

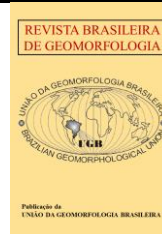


<https://rbgeomorfologia.org.br/>  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 24, n° 3 (2023)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2248>



Artigo de Pesquisa

# Processos pedogeomorfológicos em ambientes periglaciais: o fenômeno *patterned ground* na Antártica Marítima

*Soil-Geomorphic processes in periglacial environments: the patterned ground phenomenon in Maritime Antarctica*

Daví do Vale Lopes<sup>1</sup>, Fábio Soares de Oliveira<sup>2</sup> e Carlos Ernesto G.R. Schaefer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geografia, Caicó - RN, Brasil. E-mail: [davivlopes@hotmail.com](mailto:davivlopes@hotmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3336-7397>

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Geografia, Belo Horizonte - MG, Brasil. E-mail: [fabiosolos@gmail.com](mailto:fabiosolos@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1450-7609>

<sup>3</sup> Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, Viçosa - MG, Brasil. E-mail: [carlos.schaefer@ufv.br](mailto:carlos.schaefer@ufv.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7060-1598>

Recebido: 21/06/2022; Aceito: 24/04/2023; Publicado: 02/09/2023

**Resumo:** *Patterned ground* (PG) é uma geoforma típica de ambientes periglaciais. Processos físico-químicos regidos por mecanismos de congelamento e descongelamento são típicos destes ambientes e são importantes para a gênese dessas superfícies. Este estudo teve como objetivo analisar relações solo-relevo e processos associados a superfícies com *patterned ground* na Ilha Snow, Antártica Marítima. Realizou-se descrições em campo e coletas em três áreas com ocorrência de PG. Classificou-se os solos de acordo com a U.S. Soil Taxonomy e realizou-se análises morfológicas, físicas e químicas. Os processos mais relevantes para a formação dos PG identificados foram crioclastia e crioturbação. Registrou-se diferenças marcantes entre as zonas centrais e as bordas dos PG. Os centros apresentam maior conteúdo de argila e silte, valores mais elevados de soma de bases e nutrientes como K e P. As bordas apresentam duas vezes mais fração grossa (> 2 mm), sendo mais colonizadas pela vegetação e submetidas a iluviação da matéria orgânica (podzolização). Essa variação em microescala de processos que possuem caráter dual (pedogeomorfológico) é relevante para uma melhor compreensão dos ecossistemas Antárticos, sendo de inestimável valor para o estudo do estabelecimento de condições periglaciais e para o monitoramento das possíveis alterações diante os cenários de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Geomorfologia Periglacial; crioclastia; *permafrost*; crioturbação; intemperismo criogênico.

**Abstract:** *Patterned ground* is a typical landform of periglacial environments. Physicochemical processes driven by freezing and thawing mechanisms are common of these environments. The present study aimed to analyze soil-landform relationships and processes associated with *patterned ground* on Snow Island, Maritime Antarctica. Field descriptions were carried out in three areas with PG occurrence. The soils were classified according to the U.S. Soil Taxonomy. Morphological, physical and chemical analyzes were performed. Physical processes such as cryoclasty and cryoturbation were identified. Marked differences were observed between the central zones and the edges of the circles of the *patterned ground* surfaces. Central zones show greater pedogenetic development and higher values of sum of bases (SB) and nutrients (K and P). The edges have twice as much coarse fraction (> 2 mm), being more colonized by vegetation and subjected to organic matter illuviation (podzolization). This microscale variation of processes that have a dual character (pedogeomorphological) is relevant for a better understanding of Antarctic ecosystems, being of inestimable value for the study of the establishment of periglacial conditions and for monitoring possible alterations in the face of climate change scenarios.

**Keywords:** Periglacial Geomorphology; cryoclasty; *permafrost*; cryoturbation; cryogenic weathering.

## 1. Introdução

Áreas livres de gelo no Arquipélago das Shetlands do Sul, localizado na Antártica Marítima, apresentam ambientes periglaciais típicos (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012). Esses ambientes estão relacionados às formas de relevo e solos afetados por processos de congelamento e descongelamento da água, e ocupam aproximadamente 20% da área continental mundial (GUTIÉRREZ E GUTIÉRREZ, 2016). O *permafrost*, enquanto condição térmica em que o substrato permanece abaixo de 0°C durante dois ou mais anos consecutivos (PING et al., 1998; VAN EVERDINGEN, 1998; FRENCH, 2000; TARNOCAI et al., 2009), está presente nesse ambiente e possui forte relação com a evolução da paisagem (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; ALMEIDA et al., 2014; LOPES et al., 2019; RODRIGUES et al., 2021). Tendências de aquecimento climático regional na Antártica Marítima e o aumento dos impactos antrópicos têm intensificado estudos sobre o *permafrost* na região (GUGLIELMIN; FRATTE; CANNONE, 2014; SCHAEFER et al., 2017; TURNER et al., 2021; 2022), incluindo as formas de relevo associadas ao mesmo. Isso torna a Geomorfologia Periglacial importante para ampliar as discussões sobre as mudanças climáticas (BARSCH, 1993; FRENCH, 2007; FRANCELINO et al., 2011; LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; ALMEIDA et al., 2014; SCHAEFER et al., 2015; GUTIÉRREZ E GUTIÉRREZ, 2016).

Em ambientes periglaciais, os processos de intemperismo físico são predominantes (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; FRENCH, 2007). Dentre eles se destacam o fraturamento e a fragmentação das rochas (crioclastia), e o deslocamento de partículas pela movimentação do gelo e água (crioturbação). Contudo, estudos recentes têm demonstrado que os processos intempéricos químicos em climas frios não devem ser desconsiderados (SIMAS et al., 2006; FRENCH, 2007; FRANCELINO et al., 2011; SOUZA et al., 2014; LOPES et al., 2017; 2019; 2021; RODRIGUES et al., 2021), ainda que sua intensidade dependa de fatores azonais específicos (MACHADO et al., 2019). Fato é que, tais processos estão relacionados à gênese de formas de relevo únicas associadas à solos singulares, como os *patterned grounds* (LOPES et al., 2019).

*Patterned Ground* diz respeito a superfícies cuja morfologia apresentam algum tipo de padrão discernível e ordenado (BOCKEIM, 2005), ocorrendo na escala do micro-relevo. Sua gênese é atribuída a constantes ciclos de congelamento e descongelamento, onde a crioturbação dos grãos grossos e finos tem papel relevante. Trata-se, portanto de uma geoforma com íntima relação com o *permafrost* subjacente. Geralmente ocorre o deslocamento ascendente por gravidade do material fino, associado ao congelamento e descongelamento de lentes de gelo nas partes superior e basal da camada ativa (MACKAY, 1980). Os fragmentos grossos também são individualizados na porção da superfície, formando guirlandas ou estrias de cascalhos. Vários são os tipos de padrões morfológicos conhecidos, sendo mais comuns os poligonais, circulares e em faixas (BOCKEIM, 2014). O fenômeno de “padronização” de superfícies é um traço marcante da evolução geomorfológica de ambientes periglaciais, o que motiva a identificação de sua ocorrência e estudo. Na Antártica Marítima já foi observado em diversas áreas, como, por exemplo, nas ilhas Rei George (FRANCELINO et al., 2011), Nelson RODRIGUES et al., 2019), Robert, Elephant e Livingston (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012). Recentemente, uma nova ocorrência foi divulgada por Lopes et al. (2022) na Ilha Snow, o que motivou a realização de um estudo mais aprofundado.

