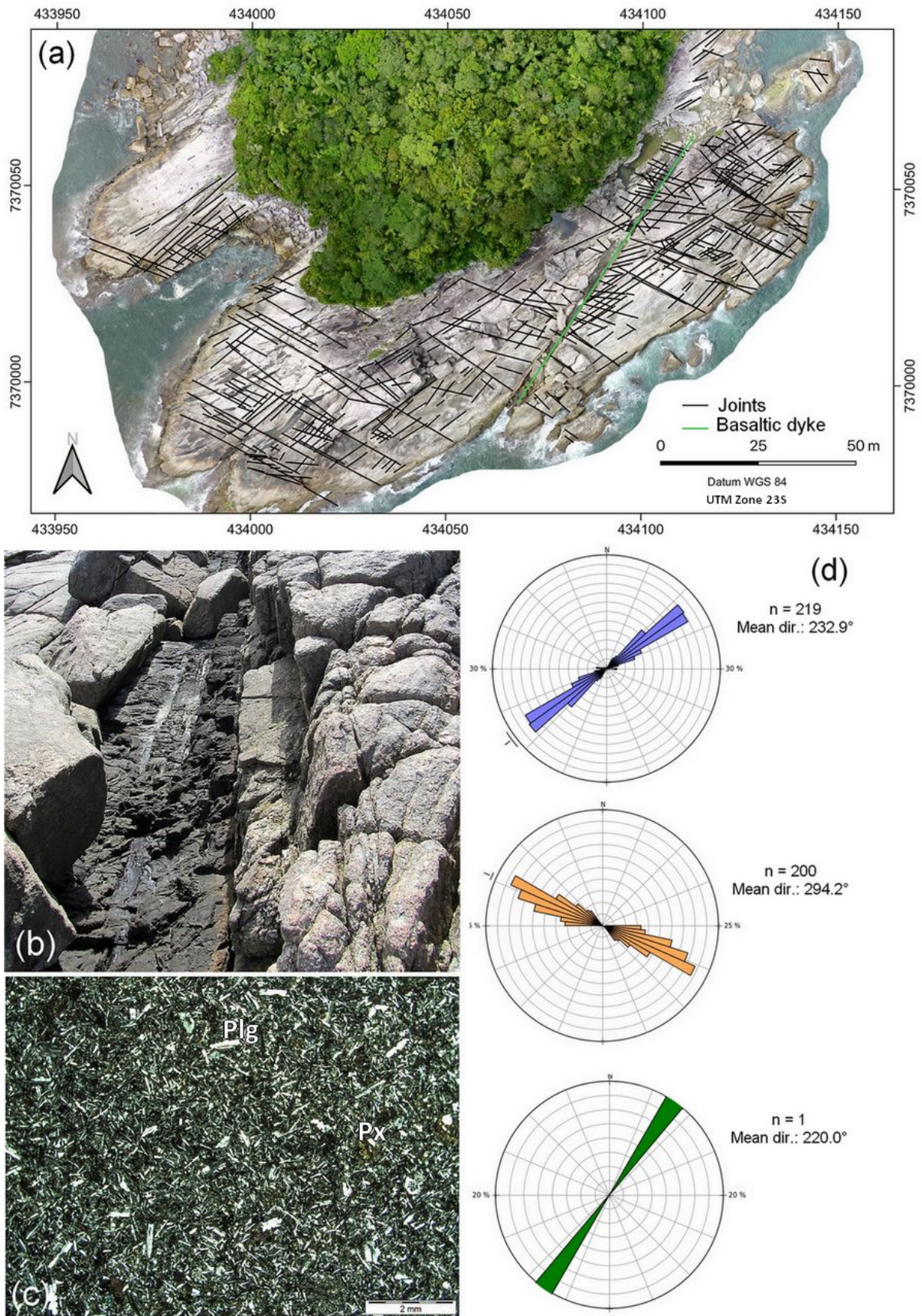


Figure 7: Extensional and brittle features. (a) main joints sets and basaltic dyke mapped in the orthomosaic image; (b) the dyke view from the islet, it presents internal fractures related to its cooling process; (c) thin section of the basaltic dyke showing its main mineralogy and the hypocrySTALLINE and subophytic textures; (d) rose

diagrams of the two main joints sets of mean directions: azimuths  $232.9^{\circ}$  ( $\sim N53^{\circ}E$ ) and  $294.2^{\circ}$  ( $\sim N66^{\circ}W$ ); and the dyke azimuth  $220^{\circ}$  ( $N40^{\circ}E$ ).

## 4.2 Virtual viewing and products

A geological virtual tour was created using five panoramic images that provide a broad visualization of the geosite and the Serra do Mar landscape. Each panorama offers an outlook of the islet from different viewpoints (Fig. 8a,b,c). The images have high resolution and it is possible to zoom in on the structures (Fig. 8d). In order to convey the impression of immersion in the geosite's geology, additional tools were added, which are: a 3D model of the geosite with interpretive information (Fig. 8e) and illustrative didactic figures (Fig. 8f). A virtual reality option is also available.

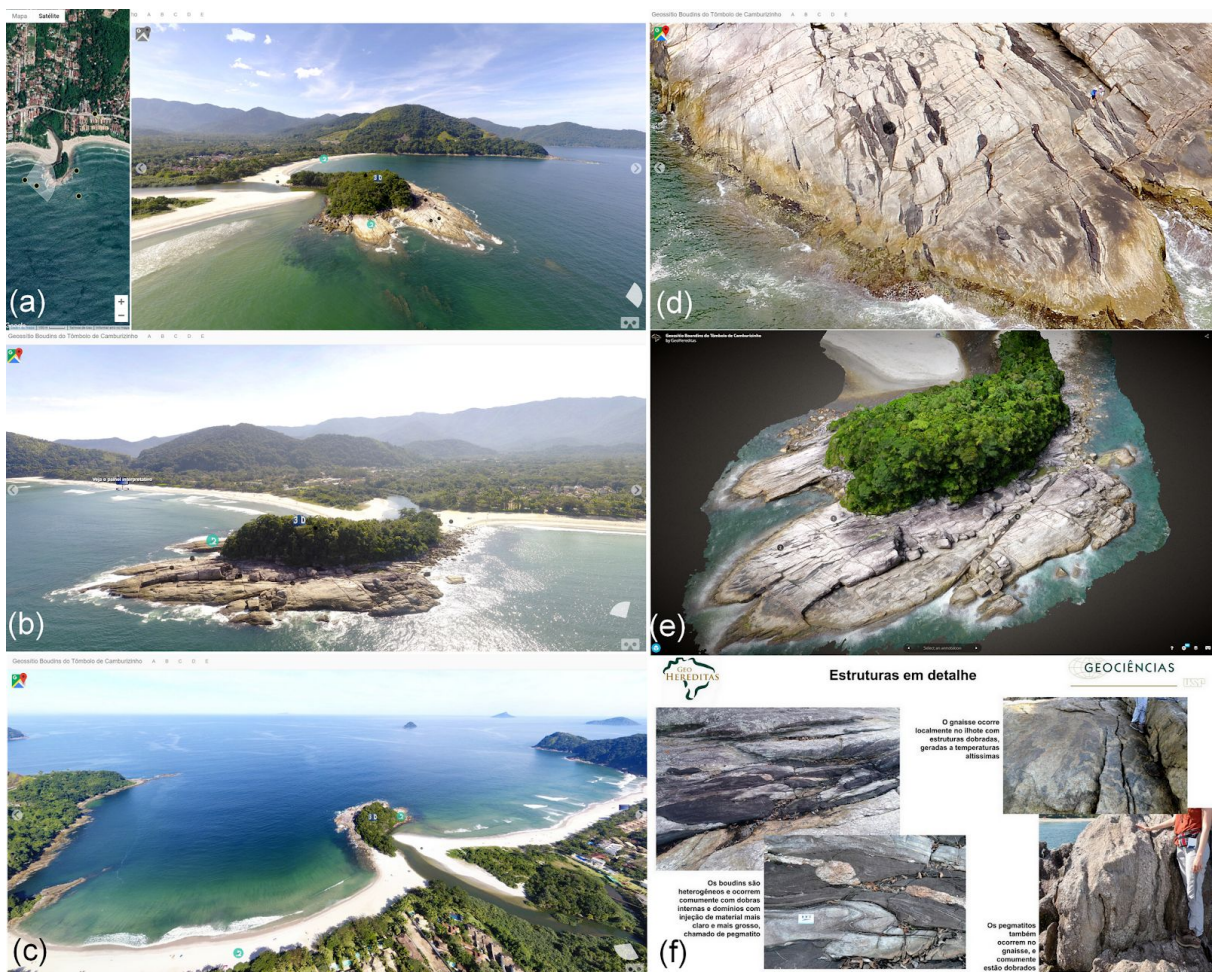


Figure 8: Screenshots of the virtual tour of the geosite. Five panoramic images compose the tour, with different points of view (three are shown here as example): (a) east facing panorama of the geosite with the Serra do Mar landscape in the background. The icons to access the 3D model and the illustrative figures are dispersed throughout the islet. The map with the location and the range visualization of each panoramic is shown in a left lateral bar; (b) southeast facing panorama; (c) panorama with a view from the northern portion of the geosite, with focus on the Camburu river and the tombolo; (d) zoom in of the portion with the high concentration of boudins; (e)

the 3D model; (f) example of an illustrative figure with detailed images of the structures and a brief explanation about them.

The location and the visualization range of each panorama is shown in a satellite map that can be opened after clicking the corresponding icon (Fig. 8a). The definition of the scene covered by each panorama was made aiming to focus on the main structures, such as the boudins in the southwest domain, the dyke in the northeast domain and the tombolo and the Camburi river, to the north.

The access to the additional tools is made by clicking on the several icons of the virtual tour. In contrast to the panoramas, the 3D model offers a continuous 360° view around the geosite, providing a full 'geovisualization'. The illustrative didactic figures aim to disseminate the geosite geology and highlight its scientific relevance to the general public. To produce them, a simple non-academic language was used, with relevant explanations about the structures and the geological evolution. The themes presented in the tour focus on the main rock types, their genesis, the remarkable structures, and their relation with the formation and rapture of Western Gondwana. The public access to the tour can be done through the link: [https://www2.igc.usp.br/geohereditas/passeiovirtual\\_camburizinho/camburizinhokarina.html](https://www2.igc.usp.br/geohereditas/passeiovirtual_camburizinho/camburizinhokarina.html)

## **5. DISCUSSION**

The geosite "Boudins of the Camburizinho Islet" is an example of how geological heritage can be used in geoconservation, either regarding its geoscientific or outreach potential. The geological features that were considered to justify its definition as a geosite are associated with the geological evolution of the southeastern coast of Brazil and are important to correlate the overlapping of the tectonic events related to the amalgamation and rifting of Western Gondwana. Moreover, the geosite is located in a traditional tourism destination, a fact that can be used in favor of its sustainable use for society by means of geotourism.

### **5.1 Geosites as records of the geological history**

The criteria that are normally used to define a geosite include representativeness, integrity, rarity, and scientific knowledge (Gray 2013; Brilha 2016), which are particularly important when dealing with geoheritage as the key records of the geological evolution of an area. In this context, the studied geosite constitutes a high quality case of sites where a significant part of the geological history is recorded. In spite of its importance, no detailed geological mapping or rock sampling had been performed in the geosite until this study. In

regional geological maps the site is located within the sedimentary recent deposits unit, among the paraderivated units, and therefore is not represented.

The oldest features are illustrated by ductile structures recorded in the high grade metamorphic rocks that represent the collisional processes related to the central Ribeira Belt formation. The boudins are shear band-type with an atypical geometry that reveals an intense stretching acting along the metamorphic foliation, paralleling it in the progression of the deformation. The amphibolite boudins show a large proportion of biotite in equilibrium with the paragenesis of these rocks, possibly due to the metasomatic processes associated with the host granitic rock during metamorphism and deformation, which makes it possible for K to enter the system to form metamorphic biotite in the thermal peak paragenesis. The garnet-biotite schist boudins are probably related to a metapelitic protolite, which has been deformed and metamorphosed together with the granitic host rock (Fig. 9a). It is possible that these constitute xenoliths from the magmatic chamber that generated the granitic rock, and thus must be the oldest protolith of the islet rocks. The hornblende + plagioclase paragenesis in the amphibolite boudins and the local migmatization in the biotite orthogneiss (Fig. 9b) indicate that the metamorphism occurred under amphibolite facies conditions and could reach anatexis.

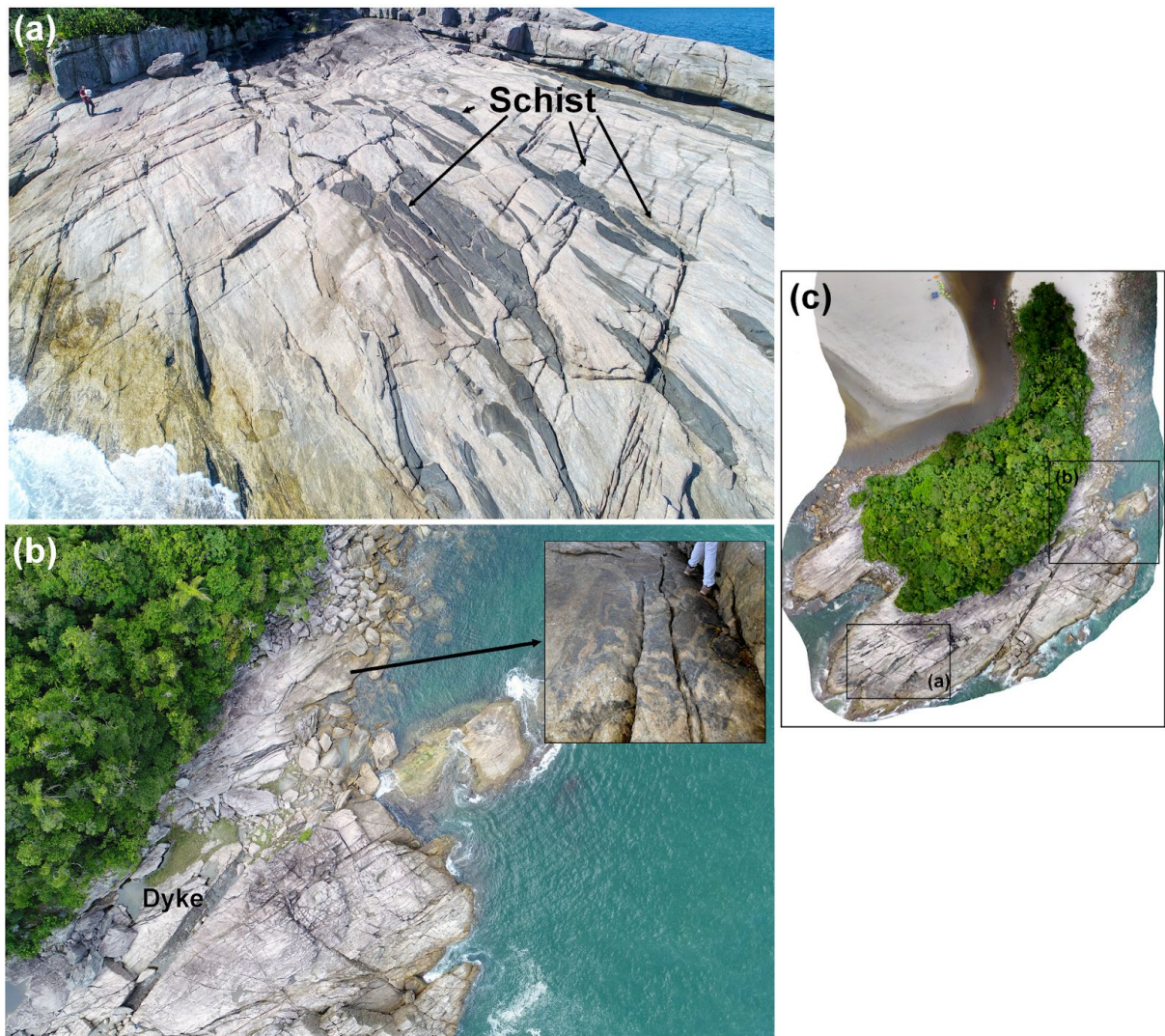


Figure 9: (a) UAV image of the portion with concentration of the garnet-biotite schist boudins among the predominantly biotite amphibolite boudins, both similar in shape. The schist boudins are probably related to sedimentary xenoliths of the granitic host rock, while the amphibolites are related to ancient dykes; (b) the biotite orthogneiss host rock has preserved locally migmatitic structures, while the rest of the islet presents a high angle axial plane foliation. This UAV image shows where it occurs; (c) location of the UAV images in the geosite's orthomosaic.

The fracture system and the basaltic dyke are representative of the brittle tectonics phase that affected the southeastern coast of Brazil during the Early Cretaceous rifting stages of Western Gondwana and opening of the South Atlantic Ocean. The dykes swarms of the southeastern continental margin of Brazil also took place in this period. The NE-SW orientation of the dyke is compatible with the Serra do Mar Dyke swarm and, according to Raposo et al. (2017), there is evidence that these dykes were emplaced in pre-existing fractures with NE-SW direction. The NW-SE fractures are apparently later than the NE-SW, but only with photo interpretation it was not possible to clarify this relationship. The development of the Continental Rift of Southeast Brazil during the Paleogene and the

generation of the Serra do Mar was the basis for the further establishment of the regional relief and sedimentary processes that resulted in the present landscape.

The Camburi River mouth and the tombolo are the most recent features of the geosite, and show active sedimentary processes, being associated to the generation of the coastal plains on the Atlantic coast of the South American Platform and to the Quaternary changes in the relative sea level. The tombolo is a sedimentary bar that resulted from the sand deposition controlled by the presence of the islet, which acted as a breakwater. This caused the waves to lose their energy and promoted the conditions for the sediments to accumulate from the coastline towards the islet, thus connecting it to the coastal plain. The Camburi River mouth is deflected by the islet itself, and can change its flow into the sea either by the west- or the east side of the tombolo, in which occasion the tombolo is deposited along the islet and the western beach.

## **5.2 Geospatial products as scientific and outreach tools**

The geospatial products developed for the geosite can be organised into four types: i) high resolution orthophotomosaics; ii) 360° panoramas; iii) three-dimensional (3D) models; and iv) panoramic virtual tours.

Regarding geoscientific research, the use of UAVs for the acquisition of high-resolution images has been growing due to the cost-benefit aspect of this technological resource in relation to other methods. The data obtained are effective for large-scale photo interpretation, suitable for a large range of sites of geological interest, either for accessibility reasons or for an enhanced view and analysis of an outcrop. The products obtained in this research proved to be essential to visualize and to understand the geological features and how they are correlated, being also records of the geosite's geodiversity. The orthomosaics, together with the field data, were the main resources for the geological mapping of the rock units and measurements of the linear structures of the whole islet (which would not be feasible with the field mapping only).

The analysis of the islet and its features and how they relate to each other can be done comprehensively using orthogonal visualization, since every structure can be seen with its real orientation in space. With ease and speed, it is possible to characterize the irregular and highly stretched geometry pattern of the boudins, and to define the places in which these structures occur. In addition, the extraction of the orientation measures of the fracture sets, vectorized from the orthomosaics, is done quickly using geographic information systems. Therefore, the orthorectified images proved to be important in the geological characterization of the geosite, making it faster and more detailed.

The 360° panoramas and the 3D model were used to generate outreach tools, such as the geological virtual tour. These science dissemination products present new prospects to the promotion and safeguard of endangered and/or inaccessible geological sites and may guarantee scientific studies for unreachable or threatened spots. They provide an interactive way of exploring a place, and by devising them with various elements of environmental interpretation they can be used as tools to promote the geodiversity of the site to the general public. This brings valuable prospects regarding their inclusion in geotourism planning, in which geosite's dissemination can have a crucial role.

