

ECOSSISTEMAS COSTEIROS DA ILHA SNOW, ANTÁRTICA: FÍSICA, QUÍMICA E MINERALOGIA

The Snow Island coastal ecosystems, Antarctica: physics, chemistry and mineralogy

Daví do Vale Lopes¹, Fábio Soares de Oliveira², Carlos Ernesto G. R. Schaefer³, Luís Flávio Pereira⁴

¹ Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Rua Joaquim Gregório, s/n - Penedo, Caicó-RN, CEP 59300-000, Brasil. E-mail: davivlopes@hotmail.com

² Departamento de Geografia, Instituto de Geociências (IGC), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP 31270-901. E-mail: fabiosolos@gmail.com

³ Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs s/n - Campus Universitário, Viçosa-MG, CEP 36570-900. Bolsista de produtividade em pesquisa nível 1A do CNPq. E-mail: carlos.schaefer@ufv.br

⁴ Graduação em Agronomia, Departamento de Solos, Centro de Ciências Agrárias (CCA), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs s/n - Campus Universitário, Viçosa-MG, CEP 36570-900. Bolsista FAPEMIG. E-mail: pereira.flavioluis@gmail.com

RESUMO

A maior parte das áreas livres de gelo da Antártica ocorre próximo à zona costeira, locais relevantes pelas transferências de nutrientes realizadas pela fauna. O objetivo deste trabalho foi analisar amostras superficiais de solos dos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica Marítima, a partir das suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Foram coletadas cinco amostras nos terraços marinhos. Nutrientes trocáveis, pH e textura foram determinados em amostras de TFSA. Determinaram-se teores de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, Co, Cu, Mn, P, Pb e Zr por EDX. Identificou-se a mineralogia por DRX. Registraram-se ecossistemas costeiros predominantemente arenosos, ácidos e com distrofismo generalizado. Transferências de nutrientes são essenciais para a adubação desses ambientes. O aporte nutricional pode ser identificado pelos valores elevados de P e C orgânico. Índícios de crioclastia e alterações químicas com ocorrência de esmectita, caulinita e goethita foram registrados. O monitoramento dos solos de ecossistemas costeiros fornece importantes subsídios para a identificação de alterações climáticas na Antártica.

Palavras-chave: crioclastia, fosfatização, fauna, ciclagem de nutrientes, terraços marinhos.

Recebido em: 12/11/2019
Aprovado em: 02/07/2020
Publicado em: 30/01/2021

ABSTRACT

Most of the Antarctic ice-free areas occur near the coastal zone, places relevant for nutrient transfers by fauna. In this paper, we analyze the Snow Island coastal ecosystems, Antarctica, from their physical, chemical and mineralogical properties. Five samples were collected from the marine terraces. Exchangeable nutrients, pH and texture were determined. Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, Co, Cu, Mn, P, Pb and Zr were determined by EDX. The mineralogy was determined by X-ray diffraction (DRX). These coastal ecosystems are predominantly sandy, acidic and dystrophic. Nutrient transfers are essential for fertilization of these environments. Biovectors, such birds, transport nutrients from sea to land, identified by the high values of P and organic carbon. There were signs of cryoclastic weathering and chemical alterations with the occurrence of smectite, kaolinite and goethite. Monitoring of Antarctic coastal ecosystems it is important to try to identify and understand the impacts of climate change.

Keywords: *cryoclastic, phosphatization, fauna, nutrient cycling, marine terraces.*

INTRODUÇÃO

A maior parte das áreas livres de gelo da Antártica ocorre próxima às zonas costeiras, as quais estão associadas às bordas de glaciares, susceptíveis aos seus avanços e recuos. A topografia dessas áreas varia desde amplos e extensos vales glaciais até suaves planícies. A maioria das áreas costeiras do continente apresenta evidências de soerguimento isostático, como falésias interiores, praias e terraços marinhos (Bölter; Beyer & Stonehouse, 2002; Nichols, 1968). Nesses locais é comum encontrar vestígios de colonização biológica progressiva, com as áreas mais recentes sendo aquelas próximas às bordas da calota de gelo (Bölter; Beyer & Stonehouse, 2002).