O objetivo desse estudo foi analisar os *patterned grounds* na Ilha Snow, localizada no Arquipélago das Shetlands do Sul, a partir de uma perspectiva pedogeomorfológica, ou seja, buscando demonstrar que os mesmos processos relacionados à gênese dessas superfícies possuem caráter dual, envolvendo processos morfogenéticos e pedogenéticos. Essa abordagem integrada das relações solo-relevo não só contribui com o melhor entendimento desse fenômeno na Antártica Marítima, mas também evidencia os *patterned grounds* como importantes marcadores do estabelecimento de condições periglaciais nessa região.

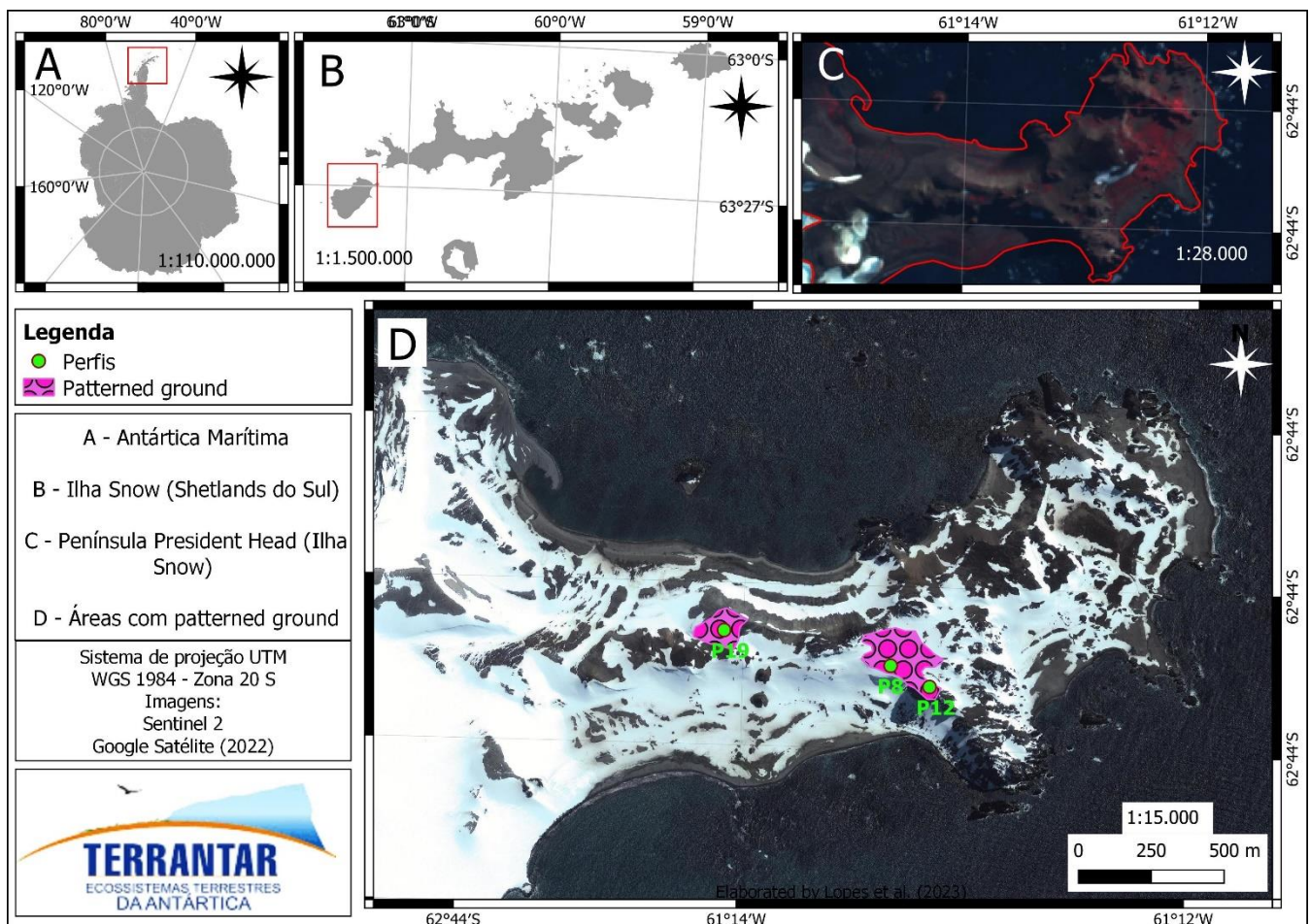
## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Área de Estudo

A Ilha Snow localiza-se no Arquipélago das Shetlands do Sul (FIGURA 1), na região da Antártica Marítima, caracterizada por ter temperatura do ar média anual de -2,8 °C e precipitação anual entre 500 e 800 mm (2002-2010) (BAÑÓN et al., 2013). A Ilha apresenta ocorrência de afloramentos do Mesozóico, com presença de rochas fossilíferas juro-cretáceas (SMELLIE et al., 1984). Podem ser encontradas rochas sedimentares como arenitos, siltitos, lamitos e conglomerados (HATHWAY; LOMAS, 1998; SMELLIE et al., 1984) e rochas ígneas como basalto e andesito (SMELLIE et al., 1984).

A geomorfologia da área de estudo apresenta grande complexidade, com formas de relevo associadas a ambientes glaciais, paraglaciais e periglaciais (LOPES et al., 2022b). Na Península President Head (Ilha Snow), ocorrem platôs vulcânicos na porção central, circundados por encostas e cones de tálus, e nas áreas mais rebaixadas extensos terraços marinhos e planícies costeiras. As superfícies com *patterned ground* ocorrem nos platôs em área onde o *permafrost* foi identificado (LOPES et al., 2022b).

A Ilha Snow é vizinha à Ilha Livingston (FIGURA 1B). Essas áreas possuem semelhanças nos substratos rochosos, nas formas de relevos e no histórico de deglaciação (LOPES et al., 2022b). Na Ilha Livingston, mais especificamente na Península Byers, Oliva et al. (2016) identificaram o início da deglaciação no Holoceno Inferior, a cerca de 8,3 mil anos antes do presente (A.P.), com exposição das partes mais elevadas do Nunatak Cerro Negro e durante o Holoceno Médio (6 mil anos A.P.), o rápido recuo da geleira Rotch Dome expôs o substrato rochoso na parte central do planalto de crioplanação da Península Byers, por sua vez, datações dos sedimentos basais do Lago Domo (45 m de altitude) indicam que a deglaciação da parte mais jovem da área livre de gelo ocorreu a cerca de 1,8 mil anos A.P. (OLIVA et al., 2016).



**Figura 1.** Mapa de localização da área de estudo. A – Antártica Marítima; B - Ilha Snow no Arquipélago Shetland do Sul; C – Península President Head, Ilha Snow; D – localização das áreas com *patterned ground*, com os perfis de solos analisados. **Fonte:** Arquivo dos autores.

