

DO BRASIL À ANTÁRTICA (E DE VOLTA): UMA JORNADA ATRAVÉS DA GEOMORFOLOGIA

From Brazil to Antarctica (and back again): a geomorphological journey

Fábio Soares de Oliveira

Geógrafo, Dr. em Geologia e Professor no Instituto de Geociências da UFMG, Brasil

fabiosolos@gmail.com

Davi do Vale Lopes

Geógrafo, Dr. em Geografia e Professor no Departamento de Geografia do Centro de Ensino Superior do Seridó (CERES) da UFRN, Brasil

davivlopes@hotmail.com

Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud Schaefer

Agrônomo. PhD. em Ciência do Solo e Professor no Instituto de Geociências da UFRJ, Brasil.

reyschaefer@yahoo.com.br

Márcio Rocha Francelino

Agrônomo. Dr. em Solo e Nutrição de Plantas e Professor no Departamento de Solos da UFV, Brasil.

marcio.francelino@gmail.com

Resumo

A experiência científica brasileira na Antártica configura um movimento epistemológico de ida e volta, uma travessia que transforma tanto o olhar de quem investiga quanto o objeto investigado. Este artigo reflete sobre os resultados e significados de mais de vinte anos de pesquisas do Grupo Terrantar, dedicados ao estudo dos ecossistemas terrestres em áreas livres de gelo da Antártica. Aqui, sob a perspectiva da Geomorfologia, discutem-se as contribuições de pesquisadores e pesquisadoras com “alma tropical”, que precisaram “reformatar seu HD” para avançar na compreensão dos fatores fundamentais que controlam a evolução das paisagens frias. Na primeira parte, analisa-se o movimento de ida, quando o olhar tropical se desloca para o continente gelado, e, a partir da tríade de formas, materiais e processos, revela o papel de quatro fatores azonais fundamentais para a morfogênese e a morfodinâmica antárticas: diversidade litológica, clima, colonização biológica e tempo. Essa abordagem permite interpretar as paisagens pro-para-periglaciais como sistemas dinâmicos em permanente reorganização. A segunda parte aborda o movimento de volta desse conhecimento ao Brasil, destacando como a experiência polar pode refinar a leitura da geomorfologia tropical e inspirar interpretações sobre intemperismo profundo, bioturbação, regolitos antigos e fosfatização em ilhas oceânicas. O artigo também evidencia o impacto institucional dessa trajetória, com a consolidação de redes de pesquisa, a formação de dezenas de mestres e doutores e o reconhecimento internacional da ciência brasileira em solos e paisagens polares. Estudar a Antártica também tornou-se um modo de compreender o Brasil: dois extremos em diálogo que revelam a unidade planetária dos processos geomorfológicos que moldam a Terra e conectam ciência, tempo e imaginação.

Palavras-chave: Áreas livres de gelo; Diversidade litológica; Clima; Colonização biológica; Tempo.

Abstract

The Brazilian scientific experience in Antarctica represents an epistemological journey of departure and return, a crossing that transforms both the observer and the observed. This article reflects on the results and meanings of more than two decades of research conducted by the Terrantar Group, dedicated to studying terrestrial ecosystems in Antarctica's ice-free areas. From a geomorphological perspective, it examines the contributions of researchers with a "tropical soul," who had to "reformat their hard drives" to advance the understanding of the fundamental factors controlling the evolution of cold-region landscapes. In its first part, the article analyses the movement of departure, when the tropical gaze turns toward the frozen continent and, through the triad of forms, materials, and processes, reveals the role of four key azonal factors in Antarctic morphogenesis and morphodynamics: lithological diversity, climate, biological colonisation, and time. This approach allows the interpretation of pro-, para-, and periglacial landscapes as dynamic systems in continuous reorganisation. The second part explores the movement of return, emphasising how the polar experience refines the reading of tropical geomorphology by inspiring new interpretations of deep weathering, bioturbation, ancient regoliths, and phosphatization on oceanic islands. The article also highlights the institutional impact of this trajectory, including the consolidation of research networks, the training of dozens of master's and doctoral students, and the international recognition of Brazilian science in polar soils and landscapes. Studying Antarctica has also become a way of understanding Brazil itself, two contrasting worlds in dialogue, revealing the planetary unity of geomorphological processes shaping the Earth and connecting science, time, and imagination.

Keywords: Ice-free areas; Lithological diversity; Climate; Biological colonisation; Time.

1. INTRODUÇÃO

Como cientistas formados nos trópicos, realizar pesquisas na Antártica e em suas paisagens exige, antes de tudo, "reformatar nosso HD". Essa metáfora traduz a necessidade de revisitar e ampliar nosso repertório de conhecimentos, reconhecer os limites das referências construídas sob outras realidades ambientais e abrir espaço para novos modos de compreender o mundo. No extremo austral, tudo desafia as experiências e os parâmetros acostumados: escalas, ritmos, materiais e processos operam em outra lógica. A Antártica é um continente de superlativos, ou seja, o mais frio, o mais seco, o mais ventoso, o mais isolado, mas também um território de detalhes, com uma enorme diversidade de paisagens moldadas por processos glaciais a periglaciais, especialmente nas áreas livres de gelo, onde se concentram parte das pesquisas geomorfológicas e pedológicas realizadas por cientistas brasileiros.

Pensar a Antártica sob o ponto de vista geomorfológico é compreender uma sucessão de estados e paisagens interligados, tais como glaciais, proglaciais, paraglaciais e periglaciais (Machado *et al.*, 2019). As paisagens glaciais correspondem àquelas diretamente modeladas pelo gelo. São ambientes de intensa erosão e transporte, onde a

dinâmica de avanço e retração das geleiras esculpe vales em “U”, deposita morainas e redistribui sedimentos em extensos sistemas fluvioglaciais. Nas margens dessas geleiras se formam as paisagens proglaciais, caracterizadas por sua natureza essencialmente deposicional. Ali, rios e lagos alimentados pelo degelo interagem com os fluxos gravitacionais, originando leques aluviais, deltas e espessos pacotes sedimentares que marcam a transição entre o domínio do gelo e o terreno exposto. Já as paisagens paraglaciais não são definidas pela posição nem por processos específicos, mas sim por sua trajetória temporal. Representam ambientes em reajuste, que se reorganizam após o recuo das geleiras. Nesses contextos, a instabilidade é a regra: vertentes íngremes, cobertas por sedimentos inconsolidados, sofrem erosão intensa, movimentos de massa e reconfigurações rápidas da drenagem. O conceito, discutido por autores como Church e Ryder (1972) e refinado por Ballantyne (2002), descreve o intervalo de transição entre o fim da glaciação e o restabelecimento de condições de equilíbrio sob um clima não glacial.

As paisagens periglaciais, por sua vez, são aquelas dominadas pela ação cíclica do congelamento e descongelamento do solo. Mesmo sem a presença direta de geleiras, a energia criogênica atua gerando, por exemplo, superfícies com solos estruturados em padrões através da dinâmica da camada ativa e do permafrost. A literatura (French, 2007; Slaymaker, 2011) aponta que esses processos cobrem aproximadamente um terço da superfície terrestre, evidenciando o papel fundamental da criosfera na modelagem do relevo. A presença ou ausência de permafrost, a espessura das camadas congeladas e a dinâmica térmica do solo definem um vasto espectro de sistemas periglaciais, nos quais o congelamento e descongelamento se tornam agentes geomorfológicos primordiais.

Para compreender tais paisagens, o olhar geomorfológico se ancora em uma tríade conceitual fundamental: formas, materiais e processos (Arraújo Barros; Valadão, 2018). Essa estrutura epistemológica define modos de pensar e escolhas metodológicas. As formas correspondem à expressão espacial das feições observáveis; os materiais (rochas, solos, depósitos, etc) registram os produtos da transformação; e os processos representam as forças dinâmicas que modelam e remodelam continuamente a superfície terrestre. Essa tríade constitui o eixo de sustentação da ciência geomorfológica, orientando a observação, a análise e a explicação dos fenômenos que compõem o relevo.

Aplicar essa estrutura analítica à Antártica significa reconhecer que seus vales, planícies, encostas, terraços, entre outros, são inseparáveis dos materiais que as compõem e dos processos que as geram. A leitura integrada desses elementos permite compreender como o continente gelado se transforma em resposta às oscilações climáticas, à dinâmica

glacial e às mudanças ambientais globais. Essa perspectiva também é um exercício de tradução entre mundos: o olhar tropical que se volta ao gelo busca compreender não apenas a Antártica, mas também ampliar o entendimento dos próprios sistemas geomorfológicos brasileiros, especialmente aqueles marcados por extremos climáticos e por processos de longa duração.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo conectar o Brasil e a Antártica por meio da Geomorfologia (IDA) (Figura 1), apresentando uma síntese dos conhecimentos produzidos ao longo de mais de 20 anos de pesquisas do Grupo Terrantar – Ecossistemas Terrestres da Antártica. Composto por pesquisadores de universidades brasileiras, o Terrantar integra o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e se dedica ao estudo das relações entre relevo, solos, permafrost e mudanças climáticas na Antártica. Desde sua criação em 2021/2002, por meio do embrionário projeto Criossolos, idealizado pelo Prof. Carlos Schaefer, na Universidade Federal de Viçosa, o grupo vem desenvolvendo estudos sobre processos periglaciais, evolução geomorfológica e dinâmica da paisagem nas Antárticas Marítima, Peninsular e Continental, contribuindo significativamente para o entendimento das respostas dos sistemas gelados às transformações do clima. Da mesma forma, este artigo propõe refletir sobre como as pesquisas realizadas na Antártica ampliaram as perspectivas dos geomorfólogos e geomorfólogas do grupo (VOLTA), permitindo (re)interpretar, com base em novas evidências, os cenários da paisagem tropical brasileira.



Figura 1 – Estrutura conceitual do movimento epistemológico (IDA e VOLTA) adotado neste artigo para sistematizar e refletir sobre as contribuições do Grupo Terrantar em suas pesquisas na Antártica, definindo o fluxo contínuo de retroalimentação do conhecimento entre os ambientes tropicais e polares.

Fonte: Os autores.

2. DO BRASIL À ANTÁRTICA (IDA)

Os resultados das pesquisas realizadas pelo Grupo Terrantar, principalmente nas áreas livres de gelo indicadas na Figura 2, mostram que quatro fatores azonais são fundamentais para a modelagem do relevo. São eles: a diversidade litológica, o clima, tanto atual quanto pretérito, a colonização biológica e o tempo. Esses elementos constituem os pilares interpretativos por meio dos quais o Terrantar busca compreender, de forma integrada, as relações entre formas, materiais e processos que explicam a gênese e a evolução das paisagens do continente gelado.

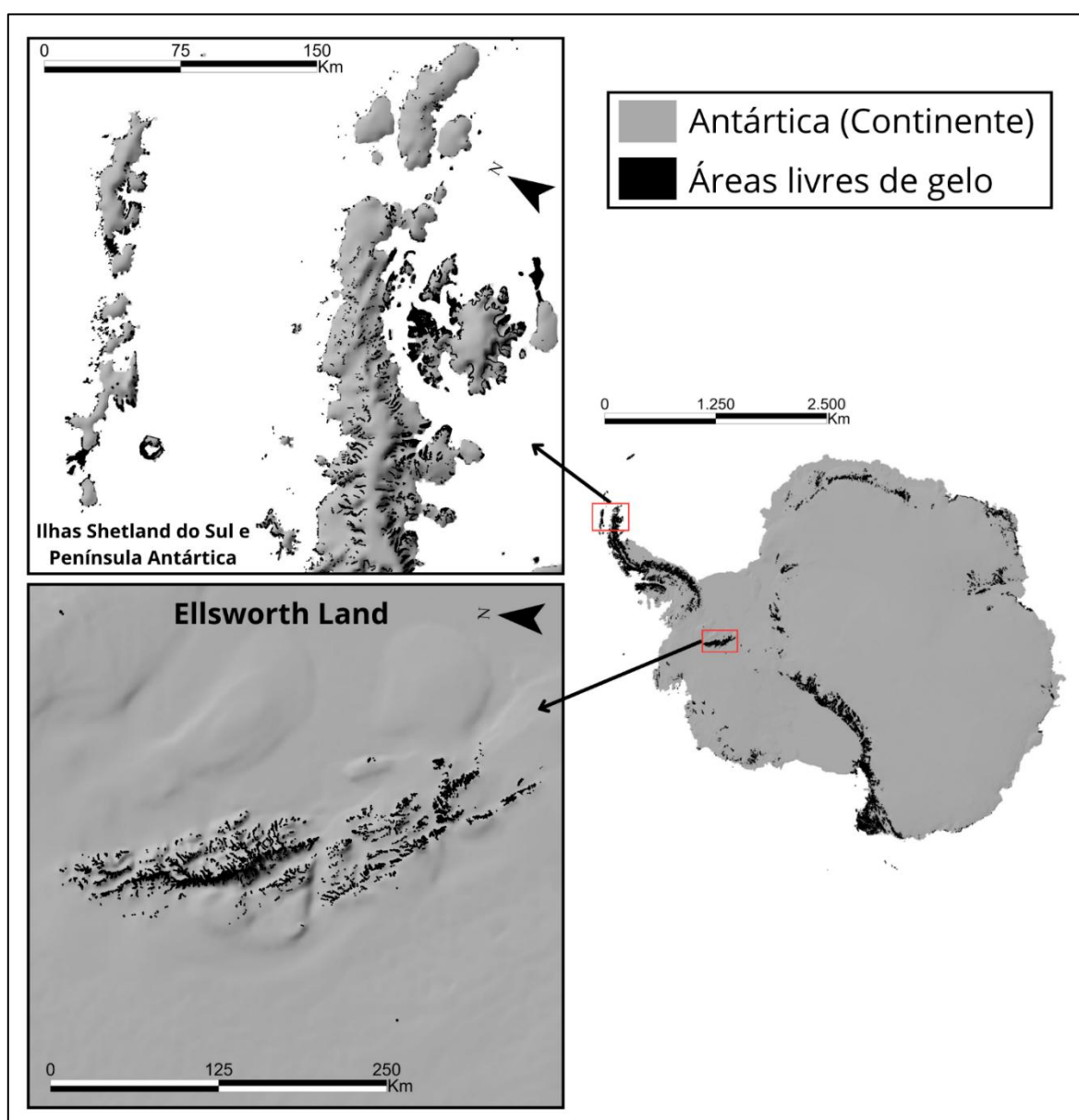


Figura 2 – Localização dos principais setores com áreas livres de gelo estudados pelo Grupo Terrantar até o momento, incluindo o Arquipélago das Shetlands do Sul, as áreas continentais e insulares da Península Antártica e os vales secos das Montanhas Ellsworth.