Ecossistemas terrestres da Antártica Marítima desenvolvidos na zona costeira representam importantes sítios de entrada de nutrientes (destacam-se C orgânico, P e N) realizada pela fauna (espécies diversificadas de focas, elefantes marinhos e, principalmente, aves) a partir de transferências dos oceanos para o continente (Tatur; Myrcha & Niegodysz, 1997). A deficiência em fósforo limita a produtividade primária em ambientes aquáticos e terrestres. Contudo, esse nutriente é encontrado em altas concentrações em excrementos de aves marinhas (Otero *et al.*, 2018). Por isso, a nidificação transforma drasticamente as condições ambientais dos locais onde estabelecem suas colônias, via solo, sedimento e água (Otero *et al.*, 2018).

Na Antártica, o Arquipélago das Shetlands do Sul possui muitas áreas livres de gelo sensíveis às alterações climáticas e com grande potencial de estudos relacionados às dinâmicas geomorfológicas e pedológicas (López-Martínez *et al.*, 2012). Diversas pesquisas na região têm concentrado esforços na compreensão dos processos e das formas de relevo associados a ambientes periglaciais, dinâmicas relacionadas ao *permafrost*, interações entre meio físico e biótico, mecanismos de congelamento/descongelamento, processos de intemperismo químico, entre outros (Francelino *et al.*, 2011; Lopes *et al.*, 2017; López-Martínez *et al.*, 2012; Michel *et al.*, 2014; Moura *et al.*, 2012; Oliva & Ruiz-Fernández, 2016; Simas *et al.*, 2006, 2007).

Apesar do avanço alcançado com os estudos anteriores, ainda existem várias lacunas a serem preenchidas na Antártica Marítima. A Ilha Snow, por exemplo, ainda apresenta escassas informações sobre sua geologia e ausência de estudos sobre geomorfologia e solos.

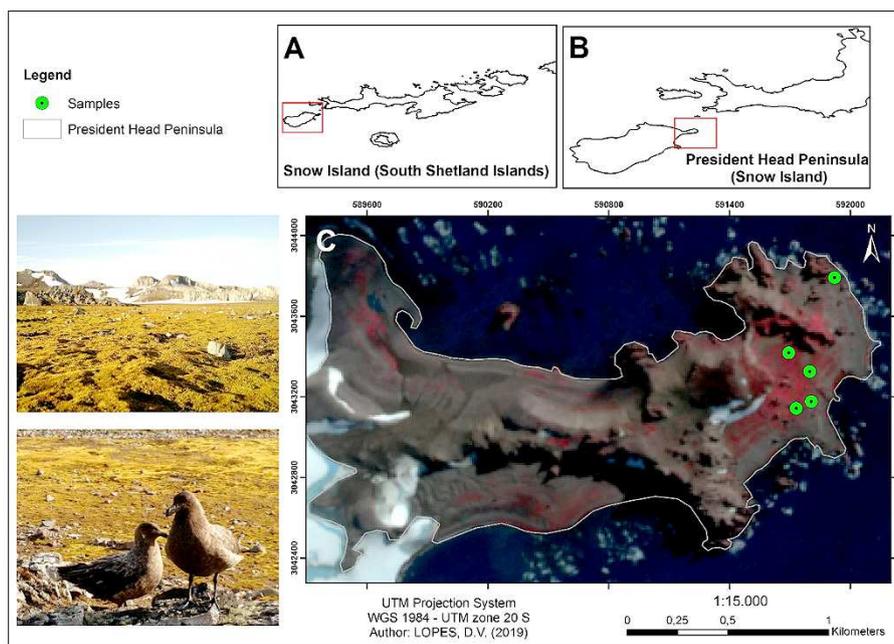
A área ainda se destaca por apresentar paisagens de exceção com intensa atividade biológica e colonização progressiva quase exclusivamente na área costeira. Por esse motivo, o objetivo deste trabalho foi analisar os solos dos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica Marítima, por meio de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, buscando elucidar, a partir desses aspectos importantes da interação substrato - atividade biológica -, a reserva nutricional para a colonização biológica desses ambientes.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A Ilha Snow localiza-se no Arquipélago das Shetlands do Sul, na Antártica Marítima (Figura 1). A Península President Head é a maior área livre de gelo. A península apresenta geologia complexa, rochas vulcano-sedimentares com abundância fossilífera, podendo-se encontrar rochas como basalto, andesito, conglomerado, arenito, entre outras (Cantrill, 1998; Smellie *et al.*, 1984).