## 2.2. Descrição, classificação e análises morfológicas dos solos

Superfícies com *patterned grounds* foram estudadas na Ilha Snow a partir dos materiais (solos) que as constituem. Esses foram descritos e amostrados em trabalho de campo realizado em 2017 (OPERANTAR XXXV). Foram selecionados 3 perfis de solos representativos dessas superfícies, identificados como P8, P12 e P19 (FIGURAS 1, 2A, 2D, 2G). Análises e descrições morfológicas foram realizadas em campo (estrutura, transição entre horizontes, presença de *permafrost*, sinais de iluviação, crioturbação, entre outras). Descrições morfológicas do solo e a amostragem seguiram as recomendações de Bockheim (1997) e critérios utilizados pela *Antarctic*



*Permafrost, Soils and Periglacial Environment* (ANTPAS, 2006). Foram coletadas amostras nos centros e nas bordas das superfícies padronizadas (FIGURA 2A), e os solos foram classificados conforme a U.S. *Soil Taxonomy* (SSS, 2014).



**Figura 2.** Representações das áreas com ocorrência de *patterned ground* na área de estudo. A – Paisagem com *patterned ground* e coleta no centro e na borda das superfícies padronizadas (P8); B – área central (P8); C – borda pedregosa (P8), com iluviação de matéria orgânica; D – paisagem de coleta do perfil 12; E – área central (P12), com brilho mais intenso do *permafrost* na base; F – borda pedregosa (P12); G – área de coleta do perfil 19; H – centro do perfil P19; I – borda do P19, com cimentação por gelo; J – medição da temperatura, com água do derretimento do *permafrost* minando na base; K - *frost sorting*; L – intemperismo criogênico. **Fonte:** Arquivo dos autores.



### 2.3. Análises físicas e químicas

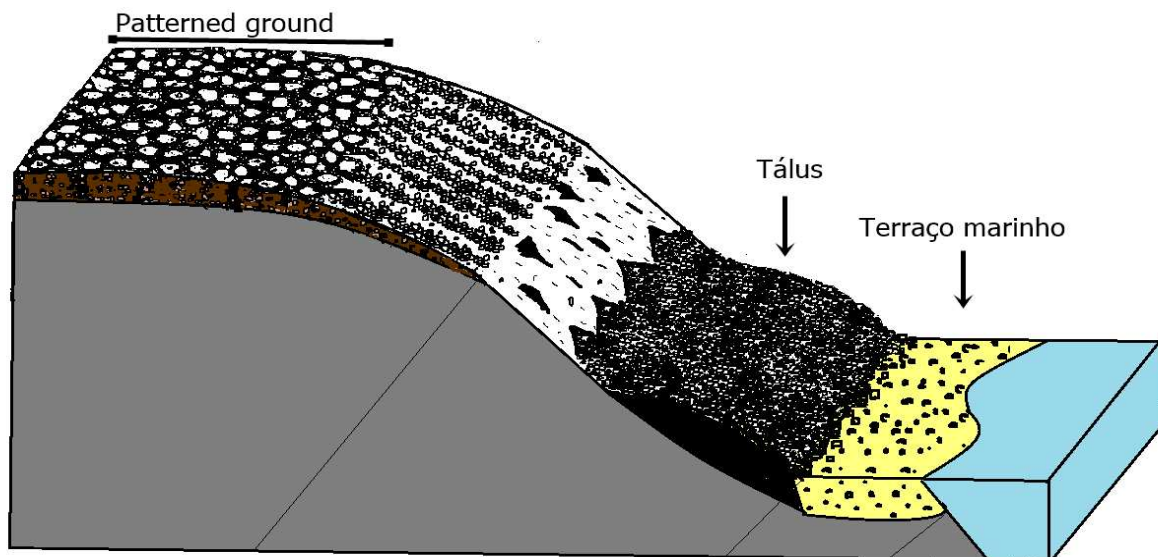
As amostras de solo foram destorroadas, secas e peneiradas (malha de 2 mm) para obtenção da “terra fina seca ao ar” (TFSA). A TFSA foi submetida à separação das frações granulométricas pelo método da centrífuga, com uso de solução de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  em pH 9,5 como dispersante (JACKSON, 2005). Os tamanhos de partículas foram analisados e seguiram os critérios de Teixeira et al. (2017): areia grossa (AG) (2 – 0,2 mm); areia fina (AF) (0,2 – 0,05 mm); silte (S) (0,05 – 0,002 mm); e argila (A) (< 0,002 mm).

Análises químicas, como o pH e nutrientes trocáveis foram determinados em amostras de TFSA (TEIXEIRA et al., 2017). Cátions trocáveis,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  foram extraídas com 1M KCl e P,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  com extrator Mehlich-1 (TEIXEIRA et al., 2017). Os teores dos elementos ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ) nos extratos foram determinados por espectrometria de absorção atômica e emissão de chama ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e fotocolorimetria (P) (TEIXEIRA et al., 2017; ALVAREZ et al., 2000). O carbono orgânico total foi determinado via combustão úmida (YEOMANS E BREMNER, 1988).

## 3. Resultados

### 3.1. Caracterização física e morfológica das áreas com ocorrência de *patterned ground*

As superfícies com ocorrência de *patterned grounds* na Ilha Snow estão associadas aos topos dos platôs sustentados por rochas vulcânicas, principalmente tufo de composição andesítica, com presença de *permafrost* encontrado entre 30 e 50 cm de profundidade (FIGURA 3; TABELA 1). Nas áreas com menor declividade, foram encontrados padrões predominantemente circulares (< 2m) (FIGURA 2D), com centro marcado pela acumulação de partículas finas (silte e argila), circundado por uma aureola de fragmentos de cascalhos placóides fortemente orientados (guirlanda de pedras). Nas bordas dos platôs, em declividade suave ondulada entre 3 e 8%, um outro padrão pode ser reconhecido (FIGURA 3). Trata-se de tiras (*strips*) orientadas paralelamente ao gradiente de inclinação do terreno, com linhas de cascalhos intercaladas com tiras de material fino (FIGURA 3). Em ambos os casos, as feições com cascalhos são ocupadas por musgos pertencentes ao gênero *Andreaea*, que atribuem uma coloração preta à superfície (Figura 2D).



**Figura 3.** Representação dos platôs com ocorrência de *patterned ground* na Ilha Snow, Antártica Marítima. Em destaque os formatos circulares com bordas mais pedregosas e vegetadas. **Fonte:** Arquivo dos autores.

A presença do *permafrost* e os ciclos de congelamento e descongelamento permitem o reconhecimento nos solos de horizontes com os sufixos f e jj, respectivamente indicando a presença de solo congelado e sinais de crioturbação (Turbels) (FIGURA 2E, 2H; TABELA 1). Por isso, os solos foram classificados como Typic Haploturbel (P8) e Glacic Haploturbel (P12 e P19) (SSS, 2014) (TABELA 1).

**Tabela 1.** Caracterização geral das áreas com *patterned ground* na Ilha Snow, Antártica.

Perfil	Coordenadas Geográficas	Altitude (m a.n.m.)	Litologia	Relevo	U.S. Soil Taxonomy	Descrição geral
P8	S 62°43'56,8" / W 61°13'12,3"	60	Tufos Andesitos	Platô vulcânico com presença de <i>patterned ground</i>	Typic Haploturbel	<i>Permafrost</i> a partir de 50 cm de profundidade. Perfil com cimentação por gelo. Saturação hídrica na base. Bordas com poucos líquens.
P12	S 62°43'59,0" / W 61°13'02,7"	82	Tufos Andesitos	Platô vulcânico com presença de <i>patterned ground</i>	Glacic Haploturbel	<i>Permafrost</i> a partir de 50 cm de profundidade. Perfil com cimentação por gelo. Saturação hídrica na base. Bordas colonizadas por musgos e líquens.
P19	S 62°43'53,3" / W 61°13'52,7"	63	Tufos Andesitos	Platô vulcânico com presença de <i>patterned ground</i>	Glacic Haploturbel	<i>Permafrost</i> identificado a partir de 35 cm de profundidade. Perfil com cimentação por gelo. Ausência de saturação hídrica. Bordas com presença de musgos e líquens.