The promotion of the geosite's geodiversity through the virtual tour is mainly focused on the general public, which includes local community, tourists, geoscientists and students. The use of a relatively simple language, but without avoiding essential scientific terms to refer to the geoscientific information was thought to be an efficient tool to reach the geological relevance of the geosite and to increase awareness on its importance as a key record of Gondwana history.

The region lacks concrete geotourism measures, but the area where the geosite "Boudins of the Camburizinho Islet" is located is very touristic, being the site itself considered a place of high scenic beauty. To relate this scenic aspect with its geological features may be the key to reach people's attention to the importance of conserving this and other geoheritage sites. The striking features of the islet's rocks triggers the public's curiosity and increases its potential for the dissemination of geodiversity in the geotouristic context. An interpretative panel is available on the nearby Camburi beach, from which the geosite may be observed. The panel is part of the project "Geotourism route of the northern coast of the state of São Paulo" (Garcia et al. 2011), which includes eleven panels displaced in the other municipalities that, together, aim to summarize the geological history of the region. The main geological theme of this panel is the Gondwana breakup and the opening of the south Atlantic ocean. An online version of a geotourism mapguide based on the assessment of geosites and geodiversity sites, as well as built heritage and geocultural sites is under construction (Arruda 2017, Garcia et al. 2019a). Virtual tours in other geological sites in the region were produced by the Centre for Research Support on Geological Heritage and Geotourism (GeoHereditas) and can be accessed in [https://www2.igc.usp.br/geohereditas/passeiovirtual\\_geossitiosLN/passeio-virtual\\_geossitios\\_LN.html](https://www2.igc.usp.br/geohereditas/passeiovirtual_geossitiosLN/passeio-virtual_geossitios_LN.html).

These virtual products may be particularly important for the dissemination of geoscientific information for the general public. Besides these virtual maps, courses in Geosciences for park guides were carried out in the most important protected area in the region, the Serra do Mar State Park (Garcia et al. 2019b). These courses were inspired by the scarcity of information about geodiversity and geoheritage, detected during fieldwork for

geological sites inventories and constitute effective tools to the multiplication of geoscientific knowledge.

## 6. CONCLUSIONS

The development of active scientific research and its popularisation are fundamental to the valorization of the geoheritage of a region. The northern coast of the state of São Paulo presents a rich geodiversity that includes geosites and other places of geological interest that can be used for geoscientific research and geotourism. The geosite "Boudins of the Camburizinho Islet" was included in previous geoheritage inventories but, despite its importance, lacked detailed geological studies. It records the important tectonic events that took place in the regional geological history of southeastern Brazil.

In order to strengthen its definition as a geosite and to amplify its use as both scientific, geotourism site and education tool, we used traditional geological field techniques combined with UAV mapping and the development of geospatial products to i) characterize the geosite and to correlate its geological features with the main events in the evolutionary history of the southeastern Brazilian margin, thus revealing its scientific relevance and, ii) create virtual products and interpretative contents that can be used to disseminate geoscientific information for the general public, thus enhancing its outreach potential.

The geological-structural analysis of the geosite allowed the definition of specific features as records of the main geological events related to the amalgamation and breakup of Western Gondwana. These features represent igneous, metamorphic and sedimentary processes that operate over a period of at least 600 Ma, in active, collisional to passive, extensional tectonic environments:

- The oldest protolith is constituted by the garnet-biotite schist that constitutes part of the boudins and represents sedimentary xenoliths captured during the emplacement of the granitic body that gave origin to the orthogneiss. Tholeiitic dykes also intruded the granite.
- The whole set was metamorphosed and deformed during the Brasiliano Cycle. Three types of rock structures were generated: (i) the orthogneiss host rock with (ii) local migmatization and (iii) the highly deformed metric mafic boudins, composed by amphibolite and schist.
- Early Mesozoic rifting stage processes are recorded by the NE-SW basalt dyke and the NE-SW/NW-SE fractures, which affected most of the islet area.
- Quaternary to recent sedimentary processes are represented by the tombolo and coastal erosion features.

The products generated from the processing of the high resolution UAV images proved to be highly effective in both scientific and outreach approaches. Concerning the scientific use, the depicting and record of orthogonal and three-dimensional views of the geosite provided by the geospatial tools were essential in assisting the description and the understanding of the geological features, allowing a detailed geological characterization, including the analysis of the pattern of the fracture directions, the dyke, the boudins and the relationship between these structures. This brings valuable perspectives on the maintenance of relevant geological records for future research, particularly in threatened places. On the other hand, the potential use of these tools for outreach purposes is also promising. Outcomes such as the virtual geological tour and other associated products can be used for both geoscientific and geoconservation dissemination, since they focus directly on people's understanding of the geological dynamics responsible for the formation of the landscape. This opens a number of opportunities on the efficient communication with stakeholders and society and on the elaboration of public policies regarding education, tourism, and nature conservation.

This study shows that the geological characterization of a geosite, the record of its scientific relevance and its use for geotourism can be well supported and enhanced by the application of geospatial products generated from high resolution UAV data. It attempts to provide a basis for further geological characterization of geosites and to promote geological heritage research and its significance to geoscience dissemination and geotourism.

## **7. ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors are thankful to the two anonymous reviewers, whose suggestions helped to improve the manuscript. We also thank the São Paulo Research Foundation (FAPESP Grants 2016/18652-2 and 2018/21738-1) and to the Marine Biology Center of the University of São Paulo - CEBIMAR. M. G. M. Garcia thanks the National Council for Scientific and Technological (CNPq), Grant 309964/2018-0.

## **8. REFERENCES**

- Almeida FFM, Hasui Y, Brito Neves BB, Fuck RA (1981) Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Review*, 17:1-29.
- Brilha J (2016) Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage* Vol. 8, No 2, 119-134.

- Brilha J et al. (2010) O inventário nacional do patrimônio geológico: abordagem metodológica e resultados. *e-Terra*, 18(1).
- Brilha J (2018) *Geoheritage: Inventories and Evaluation*. In: Reynard, E; Brilha, J. (eds.) *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier Inc., 482 p. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04543-9>.
- Brito Neves BB, Cordani U (1991) Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, 53:23-40.
- Brito Neves BB (1999) América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrecionário Andino. *Revista Brasileira Geociências*, 29(3):379-392.
- Campanha GAC, Ens HH, Ponçano WL (1992) Análise morfotectônica do planalto do Juqueriquerê. In: *Conor. Bras. Geol.*, 37. São Paulo, 1992. *Boletim de Resumos Expandidos*. São Paulo, SBG. p. 605.
- Campanha GAC, Ens HH (1993) Estrutura geológica na região de São Sebastião. In: *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 3. *Boletim de Resumos*, Rio de Janeiro, SBG p. 51-52.
- Campanha GAC, Ens HH, Ponçano WL (1994) Análise morfotectônica do Planalto do Juqueriquerê, São Sebastião. *Rev. Geoc.*, 24: 32-42.
- Campanha GAC, Ens HH (1996) Estruturação geológica da Serra de Juqueriquerê, São Sebastião SP. *Boletim Instituto de Geociências. Série Científica*, v. 27, p. 1-15.
- Carrivick JL, Smith MW, Quincey DJ (2016) *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley. 208 p.
- Cayla N (2014) An Overview of New Technologies Applied to the Management of Geoheritage. *Geoheritage* 6, 91–102. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0113-0>
- Cayla N, Hobléa F, Reynard E (2014) New Digital Technologies Applied to the Management of Geoheritage. *Geoheritage* 6, 89–90. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0118-8>
- Coutinho JMV (2008) Dyke swarms of the Paraná Triple Junction, Southern Brazil. *Revista do Instituto de Geociências USP* 8(2): 29-52.
- Dias Neto CM (2001) *Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos Ribeira) em São Paulo. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, São Paulo, 2001.* <https://doi.org/10.11606/T.44.2001.tde-30092013-151641>
- Dias Neto CM, Fonseca PE, Munhá J, Egydio Silva M, Ribeiro A (2006) A estrutura em flor (flower structure) do Complexo Costeiro (Faixa Ribeira) em São Sebastião (São Paulo, Brasil). *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe, La Curuña*, v. 31, p. 105-125.
- Dias Neto CM, Correia CT, Munhá JMU, Tassinari CCG (2008) Litoquímica dos granitóides da estrutura em flor de São Sebastião, São Paulo. *Geologia USP: Série Científica*, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 101-114.

- Díaz-Martínez E, Brilha J, Brocx M, Erikstad L, García-Cortés A, Wimbledon WAP (2016) Global Geosites: an active and partially achieved geoheritage inventory initiative, waiting to regain official recognition. In: Cornée A, Egoroff G, de Wever P, Lalanne A and Duranthon F (Eds), Actes du congrès international Les inventaires du géopatrimoine, 22-26 Septembre 2015, Toulouse. Mémoire hors-série de la Société géologique de France 16: 103-108.
- Ebert HD, Hasui Y (1988) Transpressional tectonics and strain partitioning during oblique collision between three plates in precambrian of southeast Brazil. In: Holdsworth, R. E., Strachan R. A., Dewey J. F. (Ed.). Continental transpressional and transtensional tectonics. London: Geological Society. p. 231-253 (Geological Society Special Publication, 135)
- Ellis N (2011) The Geological Conservation Review (GCR) in Great Britain - Rationale and methods. *Proc Geol Assoc* 122(3): 353-362.
- García-Cortés A, Carcavilla L, Díaz-Martínez E, Vegas J (2018) Documento metodológico para la elaboración del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, versión 16, 61 p.
- Garcia MGM (2012) Gondwana geodiversity and geological heritage: examples from the north coast of São Paulo State, Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências (Online)* 35:101–111.
- Garcia MGM, Del Lama EA, Martins L, Bourotte CLM (2011) Geotourism potential in the North Coast of São Paulo State, Brazil: Aspects of Geoconservation, Preservation of Traditional Culture and Income Generation. In: Rocha D, Sá, AA (Coords.) *Proceedings of the International Congress of Geotourism, AROUCA2011* (.), Arouca, Portugal: 101-104.
- Garcia MGM, Brilha J, de Lima FF et al. (2018) The Inventory of Geological Heritage of the State of São Paulo, Brazil: Methodological Basis, Results and Perspectives. *Geoheritage* 10, 239–258 <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0215-y>
- Garcia MG, Del Lama EA, Martins L, Mazoca CEM, Bourotte CLM (2019a) Inventory and assessment of geosites to stimulate regional sustainable management: the northern coast of the state of São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v. 91, n. 2, e20180514. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180514>
- Garcia MGM, Reverte FC, Mucivuna VC, Arruda KEC, Prochoroff R, Santos PLA, Romão RMM (2019b) Geoconservação em áreas protegidas: contribuição de cursos para monitores ambientais do litoral norte do estado de São Paulo. *Terra e Didática* 15 (online). <https://doi.org/10.20396/td.v15i0.8652390>
- Garda GM, Schorscher JHD (1996) Os diques costeiros básicos e ultrabásicos adjacentes ao canal de São Sebastião (Litoral Norte do Estado de São Paulo). *Revista do Instituto Geológico SP*, 17 (1-2): 7 – 31.

- Gray M (2013) *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. 2<sup>a</sup> ed. Chichester: John Wiley & Sons. 495p.
- Guimarães GB, Lima FF, Rocha-Campos AC (2018) Varvite Park, a Brazilian initiative for the conservation and interpretation of Geoheritage In: Reynard E., Brilha J. (Eds.), *Geoheritage: Assessment, Protection and Management*. Elsevier, Amsterdam, pp. 405-415.
- Hasui Y, Dantas ASL, Carneiro CDR, Bistrichi CA (1981) O embasamento Pré-Cambriano e Eopaleozóico em São Paulo. In: *Mapa Geológico do Estado de São Paulo. Pró-Minério, IPT. v. 1*, p. 12-45.
- Heilbron M, Mohriak W, Valeriano CM, Milani E, Almeida J, Tupinambá M (2000) From collision to extension: the roots of the South-eastern continental margin of Brazil. In: Talwani, Mohriak (Eds.), *Atlantic Rifts and Continental Margin*. AGU Geophysical Monograph Series, vol. 115, 354 pp.
- Heilbron M, Valeriano CM, Tassinari CCG, Almeida JCH, Tupinambá M, Siga Jr. O, Trouw RJA (2008) Correlation of Neoproterozoic terranes between the Ribeira Belt, SE Brazil and its African counterpart: comparative tectonic evolution and open questions. In: Pankhurst RJ, Trouw RAJ, Brito Neves BB, De Wit MJ (Eds.) *West Gondwana Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*, 294. The Geological Society of London, London, pp. 211–237. <http://dx.doi.org/10.1144/SP294.12>
- Heilbron M, Cordani U, Alkmin F (2017) The Ribeira Belt. In: (eds) *São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews*. Springer, Cham.
- Kurz C, Thormählen T, Seidel HP (2011) Visual Fixation for 3D Video Stabilization. *JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting*. 8(2): 1860-2037.
- Lima FF, Brilha JB, Salamuni E (2010) Inventorying geological heritage in large territories: a methodological proposal applied to Brazil. *Geoheritage* 2(3–4):91–99.
- Maffra CQT (2000) *Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP: evidências de um domínio transpressivo*. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. <https://doi:10.11606/D.44.2000.tde-26082015-13554>
- Martin S. 2014. Interactive Visual Media for Geomorphological Heritage Interpretation. Theoretical Approach and Examples. *Geoheritage* 6, 149–157. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0107-y>
- Mazoca CEM, Garcia MGM, Henriques R (2020) Research and outreach potential of digital products in geoconservation: examples from the state of São Paulo, Brazil. *Boletim ProGEO News* (in press).
- Meira VT, Garcia-Casco A, Hyppolito T, Juliani C, & Schorscher JHD (2019) Tectono-Metamorphic Evolution of the Central Ribeira Belt, Brazil: A Case of Late

- Neoproterozoic Intracontinental Orogeny and Flow of Partially Molten Deep Crust During the Assembly of West Gondwana. *Tectonics*, 38(8), 3182–3209. <https://doi.org/10.1029/2018tc004959>
- Minioli B (1974) Determinações potássio-argônio em rochas localizadas no litoral Norte do Estado de São Paulo. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 43, n. 2, p. 443-448.
- Raposo MIB (2017) Magnetic fabrics of the Cretaceous dike swarms from São Paulo coastline (SE Brazil): its relationship with South Atlantic Ocean opening. *Tectonophysics*, 721, pp. 395-414.
- Reverte FC, Garcia MGM (2016) O patrimônio geológico de São Sebastião-SP Inventário e uso potencial de geossítios com valor científico. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 35, n. 4, p.495-511.
- Riccomini C, Sant'anna LG, Ferrari AL (2004) Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso Neto V, Bartorelli A, Carneiro CDR., Neves BBB (Eds.), *Geologia do Continente Sul - Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Beca, p. 383–405.
- Riccomini C, Velázquez VF, Gomes CB (2005) Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian Platform. In: Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P. (Eds.), *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. EDUSP-FAPESP, p. 31–55.
- Salazar Mora CA, Campanha GAC., Faleiros FM (2011) Rochas cataclásticas da zona de cisalhamento Camburu-São Sebastião (SP). *Anais*. São Paulo: Tec Art Editora.
- Santos I, Henriques R, Mariano G et al. (2018) Methodologies to Represent and Promote the Geoheritage Using Unmanned Aerial Vehicles, Multimedia Technologies, and Augmented Reality. *Geoheritage* 10, 143–155. <https://doi.org/10.1007/s12371-018-0305-0>
- Schobbenhaus C, Campos DA, Queiroz ET, Winge M, Berbert-born MLC (2002) Edts. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. v. 1. Brasília: CPRM.
- Tassinari CCG, Campos Neto MC (1988) Precambrian continental crust evolution of southeastern São Paulo State- Brazil: based on isotopic evidences. *Geochimica Brasiliensis*, v. 2, n. 2, p. 175-183.
- Tavares GND, Boggiani PC, de Moraes Leme J, Trindade RI (2020) The Inventory of the Geological and Paleontological Sites in the Area of the Aspirant Geopark Bodoquena-Pantanal in Brazil. *Geoheritage* 12, 28 <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00437-8>.
- Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM (2012) 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 179: 300-314.
- Wimbledon WAP (1996) Geosites - a new conservation initiative. *Episodes*, 19, 3, 87-88.

- Wimbledon WAP (2011) Geosites—a mechanism for protection, integrating national and international valuation of heritage sites. *Geologia dell'Ambiente* supplemento 2:13–25
- Winge M, Schobbenhaus C, Souza CRG, Fernandes ACS, Queiroz ET, Berbert-born M, Campos DA. (Edts.). 2009. Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. 2. Brasília: CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 515p
- Winge M, Schobbenhaus C, Souza CRG, Fernandes ACS, Berbert-born M, Salum Filho W, Queiroz ET (2013) Edts. Sítios Geológicos E Paleontológicos Do Brasil. V.3. Brasília: CPRM.
- Zerfass H, dos Anjos-Zerfass GS, Ruban DA, Yashalova NN (2020) Basalt hills of Torres, southern Brazil: World-class geology, its heritage value, and tourism perspectives. *J. South American Earth Sciences*, 97 (online). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102424>.

## **5.2. “Análise comparativa do uso de VANTs e produtos geoespaciais aplicado às geociências”**

### **RESUMO**

Trabalhos que envolvem diversas áreas da pesquisa geocientífica e que utilizam Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para gerar produtos geoespaciais a partir da técnica de fotogrametria digital Structure from Motion foram analisados a fim de obter um panorama atual dessas publicações no cenário nacional e internacional. Foram analisados um total de 198 trabalhos publicados ou realizados entre 2012 e 2020, sendo 140 artigos científicos da base de dados internacional e 58 trabalhos diversos da base de dados nacional, sendo estes anais de congressos e eventos nacionais, trabalhos de formatura, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos de revistas nacionais. Os trabalhos foram categorizados de acordo com três aspectos: principal produto geoespacial utilizado, principal aplicação direta desse produto e área das geociências associada à pesquisa. Os resultados indicam que há poucas pesquisas nestas áreas no Brasil em comparação ao crescimento contínuo das pesquisas internacionais. Verifica-se também que o avanço e a diversificação do uso do VANTs e SfM em áreas diversas das geociências ocorre proporcionalmente aos avanços da acessibilidade no mercado de modelos de VANT para o uso na pesquisa. O predomínio de áreas mais tradicionais na análise de superfície como geomorfologia, geologia de engenharia e geologia estrutural e também o aparecimento de áreas menos frequentes, porém promissoras, no uso da tecnologia analisada, como patrimônio geológico,

ensino geológico e petrologia, demonstram que o uso dessas tecnologias pode ser de grande utilidade na pesquisa geocientífica.

Palavras Chave: VANTs, structure from motion, fotogrametria digital, tecnologias geoespaciais, geociências.

## **1. INTRODUÇÃO**

Tecnologias geoespaciais são um amplo campo de técnicas que envolvem sobretudo ferramentas de Sensoriamento Remoto, Sistema de Posicionamento Global (GPS - Global Positioning System) e Sistema de Informação Geográfica (GIS - Geographic Information System). O uso destas técnicas permite adquirir dados georreferenciados que possuem inúmeras aplicações para a sociedade, incluindo usos com fins mercantis, acadêmicos, ambientais, entre outros, permitindo análise e caracterização de dados da superfície terrestre. Os produtos oriundos destas tecnologias já constituem parte fundamental da vida cotidiana das sociedades modernas e no campo da pesquisa científica e seu uso tende a crescer nos próximos anos.