Fonte: Os autores.

A síntese apresentada neste artigo foi inicialmente discutida na Mesa-Redonda “Geomorfologia de Áreas Frias”, realizada durante o XV Simpósio Nacional de Geomorfologia, em Natal (2025), e representa uma celebração do esforço coletivo do grupo. Felizmente, o Terrantar não está sozinho nessa trajetória. Outros grupos e pesquisadores brasileiros vêm contribuindo de forma expressiva para o avanço das geociências polares, como os trabalhos desenvolvidos no INCT da Criosfera (ex, Perondi *et al.*, 2025; Vieira *et al.*, 2024; Andrade *et al.*, 2024; Perondi *et al.*, 2023; Rosa *et al.*, 2023; Petsch *et al.*, 2022a; Petsch *et al.*, 2022b; Perondi *et al.*, 2022; Costa *et al.*, 2022; Rosa *et al.*, 2021; Idalino *et al.*, 2021; Rosa *et al.*, 2020; Petsch *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2015; Rosa *et al.*, 2013; Rosa *et al.*, 2010)., evidenciando que as fronteiras do pensamento científico, assim como as dos trópicos, podem e devem ser transpostas.

2.1. A diversidade litológica e o relevo antártico

Pensar o relevo a partir de seus materiais é, em essência, refletir sobre o papel geomorfológico das rochas na configuração e evolução das paisagens. As rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, com suas propriedades mineralógicas, estruturais e texturais, exercem papel direto sobre a morfodinâmica superficial, influenciando tanto os processos erosivos e deposicionais quanto a gênese e o grau de desenvolvimento dos solos. Na Antártica, essa influência assume uma complexidade singular: as interações entre litologia, crioclastia, crioturbação e variações térmicas extremas fazem com que, em certas condições ambientais, as próprias rochas determinem tanto a morfologia das paisagens quanto as propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos formados nelas.

As áreas livres de gelo estudadas pelo grupo apresentam ampla diversidade litológica. Embora raramente se encontrem áreas compostas por um único litotipo, é possível reconhecer tendências regionais. Na Antártica Marítima predominam rochas vulcânicas e subvulcânicas de composição intermediária a máfica, associadas a episódios magmáticos cenozoicos e a estruturas tectônicas que condicionam o relevo, com rochas sedimentares e vulcanosedimentares subordinadas. Já nas ilhas situadas no mar de Weddell, vinculadas à Antártica Peninsular, observa-se maior representatividade de rochas sedimentares marinhas, frequentemente intercaladas com intrusões ígneas, como é o caso das Ilhas Marambio (Seymour), James Ross e Vega. No continente antártico, sobretudo nas regiões de atuação do Terrantar até o momento, as rochas metamórficas dominam, registrando histórias tectônicas anteriores à instalação das grandes coberturas glaciais, a exemplo das Montanhas Ellsworth.

O Arquipélago das Shetlands do Sul constitui um exemplo notável dessa interação entre o substrato geológico e o relevo. Sua gênese está ligada à evolução geotectônica da Península Antártica, decorrente da fragmentação de Gondwana durante o Mesozoico. A abertura da Passagem de Drake, no Oligoceno, e a subducção da placa Phoenix sob a placa Antártica resultaram na formação de um arco magmático insular (Lawver; Gahagan, 2003; Solari *et al.*, 2008). O recuo progressivo da placa subductada (rollback) originou o Estreito de Bransfield, que separa o arquipélago da Península. Essa dinâmica tectônica produziu uma complexa associação litológica composta por andesitos, basaltos, dioritos, brechas, tufos e diques, além de sequências sedimentares e vulcano-sedimentares acumuladas em ambientes marinhos e costeiros (Smellie *et al.*, 1984). Na Ilha Rei George, por exemplo, há evidências de alternância entre depósitos vulcânicos e sedimentos glaciogênicos ou marinhos, indicando sobreposição de eventos eruptivos, transgressões marinhas e glaciações sucessivas. Enquanto a Península Keller, onde se localiza a Estação Antártica Comandante Ferraz - EACF, apresenta domínio de andesitos e andesito piritizados, o extremo norte da ilha, em Cape Melville, conserva depósitos do Mioceno Inferior que registram interações entre geleiras e ambientes marinhos (Birkenmajer, 1982; 1984; Birkenmajer *et al.*, 1985).

As formas de relevo expressam de modo eloquente o papel geomorfológico das rochas. A Ilha Deception reflete um edifício vulcânico típico (Figura 3a); o horst de Barton, em King George (Tokarski, 1987), exhibe escarpas abruptas com controle tectônico (Figura 3b); e a Península Melville, com seus relevos tabulares em estruturas sedimentares homoclinais, exemplifica a resistência diferencial dos estratos (Figura 3c).



Figura 3 – Imagens representativas de formas de relevo controladas pela natureza litológica predominante: (a) encostas associadas a fluxos de lava no edifício vulcânico da Ilha Deception; (b) escarpas vinculadas à movimentação tectônica do horst de Barton, na Ponta Thomas, Ilha Rei George; com depósitos de tálus associados e (c) patamares alongados na Península Melville, com relevo plano controlado pelas camadas sedimentares de uma plataforma soerguida.

Fonte: imagens (a) e (c) - os autores, Fotos do acervo Terrantar; imagem (b) – Dadid Geddes, 1989.

Disponível em: <https://adam.antarcticanz.govt.nz/nodes/view/5865#idx109511>

Contudo, a influência litológica não se limita à morfologia estrutural. Estudos recentes têm demonstrado também sua atuação de processos paraglaciais e periglaciais, afetando diretamente a organização dos solos e o comportamento da paisagem sob congelamento e descongelamento. Lopes *et al.* (2022; 2023), por exemplo, em investigação pioneira na Ilha Snow, demonstraram como a diversidade litológica é determinante para a distribuição dos processos superficiais. A ilha, geologicamente composta por uma sequência estratigráfica do Grupo Byers, com depósitos marinhos do Jurássico Superior ao Cretáceo Inferior intercalados a intrusões e brechas vulcânicas (Hathway; Lomas, 1998; Cantrill, 1998), apresenta dois domínios paisagísticos contrastantes. O domínio sedimentar, associado a processos paraglaciais, caracteriza-se por superfícies instáveis, dinâmica erosiva intensa e solos rasos, pouco desenvolvidos e texturalmente heterogêneos, evidenciando a baixa resistência dos sedimentos à erosão. Já o domínio ígneo, relacionado a processos periglaciais, apresenta maior estabilidade, com terraços vegetados e solos mais maduros, com maior disponibilidade de nutrientes. Neste setor, as formas associadas à gelifluxão, aos solos com padrão e ao permafrost são mais expressivas, demonstrando a influência da litologia na intensidade e no tipo de processos criogênicos. Essa diferenciação sugere o papel da litodiversidade no balanço entre erosão e estabilidade e, por isso, a associação com os estágios evolutivos dos ecossistemas antárticos.

Resultados similares foram obtidos por Rodrigues *et al.* (2019) na Ilha Nelson, em Harmony Point, onde o mapeamento geomorfológico indicou uma relação estreita entre os tipos de rocha e as landforms. Mesmo no domínio ígneo, diferenças marcantes foram observadas entre basaltos e tufos andesíticos quanto à atuação do periglacialismo. Nas áreas de ocorrência de tufos, mais frágeis à crioclastia, formam-se campos de solos com padrões bem desenvolvidos de *mud boils* e guirlandas de pedra, resultantes da separação de frações finas e grossas durante os ciclos de congelamento e descongelamento. Já nos setores dominados por basaltos andesíticos, a maior coesão das rochas limita o desenvolvimento desses padrões, resultando em feições mais alongadas e com menor padronização. Isso sugere que a resistência diferencial das rochas atua diretamente na gênese dos microrrelevos associados.

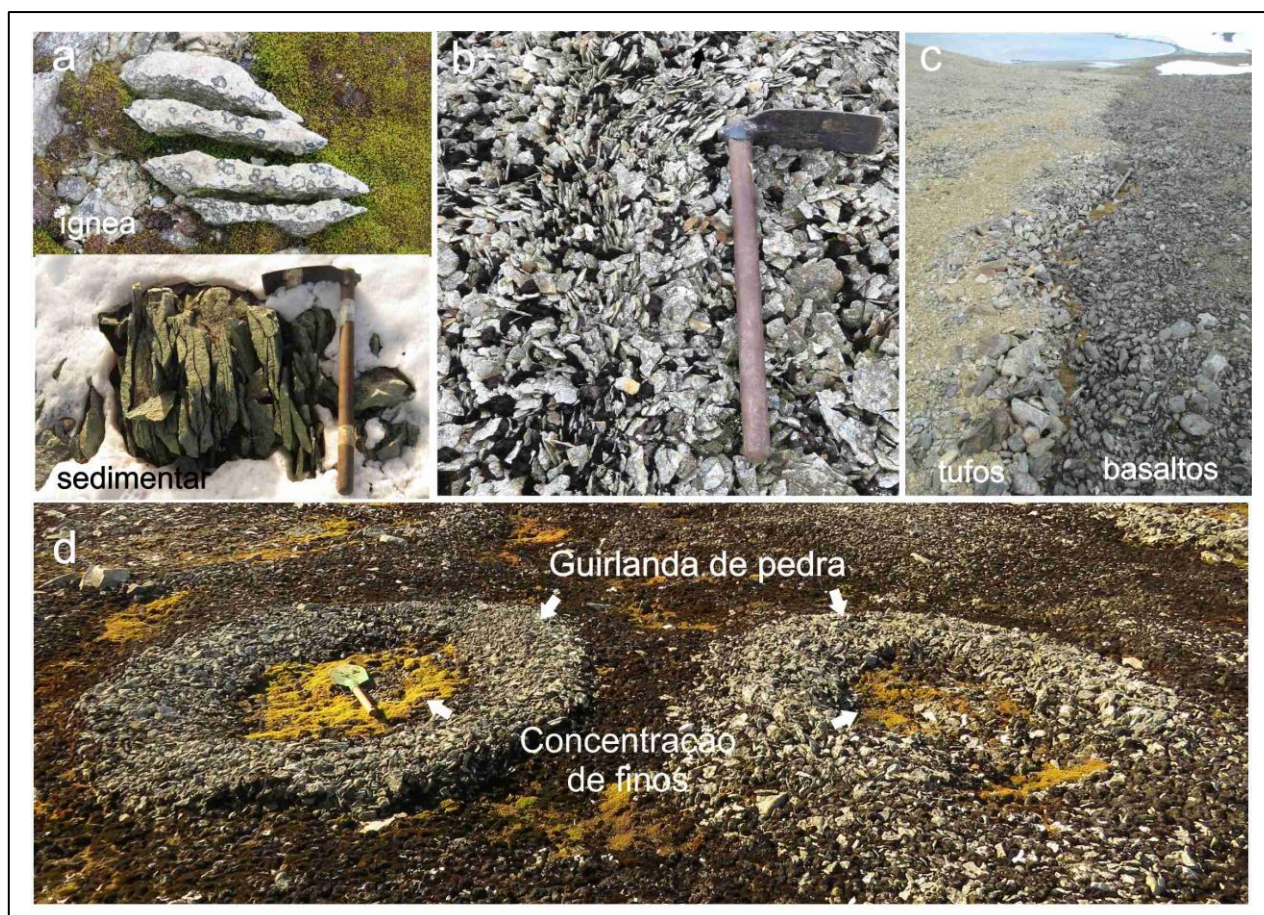


Figura 4 – Imagens representativas de processos associados à formação de relevos e solos na Antártica com evidência de comportamento diferencial entre os tipos de rochas: (a) crioclastia em blocos de rochas ígneas (acima) e sedimentares (abaixo), evidenciando que, embora ambas sejam fragmentadas, as rochas sedimentares tendem a gerar maior número de fragmentos e de tamanhos variados; (b) crioturbação, mostrando a orientação de fragmentos placoidais de tufos andesíticos; (c) superfícies cobertas por fragmentos crioclastados de basaltos andesíticos (à direita) e de tufos andesíticos (à esquerda), sendo estes mais facilmente fragmentados por sua natureza vulcano-sedimentar; (d) solos com padrões do tipo *mud boils*, com guirlandas de pedras bem marcadas e acúmulo de finos (silte e argila) no centro, definindo distintos padrões de colonização vegetal e microrelevo.