Figura 1 - Localização da Península President Head, Ilha Snow, na Antártica



Nota: A - Ilha Snow, Arquipélago das Shetlands do Sul. B - Península President Head, Ilha Snow. C - Península President Head e pontos analisados.

Fotos: terraços marinhos vegetados com ocupação da fauna antártica.

A geomorfologia da área caracteriza-se pela presença de praias, terraços marinhos, platôs e glaciares. As praias holocênicas apresentam-se descontínuas pela existência de corpos intrusivos. Os terraços marinhos apresentam variabilidade paisagística, podendo ser vegetados ou não. Na Ilha Snow foram registrados terraços com atuação de processos paraglaciais e periglaciais, destacando-se os terraços periglaciais, que são mais vegetados e apresentam maior desenvolvimento pedogenético (Figura 1). A área também apresenta platôs e platôs dissecados. Identificaram-se processos de gelifluxão, ocorrência de *permafrost* e superfícies com padrão.

Na área costeira da Península President Head são encontrados depósitos eólicos, principalmente no barlavento ao sul, composto por partículas bem selecionadas. Seu desenvolvimento é favorecido pelos ventos do sul e pela existência de plataformas no centro da península. Os depósitos são formados principalmente no verão antártico, quando há maior abrangência de áreas livres de gelo.

Análises físicas e químicas dos solos

Cinco amostras superficiais dos solos foram coletadas nos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica. As amostras foram secas, destorroadas e peneiradas (malha de 2 mm). Separaram-se as frações granulométricas pelo método da centrífuga com uso de solução de Na₂CO₃ em pH 9,5 como dispersante. O pH, os nutrientes trocáveis e a textura foram determinados em amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) (Embrapa, 1997). Cátions trocáveis, Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺, foram extraídos com 1M KCl e P, Na⁺ e K⁺, com extrator Mehlich-1 (dupla diluição 0,05 mol/L de HCl em 0,0125 mol/L de H₂SO₄) (Embrapa, 1997). Os teores dos elementos (Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) nos extratos foram determinados por espectrometria de absorção atômica e emissão de chama (Na⁺ e K⁺) e por fotolorimetria (P). O carbono orgânico total (CO) foi determinado via combustão úmida (Yeomans & Bremner, 1988).

Teores elementares e mineralogia

Os teores elementares de Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, Si, Co, Cu, Mn, P, Pb e Zr foram determinados com Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (modelo Shimadzu µEDX-1300). As amostras foram peneiradas (200 mesh) e prensadas para montagem de pastilhas. Os dados de cada metal foram obtidos a partir de 1.200 pontos, com raio de incidência de 50 µm de diâmetro. A acurácia foi calibrada com uso de amostras de referências. O índice de alteração química (CIA) foi calculado assumindo que o processo dominante durante o intemperismo químico é de degradação do feldspato e formação de minerais de argila, com lixiviação de Na, K e Ca e concentração de Al (Nesbitt & Young, 1982). O CIA baseia-se na fórmula:

$$CIA = (Al_2O_3) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O) * 100$$

A caracterização mineralógica foi realizada segundo a técnica de Difratometria de Raios X. Os difratogramas foram obtidos a partir de lâminas de argila orientadas, variando entre 5° e 70° 2θ, com radiação CoKα, com um intervalo de 0,02° 2θ e tempo de contagem de 2 s por etapa. Foram realizadas leituras em amostras de argila natural e tratamentos como remoção de óxidos de Fe e saturação com K (25 °C, 350 °C e 550 °C).