A fotogrametria é a disciplina que abrange diversas dessas técnicas e seu objetivo é a obtenção de informação de objetos físicos e do meio ambiente a partir de dados obtidos remotamente (Schenk, 2005; Bemis et al., 2014). A obtenção de estruturas tridimensionais a partir de imagens bidimensionais é uma área de pesquisa desde a década de 1970 (Ullman, 1979) e vem evoluindo até os dias atuais. O desenvolvimento de tecnologias remotas para levantamento de dados digitais nas geociências permitiram o aumento na velocidade de coleta e densidade de dados, bem como também possibilitaram o levantamento em locais fisicamente inacessíveis. Atualmente, Terrestrial Laser Scanning (TLS) e Structure from Motion (SfM) são algumas das técnicas de maior avanço recente.

A técnica de SfM vem se tornando a mais frequente em estudos geocientíficos nos últimos anos e representa um grande avanço no campo de fotogrametria para aplicações em geociências. Isto se dá devido às suas vantagens em relação a outras técnicas de levantamento, pois permite a geração de modelos 3D de alta precisão a partir de imagens bidimensionais de forma simples e com relativo baixo custo, o que torna os modelos digitais e as suas vantagens de aplicação mais acessíveis para não especialistas. A técnica baseia-se em um fluxo de trabalho que usa técnicas de áreas distintas, como fotogrametria e visão computacional, que permitem identificar e correlacionar pontos de controle em diferentes imagens obtidas de um mesmo objeto. A partir dos pontos de controle, os parâmetros de posição e calibração da câmera são extraídos ao mesmo tempo em que os

pontos são dispostos em um espaço tridimensional (Westoby et al., 2012; Carrivick et al., 2016).

Além das tradicionais câmeras digitais, a aquisição de imagens georreferenciadas de alta resolução com o uso de VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) é uma prática que vem crescendo na pesquisa geológica por ser um método de relativo baixo custo e que permite a rápida obtenção de imagens aéreas de alta resolução da superfície, possibilitando o estudo de locais inacessíveis em campo. Estas imagens podem ser facilmente processadas em softwares específicos de SfM, permitindo a construção de modelos digitais de superfície (MDS), modelos tridimensionais ou virtuais de afloramento (modelos 3D ou Digital Outcrop Models - DOMs) e imagens ortorretificadas, que podem ser usados para mapeamento digital.

No estudo geológico, a compreensão das feições e estruturas em locais remotos pode ser um processo complexo usando apenas métodos tradicionais de campo e esses produtos geoespaciais se tornam ferramentas complementares relevantes para diversas aplicações. Algumas das principais vantagens do uso desses produtos são (Bistacchi et al. 2015) a coleta de elevada quantidade de dados de alta resolução, uniformemente distribuídos ao longo uma área ou afloramento definido, fornecendo uma base estatística para modelagem; a descrição quantitativa detalhada das características geológicas, incluindo geometria das estruturas e relações espaciais; a análise unificada de afloramentos em grande escala, mesmo em escala de reservatório; a possibilidade de exploração de afloramentos em áreas fora de alcance ou perigosas.

Neste contexto, esta análise tem como foco trabalhos da área geocientífica que utilizam a metodologia de Structure from Motion para geração de produtos geoespaciais a partir de imagens obtidas por VANTs. Pretende-se com este estudo traçar um panorama atual acerca do uso destas tecnologias nos diversos estudos geológicos conforme a literatura nacional e internacional. Os trabalhos foram selecionados com base em critérios preestabelecidos que permitiram a comparação em termos de aplicação, áreas das geociências e tipo de produto gerado.

## **2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A pesquisa foi dividida de acordo com duas bases de dados: (I) internacional e (II) nacional - ambas com foco em trabalhos recentes, de 2012 a 2020. A base de dados internacional apresenta um número de trabalhos muito superior em relação à base de dados nacional e por isso os critérios de seleção de trabalhos para serem analisados foram mais restritos. Os trabalhos selecionados em ambas as bases de dados foram categorizados de

acordo com três aspectos: (1) principais produtos geoespaciais gerados, (2) principal aplicação direta destes produtos e (3) a área das geociências à qual o trabalho é aplicado.

## **2.1. Base de dados internacional**

Pesquisou-se por artigos científicos escritos na língua inglesa, publicados em revistas com revisão por pares, que abordam temas das geociências e contendo obrigatoriamente uma dessas palavras-chaves referentes a VANTs (no título e/ou no item “*keywords*” do artigo): *UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*, *drone*, *UAS (Unmanned Aircraft Systems)* e *RPAS (Remotely Piloted Aerial Systems)*. Outras palavras chaves associadas podem estar presentes, como: *photogrammetry*, *SfM* e *3D digital outcrop*, além das palavras-chaves relacionadas às geociências. Assim, os trabalhos geocientíficos que usaram VANT mas que não utilizam nenhuma palavra-chave ou título do artigo que os refiram não foram incluídos. As bases de pesquisa foram: ScienceDirect, Scopus e Web Of Science.

Além das categorizações (1, 2 e 3) previamente citadas para os trabalhos de ambas as bases de dados, os trabalhos selecionados na base de dados internacional foram também avaliados nos seguintes aspectos: países das instituições de pesquisa, modelos dos VANTs utilizados e *softwares* usados no processamento de *SfM*.

## **2.2. Base de dados nacional**

Para esta base de dados os critérios tiveram como objetivo selecionar trabalhos realizados no Brasil e publicados em plataformas nacionais, com ano de publicação recente (a partir de 2012) nas áreas das geociências e que utilizaram o método de fotogrametria digital para a geração de produtos geoespaciais a partir de imagens de VANT. As bases de pesquisa utilizadas foram (i) Anais dos 49º, 48º, 47º e 46º Congressos Brasileiros de Geologia (CBG); (ii) dissertações de mestrado; (iii) teses de doutorado; (iv) monografias de trabalhos finais; (v) artigos de revistas brasileiras e (vi) anais e artigos de eventos nacionais diversos. Para a seleção dos Anais dos Congressos Brasileiros de Geologia, utilizou-se os arquivos disponíveis no site da Sociedade Brasileira de Geologia. A seleção das dissertações e teses foi feita utilizando a base de dados de busca da CAPES. Para a busca e seleção das monografias, artigos de revistas e de eventos nacionais utilizou-se a base de dados do *Google Scholar*. A busca foi feita pelas seguintes palavras-chaves: (i) VANT/drone/aeronave remotamente tripulada; (ii) modelo 3D/virtual/tridimensional de afloramento/ortofotomosaico e (iii) fotogrametria/structure from motion. Os trabalhos selecionados apresentam um ou mais destes termos como palavras-chave do trabalho ou no resumo.

### 3. FOTOGRAMETRIA DIGITAL e SfM COM USO VANTs NAS GEOCIÊNCIAS

Os produtos geoespaciais gerados a partir do processamento de imagens obtidas através de VANTs nos trabalhos analisados neste trabalho foram obtidos utilizando a técnica de Structure from Motion (SfM), a qual representa um avanço significativo em levantamentos digitais e que está sendo usada cada vez mais como um componente crucial na pesquisa geocientífica (Westoby et al. 2012; Carrivick et al. 2014).

Durante a maior parte do século XX, os princípios da fotogrametria implementados por meio de instrumentos estereoscópicos foram o principal meio de construção de mapas topográficos (Birdseye, 1940) e um elemento crítico dos estudos geológicos tradicionais baseados em campo. Essa técnica tem sido empregada nas geociências durante anos por meio de visualização estereoscópica e análise de pares sobrepostos de fotografias aéreas (Eardley, 1942; Pillmore, 1964), sendo possível o mapeamento e a análise remota de uma perspectiva que é impossível de alcançar em campo (Bemis et al., 2014). A fotogrametria pode ser definida, segundo Schenk (2005), como uma ciência que obtém informações sobre aspectos da superfície terrestre e de objetos, sem o contato físico com estes, podendo interpretar e mensurar as informações obtidas. Segundo a American Society of Photogrammetry – ASP (Slama et al., 1980) a fotogrametria seria a ciência, arte e tecnologia da obtenção de informações sobre o meio físico por processos de interpretação de imagens ou de padrões de ondas eletromagnéticas. Ou seja, é um conjunto de técnicas de obtenção de informações e medidas/dimensões sobre os aspectos da superfície por dados obtidos remotamente, como imagens.

Os avanços na pesquisa digital e na tecnologia de sensores criaram novas oportunidades para investigar a estrutura e dinâmica dos sistemas da superfície terrestre e obter informações espaço-temporais, sobretudo por meio do desenvolvimento de MDSs de alta resolução, bem como de técnicas de diferenciação desses modelos para a detecção de mudanças geomorfológicas. Dados espaciais tridimensionais da superfície da Terra são de suma importância para geocientistas que buscam documentar formas de relevo e estruturas, compreender suas dinâmicas e os processos atuantes.

Segundo Carrivick et al. (2014), SfM é uma técnica de levantamento da superfície que surgiu com os avanços computacionais e da fotogrametria tradicional. Esta técnica pode produzir nuvens de pontos densas e tridimensionais de alta qualidade com um custo financeiro mínimo. A sua flexibilidade, sobretudo em relação a diversas escalas a que pode ser aplicada, torna a técnica de SfM bastante adequada a uma área tão diversa como as geociências. A técnica teve o início de seu desenvolvimento na década de 1980 juntamente com o desenvolvimento de algoritmos de detecção automática de feições (Carrivick et al.

2014). Segundo os autores supracitados, a SfM em contraste com a fotogrametria tradicional, utiliza algoritmos para identificar os pontos correspondentes em um conjunto de imagens digitais sobrepostas e calcula a localização e orientação da câmera a partir das posições diferenciais de vários pontos coincidentes. A geometria da cena, as posições da câmera e a orientação são recuperadas simultaneamente pelo fluxo de trabalho do SfM. Com base nesses cálculos, imagens sobrepostas podem ser usadas para reconstruir um modelo de nuvem de pontos 3D “esparso” ou “denso” do objeto fotografado, superfície ou cena.

Como o nome sugere, SfM funciona a partir de imagens "em movimento", isto é, imagens obtidas de diferentes pontos de vista. O planejamento do levantamento de imagens deve considerar que o conjunto das imagens obtidas apresentem um elevado grau de sobreposição, circulando o objeto ou superfície de interesse (Fig. 1). A fotografia aérea estereoscópica é normalmente coletada com 50-60% de sobreposição entre as imagens adjacentes, mas para SfM a sobreposição talvez seja melhor considerada em termos de cobertura e mudança angular entre imagens sobrepostas, pois a técnica consegue operar em coleções não ordenadas de fotografias (Carrivick et al. 2014, Bemis et al. 2014). Segundo os autores, em termos de cobertura, cada superfície necessita ser gerada ao menos duas vezes a partir de diferentes posições. No quesito das mudanças angulares entre as imagens sobrepostas, Moreels e Perona (2007) sugerem que não sejam maiores que 25° e 30°. Para objetos de interesse que possa circunavegar, Bemis et al. (2014) sugerem uma divergência angular entre as imagens de 10° e 20°.

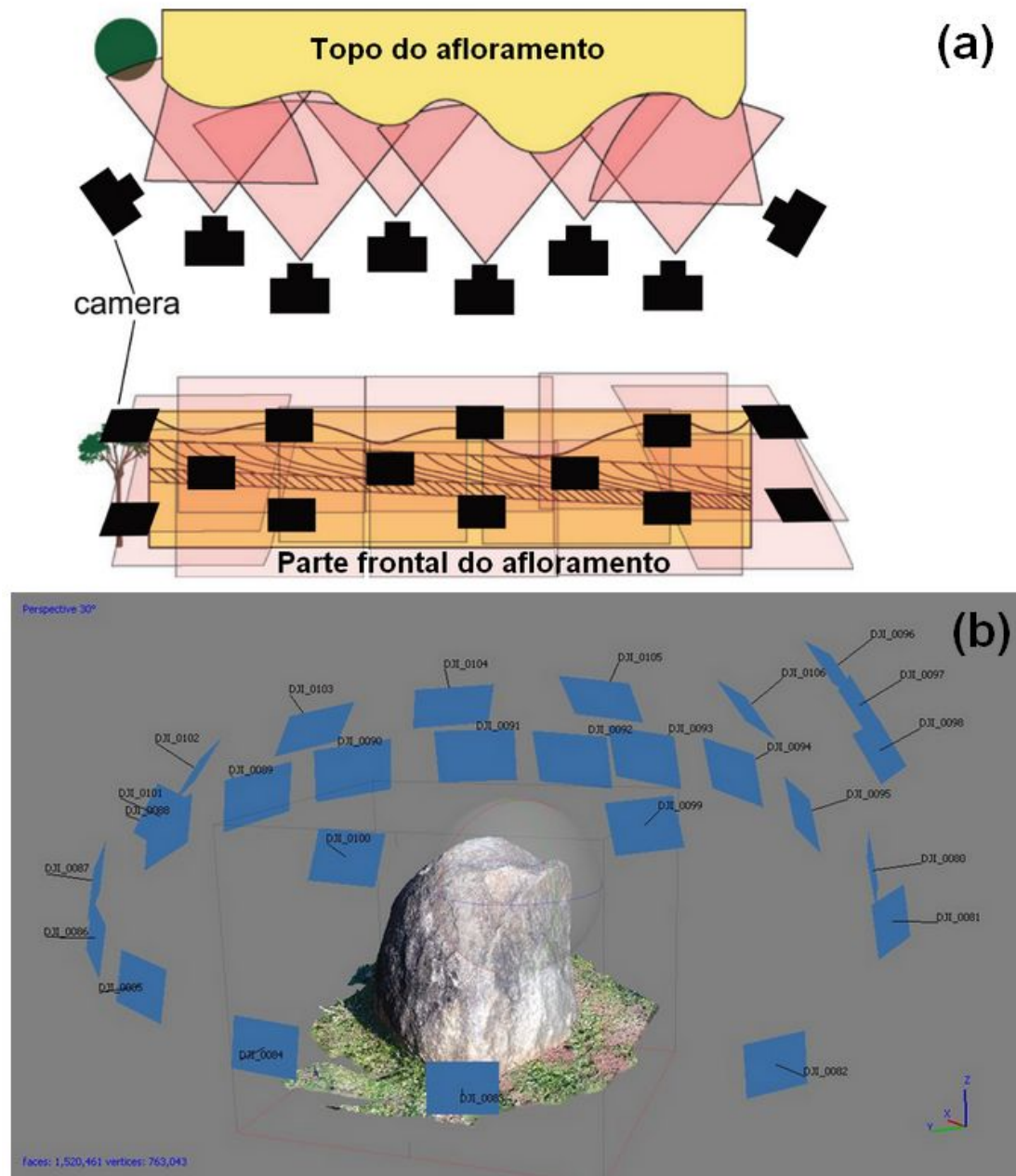


Figura 1: Esquema da aquisição de imagens para processamento SfM, o qual utiliza inúmeras imagens sobrepostas para reconstruir a localização de pontos individuais no espaço 3D. (a) Esquema da posição das câmeras e cobertura da imagem em um afloramento (Chesley et al., 2017); (b) Posição das imagens obtidas por VANT circundando um matacão, no software Agisoft Photoscan (imagem dos autores)

A técnica SfM é baseada em um fluxo de trabalho que pode ser dividido em três etapas principais: 1) identificação de pontos de controle comuns nas imagens sobrepostas usando algoritmos de detecção de feições; 2) SfM propriamente dita, que realiza a detecção das posições e orientações da câmera assim como a disposição dos pontos em um espaço tridimensional na forma de uma nuvem esparsa de pontos; 3) construção de uma nuvem densa de pontos que é maior do que a anterior em pelo menos duas ordens de magnitude (Carrivick et al., 2016). É a partir dessa nuvem densa de pontos que geram-se produtos

geoespaciais como: modelos 3D como malhas poligonais obtidas pela tesselação dos pontos da nuvem densa, modelos digitais de superfície e ortomosaicos. Conforme citado por Carrivick et al. (2014, 2016), autores que utilizam esta técnica costumam indicar de forma simplificada o algoritmo SfM como o único responsável pela criação do modelo 3D. Entretanto a etapa final do fluxo de trabalho, isto é, a geração da nuvem densa é realizada por algoritmos 'Multi-View Stereo' (MVS), por isso o mais correto seria referir ao fluxo de trabalho como SfM-MVS.

As principais propriedades que fazem do SfM uma técnica relevante na pesquisa geocientífica são o relativo baixo custo em requisitos de hardware e software, é rápido em comparação com outros levantamentos digitais de campo e é um fluxo de trabalho que é virtualmente independente da escala espacial. Além de produzir uma alta resolução espacial de pontos de levantamento e precisão de pontos 3D que em alguns casos é comparável à dos modernos scanners a laser terrestres (Carrivick et al, 2014).

Os ortomosaicos ou imagens ortorretificadas são produtos obtidos a partir de dados tridimensionais e são produtos de especial interesse no que abrange mapeamento geológico e fotointerpretação. Essas imagens são obtidas através da correção angular dos pixels para a posição vertical, de forma que as distorções do relevo são corrigidas, produzindo assim uma imagem sem os efeitos de perspectivas sobre a geometria das feições, o que torna também as coordenadas mais precisas. Dessa forma, a imagem ortorretificada obtida é um produto de utilidade cartográfica e apresenta relações realistas da paisagem, como distâncias, áreas e direções, e com as características de uma fotografia.

O reconhecimento de objetos de interesse durante atividades de campo em geociências pode encontrar limitações, seja devido à vegetação, topografia, riscos geológicos entre outros. Porém estes obstáculos podem ser contornados com o uso de fotografia digital com uso de VANTs (Bemis et al., 2014). VANTs, popularmente conhecidos como drones, têm seu surgimento no meio militar e apenas a partir da década de 2000 estes equipamentos começaram a se inserir no meio civil, tornando-se produtos disponíveis em mercado a partir da década de 2010 e tornando-se mais diversificados para diversos fins. Os modelos evoluíram para mais potentes, menores e mais baratos, e portanto, mais acessíveis como ferramenta de pesquisa científica.

A principal diferença entre modelos de VANTs comerciais é sua configuração para voo, com dois tipos principais: asa fixa ou multirotor. Os modelos de multi rotor (ou asa rotativa) apresentam um corpo central e múltiplos rotores que rotacionam hélices, com motores elétricos nas pontas de cada braço (Fig. 2a). Os mais comuns são os que possuem quatro (quadricópteros), seis (hexacópteros) ou oito (octocópteros) rotores. Já os de asa fixa apresentam uma estrutura estática de duas asas e geralmente uma única hélice

assemelhando-se a um pequeno avião (Fig. 2b). As preferências por cada modelo nos trabalhos analisados e as razões para essa escolha serão discutidas no item 5.

