

**MARTIN MEIER**

**DINÂMICA TERMO-HÍDRICA E DO CARBONO EM SOLOS DA PENÍNSULA  
STANSBURY, ILHA NELSON, ANTÁRTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes-Filho

Coorientador: Márcio Rocha Francelino

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Meier, Martin, 1982-

M511d            Dinâmica termo-hídrica e do carbono em solos da península  
2021            Stansbury, Ilha Nelson, Antártica / Martin Meier. – Viçosa, MG,  
2021.

1 tese eletrônica (179 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.016>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Intemperismo. 2. Solos - Temperatura. 3. Mudanças  
climáticas. I. Filho, Elpídio Inácio Fernandes, 1963-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.  
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.  
III. Título.

CDD 22. ed. 631.43

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto CRB6 2523

**MARTIN MEIER**

**DINÂMICA TERMO-HÍDRICA E DO CARBONO EM SOLOS DA PENÍNSULA  
STANSBURY, ILHA NELSON, ANTÁRTICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de outubro de 2021.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Martin Meier  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
Elpídio Inácio Fernandes-Filho  
Orientador

*Às minhas filhas, luzes da minha vida.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, Bondade Suprema que habita dentro de cada um de nós, seres viventes de tudo que chamamos Universo.

À minha família, em especial minha mãe, Regina Meier, pelo dom da vida, pelo amor incondicional, incentivo paternal e apoio insubstituível.

À minha filha mais velha, Gisela Valente Meier, pelo amor incondicional e pela compreensão das noites e dias em que não pude ser um pai tão presente por estar na luta por um futuro melhor para nossa família.

À minha filha mais nova, Manuela Silva Meier, pelo amor incondicional no singelo olhar de um anjo e sorriso doce e emocionante que nas palavrinhas e gestos sinceros e carinhosos, demonstra o que é a pureza da vida.

À Julia Wanick de Menezes, pelo amor que compartilhamos, no sentimento, no cuidado, nos olhares, gestos e pensamentos. És uma bênção na minha vida: te amo.

Às mães das minhas filhas, que com a compreensão e paciência, superaram tudo e todos para aceitar-me como sou e o que pude fazer até então por nossas filhas.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, que através do Departamento de Solos ofereceu-me a oportunidade de crescer e amadurecer cientificamente com esta pós-graduação maravilhosa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado durante o primeiro ano, sem a qual seria impossível estar aqui.

Ao professor Márcio Rocha Francelino, pela orientação, ensinamentos, amizade e na zelosa vivência no acampamento na Antártica, os quais foram fundamentais neste doutorado.

Ao professor Elpídio Inácio Fernandes Filho, pela orientação, ensinamentos e acolhimento na equipe do Laboratório de Geoprocessamento além do seu apoio na realização desta pesquisa.

Aos professores André Thomazini e Antônio Batista Pereira, pela ciência, pelos ensinamentos, orientações, vivências, pizzas, resenhas *borrachos*, comédias e filosofias de vida.

Aos professores do Departamento de Solos pela contribuição na minha formação acadêmica e científica além dos valiosos ensinamentos durante as disciplinas cursadas. Em especial às professoras Irene Maria Cardoso e Cristine Muggler, pela coragem e determinação em estudar, ensinar e promover a Agroecologia em um ambiente patriarcal e machista.

Aos funcionários do Departamento de Solos, em particular ao Chico do LabGeo, a Carol e Naiam da secretaria da Pós, Luiz (Lula), Cláudio Brustolini, Luiz Fernando, Jorge da Geoquímica, Elton, Carlinhos, Giovanni, Helderson e Rose, e tantos outros que prezam pelo funcionamento do Departamento de Solos.

Aos amigos da pós-graduação, em especial ao Adriano Luis Schünemann, Roberto Michel, Bruno Neri, Mayara Daher, Raiza Moniz, Eliana, Elaine, Lucas Carvalho, Pedro Almeida, Felipe Santana, João Reis, Raphael Wakin, David Gjroup, e Fábio Maia, que cumprimento em nome de todas queridas pessoas da Fundação Jarosita, além de toda equipe do LabGEO e do Terrantar pelas discussões científicas durante o período de trabalho e nas fundamentais horas de descontração no cafezin e encontros fora da Universidade.

Às amigas e amigos da Vilinha pelas conversas inspiradoras e reflexivas sobre academia, cultura, política, música e plano espiritual, especialmente ao Aldemiro Pio meu irmão de alma e à Beth que tanto me apoiaram nessa vida, à vocês, sem palavras!

À Marinha e à Aeronáutica Brasileira por viabilizar a participação do Brasil no contexto Geopolítico mundial, com seu empenho, dedicação e patriotismo ao promover as missões e operações antárticas.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram e incentivaram a realização deste trabalho e que por deslize e não maldade me esqueci de citar. Gratidão !

“Contra o positivismo, que pára  
perante os fenômenos e diz: Há  
apenas fatos, eu digo: Ao contrário,  
fatos é o que não há; há apenas  
interpretações”.

(Nietzsche)

## RESUMO

MEIER, Martin, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2021. **Dinâmica termo-hídrica e do carbono em solos da península Stansbury, Ilha Nelson, Antártica.** Orientador: Elpídio Inácio Fernandes-Filho. Coorientador: Márcio Rocha Francelino.

A Antártica é um dos lugares mais inóspito do planeta Terra, sendo cercado por todos os lados pelo oceano Antártico, que por sua vez conecta os oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. É um continente cujo a importância científica se deve a diversos fatores relacionados à fauna e flora desenvolvida em condições extremas e em especial para a ciência do solo, a Antártica oferece um objeto de pesquisa com relevos e geoambientes que compõem paisagens únicas, com processos singulares para se estudar pedogênese. O objetivo geral do trabalho foi estudar a formação dos solos e sua relação com a paisagem, o permafrost e o padrão do fluxo de CO<sub>2</sub>-C na península Stansbury, Ilha Nelson, pertencente ao Arquipélago das Ilhas Shetlands do Sul. Os resultados mostram que os solos de Stansbury, são predominantemente rasos e pedregosos, com pouca matéria orgânica, pouca cobertura vegetal e o caráter eutrófico relacionada ao material de origem sob intemperismo e lixiviação limitados das rochas vulcânicas, resultando na presença de minerais primários na fração argila. Os solos apresentam uma ação proeminente de intemperismo físico e processos de congelamento e descongelamento, resultando em solos com padrões típicos (Criosolos), sob processos periglaciais ativos. As características do microclima, por exemplo como distância da geleira, manutenção de cobertura de neve, presença de água, vegetação etc., têm grande influência sobre a temperatura do solo, registrados em diferentes regiões de Stansbury, apresentando influência direta da proximidade da geleira Nelson ademais a outros fatores importantes, como a cobertura de neve. A ocorrência das comunidades vegetais na península está intrinsecamente condicionada pela umidade e temperatura, além da influência da visitação e do estabelecimento de animais, principalmente aves. Em Stansbury, a presença desses animais e vegetais influencia no fluxo de carbono dos ecossistemas devido à menor ocorrência (não há grande pinguineiras em Stansbury como em Harmony, por exemplo) do que outras áreas da Antártica Marítima.

Palavras-chave: Intemperismo físico. Temperatura do solo. Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

MEIER, Martin, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2021. **Thermic, hydric and carbon dynamics in soils from the Stansbury Peninsula, Nelson Island, Antarctica.** Adviser: Elpídio Inácio Fernandes-Filho. Co-adviser: Márcio Rocha Francelino.

Antarctica is the most inhospitable continent on planet Earth, being surrounded on all sides by the Antarctic Ocean, which in turn connects the Atlantic, Pacific and Indian oceans. It is a continent whose scientific importance is due to several factors related to the fauna and flora developed under extreme conditions; and specially for soil science, Antarctica offers a research object with reliefs and geoenvironments that make up unique landscapes, with unique processes for studying pedogenesis. This Thesis is presented in 3 chapters in the form of scientific articles, which had the general objective of investigating the formation of soils and landscape, the permafrost and the flux of CO<sub>2</sub>-C in the Stansbury peninsula, Nelson Island, belonging to the Archipelago of South Shetlands Islands, west of the Antarctic peninsula, in the portion called Maritime Antarctica. The results show that Stansbury soils are predominantly shallow and stony, with little organic matter, little vegetation covering and eutrophic character due to the high CTC related to the source material under limited weathering and leaching of volcanic rocks, resulting in the presence of primary minerals in the clay fraction. The soils show a prominent action of physical weathering and freezing and thawing processes (crioturbation), resulting in soils with typical patterns (Cryosols), under active periglacial processes. The characteristics of the microclimate have a great influence on soil temperature, recorded in different regions of Stansbury, showing a direct influence of the proximity of the Nelson Glacier in addition to other important factors, such as snow cover. The occurrence of plant communities on the peninsula is intrinsically conditioned by humidity and temperature, in addition to the influence of visitation and the establishment of animals, especially birds. In Stansbury, the presence of these animals and plants influences the carbon flow of ecosystems and is more restricted than in other areas of Maritime Antarctica, even though pedogenetic processes similar to other ice-free areas occur.

Keywords: Physical weathering. Ground surface temperature. Climate change.