RESULTADOS

Caracterização física

Os ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica, são marcados pela presença predominante de frações grossas (> 2 mm) (média > 55%). Na fração inferior a 2 mm de diâmetro, predominam areia grossa (0,73 kg.kg), argila (0,13 kg.kg), silte (0,08 kg.kg) e areia fina (0,06 kg.kg) (Tabela I).

Tabela I - Localização e propriedades físicas dos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica

Amostra	Localização	Altitude	> 2 mm	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
		m.a.s.l.	%	kg.kg	kg.kg	kg.kg	kg.kg
P1	S 62°43'41,5" / W 061°12'22,3"	12	29,57	0,63	0,15	0,07	0,16
P2	S 62°43'44,41" / W 061°12'14,8"	12	55,75	0,78	0,04	0,07	0,11
P3	S 62°43'50,4" / W 061°12'19,2"	8	39,36	0,79	0,04	0,07	0,11
P4	S 62°43'49,2" / W 061°12'13,9"	6	73,74	0,85	0,02	0,04	0,09
P5	S 62°43'29,3" / W 061°12'0,7"	9	79,69	0,63	0,04	0,12	0,21
Média			55,62	0,73	0,06	0,08	0,13

Caracterização química

Registraram-se valores de pH ácido (média 4,28), ambientes distróficos (V equivalente a 31,52%), alta saturação por Al (m) (média de 25,55%), altos valores de CTC total (T) (média de 22,8 cmol_c.dm⁻³) e elevados valores de P remanescente (P-Rem) (média de 39,94 mg.L) (Tabela II). Considerando as condições antárticas, destacam-se valores elevados de CO e P (respectivamente 4,70 dag.kg e 1658,78 mg.dm³). Não se identificou caráter sódico (todas amostras apresentam menos de 15% de ISNa) (Tabela II).

Tabela II - Propriedades químicas dos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica

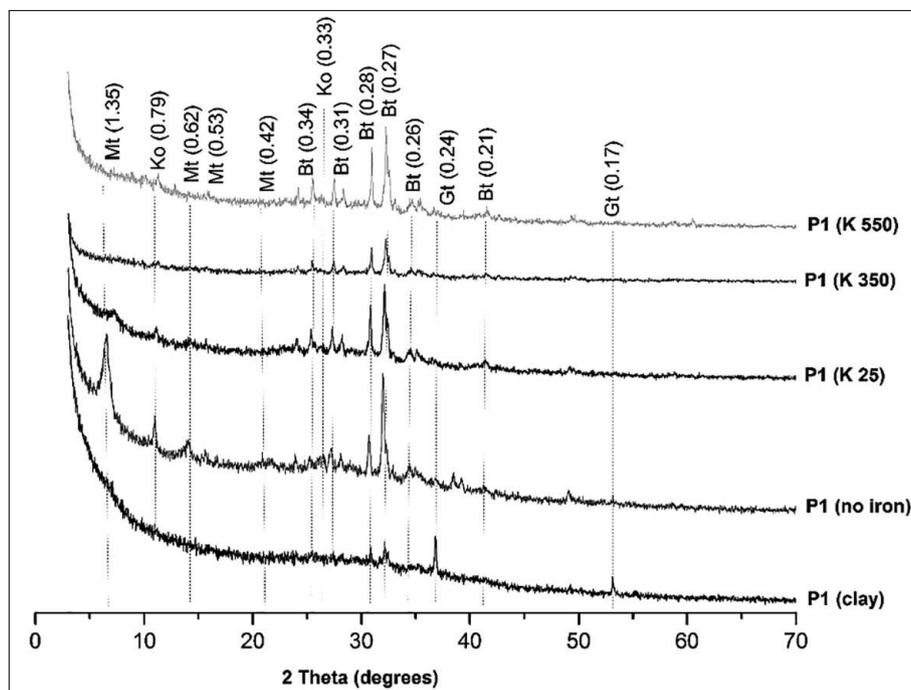
Amostra	pH H ₂ O	P	Na	H+Al	SB	T	V	m	ISNa	CO	P-Rem
		__mg.dm ³ __			__cmolc.dm ³ __			__%__		dag.Kg	mg.L
P1	4,43	130,55	520,00	9,90	8,55	18,45	45,60	12,50	11,65	6,59	11,50
P2	4,42	1401,10	210,00	16,40	5,49	21,89	25,45	25,05	4,12	2,15	51,55
P3	4,51	422,30	171,00	10,85	4,13	14,98	28,35	33,35	4,98	2,68	36,80
P4	4,02	361,75	170,00	14,55	3,23	17,78	18,10	53,20	4,41	1,30	31,70
P5	4,02	5978,20	660,00	24,50	16,40	40,90	40,10	3,65	7,03	10,76	68,15
Média	4,28	1658,78	346,20	15,24	7,56	22,80	31,52	25,55	6,44	4,70	39,94