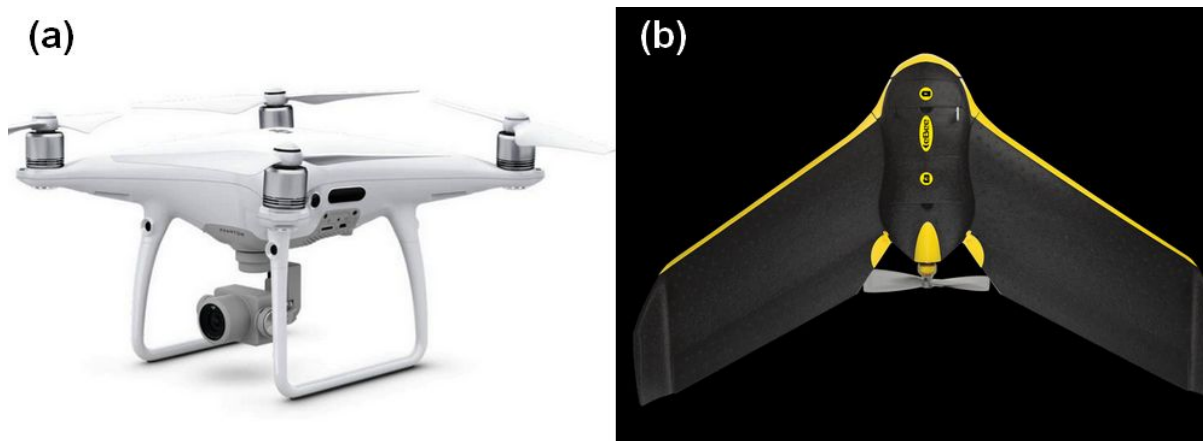


Figura 2: Principais tipos de modelos de VANTs utilizados. (a) Exemplo de multirotor (quadricoptero), modelo DJI Phantom 4 Professional ([www.dji.com](http://www.dji.com)); (b) Exemplo de asa fixa, modelo Ebee Sensefly ([www.sensefly.com](http://www.sensefly.com))

#### 4. RESULTADOS

Os trabalhos de ambas as bases de dados (internacional e nacional) foram analisados e categorizados segundo três aspectos principais. O primeiro deles: (1) “principais produtos geoespaciais utilizados” se refere a qual produto foi majoritariamente utilizado nos resultados do trabalho. Estes produtos geoespaciais são aqueles obtidos após o processamento das imagens de VANT em um software específico e são, essencialmente, de três tipos: ortomosaicos, modelos digitais de superfície e modelos 3D (que podem ser referidos também como “modelos virtuais de afloramento”). Geralmente os trabalhos geram os três produtos, pois eles são adquiridos em um mesmo processamento. Entretanto a relevância de cada produto varia nos trabalhos compilados, por isso a fim de obter uma melhor percepção da prioridade de cada produto, fez-se uma subdivisão desta categoria em duas subcategorias com os produtos principais, contendo trabalhos que utilizam principalmente (i) modelos 3D ou virtuais de afloramento ou (ii) modelos digitais de superfície (MDS) e/ou ortofotografias. Esta subdivisão foi feita pois observa-se que nos trabalhos que tendem a priorizar modelos 3D, estes tornam-se o dado principal das análises, enquanto trabalhos que usam predominantemente MDSs e ortofotografias equilibram a importância desses dois dados.

A categoria (2), “principal aplicação direta dos produtos geoespaciais” visou categorizar em cada trabalho analisado qual foi o tipo de análise predominante obtida através dos produtos geoespaciais nos resultados do trabalho. Geralmente, há mais de uma aplicação direta dos produtos geoespaciais e por isso, a fim de obter uma comparação entre todos os trabalhos, optou-se por definir apenas uma única aplicação direta em cada

trabalho, sendo esta a considerada aplicação principal, isto é, aquela que majoritariamente é apresentada nos resultados de cada trabalho. A categoria (3), “área das geociências” se refere a qual área das Geociências o trabalho se enquadra. Há diferenças nos resultados dessas 3 categorias para as bases de dados internacional e nacional, e são apresentadas a seguir.

#### 4.1 Base de dados internacional

A base de dados internacional é composta por 140 artigos selecionados e analisados, publicados entre os anos de 2012 e 2020 (Fig. 3) em revistas de revisão-por-pares. Observa-se um grande incremento na quantidade de publicações a partir de 2015. As publicações abrangem instituições de pesquisa de 40 países (Fig. 4), sendo os mais frequentes Itália (22), China (20), Reino Unido (17), Estados Unidos (17) e Alemanha (15).

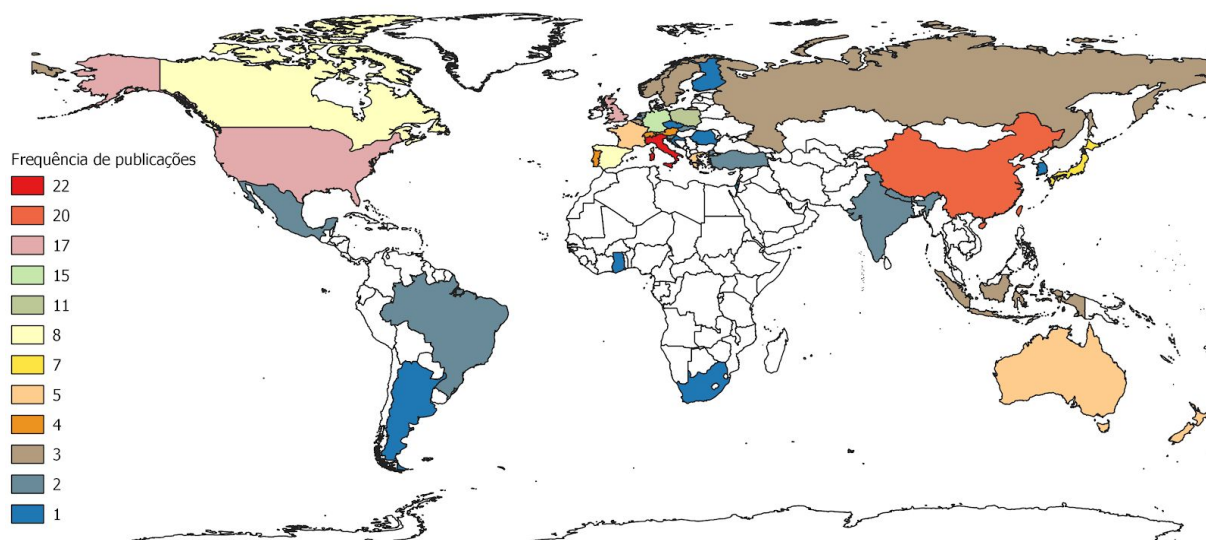


Figura 3: Distribuição global da frequência de publicações internacionais por país da instituição de pesquisa.

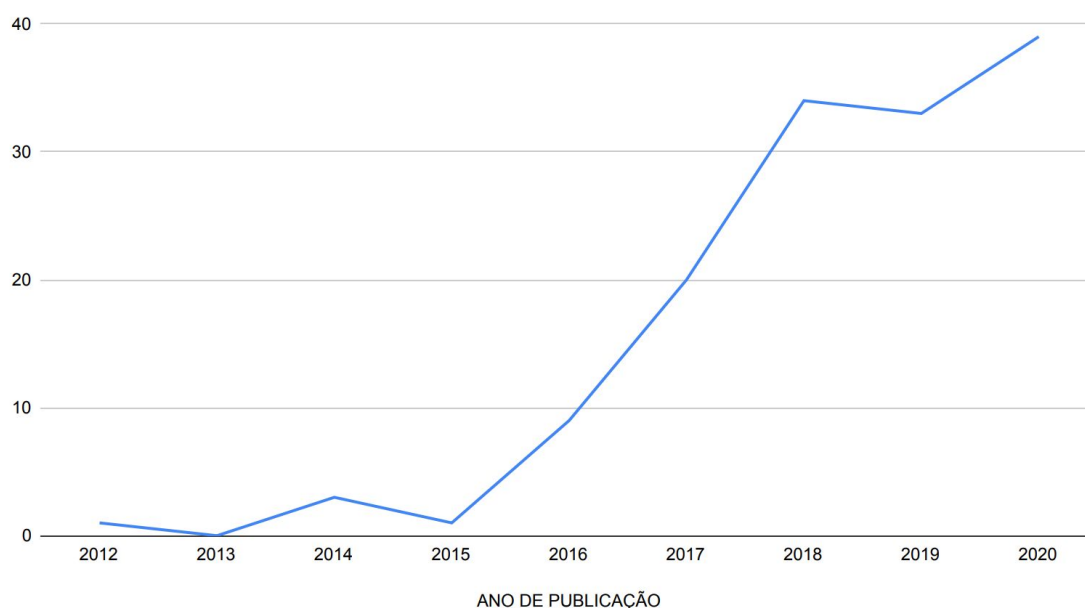


Figura 4: Trabalhos da base de dados internacional por ano de publicação.

Em relação ao tipo de VANT utilizado, não foram observadas justificativas para a escolha do modelo, apenas a citação. A grande maioria dos trabalhos opta pela utilização de modelos do tipo multirrotor (Fig. 5), sobretudo da marca DJI (57,2%). Os modelos DJI Phantom 4, DJI Phantom 4 Pro e DJI Phantom 4 Advanced são os mais utilizados nos trabalhos (23,9%). Os que optam pelo modelo de asa fixa predominantemente utilizam da marca Ebee (8,7%). Outros modelos diversos (19,6%) são utilizados. Alguns trabalhos (11,6%) não citam qual modelo foi utilizado e 2,9% dos trabalhos optam por montar seu próprio sistema de VANT.

### Modelos de VANTs utilizados

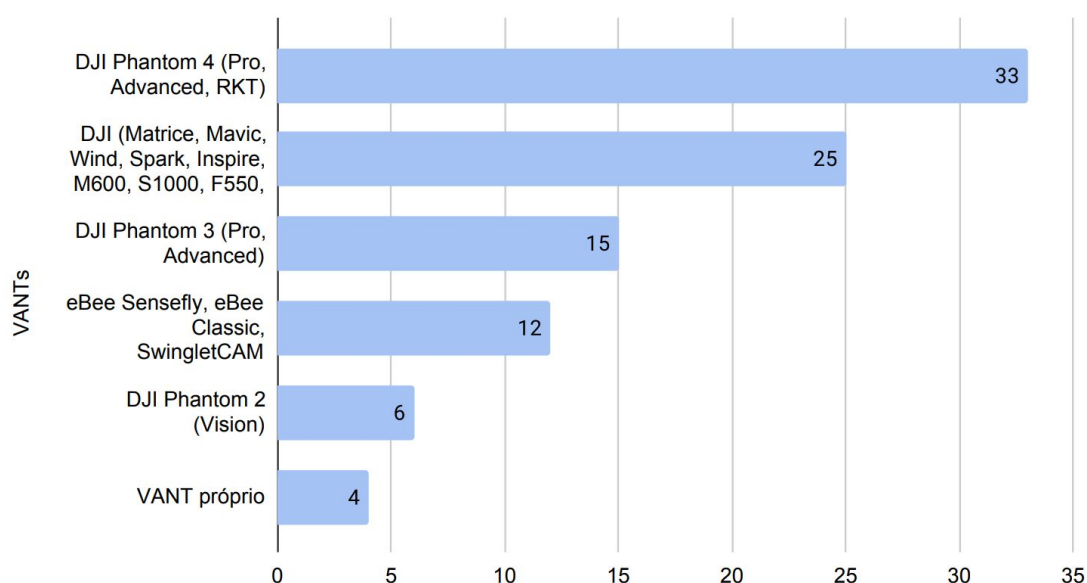


Figura 5: Modelos de VANTs utilizados nas publicações da base de dados internacional.

Quanto aos softwares usados nos trabalhos para processamento das imagens utilizando SfM na obtenção dos produtos geoespaciais, há domínio de dois softwares principais: Agisoft PhotoScan (58,7%), o mais amplamente utilizado, seguido do Pix4Dmapper (16,8%) (Fig. 6). Ambos são softwares comerciais. Outros softwares variados são 14% dos trabalhos e 9,1% não citam o tipo de software. Alguns poucos trabalhos (1,4%) utilizam algoritmos próprios no processamento de SfM. A escolha do software normalmente não é justificada nos trabalhos e os softwares geram os mesmos produtos.

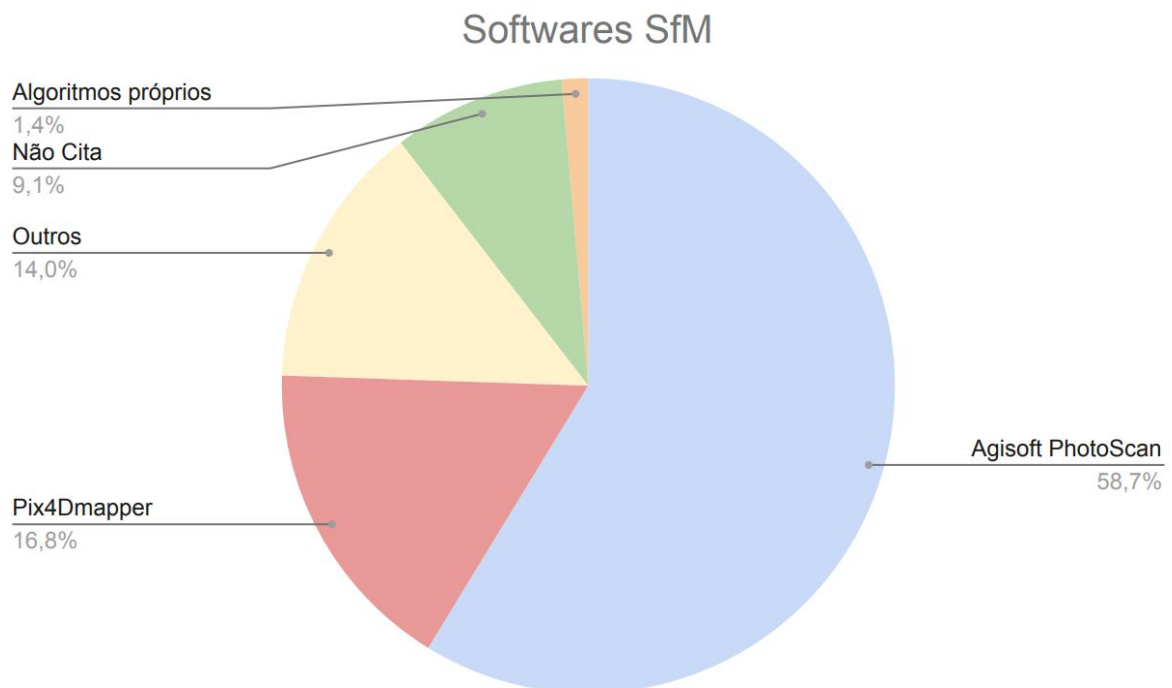


Figura 3: Softwares utilizados nos trabalhos da bases de dados internacional

Os modelos digitais de superfície e/ou ortofotos são os produtos geoespaciais principalmente utilizados em 76,6% dos trabalhos, enquanto os modelos 3D são o foco principal de 23,4% dos trabalhos (Fig. 7).

### Principais produtos geoespaciais

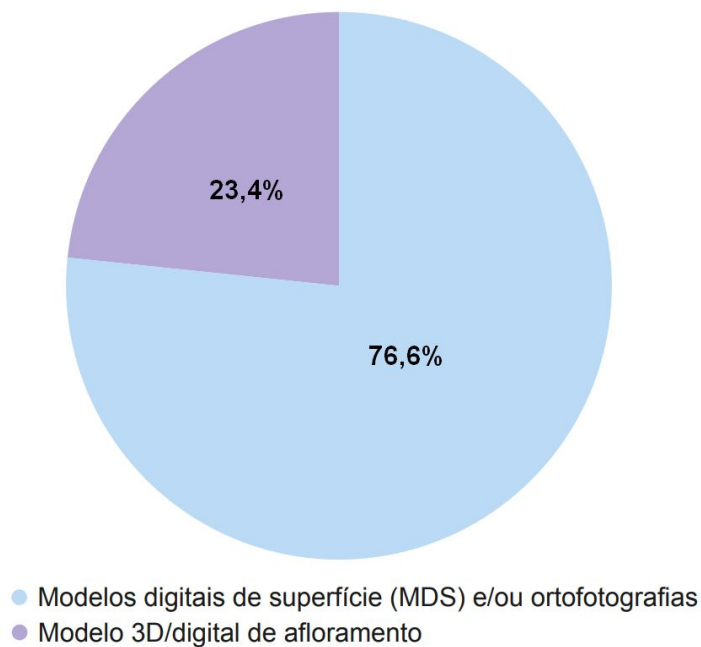


Figura 7: Principais produtos geoespaciais utilizados dos trabalhos da base de dados internacional.

Os resultados obtidos com a categorização (Fig. 8) mostram que a grande maioria dos trabalhos analisados (45,0 %) utilizam os produtos geoespaciais principalmente para realizar análises geomorfológicas, as quais abrangem diversos contextos. A análise estrutural (20,0%) é a segunda análise mais frequente. Ela é composta majoritariamente por análises de estruturas rúpteis como falhas e fraturas em diversos contextos geológicos, podendo ocorrer também medidas de planos a partir dos modelos tridimensionais. A análise de risco geológico (19,3%) também é bem frequente nos trabalhos analisados. Outras aplicações diretas ocorrem em menor proporção: análise sedimentar/estratigráfica (2,9%), análise de mina, registro de geodiversidade e análise termal (cada um apresenta 2,1% de ocorrência). De modo menos recorrente ocorrem mapeamento geológico e caracterização geológica (ambos com 1,4% cada) e análise paleontológica e aula de campo virtual (ambos com 0,8% cada). Por fim, com 2,1% tem-se trabalhos de análise bibliográfica, os quais não geraram produtos nem aplicações.

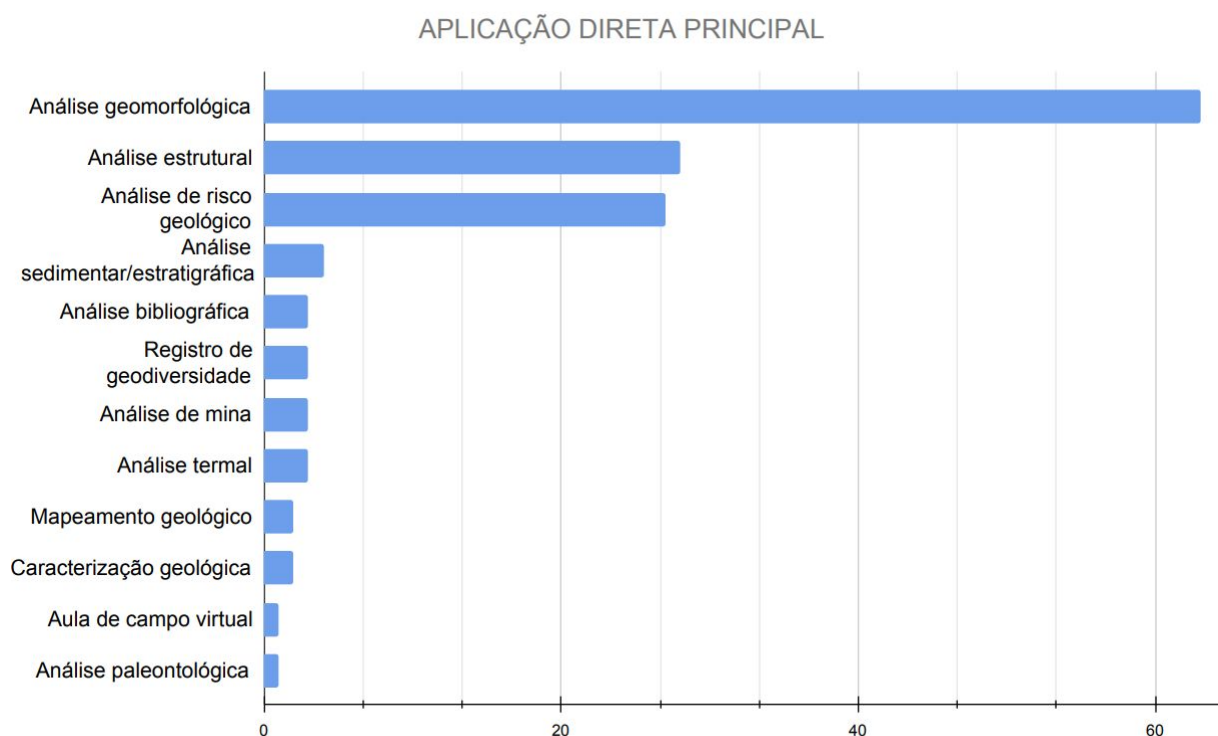


Figura 8: Principal aplicação direta dos produtos geoespaciais nos trabalhos da base de dados internacional.