Fonte: Os autores. Fotos do acervo Terrantar.

Por fim, destaca-se o papel das rochas piritizadas na gênese dos solos ácidos sulfatados e na configuração dos relevos associados, um fenômeno de grande importância pedogeoquímica em ambientes antárticos (Figura 5). Embora o intemperismo químico seja, em geral, limitado pelas baixas temperaturas (Campbell; Claridge, 1987; Lopes *et al.*, 2021), a presença de sulfetos metálicos, como pirita, calcopirita e arsenopirita, altera profundamente essa dinâmica (Lopes *et al.*, 2019; Simas *et al.*, 2008). A oxidação atmosférica desses minerais gera ácido sulfúrico, promovendo forte acidificação do meio e a dissolução de minerais primários, sobretudo em ambientes mal drenados ou sujeitos a variações do nível freático (Dent, 1986). Em condições altamente oxidantes e de pH baixo, forma-se a jarosita (Figuras 5e, f), responsável pela coloração amarelada dos horizontes superficiais (Dent, 1986; Simas *et al.*, 2008) (Figuras 5a, b, c). Esses solos apresentam

horizontes sulfúricos ($\text{pH} \leq 3,5$) (Figura 5d), elevada mobilidade de alumínio e metais pesados, além de acentuada deficiência em fósforo disponível (Bigham; Nordstrom, 2000; Souza *et al.*, 2012).

A ocorrência de solos com essas características foi documentada em diversas ilhas da Antártica Marítima. Na Ilha Rei George, estudos de Simas *et al.* (2008) e Lopes *et al.* (2019) demonstraram que a oxidação de sulfetos nas penínsulas Keller e Barton favorece a formação de solos fortemente ácidos, com horizontes enriquecidos em minerais sulfatados e desestabilização expressiva de silicatos primários. Lopes *et al.* (2019) mostrou que esse fenômeno resulta na mobilização geoquímica do ferro durante o processo de sulfurização, levando à formação de materiais singulares, como crostas ferruginosas em pleno ambiente antártico, ou seja, horizontes petroplínticos desenvolvidos sem vínculo com paleoclimas tropicais pretéritos. Esses horizontes petroplínticos impactam diretamente a morfologia do relevo, gerando setores mais resistentes e estabilizados nos sopés das encostas.

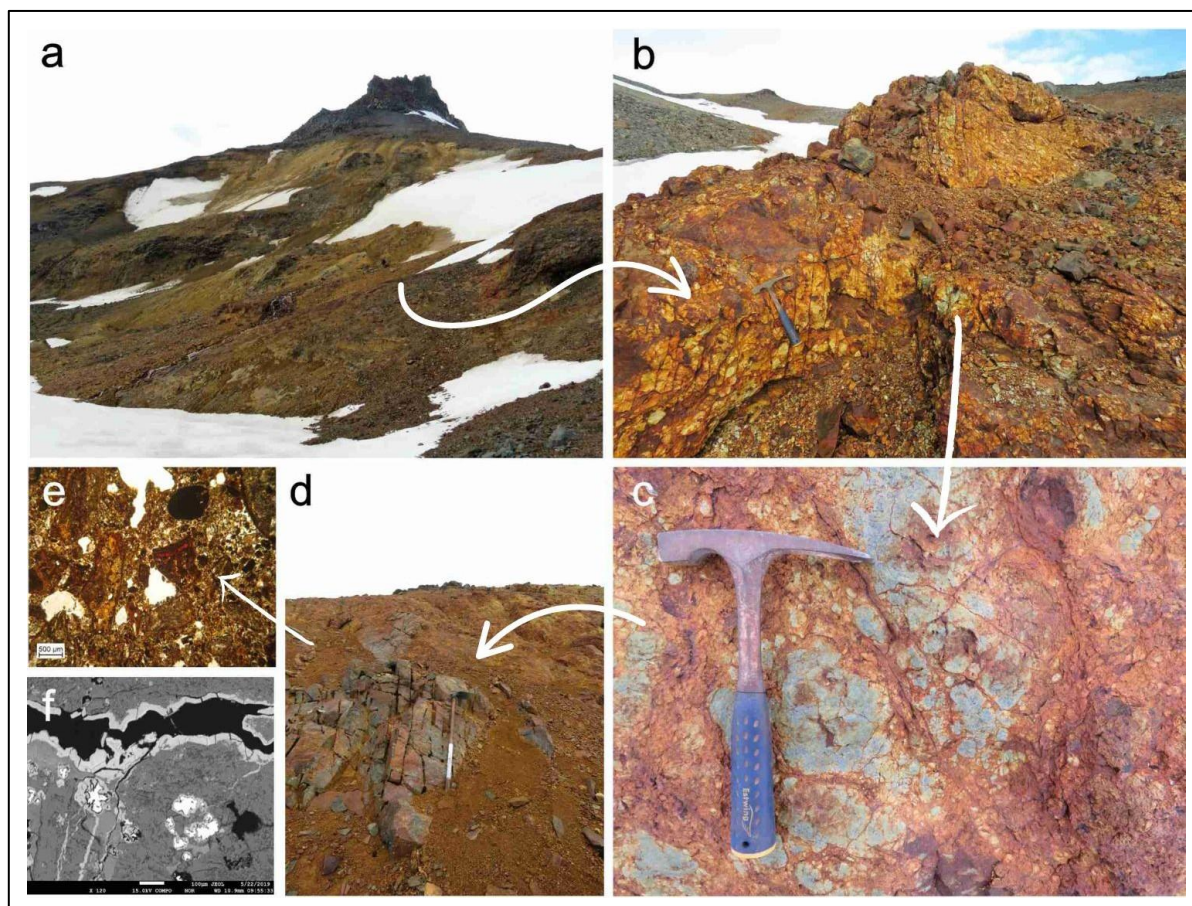


Figura 5 – Processo de sulfurização decorrente do intemperismo de rochas sulfetadas: (a) áreas oxidadas (*yellow points*); (b) afloramentos de andesitos ricos em sulfetos oxidados; (c) detalhe do processo de oxidação ao longo das fraturas; (d) formação de solos sulfatados; (e–f) evidências microscópicas em fotomicrografias e em imagens de elétrons retroespalhados da formação de sulfatos e hidróxidos de ferro. **Fonte:** Os autores. Fotos do acervo Terrantar.

2.2. O clima e o relevo antártico

O clima constitui um dos fatores fundamentais na evolução da paisagem antártica. As variações paleoclimáticas ao longo do tempo geológico deixaram marcas profundas nos registros deposicionais, permitindo a reconstituição de antigos ambientes por meio de *proxies* paleontológicos e geoquímicos, que guardam a memória ambiental do continente. Na Ilha Seymour, por exemplo, Ferreira *et al.* (2023) demonstraram que, durante a transição Maastrichtiano–Daniano, o clima passou de condições quentes e úmidas no final do Cretáceo para ambientes mais frios e secos após o limite K–Pg, acompanhados de redução da produtividade marinha e de maior aporte continental, refletindo mudanças abruptas associadas ao evento de extinção em massa. Esses resultados, somados a outros estudos, indicam que a Antártica já apresentou condições paleoambientais mais amenas, úmidas e, por vezes, florestadas, radicalmente distintas daquelas associadas às condições polares e glaciogênicas atuais.

Ao longo do Cenozóico, a configuração das paisagens atuais resultou de uma sucessão de glaciações e períodos interglaciais. Entre aproximadamente 50 e 20 milhões de anos, o continente passou por uma série de eventos glaciais marcantes, como Cracow, Polonez, Legru e Melville, intercalados por fases interglaciais mais brandas, como Arctowski, Wesele e Wawel (Birkenmajer, 1983; Rachlewicz, 1999). No Pleistoceno Tardio, o Último Máximo Glacial (c. 20–18 ka BP) representou o ápice da expansão do gelo, quando vastas porções do relevo foram remodeladas pela ação erosiva das geleiras. A deglaciação, entre 9 e 5 mil anos atrás, foi marcada pelo recuo das frentes glaciais e pela consequente redução da cobertura de gelo (Mäusbacher *et al.*, 1989). Durante o Ótimo Climático Holocênico (8–7 ka BP), as condições mais amenas favoreceram a estabilização ambiental e a retração glacial (Domack *et al.*, 2001). Posteriormente, entre 6,2 e 2,7 ka BP, ocorreu um novo avanço das geleiras, seguido de um recuo secundário associado ao Ótimo Climático do Holoceno Tardio (Yoon *et al.*, 2000). Finalmente, entre 1200 e 1800 d.C., durante a Pequena Idade do Gelo, registrou-se a última expansão glacial, que, segundo Seong *et al.* (2009), pode ser observada na paisagem de algumas áreas afetadas pela presença de campos de morainas bem preservados.

Durante o Holoceno, o recuo das geleiras levou à formação das áreas livres de gelo hoje estudadas, bem como ao estabelecimento de ambientes periglaciais e paraglaciais. Esses contextos revelam paisagens dinâmicas, fortemente controladas pela ação de movimentos gravitacionais e pela presença do permafrost. Autores como Lopez-Martínez *et al.* (2012) inventariaram o conjunto de formas periglaciais nas Ilhas Shetland do Sul e

registraram a presença de 33 tipos distintos de feições criogênicas, amplamente distribuídas e intimamente associadas à ocorrência de permafrost. As formas mais comuns são os campos de pedras (*stone fields*) e os solos com padrões (*patterned ground*). Esses autores destacaram a influência direta das condições climáticas regionais e concluíram que os fenômenos periglaciais se tornam dominantes acima de 25–30 m s.n.m., com mais de 70% da superfície ocupada por formas relacionadas à camada ativa e ao permafrost, cuja dinâmica desempenha papel central na hidrologia e na estabilidade ecológica das áreas livres de gelo.

Posteriormente, Lopez-Martínez *et al.* (2016), utilizando técnicas de sensoriamento remoto, compartimentaram a região em sete classes de terreno com base em feições superficiais e processos dominantes. As classes 1 a 4, compostas por praias atuais e holocênicas, pavimentos, *stone fields*, solos com padrões, formas nivais e microtorres, correspondem a superfícies planas ou suavemente inclinadas, nas quais prevalecem processos criogênicos ativos, como crioturbação, soerguimento e rastejamento por gelo, fissuração por congelamento e ação eólica, configurando os setores mais instáveis e dinâmicos da paisagem. A classe 5 engloba depósitos de *till*, afloramentos rochosos e falésias, com relevo heterogêneo modelado por morainas de núcleo de gelo, superfícies expostas e mantos detríticos. Já as classes 6 e 7, associadas respectivamente a lagos e áreas mal drenadas e a superfícies com gelo e neve sazonais, representam os ambientes mais estáveis, de elevado valor ecológico, localizados desde o nível do mar até plataformas elevadas, modeladas por processos nivais e criogênicos sazonais.

Contudo, não se pode falar em homogeneidade climática em escala regional. Pesquisas desenvolvidas pelo Grupo Terrantar têm revelado gradações climáticas expressivas, refletidas em variações de solos, de processos e de formas do relevo. Essas observações corroboram a proposição de Campbell e Claridge (1987) de que a Antártica deve ser entendida como um continente de “muitos climas”, que variam do subpolar úmido ao polar árido. No gradiente que se estende da Antártica Marítima ao interior continental, observa-se uma nítida redução da umidade atmosférica e da precipitação líquida. Nas regiões marítimas, durante o verão, as precipitações líquidas podem atingir valores superiores a 700 mm anuais, favorecendo o degelo superficial, a drenagem sazonal e a cobertura vegetal (Figura 6a). Já nas ilhas da Antártica Peninsular, a umidade é menor e a paisagem revela maior aridez relativa, com escassa cobertura vegetal e a ocorrência de eflorescências salinas ao longo de canais de escoamento superficial (Figura 6b). Tais condições caracterizam um semi-deserto polar, em que processos erosivos intensos em

rochas sedimentares pouco coesas formam *badlands* (Souza *et al.*, 2014). No interior continental, especialmente na região dos Dry Valleys das Montanhas Ellsworth (Figura 6c), predominam crostas salinas, pavimentos desérticos clássicos e feições indicativas de forte déficit hídrico (Schaefer *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2017), configurando um mosaico climático regional que deve ser considerado na análise das macroformas do relevo.