Caracterização mineralógica

Nos padrões de DRX, minerais primários foram identificados, como biotita, filossilicatos com estrutura 2:1 como montmorilonita, aluminossilicatos como caulinita e oxihidróxidos de Fe como goethita (Figura 2). Tratamentos com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) foram eficientes para remoção dos óxidos de Fe. A saturação dos sítios de adsorção com íons (K⁺) e os tratamentos térmicos colaboraram com a identificação das smectitas. Tratamentos térmicos também interferiram nos picos da caulinita (Figura 2).

As médias dos teores dos principais óxidos foram: SiO₂ (43,7%), Al₂O₃ (9,8%), Fe₂O₃ (5,0%), CaO (3,9%), Na₂O (1,5%), K₂O (1,4%) e MgO (0,7%) (Tabela III). A sequência decrescente dos teores de elementos traços foi P > Cu > Mn > Zr > Pb > Co (Tabela III). O índice de alteração química da maior parte das amostras ficou entre 63,3 e 68,7, exceto para a amostra coletada em área de afloramento rochoso, que indicou menor alteração (29,5) (Tabela III).

Figura 2 – Difratogramas de raios X da fração argila (P1).



Argila natural, isenta de óxidos de Fe, saturada com K (tratamentos térmicos - 25 °C, 350 °C e 550 °C).

Montmorilonita (Mt), caulinita (Ko), biotita (Bt), goethita (Gt).

Tabela III – Teores de metais e metaloides dos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, na Antártica

Amostra	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SiO ₂	Co	CuO	Mn	P	Pb	Zr	CIA
	%							mg kg ⁻¹						
P1	12,06	3,05	5,26	1,27	1,21	1,46	47,52	22,12	76,49	896,30	7760,42	97,56	209,72	67,64
P2	11,43	3,01	6,00	1,62	0,64	1,99	45,98	27,23	173,27	513,93	54868,93	153,46	203,06	63,33
P3	10,91	2,50	4,64	1,60	0,83	1,82	51,19	20,16	110,64	447,08	18252,76	101,87	217,30	64,93
P4	9,77	1,61	4,44	1,66	0,73	1,16	48,42	19,95	81,66	324,85	18109,45	89,42	162,34	68,71
P5	4,93	9,75	5,02	0,99	0,16	1,16	25,58	24,19	488,79	475,66	87152,35	146,54	304,55	29,59
Média	9,82	3,98	5,07	1,43	0,71	1,52	43,74	22,73	186,17	531,56	37228,78	117,77	219,39	58,84

DISCUSSÕES

Ecossistemas terrestres da Antártica desenvolvidos na zona costeira

Ecossistemas terrestres da Antártica Marítima desenvolvidos nas áreas livres de gelo da zona costeira representam importantes locais de alta entrada de nutrientes via animais marinhos, pinguins e aves voadoras (petréis e skuas) (Tatur; Myrchar & Niegodzisz, 1997). Esses locais são extremamente relevantes pela transferência de nutrientes dos ecossistemas marinhos para os terrestres, principalmente durante o período de reprodução no verão antártico.