Diferenças morfológicas e físicas marcantes caracterizam os centros e as bordas dos *patterned grounds*. Os centros são formados por horizonte A sobre horizonte C, respectivamente com estruturas fracas, pequenas/médias e em blocos subangulares e grãos simples. A cor (seco) variou de cinza claro a marrom amarelado claro no horizonte A e cinza claro a amarelo pálido no horizonte C da porção central. Do ponto de vista da granulometria, ocorre o predomínio da TFSA, ou seja, das frações < 2mm de diâmetro, que perfazem cerca de 50 a 70% da composição. Dessa, a soma das frações silte e argila é maior no horizonte A e reduz no horizonte C. O maior conteúdo de silte foi observado para o horizonte A do perfil P8 (36,10 %), e o maior valor de argila no horizonte A desse mesmo perfil (21,90 %). O conteúdo de areia grossa é maior que o de areia fina em todos os horizontes, e essa fração aumenta nos horizontes C em comparação com o horizonte A (TABELA 2). Considerando as frações granulométricas da TFSA, foram reconhecidas as texturas, a qual variou de franca a franco-argilo-arenosa no centro.

As bordas apresentam dominância de estruturas em grãos simples (TABELA 2) e ausência de horizontes A (FIGURAS 2F, 2I). A fração grossa (> 2mm) é, em média, duas vezes maior que a TFSA (79,1 e 39,5 % respectivamente), sendo que cascalhos podem chegar a constituir 100% da granulometria (horizontes 2C, 2Ch e 2C, respectivamente de P9, P12 e P19). Na TFSA, a areia predomina, principalmente a areia grossa, com maiores valores encontrados no horizonte 2Ch<sub>tf</sub> do perfil P19 (51,30 %). Nas bordas tem-se maior homogeneidade textural (franco-arenosa) (TABELA 2). As cores variaram de cinza claro a marrom amarelado claro (TABELA 2). Observou-se o predomínio de transição gradual/difusa e irregular em todos os perfis analisados, acúmulo de argila iluvial nos horizontes subsuperficiais (t) no P19 e acúmulo orgânico subsuperficial (h) em todas as bordas (TABELA 1).

**Tabela 2.** Propriedades morfológicas e físicas de solos em áreas de *patterned ground* da Ilha Snow, Antártica.

Posição	Horiz.	Prof. cm	Estrutura <sup>1</sup>	Transição entre horiz.	>2mm %	AG %	AF %	Silte %	Argila %	Cor (seco)	Nome (seco)	Textura
<b>P8 - Typic Haploturbel</b>												
Centro	A	0-30	w m bl-gr	abrupto irregular	40,45	33,60	8,40	36,10	21,90	2,5Y 7/2	Cinza claro	Franca
Centro	Chjff	30-50+	sg	gradual irregular	64,39	46,20	8,00	24,30	21,50	2,5Y 7/2	Cinza claro	Franco- Argilo- Arenosa
Borda	2C	0-30	w m bl-gr	gradual irregular	95,89	-	-	-	-	2,5Y 7/3	Amarelo pálido	-
Borda	2Chjff	30-50+	sg	-	44,14	44,50	15,70	25,60	14,20	2,5Y 6/3	Marrom Amarelado Claro	Franco- Arenosa
<b>P12 - Glacic Haploturbel</b>												
Centro	A	0-50	md m-f bl	difuso irregular	35,01	33,50	16,80	31,50	18,20	2,5Y 6/4	Marrom Amarelado Claro	Franca
Centro	Chjff	50-70+	sg	difuso irregular	35,58	32,70	18,20	28,20	20,90	2,5Y 7/3	Amarelo pálido	Franca
Borda	2Ch	0-20/30	sg	difuso irregular	100,00	-	-	-	-	-	-	-
Borda	2Chf	20/30-50+	sg	difuso irregular	80,00	47,70	16,30	19,80	16,20	2,5Y 6/3	Marrom Amarelado Claro	Franco- Arenosa
<b>P19 - Glacic Haploturbel</b>												
Centro	A	0-35	w f bl	gradual irregular	33,37	47,40	11,90	20,10	20,60	2,5Y 6/3	Marrom Amarelado Claro	Franco- Argilo- Arenosa
Centro	Chtf	35/60+	w m bl	gradual irregular	28,40	50,60	16,60	16,10	16,70	2,5Y 6/3	Marrom Amarelado Claro	Franco- Arenosa
Borda	2C	0-40	sg	gradual irregular	100,00	-	-	-	-	-	-	-
Borda	2Chtf	40-50+	sg	-	54,66	51,30	12,10	19,80	16,80	2,5Y 7/2	Cinza claro	Franco- Arenosa
<b>Média Centro</b>					39,53	40,67	13,32	26,05	19,97			
<b>Média Borda</b>					79,11	47,83	14,70	21,73	15,73			

<sup>1</sup>Grau de desenvolvimento da estrutura: w = fraco, md = moderado, st = forte. Tamanho: f = pequeno, m = médio. Tipo: ma = massiva, gr = granular, bl = blocos subangulares, sg = grãos simples. <sup>2</sup>Porcentagem de partículas > 2 mm.

<sup>3</sup>Areia grossa: 2–0.2 mm; Areia fina: 0.2–0.05 mm; silte: 0.05–0.002 mm; argila: < 0.002 mm.

**Fonte:** Arquivo dos autores

### 3.2. Caracterização química

Quimicamente, os solos desenvolvidos em superfícies com *patterned ground* também apresentam distinções químicas entre as bordas e centros dos círculos (TABELA 3). Os centros apresentam pH mais próximos da neutralidade (média de 6,9), possuem valores mais elevados de soma de bases (média de 21,6 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>), P disponível e P remanescente (respectivamente, médias de 73,42 mg/dm<sup>3</sup> e 36,23 mg/L), CTC total (T) (média de 22,2 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) e saturação por bases (média de 96,8%) (TABELA 3). No último caso, caracterizam-se como solos

ultraeutróficos. Considerando os horizontes que compõem a porção central (A e C), os valores foram semelhantes em praticamente todos os indicadores e elementos, com um ligeira diferença na CTC total entre os horizontes A e Chjf do perfil P8 (respectivamente de 17,19 e 25,87 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>).

As bordas, por sua vez, apresentaram valores mais elevados de carbono orgânico (média de 1,35 dag/kg), acidez potencial (média de 1,3 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) e saturação por alumínio (m) (média de 0,43%), que, nesse caso, foi nula na porção central das superfícies padronizadas (TABELA 3). Os valores de saturação por bases, embora ligeiramente menores que no centro, também são altos (média de 94,27%), reiterando o caráter ultraeutrófico. Os resultados do conteúdo de carbono orgânico total (CO) corroboram com o acúmulo de matéria orgânica iluvial nos horizontes subsuperficiais (h), principalmente nas bordas (FIGURAS 2C, 2F, 2I).