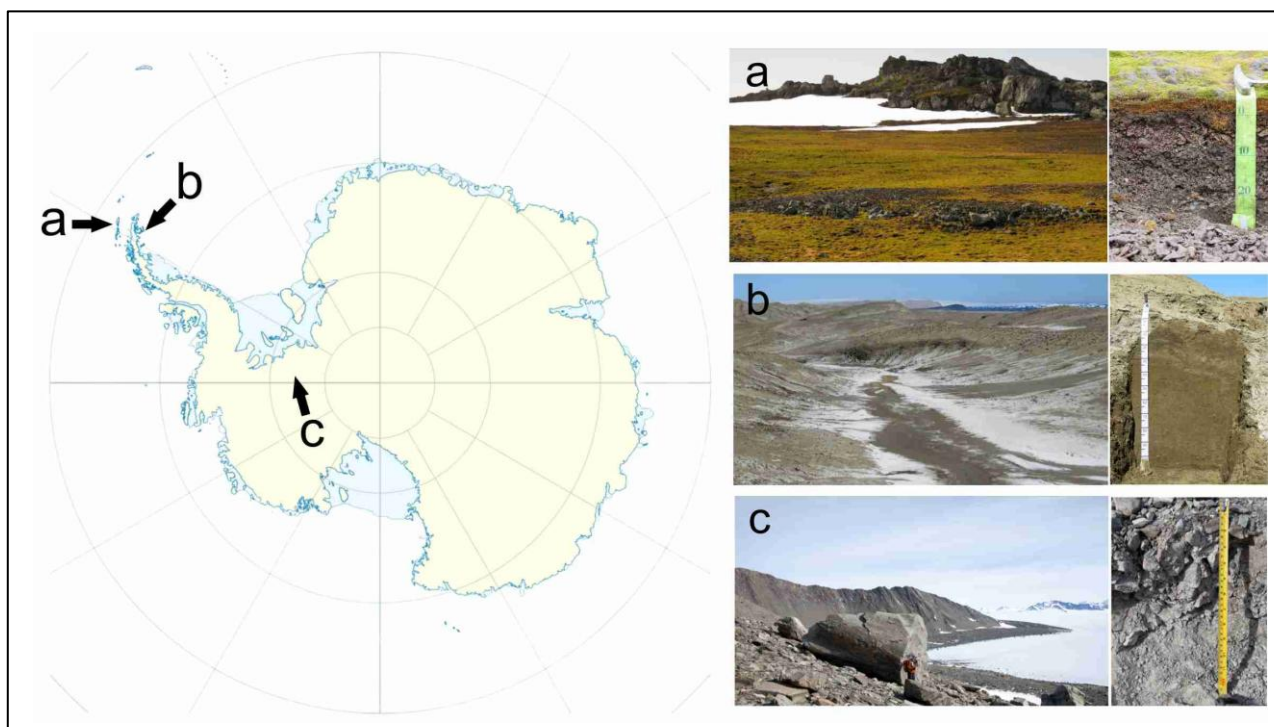


Figura 6 – Imagens representativas dos gradientes climáticos regionais e sua influência nas paisagens antárticas: (a) paisagens úmidas da Antártica Marítima, com maior colonização vegetal e solos mais desenvolvidos; (b) paisagens do semideserto polar nas ilhas do Mar de Weddell, na Península Antártica, com acúmulo de sais na superfície e no solo; (c) paisagens desérticas dos vales secos da Antártica Continental, nas Montanhas Ellsworth, com pavimentos desérticos típicos e solos rasos e salinos.

Fonte: Os autores.

Além do macroclima, fatores microclimáticos e topoclimáticos desempenham um papel decisivo na organização ambiental. Contudo, uma escala de análise vem se destacando nos estudos do Terrantar: o pedoclima. Este termo designa o conjunto de condições térmicas e hídricas do solo, que determinam diretamente o comportamento da camada ativa e do permafrost. Segundo French (2007), a camada ativa corresponde ao estrato superficial que sofre congelamento e degelo sazonais, enquanto o permafrost constitui o material que permanece abaixo de 0 °C por pelo menos dois anos consecutivos, sendo sua dinâmica fortemente controlada pelas variações térmicas e hídricas.

Para investigar tais fenômenos, o grupo implantou uma das maiores redes de monitoramento de permafrost do mundo, atualmente composta por mais de 40 sítios

instrumentados distribuídos pela Antártica (33) (Figura 7), Andes (9) e, mais recentemente, pelo Ártico (2). Esses sensores permitem compreender a dinâmica térmica e hídrica dos solos, avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre o permafrost e projetar cenários de impacto relacionados à liberação de carbono e de gases de efeito estufa (Melo *et al.*, 2025; Ferreira *et al.*, 2025; Schaefer *et al.*, 2023; Gjorup *et al.*, 2020; Almeida *et al.*, 2017; Michel *et al.*, 2014). O pedoclima, portanto, constitui um marcador fundamental para o entendimento da paisagem antártica, pois, em associação ao macroclima, permite interpretar os graus de estabilidade e instabilidade do permafrost, os processos erosivos e gravitacionais, a expansão da cobertura vegetal e a morfodinâmica das vertentes. A integração entre macroclima e pedoclima tem representado um dos avanços mais significativos para compreender a dinâmica contemporânea das paisagens antárticas, revelando como o solo se torna um registro sensível e ativo das transformações ambientais em curso no extremo sul do planeta.

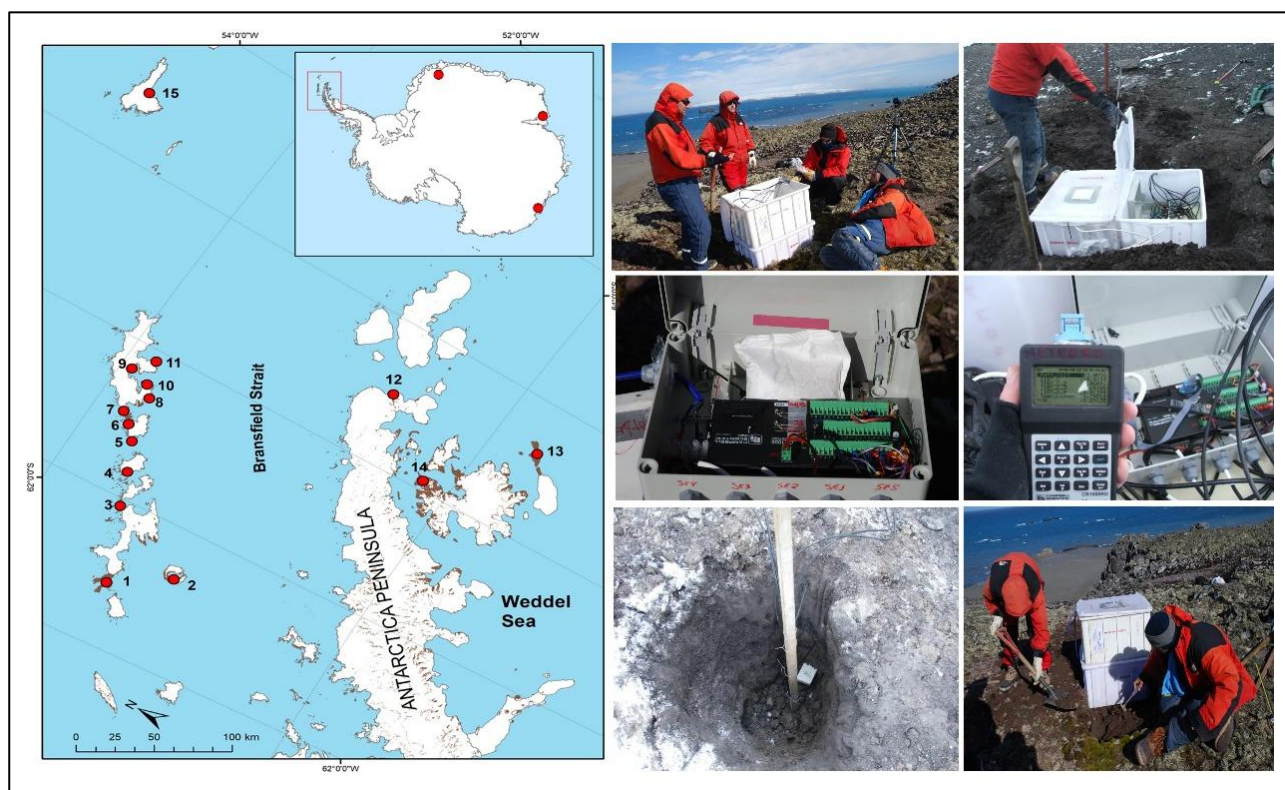


Figura 7 – Localização das áreas com sítios de monitoramento térmico e hídrico do solo, que formam a Rede Terrantar de estudos da camada ativa e do permafrost na Antártica. Os pontos vermelhos indicam os locais monitorados, entre eles, diversos com mais de um sensor, evidenciando a ampliação e a consolidação das pesquisas pedoclimáticas desenvolvidas pelo grupo.

Fonte: Os autores. Fotos do acervo Terrantar.

2.3. A colonização biológica e o relevo antártico

Embora a Antártica seja, em termos comparativos, o continente com menor biomassa do planeta, toda forma de vida, dos macro aos micro-organismos, desempenha um papel crucial na evolução de suas paisagens. De certo modo, pode-se afirmar que a vida transforma tudo na Antártica, pois, a partir da colonização biológica, os ciclos naturais se tornam efetivamente biogeoquímicos, conduzindo os processos geomorfológicos por caminhos distintos daqueles esperados em ambientes puramente físicos.

Nos estudos desenvolvidos pelo Grupo Terrantar, essa relação tem se tornado cada vez mais evidente. Uma das principais preocupações do grupo é compreender as interações entre solo, vegetação, organismos e paisagem, relacionando-as às mudanças climáticas contemporâneas. O grupo tem alcançado destaque internacional pelos estudos sobre a interação entre aves marinhas e seus locais de reprodução, com pesquisas que tornaram seus integrantes referência mundial na compreensão da formação de solos ornitogênicos e no estudo da fosfatização (Vieira *et al.*, 2024).

A fosfatização constitui um dos processos pedogenéticos mais importantes e característicos da Antártica (Simas *et al.*, 2007). Resulta da interação entre o guano de aves marinhas, especialmente de pinguins, e os substratos rochosos e sedimentares expostos nas áreas livres de gelo. Nesses ambientes, a deposição e a decomposição dos excrementos promovem reações químicas associadas à decomposição da matéria orgânica, nas quais compostos ricos em fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), cobre (Cu) e zinco (Zn) interagem com os minerais do substrato, originando produtos fosfatados secundários, além da incorporação de fosfatos biogênicos residuais, como apatitas de osso. Esse processo, conforme destacado por Tatur (1989, 2002), revela uma complexa dinâmica pedogenética na qual a atividade biológica atua como o principal agente de transformação geoquímica e mineralógica.

Os resultados acumulados ao longo de mais de duas décadas de pesquisa pelo grupo evidenciam que a fosfatização é responsável pela formação de uma diversidade de produtos, incluindo crostas, piscinas de guano e solos organizados em perfis ou bolsões (Figura 8). Os solos ornitogênicos fosfatizados estão entre os mais profundos, com maior diversidade de horizontes, agregados mais bem desenvolvidos e maior teor de argila. Isto é, são solos geoquimicamente mais intemperizados e dotados de notável estabilidade estrutural, com a formação de pedos que proporcionam maior capacidade de retenção de água líquida e maior disponibilidade de nutrientes. Esses atributos resultam em regimes térmicos diferenciados, que reduzem a perda de umidade e atenuam os efeitos do

congelamento e do descongelamento superficiais. Além disso, os teores de fósforo disponível observados nesses solos figuram entre os mais altos já registrados na Antártica, atingindo valores surpreendentes de 10.047 mg dm³ de P, conforme registrado por Rodrigues *et al.* (2021).