Os ambientes costeiros da Ilha Snow são marcados pelo distrofismo (saturação por bases médias de 31,5%) (Tabela II). As condições ambientais dessas áreas são melhoradas com o enriquecimento nutricional promovido pela fauna. Considerando as condições an-

tárticas, identificaram-se na Ilha Snow valores elevados de C org e P (respectivamente 4,70 dag.kg e 1658,78 mg.dm³) (Tabela II). Altos níveis de P (Mehlich-1) indicam ocorrência de fosfatização (Schaefer *et al.*, 2015). Teores mais altos de C org (P5) foram consistentes com maior disponibilidade de P (Mehlich-1) (Tabela II). O nitrogênio e o fósforo são considerados elementos essenciais para todas as formas de vida (Otero *et al.*, 2018). A abundância nutricional das zonas costeiras, aliada à maior disponibilidade de água líquida, favorece as condições para uma vegetação exuberante e diversificada na Antártica (Tatur; Myrcha & Niegodysz, 1997) (Figura 1).

A elevada acidez potencial (H+Al) (média de 15,2 cmolc.dm³) pode estar relacionada aos altos teores de matéria orgânica. Registraram-se valores de pH ácido (média 4,28), alta saturação por Al (m) (média de 25,55%), altos valores de CTC total (T) (média de 22,8 cmolc.dm⁻³) e elevados valores de P remanescente (P-Rem) (média de 39,94 mg.L) (Tabela II). Os baixos teores de argila (Tabela I) justificam os elevados valores de P-Rem. Não se identificou caráter sódico (todas as amostras apresentam menos de 15% de ISNa) (Tabela II). O Na em altos teores poderia ser um empecilho para o crescimento da vegetação.

Permafrost, crioclastia e mineralogia das áreas costeiras

O *permafrost* não foi identificado, nem sinais de crioturbação, nos ecossistemas costeiros da Ilha Snow. López-Martínez *et al.* (2012) apresentaram que, na Antártica Marítima, os fenômenos periglaciais estão espalhados acima 10 m de altitude e são especialmente ativos em plataformas entre 30 e 100 m de altitude. A distribuição espacial de formas de relevo periglaciais ajuda a identificar a presença de *permafrost*, que é dominante acima de 25 m de altitude (López-Martínez *et al.*, 2012).

Apesar de não terem sido registrados *permafrost* e crioturbação, sinais de crioclastia em rochas e minerais foram identificados. Detectou-se a ocorrência de minerais primários (biotita) na fração argila (Figura 2). A presença de micas associadas à rocha hospedeira e nos seus produtos de alteração indica que o intemperismo físico (crioclastia) é o processo dominante de alteração na área (Vennum & Nejedly, 1990). A presença de esmectita (montmorilonita) indica que a alteração química também é importante nesses ecossistemas (Vennum & Nejedly, 1990).

Os índices CIA sugerem alterações químicas nos ecossistemas costeiros antárticos, sendo que a maior parte das amostras ficou entre 63,3 e 68,7 (Tabela III), exceto para a amostra P5, a qual se localiza em área de afloramento rochoso e demonstra ser a mais fosfatizada (Tabela II). A geoquímica dos andesitos encontrados na área apresenta SiO₂ (58,4%), Al₂O₃ (17,2%), CaO (5,3%), Na₂O (4,2%), MgO (3,4%), Fe₂O₃ (2,3%) e K₂O (0,8%) (Smellie *et al.*, 1984). Por sua vez, nas amostras analisadas registraram-se teores médios de SiO₂ (43,7%), Al₂O₃ (9,8%), Fe₂O₃ (5,0%), CaO (3,9%), Na₂O (1,5%), K₂O (1,4%) e MgO (0,7%) (Tabela III). Observaram-se perdas geoquímicas de SiO₂, Al₂O₃, CaO, Na₂O, K₂O e MgO. O único elemento com enriquecimento foi Fe₂O₃; provavelmente esses valores representam os argilominerais oxídicos detectados (Figura 2).