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	12
REFERENCIAL .....	14
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	16
SOILSCAPES AND GEOENVIRONMENTS AT STANSBURY PENINSULA, NELSON ISLAND, MARITIME ANTARCTICA	
ABSTRACT .....	17
RESUMO.....	18
1.INTRODUCTION.....	19
2.MATERIAL AND METHODS .....	20
2.1. Study area.....	20
2.2. Geoenvironments and Soil Classification.....	22
2.3. Physical-chemical characterizations .....	22
2.4. Mineralogical characterization.....	23
2.5. Soil Mapping.....	23
3.RESULTS.....	24
3.1. General landscape characteristics .....	24
3.2. General Soils Characteristics .....	28
3.3. Mineralogical characterization .....	35
3.3.1. Mineral Liberation Analyzer results .....	35
3.3.2. Mineralogy by DRX .....	39
3.4. Soil distribution and classification .....	41
5.CONCLUSIONS.....	47
6.REFERENCES.....	48
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	51
SOIL TEMPERATURE MONITORING IN PARA-PERIGLACIAL AREAS AT STANSBURY PENINSULA, NELSON ISLAND, MARITIME ANTARCTICA	
ABSTRACT .....	52
RESUMO.....	53
1.INTRODUCTION.....	55
2.MATERIAL AND METHODS .....	57
6.3. Study area and monitoring sensors' location .....	57
6.5. Environments and Soil Characterization .....	59

6.6. Physical-chemical characterizations .....	61
6.7. Pedoclimatic Monitoring Sensors .....	61
6.7.1. Temperature and Humidity Monitoring with CALM Sensor .....	63
6.7.2. Temperature Monitoring with Ibuttons Sensors .....	64
6.8. Data Processing .....	65
6.8.1. Descriptive Statistics and Exploratory Analysis .....	65
6.8.2. Permafrost and Active-Layer Monitoring .....	66
7. RESULTS .....	68
7.3. Geospatial and Terrain Analysis .....	68
7.4. Geoenvironments and Soil Characteristics .....	71
7.5. Pedoclimatic Monitoring .....	77
7.6. Comparison of the pedoclimatic behavior registered by the sensors .....	85
7.7. Active-Layer thickness and Permafrost .....	94
8. DISCUSSION .....	95
9. CONCLUSIONS .....	99
10. REFERENCES .....	100
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	103
DINÂMICA DE CARBONO EM DIFERENTES COMUNIDADES VEGETAIS DA PENÍNSULA STANSBURY, ILHA DE NELSON, ANTÁRTICA MARÍTIMA	
RESUMO .....	104
ABSTRACT .....	106
1. INTRODUÇÃO .....	108
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	111
2.1. Localização .....	111
2.2. Reconhecimento das Comunidades Vegetais .....	112
2.3. Análises físicas e químicas .....	113
2.4. Desenho experimental .....	113
2.5. Sensoriamento Remoto .....	115
2.6. Geo-espacialização dos resultados para toda a paisagem .....	117
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	118
3.1. Características da vegetação de Stansbury .....	118
3.2. Características físico-químicas dos solos amostrados .....	124
3.3. Experimento de Fluxo de CO <sub>2</sub> -C do solo .....	129

3.4. Sensoriamento Remoto .....	135
3.5. Aerofotografias.....	136
3.6. Mapeamento das Comunidades Vegetais .....	137
3.7. Fluxo de Carbono pela vegetação em Stansbury .....	138
4.CONCLUSÕES .....	141
5.REFERÊNCIAS.....	142
CONCLUSÃO GERAL .....	146
APÊNDICES:.....	148
Relatório de Campo dos Perfis.....	149
Análise Estatística Exploratória das Análises Físicas e Químicas .....	175
Classificação Detalhada dos Solos e Mapeamento Detalhado .....	176
Mapa Detalhado de Solos .....	179

## INTRODUÇÃO GERAL

A Antártica é um dos lugares mais inóspito do planeta Terra, cercado por todos os lados pelo oceano Antártico, que por sua vez conecta os oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. Trata-se do quinto maior continente do planeta, o mais frio, mais ventoso e mais seco da Terra (Morgan et al., 2007). As baixas e severas temperaturas variam com a latitude, altitude e distância do oceano. O leste da Antártica é mais frio do que o Oeste, devido à diferença altimétrica. A Península Antártica tem o clima mais moderado e as temperaturas mais altas ocorrem em janeiro ao longo da costa e a média é ligeiramente abaixo de zero (BOCKHEIM, 2015; MORGAN ET AL., 2007). As estações do ano caracterizam-se por verões com luz do dia contínua, enquanto os invernos trazem escuridão contínua. A alta pressão atmosférica persistente sobre o interior do continente traz ar seco, o que resulta em pouca cobertura de nuvens, enquanto que na porção peninsular e Marítima, o clima é mais úmido e quente, com eventos de precipitação mais recorrente (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2007).

O continente possui área de aproximadamente 14,2 milhões de km<sup>2</sup>, dos quais existem estimativas de que 285 mil km<sup>2</sup> apenas (2%) são áreas sem cobertura de gelo (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2007). Entretanto, outros estudos estimam aproximadamente 0,35% (SIMAS ET AL., 2008; CAMPBELL AND CLARIDGE 1987; BOCKHEIM, 1997), denominadas áreas livres de gelo, durante o verão austral. Seu perímetro costeiro é de aproximadamente 17968 km e em seu interior possui elevações médias entre 2000 e 4000 m; cordilheiras de até quase 5000 m de elevação; as geleiras formam plataformas de gelo ao longo de cerca de metade da costa, e plataformas de gelo flutuantes constituem 11% da área do continente (CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY, 2007).

Além da importância dos mares circundantes à Antártica (FOGWILL, ET AL., 2020), a discussão chave está diretamente relacionada com a água doce, que por lá, acumula-se no gelo e em lagos glaciares próximos à frentes das geleiras, atribuídos ao seu derretimento e subsequente retração nas últimas décadas (ROSA ET AL., 2021). Observa-se que as temperaturas mais elevadas que a todo momento são registradas nas diferentes sub-regiões nas ilhas Shetland do Sul, e na Península Antártica Oriental e Ocidental (PA) (COMIN E JUSTINO, 2017) estão intrinsecamente

relacionadas com formação de solos, ao expor o material novo à pedogênese e a colonização pelas comunidades vegetais nas superfícies recém-expostas, passam pela formação do solo com o aumento da entrada de C lábil da vegetação, acompanhado pelo aumento das emissões de CO<sub>2</sub>-C do solo, o que tem forte relação com atividade biológica geral, um dos fatores mais ativos na pedogênese (THOMAZINI ET AL., 2015).

O desenvolvimento de pesquisas naquela região garante ao Brasil a condição de Membro Consultivo do Tratado da Antártica, assegurando assim o direito de participar plena e ativamente das decisões sobre o futuro do continente durante as Reuniões Consultivas do Tratado (Antartic Treaty Consultive Meeting - ATCM, na sigla em inglês). O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) atua na gestão científica do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) coordenado pela Marinha do Brasil, no âmbito da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), e é membro do Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR). Como parte deste importante trabalho, desde 2002 o Núcleo Terrantar (ligado ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera), com sede na Universidade Federal de Viçosa (UFV), vem atuando na Antártica em parcerias com diversas instituições e pesquisadores do Brasil e exterior, pesquisando o permafrost, questões climáticas associadas e interfaces entre solo-vegetação-relevo (LOPES et al., 2020).

A Antártica é um continente cujo a importância científica se deve a diversos fatores relacionados à fauna e flora desenvolvida em condições extremas; estudos paleoclimáticos; e para a ciência do solo, a Antártica oferece um ambiente com relevos e solos que compõem paisagens únicas e com processos singulares (LOPES et al., 2020) para se estudar formação de solos (O'NEIL, 2017). O desenvolvimento de novas técnicas, a melhoria de métodos e o uso de equipamentos cada vez mais sofisticados têm contribuído para melhorar a forma de se fazer ciência pela Antártica (FRANCELINO, 2004).

Esta tese de doutorado faz parte das ações do Núcleo Terrantar, que a quase 20 anos desenvolve estudos na Antártica, com ênfase nos processos pedogenéticos únicos que ocorrem naquela região (SCHAEFER et al. 2008; SIMAS et al. 2008; SOUZA et al. 2014; FRANCELINO et al. 2011; PEREIRA et al. 2013; OLIVA & RUIZ-FERNANDES, 2017; FERRARI, 2018). A tese está composta por três capítulos no

formato de artigos científicos, que tiveram o objetivo geral de investigar a formação dos solos e da paisagem, o permafrost e o fluxo de CO<sub>2</sub>-C da vegetação da península Stansbury, Ilha Nelson.

Nesta ilha encontra-se a estrutura destinada a pesquisa mais antiga do Brasil na Antártica, nomeada em homenagem ao primeiro brasileiro a pesquisar por lá que se tem registro: “Abrigo Astrônomo Cruls”. Com esse estudo buscou-se saber se nessa península os processos pedogenéticos, a dinâmica do permafrost e da camada ativa e o fluxo do CO<sub>2</sub> são semelhantes a outros lugares da Antártica já estudados pelo Núcleo Terrantar, e quais as principais diferenças entre ele. Para isso, no primeiro capítulo foi realizado o mapeamento de solos na península de Stansbury e avaliados os processos pedogenéticos que ali ocorrem, identificando-se os geoambientes em escala detalhada, além de investigar atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo e estudar as interações solo-relevo-vegetação.

O segundo capítulo objetivou caracterizar o regime pedoclimático, baseado no monitoramento da temperatura do permafrost e das condições da camada ativa, em um ambiente para-periglacial entre o Glaciar Nelson e o Estreito de Fildes, na península de Stansbury, na Ilha de Nelson. Já no terceiro capítulo, o objetivo foi estimar o balanço entre sequestro e emissão de CO<sub>2</sub> em solos com dois tipos de cobertura vegetal: *Saniona unicata* e *Usnea aurantiaco-atra* na península Stansbury, Ilha Nelson.

