

CARTOGRAFIAS HISTÓRICAS DA ANTÁRTICA: O USO DE DRONES NA MODELAGEM DIGITAL DE SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS

Guilherme Gandra Franco¹

Andres Zarankin²

Fernanda Covevilla Soares³

Luara Antunes Stollmeier⁴

Maria Jimena Cruz⁵

RESUMO

O presente estudo integra ciência arqueológica, geotecnologias e cartografia para evidenciar a aplicabilidade de Gêmeos Digitais no levantamento e registro do patrimônio arqueológico na Antártica a partir do uso de *drones* e do algoritmo de modelagem *Structure from Motion* (SfM). O trabalho evidencia como avanços recentes em *hardwares* e visão computacional tornaram essas ferramentas mais acessíveis e operacionais, inclusive em ambientes extremos. Os resultados confirmam a integridade estrutural dos vestígios já catalogados, ampliam a compreensão do contexto paisagístico e oferecem subsídios para estratégias futuras de conservação e mediação pública de conhecimentos científicos. A pesquisa destaca o protagonismo da ciência brasileira no continente Antártico e propõe uma metodologia não intrusiva, de baixo custo e replicável.

PALAVRAS-CHAVE: Aeronaves Remotamente Pilotadas; Arqueologia; Patrimônio histórico; Aerofotogrametria; Gêmeos Digitais.

CARTOGRAPHIES OF THE ANTARCTIC PAST: DRONE-BASED DIGITAL MODELING OF ARCHAEOLOGICAL SITES

ABSTRACT

This study integrates archaeological science, geotechnologies, and cartography to demonstrate the use of Digital Twins in the preservation of historical heritage in Antarctica through drones and the Structure from Motion (SfM) algorithm. The work highlights how recent advances in hardware and computer vision have made these tools more accessible and operational, even in

¹Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Estudos Antárticos em Ciências Humanas - UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. Email: guigandra@yahoo.com.br

²Doutor em História, Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Estudos Antárticos em Ciências Humanas - UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. Email: zarankin@yahoo.com

³ Doutora em Arqueologia, Universidade Federal do Piauí - UFPI, Teresina, PI, Brasil. E-mail: fernandacodevilla@ufpi.edu.br

⁴Doutora em Arqueologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Laboratório de Estudos Antárticos em Ciências Humanas - UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil. Email: luarastollmeier@gmail.com

⁵ Doutora em Arqueologia, Museu Nacional, Universidade Federal de Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. E-mail: jimenacrz@gmail.com

extreme environments. The results confirm the structural integrity of previously catalogued remains, expand the understanding of the surrounding landscape, and provide support for future conservation and educational strategies. The research highlights the leadership of Brazilian science on the Antarctic continent and proposes a non-intrusive, low-cost, and replicable methodology.

KEYWORDS: Remotely Piloted Aircraft; Archaeology; Historical Heritage; Aerial Photogrammetry; Digital Twin.

CARTOGRAFÍAS DEL PASADO ANTÁRTICO: USO DE DRONES EN LA MODELACIÓN DIGITAL DE SITIOS ARQUEOLÓGICOS

RESUMEN

Este estudio integra ciencia arqueológica, geotecnologías y cartografía para demostrar el uso de Gemelos Digitales en la preservación del patrimonio histórico en la Antártida mediante drones y el algoritmo Structure from Motion (SfM). El trabajo destaca cómo los avances recientes en hardware y visión computacional han hecho que estas herramientas sean más accesibles y operativas, incluso en entornos extremos. Los resultados confirman la integridad estructural de los vestigios previamente catalogados, amplían la comprensión del paisaje circundante y ofrecen soporte para futuras estrategias de conservación y educación. La investigación resalta el protagonismo de la ciencia brasileña en el continente antártico y propone una metodología no intrusiva, de bajo costo y replicable.

PALABRAS-CLAVE: Aeronaves Pilotadas a Distancia; Arqueología; Patrimonio Histórico; Fotogrametría Aérea; Gemelos Digitales.

1. INTRODUÇÃO

A computação gráfica exerce hoje um papel relevante e multifacetado na vida cotidiana, consolida-se tanto como uma forma de arte voltada à comunicação visual quanto como uma ciência transdisciplinar que integra fundamentos da física, da matemática e da engenharia de softwares. Embora sua origem remonte aos anos 1950, seu desenvolvimento ganhou impulso significativo a partir da popularização dos computadores pessoais e da evolução de arquiteturas computacionais sobretudo no final da década de 1970 (HUGHES, 2013).

Frente a célere corrida computacional observada no século XX, foi nos anos 1990 que o conceito dos Gêmeos Digitais (*Digital Twin* ou DT) consolidou-se, mesmo com as restrições técnicas da época, as quais foram superadas conforme a tecnologia computacional avançava. A partir de 2010, a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e infraestruturas em nuvem tornaram os DT tecnicamente viáveis e escaláveis para várias aplicações (SIGH *et al*, 2021).

Um dos principais agentes patrocinadores dos DT foi a indústria ligada ao setor de manufatura, que passou a demandar a modelagem digital de objetos físicos por meio de *softwares* capazes de simular seu comportamento real, com o objetivo de testar, monitorar e prever o desempenho desses sistemas (CRESPI *et al*, 2021). Plataformas como *Computer Aided Design* (CAD) e *Building Information Modeling* (BIM) permitiram uma mudança conceitual no modo de projetar e gerenciar construções, além de transferir para o meio digital não apenas a representação geométrica dos objetos, mas também informações funcionais, estruturais e operacionais (PEREZ-SANCHEZ *et al*, 2017).

Este ambiente instigou transformações que vão além da indústria, como também os campos da ciência, da cultura, da educação e das políticas públicas, ao promover novas formas de produzir conhecimento, gerenciar cidades, conservar patrimônios e interagir com o mundo físico por meio de suas representações digitais. No âmbito do patrimônio cultural material, por exemplo, observa-se uma mobilização da comunidade científica na busca por estratégias preventivas de conservação através de tecnologias de monitoramento contínuo. A modelagem computacional desses elementos é amplamente aplicada, desde grandes conjuntos arquitetônicos até peças singulares de alto valor simbólico — especialmente aquelas expostas a riscos provocados por intempéries naturais ou ações humanas, como vandalismo e conflitos armados —, comprometendo não apenas sua estabilidade física, mas também a continuidade das narrativas históricas, sociais e simbólicas que representam. (FALCONE *et al* 2021; HUSTON *et al*, 2023; KONG & HUCKS 2023;).

Embora a inspeção visual realizada por técnicos especializados continue sendo a prática mais eficaz para avaliar tais estruturas, ela demanda tempo de coleta em campo e consequentemente denota um maior custo. Apesar de não substituir os métodos tradicionais, como resposta às tentativas de aumento da capilaridade das investigações arqueológicas, pesquisas recentes vêm adotando sensores físicos para prospecção ou monitoramento estrutural como o *Light Detection and Ranging* (LiDAR). A tecnologia consiste em um sensor ativo, que pode ser embarcado em aeronaves ou instalado na superfície terrestre. Seu funcionamento opera por meio de emissão de pulsos *laser* para medir distâncias com alta precisão dos alvos, sendo capaz de penetrar nas copas de árvores para modelar tridimensionalmente terrenos e objetos com maior precisão e detalhamento. Em seu estudo na Amazônia boliviana, Prummes *et al* (2022) relata que dificuldades logísticas em mapear áreas florestadas limitaram o conhecimento

sobre a arquitetura desses locais. Para superar essa lacuna, o estudo realizou mapeamento aéreo de 20.000 hectares com o sensor em áreas possivelmente ocupadas pela cultura Casabre. Após o processamento dos dados foi possível identificar uma paisagem altamente organizada, com sistemas sofisticados de agricultura, aquicultura e manejo da água.