Registraram-se caulinita d (001) e d (002) em 0,79 e 0,33 nm respectivamente. Embora sua presença não seja comum na Antártica, esse mineral foi identificado em estudos anteriores realizados em ecossistemas costeiros (Blume *et al.*, 2002; Schaefer *et al.*, 2015; Simas *et al.*, 2007). Oxi-hidróxidos de Fe (goethita) foram detectados, os quais tiveram seus picos completamente removidos após tratamento com DCB (Figura 2). Estudos anteriores também identificaram óxidos de Fe na Antártica Marítima (Lopes *et al.*, 2017).

A presença de oxi-hidróxidos de Fe (Figura 2) nos ecossistemas costeiros da Antártica tem uma importância significativa no ciclo do fósforo (Schaefer *et al.*, 2015; Simas *et al.*,

2007; Tatur; Myrcha & Niegodzisz, 1997). Esse elemento naturalmente apresenta mobilidade reduzida, sendo encontrado em várias formas químicas no material fecal de aves marinhas (Otero *et al.*, 2018). Parte do P pode ser adsorvida por oxi-hidróxidos de Fe/Al em solos ácidos, e a chegada desses colóides em ambientes anóxidos através da erosão pode promover a liberação do P pela dissolução dos oxi-hidróxidos de Fe (Otero *et al.*, 2018). As alterações climáticas com derretimento de geleiras, a elevação dos níveis dos mares e o aumento da precipitação podem favorecer a erosão e o transporte de colóides oxidados, o que tende a favorecer a dissolução desses argilominerais e, conseqüentemente, a liberação do P (Tabela II) para os ecossistemas marinhos (Otero *et al.*, 2018).

CONCLUSÕES

Os ecossistemas costeiros da Ilha Snow são predominantemente arenosos, ácidos, e apresentam distrofismo generalizado. Nessas condições, as transferências de nutrientes dos ecossistemas marinhos para os terrestres, realizadas pela fauna antártica, são essenciais para a adubação desses ambientes.

O aporte nutricional nesses ecossistemas pode ser identificado pelos valores elevados de P e CO, os quais, aliados à maior disponibilidade de água líquida, criam um ambiente propício para ocupação da vegetação. Teores elevados de P (Mehlich-1) indicam ocorrência da fosfatização.

Não foram identificados *permafrost* e crioturbação nos ecossistemas costeiros da Ilha Snow, porém indícios de crioclastia nas rochas e nos minerais foram registrados. Detectou-se a ocorrência de minerais primários na fração argila, o que sugere alteração física.

Sinais de alteração química também foram observados, como ocorrência de esmectita (montmorilonita), oxi-hidróxidos de Fe (goethita) e aluminossilicatos (caulinita) na fração argila. Ressalta-se que esses produtos podem ter sido herdados de condições pretéritas. Alterações climáticas na Antártica podem favorecer a dissolução de oxi-hidróxidos de Fe em condições anóxidas e, conseqüentemente, a liberação de P para os ecossistemas marinhos.

O monitoramento dos ecossistemas costeiros fornece importante subsídio para identificação de alterações climáticas na Antártica. A colonização progressiva da fauna e flora auxilia na compreensão da dinâmica ambiental. A melhor compreensão do funcionamento desses ecossistemas também auxilia nas políticas de preservação na Antártica.

Agradecimentos - Agradecemos o apoio do Terrantar, do INCT da Criosfera, da Marinha do Brasil, do PPG em Geografia IGC/UFMG e o financiamento da Fapemig, da Capes e do CNPq. Agradecemos também aos revisores e editores pelas sugestões e melhorias no trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Blume, H.P.; Beyer, L.; Kalk, E. & Kuhn, D. Weathering and soil formation, *in* Beyer, L. & Bölter, M. (eds.). *Geoecology of antarctic ice-free coastal landscapes*. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 115-138, 2002.