A análise geomorfológica surge como principal aplicação direta dos produtos geoespaciais e pode ser subdividida de acordo com o contexto geomorfológico (Fig. 9). A geomorfologia glacial é a predominante nos trabalhos (27,9%), seguido pela geomorfologia de movimentos de massa (deslizamentos, fluxo de detritos e erosão de encostas) que constituem 18% dos trabalhos. A seguir tem-se a geomorfologia vulcânica (13,1%) e costeira (13,1%), sedimentar (9,8%) e carste (6,6%). Em menor proporção ocorrem a geomorfologia de relevos montanhosos (4,9%), geomorfologia lacustre (1,6%), de granitos (1,6%), permafrost (1,6%) e dunas (1,6%). A análise risco geológico também caracterizam processos de deslizamentos de massa, porém com o enfoque dado à análise de seus riscos no contexto geotécnico.

## Contexto geomorfológico

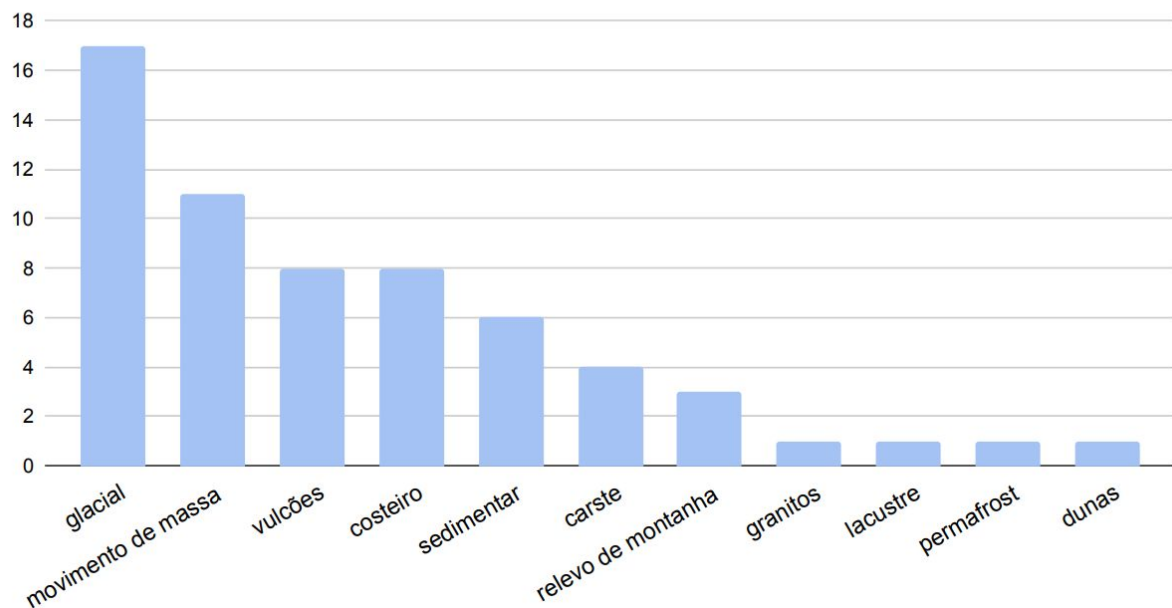


Figura 9: Tipos de análise geomorfológica. É a principal aplicação direta dos produtos geoespaciais que mais ocorrem nos trabalhos analisados.

As aplicações diretas dos produtos podem ser associadas a áreas específicas das geociências (Fig. 10). Para alguns trabalhos esta categorização é direta e de simples seleção. Entretanto, em outros trabalhos esta seleção é mais difusa em virtude da intersecção de áreas de estudo durante as análises, tendo sido escolhido aquela área que mais se aproxima dos objetivos e resultados de cada trabalho e, que são passíveis de um agrupamento entre os diversos trabalhos. As áreas das geociências mais frequentes são geologia de engenharia (25,0%) e geomorfologia (22,9%), em seguida tem-se a glaciologia/geomorfologia glacial com (12,9%), geologia estrutural (11,4%) e vulcanologia (11,4%). Sedimentologia/bacias sedimentares/estratigrafia ocorre com 6,4%, seguido de mineração (3,6%) e patrimônio geológico/geoconservação (2,1%). Por fim, neotectônica apresenta 1,4%, e paleontologia, pesquisa petrolífera, hidrogeologia e ensino geológico ocorrem com 0,7% cada, somando 2,8% juntos.

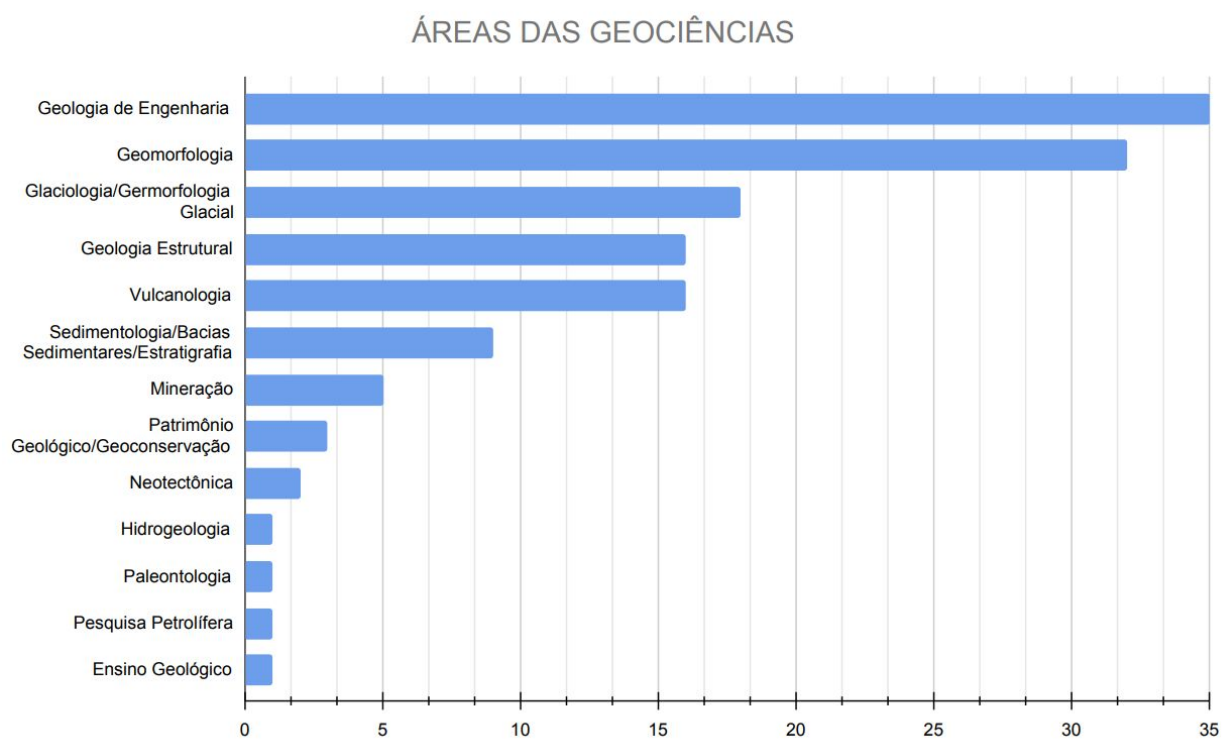


Figura 10: Áreas das geociências associadas aos trabalhos analisados.

## 4.2 Base de dados nacional

A base de dados nacional é composta por 58 trabalhos selecionados. Os trabalhos restringem-se ao período de 2012 - 2020, sendo a maioria dos anos de 2018 e 2019 (Fig. 11). Observa-se um pico de publicações no ano de 2018, associado ao 49º Congresso Brasileiro de Geologia, e uma queda considerável no ano de 2020. Segundo a fonte da publicação (Fig. 12) a maior parte dos trabalhos são dos Anais dos Congressos Brasileiros (17), seguido pelas Dissertações de Mestrado (16), Eventos Nacionais (10), Trabalhos de Formatura (7), Teses de Doutorado (5) e Revistas Nacionais (4).

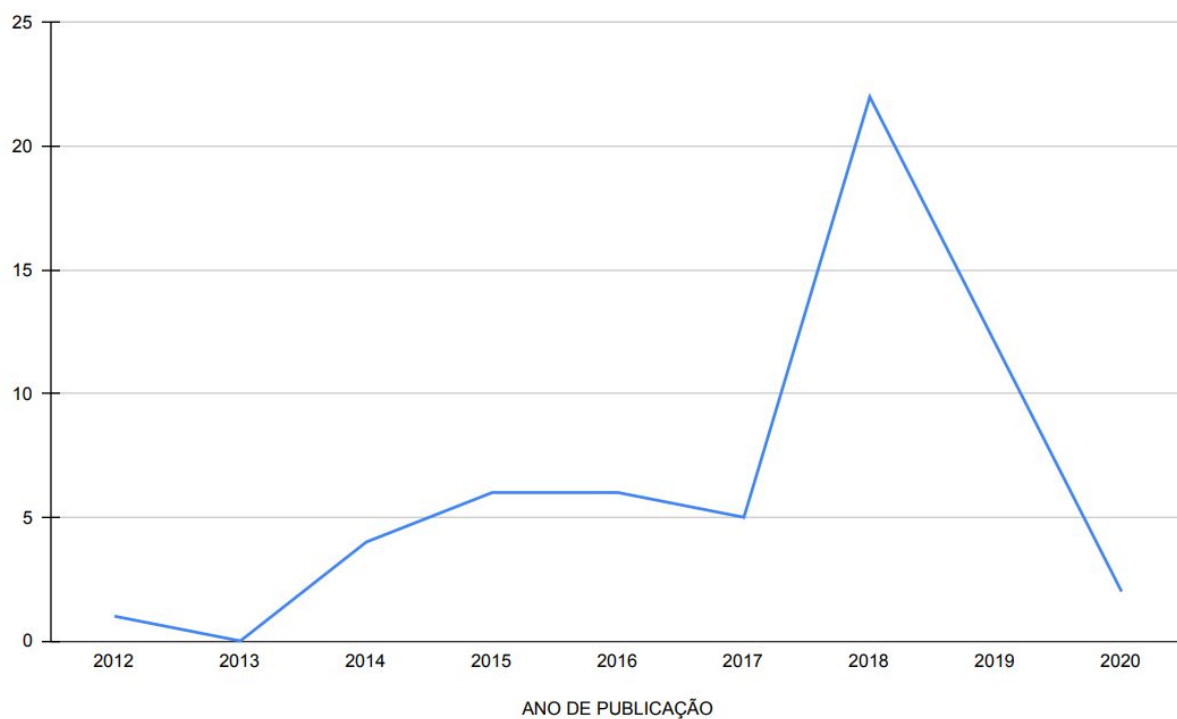


Figura 11: Número dos trabalhos selecionados da base nacional por ano de publicação, de 2012-2020.

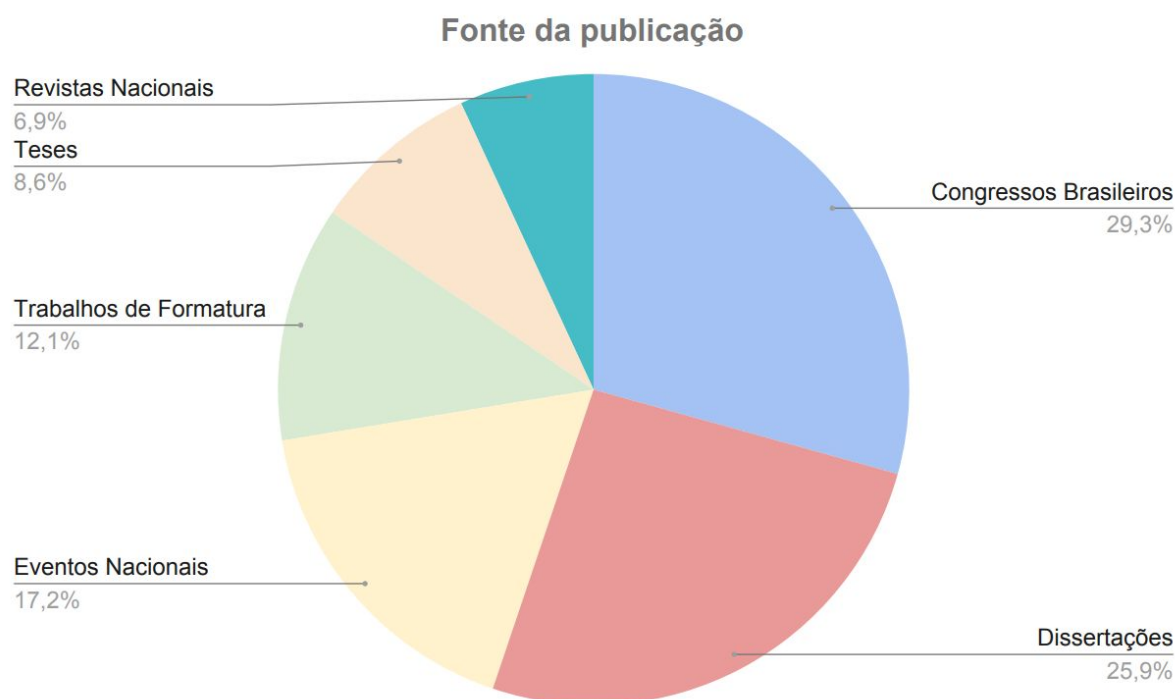


Figura 12: Fonte de publicação dos 58 trabalhos selecionados da base nacional.

O primeiro aspecto da categorização, “principais produtos geoespaciais” resultou na maioria dos trabalhos (75,9%) utilizando como produtos principais na pesquisa modelos digitais de superfície (MDS) e/ou ortofotografias, enquanto 24,1% utilizando como produtos principais os modelos 3D ou virtuais de afloramento (Fig. 13)

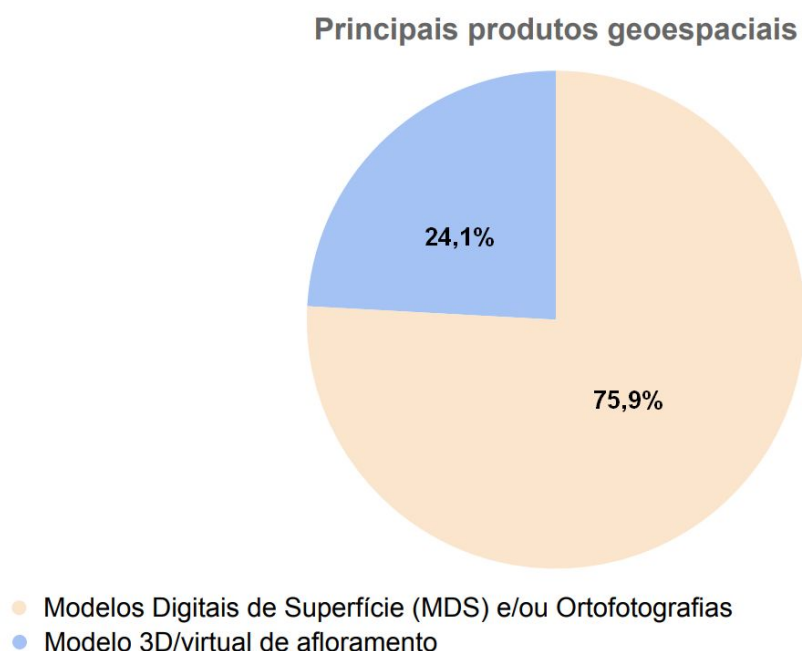


Figura 13: Produtos geoespaciais principais utilizados nos trabalhos na base de dados nacional.

O segundo aspecto analisado, principal aplicação direta dos produtos geoespaciais utilizados na pesquisa, gerou 12 categorias principais (Fig. 14), sendo que análise estrutural (27,6%) e análise geomorfológica (17,2%) foram as principais aplicações diretas dos trabalhos, seguido de levantamento topográfico, mapeamento geológico e caracterização de geossítios/geodiversidade (ambos 8,6%), fotogrametria e análise sedimentar (ambos 6,9%), modelagem geológica, mapeamento de risco geológico e cálculo de volume de pilhas de rejeito com 3,4% e 5,2% de outras aplicações (espeleometria, machine learning e fiscalização de atividades minerárias).

Estas aplicações diretas são atribuídas a uma pesquisa maior que está inserida em uma área específica das geociências (terceiro aspecto da categorização), a qual resultou em 14 áreas (Fig. 15), sendo as principais Geomorfologia (22,4%) e Geologia Estrutural (15,5%) seguidos de Bacias Sedimentares/Sedimentologia, Patrimônio Geológico, Sensoriamento Remoto, e Mineração (ambos 8,6%). Geologia de Engenharia apresenta 6,9% e Pesquisa Petrolífera 5,2%. Ensino Geológico, Rochas Ornamentais e Mapeamento Geológico apresentam 3,4% e por fim, com 1,7% cada tem-se Modelagem Geológica, Espeleologia e Hidrogeologia.

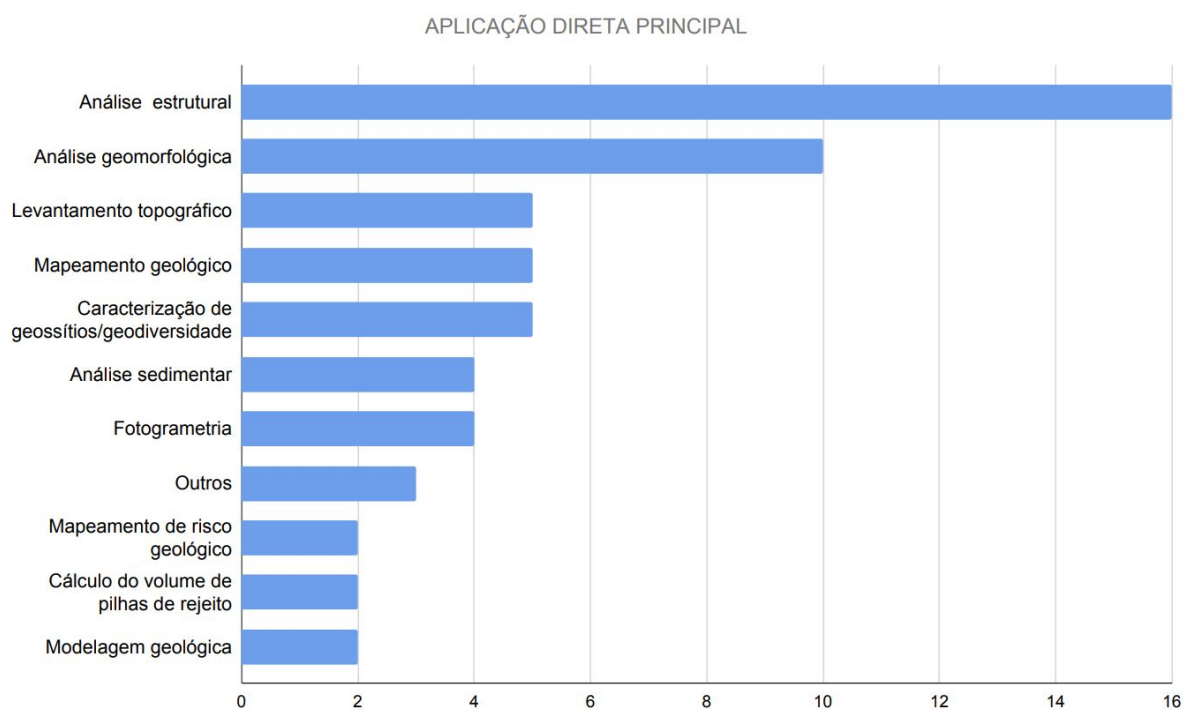


Figura 14: Principais aplicações direta dos produtos geoespaciais nos trabalhos selecionados da base nacional.