## REFERENCIAL

BOCKHEIM, J.G. **Properties and Classification of Cold Desert Soils from Antarctica**. Soil Sci. Soc. Am. J. 1997. 61, 224–231.

CAMPBELL, I.B., CLARIDGE, G.G.C. **Antarctica: soils, weathering processes and environment**. Elsevier. 1987. Amsterdam.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. **The CIA World Factbook**. Book 2008. [S.l.]: Skyhorse Publishing. ISBN 978-1-60239-080-5, 2007. Accessed: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/antarctica/> in October 13<sup>th</sup>, 2021.

COMIN, A. N.; JUSTINO, F. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ Investigação Climatológica na Península Antártica e no Arquipélago das**

**Shetland do Sul Investigation Climatological in Antarctic Peninsula and South Shetland Islands.** 2017. 40(June), 74–81. <https://doi.org/10.11137/2017>

FOGWILL, C. J.; *et al.* **Southern Ocean carbon sink enhanced by sea-ice feedbacks at the Antarctic Cold Reversal.** *Nature Geoscience.* 2020. 13(7), 489–497. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0587-0>

FRANCELINO, M.R. **Geoprocessamento aplicado ao monitoramento ambiental da Antártica Marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal da Península Keller.** 2004. 102f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2004.

LOPES, D.; *et al.* **Estudos geográficos sobre a Antártica: geopolítica, solos, relevo e clima.** *Revista Ponto De Vista.* 2020. 9(1), 2–17. <https://doi.org/10.47328/rpv.v9i1.10237>

MORGAN, F.; *et al.* **Environmental Domains of Antarctica - Version 2.0 Final Report.** November, 89. Landcare Research New Zealand. 2007.

O'NEILL, T. A. **Protection of Antarctic soil environments: A review of the current issues and future challenges for the Environmental Protocol.** *Environmental Science and Policy.* 2017. 76(July), 153–164. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.06.017

PEREIRA, A. B.; PUTZKE, J. **The Brazilian research contribution to knowledge of the plant communities from Antarctic ice free areas.** *Anais Da Academia Brasileira de Ciências.* 2013. 85, 923–935.

SIMAS, F. N. B., *et al.* **Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica.** *Geoderma.* 2008. 144, 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.019>

THOMAZINI, A., *et al.* **CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica.** *Science of the Total Environment.* 2015. 521–522, 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.110>

## **CAPÍTULO 1**

### **SOILSCAPES AND GEOENVIRONMENTS AT STANSBURY PENINSULA, NELSON ISLAND, MARITIME ANTARCTICA.**

## ABSTRACT

Considering that the extreme variation in Antarctica's climate has important effects on soil properties and distribution, characterizing and mapping surface landforms in ice-free areas is strategic. We aimed to evaluate the pedogenetic processes, as well as classify and map the different type of soils at Stansbury peninsula, Nelson Island. In order to stratify the whole environment area of the peninsula, we used the geosystems' approach, identifying the landscape unit of geoenvironment. We mapped geoenvironments and soils, performing physical-chemical and mineralogical characterizations, to fundament our discussion about the soil-landform-vegetation interplay. Our results suggest that compared to other islands in the South Shetlands, the active layer at Stansbury is thin, so that it is more susceptible to climate change, representing a Key monitoring site for climate change studies. The northwestern area of Stansbury peninsula is the preferential area for marine birds, mammals nesting and resting places. Hence, higher values of nutrients are recorded in their soils. The climate condition at ST, with a northwest face towards the Drake Passage, is harsh due to strong northwest polar winds, promoting widespread wind ablation, erosion and contributes to physical weathering, with high prevalence of periglacial processes under wet conditions, typical of this zone of South Shetlands areas, exposed to the Drake. Soils at ST are predominantly skeletal, gravelly, with little organic matter and little fauna activity, poor vegetation cover, and the eutrophic character is due to the limited weathering and leaching of volcanic rocks, resulting in the presence of primary minerals in the clay fraction. Soils display a prominent action of physical weathering and freezing and thawing process, resulting in typical patterned ground (cryoturbation forming Cryosols), under active periglacial processes. The unique proglacial and periglacial geoenvironments of Stansbury are influenced by melting water and widespread snow banks, under wet polar oceanic climate condition. The organic-matter poor ST soils are very contrasting with the other large ice-free areas. This illustrates how the biological factor represent a key aspect in driving soil formation in Maritime Antarctica.

Keywords: Weathering. Cryoturbation. Mineralogy. Mineral Liberation Analyzer.

## RESUMO

Caracterizar e mapear solos e relevo em áreas livres de gelo é estratégico. Nesta investigação objetivou-se classificar e mapear os processos pedogenéticos de solos da Península de Stansbury, Ilha Nelson. Para estratificar toda a área ambiental de Stansbury, mapeou-se geoambientes e solos, realizando caracterizações físico-químicas e mineralógicas, para fundamentar a discussão sobre a interação solo-relevo-vegetação. Os resultados sugerem que, a camada ativa em Stansbury é fina, de modo que é mais suscetível às mudanças climáticas, representando um local de monitoramento chave para estudos de mudanças climáticas. A área noroeste da península de Stansbury é a área preferencial para os locais de nidificação e descanso de pássaros e mamíferos. Assim, valores mais elevados de nutrientes são registrados em seus solos (teores de matéria orgânica entre 88,9 g kg<sup>-1</sup> e 39,9 g kg<sup>-1</sup>). A condição climática em Stansbury, com face noroeste em direção à passagem de Drake, é severa devido aos fortes ventos polares de noroeste, promovendo ablação generalizada do vento, erosão e contribui para intemperismo físico, com alta prevalência de processos periglaciais em condições úmidas, típicas desta zona das áreas Shetlands do Sul, expostas ao Drake. Os solos de Stansbury são predominantemente esqueléticos, pedregosos, com pouca matéria orgânica e pouca atividade faunística, cobertura vegetal pobre, e o caráter eutrófico se deve ao intemperismo e lixiviação limitados das rochas vulcânicas, resultando na presença de minerais primários na fração argila. Os solos apresentam uma ação proeminente de intemperismo físico e processos de congelamento e descongelamento, resultando em solos com padrões típicos (Criolosos), sob processos periglaciais ativos. Os geoambientes proglacial e periglacial únicos de Stansbury são influenciados pelo derretimento da água e bancos de neve generalizados, sob condições de clima oceânico polar úmido. Os solos Stansbury pobres em matéria orgânica são muito contrastantes com as outras grandes áreas livres de gelo, como em Harmony Point na mesma ilha, por exemplo. Isso ilustra como o fator biológico representa um aspecto chave na formação do solo na Antártica Marítima.

Palavras-chave: Intemperismo. Crioturbação. Mineralogia. Analisador de Liberação Mineral.

## 1. INTRODUCTION

Antarctica has about 0,35% of ice-free areas (MINK et al., 2014; BOCKHEIM, 2015), mainly located in the Transantarctic Mountains, at the coastal area of the Antarctic peninsula and in adjacent islands. There is a great climatic contrast between continental and maritime parts, the latter being warmer and wetter (SIMAS et al., 2008). In this condition, several unique pedogenetic processes occur, continuously studied by soil scientists from several countries, especially Brazil (SCHAEFER et al., 2008; SIMAS et al., 2008; SOUZA et al., 2014; FRANCELINO et al., 2011; PEREIRA et al., 2013; OLIVA & RUIZ-FERNANDES, 2017; FERRARI, 2018).

In the South Shetland Islands, located near the Antarctic Peninsula, physical weathering processes occur that restrict chemical weathering (SIMAS et al., 2006; SOUZA et al., 2014), with a predominance of the former (BOCKHEIM, 2015; SIMAS et al., 2008). Among the soil formation factors, there is a greater influence of parent material and climate, whereas other factors are locally very important, such as the bird activity, forming ornithogenic soils (SIMAS et al., 2007; TATUR, 2002; TATUR & MYRCHA, 1984) or specific types of vegetation influencing the formation of Histosols. Geomorphic conditions also influence soil formation in the Maritime Antarctic sector (FRANCELINO et al. 2011).