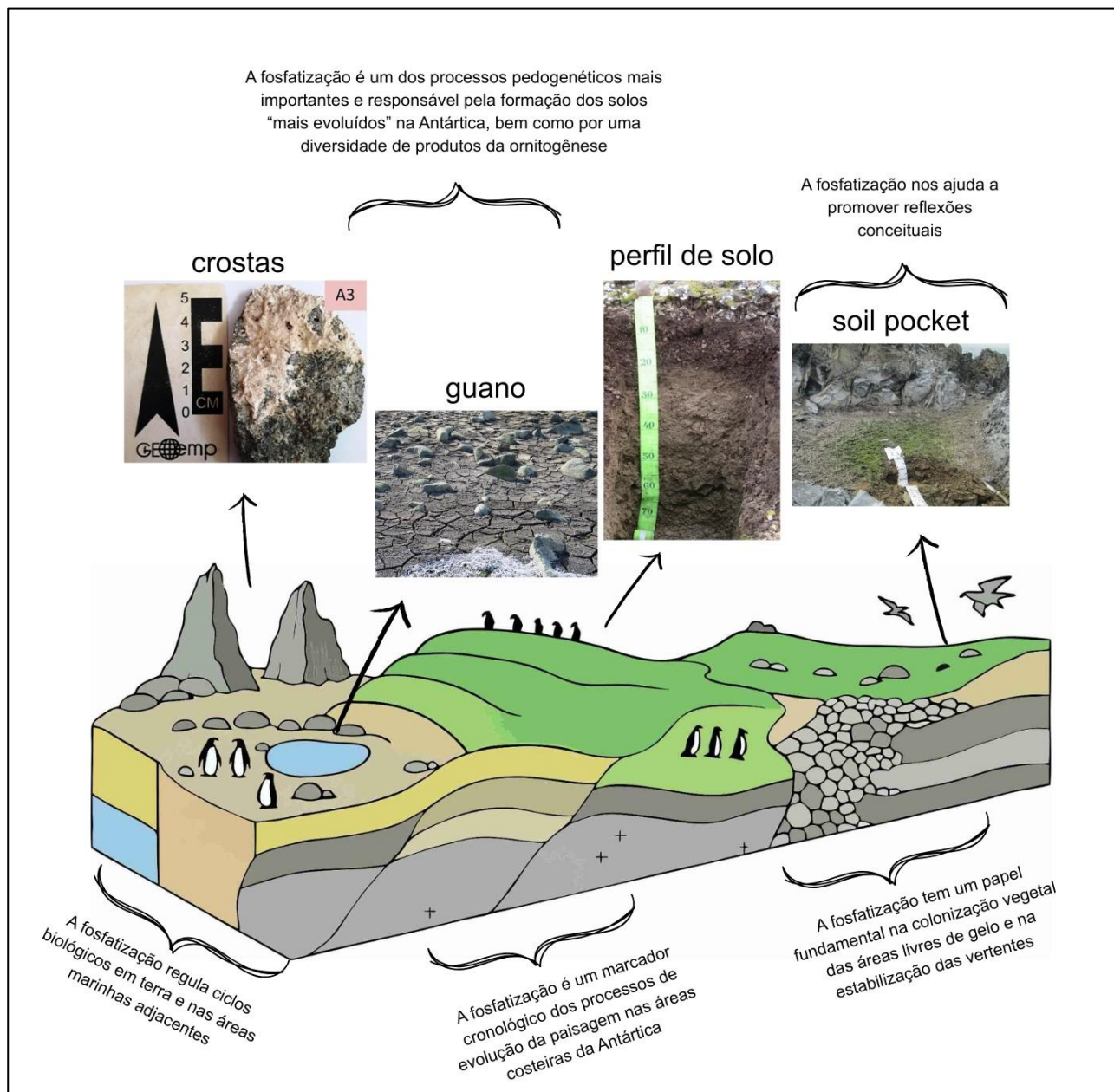


Figura 8 – Representação esquemática da influência da colonização biológica da avifauna na evolução das paisagens costeiras da Antártica, por meio da fosfatização.

Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2021).

Justamente por oferecerem condições favoráveis de fertilidade e umidade, os solos ornitogênicos favorecem o desenvolvimento de comunidades vegetais compostas por musgos, líquens, algas, gramíneas e microrganismos adaptados. Esses ambientes se

tornam verdadeiros *hot spots* de biodiversidade terrestre na Antártica, sustentando cadeias biológicas complexas e promovendo o estabelecimento de novas comunidades vegetais que contribuem para a fixação de carbono e para a estabilização da superfície do solo (Schaefer *et al.*, 2004; Pereira *et al.*, 2013; Abakumov *et al.*, 2020).

Os solos ornitogênicos possuem, portanto, amplas implicações biogeoquímicas e geomorfológicas, pois regulam os ciclos de nutrientes tanto em terra quanto nas águas marinhas adjacentes. O fósforo mobilizado a partir do guano e dos solos ornitogênicos alimenta o ciclo deste elemento, sendo redistribuído lateralmente por lixiviação ou erosão física, alcançando zonas costeiras e contribuindo para a fertilização das águas marinhas adjacentes (Zhu *et al.*, 2014). Dessa forma, a fosfatização integra os ecossistemas terrestres e marinhos, estabelecendo um elo direto entre a biota e a evolução geoquímica da paisagem antártica.

Do ponto de vista da evolução da paisagem, a fosfatização se configura como um verdadeiro marcador cronológico das transformações costeiras. A migração das colônias de aves marinhas, controlada pelo recuo glacial e pelos efeitos da compensação glacio-isostática, deixa um registro espacial e temporal da intensidade deste processo pedogenético. As colônias ativas, as zonas adjacentes e as colônias abandonadas representam estágios distintos e complementares de fosfatização, refletindo diferentes idades e graus de evolução dos solos e, conseqüentemente, das superfícies geomórficas. Assinaturas mineralógicas, com a transformação de fosfatos de cálcio em fosfatos de ferro e de alumínio, marcam essas etapas evolutivas (Tatur, 2002). A fosfatização acompanha a estabilização dos depósitos glaciais e marinhos e a reorganização das vertentes ao longo do Holoceno, permitindo reconstruir as fases sucessivas da ocupação biológica e da modelagem costeira (Rodrigues *et al.*, 2021; Bockheim, 2015).

A fosfatização também tem relevância conceitual para a Pedologia moderna, ao desafiar a visão clássica de solos estruturados em horizontes bem definidos. Muitos solos ornitogênicos não se expressam por meio de perfis típicos, mas sob a forma de “soil pockets”, concentrando material fosfatado em depósitos descontínuos, ao longo de fraturas e bolsões de acumulação de guano (Lopes *et al.*, 2022). Essa característica amplia o entendimento sobre o papel dos organismos na gênese dos solos e tem levado à revisão de sistemas taxonômicos, que atualmente incorporam o caráter ornitogênico como atributo diagnóstico. Essa é, inclusive, uma das contribuições mais relevantes dos estudos desenvolvidos pelo Terrantar, que vêm influenciando classificações taxonômicas

internacionais ao consolidar o caráter ornitogênico como elemento definidor em contextos pedogenéticos específicos.

O exposto mostra que a fosfatização, os solos ornitogênicos e toda a dinâmica revelada pelos estudos do Terrantar exemplificam como a colonização biológica é capaz de remodelar profundamente o ambiente físico, tornando-se um elo essencial para compreender a coevolução entre a geosfera e a biosfera. A Antártica, tradicionalmente vista como um deserto de gelo, revela-se um laboratório natural para observar a potência transformadora da vida, mesmo figurando entre os ambientes mais extremófilos do planeta.

2.5. O tempo e o relevo antártico

O tempo é um agente determinante na evolução do relevo. Ele regula as transformações das formas terrestres, atuando como o eixo que conecta processos, materiais e formas. Na Geomorfologia, o tempo constitui uma dimensão escalar que se manifesta sob diferentes perspectivas. Há o tempo longo, ou morfogenético, associado à duração e à intensidade dos processos que moldam as grandes estruturas e superfícies, revelando a história profunda da modelagem do relevo. Em contraste, o tempo médio a curto, ou morfodinâmico, expressa o conjunto de mudanças processuais que ocorrem em escalas locais e temporais mais restritas, como as observadas em vertentes e fundos de vales, em consonância com o tempo histórico, perceptível nas transformações recentes e nas intervenções humanas sobre a paisagem.

No caso das superfícies geomórficas, o tempo cronológico expressa-se na idade absoluta ou relativa das paisagens, correspondendo aos períodos em que as dinâmicas erosivas e deposicionais ocorreram e se estabilizaram. Já o tempo morfogenético, ou histórico-ambiental, refere-se à duração dos processos responsáveis pela configuração atual das formas, indicando fases de maior ou menor estabilidade vinculadas às condições climáticas, tectônicas e biológicas. A análise do tempo geomorfológico, portanto, permite compreender como as paisagens evoluem, se transformam e se estabilizam, ou permanecem em transição, nas condições atuais. Essa perspectiva abre caminho para o estudo de sequências temporais integradas, como as cronossequências, que relacionam, ao longo do tempo, as formas, os materiais e os processos.

As cronossequências de solos, conceituadas a partir do clássico sistema dos fatores de formação proposto por Hans Jenny (1941), constituem sequências em que o tempo é o principal fator diferenciador entre os perfis. O vínculo com o relevo torna-se evidente ao reconhecer que não apenas o solo evolui, mas também a própria superfície sobre a qual

ele se desenvolve. À medida que a paisagem se estabiliza, a pedogênese se intensifica, conduzindo à formação de horizontes mais desenvolvidos e à diversificação dos atributos físicos, químicos e mineralógicos. Contudo, o estudo de cronossequências em grande parte do planeta é dificultado pela impossibilidade de isolar o tempo dos demais fatores de formação. Na Antártica, entretanto, essa condição é notavelmente alcançável. O tempo-zero, marcado pelo recuo das geleiras e pela exposição das áreas antes cobertas por gelo, estabelece o ponto de partida de uma nova cronologia: materiais glaciares e superfícies crioplanadas são expostos à superfície e, a partir daí, pedogênese e morfogênese iniciam um diálogo contínuo, conduzindo a transformação progressiva do ambiente.

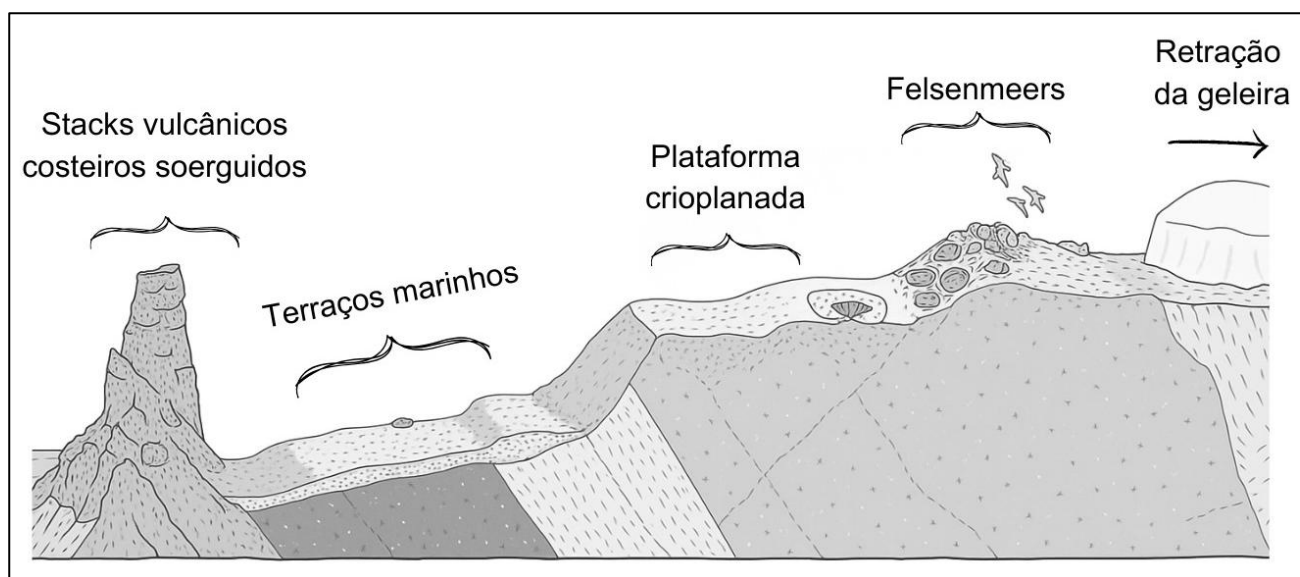


Figura 9 – Representação esquemática da influência da retração das geleiras, da compensação glacioisostática e da crioplanagem na formação de superfícies geomórficas nas áreas costeiras da Antártica, com destaque para os stacks marinhos soerguidos e os níveis de terraços marinhos escalonados.

Fonte: Os autores.

Partindo dessa premissa, o Grupo Terrantar tem investigado diversas áreas da Antártica para compreender o papel do tempo na evolução do relevo e do solo. Na Península Keller, Machado (2020) analisou as propriedades dos solos de diferentes superfícies geomórficas, identificando nelas uma cronossequência típica. As evidências mineralógicas, micromorfológicas e químicas demonstram uma sucessão temporal que acompanha a transição de um ambiente dominado por processos glaciares e crioclásticos (S1) para condições pedogeomórficas mais complexas (S2–S3), nas quais o intemperismo químico, a sulfurização e a crioturbação tornam-se agentes dominantes. A presença de minerais secundários, como jarosita, schwertmannita e hidrobasaluminita, associados à alteração geoquímica dos sulfetos, destaca o papel dos processos biogeoquímicos na

reorganização do material de origem e na formação de horizontes pedológicos, marcados por um incremento da acidez e pela diversificação das feições de intemperismo. No extremo oposto da sequência (S4), a estabilização geomorfológica e o declínio da criodinâmica marcam o início de uma fase de equilíbrio biopedogênico, caracterizada pela colonização biológica, pela acumulação de matéria orgânica e pela formação de crostas criptogâmicas. Essa transição reflete uma tendência ao esgotamento dos processos criogênicos e a ascensão de controles biogeoquímicos sobre a evolução superficial, resultando em solos mais estruturados, agregados e funcionalmente estáveis. Assim, a cronosequência da Península Keller traduz um continuum temporal e processual em que a coevolução entre relevo e solo conduz à crescente complexidade morfopedológica, simbolizando a passagem de uma paisagem glacial instável a um sistema edáfico-ecológico em equilíbrio sob condições periglaciais.