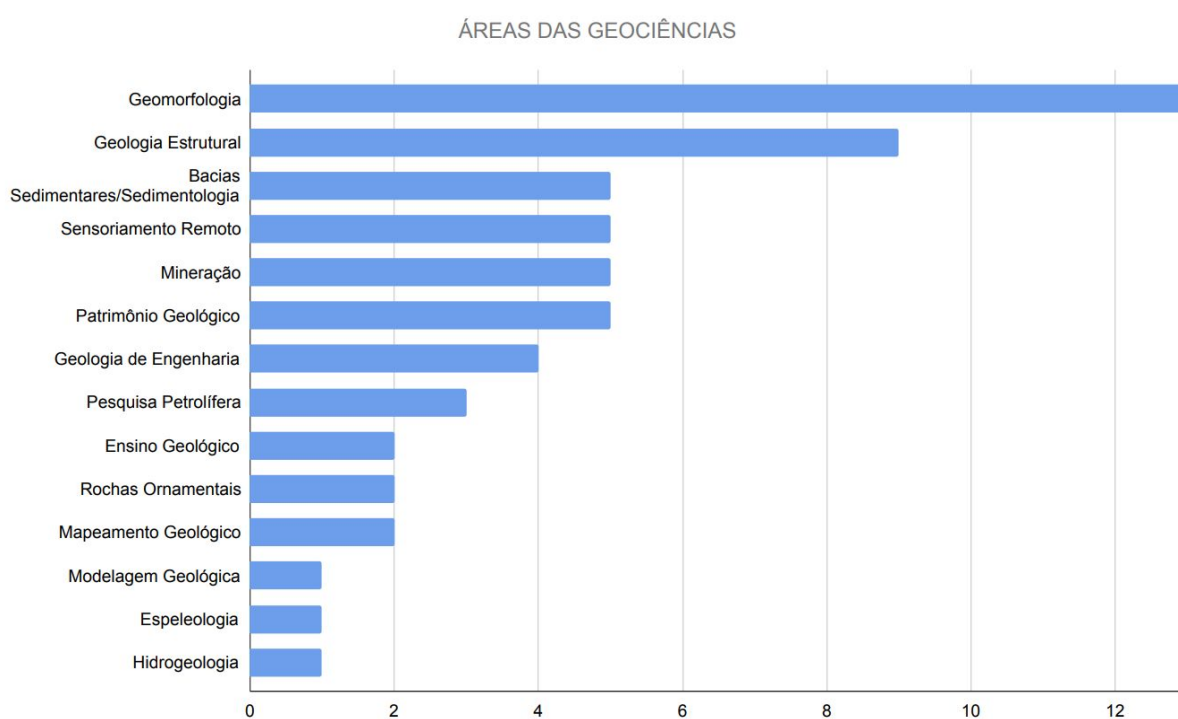


Figura 15: Áreas das Geociências dos trabalhos selecionados da base nacional, categorizados em 14 áreas.

## 5. DISCUSSÃO

Um panorama geral pode ser interpretado no aspecto da análise do uso de produtos geoespaciais obtidos por fotogrametria digital e Structure from Motion com imagens adquiridas por VANTs nas geociências. Os resultados obtidos para as bases de dados

nacional e internacional permitem avaliar as diferenças que refletem sobretudo o estágio ao qual o Brasil se encontra no uso desta tecnologia em relação aos outros países.

Os critérios de seleção dos tipos de publicação diferem grandemente entre as bases de dados nacional e internacional. A base de dados internacional são os artigos científicos, principal mecanismo global de divulgação no meio acadêmico das pesquisas que estão sendo desenvolvidas. Já a base de dados nacional apresenta apenas 3 artigos publicados em revistas nacionais, enquanto o restante dos trabalhos são de outras fontes de publicação. O intuito de empregar esses trabalhos de diversas fontes de publicação na compilação nacional foi de obter um número mínimo de trabalhos que utilizam as tecnologias em análise, mesmo que estes trabalhos não tenham sido publicados em artigos científicos, sendo a maioria (30,5%) de resumos de anais de congressos ou eventos.

Com relação aos anos de publicações dos trabalhos, tanto internacionais como nacionais apresentam um aumento a partir de 2015. Os trabalhos internacionais apresentam um crescimento contínuo até o ano de 2020 e reflete a popularização de drones no mercado em geral e em seu uso civil, incluindo para a pesquisa científica. No Brasil a curva de trabalhos por ano não é crescente e oscila de acordo com os anos dos eventos nacionais. Apresenta uma queda após 2018, ano em que uma elevada quantidade de resumos foram apresentados no Anais do 49° CBG.

Esta oscilação de crescimento dos trabalhos nacionais e o volume de publicações de outras fontes que não artigos acadêmicos, indicam que a utilização de VANTs como instrumento de pesquisa nas geociências no país ainda é baixo e reflete um estágio inicial das pesquisas geocientíficas nacionais que utilizam a tecnologia analisada. Já a curva de crescimento dos trabalhos internacionais refletem o contínuo aumento e dispersão desta tecnologia nas pesquisas geocientíficas no mundo.

O aumento geral das publicações a partir de 2015 pode estar associado ao aumento da oferta dos VANTs no mercado, aumentando o acesso a este tipo de tecnologia e se tornando cada vez mais popular no meio científico. Os modelos multirotores DJI Phantom 3, DJI Phantom 4 e suas variações, que são os modelos mais utilizados nas pesquisas, também surgiram nesta época, nos anos de 2015 e 2016 respectivamente. Possíveis razões para a popularidade dos VANTs multirotores são que eles dominam o mercado e apresentam menor custo, podendo custar até 10 vezes menos que um modelo de asa fixa. Multirotores apresentam dimensões razoáveis para manuseio e transporte em relação aos de asa fixa, os quais apresentam uma grande área de superfície e envergadura. Outro fator importante é a facilidade de decolagem, pilotagem e pouso. Os multirotores têm procedimentos de lançamento e pouso mais seguros para operar em ambientes de terrenos irregulares, pois as decolagens e aterrissagens são verticais e exigem menor superfície para

decolar e pousar, além disso a pilotagem é mais simples do que os de asa fixa, o que demanda menos conhecimento técnico para o uso.

O fator que leva a alguns trabalhos optarem pelos modelos de asa fixa se dá nas vantagens deste modelo em relação aos multirotores: principalmente, em razão da maior extensão de área mapeada em um único ciclo de bateria, a qual, devido à configuração da aeronave, consome energia para seguir em frente e não para se manter no ar, e também por sua maior estabilidade em ventos fortes relação aos multirotores. Jouvét (2018) indica que o alcance de voo dos VANTs é um fator limitante para o mapeamento de áreas de grande extensão. Segundo o autor, multicópteros como o DJI Phantom são fáceis de voar sem experiência anterior, no entanto, eles têm alcance operacional limitado - normalmente menos de 10 km assumindo voos de baixa altitude. Já o modelo Ebee, de pequenas asas fixas, podem dobrar esse alcance enquanto permanecem relativamente fáceis de operar. Por outro lado, grandes VANTs de asa fixa podem voar mais alto e em distâncias muito maiores (mais de 100 km), mas exigem treinamento de voo especial e são difíceis de pousar em ambientes montanhosos. Por este motivo, os últimos são mais adequados para mapear vastas áreas glaciais (normalmente mais de 10 km<sup>2</sup>). Existem também alguns modelos híbridos de VANTs, combinando as vantagens dos multirotores com os de asa fixa, são baseados no princípio de decolagem e pouso vertical (Vertical Take-Off and Landing - VTOL), sendo ideais para suprir as necessidades do grande alcance de mapeamento superficial com facilidade de decolagem e pouso. Entretanto ainda é pouco usado e apenas 1 trabalho utilizou este tipo de VANT.

Os países que mais publicam internacionalmente são Itália, China, Reino Unido e Alemanha. São países que apresentam elevada quantidade de publicações científicas de diversas áreas, sendo a China o país sede da DJI, maior fabricante de VANTs utilizados na atualidade. No Brasil as universidades sedes mais frequentes dos trabalhos analisados estão nos estados do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e Rio Grande do Norte, tendo alguns trabalhos ligados a Petrobras, ao DNPM e um trabalho ligado a CPRM.

Com relação aos tipos de produtos geoespaciais utilizados, tanto para a base nacional como internacional, nota-se que as publicações focam as suas aplicações principalmente nos modelos digitais de superfície e nas ortofotografias. A nuvem de pontos, que é um produto tridimensional, é gerada após o processamento em softwares de *structure-from-motion*, sendo o mais utilizado o Agisoft Photoscan seguido do Pix4Dmapper. A partir deste nuvem, são gerados os três produtos geoespaciais: modelos digitais de superfície, ortofotografias e modelos 3D. O foco principal dos MDSs é a análise de mudanças na superfície, sobretudo para investigações geomorfológicas e de risco geológico. Muitos trabalhos utilizam o chamado “*DEM of difference (DoD)*” que é o processo de medir as diferenças entre dois modelos digitais de superfície de períodos distintos,

podendo calcular volumes e áreas que foram alteradas ou movimentadas. É utilizado principalmente para análises de landslides, debris flow e erosão em encostas. As ortofotografias são geralmente utilizadas para análise estrutural rúptil, medindo estruturas lineares como falhas, fraturas e diques. Os modelos 3D ou virtuais de afloramento podem ser utilizados na caracterização geológica no geral, bem como para extração de planos de foliação em softwares específicos, como o CloudCompare. Além disso, os modelos podem ser utilizados para divulgação científica e passeios virtuais.

O pré e o pós processamento de modelos 3D de alta resolução nos softwares demandam maior trabalho técnico em relação aos outros produtos e os computadores necessários precisam apresentar alto desempenho, e portanto são mais caros. A aquisição das imagens a partir de VANTs para o processamento de modelos 3D ainda é inteiramente manual, diferente da aquisição para geração de ortofotos e MDSs, as quais podem ser realizadas com softwares de voos onde o plano de voo e a produção das fotos são automatizadas. Este salto técnico para produção dos modelos 3D, além dos seus possíveis usos específicos de pós processamento em outros softwares especializados, podem justificar a sua menor frequência de aplicações em relação a ortofotos e MDSs.

As principais aplicações diretas dos produtos geoespaciais podem não refletir diretamente na mesma área das geociências a qual o trabalho está inserido, como por exemplo, as aplicações de análise estrutural e análise geomorfológica comumente são atribuídas a trabalhos da área de geologia de engenharia e a análise estrutural também se associa comumente a trabalhos de geomorfologia glacial e vulcanologia. A análise geomorfológica e análise estrutural predominam como as principais aplicações diretas dos produtos geoespaciais nos trabalhos nacionais e internacionais. São análises altamente dependentes de caracterização das feições em superfície e produtos de alta resolução e georreferenciados, como os obtidos através da metodologia proposta neste trabalho, são de grande relevância nas pesquisas que desejam resultados relevantes nestes aspectos.

A análise geomorfológica e análise estrutural em ambientes glaciais e vulcânicos são frequentes nos trabalhos internacionais. Por serem ambientes extremos e de difícil acesso humano, o uso de VANTs têm sido um meio de suprir as impossibilidades e também de obter resultados inovadores e de alta qualidade. Na vulcanologia, alguns trabalhos focam na análise termal a partir dos produtos geoespaciais obtidos, a qual a câmera do VANT utilizado na aquisição das imagens também apresenta o sensor de infravermelho (NIR - Near Infrared), permitindo obter imagens ortorretificadas e MDSs com os dados de temperatura da superfície.

A geologia de engenharia é a área das geociências mais frequente nos trabalhos analisados da base internacional. A alta precisão e resolução dos dados obtidos para a análise de riscos geológicos, em principalmente áreas de deslizamentos de terra, obtendo

assim mapas de riscos geológicos, é um motivo para a alta adesão desta tecnologia nessas pesquisas. Alguns dos trabalhos que analisam processos de movimento de massa possuem uma categorização tênue entre as áreas de geomorfologia e geologia de engenharia. Os trabalhos da área da geologia estrutural são majoritariamente de estruturas rúpteis, com apenas um trabalho analisado que é apenas sobre estrutura dúctil. Isto reflete ao uso direto dos produtos, os quais são majoritariamente utilizados para caracterização de feições lineares em superfície.

O início do uso de VANTs para SfM ocorreu em áreas como geologia de engenharia, geologia estrutural e secundariamente geomorfologia. Com o tempo aplicações em geomorfologia aumentaram consideravelmente em proporção e foram seguidas por usos de outras áreas diversas das geociências. Isso indica um uso inicial concentrado por menor número de pesquisadores em áreas mais especializadas. Com o aumento da acessibilidade a novos modelos de VANTs a partir de 2015 outras áreas diversas passaram a publicar mais trabalhos com essas tecnologias. Entretanto apesar da diversificação, o maior volume de trabalhos ainda hoje é nas áreas de geologia estrutural, geomorfologia e geologia de engenharia.

Áreas com pouca frequência entre as publicações, mas que têm potencial para utilizar cada vez mais as tecnologias analisadas são patrimônio geológico/geoconservação, ensino geológico e petrologia. Patrimônio geológico e geoconservação podem aplicar os produtos geoespaciais para caracterizar os locais de interesse geológico e para a divulgação do conhecimento geológico de uma dada região, promovendo estratégias de geoconservação e geocomunicação. O ensino geológico para alunos de graduação e pós-graduação pode ser auxiliado com as ferramentas disponibilizadas através dos produtos geoespaciais, por exemplo com “aulas de campo virtuais”, análise estrutural e geomorfológica, a fim de melhorar a visualização tridimensional das feições geológicas e sua compreensão. Os trabalhos que envolvem petrologia demonstram avanços substanciais nos resultados com os usos dos produtos geoespaciais. Sobretudo petrologia ígnea, com análise combinada de estrutural no estudo de diques e vulcanismo bem como do estudo dos produtos vulcânicos em áreas de difícil acesso, e petrologia sedimentar com a análise de fácies e paleocorrentes em estruturas sedimentares.

## **6. CONCLUSÕES**

Trabalhos que envolvem diversas áreas da pesquisa geocientífica e que utilizam VANTs para gerar produtos geoespaciais a partir da técnica de SfM foram categorizados a fim de obter um panorama atual dessas publicações no cenário nacional e internacional. Foram analisados um total de 198 trabalhos publicados ou realizados entre 2012 e 2020,

sendo 140 artigos científicos da base de dados internacional e 58 trabalhos diversos da base de dados nacional, sendo estes anais de congressos e eventos nacionais, trabalhos de formatura, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos de revistas nacionais.

As três categorias principais se relacionam ao principais tipos de produtos geoespaciais utilizados, principais aplicações diretas de tais produtos e a área da geociência associada a pesquisa. Além disso, os modelos de VANTs e os softwares utilizados foram analisados para os trabalhos internacionais.

A base de dados nacional possui um grande volume de publicações em outros meios que não artigos acadêmicos e a curva de número de trabalhos nacionais publicados por ano de publicação mostra a tendência do aumento de trabalhos com os anos de congressos nacionais. Isso evidencia que o Brasil encontra-se numa fase inicial do uso dessa tecnologia nas pesquisas geocientíficas, enquanto os trabalhos internacionais demonstram um contínuo crescimento do uso dessa tecnologia nos trabalhos das diversas áreas das geociências.

Os principais produtos utilizados como focos das aplicações são os ortofotomosaicos e MDS, refletindo também as aplicações principais sendo análises de superfície em geomorfologia e estruturas lineares em geologia estrutural. Para gerar modelos 3D de alta qualidade é necessário dar um salto técnico e computacional. O início do uso de VANTs e SfM nas geociências ocorreu em áreas de maior especialização por um número pequeno de pesquisadores. Com o aumento da acessibilidade a novos modelos de VANTs passíveis de obtenção e uso na pesquisa, de acordo com a popularidade das aeronaves a partir de 2015-2016, outras áreas passaram a publicar trabalhos usando essas tecnologias. Mesmo com a diversificação de áreas, geomorfologia, geologia de engenharia e geologia estrutural ainda predominam.

A categorização dos trabalhos analisados permitiu obter resultados que demonstram o panorama geral e atual acerca do uso dessa importante tecnologia no meio geocientífico. O contínuo crescimento mundial dessas técnicas para áreas mais tradicionais e o começo do aparecimento de novas áreas promissoras indicam a relevância deste tema e como a comunidade geocientífica pode utilizar esta tecnologia a seu favor em suas pesquisas. Sobretudo no Brasil, onde há uma relativa escassa utilização de VANTs como instrumento de pesquisa em comparação a base de dados internacional, percebe-se que o foco acerca deste tema pode favorecer a pesquisa científica brasileira como um todo.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Bemis S.P., Micklethwaite S., Turner D., James M.R., Akciz S., Thiele S.T., Bangash H.A.  
2014. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution

- mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology*, 69(Part A):163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jsrg.2014.10.007>
- Birdseye, C.H., 1940. Stereoscopic Phototopographic mapping. *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 30, 1e24. <http://dx.doi.org/10.1080/00045604009357193>
- Bistacchi A., Balsamo F., Storti F., Mozafari M., Swennen R., Solum J., Tueckmantel C., Taberner C. 2015. Photogrammetric digital outcrop reconstruction, visualization with textured surfaces, and three-dimensional structural analysis and modeling: Innovative methodologies applied to fault-related dolomitization (Vajont Limestone, Southern Alps, Italy). *Geosphere*, 11(6):2031-2048. <https://doi.org/10.1130/GES01005.1>
- Eardley, A.J., 1942. *Aerial Photographs: Their Use and Interpretation*. Harper and Brothers, New York.
- Carrivick J.L., Smith M.W., Quincey D.J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. West Sussex: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- 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>
- Moreels, P., Perona, P., 2007. Evaluation of features detectors and descriptors based on 3D objects. *Int. J. Comput. Vis.* 73, 263e284. <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-006-9967-1>.
- Pillmore, C.L., 1964. Application of high-order stereoscopic plotting instruments to photogeologic studies. In: *Procedures and Studies in Photogeology*, Geological Survey Bulletin 1043-B. U.S. Department of the Interior, Geological Survey, Washington, D.C, pp. 22e34.
- Schenk, T., 2005. *Introduction to Photogrammetry*. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA. 95 pages.
- Slama, C.C., Theurer, C., Hendrikson, S.W. 1980. (Ed). *Manual of Photogrammetry* 4th edition. American Society of Photogrammetry. 1056 p.
- Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. 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>

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização geológica do geossítio Boudins do Ilhote de Camburizinho, localizado em São Sebastião, permitiu associar os registros locais com a história evolutiva regional relacionada à formação e posterior rifteamento do Gondwana Ocidental. O estágio de amalgamação culminou com o desenvolvimento da Faixa Ribeira central durante o Ciclo Brasileiro-Pan Africano e a fase de rifteamento gerou o magmatismo Mesozoico durante a formação do Atlântico sul. O ilhote de biotita-ortognaisse apresenta foliação de alto ângulo ( $N60^{\circ}E/75^{\circ}NW$ ). A metodologia utilizada no estudo do geossítio combinou técnicas de campo clássicas com produtos geoespaciais obtidos a partir de imagens de VANT. A imagem ortorretificada de alta resolução (2 cm/pixel) utilizada para mapeamento digital do geossítio permitiu identificar os boudins altamente deformados e estirados compostos por duas litologias distintas, biotita anfibolito e granada xisto, e também medir o sistema de fraturas composto por direções  $N53^{\circ}E$  e  $N66^{\circ}W$  e o dique basáltico de direção  $N40^{\circ}E$ . O modelo tridimensional do afloramento e as imagens panorâmicas foram utilizados para gerar um passeio virtual do local, construindo um registro da relevância da geodiversidade do geossítio e disseminando a informação geológica para o público em geral.