Apesar do LiDAR embarcado em aeronaves pilotadas ser uma ferramenta eficiente para o mapeamento de grandes áreas, seu uso pode se tornar inviável em contextos com restrições logísticas, sobretudo devido às exigências operacionais e custos envolvidos. Em contrapartida, regiões sem cobertura vegetal oferecem condições ideais para a aplicação de métodos alternativos, como o *Structure from Motion* (SfM). Esta técnica de fotogrametria associada à visão computacional permite reconstruir modelos tridimensionais a partir de múltiplas imagens bidimensionais obtidas de diferentes ângulos. Este conjunto de algoritmos demanda uma infraestrutura mais simples e ainda assim é capaz de representar dados com alto nível de precisão e detalhamento (CUCCHIARO *et al.*, 2020; ACKE *et al.*, 2021). Quando associado ao uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), popularmente designada como *drones*, o SfM potencializa a resolução espacial dos dados, uma vez que as informações podem ser coletadas em baixas altitudes, que permite modelar detalhes sutis da superfície e das feições arqueológicas com elevado grau de fidelidade geométrica (FRANCO, 2021).

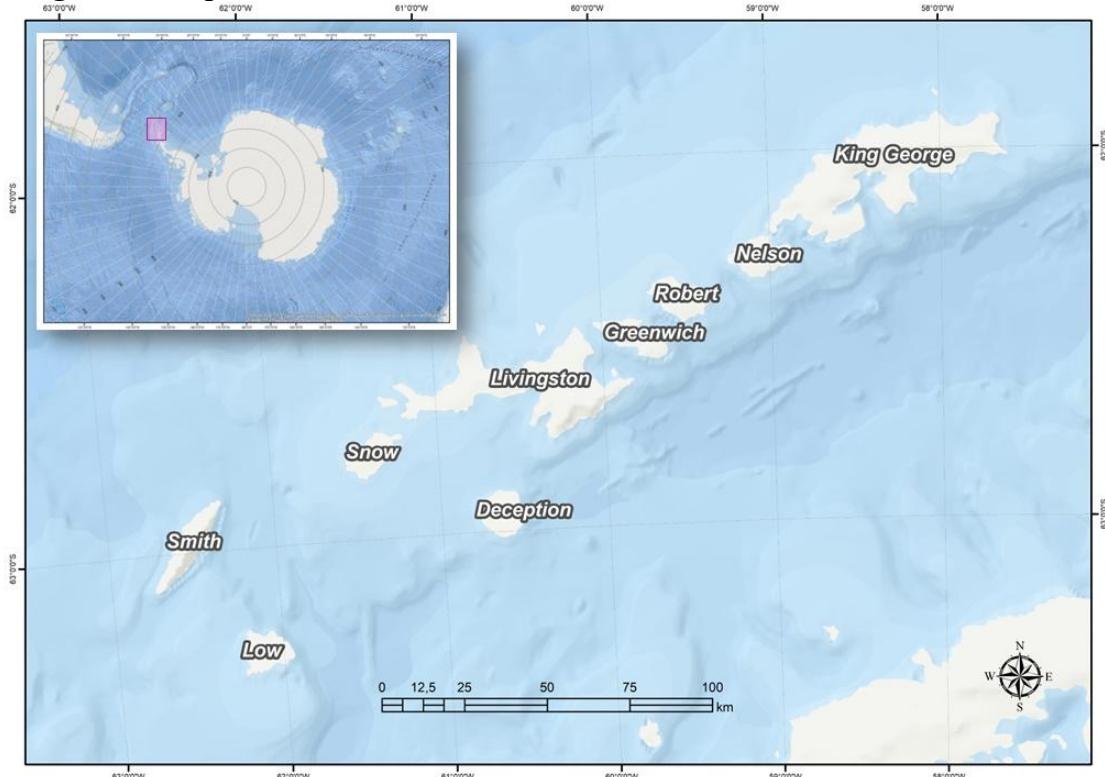
Neste contexto, o presente estudo selecionou o SfM para o levantamento e registro digital de sítios arqueológicos previamente catalogados pelo Laboratório de Estudos Antárticos em Ciências Humanas, da Universidade Federal de Minas Gerais (LEACH-UFMG) em Ponta Elefante, Ilha Livingston, Arquipélago Shetland do Sul, na Antártica, fundamentado no conceito de Gêmeo Digital. Até então, os registros arqueológicos na região se baseavam majoritariamente em croquis ou levantamentos detalhados com instrumentação especialista (estação total e *laser scan*), porém limitados à escala do sítio. O estudo se destaca como pioneiro ao empregar modelagem tridimensional em escalas ampliadas, capazes de integrar não apenas os elementos pontuais dos sítios, mas também o contexto paisagístico do entorno, que possibilitou uma documentação mais abrangente e fiel das relações espaciais no ambiente antártico.

A escolha pela técnica SfM, em detrimento do uso de sensores LiDAR embarcados, deve-se, inicialmente, à estratégia de testar e validar a eficácia do SfM em ambientes extremos. O elevado custo dos sensores LiDAR embarcados em *drones*, somado aos riscos operacionais

inerentes às missões em regiões antárticas — como alterações drásticas nas condições meteorológicas, velocidade dos ventos, baixas temperaturas e restrições logísticas —, tornou mais viável adotar o SfM como método de primeira aplicação. Essa abordagem permitiu reduzir significativamente os custos e a complexidade do projeto. Além disso, a reduzida de cobertura vegetal no local possibilitou que a modelagem da superfície pudesse ser realizada por técnica de SfM.

2. ÁREA DE ESTUDO

Localizada ao norte da Península Antártica, as Ilhas Shetland do Sul são caracterizadas como uma das áreas mais importantes e ricas em registros arqueológicos da Antártica (Figura 1). Incluem um conjunto das ilhas, onde segundo documentos históricos e evidências arqueológicas, ocorreram os primeiros contatos humanos com o continente, especialmente por caçadores de focas e baleias no início do século XIX. Trata-se de um ambiente extremo, que impõe desafios logísticos e operacionais tanto para a permanência humana quanto para a realização de atividades de pesquisa. Ainda assim, a área apresenta uma densidade significativa de sítios arqueológicos históricos, com vestígios materiais de abrigos de caçadores, restos de estruturas construídas com ossos de baleia e rochas, artefatos metálicos, cerâmicos e até objetos pessoais, como roupas, sapatos, cachimbos, garrafas de bebidas, utensílios de trabalhos, entre outros (ZARANKIN *et al.*, 2023).

Figura 1: Mapa de localização das ilhas Shetland do Sul, Península Antártica.

Fonte: Autores (2025)

A região é composta por formações rochosas costeiras, praias de cascalho, encostas íngremes e áreas com cobertura de neve sazonal. Historicamente, ela foi intensamente explorada entre 1819 e as primeiras décadas do século XX, sendo palco das primeiras atividades extrativistas organizadas no continente. Atualmente, abriga várias estações científicas de diversos países, como Argentina, Brasil, Chile, China, Polônia e demais. A combinação de isolamento, condições ambientais extremas e histórico de ocupação humana efêmera confere às Ilhas Shetland do Sul um papel crucial na arqueologia polar, pois permite estudar os impactos da modernidade, da expansão capitalista e das formas como se deu os primeiros encontros humanos com uma das regiões mais inóspitas do planeta.

Apesar da grande quantidade de sítios arqueológicos registrados nas Ilhas Shetland do Sul, o presente estudo concentrou-se especificamente em Ponta Elefante, na Ilha Livingston (Figura 2). A escolha dessa área deve-se, sobretudo, à sua relevância patrimonial e à necessidade de preservação dos vestígios, diante do aumento da presença humana, por meio do turismo antártico, que tem se intensificado na região.

Figura 2: Praia de Ponta Elefante, Livingston.



Fonte: Autores (2025)

Um dos sítios de grande relevância local, denominado Ponta Elefante 2, apresenta notável preservação estrutural, com elementos como paredes de rocha sobrepostas, fogueiras, ossos de baleia usados como mobiliário (bancos, mesas ou divisórias), e indícios de estruturas de cobertura com costelas de baleia Figura 3 (ZARANKIN *et al*, 2023).