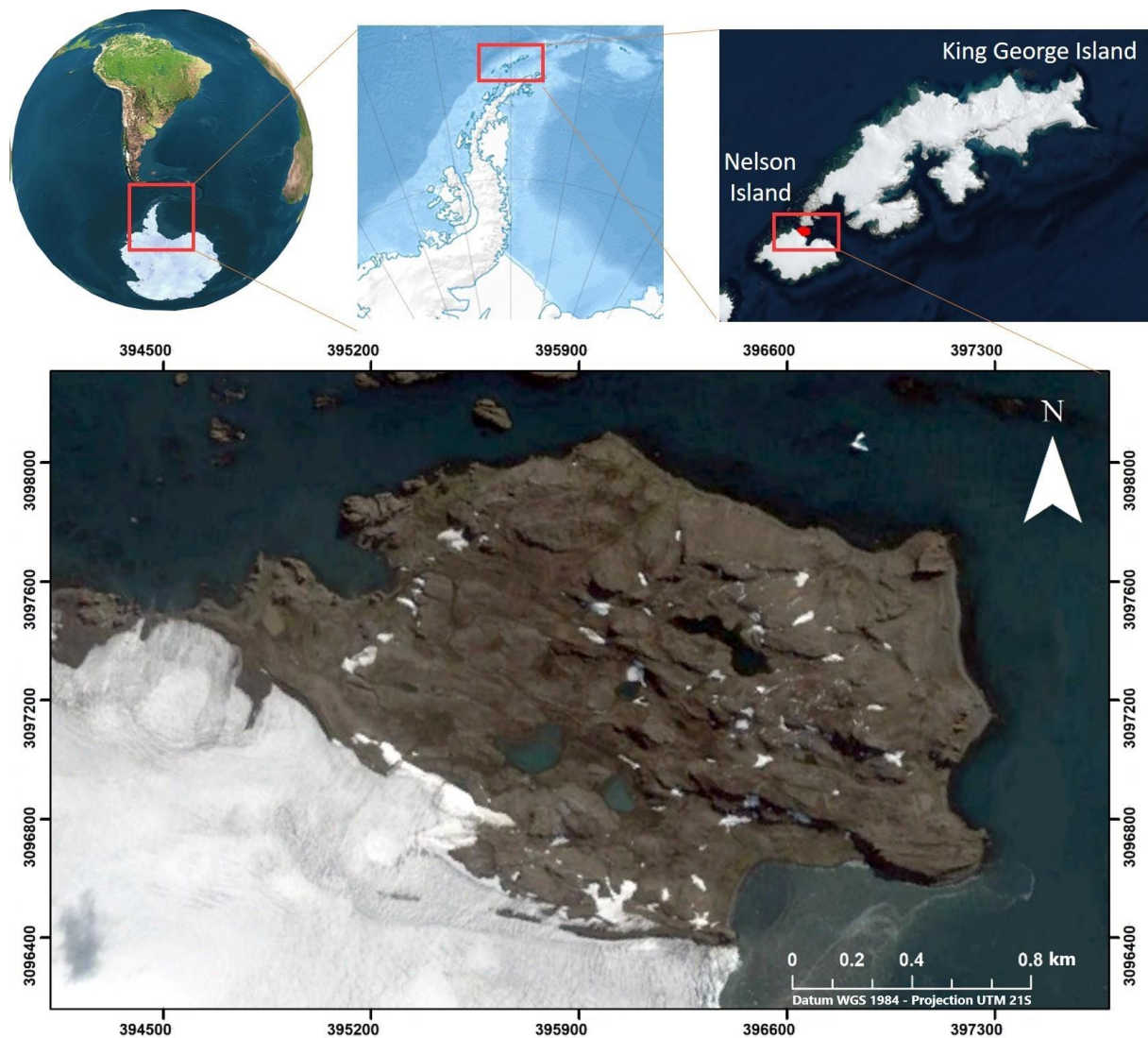
Due to the high sensitivity of Antarctic terrestrial ecosystems to climate change scenarios, soils properties can reveal the effects of the warming process, with a regional increase of 2.7°C in the last 50 years (TURNER et al. 2005), associated to factors related to geomorphic attributes. Considering that the extreme variation in Antarctica's climate has important effects on soil properties and distribution (BOCKHEIM, 2015), characterizing and mapping surface landforms in ice-free areas is strategic (LÓPES-MARTÍNEZ et al., 2016). Thus, this work aimed to evaluate the pedogenetic processes, classify and map soils at Stansbury peninsula, Nelson Island, part of the South Shetlands archipelago. Specifically, we: i) identified geoenvironments at a detailed scale; ii) investigated soil physical, chemical and mineralogical attributes; and iii) discuss the soil-landform-vegetation interplays.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Study area

Nelson Island is one of the largest islands at South Shetlands with a total area of 165 km<sup>2</sup>, with only 5% (8 km<sup>2</sup>) free of ice (RODRIGUES et al. 2020), presenting a domain of periglacial, glacial, fluvial and coastal landscapes, where permafrost is commonly present (LÓPEZ-MARTÍNEZ et al., 2016). The Stansbury peninsula (62°15 S 58°59 W) is located in the northern part of Nelson Island (Figure 1).

Figure 1 – Location map of the Stansbury Peninsula on Nelson Island, part of the South Shetlands Islands archipelago, west of the Antarctic Peninsula.

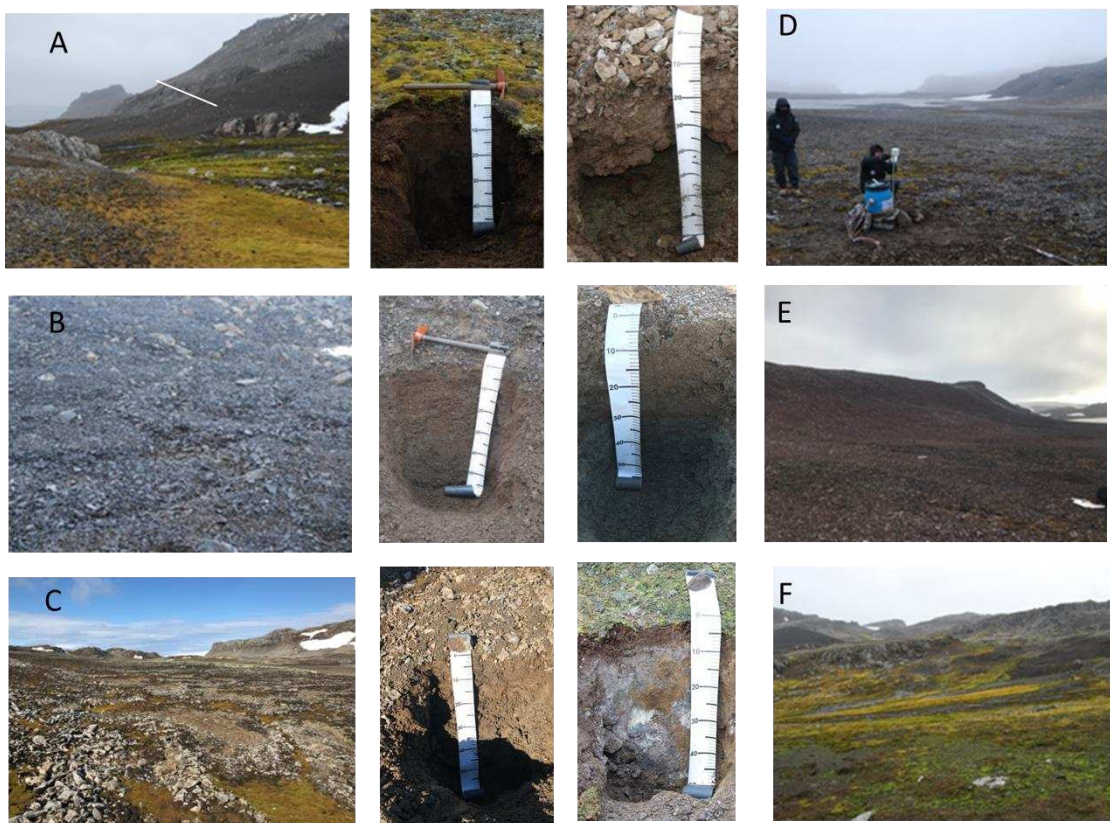


Source: Author

The sub-Antarctic climate classification, according to Köppen, includes strong winds, high weather variability, and relatively mild temperatures varying from average annual air temperature of  $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the average summer air temperature slightly greater than  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (FERRON et al. 2004). Precipitation varies from 350 and 500 mm per year with rainfalls during summer.

Despite recent studies in Nelson Island being performed at Harmony Point (SANTOS, 2016, RODRIGUES et al., 2020; PUTZKE et al., 2020), the Stansbury peninsula, with a 289 ha of ice-free area, remains poorly investigated. The geological composition is mainly by volcanic rocks of olivine-basalts and basaltic andesites, with rare occurrences of pyroxene-andesites and dacites, dated at the beginning of the Cenozoic (Paleocene - Eocene) (SMELIE et al. 1984).

Figure 2 – Soil Profiles distribution in Stansbury, Nelson Island, Maritime Antarctic: Albic Histic Spodzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic) (a), Cambic Cryosol (Fluvic, Novic) (b), Turbic Cryosol (Fluvic) (c), Turbic Skeletal Reductaquic Cryosol (Fluvic) (d), Colluvic Skeletal Regosol (Fluvic, Turbic) (e), Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) (f).



Source: Author

## 2.2. Geoenvironments and Soil Classification

In order to stratify the whole environment area of the Stansbury peninsula, we used the geosystems approach, identifying the landscape unit of geoenvironment, defined as the landscape sector with similar pedological, geological and morphological characteristics related to post-glacial evolution with specific, typical landscape elements.

After performing a systematic observation of geoenvironments, 23 soil profiles were opened, described, and sampled in February 2018 to represent most pedological variations at ice-free areas in Stansbury (Figure 2). For soil sample collections, the recommendations of the Antarctic Soil and Permafrost Group (ANTPAS) were followed (BOCKHEIM et al., 2006). Based on field morphological observations and the results of physical and chemical analyses, the soils were classified according to World Reference Base of Soil (WRB 2014).

## 2.3. Physical-chemical characterizations

The color, gravel content and fine earth (< 2,0 mm), were obtained, determining the soil texture by dispersion in distilled water, sieving and weighing to separate the coarse and fine sand fractions, followed by sedimentation to determine the silt and clay fractions (GEE AND BAUDER, 1986).

The pH was measured in water and KCl and CaCl 1 mol L<sup>-1</sup> solutions, in the proportion 1: 2.5. Exchangeable cations were extracted by KCl mol L<sup>-1</sup> and quantified by atomic absorption spectrometry (Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>) and by titration with NaOH (Al<sup>3+</sup>). Na<sup>+</sup>, extracted with 1.0 mol L<sup>-1</sup> ammonium acetate solution at pH 7.0, was quantified by flame photometry.

Potential acidity (H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>) was extracted with 0.5 mol L<sup>-1</sup> calcium acetate at pH 7.0 and quantified by titration with NaOH. Available P and K<sup>+</sup> exchangeable were extracted by Mehlich, where P was quantified by the ascorbic acid method, as described by Kuo (1996), and K<sup>+</sup> was determined by flame photometry.