Um exercício comparável foi realizado por Rodrigues *et al.* (2022) em Harmony Point (Ilha Nelson), no qual o levantamento de três níveis sucessivos de terraços marinhos permitiu compreender as assinaturas pedológicas da evolução costeira quaternária nesta área. Os autores demonstraram que os solos dos terraços mais elevados apresentam maior grau de desenvolvimento, cores avermelhadas, estrutura granular e horizontes B incipientes, atributos que refletem maior tempo de exposição e atividade pedogenética mais intensa. A idade crescente dos terraços está associada à compensação glacioisostática, que eleva progressivamente as antigas superfícies marinhas, criando um gradiente temporal que controla a intensidade dos processos de fosfatização, do intemperismo químico e da atividade biológica (Figura 8). Os solos mais próximos à praia atual, em contraste, retêm altos teores de sódio e de minerais primários pouco alterados, sendo classificados como Gelorthents, imaturos e fortemente influenciados pelo aporte marinho. A progressiva substituição desses solos por Haplogelepts mais desenvolvidos nos terraços superiores evidencia a condição taxonômica da cronosequência, na qual a interação entre processos biológicos, hidrológicos e geomorfológicos amplia a maturidade pedogenética e confere às paisagens costeiras um registro inequívoco da passagem do tempo.

A situação observada em Keller e Harmony Point repete-se em diversas outras áreas costeiras da Antártica Marítima, onde o tempo atua como o grande arquiteto da paisagem e revela, em escalas distintas, as etapas de transformação entre o gelo, a rocha e o solo vivo. Nesses ambientes extremos, o tempo não é apenas uma medida cronológica, mas um agente ativo que imprime ritmo, memória e direção à evolução da superfície terrestre, convertendo o efêmero em duradouro e o mineral em biogeoquímico.

3. DA ANTÁRTICA AO BRASIL (VOLTA)

Na trajetória de mais de duas décadas dedicadas ao estudo da evolução das paisagens antárticas e à compreensão dos cenários de mudanças climáticas globais, os pesquisadores brasileiros têm realizado um movimento de retorno. Ao mesmo tempo em que levam ao continente gelado o olhar formado sob a lógica tropical, também trazem da Antártica novos referenciais teóricos e metodológicos que permitem reinterpretar fenômenos clássicos sob outras perspectivas. Assim, mais do que um deslocamento geográfico, essa experiência representa uma troca epistemológica: um exercício de comparação e de calibração de escalas que enriquece a leitura das paisagens brasileiras (Figura 10).

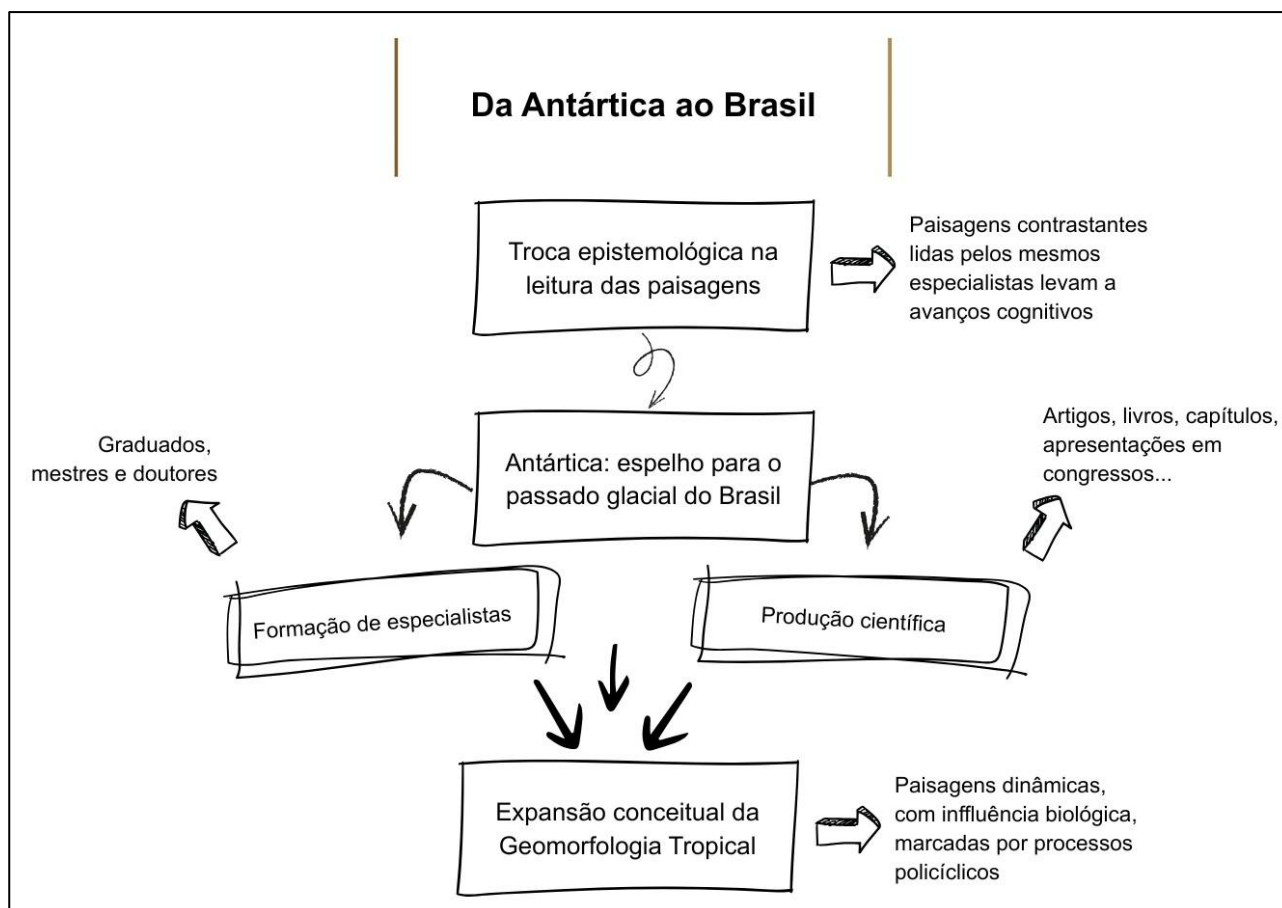


Figura 10 – Fluxograma esquemático que ilustra o movimento de retorno do saber científico, evidenciando o feedback positivo entre as experiências adquiridas na Antártica e a releitura das dinâmicas e processos formadores das paisagens tropicais brasileiras.

Fonte: Os autores.

A Antártica pode ser vista como um laboratório natural de processos fundamentais. Em meio à aparente simplicidade de um ambiente dominado pelo gelo, as relações entre

tempo, matéria e energia se tornam mais legíveis. Ali, a erosão, a sedimentação, a pedogênese, a colonização biológica, o trabalho do vento e do mar e o controle estrutural sobre o relevo ocorrem de forma direta e observável, o que possibilita aos cientistas refinarem o olhar e construam visões comparativas entre sistemas antagônicos. Por isso, estudar a Antártica pode ser entendido como também compreender melhor o Brasil.

Entre os ganhos desse intercâmbio, o primeiro é o aperfeiçoamento da compreensão do passado glacial brasileiro. A observação dos sistemas glaciares e subglaciais atuais, com suas dinâmicas de erosão basal, transporte e sedimentação, tem permitido reinterpretar a gênese dos materiais glaciogênicos presentes em nosso território. Assim o fizeram grandes nomes da geologia brasileira, com referência ao ilustre trabalho desenvolvido pelo Prof. Rocha Campos, da USP, que, durante muitos anos, foi um pioneiro das geociências na Antártica, mas igualmente a diversos outros que se dedicaram e ainda se dedicam a (re)compreender as fases glaciogênicas nos orógenos neoproterozoicos e nas bacias paleozoicas brasileiras. A Antártica, portanto, oferece um espelho do passado geológico do Brasil, ajudando a decifrar o registro deixado por eventos glaciais antigos que moldaram as rochas com as quais lidamos na atualidade.

Um segundo aspecto essencial é a formação de uma geração de especialistas em paisagens geladas com alma tropical. A convivência com ambientes tão contrastantes amplia a capacidade cognitiva e comparativa desses cientistas, que passam a enxergar, sob uma nova ótica, fenômenos como o permafrost, o descongelamento-congelamento e a dinâmica biogeoquímica dos solos frios. O Grupo Terrantar, ao longo de suas atividades, formou mais de quarenta mestres e doutores, além de numerosos graduandos, consolidando uma base científica capaz de dialogar com as principais instituições dedicadas às pesquisas polares do mundo. Essa formação não se restringe ao Terrantar: diversos grupos vinculados ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) têm contribuído para a criação de uma comunidade nacional de pesquisa polar interdisciplinar, que conecta geociências, biociências, oceanografia, ciências humanas, ciências da saúde e diversas outras.

Se há formação de recursos humanos qualificados, há também produção de conhecimento de ponta. O estudo de Vieira *et al.* (2024), publicado na *Antarctic Science*, apresentou uma análise cienciométrica abrangente da pesquisa global sobre solos antárticos, revelando o papel central do Brasil nesse campo. A pesquisa mostrou que o número de estudos sobre os solos gelados cresceu exponencialmente nas últimas décadas, destacando-se redes de coautoria amplamente colaborativas e transnacionais. A

Universidade Federal de Viçosa aparece como uma das instituições com maior centralidade na rede científica no tema, ao lado de universidades dos Estados Unidos, Nova Zelândia, Itália e Espanha. Entre os pesquisadores de destaque estão Carlos Schaefer, Márcio Francelino e Roberto Michel, todos integrantes do Terrantar, cuja atuação vem expandindo a presença brasileira na fronteira do conhecimento sobre criossolos e processos pedogeomorfológicos.

Segundo Vieira *et al.* (2024), o campo de pesquisa divide-se em três grandes eixos: (i) biologia e ecologia do solo, com ênfase em relações bio-geo-químicas; (ii) temas ambientais e de poluição, voltados ao impacto humano e à remediação de solos; e (iii) ciências da Terra, nas quais o Brasil se destaca, abordando monitoramento térmico e hídrico, classificação dos solos e os efeitos das mudanças climáticas sobre as paisagens. Essa liderança científica, associada à criação de uma rede de monitoramento de solos e permafrost, já citada (Figurra 7), reflete o compromisso de longo prazo do país com a pesquisa polar, apoiado por CNPq, CAPES, Marinha do Brasil, FAPs estaduais e diversos órgãos públicos. É notável que uma nação sem solos congelados em seu território continental seja hoje referência global na pesquisa sobre eles, um feito que demonstra como o investimento contínuo e articulado em ciência e pesquisa gera excelência e reconhecimento internacional (Vieira *et al.*, 2024).

Mas o retorno mais profundo da experiência antártica talvez seja conceitual. As observações realizadas pelo grupo Terrantar sobre a importância da colonização biológica nas paisagens polares inspiraram reflexões que reconfiguram a própria geomorfologia tropical praticada por seus pesquisadores. Em diálogo com essa perspectiva, Schaefer e Oliveira *et al.* (2023) discutem como a vida é um agente geomorfológico ativo, e não um mero componente passivo do relevo. Os autores lembram que processos biomecânicos e biogeoquímicos, como a bioturbação, a pedoturbação e a formação do biomanto, atuam em pé de igualdade com os processos físicos e químicos clássicos na evolução das vertentes. Essa perspectiva, inspirada nas ideias de Darwin (1881) e sistematizada por Johnson (2002), permite reinterpretar feições, como as linhas de cascalho enterradas e os mantos lateríticos tropicais, à luz de uma dinâmica biogeomorfológica integrada.

No contexto brasileiro, e com forte inspiração do que esses pesquisadores e pesquisadoras viram na Antártica, essa visão propõe uma leitura renovada da estabilidade das vertentes tropicais e da gênese dos espessos regolitos que caracterizam nossas paisagens. Schaefer e Oliveira (2023) argumentam que a longa coevolução entre clima, organismos e intemperismo, em escala de milhões de anos, gerou mantos profundamente

estruturados, nos quais a atividade de térmitas, formigas e microrganismos reorganiza o solo, regula fluxos de água e reforça a resiliência do sistema frente à erosão. Tal compreensão recoloca a biota no centro dos modelos de evolução do relevo tropical, demonstrando que processos semelhantes, observados em escala embrionária na Antártica, encontram aqui sua expressão máxima e mais antiga.

Por fim, um outro exemplo eloquente dessa expansão conceitual é o estudo da fosfatização nas ilhas oceânicas brasileiras, processo que, à semelhança dos solos ornitogênicos polares, resulta da interação entre aves marinhas e substratos minerais. Pesquisas em ilhas como Fernando de Noronha, Trindade, Abrolhos e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) evidenciam que a deposição de guano e a decomposição orgânica promovem intensa acidificação e neoformação de minerais fosfatados, alterando profundamente a composição e a estrutura dos solos (Oliveira *et al.*, 2010, 2014; Schaefer *et al.*, 2010; Machado *et al.*, 2017, entre outros).

Em Fernando de Noronha, Silveira *et al.* (2020) documentaram solos fosfatizados mesmo entre solos altamente intemperizados, um caso raro que combina intemperismo profundo e colonização biológica de longa duração, resultando em concentrações recordes de fósforo (até 2.721 mg/dm³). Em Trindade, Machado (2016) mostrou que a fosfatização atinge tanto rochas vulcânicas quanto sedimentos bioclásticos, formando enriquecimento absoluto dos solos associado à dinâmica de encostas e ao fluxo lateral de soluções ricas em P.