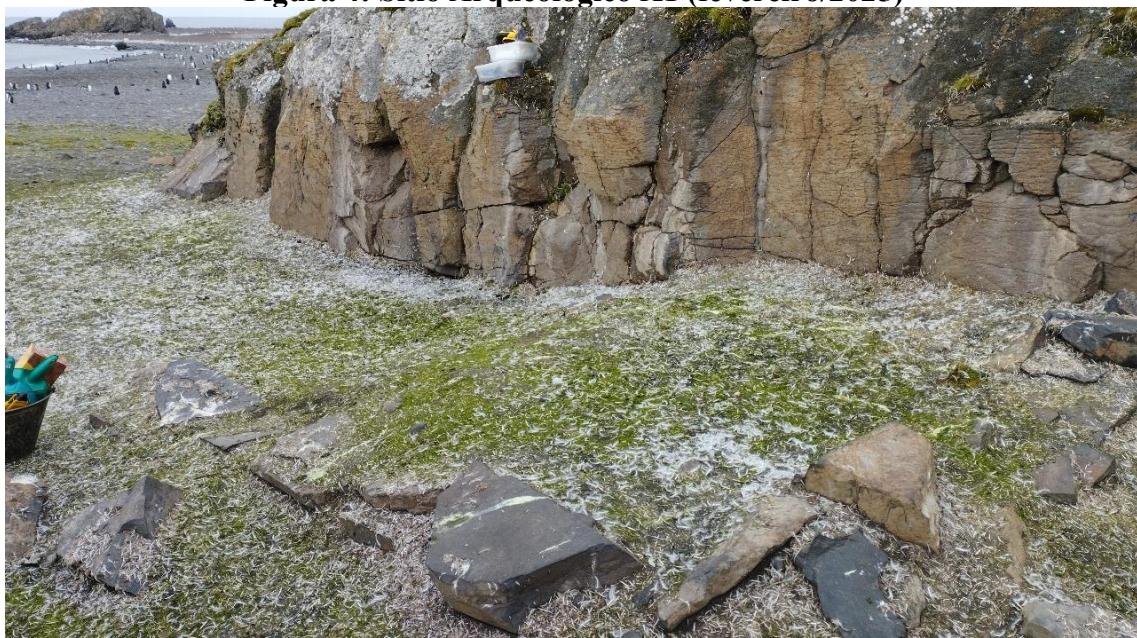
Figura 3: Sítio Arqueológico Ponta 2 (fevereiro/2025)



Fonte: Autores (2025)

Cerca de 50 metros do Punta Elefante 2, observa-se o sítio X1 (Figura 4), com muros de rochas que formam um retângulo ($6\text{ m} \times 2,8\text{ m}$), apoiado em um afloramento rochoso usado como parede de fundo. Foi interpretado como um espaço de trabalho, potencialmente utilizado para limpeza e armazenamento de peles de foca. Contém uma fogueira interna e outra externa. A associação funcional com o sítio 2 sugere uma divisão entre espaço de residência (Punta Elefante 2) e de trabalho (Punta X1). Além desses, a localidade possui outros 3 sítios registrados pela equipe, são eles: Punta Elefante I, Punta Elefante III e Punta Elefante IV (ZARANKIN *et al.*, 2023).

Figura 4: Sítio Arqueológico X1 (fevereiro/2025)



Fonte: Autores (2025)

Nesse contexto, este trabalho busca demonstrar como tecnologias de fotogrametria e modelagem tridimensional, aplicadas por meio de *drones*, podem contribuir para ressignificar a forma como se registra o patrimônio arqueológico em regiões polares remotas. Ao propor uma abordagem inovadora para o mapeamento digital dos sítios de Punta Elefante, a pesquisa espera não apenas reduzir os custos e os riscos associados ao trabalho de campo em ambientes extremos, mas também ampliar o alcance e a acessibilidade dos acervos arqueológicos por meio da construção de representações digitais de alta fidelidade. A seguir, detalha-se a metodologia empregada para alcançar esses objetivos.

3. METODOLOGIA

As particularidades geográficas da Antártica impõem uma série de desafios logísticos às atividades de pesquisa de campo, com isso, exige soluções tecnológicas que sejam não apenas eficazes, mas também compatíveis com as limitações de transporte e espaço. O acesso a muitos sítios arqueológicos só é possível por meio de helicópteros ou botes infláveis, o que torna o volume e o peso dos equipamentos fatores decisivos no planejamento das operações. Diante dessas restrições, optou-se pela utilização do drone DJI Mavic 3 Enterprise, em detrimento de plataformas mais robustas, como o DJI Matrice. Embora o citado ofereça maior capacidade de carga e suporte à integração de sensores avançados — como LiDAR e câmeras multiespectrais —, sua operação exige uma infraestrutura significativamente mais complexa, com maletas de transporte volumosas, estações de carregamento específicas e conjuntos de baterias pesados. Em contraste, o Mavic apresenta um design compacto e dobrável, que facilita tanto o transporte quanto armazenamento.

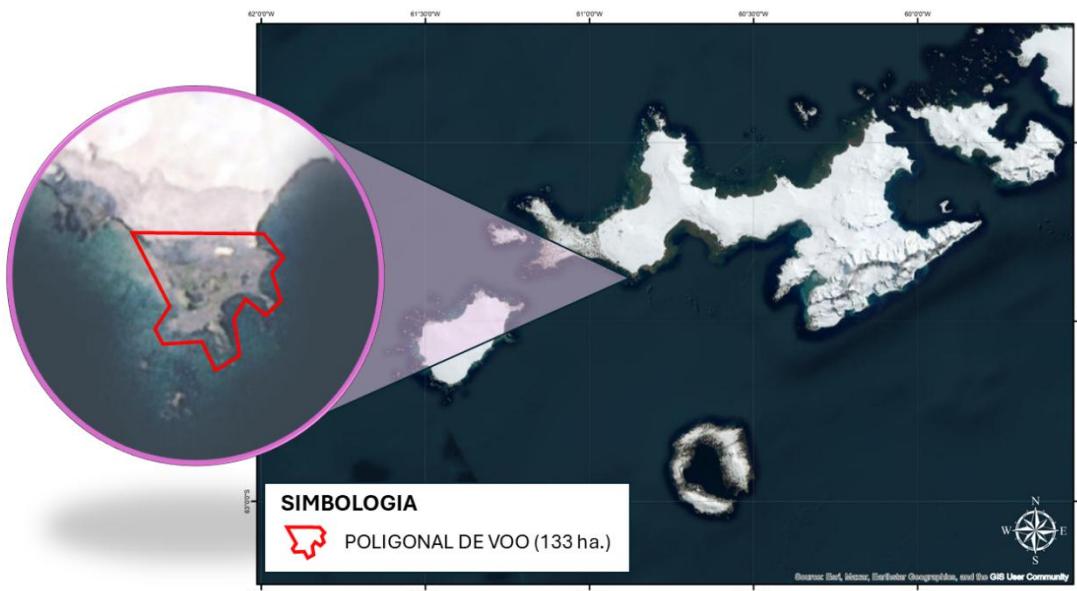
Além da portabilidade, o menor tempo de preparação para voo e a agilidade no deslocamento da equipe com o Mavic permitiram um melhor aproveitamento das janelas meteorológicas — muitas vezes curtas — e do tempo disponível em cada área. O trabalho forma parte do projeto Paisagens em Branco, do LEACH-UFMG, que integrou a 43^a operação do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), cuja expedição é estruturada para atender simultaneamente a diversas pesquisas científicas. As missões seguem um cronograma rigoroso, já que o navio de apoio logístico — principal meio de transporte entre os pontos de interesse — precisa realizar múltiplas paradas para contemplar diferentes grupos embarcados. Esse fluxo contínuo impõe prazos apertados para a coleta de dados em campo, e com isso, operações rápidas, eficientes e com baixa dependência de infraestrutura externa (Figura 5).