Organic matter (OM) content was estimated after the determination of organic C using the Walkley Black method, without heating. Total nitrogen ( $N_{\text{total}}$ ) was estimated using the Kjeldahl method and the remaining phosphorus (P-rem) in calcium chloride.  $0.01 \text{ mol L}^{-1}$  with an initial concentration of  $60 \text{ mg L}^{-1}$  of P determined according to De Filippo & Ribeiro (1997).

#### **2.4. Mineralogical characterization**

Soil aliquots of 270 mesh sieved material were submitted to mineral analysis by Mineral Liberation Analyzer - MLA TECSCAN, from NanoLab (Department of Materials Engineering at the Federal University of Ouro Preto). Using quantitative electronic mineralogy technique (EQM) for the mineralogical characterization by automatic quantification of mineral phases, this technique is based on the quantitative mineralogy to characterize mineral phases by image analysis, aiming at determining and quantifying minerals present in the whole sample (SYLVESTER et al. 2012; SAMPAIO et al., 2018; PIRES et al., 2019).

In addition, minerals present in powdered fine earth fraction (less than 2 mm) were identified by X-ray diffraction (XRD) in the mineralogy laboratory of the Soil Department of Federal University of Viçosa. The interpretations of the X-ray diffractograms followed charts by Chen (1977) and by Downs and Hall-Wallace (2003).

#### **2.5. Soil Mapping**

To improve soil mapping, an aerial photogrammetric survey of the area was carried out using Unmanned Aerial Vehicle (UAV), model Phantom 4 Pro. Eleven flight plans were elaborated, in order to cover the entire study area, using DroneDeploy software. In total, 1,570 aerial photos were obtained, which made it possible to generate Orto-rectified mosaics, using Agisoft Photoscan software, with a spatial resolution of 4 cm. This resolution made it possible to generate thematic maps at the scale of 1: 2500. A digital elevation model (DEM) with a final resolution of 10 cm was also generated. Forty-eight control points were collected using a dual-frequency GNSS

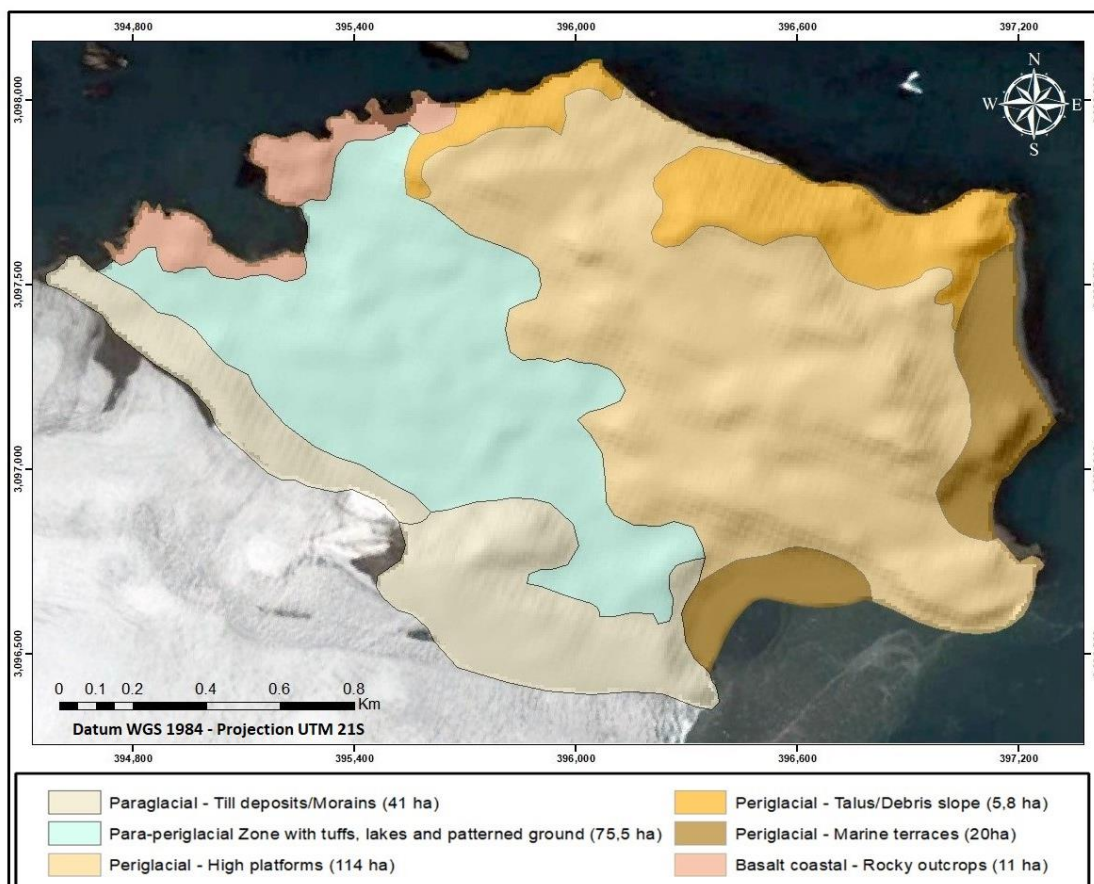
receiver (L1 and L2). With all the topographic information obtained, Geoenvironmental and Soil Survey maps of the Stansbury peninsula were prepared.

### 3. RESULTS

#### 3.1. General landscape characteristics

Stansbury Peninsula was divided into basic geosystems: (1) Paraglacial, (2) transitional Para-periglacial and (3) Periglacial, shown in Figure 3. Recent events of volcanism, talus presence were also mapped.

Figure 3 – Delimitation and sizes in hectares of geoenvironments in Stansbury Peninsula, Nelson Island.



Source: Author

The DEM elaborated showed the altimetry at a detailed scale up to 126 meters at the highest peak (“Paschal Mount”). The geoenvironments were mapped, where the

largest unit consists of periglacial characteristics. The total area of the peninsula is precisely 298 hectares, obtained as a result of the aerophotogrametry survey performed using UAV and the orthomosaic confection using AgiSoft software.

The paraglacial geosystem is encompassed by the pro-glacial lakes occupying a narrow fringe at the NO-SE direction, with a total area of 41 ha (14% of the peninsula). This moraine and associated tills have an average height of 40 m interrupted by rocky outcrops that anchorates the moraines at the southeastern section.

Figure 4 – The paraglacial landscape (Moraine/Tills) of Stansbury Peninsula.



Source: Author.

In this paraglacial zone, only one soil profile was opened (RP15) classified as Turbic Cryosols (Skeletal, Novic), extending over 30% of the area; Regosols and Leptsols, all with Skeletal qualifiers, also occur.

The Para-periglacial environment on volcanic tuffs with flat relief and patterned ground soils occupies 25% of the peninsula, downstream from the proglacial fringe (Figure 5). It represents a transitional area, with mixed features of both environments, a dense network of melting channels and proglacial lakes, covered by scattered moss fields, lakes and fluvio-glacial deposits, where Fluvisols are formed.

Figure 5 – Para-periglacial transitional landscape on the Stansbury peninsula.



Source: Author.

Under strong wind-ablation, a Late Holocene coarse-siege drift surface has a mean slope of 5 %, constituting the last glacier advance, at the foreland. There, patterned-ground soils, occur at 20 % of the area. They are closely associated with the presence of discontinuous permafrost, suggesting a periglacial environment. Felsenmeers and rocky outcrops also occur in resistant, eroded, volcanic stacks and plugs.

Due to the joint occurrence of peri and paraglacial phenomena and features, it is difficult to distinguish one from the other even on a detailed scale. In this

environment, six profiles were opened (RP10, RP13, RP14, RP16, RP17 AND RP18), four classified as Turbic Cryosols, and two Fluvisols (11%), and minor Regosols and Leptosols are also found.

Figure 6 – Para-periglacial transitional landscape on the Stansbury peninsula.



Source: Author.

Periglacial Environment corresponds to the highest areas and occupies 160.6 ha, corresponding to 55% of the peninsula. It was divided into three subunits: i) *Periglacial high plateau*: the largest subunit, with 146.5 ha, reaching the highest elevations (> 100 m) on basalts, with Regosols (26% of the area), followed by Cryosols (16%) and Leptosols (14%), all very shallow and rocky (skeletal); ii) *Periglacial Coastal Talus slopes*: sloping areas with talus deposits down to sea water, where marine birds are found, on well-developed Leptic Cambisols with ornithogenic classifying characteristics (Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic) - P22 and Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) - P23) ; and iii) *Periglacial marine terrace*: the marine terraces on

Nelson Island lack animals, and soils are coarse-grained, pebbly and very shallow, without permafrost.

Finally, the Basalt Coastal outcrops are landforms of volcanic origin forming stacks of resistant intrusive bodies (micrograbbs) or dykes of basaltic lavas, which are resistant to the stormy condition of the marine erosion (Figure 6).

### 3.2. General Soils Characteristics

The main physical properties of the soils are shown in Table 1, for each profile with classification, parent material, altitude, soil horizons depth, color, particle density (PD), and textural fractions (gravel, coarse and fine sand, silt and clay). Most soils have a dominance of coarse material, large gravel content and skeletal character (WRB, 2014).

Table 1 – Physical characteristics of soils in Stansbury peninsula, Nelson Island.