No ASPSP, Duarte *et al.* (2024) identificaram crostas e espeleotemas fosfatados com teores de P₂O₅ superiores a 15%, além da presença de minerais como leucophosphita, crandallita e hidroxiapatita, gerados pela reação entre soluções ácidas de guano e minerais primários de Fe e Mg das rochas. As análises micromorfológicas revelam uma sequência de transformação que vai do acúmulo superficial de guano à infiltração e precipitação de fosfatos nas fraturas das rochas, configurando verdadeiros arquivos paleoambientais sobre a história de colonização e variação climática do Atlântico Equatorial.

Essas descobertas demonstram que os processos biogeoquímicos observados na Antártica encontram análogos diretos nos trópicos, ainda que sob regimes climáticos opostos. Em ambos os casos, a vida atua como força geológica e o diálogo entre o gelo e o trópico ultrapassa o contraste ambiental, pois ele revela a unidade planetária dos processos de formação da paisagem.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As reflexões apresentadas neste artigo evidenciam que a experiência científica brasileira na Antártica transcende o âmbito locacional e técnico, configurando-se como uma verdadeira travessia epistemológica. A partir da integração entre formas, materiais e processos, os resultados das pesquisas conduzidas pelo Grupo Terrantar revelam que a morfogênese e a morfodinâmica das áreas livres de gelo são influenciadas por quatro fatores azonais fundamentais: diversidade litológica, clima, colonização biológica e tempo, cuja interação define a complexidade e a singularidade das paisagens antárticas.

A diversidade litológica mostrou-se determinante na compartimentação geomorfológica e na gênese dos solos, influenciando, por exemplo, na intensidade e o tipo de processos criogênicos atuantes. O clima, tanto em sua dimensão atual quanto pretérita, expressa-se como o motor das transformações, regulando a dinâmica das geleiras, do permafrost e das feições periglaciais que caracterizam a superfície antártica. Já a colonização biológica redefine o papel da vida como força geomorfológica ativa, sendo responsável, por exemplo, por processos como a fosfatização e pela formação dos solos ornitogênicos, que são verdadeiros “laboratórios biogeoquímicos” que articulam geosfera e biosfera. O tempo, por sua vez, atua como o eixo de convergência entre esses fatores, permitindo compreender a evolução das paisagens em cronossequências nas quais o gelo, a rocha, as superfícies e o solo se sucedem em continuidade dinâmica.

Essas descobertas, entretanto, não se encerram no continente gelado. O movimento de retorno da Antártica ao Brasil demonstra que a experiência polar aprimora o olhar tropical, permitindo reinterpretar fenômenos clássicos da geomorfologia e pedologia brasileiras. A observação dos processos criogênicos e biogeoquímicos nas áreas polares tem inspirado novas leituras sobre o intemperismo profundo, a bioturbação, a formação de regolitos antigos e a fosfatização em ilhas oceânicas, estabelecendo analogias fecundas entre ambientes tão contrastantes.

Do ponto de vista institucional, o percurso do Terrantar representa um marco para a consolidação da ciência geomorfológica e pedológica brasileira. Em pouco mais de duas décadas, o grupo formou dezenas de pesquisadores, estruturou uma das maiores redes de monitoramento de permafrost do mundo e projetou internacionalmente a pesquisa nacional em paisagens frias. Essa trajetória reafirma a capacidade do país em produzir ciência de fronteira, mesmo em territórios onde não há tradição nem condições ambientais análogas.

E é nesse ponto que a ciência encontra a poesia, ambas tentativas de compreender o mundo e de nomear o indizível.

Paisagens em branco se estendem até onde a vista alcança
O tempo parece suspenso sob camadas espessas de gelo
Formas repousam ocultas, moldadas por forças antigas
O frio não cala, apenas sussurra em silêncio
Cientistas vindos do calor se aproximam
Seus olhos procuram sentido no vazio branco
Relevos emergem lentamente sob o olhar atento
Nada é imóvel para quem sabe esperar
A luz do sol encontra frestas no gelo
O branco se transforma em linguagem
Os olhos tropicais não apenas observam
Eles decifram, recolhem, redesenham o mundo.

Esse relevo poético sintetiza a jornada do Terrantar: do calor ao gelo, do silêncio à descoberta, da observação à criação de novos significados. Estudar a Antártica é, enfim, compreender o Brasil; e compreender o Brasil é reconhecer que toda paisagem, em qualquer latitude, é uma narrativa do tempo escrita pela Terra e lida pela vida.

REFERÊNCIAS

ABAKUMOV, E.; LUPACHEV, A.; ANDREEV, M.; WANG, W.; JI, X. The influence of brown and south polar skua on the content of plant nutrient in the soils from the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). **Chemistry and Ecology**, p. 1–15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/02757540.2020.1839435>

ALMEIDA, I. C. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MICHEL, R. F. M.; FERNANDES, R. B. A.; PEREIRA, T. T. C.; ANDRADE, A. M. de; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; BOCKHEIM, J. G. Long term active layer monitoring at a warm-based glacier front from maritime Antarctica. **Catena**, Cremlingen, v. 149, p. 572-581, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.031>.

ANDRADE, A. M.; MICHEL, R. F.; ROSA, K. K. da; BREMER, U. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMÕES, J. C. TerraSAR-X SAR data for classification of ice-free areas and glacier facies on Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 96, p. 1–17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240362>.

ARAÚJO BARROS, P. H. C. de; VALADÃO, R. C. Aquisição e produção do conhecimento em Geomorfologia: a investigação geomorfológica e seus conceitos fundantes. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, v. 22, p. 416-436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.123896>.

BALLANTYNE, C. K. Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, p. 1935-2017, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00005-7).

BIGHAM, J. M.; NORDSTROM, D. K. Iron and aluminum hydroxysulfates from acid sulfate waters. In: ALPERS, C. N.; JAMBOR, J. L.; NORDSTROM, D. K. (Org.). **Sulfate minerals** – Crystallography, geochemistry, and environmental significance. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 2000. v. 40, p. 351–403.

BIRKENMAJER, K. Geology of the Cape Melville area, of King George Island (South Shetland Islands, Antarctica): pre-Pliocene glaciomarine deposits and their substratum. **Studia Geologica Polonica**, v. 79, p. 7–35, 1984.

BIRKENMAJER, K. Pre-Quaternary fossiliferous glacio-marine deposits at Cape Melville, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). Bulletin of the Polish Academy of Sciences, **Earth Sciences**, v. 29, p. 331-340, 1982.

BIRKENMAJER, K.; GAŹDZICKI, A.; KREUZER, H.; MULLER, P. K–Ar dating of the Melville Glaciation (Early Miocene) in West Antarctica. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, **Earth Sciences**, v. 33, p. 15–23, 1985.

BIRKENMAJER, K.; GAŹDZICKI, A.; WRONA, R. Cretaceous and Tertiary fossils in glacio-marine strata at Cape Melville, Antarctica. **Nature**, v. 303, p. 56–59, 1983.

BOCKHEIM, J. G. Soils of Antarctica: history and challenges. In: BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **The soils of Antarctica**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 1–3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_1.

CAMPBELL, I. B.; CLARIDGE, G. G. C. **Antarctica: soils, weathering processes and environment**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1987. 368p.

CANTRILL, D. J. Early Cretaceous fern foliage from President Head, Snow Island, Antarctica. Alcheringa: **Australian Journal of Palaeontology**, v. 22, n. 3, p. 241–258, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1080/03115519808619203>.

CHURCH, M.; RYDER, J. M. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, p. 3059-3072, 1972. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[3059:PSACOF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[3059:PSACOF]2.0.CO;2).

CORREIA, T. P.; VELOSO, G. V.; LYRA, G. B.; MICHEL, R. F.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; JUSTINO, F. B.; FRANCELINO, M. R. Temporal trend and dynamics of the active layer at different monitoring points in Maritime Antarctica and Peninsula. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 97, p. e20240586, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240586>.

COSTA, R. M.; PETSCH, C.; SOTILLE, M. E.; ROSA, K. K. da; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; ANDRADE, A. M. Evidências geomorfológicas de mudanças ambientais na Baía Esperança, Península Antártica. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 37, p. 137–149, 2019. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v37i0.149173>.

COSTA, V.; ROSA, K. K. da; SANDES, A.; DELPUPO, C.; VIEIRA, R. Sedimentary evidence of glacial entrainment at Patriot Hills and Union Glacier moraines, Ellsworth Mountains, West Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1–26, 2022.

DARWIN, C. **The formation of vegetable mould through the action of worms**. London: J. Murray, 1881. Fac-símiles republicados em 1982 e 1985. Chicago: University of Chicago Press. 314p.

DE MELLO, D. C.; FRANCELINO, M. R.; MOQUEDACE, C. M.; BALDI, C. G. O.; SILVA, L. V.; SIQUEIRA, R. G.; VELOSO, G. V.; FERNANDES FILHO, E. I.; THOMAZINI, A.; DEMATTÊ, J. A. M.; FERREIRA, T. O.; GOMES, L. C.; SENRA, E. O.; SCHAEFER, C. E. G. R. Global warming may turn ice-free areas of Maritime and Peninsular Antarctica into potential soil organic carbon sinks. **Communications Earth & Environment**, v. 6, p. 143, 2025. DOI : <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01937-z>.

DELPUPO, C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ROQUE, M. B.; FARIA, A. L. L. de; ROSA, K. K.; THOMAZINI, A.; PAULA, M. D. de. Soil and landform interplay in the dry valley of Edson Hills, Ellsworth Mountains, continental Antarctica. **Geomorphology**, v. 295, p. 134-146, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.002>.

DENT, D. **Acid sulphate soils: a baseline for research and development**. Wageningen: ILRI Publications, 1986. 204p.

DOMACK, E.; LEVENTER, A.; DUNBAR, R.; TAYLOR, F.; BRACHFELD, S.; SJUNNESKOG, C.; ODP LEG 178 SCIENTIFIC PARTY. Chronology of the Palmer Deep site, Antarctic Peninsula: a Holocene palaeoenvironmental reference for the circum-Antarctic. **The Holocene**, v. 11, p. 1–9, 2001.

DUARTE, E. B.; VARAJAO, A. F. D. C.; OLIVEIRA, F. S.; RENAC, C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CORRÊA, G. R. Lithological controls of phosphatization in oceanic islands, Equatorial Atlantic, Brazil. **Catena**, v. 242, p. 108138, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108138>.

FERREIRA DA SILVA, L. C.; SANTOS, A.; FAUTH, G.; MANRÍQUEZ, L. M. E.; KOCHHANN, K. G. D.; GUERRA, R. M.; HORODYSKI, R. S.; VILLEGAS-MARTÍN, J.; RIBEIRO DA SILVA, R. High-latitude Cretaceous–Paleogene transition: new paleoenvironmental and paleoclimatic insights from Seymour Island, Antarctica. **Marine Micropaleontology**, v. 180, p. 102214–102234, 2023. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2023MarMP.180j2214F/doi:10.1016/j.marmicro.2023.102214.

FRENCH, H. M. **The periglacial environment**. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 458p. DOI: <https://doi.org/10.1002/PPP.608>.

GJORUP, D. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; FRANCELINO, M. R.; MICHEL, R. F. M.; BOCKHEIM, J. G. Sulfurization, acid-sulfate soils and active layer monitoring at the semiarid Seymour Island, Antarctica. **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00305, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00305>.

HATHWAY, B.; LOMAS, S. A. The Jurassic–Lower Cretaceous Byers Group, South Shetland Islands, Antarctica: revised stratigraphy and regional correlations. **Cretaceous Research**, v. 19, n. 1, p. 43–67, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1006/cres.1997.0095>.

IDALINO, F. D.; ROSA, K. K. da; PETSCH, C.; MENDES, C. W.; PERONDI, C.; LORENZ, J. L.; BUSCHER, N.; SIMÕES, J. C. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação para mapeamento de ambientes glaciais e periglaciais da Península Keller, Antártica Marítima. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 22, p. 367–384, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v22i2.2009>.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: McGraw-Hill, 1941. 281p.

JOHNSON, D. L. Darwin would be proud: bioturbation, dynamic denudation, and the power of theory in science. **Geoarchaeology**, v. 17, p. 7–40, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1002/gea.10001>.

LAWVER, L. A.; GAHAGAN, L. M. Evolution of Cenozoic seaways in the circum-Antarctic region. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 198, p. 11-37, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00392-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00392-4).

LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S. de; SOUZA, J. J. L. L. de; MACHADO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Soil pockets phosphatization and chemical weathering of sites affected by flying birds of Maritime Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1–17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210595>.

LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R. Pedogeomorphology and weathering at Snow Island, Maritime Antarctica. **Catena**, v. 217, p. 106515, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106515>.

LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; REIS, J. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Lithological controls on soil properties, Snow Island, Maritime Antarctica. **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 14, p. 1–14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppp.2212>.

LOPES, D. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, J. J. L. L.; OLIVEIRA, F. S.; SIMAS, F. N. B.; DAHER, M.; GJORUP, D. F. Concretionary horizons, unusual pedogenetic processes and features of sulfate-affected soils from Antarctica. **Geoderma**, v. 347, p. 13–24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.024>.

LOPES, D. V.; SOUZA, J. J. L. L. de; SIMAS, F. N. B.; OLIVEIRA, F. S. de; SCHAEFER, C. E. G. R. Hydrogeochemistry and chemical weathering in a periglacial environment of Maritime Antarctica. **Catena**, v. 197, p. 104959, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104959>.

LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SCHMID, T.; SERRANO, E.; MINK, S.; NIETO, A.; GUILLASO, S. Geomorphology and landforms distribution in selected ice-free areas in the South Shetland Islands, Antarctic Northern Peninsula region. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 42, n. 2, p. 435–455, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18172/cig.2965>.

LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; SERRANO, E.; SCHMID, T.; MINK, S.; LINÉS, C. Periglacial processes and landforms in the South Shetland Islands (northern Antarctic Peninsula region). **Geomorphology**, v. 155–156, p. 62–79, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.018>.

MACHADO, M. R. **Indicadores pedogeomorfológicos no estabelecimento de condição periglacial na Península Keller, Antártica Marítima**. 2020. 183 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MACHADO, M. R. **Interação avifauna-substratos na Ilha da Trindade, Atlântico Sul**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALMEIDA, E. P. C. Endemismo pedológico e os solos da Ilha da Trindade – Atlântico Sul, Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. esp., p. 238–246, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132762>.

MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; MICHEL, R. F. Paisagens polares não glaciais (proglacial, paraglacial e periglacial): revisão de conceitos e contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 20, p. 603-622, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1639>.

MÄUSBACHER, R.; MÜLLER, J.; SCHMIDT, R. Evolution of postglacial sedimentation in Antarctic lakes (King George Island). **Zeitschrift für Geomorphologie**, Neue Folge, v. 33, p. 219–234, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1127/zfg/33/1989/219>.

MICHEL, R. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; LYRA, G. B. Active-layer thermal monitoring on the Fildes Peninsula, King George Island, maritime Antarctica. **Solid Earth**, v. 5, p. 1361–1374, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/se-5-1361-2014>.

OLIVEIRA, F. S.; ABRAHÃO, W. A. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B. Implicações geomorfológicas e paleogeográficas das crostas fosfáticas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Norte. **REM – Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 239–246, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000200006>.

OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ABRAHÃO, W. A. P.; CLEMENTE, E. P.; SIMAS, F. N. B. Soil–geomorphology interactions and paleoclimatic implications of an ornithogenic soil toposequence on Rata Island, Fernando de Noronha Archipelago, South Atlantic. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 52, p. 119–128, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2014.02.007>.

PEREIRA, T. T. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; ALMEIDA, C. C.; ALMEIDA, I. C. C.; PEREIRA, A. B. Genesis, mineralogy and ecological significance of ornithogenic soils from a semi-desert polar landscape at Hope Bay, Antarctic Peninsula. **Geoderma**, v. 209–210, p. 98–109, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.012>.

PERONDI, C.; ROSA, K. K. da; MAGRANI, F.; PETSCH, C.; VIEIRA, R.; AYRES NETO, A.; SIMÕES, J. C. Paleoglaciological reconstruction and geomorphological mapping of Dobrowolski Glacier, King George Island, Antarctica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 24, p. 1–25, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2425>.

PERONDI, C.; ROSA, K. K. da; SIMÕES, J. C.; VIEIRA, R.; AYRES NETO, A.; MAGRANI, F.; PETSCH, C.; VELHO, L. F. Geomorphological mapping and palaeoglacial reconstruction of the Admiralty Bay, King George Island, Maritime Antarctica. **Antarctic Science**, v. 37, p. 1–13, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0954102025000173>.

PERONDI, C.; ROSA, K. K. da; VIEIRA, R.; MAGRANI, F. J. G.; AYRES NETO, A.; SIMÕES, J. C. Geomorphology of Martel Inlet, King George Island, Antarctica: a new interpretation based on multi-resolution topo-bathymetric data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1–20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210482>.

PETSCH, C.; DA ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; BRAUN, M. H.; COSTA, R. M.; SIMÕES, J. C. The effects of climatic change on glacial, proglacial and paraglacial systems at Collins Glacier, King George Island, Antarctica, from the end of the Little Ice Age to the 21st century. **Investigaciones Geográficas**, v. 103, p. 1–19, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14350/riq.60153>.

PETSCH, C.; PERONDI, C.; ROSA, K. K. da; VIEIRA, R.; ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R. Método de geomorfon aplicado à Antártica: identificação de formas de relevo paraglaciais de macro e mesoescala, Ilha Rei George, Ilhas Shetlands do Sul. **Cuadernos de Geografía**, v. 31, p. 108–127, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15446/rcdq.v31n1.85644>.

PETSCH, C.; ROSA, K. K. da; OLIVEIRA, M. A. G. de; VELHO, L. F.; SILVA, S. L. C.; SOTILLE, M. E.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. An inventory of glacial lakes in the South Shetland Islands (Antarctica): temporal variation and environmental patterns. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1–26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210683>.

RACHLEWICZ, G. Glacial relief and deposits of the western coast of Admiralty Bay, King George Island, South Shetlands. **Polish Polar Research**, v. 20, n. 2, p. 89–130, 1999.

RODRIGUES, W. F.; MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S. de; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; MICHEL, R. F. M.; GAUZZI, T. Soil–chronosequence and Quaternary landscape evolution at the marine terraces of Harmony Point, Nelson Island, Maritime Antarctica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1–22, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202220201141>.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S. de; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; PAVINATO, P. S. Phosphatization under birds' activity: ornithogenesis at different scales on Antarctic soils. **Geoderma**, v. 391, p. 114950, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114950>.

RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; GAUZZI, T.; BOCKHEIM, J. G.; PUTZKE, J. Soil–landscape interplays at Harmony Point, Nelson Island, Maritime Antarctica: chemistry, mineralogy and classification. **Geomorphology**, v. 336, p. 77–94, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.030>.

ROSA, K. K. da; OLIVEIRA, M. A. G. de; PETSCH, C.; AUGER, J. D.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Expansion of glacial lakes on Nelson and King George Islands, Maritime Antarctica, from 1986 to 2020. **Geocarto International**, v. 36, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886342>.

ROSA, K. K. da; PERONDI, C.; LORENZ, J. L.; AUGER, J. D.; CAZAROTO, P.; PETSCH, C.; SIQUEIRA, R. G.; SIMÕES, J. C.; VIEIRA, R. Glacier fluctuations and proglacial evolution in King George Bay (King George Island), Antarctica, since the 1980 decade. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 95, p. 2–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320230624>.

ROSA, K. K. da; PERONDI, C.; VEETIL, B. K.; AUGER, J. D.; SIMÕES, J. C. Contrasting responses of land-terminating glaciers to recent climate variations in King George Island, Antarctica. **Antarctic Science**, v. 1, p. 1–10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0954102020000279>.

ROSA, K. K. da; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. A.; SIMÕES, J. C. Geomorfologia e sedimentologia glacial aplicadas na reconstrução do ambiente de deglaciação da geleira Wanda, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 11, p. 39–48, 2010. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v11i1.140>.

ROSA, K. K. da; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Estimation of the Wanda Glacier (South Shetlands) sediment erosion rate using numerical modelling. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v. 13, p. 393–400, 2013. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i4.288>.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, A. B.; MICHEL, R. F. M.; SCHMITZ, D.; SACRAMENTO, I. F.; RODRIGUES, W. F.; MIRANDA, C. O. de. Thermal monitoring of a Cryosol in a high marine terrace (Half Moon Island, Maritime Antarctica). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 95, p. e20210692, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202320210692>.

SCHAEFER, C. E. G. R.; MICHEL, R. F. M.; DELPUPO, C.; SENRA, E. O.; BREMER, U. F.; BOCKHEIM, J. G. Active layer thermal monitoring of a Dry Valley of the Ellsworth Mountains, Continental Antarctica. **Catena**, v. 149, p. 603–615, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.020>.

SCHAEFER, C. E. G. R.; OLIVEIRA, F. S. Live subsoils: tropical regolith and biota interactions. In: OLIVEIRA, T. S. de; BELL, R. W. (Org.). **Subsoil constraints for crop production**. Cham: Springer, 2022, p. 373–396. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-00317-2_15.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. Fosfatização: processo de formação de solos na Baía do Almirantado e implicações ambientais. In: SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; SIMAS, F. N. B. (Orgs.). **Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima**. Viçosa: NEPUT – Departamento de Solos, 2004. p. 47–59.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; ALBUQUERQUE, M. A.; SOUZA, E.; DELPUPO, K. K. Fosfatização de solos e evolução da paisagem no Arquipélago de Abrolhos, Bahia. **REM – Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 4, p. 727–734, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000400019>.

SEONG, Y. B.; OWEN, L. A.; LIM, H. S.; YOON, H. I.; KIM, Y.; LEE, Y. I.; CAFFEE, M. W. Rate of late Quaternary ice-cap thinning on King George Island, South Shetland Islands, West Antarctica defined by cosmogenic ³⁶Cl surface exposure dating. **Boreas**, v. 38, p. 207–213, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2008.00069.x>.

SILVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VARAJÃO, A. F. D. C.; VARAJÃO, C. A. C.; SENRA, E. O. Phosphatized volcanic soils of Fernando de Noronha Island, Brazil: paleoclimates and landscape evolution. **Catena**, v. 195, p. 104728, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104728>.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ALBUQUERQUE FILHO, M. R.; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GILKES, R. J.; COSTA, L. M. da. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, Maritime Antarctica. **Geoderma**, v. 144, p. 116–122, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.019>.

SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F. de; ALBUQUERQUE FILHO, M. R. de; MICHEL, R. F. M.; PEREIRA, V. V.; GOMES, M. R. M.; COSTA, L. M. da. Ornithogenic Cryosols from Maritime Antarctica: phosphatization as soil-forming process. **Geoderma**, Amsterdam, v. 138, p. 191–203, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.011>.

SLAYMAKER, O. Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, n. 1, p. 85-94, 2011. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0008-y>.

SMELLIE, J. L.; PANKHURST, R. J.; THOMSON, M. R. A.; DAVIES, R. E. S. The geology of the South Shetland Islands. VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. **British Antarctic Survey Scientific Report**, n. 87, 85 p., 1984.

SOLARI, M. A.; HERVÉ, F.; MARTINOD, J.; LE ROUX, J. P.; RAMÍREZ, L. E.; PALACIOS, C. Geotectonic evolution of the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: insights from analogue models. **Antarctic Science**, Cambridge, v. 20, p. 185-196, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1017/S095410200800093X>.

SOUZA, C. D.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; SPINOLA, D. N.; PAULA, M. D. de. Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 225, p. 87–99, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.047>.

SOUZA, J. J. L. L.; SCHAEFER, C. E. G. R.; ABRAHÃO, W. A. P.; MELLO, J. W. V. de; SIMAS, F. N. B.; SILVA, J. da; FRANCELINO, M. R. Hydrogeochemistry of sulfate-affected landscapes in Keller Peninsula, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, v. 155–156, p. 55–61, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.017>.

SZANIAWSKI, H.; WRONA, R. Polychaete jaws from the Cape Melville Formation (Lower Miocene) of King George Island, West Antarctica. Bulletin of the Polish Academy of Sciences, **Earth Sciences**, v. 49, p. 105–126, 1987.

TATUR, A. Ornithogenic ecosystems in the Maritime Antarctic – formation, development and disintegration. In: BÖLTER, M.; BEYER, L.; STONEHOUSE, B. (Eds.). **Geoecology of Antarctic ice-free coastal landscapes**. Berlin: Springer-Verlag, 2002. p. 161–184. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56318-8_10.

TATUR, A. Ornithogenic soils of the Maritime Antarctic. **Polish Polar Research**, v. 4, p. 481–532, 1989.

TOKARSKI, A. K. Structural events in the South Shetland Islands (Antarctica). III. Barton Horst, King George Island. **Studia Geologica Polonica**, v. 40, p. 7–37, 1987.

VIEIRA, Í.; OLIVEIRA, F.; MICHEL, R. F. M. Beyond the ice: exploring Antarctic soils research through spatial and scientometric analysis. **Antarctic Science**, v. 1, p. 1–26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0954102024000166>.

VIEIRA, R.; CARDOSO, P.; ROSA, K. K. da; PETSCH, C.; LIRIO, J. M. Changes and collapse in lacustrine system in Antarctic Peninsula ice-free area: Boeckella and Buenos Aires Lakes. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 96, p. 1–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240578>.

VIEIRA, R.; MAROTTA, H.; ROSA, K. K. da; JANA, R.; SIMÕES, C. L.; DE SOUZA JUNIOR, E.; FERREIRA, F.; SANTOS, L. R. S.; RAMOS, J. V.; PERRONI, M. A.; GONÇALVES, M.; GALVÃO, J. C. M.; RODRIGUES, R. I.; FELIZARDO, J. P. S. Análisis sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. **Investigaciones Geográficas**, v. 49, p. 3–30, 2015.

YOON, H. H.; PARK, B. K.; KIM, Y.; KIM, D. Glaciomarine sedimentation and its paleoceanographic implications along the fjord margins in the South Shetland Islands, Antarctica during the last 6000 years. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 157, p. 189–211, 2000.

ZHU, R.; WANG, Q.; DING, W.; WANG, C.; HOU, L.; MA, D. Penguins significantly increased phosphine formation and phosphorus contribution in maritime Antarctic soils. **Scientific Reports**, v. 4, p. 7055, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep07055>.