Figura 5: Dimensões da caixa de transporte da aeronave utilizada no levantamento (esquerda) e navio de apoio logístico do PROANTAR, Almirante Maximiliano (direita).



Fonte: Autores (2025)

Ao desembarcar em Ponta Elefante, foi definida a poligonal de interesse no aplicativo nativo do *drone* DJI Pilot, de forma que abrangesse os sítios arqueológicos numa área total de 133 hectares (Figura 6). O voo foi realizado no dia 28 de fevereiro de 2025, com altitude fixada em 70 metros em relação ao solo para garantir um *Ground Sample Distance* (GSD) de até 2 centímetros. A habilitação da função *terrain follow*, foi essencial para garantir a manutenção de uma altitude constante de 70 metros em relação ao solo, mesmo em porções acidentadas ou com variações altimétricas abruptas, como encostas rochosas e platôs costeiros. Manter o voo a 70 metros também ajudou a evitar camadas mais turbulentas da atmosfera, comuns em altitudes superiores, onde a velocidade e a direção dos ventos podem variar bruscamente.

Figura 6: Mapa de localização da Ponta Elefante na ilha Livingston.

Fonte: Autores (2025)

Para assegurar a qualidade da reconstrução tridimensional, foi adotado um padrão de sobreposição de 80% tanto lateral quanto longitudinal entre as imagens. As condições de luz intensa e alta refletividade impuseram a necessidade de ajustes específicos nos parâmetros da câmera embarcada: o ISO foi fixado em 100, para minimizar o ruído digital nas imagens, enquanto a velocidade do obturador foi configurada em 1/2000, a fim de evitar o efeito de superexposição e garantir a nitidez dos registros fotográficos mesmo com intensa luminosidade sobre o manto de neve.

Foram capturadas imagens aéreas georreferenciadas no sistema WGS84, em coordenadas geográficas, padrão amplamente adotado em trabalhos científicos na Antártica devido à sua compatibilidade com bases cartográficas internacionais e com os sistemas de navegação GNSS utilizados em missões de campo. As imagens foram processadas no software Agisoft Metashape Professional (versão 2.0.2), a partir de um sensor previamente calibrado.

O fluxo de processamento seguiu as etapas convencionais da técnica SfM. Inicialmente, foi realizado o alinhamento das câmeras com precisão definida como “alta”, sem a utilização de pré-seleção genérica de imagens. A partir do alinhamento, procedeu-se à geração dos mapas de profundidade (*depth maps*), com qualidade também configurada como “alta” e modo de filtragem suave. Em seguida, foi criada a nuvem de pontos densa, a partir da qual foram

derivados o Modelo Digital de Superfície (MDS), por meio de interpolação baseada nos dados de profundidade e na classificação da nuvem.

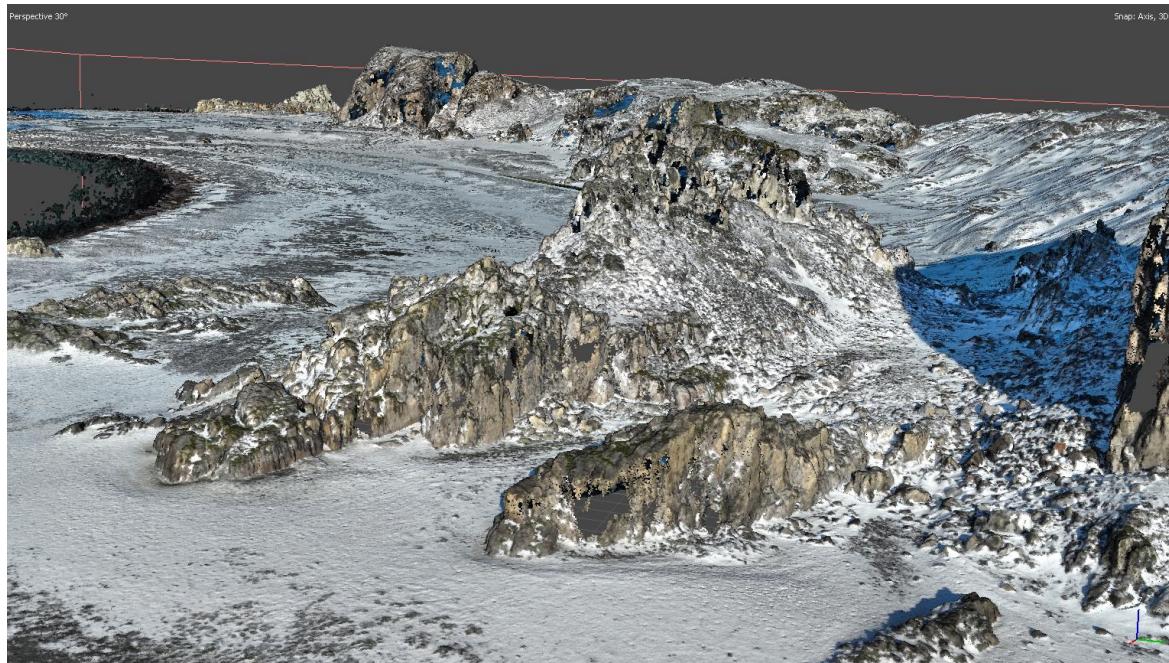
Com os modelos digitais, foi construída uma malha tridimensional (*mesh*), texturizada com base nos canais RGB das imagens originais. O ortomosaico foi gerado a partir do MDE, utilizando o modo de mistura do tipo “*mosaic*”, com preenchimento de lacunas e configurações específicas para evitar sobreposições indesejadas. Os produtos finais foram exportados nos formatos .obj (modelo 3D) e .tif (ortomosaico e MDS).

4. RESULTADOS

A aquisição em campo resultou em um total de 2.237 fotografias e o processamento dessas imagens gerou um modelo tridimensional de alta qualidade, com erro médio de reprojeção de 0,89 pixels, o que indica boa consistência geométrica na reconstrução da cena. Na etapa de alinhamento das câmeras, foram identificados mais de 7,1 milhões de pontos de amarração (*tie points*) e cerca de 346 milhões de projeções, com uma multiplicidade média de 5,27. Essa alta redundância geométrica entre as imagens foi particularmente favorável no contexto mapeado, marcado por superfícies homogêneas e coberturas de neve esparsas.

A nuvem densa gerada a partir dos mapas de profundidade resultou em aproximadamente 197 milhões de pontos, com uma densidade média de 169 pontos/m², que permitiu a representação detalhada das microformas do relevo e das feições arqueológicas associadas aos sítios (Figura 7).

Figura 7: Nuvem de pontos da formação rochosa em que se concentram os dois sítios avaliados.



Fonte: Autores (2025)

A partir dessa nuvem, foi produzido um MDS com resolução espacial de 7,7 cm/pixel, malha tridimensional (*mesh*) com 28,8 milhões de faces e 14,4 milhões de vértices e texturização nos três canais de cor (RGB). O processo resultou também na geração de um ortomosaico com resolução final de 78.684 x 75.696 pixels (Figura 8a e 8b) capaz de representar com precisão o obter medidas, tanto os elementos físicos da paisagem quanto a presença da fauna local — incluindo colônias de elefantes-marinhos e focas cuja abundância histórica na região foi um dos fatores que motivaram a instalação na área mapeada.