**Tabela 3.** Propriedades químicas dos solos em áreas de *patterned ground* na Ilha Snow, Antártica Marítima

Posição	Horiz.	pH H <sub>2</sub> O	P	K	H+Al <sup>3+</sup>	SB	T	V	m	CO	P-Rem
<b>P8 - Typic Haploturbel</b>											
Centro	A	6,85	32,60	216,00	0,50	16,69	17,19	97,10	0,00	0,91	40,20
Centro	Chjf	6,66	69,20	270,00	0,50	25,37	25,87	98,10	0,00	0,91	36,60
Borda	2C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Borda	2Chjf	6,87	29,90	252,00	0,50	21,94	22,44	97,80	0,00	0,52	38,60
<b>P12 - Glacic Haploturbel</b>											
Centro	A	7,16	77,70	380,00	0,80	25,73	26,53	97,00	0,00	1,04	34,10
Centro	Chjf	7,26	55,50	340,00	0,50	27,65	28,15	98,20	0,00	1,04	38,80
Borda	2Ch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Borda	2Chf	5,99	25,20	240,00	2,50	22,40	24,90	90,00	1,30	1,83	24,20
<b>P19 - Glacic Haploturbel</b>											
Centro	A	6,51	108,20	220,00	1,10	17,13	18,23	94,00	0,00	1,04	31,70
Centro	Chtf	6,99	97,30	180,00	0,60	17,15	17,75	96,60	0,00	0,91	36,00
Borda	2C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Borda	2Chtf	6,73	7,40	200,00	0,90	16,96	17,86	95,00	0,00	1,70	33,90
<b>Média</b>		6,91	73,42	267,67	0,67	21,62	22,29	96,83	0,00	0,98	36,23
<b>Centro</b>											
<b>Média</b>		6,53	20,83	230,67	1,30	20,43	21,73	94,27	0,43	1,35	32,23
<b>Borda</b>											

Fonte: Arquivo dos autores.

#### 4. Discussão

Ambientes periglaciais são marcados por mecanismos de evolução da paisagem controlada por ciclos de congelamento e descongelamento da água (FRENCH, 2007; LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; MACHADO et al., 2019). A Geomorfologia Periglacial está diretamente relacionada aos processos e formas conduzidos por esses ciclos. A água pura ao congelar aumenta de volume em cerca de 9% (FRENCH, 2007), o que acarreta em implicações paisagísticas, pois, a dinâmica do *permafrost* e da camada ativa provoca a elevação progressiva da superfície, modificando sua forma. Assim, os processos periglaciais ligados aos ciclos de congelamento e descongelamento e ao *permafrost* se associam com configurações ambientais específicas (como, substrato rochoso, solos, condições térmicas, microclima, vegetação) para dar origem a formas de relevo singulares (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012). Ao mesmo tempo, tais processos atuam na transformação dos substratos geológicos subjacentes, através de diversos processos físicos (crioclastia, crioturbação, segregação por congelamento, etc) e químicos (sulfurização,



fosfatização, etc) (LOPES et al., 2019), formando solos igualmente singulares. Dessa forma, esses ecossistemas terrestres Antárticos são tidos como paisagens de exceção e sensíveis às alterações climáticas. A discussão a seguir busca detalhar os mecanismos envolvidos na formação dos *patterned grounds*, destacando-os como fenômenos pedogeomorfológicos, tendo como referência os resultados da sua caracterização na Ilha Snow. A comparação e o diálogo com outros estudos na literatura são realizados para mostrar que, a despeito do foco em uma área específica, trata-se de um fenômeno que evidencia o estabelecimento de condições periglaciais na Antártica Marítima.

#### 4.1. *Patterned ground* como um fenômeno morfogenético

Os materiais sofrem processos distintos de acordo com a sua composição. Os substratos rochosos e solos não necessariamente congelam quando as temperaturas chegam 0 °C. Soluções salinas podem reduzir a temperatura de congelamento (FRENCH, 2007). *Permafrost* é uma condição em que uma camada (solo, sedimento ou rocha) permanece sob temperatura igual ou inferior a 0 °C por pelo menos 2 anos consecutivos, não necessariamente congelado (FRENCH, 2007).

Regiões periglaciais caracterizadas por longos períodos de inverno e verões curtos são muitas vezes marcadas pela presença de *permafrost*, essencial para criar geoformas típicas, como os *patterned grounds* (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; LOPES et al., 2019). Na Antártica Marítima, Lopez-Martinez et al., (2012) identificaram que em todas as áreas em que foram encontradas geleiras rochosas e *protalus lobes* também foi registrada a presença de *permafrost*, o que indica que estas geoformas são grandes indicadores geomorfológicos para *permafrost*.

Os verões curtos em ambientes periglaciais não são suficientes para o completo descongelamento da superfície (FIGURA 2J) (ALMEIDA et al., 2014). A camada ativa, parte acima do *permafrost*, que derrete no verão (FIGURA 2J), é a mais dinâmica nestes ambientes em termos geomórficos, respondendo à ação de congelamento e descongelamento de acordo com a variação térmica, interferindo nas reações químicas, armazenamento e liberação de água no solo (BARSCH, 1993; ALMEIDA et al., 2014; LOPES et al., 2021).

Na Ilha Snow identificou-se sinais de crioclastia, processos de quebra pelo gelo, sendo considerado o processo de intemperismo mais importante em domínios periglaciais (FIGURA 2L) (GUTIERREZ, 2008). A quebra pelo gelo e processos relacionados são sistematicamente enfatizados, assim como sua responsabilidade na formação de uma vasta gama de formas de relevo (ANDRE, 2003). A expansão da água ao congelar promove aumento de pressão e consequentemente a quebra mecânica das rochas gerando clastos angulares ou sua desintegração granular.

Na Ilha Snow foram identificados *patterned ground* com formatos circulares associados aos platôs (FIGURA 2A). O tamanho dos círculos varia de 0,5 a 3 m (FIGURA 2D), podem ter materiais selecionados e não selecionados (GUTIERREZ, 2008). A formação dessas superfícies envolve processos como *frost heaving* e *frost sorting*, em que partículas mais grossas se acumulam na superfície como resultado do movimento vertical ascendente no solo (VAN VLIET-LANOË, 2004; FRENCH, 2007; LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; HALLET, 2013). A gênese dos *patterned grounds* com formatos circulares ou poligonais está mais associada às superfícies planas e relativamente estáveis com drenagem imperfeita, como plataformas de crioplanção, e são tipicamente delimitados por seixos e fragmentos angulosas. Em áreas com maior declividade, podem ser encontrados formas em *Stone Stripes*, formadas pelo desmantelamento das superfícies poligonais em decorrência de solifluxão e *frost creep* (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2021). Essas áreas, frequentemente, estão associadas a presença de encosta de tálus ou cones de tálus à jusante (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012; LOPES et al., 2022b).