Bölter, M.; Beyer, L. & Stonehouse, B. Antarctic coastal landscapes: characteristics, ecology and research, *in* Beyer, L. & Bölter, M. (eds.). *Geoecology of antarctic ice-free coastal landscapes*. Berlin: Springer, p. 5-15, 2002.

Cantrill, D.J. Early cretaceous fern foliage from President Head, Snow Island, Antarctica. *Alcheringa an Australas. J. Palaeontol.*, v. 22, n. 3, p. 241-258, 1998.

Embrapa. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed., Rio de Janeiro: Embrapa, 212 p., 1997.

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, p. 194-204, 2011.

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. *Rev. do Dep. Geogr. USP*, volume especial, p. 259-267, 2017. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.132721>.

López-Martínez, J.; Serrano, E.; Schmid, T.; Mink, S. & Lines, C. Periglacial processes and landforms in the South Shetland Islands (northern Antarctic Peninsula region). *Geomorphology*, 155-156, 62-79, 2012.

Michel, R.F.M.; Schaefer, C.E.G.R.; López-Martínez, J.; Simas, F.N.B.; Haus, N.W.; Serrano, E. & Bockheim, J.G. Soils and landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica. *Geomorphology*, v. 225, p. 76-86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.041>.

Moura, P.A.; Francelino, M.R.; Schaefer, C.E.G.R.; Simas, F.N.B. & Mendonça, B.A.F. Distribution and characterization of soils and landform relationships in Byers Peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica. *Geomorphology*, 155-156, 45-54, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.011>.

Nesbitt, H.W. & Young, G.M. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, v. 299, p. 715-717, 1982. <https://doi.org/10.1038/299715a0>.

Nichols, R.L. Coastal geomorphology, McMurdo Sound, Antarctica. *J. Glaciol.*, v. 7, p. 449-478, 1968.

Oliva, M. & Ruiz-Fernández, J. Geomorphological processes and frozen ground conditions in Elephant Point (Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*, 12, xxx-xxx, 2016. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.020>.

Otero, X.L.; De La Peña-Lastra, S.; Pérez-Alberti, A.; Ferreira, T.O. & Huerta-Díaz, M.A. Seabird colonies as important global drivers in the nitrogen and phosphorus cycles. *Nat. Commun.* 9, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02446-8>.

Schaefer, C.E.G.R.; Pereira, T.T.C.; Ker, J.C.; Almeida, I.C.C.; Simas, F.N.B.; Oliveira, F.S.; Correa, G.R. & Vieira, G. Soils and landforms at Hope Bay, Antarctic Peninsula: formation, classification, distribution, and relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 79, p. 175-184, 2015. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.06.0266>.

Simas, F.; Schaefer, C.E.G.R.; Filho, M.R.A.; Francelino, M.R.; Filho, E.I.F. & Costa, L.M. da. Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica. *Geoderma*, v. 144, p. 116-122, 2007.

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 Clay Miner.*, v. 54, p. 721-736, 2006.

Smellie, J.L.; Pankhurst, R.J.; Thomson, M.; Davies, R.E.S. & Thompson, M.R. The geology of the South Shetland Islands. VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution. *Br. Antarct. Surv. Sci. Reports*, p. 265-272, 1984.

Tatur, A.; Myrcha, A. & Niegodysz, J. Formation of abandoned penguin rookery ecosystems in the maritime Antarctic. *Polar Biol.*, v. 17, p. 405-417, 1997.

Vennum, W.R. & Nejedly, J.W. Clay mineralogy of soils developed on weathered igneous rocks, West Antarctica. *New Zeal. J. Geol. Geophys.*, v. 33, p. 579-584, 1990. <https://doi.org/10.1080/00288306.1990.10421376>.

Yeomans, J.C. & Bremner, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, v. 19, p. 1467-1476, 1988.