Figura 8a: Modelo Digital de Superfície

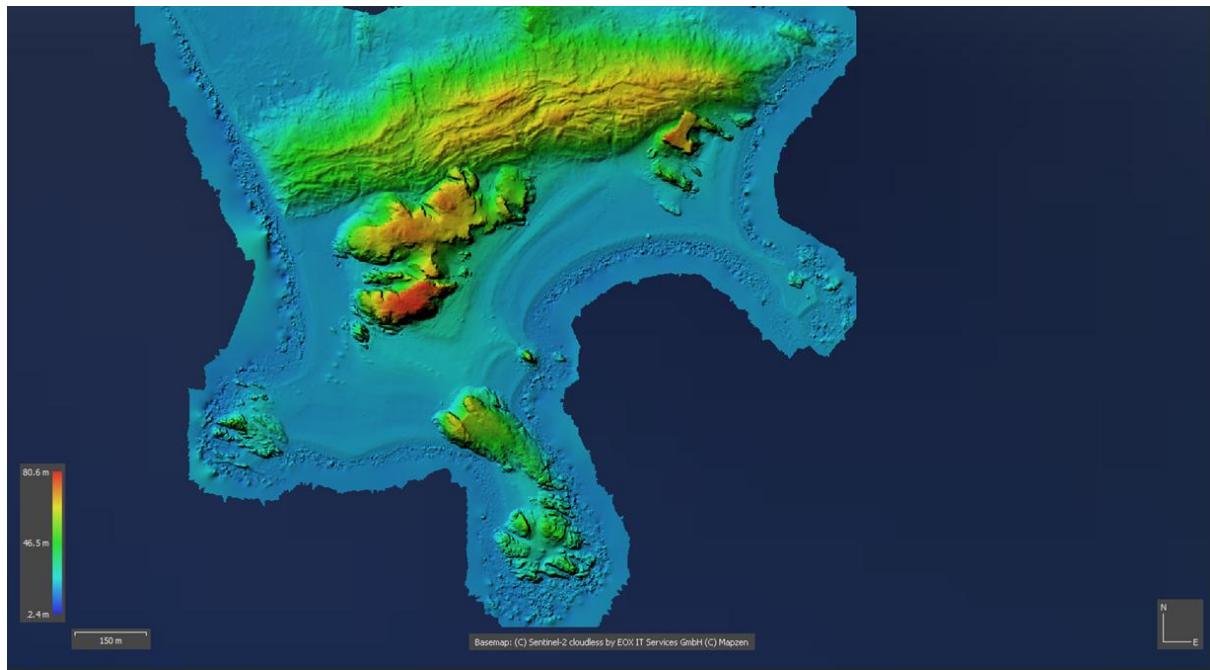
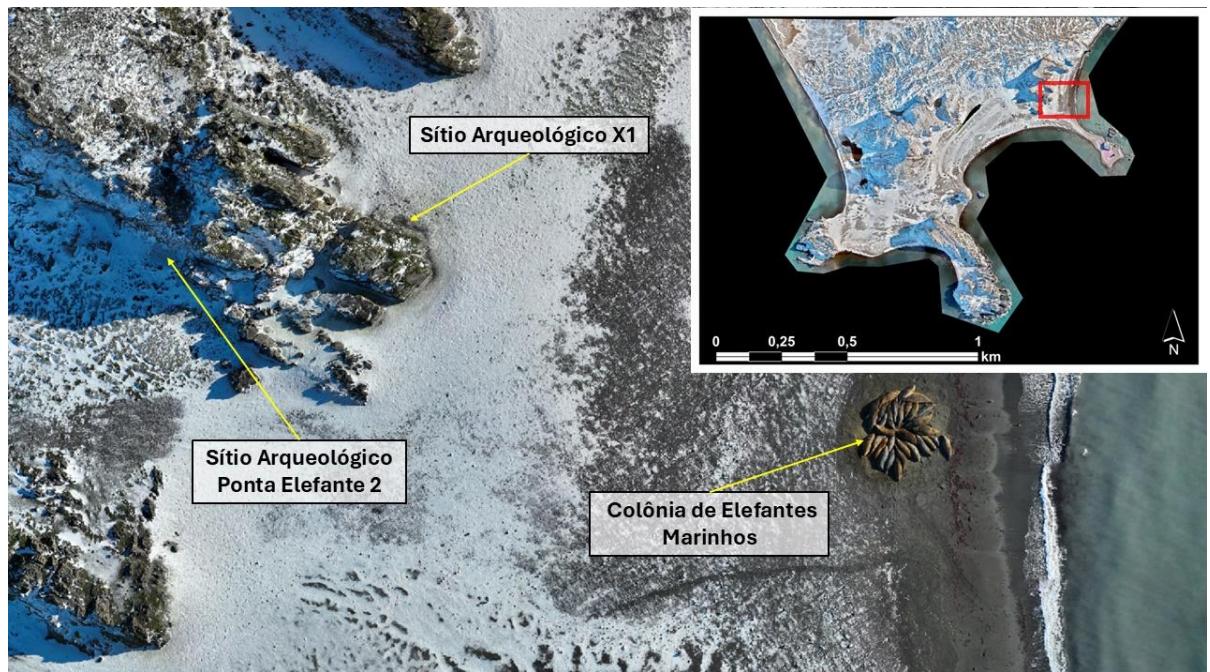


Figura 8b: Recorte do ortomosaico processado em Ponta Elefante, com destaque à fauna da região e os sítios arqueológicos analisados.



Fonte: Autores (2025)

6. DISCUSSÃO

A modelagem tridimensional aplicada em Ponta Elefante permitiu revisar e confirmar as interpretações arqueológicas anteriormente estabelecidas para os sítios da região. No Ponta Elefante 2, apesar da cobertura de neve ter dificultado a identificação precisa do mobiliário interno — construído com vértebras de baleia —, os elementos estruturais principais, como muros de rochas sobrepostas e cobertura compostas por costelas de baleia, mantêm-se preservados, em conformidade com os registros anteriores. O Sítio Ponta Elefante X1 também apresentou os mesmos comportamentos dos registros anteriores, com a cobertura de neve, no entanto as dimensões e os blocos utilizados para construção de abrigos, mantidos. Este registro reforça a ideia de que, mesmo com o aumento do turismo na região, os vestígios arqueológicos seguem em bom estado de conservação.

A análise espacial possibilitada pelo modelo digital permitiu também calcular com precisão a distância entre o abrigo principal (Ponta Elefante 2) e o possível espaço de trabalho (X1), que se estende por 68 metros ao longo do afloramento rochoso. Essa medição reforça a hipótese de a divisão funcional entre os dois espaços, possivelmente pensada não apenas em termos de organização das atividades, mas também para mitigar os efeitos sensoriais provocados pelo cheiro intenso e persistente dos restos de animais marinhos, uma vez que há uma barreira rochosa com aproximadamente 20 metros de altura separando as duas áreas. Por fim, as dimensões estruturais dos sítios modelados apresentaram correspondência total com os dados previamente registrados, sem identificação de alterações ou adições nos elementos construídos, o que atesta a estabilidade material das estruturas ao longo do tempo.

Embora o Gêmeo Digital não tenha revelado elementos invisíveis a olho nu, a modelagem tridimensional permitiu o acesso a uma série de informações que seriam inviáveis com métodos tradicionais, como croquis ou fotografia convencional. Por meio da manipulação do modelo 3D, foi possível observar os sítios sob múltiplas visadas e ângulos, mensurar a altura da formação rochosa que abriga os sítios e medir a distância entre os sítios e as praias mais próximas, estimada em aproximadamente 120 metros. A análise tridimensional ainda permitiu identificar a ausência de blocos rochosos instáveis na área, o que indica que o sítio, ao menos no momento da documentação, se encontrava estruturalmente estável e seguro.