Parental Material	Horizon	Depth (cm)	Soil Color	C FS Silt Clay				DP	Gravel %	Textural Class
				%						
<b>60 m</b>	<b>P1 – Skeletic Leptosol (Ornithic, Colluvic, Fluvic)</b>									
Andesite	A	0-10	7,5YR 4/2	39	23	18	20	2,56	17	Sandy Loam
	Bi	10-25	7,5YR 4/2	40	25	16	19	2,33	40	Loam
	BC	25-32	2,5Y 5/4	26	23	31	20	2,47	57	Sandy Loam
	C	32-50	2,5Y 6/4	25	13	35	28	2,44	58	Sandy loam
<b>73 m</b>	<b>P2 – Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic)</b>									
Basalt with volcanic Tuffs	A	0-5	10YR 4/1	83	4	4	9	2,50	34	Loamy sand
	C1	5-35	2,5Y 4/1	65	15	9	1	2,53	63	Sandy loam
	C2	35-55+	2,5Y 4/2	70	9	10	11	2,50	58	Sandy loam
<b>94 m</b>	<b>P3 – Cambic Cryosol (Fluvic, Novic)</b>									
Basalt with Volcanic Tuffs	C1	0-30	2,5 Y 4/3	42	14	29	14	2,50	44	Sandy loam
	C2	30-60+	10 YR 4/6	42	14	28	15	2,47	37	Sandy loam
<b>76 m</b>	<b>P4 – Gelistagnic Cambisol (Oxyaquic, Skeletic)</b>									
Basalt	A	0-10	10 YR 4/3	42	22	21	15	2,47	34	Sandy loam
	B1	10-35	7,5 YR 4/3	31	23	30	16	2,38	40	Sandy loam
	B2	35-50+	10 YR 4/3	32	23	30	15	2,44	49	Sandy loam

<b>45 m</b>	<b>P5 – Albic Histic Spodosol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic)</b>									
	A	0-5	7,5YR 3/4	43	24	17	16	2,38	13	Sandy loam
	E	5-10	10YR 4/3	50	22	14	14	2,47	15	Sandy loam
Basalt	Fribic	10-13								
	Bh	13-22	10YR 3/2	47	17	17	19	2,38	32	Sandy loam
	B	22-35	7,5YR 3/3	40	19	29	13	2,35	31	Sandy loam
	BC	35-50+	2,5Y 4/4	41	22	17	20	2,44	32	Sandy loam
<b>22 m</b>	<b>P6 – Lithic Histic Skeletic Leptosol (Ornithic)</b>									
Fragmented Basalt	A1	0-10	10YR 4/2	52	15	14	19	2,41	52	Sandy loam
	A2	10-50+	7,5YR 4/3	48	22	17	13	2,38	35	Sandy loam
<b>83 m</b>	<b>P7 – Colluvic Regosol (Ornithic, Fluvic)</b>									
	A	0-5	2,5Y 4/1	23	12	48	17	2,44	58	Loam
Volcanic Sediments	C1	45-78	2,5Y 4/1	23	13	45	18	2,53	42	Loam
	C2	25-33	5Y 4/1	19	23	43	15	2,53	36	Loam
	C3	33-43	2,5Y 4/2	31	15	36	18	2,56	58	Loam
	C4	43-55+	5Y 5/1	16	25	43	15	2,41	32	Loam
<b>99 m</b>	<b>P8 – Turbic Cryosol (Arenic)</b>									
Volcanic Tuffs	C1	0-15	2,5 Y 5/3	43	12	26	19	2,47	42	Sandy loam
	C2	15-40	10 YR 5/3	42	17	23	18	2,67	30	Sandy loam
	C3	40+	2,5 Y 5/3	36	14	28	21	2,47	43	Loam
<b>101 m</b>	<b>P9 – Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic)</b>									
	A	0-10	10 YR 4/2	63	20	10	7	2,64	16	Loamy sand
Volcanic Tuffs	C1	10-30	10 YR 4/2	74	74	9	8	2,74	46	Loamy sand
	C2	30-40+	10 YR 4/3	76	7	9	8	2,78	29	Loamy sand
<b>51 m</b>	<b>P10 – Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)</b>									
	C1	0-25	10 YR 4/2	27	18	39	16	2,59	76	Loam
Andesite	C2	25-90+	10 YR 5/2	32	16	31	21	2,32	69	Loam
<b>45 m</b>	<b>P11 – Leptic Cambisol (Colluvic)</b>									
	A	0-10	2,5 Y 4/1	57	17	12	14	2,53	50	Sandy loam
Basalt	AB	10-20	2,5 Y 4/2	56	16	15	13	2,60	37	Sandy loam
	B	20-30	2,5 Y 4/2	59	13	15	13	2,50	48	Sandy loam
	Cr	30-50+	2,5 Y 4/2	70	8	10	12	2,47	50	Sandy loam
<b>79 m</b>	<b>P12 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>									
	A	0-5	2,5 Y 4/3	56	10	20	14	2,53	42	Sandy loam
Basalt and Andesite	C1	5-20	10 YR 4/3	48	19	20	13	2,53	20	Sandy loam
	C2	20-45	10 YR 5/3	53	19	16	12	2,56	16	Sandy loam
	C3	45-50+	2,5 Y 4/3	51	20	18	12	2,53	22	Sandy loam
<b>47 m</b>	<b>P13 – Skeletic Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic)</b>									
	A	0-10	2,5 Y 4/3	47	19	15	19	2,53	35	Sandy loam
Basalt	C1	10-20	10 YR 4/2	49	14	16	21	2,47	40	Sandy clay-loam

	C2	20-40+	2,5 Y/R 4/2	60	10	11	19	2,44	42	Sandy loam
<b>61 m</b>	<b>P14 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>									
	C1	0-10	10YR 4/2	37	13	27	23	2,44	67	Sandy Claim Loam
Volcanic Tuffs	C2	10-20	2,5YR 4/4	40	12	25	23	2,41	50	Sandy Claim Loam
	C3	20-45	10 YR 4/2	38	12	27	23	2,41	42	Sandy Claim Loam
	C4	45-60+		36	16	23	25	2,41	54	Sandy Claim Loam
<b>68 m</b>	<b>P15 – Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)</b>									
	C1	0-15	2,5 YR 4/2	41	19	20	20	2,50	53	Sandy loam
Andesite, Tuffs and basalt	C2	15-28	2,5 YR 4/2	36	16	24	24	2,50	66	Sandy Claim Loam
	C3	28-45+	5 Y 4/1	33	15	28	24	2,47	72	Sandy Claim Loam
<b>38 m</b>	<b>P16 – Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)</b>									
	A	0-10	2,5 YR 5/4	26	11	38	25	2,44	45	Loam
	C1	10-20	2,5 YR 5/4	33	3	34	29	2,50	63	Clay-loam
Andesite	C2	20-40	10 YR 5/3	42	17	20	21	2,53	65	Sandy clay-loam
	Cr	40-70+								
<b>42 m</b>	<b>P17 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>									
	A	0-5	2,5 Y 5/4	34	9	36	21	2,63	61	Loam
Volcanic Tuffs and Basalt	C1	5-20	2,5 Y 5/3	28	16	36	20	2,50	51	Loam
	C2	20-35	2,5 Y 5/3	25	14	44	17	2,50	50	Loam
	C3	35-60+	5 Y 5/3	26	16	40	18	2,50	33	Loam
<b>34 m</b>	<b>P18 – Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)</b>									
	C1	0-20	10 YR 4/2	38	19	26	17	2,53	46	Sandy loam
Basalt	C2	20-35	10 YR 4/2	32	29	19	20	2,50	37	Sandy loam
	C3	35-55+	10 YR 4/3	40	12	27	21	2,47	33	Sandy clay-loam
<b>14 m</b>	<b>P19 – Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)</b>									
	A	0-5	10 YR 4/2	43	24	18	15	2,63	2	Sandy loam
Non-consolidated Sediments	C1	5-10	10 YR 3/2	70	18	4	8	2,70	3	Loamy sand
	C2	10-18	10 YR 4/1	34	49	6	11	2,60	2	Loamy sand
	C3	18-25	10 YR 4/2	71	13	6	10	2,67	18	Loamy sand
	C4	25-45+	10 YR 3/2	77	7	5	11	2,63	48	Loamy sand
<b>13 m</b>	<b>P20 – Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)</b>									
	A	0-20	10 YR 4/2	36	25	29	10	2,53	50	Sandy loam
Basalt	AC	20-35	10 YR 3/4	40	20	28	12	2,60	51	Sandy loam
	Cr	35-50+								
<b>3 m</b>	<b>P21 – Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic)</b>									
Basalt	A1	0-12	5 YR 3/2	58	10	16	16	2,38	16	Sandy loam

	A2	12-22	10 YR 4/2	52	10	27	11	2,53	16	Sandy loam
	AC	22-35	10 YR 3/2	72	9	8	11	2,63	31	Sandy loam
	C	35- 45+								
<b>7 m</b>	<b>P22 – Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic)</b>									
	Ahistic	0-10	7,5 YR 4/2	66	10	9	15	2,53	48	Sandy loam
	2B	10-22	10 YR 4/1	71	7	10	12	2,63	29	Sandy loam
Basalt	Afraco	22-40	10 YR 4/3	62	10	15	13	2,70	28	Sandy loam
	B	40- 60+	10 YR 4/2	54	16	18	12	2,67	32	Sandy loam
<b>21 m</b>	<b>P23 – Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic)</b>									
	A	0-5	7,5 YR 4/3	50	18	17	15	2,61	46	Sandy loam
	B1	5-20	10 YR 4/3	35	89	34	22	2,46	25	Loam
Basalt	B2	20-35	10 YR 4/2	18	10	53	20	2,33	59	Silt-loam
	B3	35-45	10 YR 4/2	19	13	51	17	2,30	48	Silt-loam

Soils are predominantly shallow, reaching a maximum depth of 90 cm, at a Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic) (P10 at 51 m altitude). The lowest depth was nearby 40 cm in three profiles: P8 - Turbic Cryosol (Arenic), P9 - Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic) and P13 - Skeletic Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic), respectively at 99, 101 and 47 meters' altitude. The textural class was mostly Sandy loam, with a maximum clay content of 28 %, and an average of 16 %.