As bordas dos círculos das áreas de *patterned ground* da Ilha Snow (FIGURAS 2C, 3) apresentam duas vezes mais fração grossa (> 2mm) do que as áreas centrais (79,1 e 39,5 % respectivamente) (TABELA 2). Os centros apresentam mais fração fina (médias de 26,05 de silte e 19,97 % de argila) e as bordas apresentam mais areias (médias de 47,83 de areia grossa e 14,70 % de areia fina) (TABELA 2). Estes resultados estão relacionados ao processo de *frost sorting* (FIGURA 2K), o qual envolve deslocamento e segregação das partículas de tamanho mais grosso (GUTIERREZ, 2008). Com o congelamento, as partículas mais grossas são expulsas do perfil e se concentram em superfície, caracterizando um processo de segregação vertical. Esses processos também foram identificados em outras áreas da Antártica, como nas Ilhas Livingston, Rei George, Robert, conforme relatado por Lopes et al. (2019) e Lopez-Martinez et al. (2012). Na superfície, as partículas mais grossas se movem pela gravidade para as margens enquanto as partículas mais finas permanecem no centro do polígono (GUTIERREZ, 2008). Desta forma tem-se dois padrões distintos, quanto aos materiais e processos, nas bordas e no centro dos *patterned grounds* (FIGURAS 2B, 2C).

O monitoramento destas superfícies e do *permafrost* são importantes para questões associadas às mudanças climáticas (LOPEZ-MARTINEZ et al., 2012). O descongelamento leva ao ajuste do terreno e formação de geoformas típicas através de processo denominado *thermokarst* (GUTIÉRREZ; GUTIÉRREZ, 2016). Este termo abrange toda gama de efeitos geomórficos resultantes da formação de água no subsolo em regiões com *permafrost* (FRENCH, 2007). O desenvolvimento de *thermokarst* está associado, principalmente, à ruptura do equilíbrio térmico do *permafrost*, o qual aumenta a profundidade da camada ativa, resultante do aumento da temperatura da superfície (FRENCH, 2007).

#### 4.2. Processos pedogenéticos associados a áreas com *patterned grounds*

Nos solos analisados em áreas com *patterned ground* na Ilha Snow, os processos pedogenéticos estão diretamente associados às geoformas, ou seja, os processos possuem caráter dual (pedogeomorfológico), como, a crioturbação, principal processo pedogenético em áreas afetadas por *permafrost* (BOCKHEIM; TARNOCAI, 1998). Este processo corresponde à deformação do material não consolidado e deslocamento de partículas por efeito principalmente da pressão, com predominância de movimentos verticais, sendo um dos processos essenciais para a gênese de *patterned ground* (GUTIERREZ, 2008).

A migração mecânica de partículas finas no solo está relacionada aos ciclos anuais de congelamento e descongelamento (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; LOPES et al., 2019). Isso ocorre, principalmente no outono, quando se tem um congelamento de baixo para cima a partir do *permafrost*, este ambiente de estresse é agravado no inverno com o congelamento que ocorre também da superfície para baixo. Isto aliado aos diferentes teores de umidade no solo propicia o congelamento diferencial e a expansão irregular. Desta forma tem-se a geração de estruturas caóticas (GUTIERREZ, 2008; SOIL SURVEY STAFF, 2022; LOPES et al., 2019). A crioturbação é utilizada como critério para a classificação dos Gelisols, subordem Turbel (TABELA 1) (SOIL SURVEY STAFF, 2022).

Nos solos analisados na Ilha Snow observou-se involução de matéria orgânica e partículas finas (TABELA 2). A crioturbação é na maioria dos solos evidenciada por involução de partículas, transições entre horizontes irregulares, distribuição errática de argila e silte ao longo do perfil, segregação de partículas, entre outros (BOCKHEIM; TARNOCAI, 1998; HAUS et al., 2015). Na Antártica, solos com baixos teores de argila e silte, não demonstraram feições de crioturbação devido à baixa umidade na camada ativa (BLUME; BÖLTER, 2015), isto justifica os maiores sinais de crioturbação identificados no centro, área com maiores teores de partículas finas (TABELA 2). Na Antártica Marítima a crioturbação é um fenômeno generalizado, comumente associada com a intensa crioclastia, superfícies com padrões e gelifluxão (SIMAS et al., 2015; LOPES et al., 2019).

Nos solos analisados na Ilha Snow, observou-se sinais de podzolização, que também favorece a migração de partículas finas (principalmente argilas) e de matéria orgânica. Observou-se acúmulo de matéria orgânica iluvial nos horizontes subsuperficiais (h), principalmente nas bordas dos padrões circulares (TABELA 3). As bordas dos círculos, mais arenosas e cascalhentas (TABELA 2), favorecem a podzolização. Este processo também foi identificado em várias outras áreas da Antártica (BLUME; SCHNEIDER; BOLTER, 1996). Simas et al., (2015) apresentaram que nos Arquipélagos das Orcadas do Sul e Shetlands do Sul, em áreas mais estáveis, onde existe vegetação, tem-se maior atuação de processos químicos, que possibilitam a longo prazo processos de podzolização. Na Península Antártica também foi registrada podzolização associada a áreas de solos ornitogênicos (HAUS et al., 2015). Esses ambientes, mesmo em condições periglaciais típicas, apresentam processos de intemperismo químico atuante, em que a fosfatização libera bases trocáveis e acelera as transformações mineralógicas e micromorfológicas nos solos (RODRIGUES et al., 2021; LOPES et al., 2021; 2022a).

#### 4.3. Os *patterned grounds* e seu papel na evolução geocológica da paisagem antártica

A ocupação da vegetação na Antártica Marítima é favorecida pela maior umidade, luminosidade e temperatura (CAMPBELL; CLARIDGE, 1987; MICHEL et al., 2006). Esta ocupação está ligada a uma combinação de processos pedológicos e geomorfológicos, como disponibilidade hídrica, drenagem, disponibilidade nutricional e estabilidade da superfície (MICHEL et al., 2006; RODRIGUES et al., 2021; LOPES et al., 2021; 2022a).

Apesar dos centros das superfícies padronizadas da Ilha Snow apresentarem estruturas mais desenvolvidas (TABELA 2), pH mais próximos da neutralidade (6,9) e maior riqueza nutricional (valores mais elevados de SB, T e V, respectivamente 21,6 cmolc.dm<sup>-3</sup>, 22,2 cmolc.dm<sup>-3</sup> e 96,8%) a vegetação se concentra nas bordas (FIGURA

2D). A intensa crioturbação nas áreas centrais é um limitante, e a maior disponibilidade hídrica e maior estabilidade das bordas favorecem a colonização vegetal destas áreas (FIGURA 2D).

A maior ocupação da vegetação nas bordas dos círculos dos *patterned ground*, oferece maior aporte orgânico, conseqüentemente tem-se teores mais elevados de CO (TABELA 3). A atuação concomitante da pedogênese e microrganismos produzem e transformam a matéria orgânica em processos de mineralização e humificação, elevando os teores de carbono orgânico (MICHEL et al., 2006; MACHADO et al., 2019; LOPES et al., 2022a). Nessas áreas, também registrou-se valores mais baixos de pH (média de 6,53), o que favorece a diminuição de cargas negativas no solo, conseqüentemente, tem-se maior adsorção de fósforo e valores mais baixos de P-rem (TABELA 3). Destaca-se que a dinâmica química do P no solo depende de vários fatores, como, matéria orgânica, pH, alumínio trocável e mineralogia (ULRICH; SCHNUG, 2013; SIQUEIRA et al., 2021).

O substrato mais arenoso e cascalhento das bordas também favorece a migração e acúmulo orgânico em subsuperfície (TABELA 2). Existe uma ampla gama de variação em microescala que envolvem processos pedogenéticos e morfogenéticos, esse entendimento é muito relevante para uma melhor compreensão dos ecossistemas Antárticos e do potencial de sequestro e emissões de carbono, no cenário de alterações climáticas.