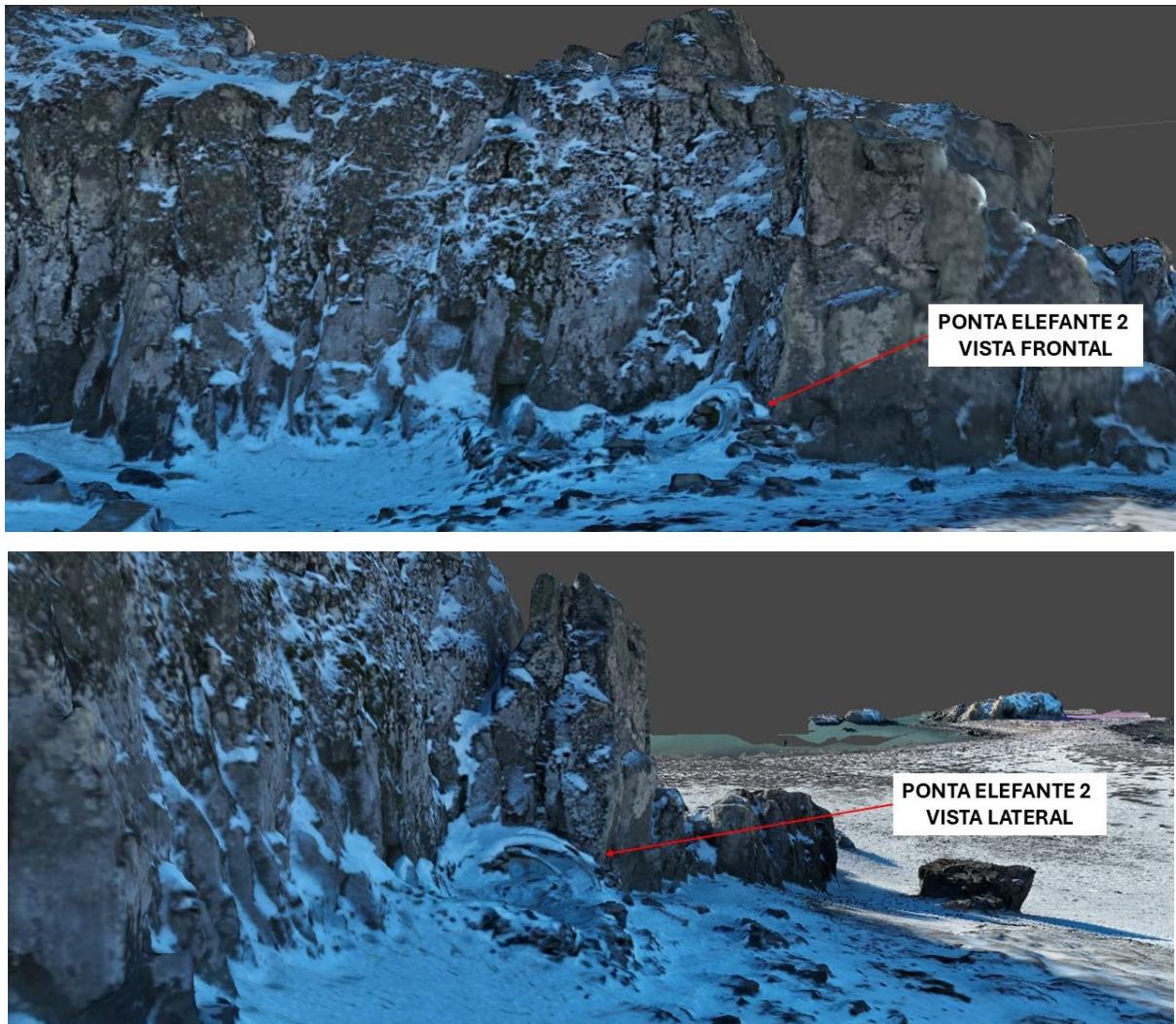
Do ponto de vista funcional e paisagístico, a modelagem revelou que o abrigo Punta Elefante 2 não recebe incidência solar direta pela manhã, horário em que os voos foram realizados, o que sugere uma possível estratégia de orientação voltada ao conforto térmico nas horas de maior radiação à tarde. A proteção lateral oferecida por duas paredes rochosas reforça essa hipótese, indicando que os critérios de escolha do local podem ter priorizado a proteção contra ventos mais do que a exposição solar direta.

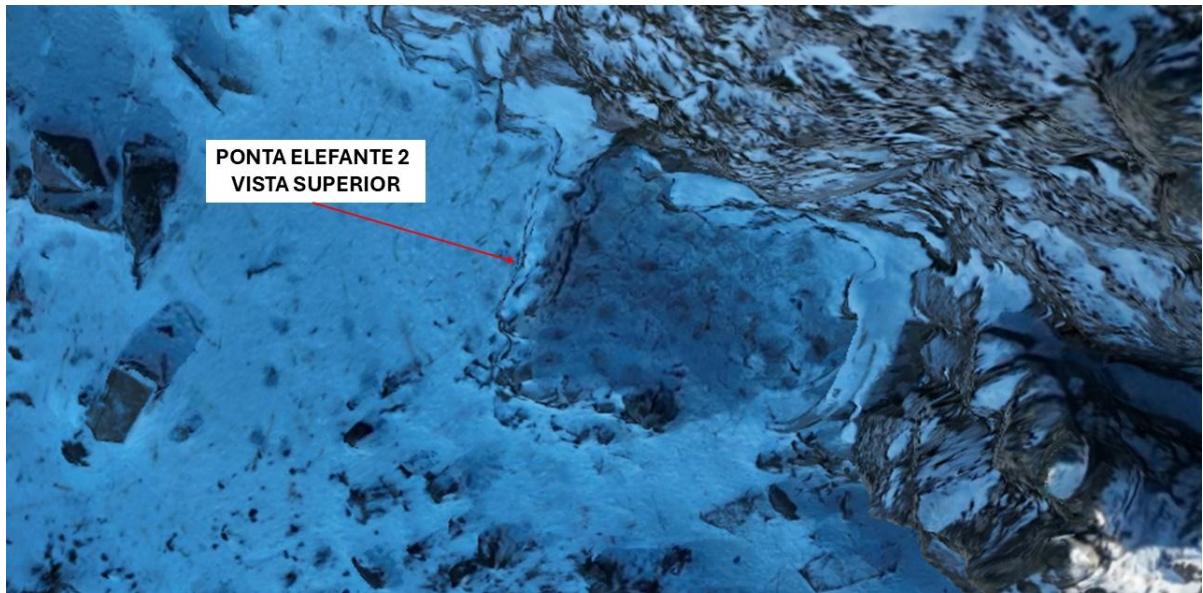
Além dos elementos arqueológicos, o levantamento em alta resolução revelou com clareza a presença de densas colônias de fauna silvestre, como pinguins, focas, elefantes e lobos-marinhos — algumas localizadas em estreita proximidade com os antigos acampamentos. Esses dados reforçam a importância ecológica da área e ampliam a compreensão sobre o ambiente que cercava os ocupantes históricos.

Apesar do poder de descrição técnica dos sítios, a aplicação do modelo tridimensional transcende o aspecto documental e oferece uma base sólida para estratégias futuras de conservação dos sítios arqueológicos. A precisão métrica dos dados, associada à possibilidade de reprocessamento periódico das imagens, habilita o modelo a funcionar como referência para o monitoramento de possíveis impactos ambientais ou antrópicos, como erosão, deslocamento de blocos rochosos, pisoteio ou vandalismo. Tal modelo também pode ser incorporado em futuros planos de manejo ambiental e turístico, permitindo a definição de rotas controladas e áreas restritas, especialmente diante da crescente circulação de visitantes na região.

Embora o modelo gerado tenha potencial para uso educacional e científico em diversas áreas — arqueologia, geografia, ciências ambientais, design digital —, sua plena integração à ciência aberta ainda esbarra na falta de plataformas públicas robustas para o compartilhamento de modelos 3D georreferenciados de grande volume. Atualmente, não há uma estrutura gratuita que permita a hospedagem desses dados em formato navegável, o que limita o acesso por parte de pesquisadores, educadores e interessados. Caso esse entrave tecnológico fosse superado, os modelos poderiam permitir visitas virtuais a áreas remotas como Ponta Elefante, ampliando o acesso à Antártica sem os elevados custos financeiros e ambientais de um deslocamento físico ao continente. No entanto, este trabalho apresenta capturas de tela do modelo tridimensional gerado, no intuito de ilustrar a relação dos sítios com a paisagem, acompanhado da planta baixa, registrado pela equipe de arqueologia deste mesmo projeto, em expedições anteriores.