The chemical characteristics (Table 2) suggest an incipient process of soil formation, a general eutrophic character and high bases saturation. The range of values for the CEC was 62,33  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$  in a deep (60+ cm) Turbic Cryosol (Fluvic) (P14 at 35 m altitude) to 15,6  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$  at the same depth (55 to 60+ cm) in a Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic) (P2 at 73 m altitude). Soils have a pH generally higher than 6 (except P5 - Albic Histic Spodzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic) with pH between 4.96 and 5.08, and P23 - Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic), ranging 4.77 and 5.81 in the B horizon).

The bioavailable phosphorus (P) reached 537  $\text{mg dm}^{-3}$  in P23 - Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) at the surface A of a top hill location adjacent to Petrel nests. It represents an old petrel nesting area with evidence of bioturbation by birds in the entire profile, and an abrupt change between A and B horizons. One soil had exceptionally high K values (P15 - Turbic Cryosol (Skeletic, Novic) of 323  $\text{mg}.\text{dm}^{-3}$ , and is located at the top of the moraine (68 m altitude) adjacent to Nelson glacier,

under the influence of melting waters. On the other hand, the Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic) (P2 at 73 m altitude) shows the lowest K content with  $24 \text{ mg.dm}^{-3}$ .

Calcium and Magnesium show maximum values of  $43.9 \text{ cmolc.dm}^{-3}$  to a Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic) (P18 at 34 m altitude) and  $26.4 \text{ cmolc.dm}^{-3}$  in the Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) (P23 at 21 m altitude), respectively. The lowest values of these nutrients were observed in the superficial horizon A of the latter soil ( $2.23 \text{ mg.dm}^{-3}$  and  $1.89 \text{ mg.dm}^{-3}$ , respectively). The abrupt increase of CEC (Ca, Mg, Na) below 20 cm depth in soil P23 - Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic), illustrates the solute-saturated water table. The organic matter contents ranged 8.89 to  $0.13 \text{ dag.kg}^{-1}$ , with the highest values of 8.89 and  $7.24 \text{ dag.kg}^{-1}$  in the two surface horizons of the P5 - Albic Histic Podzol soil (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic), higher than the Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) (P23) which registered  $3.99 \text{ dag.kg}^{-1}$  on horizon A.

The remaining phosphorus values (P-rem) were higher than  $18.1 \text{ mg dm}^{-3}$  for all soils. P5 - Albic Histic Podzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic), showed lowest values of P-rem, indicating greater contribution of amorphous materials in the clay fraction, enhancing the P adsorption capacity lowering the P-rem. The exchangeable  $\text{Al}^{3+}$  range from 1.17 to  $33.3 \text{ cmolc dm}^{-3}$ ., suggesting the hydrolysis of Al polymers and amorphous Al-forms.

Table 2 – Chemical characteristics of the Soils in Stansbury peninsula, Nelson Island (Some horizons are not shown to avoid repetitions).

Horizon	Depth cm	pH	pKCl	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	BS	t	T	V	m	ISNa	MO	Ntotal	P-rem
				mg/dm <sup>3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>						%	Dagkg		mg/L			
<b>P1 – Skeletic Leptosol (Ornithic, Colluvic, Fluvic)</b>																			
A	0-10	5,85	4,58	113,6	180	279	8,63	8,75	0	5	19,05	19,05	24,05	79,2	0	5,04	3,29	0,172	26,1
Bi	10-25	6,84	5,08	89,1	171	282	10,11	8,54	0	3,5	20,31	20,31	23,81	85,3	0	5,15	3,56	0,166	24,7
<b>P2 – Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic)</b>																			
A	0-5	7,91	5,49	27,4	82	430	8,27	3,66	0	1,1	14,01	14,01	15,11	92,7	0	12,37	0,53	0,030	42,3
C2	35-55+	7,66	5,28	39,9	24	436	10,05	3,59	0	0,8	15,6	15,6	16,4	95,1	0	11,56	0,26	0,009	39,7
<b>P3 – Cambic Cryosol (Fluvic, Novic)</b>																			
C1	0-30	7,38	4,63	19,8	193	273	19,24	13,49	0	1,3	34,41	34,41	35,71	96,4	0	3,32	0,53	0,026	31,2
C2	30-60+	7,66	5,17	30,6	242	309	22,33	14,37	0	0,6	38,66	38,66	39,26	98,5	0	3,42	0,53	0,019	37
<b>P4 – Gelistagnic Cambisol (Oxyaquic, Skeletic)</b>																			
A	0-10	6,6	4,63	83,2	151	242	17,51	8,66	0	3,1	27,61	27,61	30,71	89,9	0	3,43	1,71	0,100	34,8
B2	35-50+	6,95	4,5	61,6	134	243	23,88	8,17	0	2,9	33,45	33,45	36,35	92	0	2,91	2,24	0,117	39
<b>P5 – Albic Histic Spodosol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic)</b>																			
A	0-5	4,96	3,45	213,5	147	183	6,43	6,02	13,66	22,2	13,62	27,28	35,82	38	50,1	2,22	8,89	0,376	13,1
E	5-10	5	3,3	373,9	124	146	5,26	3,97	13,85	24,6	10,18	24,03	34,78	29,3	57,6	1,83	4,21	0,201	16,4
B	22-35	5,02	3,5	153,2	78	143	4,35	2,03	9,66	21,7	7,2	16,86	28,9	24,9	57,3	2,15	5,79	0,261	10
<b>P6 – Lithic histic Skeletic Leptosol (Ornithic)</b>																			
A1	0-10	5,39	3,99	264	124	247	10,74	8,26	0,98	10,1	20,39	21,37	30,49	66,9	4,6	3,52	6,32	0,326	21,9
A2	10-30	6,73	4,91	318	183	255	21,91	10,55	0	4,7	34,04	34,04	38,74	87,9	0	2,86	1,71	0,094	27,9
<b>P7 – Colluvic Regosol (Ornithic, Fluvic)</b>																			
A	0-5	6,32	4,5	233,7	152	301	17,64	12,97	0	2,3	32,31	32,31	34,61	93,4	0	3,78	1,32	0,090	38,5
C4	43-55+	7,68	5,14	514,9	119	222	29,35	16,94	0	0,8	47,56	47,56	48,36	98,3	0	2	0,26	0,008	48,1
<b>P8 – Turbic Cryosol (Arenic)</b>																			
C1	0-15	7,15	4,82	23,1	193	316	21,14	9,84	0	1,6	32,85	32,85	34,45	95,4	0	3,99	0,79	0,041	36
C2	15-40	7,76	5,52	32,7	230	319	21,72	8,8	0	0,8	32,5	32,5	33,3	97,6	0	4,17	0,92	0,045	37,2
<b>P9 – Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic)</b>																			
A	0-10	6,55	2,59	228,7	104	228,7	15,39	6,44	0,2	1,8	23,09	23,28	24,89	92,8	0,8	4,0	0,27	0,018	33,2
C2	30-40+	7,20	5,24	34,4	82	260,75	18,36	5,25	0	0,6	24,95	24,95	25,55	97,7	0	4,44	0,53	0,014	40,1
<b>P10 – Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)</b>																			
C1	0-25	7,25	5,05	29,3	184	244,7	22,93	13,32	0	1,4	37,79	37,79	39,19	96,4	0	2,72	1,06	0,048	26,6
C2	25-90+	7,91	3,97	98,3	166	316,83	33,09	14,59	0,19	0,5	49,48	49,67	49,98	99	0,4	2,76	0,27	0,002	44,2
<b>P11 – Leptic Cambisol (Colluvic)</b>																			
A	0-10	7,41	5,96	28,1	100	149	26,12	5,09	0	0,3	32,11	32,11	32,41	99,1	0	2	0,79	0,043	39,2