Verificou-se que a técnica de fotogrametria digital Structure from Motion com o uso de imagens de VANT para a geração de produtos geoespaciais, como a utilizada no estudo do geossítio, vem crescendo no meio da pesquisa geocientífica devido às suas vantagens em relação a outros métodos de levantamento de dados de superfície e suas diversas possibilidades de aplicações. A análise comparativa de diversos trabalhos geocientíficos recentes, selecionados a partir de critérios preestabelecidos e que utilizam esta tecnologia, permitiu obter um panorama geral acerca deste tema. Os 140 artigos científicos selecionados da base internacional revelam um aumento crescente de publicações ao longo dos anos, evidenciando a popularização desta técnica e seu promissor avanço nas diversas áreas da geologia. Já os 58 trabalhos selecionados da base de dados nacional, sendo a maioria deles resumos de anais de eventos e apenas três artigos de revistas nacionais, mostram que a curva de aumento das publicações ao longo dos anos não é crescente e é associada sobretudo aos anos em que ocorrem os congressos brasileiros de geologia. Isto demonstra que a tendência de crescimento internacional não segue para os trabalhos nacionais e o Brasil está em um estágio inicial de popularização do uso desta técnica na pesquisa geológica. Os modelos digitais de superfície e as ortografias são os principais produtos utilizados e as áreas de aplicação mais frequentes são áreas tradicionais de análise de superfície, como análise geomorfológica, estrutural e geologia de engenharia.

A área de patrimônio geológico é uma das menos frequentes na análise realizada tanto na base de dados nacional como internacional. Entretanto, é uma área que se mostra promissora para o aumento do uso dessas tecnologias nas pesquisas que envolvem caracterização de geossítios e medidas de geoconservação, geoturismo e disseminação geocientífica. No estudo no geossítio Boudins do Ilhote de Camburizinho o método mostrou-se eficiente no entendimento geológico do local e como meio de valorização da geodiversidade e do patrimônio geológico. Espera-se que mais locais associados ao geossítio sejam estudados a fim de complementar o entendimento dos processos envolvidos, sobretudo no que diz respeito à formação dos boudins da região durante a evolução da Faixa Ribeira central. Por fim, também é esperado que os resultados deste trabalho contribuam para o avanço do entendimento do patrimônio geológico do litoral norte do estado de São Paulo e para futuras pesquisas nacionais utilizando a metodologia abordada.

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Brilha, J. 2002. Geoconservation and protected areas. *Environmental Conservation*, 29(3), 273-276. doi:10.1017/S0376892902000188
- Brilha, J., 2015. Concept of geoconservation. In: Tiess, G., Majumder, T., Cameron, P. (Eds.), *Encyclopedia of Mineral and Energy Policy*. Springer-Verlag, Berlin, p. 2. doi.org/10.1007/978-3-642-40871-7\_2-1
- Brilha, J. 2016. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage* Vol. 8, No 2, 119-134. doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3
- Crofts, R. 2014. Promoting geodiversity: learning lessons from biodiversity. *Proceedings of the Geologists' Association*, 125, pp.263–266. DOI: 10.1016/j.pgeola.2014.03.002
- Crofts, R., Gordon, J.E. 2015. Geoconservation in protected areas G.L. Worboys, M. Lockwood, A. Kothari, S. Feary, I. Pulsford (Eds.), *Protected area governance and management*, Australian National University Press, Canberra, Australia, pp. 531-568
- Gray, M., 2004. *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. 1ª ed. Chichester: John Wiley & Sons. 434p
- Gray, M., 2013. *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. 2ª ed. Chichester: John Wiley & Sons. 495p
- Henriques, M.H., Pena dos Reis, R., Brilha, J., Mota, T. 2011. Geoconservation as an emerging geoscience. *Geoheritage*, 3:117-128. doi.org/10.1007/s12371-011-0039-8

- Prosser, C. D. 2013. Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proceedings of the Geologists' Association*, 124(4), 568–580. doi.org/10.1016/j.pgeola.2012.06.00
- Reynard, E., Brilha, J. (Edts.), 2018. *Geoheritage: assessment, protection and management*. Elsevier, Amsterdam, 450p
- Sharples, C., 1993. *A Methodology for the Identification of Significant Landforms and Geological Sites for Geoconservation Purposes; Report to Forestry Commission, Tasmania*
- Uceda A.C., 2000. Patrimonio geológico: diagnóstico, clasificación y valoración. In: Suárez Valgrande, J.P. (Ed), *Jornadas sobre Património Geológico y Desarrollo Sostenible, Serie Monografías, Ministerio de Medio Ambiente de España*, p. 23-37
- Westoby M., Brasington J., Glasser N., Hambrey M., Reynolds J. 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>
- Wiedenbein, F.W., 1993. Ein Geotopschutzkonzept für Deutschland. In: *Geotopschutz Probleme: der Methodik und der Praktischen*. Saarbrücken, Germany: University of Saarland
- Wimbledon, W.A.P., 2011. Geosites - a mechanism for protection, integrating national and international valuation of heritage sites. *Geologia dell'Ambiente, Supplemento 2*: 13-25

## 8. MATERIAL SUPLEMENTAR

Lista dos 198 trabalhos selecionados e analisados no artigo “Análise comparativa do uso de VANT e produtos geoespaciais aplicado às geociências”

### 8.1 Listagem dos trabalhos da base de dados internacional

Tabela 1: Listagem dos trabalhos da base de dados internacional

| Autor e ano            | Título                                                                                                                                                        |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chandler et al. (2020) | The glacial landsystem of Fjallsjökull, Iceland: Spatial and temporal evolution of process-form regimes at an active temperate glacier                        |
| Wang et al. (2020)     | Refined micro-scale geological disaster susceptibility evaluation based on UAV tilt photography data and weighted certainty factor method in Mountainous Area |
| Zhang et al. (2020)    | Semi-automatic mapping of dyke and dyke-related fractures using UAV-based photogrammetric data: A case study from Sijiao Island, coastal Southeastern China   |

|                             |                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fey and Krainer (2020)      | Analyses of UAV and GNSS based flow velocity variations of the rock glacier Lazaun (Ötztal Alps, South Tyrol, Italy)                                                                                  |
| Zapico et al. (2020)        | Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park                                                                             |
| Yamada et al. (2020)        | Dynamic movement history of the Iiyama slope failure revealed from seismic data                                                                                                                       |
| Tomczyk et al. (2020)       | Geomorphological impacts of a glacier lake outburst flood in the high arctic Zackenberg River, NE Greenland                                                                                           |
| Ren et al. (2020)           | Design and construction of the knowledge base system for geological outfield cavities classifications: An example of the fracture-cavity reservoir outfield in Tarim basin, NW China                  |
| A. Tibaldi et al. (2020)    | Surface deformation and strike-slip faulting controlled by dyking and host rock lithology: A compendium from the Krafla Rift, Iceland                                                                 |
| Turner et al. (2020)        | Identifying and mapping potentially adverse discontinuities in underground excavations using thermal and multispectral UAV imagery                                                                    |
| Walter et al. (2020)        | Underwater and drone based photogrammetry reveals structural control at Geysir geothermal field in Iceland                                                                                            |
| Bogoyavlensky et al. (2020) | Complex of Geophysical Studies of the Seyakha Catastrophic Gas Blowout Crater on the Yamal Peninsula, Russian Arctic                                                                                  |
| Stupar et al. (2020)        | Investigation of Unmanned Aerial Vehicles-Based Photogrammetry for Large Mine Subsidence Monitoring                                                                                                   |
| Akara et al. (2020)         | Enhancing fracture-network characterization and discrete-fracture-network simulation with high-resolution surveys using unmanned aerial vehicles                                                      |
| Gül et al. (2020)           | Using the GNSS method assisted with UAV photogrammetry to monitor and determine deformations of a dump site of three open-pit marble mines in Eliktekké region, Amasya province, Turkey               |
| Specht et al. (2020)        | 3D modelling of beach topography changes caused by the tombolo phenomenon using terrestrial laser scanning (TLS) and unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry on the example of the city of Sopot |
| Ma et al. (2020)            | UAV survey and numerical modeling of loess landslides: an example from Zaoling, southern Shanxi Province, China                                                                                       |

|                           |                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Meng et al. (2020)        | Time-series analysis of the evolution of large-scale loess landslides using InSAR and UAV photogrammetry techniques: a case study in Hongheyan, Gansu Province, Northwest China                             |
| Rodriguez et al. (2020)   | UAVs for monitoring, investigation, and mitigation design of a rock slope with multiple failure mechanisms—a case study                                                                                     |
| Samodra et al. (2020)     | Characterization of displacement and internal structure of landslides from multitemporal UAV and ERT imaging                                                                                                |
| Andriolo et al. (2020)    | Beach-dune morphodynamics and marine macro-litter abundance: An integrated approach with Unmanned Aerial System                                                                                             |
| Tsunetaka et al. (2020)   | Spatial accuracy assessment of unmanned aerial vehicle-based structures from motion multi-view stereo photogrammetry for geomorphic observations in initiation zones of debris flows, Ohya landslide, Japan |
| Yang et al. (2020)        | Badland Erosion and Its Morphometric Features in the Tropical Monsoon Area                                                                                                                                  |
| Sam et al. (2020)         | Small Lava Caves as Possible Exploratory Targets on Mars: Analogies Drawn from UAV Imaging of an Icelandic Lava Field                                                                                       |
| Stalin et al. (2020)      | Application of Unmanned Aerial Vehicle for Mapping and Modeling of Indian Mines                                                                                                                             |
| Hoffmeister et al. (2020) | Monitoring the sedimentary budget and dislocated boulders in western Greece – results since 2008                                                                                                            |
| Francioni et al. (2020)   | Application of Unmanned Aerial Vehicle Data and Discrete Fracture Network Models for Improved Rockfall Simulations                                                                                          |
| Ding et al. (2020)        | Optimized Segmentation Based on the Weighted Aggregation Method for Loess Bank Gully Mapping                                                                                                                |
| Inama et al. (2020)       | Syn depositional fractures and architecture of the lastoni di formin carbonate platform: Insights from virtual outcrop models and field studies                                                             |
| Xiong et al. (2020)       | Offset measurements along active faults based on the structure from motion method e A case study of Gebiling in the Xorkoli section of the Altyn Tagh Fault                                                 |
| Sasak et al. (2020)       | Combined Use of Terrestrial Laser Scanning and UAV Photogrammetry in Mapping Alpine Terrain                                                                                                                 |

|                                      |                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tian et al. (2020)                   | Landslide development within 3 years after the 2015 Mw 7.8 Gorkha earthquake, Nepal                                                                               |
| Gómez-Gutiérrez and Gonçalves (2020) | Surveying coastal cliffs using two UAV platforms (multirotor and fixed-wing) and three different approaches for the estimation of volumetric changes              |
| Karantanellis et al. (2020)          | Object-Based Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Site-Specific Landslide Assessment                                                                |
| Walter et al. (2020)                 | The 2019 Eruption Dynamics and Morphology at Ebeko Volcano Monitored by Unoccupied Aircraft Systems (UAS) and Field Stations                                      |
| Hormes et al. (2020)                 | Innovative methods to monitor rock and mountain slope deformation                                                                                                 |
| James et al. (2020)                  | Volcanological applications of unoccupied aircraft systems (UAS): Developments, strategies, and future challenges                                                 |
| Zorn et al. (2020)                   | UAS-based tracking of the Santiaguito Lava Dome, Guatemala                                                                                                        |
| Giordan et al. (2020)                | The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications                                                                                   |
| Ewertowski et al. (2019)             | Operational Framework for Rapid, Very-high Resolution Mapping of Glacial Geomorphology Using Low-cost Unmanned Aerial Vehicles and Structure-from-Motion Approach |
| Weismüller et al. (2019)             | Structure of massively dilatant faults in Iceland: lessons learned from high-resolution unmanned aerial vehicle data                                              |
| Wójcik et al. (2019)                 | Investigation of Sediment-Rich Glacial Meltwater Plumes Using a High-Resolution Multispectral Sensor Mounted on an Unmanned Aerial Vehicle                        |
| Dragos and Anghel (2019)             | The digital elevation model of Sărata Monteoru and other photogrammetric products obtained through processing data acquired by UAV systems                        |
| Kordić et al. (2019)                 | Integration of Terrestrial Laser Scanning and UAS Photogrammetry in Geological Studies: Examples from Croatia                                                     |
| Meinen and Robinson (2019)           | Streambank topography: an accuracy assessment of UAV-based and traditional 3D reconstructions                                                                     |

|                             |                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cody et al. (2019)          | Geomorphology and geological controls of an active paraglacial rockslide in the New Zealand Southern Alps                                                                                  |
| Jouvet et al. (2019)        | High-Endurance UAV for Monitoring Calving Glaciers: Application to the Inglefield Bredning and Eqip Sermia, Greenland                                                                      |
| Lin et al. (2019)           | Evaluation of UAV LiDAR for Mapping Coastal Environments                                                                                                                                   |
| Peña-Ortega et al. (2019)   | Environmental assessment and historic erosion calculation of abandoned mine tailings from a semi-arid zone of northwestern Mexico: insights from geochemistry and unmanned aerial vehicles |
| Dolphin et al. (2019)       | Virtual field experiences in introductory geology: Addressing a capacity problem, but finding a pedagogical one                                                                            |
| Niedzielski et al. (2019)   | Estimating snow water equivalent using unmanned aerial vehicles for determining snow-melt runoff                                                                                           |
| Dille et al. (2019)         | Causes and triggers of deep-seated hillslope instability in the tropics – Insights from a 60-year record of Ikoma landslide (DR Congo)                                                     |
| Menegoni et al. (2019)      | Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery – Ormea rock slope, Italy               |
| Deffontaines et al. (2019)  | Neotectonics of the Southern Hengchun Peninsula (Taiwan): Inputs from high resolution UAS Digital Terrain Model, updated geological mapping and PSInSAR techniques                         |
| Fazio et al. (2019)         | A new methodological approach to assess the stability of discontinuous rocky cliffs using in-situ surveys supported by UAV-based techniques and 3D finite element model: a case study      |
| Triantafyllou et al. (2019) | 3D digital outcrop model for analysis of brittle deformation and lithological mapping (Lorette cave, Belgium)                                                                              |
| Galland et al. (2019)       | Structure, emplacement mechanism and magma-flow significance of igneous fingers – Implications for sill emplacement in sedimentary basins                                                  |
| Jordan (2019)               | Collecting field data in volcanic landscapes using small UAS(sUAS)/drones                                                                                                                  |
| Gilham et al. (2019)        | Detection and analysis of mass wasting events in chalk sea cliffs using UAV photogrammetry                                                                                                 |

|                          |                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bonali et al. (2019)     | UAV-based surveying in volcano-tectonics: An example from the Iceland rift                                                                                                                          |
| Quashigaha et al. (2019) | Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned Aerial Vehicles (Drone)                                                                   |
| Oliveira et al. (2019)   | Coastal paleokarst landforms: A morphometric approach via UAV for coastal management (Algarve, Portugal case study)                                                                                 |
| Comert et al. (2019)     | Mapping of shallow landslides with object-based image analysis from unmanned aerial vehicle data                                                                                                    |
| Groos et al. (2019)      | The Potential of Low-Cost UAVs and Open-Source Photogrammetry Software for High-Resolution Monitoring of Alpine Glaciers: A Case Study from the Kanderfirn (Swiss Alps)                             |
| Pellicani et al. (2019)  | UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy)                                            |
| Marini et al. (2019)     | Insight into Heterogeneous Calcite Cementation of Turbidite Channel-Fills from UAV Photogrammetry                                                                                                   |
| De Beni et al. (2019)    | UAVs for volcano monitoring: A new approach applied on an active lava flow on Mt. Etna (Italy), during the 27 February–02 March 2017 eruption                                                       |
| Sayab et al. (2019)      | A succession of near-orthogonal horizontal tectonic shortening in the Paleoproterozoic Central Lapland Greenstone Belt of Fennoscandia: constraints from the world-class Suurikuusikko gold deposit |
| Wang et al. (2019)       | Multistep rocky slope stability analysis based on unmanned aerial vehicle photogrammetry                                                                                                            |
| Liu et al. (2019)        | Application of 3D-DDA integrated with unmanned aerial vehicle–laser scanner (UAV-LS) photogrammetry for stability analysis of a blocky rock mass slope                                              |
| Dering et al. (2019)     | Review of drones, photogrammetry and emerging sensor technology for the study of dykes: Best practises and future potential                                                                         |
| Behrman et al. (2019)    | Drone Geologic Mapping of an Active Sand and Gravel Quarry, Desoto County, Mississippi                                                                                                              |
| Cox et al. (2018)        | Aerial and terrestrial-based monitoring of channel erosion, headcutting, and sinuosity                                                                                                              |
| Ma et al. (2018)         | Geometric and kinematic features of a landslide in Mabian Sichuan, China, derived from UAV photography                                                                                              |
| Templin et al. (2018)    | Application of Low-Cost Fixed-Wing UAV for Inland Lakes Shoreline Investigation                                                                                                                     |
| Rossi et al. (2018)      | Multitemporal UAV surveys for landslide mapping and characterization                                                                                                                                |

|                              |                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wang et al. (2018)           | Quantitative extraction of the bedrock exposure rate based on unmanned aerial vehicle data and Landsat-8 OLI image in a karst environment                                                                             |
| Obanawa et al. (2018)        | Variations in volumetric erosion rates of bedrock cliffs on a small inaccessible coastal island determined using measurements by an unmanned aerial vehicle with structure-from-motion and terrestrial laser scanning |
| Niedzielski et al. (2018)    | Automated Snow Extent Mapping Based on Orthophoto Images from Unmanned Aerial Vehicles                                                                                                                                |
| Kasprzak et al. (2018)       | UAV and SfM in Detailed Geomorphological Mapping of Granite Tors: An Example of Staros 'cin'skie Skały (Sudetes, SW Poland)                                                                                           |
| Favalli et al. (2018)        | UAV-based remote sensing surveys of lava flow fields: a case study from Etna's 1974 channel-fed lava flows                                                                                                            |
| Kirsch et al. (2018)         | Integration of Terrestrial and Drone-Borne Hyperspectral and Photogrammetric Sensing Methods for Exploration Mapping and Mining Monitoring                                                                            |
| Salvini et al. (2018)        | Use of a remotely piloted aircraft system for hazard assessment in a rocky mining area (Lucca, Italy)                                                                                                                 |
| Nesbit et al. (2018)         | 3-D stratigraphic mapping using a digital outcrop model derived from UAV images and structure-from-motion photogrammetry                                                                                              |
| Walter et al. (2018)         | Localized and distributed erosion triggered by the 2015 Hurricane Patricia investigated by repeated drone surveys and time lapse cameras at Volcán de Colima, Mexico                                                  |
| Zmarz et al. (2018)          | Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem                                                                                                                        |
| F. Fantia et al. (2018)      | High-resolution maps of Khulsan and Nemegt localities (Nemegt Basin, southern Mongolia): Stratigraphic implications                                                                                                   |
| Xing et al. (2018)           | Diverse sauropod-theropod-dominated track assemblage from the Lower Cretaceous Dasheng Group of Eastern China: Testing the use of drones in footprint documentation                                                   |
| Di Felice et al. (2018)      | Drone high resolution infrared imaging of the Lusi mud eruption                                                                                                                                                       |
| Madjid et al. (2018)         | Drones in carbonate geology: Opportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping                                                                                                     |
| Darmawan et al. (2018)       | Morphological and structural changes at the Merapi lava dome monitored in 2012–15 using unmanned aerial vehicles (UAVs)                                                                                               |
| Valkaniotis et al. (2018)    | Mapping an earthquake-induced landslide based on UAV imagery; case study of the 2015 Okeanos landslide, Lefkada, Greece                                                                                               |
| Daniel Solazzo et al. (2018) | Mapping and measuring aeolian sand dunes with photogrammetry and LiDAR from unmanned aerial vehicles (UAV) and multispectral satellite imagery on the Paria Plateau, AZ, USA                                          |
| Rossini et al. (2018)        | Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry                                                                                                                                          |
| Gomez and Kennedy (2018)     | Capturing volcanic plumes in 3D with UAV-based photogrammetry at Yasur Volcano – Vanuatu                                                                                                                              |