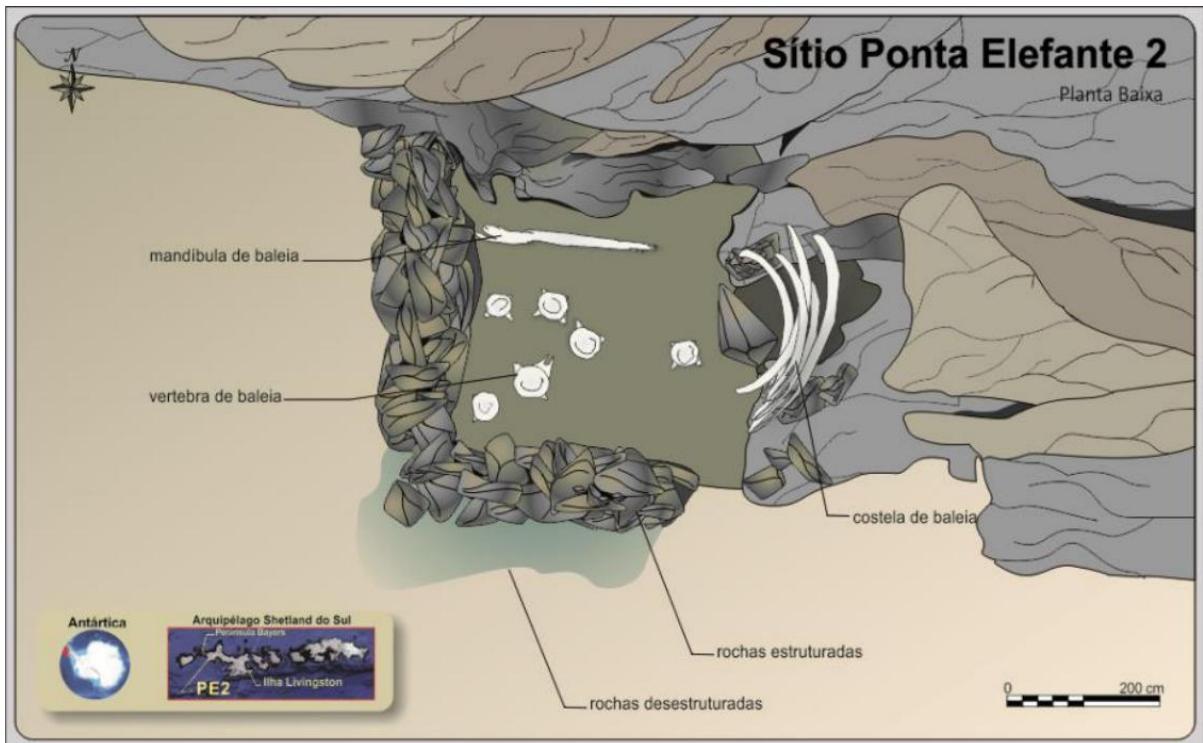
Figura 9a: Modelo tridimensional do sítio arqueológico Ponta Elefante 2 com visada.





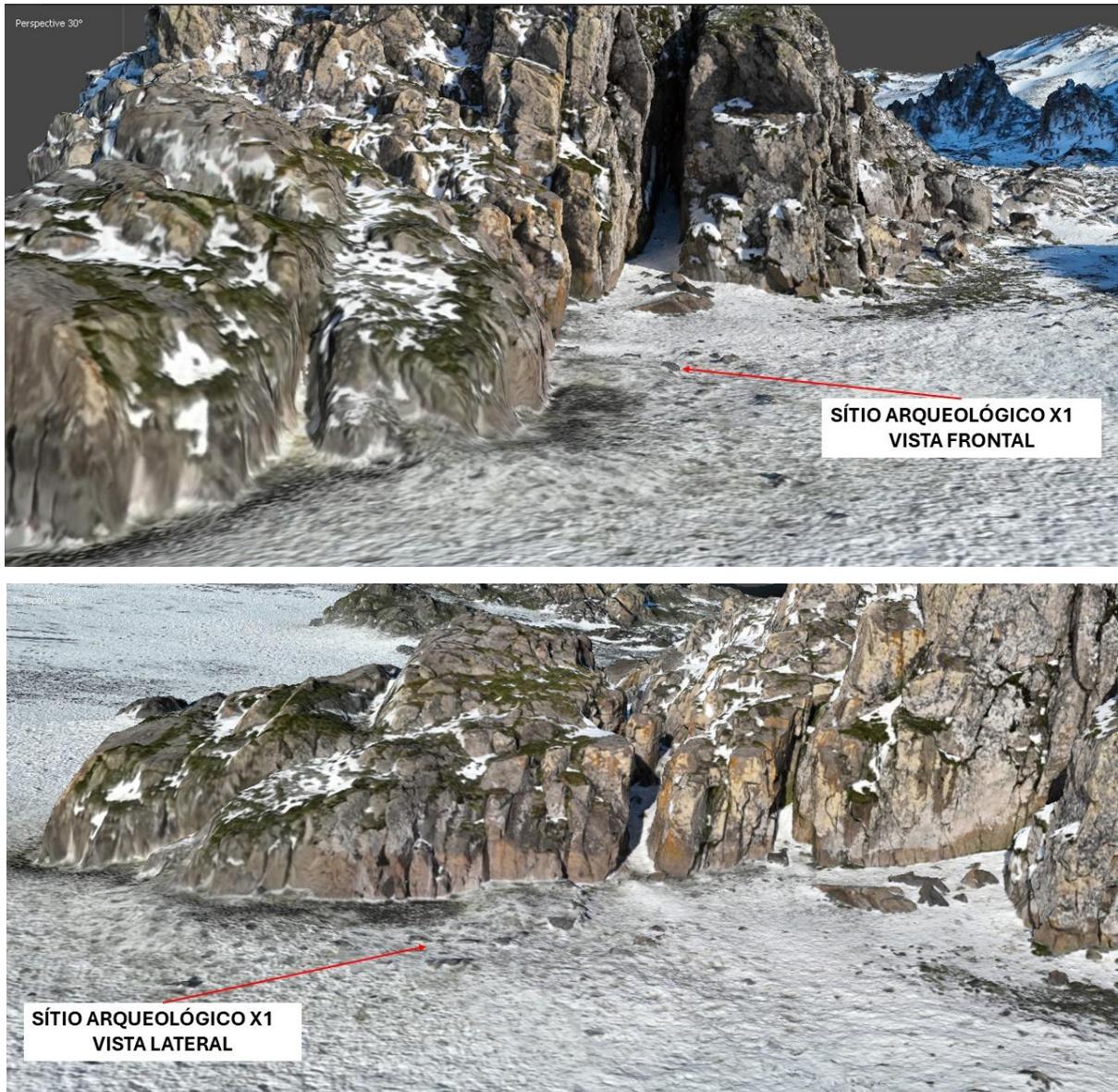
Fonte: Autores (2025)

Figura 9b: Planta baixa do sítio arqueológico Ponta Elefante 2.