Na Antártica, a estabilidade do material e a presença de água líquida é essencial para a atividade biológica mais intensa, estas condições também favorecem o intemperismo químico (MACHADO et al., 2019; LOPES et al., 2021; RODRIGUES et al., 2021). Destaca-se ainda, que a dinâmica do *permafrost* também está associada com a cobertura vegetal e acumulação de neve na superfície, exercendo efeito de amortecimento térmico (ALMEIDA et al., 2014; GUGLIELMIN; FRATTE; CANNONE, 2014).

A dinâmica da camada ativa gera influência direta na umidade do solo, conseqüentemente, também na vegetação. O espessamento da camada ativa melhora a drenagem e tende a provocar a diminuição de água subterrânea. Essa mudança favorece a colonização de líquens, em detrimento da colonização de musgos, os quais necessitam de maior aporte hídrico (GUGLIELMIN; FRATTE; CANNONE, 2014). Observa-se que as relações relevo-solo-vegetação em áreas de *patterned ground*, são marcadas por uma condição de não-equilíbrio complexo, resultante da forte variabilidade microespacial do fenômeno pedogenético, acarretando em implicações importantes nos serviços ecossistêmicos.

## 5. Conclusões

Paisagens periglaciais com *patterned ground*, envolvem uma complexidade de processos pedológicos e geomorfológicos, que para serem compreendidas necessitam de uma análise que contemple as relações interescalares (escala da paisagem, do perfil e micromorfológica).

A geomorfologia periglacial está diretamente relacionada aos processos físico-químicos relacionados à propriedade da água. Superfícies com *patterned ground* da Antártica Marítima são regidas principalmente pelas dinâmicas associadas ao *permafrost*. Identificou-se processos físicos como *frost sorting* e crioclastia associados aos mecanismos de congelamento e descongelamento da água.

Os centros dos padrões circulares apresentam maior desenvolvimento pedogenético, maior diferenciação entre horizontes, estruturas mais desenvolvidas, maiores teores de partículas finas e maior riqueza nutricional. As bordas apresentam pouca diferenciação entre horizontes, estrutura em grãos simples, altos teores da fração grosseira (> 2 mm) e são predominantemente arenosos.

Em áreas de *patterned ground* em ambientes periglaciais da Antártica, a instabilidade gerada pela intensa crioturbação nas áreas centrais dos círculos, a maior disponibilidade hídrica e maior estabilidade das bordas parecem ser fatores determinantes para colonização vegetal nas margens.

Por fim, a gênese de superfícies/solos com padrões está vinculada a uma importante variação em microescala de processos pedogenéticos, com fortes implicações na dinâmica do carbono nos ecossistemas periglaciais. Seus efeitos dependem do tempo (por quanto tempo o fenômeno se expressa), da colonização pela vegetação (e sua composição florística diferenciada) e da estabilidade da paisagem gerada em condições periglaciais, constantemente em evolução. Desse não-equilíbrio complexo resulta forte variabilidade microespacial do fenômeno pedogenético, e implicações importantes nos serviços ecossistêmicos.

**Contribuições dos autores:** Os autores D.V. Lopes e F.S. Oliveira elaboraram a proposta de estudo, realizaram as coletas de campo e executaram a pesquisa. D.V. Lopes realizou as análises, processou os dados, realizou a interpretação dos resultados e escreveu o manuscrito. C.E.G.R. Schaefer e F.S. Oliveira orientaram a pesquisa e

contribuíram de maneira significativa com a discussão e à revisão do texto. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

**Agradecimentos:** Agradecemos o apoio do Grupo Terrantar (INCT Criosfera), com colaboração entre os Programas de Pós-Graduação em Geografia (IGC/UFGM) e Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas (PPGSNP-UFV). Agradecemos o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), pelo apoio e assistência no campo e a FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro. Por fim, agradecemos também os revisores e editores pelas sugestões e melhorias no trabalho.

**Conflito de interesse:** Os autores declaram não haver conflito de interesse. Os financiadores não tiveram interferência no desenvolvimento do estudo (na coleta, análise, interpretação dos dados, redação do manuscrito, ou na publicação).

## Referências

1. ALMEIDA, I. C. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, R. B. A.; PEREIRA, T. T. C.; NIEUWENDAM, A.; PEREIRA, A. B. Active layer thermal regime at different vegetation covers at Lions Rump, King George Island, Maritime Antarctica. **Geomorphology**, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.048
2. ALVAREZ, V.H.V., NOVAIS, R.F., DIAS, L.E., OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **B. Inf. SBCS**, 25, p. 27–32, 2000.
3. ANTPAS. ANTPAS Guide for Describing, Sampling, Analyzing, and Classifying Soils of the Antarctic Region Summary of Key Attributes to be recorded Methods for recording Key Attributes. **Antarctic Permafrost and Soils**, 2006.
4. BARSCH, D. Periglacial geomorphology in the 21st century. **Geomorphology** 7, 141–163, 1993. DOI: 10.1016/0169-555X(93)90015-T
5. BAÑON, M.; JUSTEL, A.; VELAZQUEZ, D.; QUESADA, A. Regional weather survey on Byers Peninsula, Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica. **Antarctic Science**, 25, 146–156, 2013. DOI: 10.1017/S0954102012001046
6. BLUME, H.; SCHNEIDER, D.; BOLTER, M. Organic Matter Accumulation in and Podzolization of Antarctic Soils. **Pflanzenernähr. Bodenk.**, 159. 411-412, 1996.
7. BOCKHEIM, J. G. Properties and classification of cold desert soils from Antarctica. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 61 (1), p. 224–231, 1997.
8. BOCKHEIM, J. G.; TARNOCAI, C. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. **Geoderma**, 81:281–293, 1998.
9. BOCKHEIM, J. G.; UGOLINI, F. C. A review of pedogenic zonation in well-drained soils of the Southern Circumpolar Region. **Quaternary Research**, v. 34, n. 1, p. 47–66, 1990.
10. BOCKHEIM, J. G.; HINKEL, K. M. Characteristics and significance of the transition zone in permafrost-affected soils of drained thaw-lake basins of the Arctic Coastal Plain, Alaska. **Arctic**, 58: 406-417, 2005.
11. BOCKHEIM, J. G. Distribution, properties and origin of viscous-flow features in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. **Geomorphology**, 204: 114 -122, 2014.
12. CAMPBELL, I. B.; CLARIDGE, G. G. C. **Antarctica: soils, weathering processes and environment**. p. 368pp, 1987.
13. FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; FILHO, E. I. F.; SOUZA, J. J. L. L.; COSTA, L. M. Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Catena**, v. 85, n. 3, p. 194–204, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.007>
14. FRENCH, H. M. **The Periglacial Environment**, 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2007.
15. FRENCH, H. M. Does Lozinski's periglacial realm exist today? A discussion relevant to the usage of the term "periglacial". **Permafrost and Periglacial Processes**, 11: 35-42, 2000.
16. GUGLIELMIN, M.; FRATTE, M. D.; CANNONE, N. Permafrost warming and vegetation changes in continental Antarctica. **Environ. Res. Lett.** 9 (2014) 045001, 2014. DOI: 10.1088/1748-9326/9/4/045001