|                                |                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tziavou et al. (2018)          | Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results                                                                               |
| Pérez-García et al. (2018)     | Georeferenced thermal infrared images from UAV surveys as a potential tool to detect and characterize shallow cave ducts                                                                        |
| Santos et al. (2018)           | Methodologies to Represent and Promote the Geoheritage Using Unmanned Aerial Vehicles, Multimedia Technologies, and Augmented Reality                                                           |
| Menegoni et al. (2018)         | Analysis by UAV Digital Photogrammetry of Folds and Related Fractures in the Monte Antola Flysch Formation (Ponte Organasco, Italy)                                                             |
| Xiao et al. (2018)             | A new approach to study terrestrial yardang geomorphology based on high-resolution data acquired by unmanned aerial vehicles (UAVs): A showcase of whaleback yardangs in Qaidam Basin, NW China |
| Hänsel et al. (2018)           | Mud Flow Reconstruction by Means of Physical Erosion Modeling, High-Resolution Radar-Based Precipitation Data, and UAV Monitoring                                                               |
| Duró et al. (2018)             | Bank erosion processes measured with UAV-SfM along complex banklines of a straight mid-sized river reach                                                                                        |
| Fernández-Lozano et al. (2018) | New Perspectives for UAV-Based Modelling the Roman Gold Mining Infrastructure in NW Spain                                                                                                       |
| Nikolakopoulos et al. (2018)   | Synergistic Use of UAV and USV Data and Petrographic Analyses for the Investigation of Beachrock Formations: A Case Study from Syros Island, Aegean Sea, Greece                                 |
| Jouvet et al. (2018)           | Short-lived ice speed-up and plume water flow captured by a VTOL UAV give insights into subglacial hydrological system of Bowdoin Glacier                                                       |
| Xiang et al. (2018)            | Open-pit mine geomorphic changes analysis using multi-temporal UAV survey                                                                                                                       |
| Nikolakopoulos et al. (2017)   | Preliminary results from active landslide monitoring using multidisciplinary surveys                                                                                                            |
| Bernard et al. (2017)          | Using a small COTS UAV to quantify moraine dynamics induced by climate shift in Arctic environments                                                                                             |
| Ely et al. (2017)              | Using UAV acquired photography and structure from motion techniques for studying glacier landforms: application to the glacial flutes at Isfallsglaciären                                       |
| Muller et al. (2017)           | High-Resolution Digital Elevation Modeling from TLS and UAV Campaign Reveals Structural Complexity at the 2014/2015 Holuhraun Eruption Site, Iceland                                            |

|                                    |                                                                                                                                                                                 |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Turner et al. (2017)               | Lava flow hazard prediction and monitoring with UAS: a case study from the 2014–2015 Pāhoa lava flow crisis, Hawai'i                                                            |
| Marinos et al. (2017)              | Beyond the boundaries of feasible engineering geological solutions: stability considerations of the spectacular Red Beach cliffs on Santorini Island, Greece                    |
| Yu et al. (2017)                   | Modeling of landslide topography based on micro-unmanned aerial vehicle photography and structure-from-motion                                                                   |
| Cigna et al. (2017)                | Mapping Ground Instability in Areas of Geotechnical Infrastructure Using Satellite InSAR and Small UAV Surveying: A Case Study in Northern Ireland                              |
| Dąbski et al. (2017)               | UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica)                                       |
| Lozano and Gutiérrez-Alonso (2017) | The Alejico Carboniferous Forest: a 3D-Terrestrial and UAV-Assisted Photogrammetric Model for Geologic Heritage Preservation                                                    |
| Chesley et al. (2017)              | Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA                 |
| Savastano et al. (2017)            | Rift brittle deformation of SE-Brazilian continental margin: Kinematic analysis of onshore structures relative to the transfer and accommodation zones of southern Campos Basin |
| Silva et al. (2017)                | Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints                    |
| Cawood et al. (2017)               | LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models                                                                                       |
| Clapuyt et al. (2017)              | Unravelling earth flow dynamics with 3-D time series derived from UAV-SfM models                                                                                                |
| Nieminski and Graham (2017)        | Modeling Stratigraphic Architecture Using Small Unmanned Aerial Vehicles And Photogrammetry: Examples From The Miocene East Coast Basin, New Zealand                            |
| Suh et al. (2017)                  | Mapping hazardous mining-induced sinkhole subsidence using unmanned aerial vehicle (drone) photogrammetry                                                                       |
| Hu et al. (2017)                   | Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs                                                                 |
| Huang et al. (2017)                | Unmanned aerial vehicle based remote sensing method for monitoring a steep mountainous slope in the Three Gorges Reservoir, China                                               |
| Salvini et al. (2017)              | The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling                      |
| Piras et al. (2016)                | Detailed geological mapping in mountain areas using an unmanned aerial vehicle: application to                                                                                  |

|                            |                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            | the Rodoretto Valley, NW Italian Alps                                                                                                                                               |
| Blistan et al. (2016)      | Using UAV photogrammetry to document rock outcrops                                                                                                                                  |
| Harvey et al. (2016)       | Drone with thermal infrared camera provides high resolution georeferenced imagery of the Waikite geothermal area, New Zealand                                                       |
| Vollgger and Cruden (2016) | Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia                                               |
| Nishar et al. (2016)       | Thermal infrared imaging of geothermal environments and by an unmanned aerial vehicle (UAV): A case study of the Wairakei e Tauhara geothermal field, Taupo, New Zealand            |
| Neugirg et al (2016)       | Erosion processes in calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys                           |
| Bhardwaj et al. (2016)     | UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects                                                                                            |
| Tonkin et al. (2016)       | Ice-cored moraine degradation mapped and quantified using an unmanned aerial vehicle: A case study from a polythermal glacier in Svalbard                                           |
| Peternel et al. (2016)     | Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements                                                                        |
| Francioni et al. (2015)    | An integrated remote sensing-GIS approach for the analysis of an open pit in the Carrara marble district, Italy: Slope stability assessment through kinematic and numerical methods |
| Bemis et al. (2014)        | Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high- resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology                                                  |
| Immerzeel et al. (2014)    | High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles                                                                                             |
| Vasuki et al. (2014)       | Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach                                                                    |
| Niethammer et al. (2012)   | UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results                                                                                                       |

## 8.2 Listagem dos trabalhos da base de dados nacional

Tabela 2: Listagem dos trabalhos da base de dados nacional

| Autores                                                                    | Ano e fonte             | Título                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Silva, M.L.N.;<br>Nascimento, M.A.L.;<br>Mansur, K.L.;<br>Medeiros, G.L.D. | Anais 49° CBG -<br>2018 | Metodologias tridimensionais em geoconservação: fotogrametria no geossítio Morro do Cruzeiro – Geoparque Seridó / RN            |
| Kroth, M.; Guadagnin, F;<br>Nóbrega, K.A.C.;<br>Kumaira, S                 | Anais 49° CBG -<br>2018 | Ferramentas de geotecnologias aplicadas ao ensino de Geologia Estrutural através da metodologia problem-based learning          |
| Assumpção, H.C.P. ;<br>Oliveira, L.M                                       | Anais 49° CBG -<br>2018 | Utilização da aerofotogrametria, aplicada com VANT (veículo aéreo não tripulado), para auxílio no mapeamento de áreas de riscos |

|                                                                            |                          |                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                            |                          | geológicos no bairro do Rio Vermelho – Salvador, BA                                                                                                                    |
| González Chiozza, S. et al.                                                | Anais 49° CBG - 2018     | Espeleometria e modelagem 3D da Gruta Casa de Pedra, Ceará                                                                                                             |
| Trindade, S.; Collischon L. ; Rosa M.L.C.C. ; Barboza E.G                  | Anais 49° CBG - 2018     | Caracterização geomorfológica de dois sistemas deltaicos presentes em lagoas do litoral norte do Rio Grande do Sul.                                                    |
| Oliveira, H.M.; Mota, R.C.; Fortes, P.T.F.O.                               | Anais 49° CBG - 2018     | Geologia dos costões rochosos e ilhas costeiras do município de Guarapari (ES)                                                                                         |
| Fleury, F.B.C; Soares, L.P                                                 | Anais 49° CBG - 2018     | O uso de VANTs como ferramenta de baixo custo na geração de base cartográfica 2D e 3D de alta resolução em geologia: caso de estudo da Pedreira do Tamboril, Unaí – MG |
| Filipe, F.S. et al.                                                        | Anais 49° CBG - 2018     | Lithological classification using UAV imagery and machine learning techniques on and open pit mine                                                                     |
| Lima, L. F. A. ; Silva, A.T                                                | Anais 49° CBG - 2018     | Geração de modelo numérico de superfície para modelagem geológica 3D a partir de imagens obtidas por RPAS (drone) através da aerofotogrametria digital                 |
| Rocha, G.S.; Azeredo, R. B.; Faria, M. P. G.1; Cirolini, A.; Bruch, A. F.  | Anais 49° CBG - 2018     | Análise dos lineamentos estruturais através de imagens SRTM e de altíssima resolução espacial                                                                          |
| Rosa, M.C.; Morales, N., Savastano, V.L.M., Assine, M.L                    | Anais 49° CBG - 2018     | Uso de imagens VANT em análise estrutural: aplicação no estudo da tectônica da fase rifte da Bacia do Araripe                                                          |
| Savastano, V.L.M et al.                                                    | Anais 48° CBG - 2016     | O uso de VANT s como ferramenta geotecnológica aplicada em estudos diversos                                                                                            |
| Santos, I.C.A.B.A et al.                                                   | Anais 48° CBG - 2016     | Mapeamento estrutural de bandas de deformação utilizando VANTs                                                                                                         |
| Duque, T.R.F                                                               | Anais 48° CBG - 2016     | Uso de drone de pequeno porte (aeromodelo) no mapeamento geológico                                                                                                     |
| Silva, C. A.; Bicho, C. P.;Fonteles, H. R. N. ; Duarte, C. R.              | Anais 47° CBG - 2014     | Cálculo do volume das pilhas de rejeito de calcário (Pedra Variri) em Nova Olinda-CE utilizando VANT                                                                   |
| Renner, L. C. et al.                                                       | Anais 47° CBG - 2014     | Uso de aerofotomosaico adquirido por VANT aplicado na quantificação do volume de pilhas em mineração                                                                   |
| Cristina Prando Bicho; Lenildo Santos Da Silva; Giuliano Sant'anna Marotta | Anais 46° CBG - 2012     | VANT (veículo aéreo não tripulado) – uma nova tendência na fiscalização de atividades minerais não tituladas                                                           |
| Tarsila Barbosa Dantas                                                     | Dissertação UFRN - 2020  | correlação entre a morfologia e a geometria interna de dunas eólicas parabólicas, com auxílio de GPR                                                                   |
| Ana Paula Piazza Forgiarini                                                | Dissertação FURG - 2019  | Quantificação da influência da geomorfologia e urbanização no recuo da linha de costa em cenários de elevação do nível do mar                                          |
| Lucas Moreira Furlan                                                       | Dissertação UNESP - 2019 | Hidrodinâmica em área úmida de cerrado na chapada sedimentar do oeste mineiro                                                                                          |
| Sidney Andrade De Lima                                                     | Dissertação INPE - 2018  | Avaliação da acurácia do posicionamento e orientação de aeronaves remotamente pilotadas com uso de técnicas de fotogrametria e processamento digital de imagens        |

|                                   |                                       |                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lucas Leonardo Swerts Esteves     | Dissertação UFOP - 2018               | Simulação do processo de queda de blocos em taludes da serra do itacolomi                                                                                                                                       |
| Henrique Sampaio De Castro        | Dissertação UFC - 2018                | Controle litoestrutural nos relevos saprolíticos sobre o batólito de Quixadá e entorno-CE                                                                                                                       |
| Gabriel De Souza                  | Dissertação UFRGS - 2018              | Análise da influência das configurações dos pontos de apoio e do voo na acurácia de ortofotomosaicos elaborados a partir de dados de VANT                                                                       |
| Daniel Quintino Silva             | Dissertação UFPE - 2018               | Viabilidade e acurácia de VANT para o monitoramento costeiro tridimensional                                                                                                                                     |
| Renata Emily Brito De Araujo      | Dissertação UFRN - 2018               | O papel das falhas na evolução das bandas de deformação na Bacia do Rio do Peixe                                                                                                                                |
| Eduardo Evangelista Ferreira      | Dissertação UFOP - 2017               | Patrimônio mineiro na Serra do Veloso em Ouro Preto – MG: registro, análise e proposição de circuitos geoturísticos interpretativos                                                                             |
| Vitor Lamy Mesiano Savastano      | Dissertação UFRJ - 2016               | Análise estrutural e cronologia das estruturas de natureza rúptil do embasamento cristalino na margem continental do SE brasileiro relacionadas a zonas de acomodação do pré- e sin-rifte da Bacia de Campos-RJ |
| Orildo De Lima E Silva            | Dissertação UFRN - 2016               | Evolução dos processos de carstificação da Formação Jandaíra, Bacia Potiguar, utilizando dados obtidos por LIDAR e VANT                                                                                         |
| Mikaelle Araujo Carneiro          | Dissertação UFRN - 2015               | Estudo tectônico e morfoestrutural do carste na Formação Jandaíra, Bacia Potiguar                                                                                                                               |
| Antonio Lisboa Fernandes Junior   | Dissertação UFRN - 2014               | Interpretação de imagens de GPR em ambiente cárstico guiada por comparação com afloramentos e imagens de veículo aéreo não tripulado                                                                            |
| Alexandre Moreno Richwin Ferreira | Dissertação UNB - 2014                | Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado -VANT, para uso em aerolevantamentos                                                                                        |
| Pedro Benedito Casagrande         | Teses UFMG - 2019                     | Geologia e geoprocessamento aplicados ao ordenamento territorial                                                                                                                                                |
| Juliana Gomes Rabelo              | Teses UFRN - 2019                     | Estudo de zonas de fraturas de alta permeabilidade através de mapeamento estrutural e modelagem numérica na Formação Jandaíra, Bacia Potiguar                                                                   |
| Leonlene De Sousa Aguiar          | Teses UFRN - 2018                     | Risco por inundação costeira na foz estuarina do rio Apodimossoró/RN: aplicações de geotecnologias e simulações de mudanças climáticas                                                                          |
| Ivaneide De Oliveira Santos       | Teses UFPE - 2017                     | Representação e valorização do patrimônio geológico: recursos interativos online no cânion do rio São Francisco no Brasil e de lugares de interesse geológico em Portugal utilizando realidade aumentada        |
| Frederico Maranzato Scarelli      | Teses UFRGS - 2016                    | Integração de geotecnologias como subsídio a gestão integrada de zonas costeiras, Capão Novo (RS-Brasil) e Ravenna (ER-Itália)                                                                                  |
| Raphael Camêlo Santana            | Trabalho de Formatura UFRJ - 2019     | Uso de modelo virtual de afloramento como uma ferramenta de interpretação geológica – um estudo de caso na Bacia de Volta Redonda (RJ)                                                                          |
| Daniele Martins Soares            | Trabalho de Formatura UNIPAMPA - 2019 | Estratigrafia de alta frequência e modelagem de reservatório a partir de modelos virtuais de afloramento, exemplo da Formação Pedra Pintada, Bacia do Camaquã                                                   |
| Érika Piacheski De Abreu          | Trabalho de Formatura                 | Pesquisa geológica e caracterização tecnológica de riodacito para uso em rocha ornamental e de revestimento - Garibaldi- RS                                                                                     |

|                                                           |                                                                       |                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                           | UFRGS - 2019                                                          |                                                                                                                                                            |
| Felipe Martins De Miranda Ribeiro                         | Trabalho de Formatura UFRJ - 2018                                     | Análise das estruturas dúcteis do embasamento Paleoproterozóico da Praia das Conchas, Cabo Frio, RJ                                                        |
| Giovanni Argenta Pasetto                                  | Trabalho de Formatura UNIPAMPA - 2018                                 | Modelagem geológica 3D utilizando aerofotogrametria com VANT em mina de mármore no município de Caçapava do Sul – RS                                       |
| Lucas Martini                                             | Trabalho de Formatura UNIPAMPA - 2018                                 | Caracterização de descontinuidades com o auxílio de VANT aplicada à pesquisa de rocha ornamental no Complexo Metamórfico Palma, São Gabriel (RS)           |
| Bruno Scorsatto Menegon                                   | Trabalho de Formatura UFRGS - 2016                                    | O controle geológico de áreas suscetíveis à inundação: um exemplo no município de Santa Vitória do Palmar                                                  |
| Franca-Rocha et al.                                       | V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO (2019)                  | Aplicação da aerofotogrametria com drones na caracterização e planejamento de geossítios: o caso do Cânion do Rio Sergi                                    |
| Cristiano Fernandes Ferreira; Rogério Elias Soares Uagoda | 35o Congresso Brasileiro de Espeleologia - 2019                       | O uso de veículo aéreo não tripulado - VANT para construção de modelos digitais de terreno – MDT e identificação de dolinas na área da Gruna da Tarimba-GO |
| Alanah Alexandra Paiva Dos Reis et al.                    | IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental - REGEO - 2019         | Estudo do comportamento geotécnico de uma voçoroca.                                                                                                        |
| Karina Assumpção Da Costa Nóbrega et al.                  | 10° Salão Internacional De Ensino, Pesquisa E Extensão - SIEPE - 2018 | Utilização de modelos virtuais de afloramentos para análise estrutural, aplicada à recursos não convencionais                                              |
| Felipe Guadagnin et al.                                   | Xvi Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos - 2017                    | Modelos virtuais de afloramentos aplicados ao ensino de geologia estrutural e tectônica                                                                    |
| Adriano Oliveira et al.                                   | 9° Salão Internacional De Ensino, Pesquisa E Extensão - SIEPE - 2017  | Estratigrafia da Formação Pedra do Segredo: exercício com base em sensoriamento remoto de alta resolução                                                   |
| Julio Almeida Moreira et al.                              | XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica - INIC          | Uso de VANT para fotointerpretação de lineamentos                                                                                                          |

|                                                               |                                                        |                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                               | - 2017                                                 |                                                                                                                                                 |
| Lorena Sávilla Brito Oliveira; Francisco Hilário Rego Bezerra | VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto- 2015  | Identificação de falhas carstificadas na Bacia Potiguar utilizando imagens de VANT/drone                                                        |
| Alanny Christiny Costa De Melo et al.                         | VII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - 2015 | Identificação de falhas no pós-rifte da Bacia Potiguar utilizando VANT e dados sísmicos                                                         |
| Vítor Lamy Mesiano Savastano et al.                           | XV Simpósio Nacional De Estudos Tectônicos - 2015      | Uso de VANTs na análise estrutural do pontal norte da Praia das Conchas, município de Cabo Frio – RJ                                            |
| Rodrigo Silva Simões; Ulisses Rocha De Oliveira               | Quaternary and Environmental Geosciences - 2020        | Monitoramento mensal da linha de costa no Balneário Mostardense - RS entre 2016/2017 utilizando dados de VANT                                   |
| Pedro Andrade Coelho et al.                                   | Brazilian Journal of Development - 2019                | Avaliação do uso de aerolevantamentos com VANT e processos fotogramétricos para a determinação indireta de parâmetros geológicos estruturais    |
| Silva, M.L.N. et al.                                          | Terrae - 2019                                          | Uso de fotogrametria digital na elaboração de modelos tridimensionais com aplicação em Geoconservação e educação                                |
| Cristhyano Cavali Da Luz & Alzir Felipe Buffara Antunes       | Revista Brasileira de Cartografia - 2015               | Validação da tecnologia vant na atualização de bases de dados cartográficos geológicos – estudo de caso: sistema cárstico do rio João Rodrigues |