Fonte: LEACH

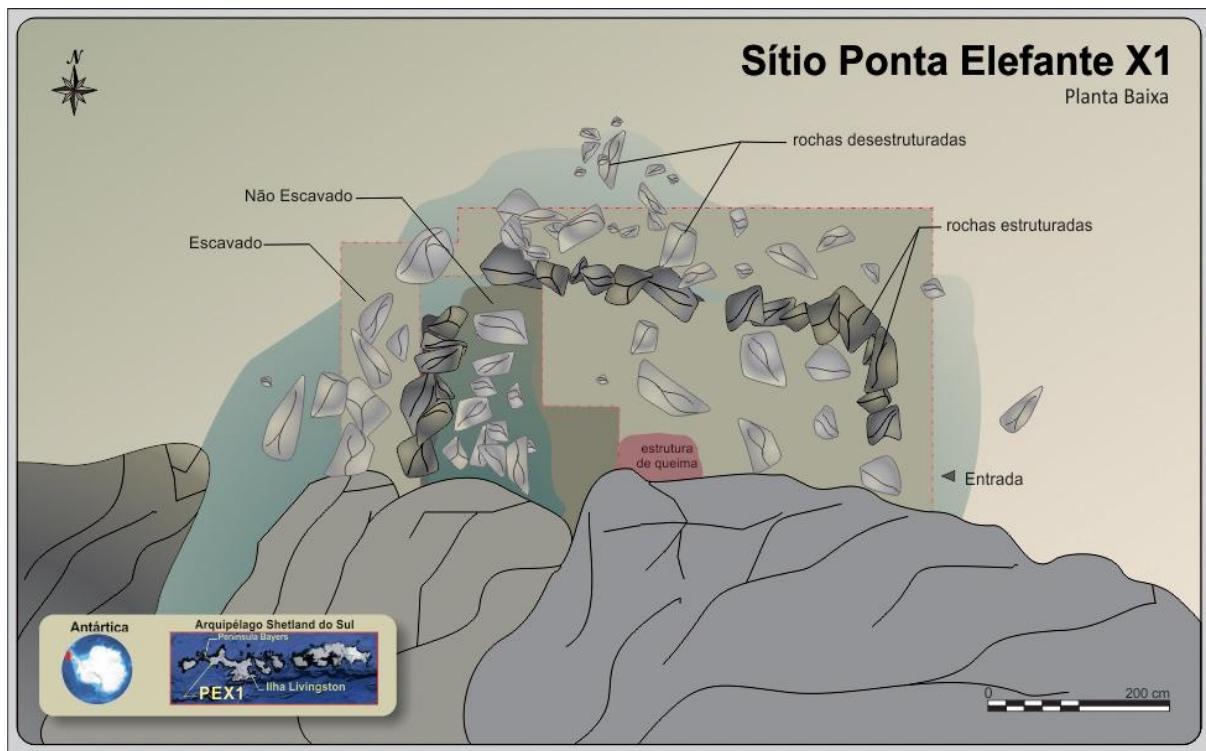
Figura 10a: Modelo tridimensional do Sítio Arqueológico Ponta Elefante X1 com visadas





Fonte: Autores (2025)

Figura 10b: Planta baixa do sítio arqueológico Ponta Elefante X1.



Fonte: LEACH

Dentre as principais vantagens observadas da técnica em contextos arqueológicos polares, destacam-se a capacidade de registrar tridimensionalmente ambientes remotos com alta

fidelidade métrica, a possibilidade de revisitar digitalmente os sítios para análises complementares, e a criação de um acervo visual e interativo que ultrapassa os limites das plantas bidimensionais.

Por outro lado, as limitações desse método também merecem menção. A ausência de cobertura aerofotogramétrica no interior das estruturas, a dependência de boas condições climáticas para os voos e a dificuldade de armazenamento e compartilhamento dos arquivos 3D em plataformas abertas ainda representam entraves à plena adoção dessa tecnologia como padrão. Ademais, a análise arqueológica continua dependente de evidências materiais de escavação, sendo os modelos digitais mais indicados para complementação e documentação do que para substituição dos métodos tradicionais.

7. CONCLUSÃO

Embora os dados deste estudo ainda estejam em análise pela equipe do projeto para uma exploração mais aprofundada, já é possível afirmar que este tipo de abordagem apresenta alto potencial de aplicabilidade na arqueologia e na conservação digital, ao propor uma metodologia replicável, tecnicamente viável e de baixo custo relativo para a documentação de sítios históricos em regiões polares. Ao expandir os limites do registro convencional e promover uma nova camada de leitura da paisagem e das estruturas construídas, o trabalho abre caminho para a construção de acervos digitais interativos que respeitam os princípios da ciência aberta e da acessibilidade, ainda que a infraestrutura para a plena difusão desses dados ainda dependa de avanços institucionais e tecnológicos.

Entre os principais ganhos, destacam-se os avanços técnicos na captura e modelagem tridimensional de alta precisão, os aportes científicos para a arqueologia polar e a valorização patrimonial dos vestígios, acessíveis em ambiente digital. A inovação metodológica demonstrada neste contexto de alto risco logístico e baixa acessibilidade reafirma o potencial do uso não intrusivo das tecnologias digitais na preservação de bens culturais sensíveis.

Além disso, o trabalho exemplifica o potencial da interdisciplinaridade ao integrar arqueologia, geotecnologias e ciência de dados na construção de registros precisos e interpretáveis. No horizonte futuro, os modelos digitais gerados poderão ser incorporados a bancos de dados globais, plataformas educativas e exposições virtuais, promovendo maior

democratização do conhecimento e fortalecendo práticas de ciência aberta, colaborativa e reproduzível.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKE, L.; DE VIS, K.; VERWULGEN, S.; VERLINDEN, J. "Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration". **Journal of Cultural Heritage**, v. 49, p. 272–288, 2021.
- CASAGRANDE, P.; ROCHA, N.; SENA, Í.; FONSECA, B.; MOURA, A. C. "Geological Heritage and Conservation: A Case Study of the Visual Axis Through Digital Terrain Modeling". In: **Lecture Notes in Computer Science**. s.l.: s.ed., 2016. p. 63–71.
- CRESPI, N.; DROBOT, A.; MINERVA, R. **The Digital Twin**. s.l.: Springer eBooks, 2023.
- CUCCHIARO, S.; FALLU, D.; ZHENG, P.; WADDINGTON, C.; COCKCROFT, D.; TAROLLI, P.; BROWN, A. "SfM Photogrammetry for Geoarchaeology". In: **Developments in Earth Surface Processes**. Amsterdam: Elsevier, 2020. v. 23, p. 183–205.
- FALCONE, M.; ORIGLIA, A.; CAMPI, M.; DI MARTINO, S. "From Architectural Survey to Continuous Monitoring: Graph-Based Data Management for Cultural Heritage Conservation With Digital Twins". **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLIII-B4-2021, p. 47–53, 2021.
- FRANCO, G. G.; NAIME, A. F. "Structure from Motion (SFM) – Uma Breve Revisão Histórica, Aplicações nas Geociências e Perspectivas Futuras". **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.
- HUGHES, J. F.; DAN, A.; MCGUIRE, M.; SKLAR, D. F.; FOLEY, J. D.; FEINER, S. K.; AKELEY, K. J. F. **Computer Graphics: Principles and Practice**. USA: Addison-Wesley, 2013.
- HUTSON, J.; WEBER, J.; RUSSO, A. "Digital Twins and Cultural Heritage Preservation: A Case Study of Best Practices and Reproducibility in Chiesa dei SS Apostoli e Biagio". **Art and Design Review**, v. 11, n. 1, p. 15–41, 2023.
- KONG, X.; HUCKS, R. G. "Preserving our Heritage: a Photogrammetry-based Digital Twin Framework for Monitoring Deteriorations of Historic Structures". **Automation in Construction**, v. 152, p. 104928, 2023.
- PÉREZ-SÁNCHEZ, J. C.; MORA-GARCÍA, R. T.; PÉREZ-SÁNCHEZ, V. R.; PIEDECAUSA-GARCÍA, B. "From CAD to BIM: a New Way to Understand Architecture". **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 1, p. 45–54, 2017.

PRÜMERS, H.; BETANCOURT, C. J.; IRIARTE, J.; ROBINSON, M.; SCHAIKH, M. "Lidar Reveals Pre-Hispanic Low-Density Urbanism in the Bolivian Amazon". **Nature**, v. 606, n. 7913, p. 325–328, 2022.

SINGH, M.; FUENMAYOR, E.; HINCHY, E.; QIAO, Y.; MURRAY, N.; DEVINE, D. "Digital Twin: Origin to Future". **Applied System Innovation**, v. 4, n. 2, p. 36, 2021.

ZARANKIN, A.; SALERNO, M. A.; PEARSON, M. **Archaeology in Antarctica**. USA: Routledge, 2023.