17. GUTIERREZ, E. M. **Geomorfología**. Pearson Educación, SA, Madrid, 2008.
18. GUTIÉRREZ, F.; GUTIÉRREZ, M. Periglacial Landforms. In: **Landforms of the Earth**. Springer International Publishing, pp. 221–236. DOI: 10.1007/978-3-319-26947-4
19. HALLET, B. Stone circles: form and soil kinematics. **Phil. Trans. R. Soc. A**, 371, 1–17, 2013.
20. HATHWAY, B.; LOMAS, S. A. The Upper Jurassic - Lower Cretaceous Byers Group, South Shetland Islands, Antarctica: revised stratigraphy and regional correlations. **Cretaceous Research**, p. 43–67, 1998.
21. HAUS, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BOCKHEIM, J.; PEREIRA, T. T. C. Soils of Graham and Palmer Lands, Antarctic Peninsula. In: BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **The soils of Antarctica**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 205–225.
22. JACKSON, M. L. **Soil Chemical Analysis: Advanced Course**. Madison: University of Wisconsin - Madison Libraries, 930p., 2005.
23. LOPES, D. V.; SOUZA, J. J. L. L.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Solos e Evolução da Paisagem em Ambiente Periglacial na Península Barton, Antártica Marítima. **Revista do Departamento de Geografia**, (spe), 259-267, 2017. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.132721
24. LOPES, D. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, J. J. L. L.; OLIVEIRA, F. S.; SIMAS, F. N. B.; PAULA, M. D.; GJORUP, D. F. Concretionary horizons, unusual pedogenetic processes and features of sulfate affected soils from Antarctica. **Geoderma**. 347, 13-24, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.03.024
25. LOPES, D. V.; SOUZA, J. J. L. L.; SIMAS, F. N. B.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. Hydrogeochemistry and chemical weathering in a periglacial environment of Maritime Antarctica. **Catena**, 197 (2021) 104959, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104959
26. LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; SOUZA, J. J. L. L.; MACHADO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. R. Soil pockets phosphatization and chemical weathering of sites affected by flying birds of Maritime Antarctica. **An Acad Bras Cienc** (2022) 94 (Suppl. 1). p. 1-17, 2022a. DOI: 10.1590/0001-376520220210595
27. LOPES, D. V.; OLIVEIRA, F. S.; PEREIRA, T.T.C.; SCHAEFER, C. E. G. R., Pedogeomorphology and weathering at Snow Island, Maritime Antarctica. **Catena** 217 (2022) 106515, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106515>
28. LOPEZ-MARTINEZ, 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: 10.1016/j.geomorph.2011.12.018
29. MACHADO, M. R.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FRANCELINO, M. R.; MICHEL, R. F. M. Paisagens polares não glaciais (Proglacial, Paraglacial e Periglacial): Revisão de conceitos e contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. **Rev. Bras. Geomorfol.** 20, 603–622, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1639
30. MACKAY, J. R. The origin of hummocks, Western Arctic coast, Canada, **Can. J. Earth Sci.**, 17: 996-1006, 1980.
31. MICHEL, R. F. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; DIAS, L.; SIMAS, F. N. B.; BENITES, V.; MENDONÇA, E. S. Ornithogenic Gelisols (Cryosols) from maritime Antarctica; pedogenesis, vegetation, and carbon studies. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70(4), n. October, p. 1370–1376, 2006. DOI: 10.2136/sssaj2005.0178
32. PING, C. L.; BOCKHEIM, J. G.; KIMBLE, J. M.; MICHAELSON, G. J.; WALKER, D. A. Characteristics of cryogenic soils along a latitudinal transect in arctic Alaska. **J. Geophys. Res.**, 103, p. 2891-2892. 1998.
33. 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** 336, 77–94, 2019. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.03.030
34. RODRIGUES, W. F.; OLIVEIRA, F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R.; LEITE, M. G. P.; PAVINATO, P. S. Phosphatization under birds' activity: Ornithogenesis at different scales on Antarctic Soils. **Geoderma**, 391 (2021) 114950, 2021. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.114950
35. SCHAEFER, C. E. G. R.; DELPUPO, C.; SIMAS, F. N. B.; GJORUP, D.; BOCKHEIM, J. Soils of the Weddell Sea Sector, Antarctica. In: BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **The soils of Antarctica**. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 274–279.
36. SCHAEFER, C. E. G. R.; PEREIRA, T. T. C.; ALMEIDA, I. C. C.; MICHEL, R. F.; CORRÊA, G. R.; FIGUEIREDO, L. P. S.; KER, J. C. Penguin activity modify the thermal regime of active layer in Antarctica: A case study from Hope Bay. **Catena** 149, 2017. p. 582-591. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.021>

37. SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MELO, V. F.; GUERRA, M. B. B.; SAUNDERS, M.; GILKES, R. J. Clay-sized minerals in permafrost-affected soils (Cryosols) from King George Island, Antarctica. **Clays and Clay Minerals**, v. 54, n. 6, p. 721–736, 2006.
38. SIMAS, F. N. B.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MICHEL, R. F. M.; FRANCELINO, M. R.; BOCKHEIM, J. G. Soils of the South Orkney and South Shetland Islands, Antarctica. In: BOCKHEIM, J. G. (Ed.). **The soils of Antarctica**. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. p. 227–273.
39. SIQUEIRA R. G.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES-FILHO, E. I.; CORRÊA, G. R.; FRANCELINO, M. R.; SOUZA, J. J. L. L.; ROCHA, P.A. Weathering and pedogenesis of sediments and basaltic rocks on Vega Island, Antarctic Peninsula. **Geoderma** 382: 114707, 2021.
40. SMELLIE, J. L.; PANKHURST, R.; THOMSON, M. R. A.; DAVIES, R. E. S. The geology of the South Shetland Islands. VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. **British Antarctic Survey Scientific Reports**, 1984.
41. SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service. 410p, 2022.
42. SOUZA, C. D.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SIMAS, F. N. B.; SPINOLA, D. N.; DAHER, M. Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica. **Geomorphology**, p. 1–13, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.047
43. TARNOCAL, C.; CANADELL, J. G.; SCHUUR, E. A. G.; KUHR, P.; MAZHITOVA, G.; ZIMOV, S. A. Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. **Global Biogeochem. Cy.**, 23: GB2023, 2009. doi:10.1029/2008GB003327
44. TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G.; Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p
45. TURNER, J.; LU, H.; KING, J.; MARSHALL, G. J.; PHILLIPS, T.; BANNISTER, D.; COLWELL, S. Extreme Temperatures in the Antarctic. **Journal of Climate**. v. 34, n. 7, 2021. p. 2653–2668. DOI: 10.1175/JCLI-D-20-0538.1
46. TURNER, J.; LU, H.; KING, J. C.; CARPENTIER, S.; LAZZARA, M.; PHILLIPS, T.; WILLE, J. An extreme high temperature event in coastal East Antarctica associated with an atmospheric river and record summer downslope winds. **Geophysical Research Letters**, 49, e2021GL097108, 2022. p. 1-11. DOI: 10.1029/2021GL097108
47. ULRICH, A.; SCHNUG, E. The modern P sustainability movement: A profiling experiment. *Sustainability*. 5, 4523-4545, 2013.
48. VAN EVERDINGEN, R. **Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms**. National Snow and Ice Data Center, Boulder, CO, 159p. 1998.
49. VAN VLIET-LANOË, B. Micromorphology of Cryosols. In: Kimble, J. (Ed.), **Cryosols: Permafrost Affected-Soils**. Springer, pp. 365–390, 2004.
50. YEOMANS, J. C.; BREMMER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988.



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.