Horizon	Depth	pH	pKCl	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	BS	t	T	V	m	ISNa	MO	Ntotal	P-rem
B	20-30	7,93	6,37	26,9	90	137	30,16	4,85	0	0	35,84	35,84	35,84	100	0	1,66	0,53	0,025	43
<b>P12 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>																			
A	0-5	6,95	4,92	26,9	116	210	21,58	8,66	0	1,4	31,45	31,45	32,85	95,7	0	2,78	0,53	0,021	36,7
C2	20-45	7,97	5,97	18,4	117	214	28,13	7,51	0	0,2	36,87	36,87	37,07	99,5	0	2,51	0,53	0,025	38,6
<b>P13 – Skeletic Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic)</b>																			
A	0-10	7,24	4,85	62,7	110	320	39,52	16,31	0	1,1	57,5	57,5	58,6	98,1	0	2,37	1,32	0,010	43,9
C2	20-40+	7,37	4,73	65,9	121	329	35,68	11,44	0	1	48,86	48,86	49,86	98	0	2,87	0,66	0,004	42,3
<b>P14 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>																			
C1	0-10	7,08	4,07	18,4	208	392	23,9	18,87	0,2	1,9	45,01	45,21	46,91	95,9	0,4	3,63	0,26	0,015	33,8
C4	45-60+	8,25	5,1	43,4	144	351	42,89	17,34	0	0,2	62,13	62,13	62,33	99,7	0	2,45	0,13	0,001	41,2
<b>P15 – Turbic Cryosol (Skeletic, Novic)</b>																			
C1	0-15	7,94	5,35	129,3	249	561	25,61	8,08	0	0	36,77	36,77	36,77	100	0	6,63	0,26	0,002	45,9
C3	28-45+	8,91	6,16	107,5	315	781	29,1	8,31	0	0	41,61	41,61	41,61	100	0	8,16	0,26	0,001	42,9
<b>P16 – Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)</b>																			
A	0-10	7,4	4,54	52,4	270	517	19,23	15,21	0	2,1	37,38	37,38	39,48	94,7	0	5,69	0,79	0,042	23,2
C2	20-40	7,62	5,19	36	228	715	16,79	11,02	0	1,8	31,5	31,5	33,3	94,6	0	9,34	0,92	0,048	27,2
<b>P17 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>																			
A	0-5	6,59	4,24	40,3	238	365	15,6	10,54	0,2	3,1	28,34	28,54	31,44	90,1	0,7	5,05	0,92	0,053	28,4
C3	35-60+	7,7	5,18	48,7	271	304	19,5	10,92	0	0,8	32,44	32,44	33,24	97,6	0	3,98	0,53	0,025	38,7
<b>P18 – Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)</b>																			
C1	0-20	7,12	5,35	106,7	115	199	31,91	9,38	0	0,3	42,45	42,45	42,75	99,3	0	2,02	0,26	0,016	39,4
C3	35-55+	8,62	6,55	102,6	114	140	43,86	10,38	0	0	55,14	55,14	55,14	100	0	1,1	0,13	0,001	47,1
<b>P19 – Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)</b>																			
A	0-5	6,48	4,25	45,9	188	323	15,14	9	0,2	2,6	26,03	26,23	28,63	90,9	0,8	4,91	1,19	0,065	39,5
C1	5-12	6,26	3,83	47,6	192	361	11,32	6,39	0,49	1,9	19,77	20,26	21,67	91,2	2,4	7,24	0,26	0,017	44,8
<b>P20 – Lithic Skeletic Leptosol (Ornithic, Novic)</b>																			
A	0-20	6,25	4,17	78,3	174	196,66	19,81	11,72	0,19	3,5	32,83	33,02	36,33	90,4	0,6	2,35	0,8	0,048	34,9
AC	20-35	6,95	4,77	45,5	138	192,66	20,42	11,88	0	1,6	33,49	33,49	35,09	95,4	0	2,39	0,53	0,038	32,9
<b>P21 – Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic)</b>																			
A1	0-12	6,22	5	64,8	248	473	20,2	9,28	0	2,6	32,17	32,17	34,77	92,5	0	5,91	4,61	0,253	42,3
AC	22-35	7,24	5,05	62,6	241	478	19,6	7,89	0	1,6	30,19	30,19	31,79	95	0	6,54	0,99	0,058	44,6
<b>P22 – Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic)</b>																			
A	0-10	5,5	3,67	83,2	154	266	6	5,08	3,02	8,7	12,63	15,65	21,33	59,2	19,3	5,42	2,63	0,158	31,4
B	40-60+	7,51	5,1	138,1	217	300	13,98	10,48	0	1,4	26,32	26,32	27,72	94,9	0	4,71	0,33	0,017	45,4
<b>P23 – Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic)</b>																			
A	0-5	4,77	3,23	536,7	150	144,4	2,23	1,89	24,3	38,2	5,13	29,36	43,33	11,8	82,5	1,45	3,99	0,271	21,9
B3	35-45	6,12	3,69	44,6	277	308,82	20,11	25,20	1,17	3,1	47,36	48,53	50,46	93,9	2,4	2,66	0,27	0,009	30,8

### 3.3. Mineralogical characterization

#### 3.3.1. Mineral Liberation Analyzer results

It was focused the mineralogical studies of the total soils from Stansbury Peninsula on three contrasting soils: P10 - Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvisol), P18 - Colluvic Skeletic Regosol (Fluvisol, Turbic) and P23 - Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic). Results of mineralogical phases are shown in Table 3.

Table 3 – The relative contribution of mineralogical phases of three selected soils and horizons (P10, P18 and P23).

Mineralogical Phases	P10_C1	P10_C2	P18_C1	P18_C3	P23_B1	P23_B3
	%					
Not-identified aluminosilicates	34.36	44.73	32.85	40.02	48.55	42.57
Quartz	8.17	19.07	22.10	13.79	10.23	9.63
Plagioclase	10.61	3.92	8.65	6.04	18.53	18.04
Dolomite	15.09	10.76	6.21	11.24	7.96	5.2
Andesine	5.86	6.23	8.08	4.61	4.09	8.59
Other Silicates	8.72	3.63	2.27	2.35	2.1	3.12
Anorthoclase	4.3	3.16	8.65	3.46	0.46	1.71
Hematite/Magnetite	1.38	0.8	2.02	2.76	2.44	2.56
Garnet - Pyrope	0.65	0.02	0.98	2.11	1.86	1.53
Albite	1.26	0.31	2.48	1.27	0.1	0.25
Calcite	0.01	0.01	0.01	3.87	0.01	0
Augite	1.54	0.85	0.35	0.02	0.03	0.02
Minor elements	-	-	-	-	-	< 1%
Not Identified	6.82	6.19	4.67	7.71	3.01	4.93
<b>Total (%)</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Unidentified aluminosilicates (32 to 49%) were the predominant form in all soil soils analyzed, followed by quartz, plagioclases, dolomite and andesine. These aluminosilicates were not identified through MLA due to a lack of mineralogical database for poorly developed soils, such as those found in Antarctica, in the NanoLab database (REDEMAT / UFOP). The mineral phases in the three soils were similar with the substantial presence of dolomite, plagioclase and quartz. Primary Fe-oxides (Hematite/magnetite) showed similar amounts with quartz in all samples.

Figure 7a – Different minerals are present in the primary mineralogical phases of P10 - Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic), in Stansbury peninsula, Nelson Island.

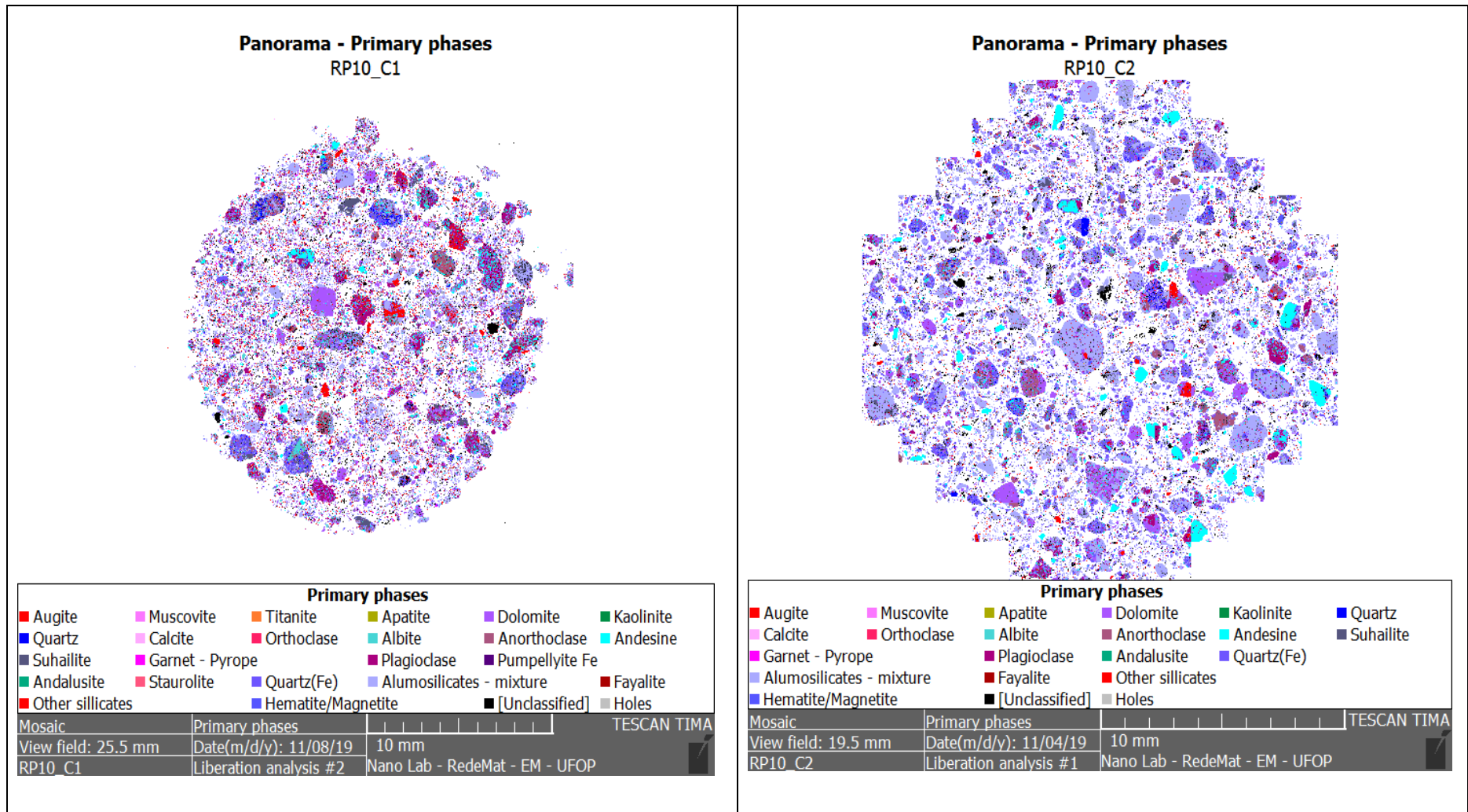
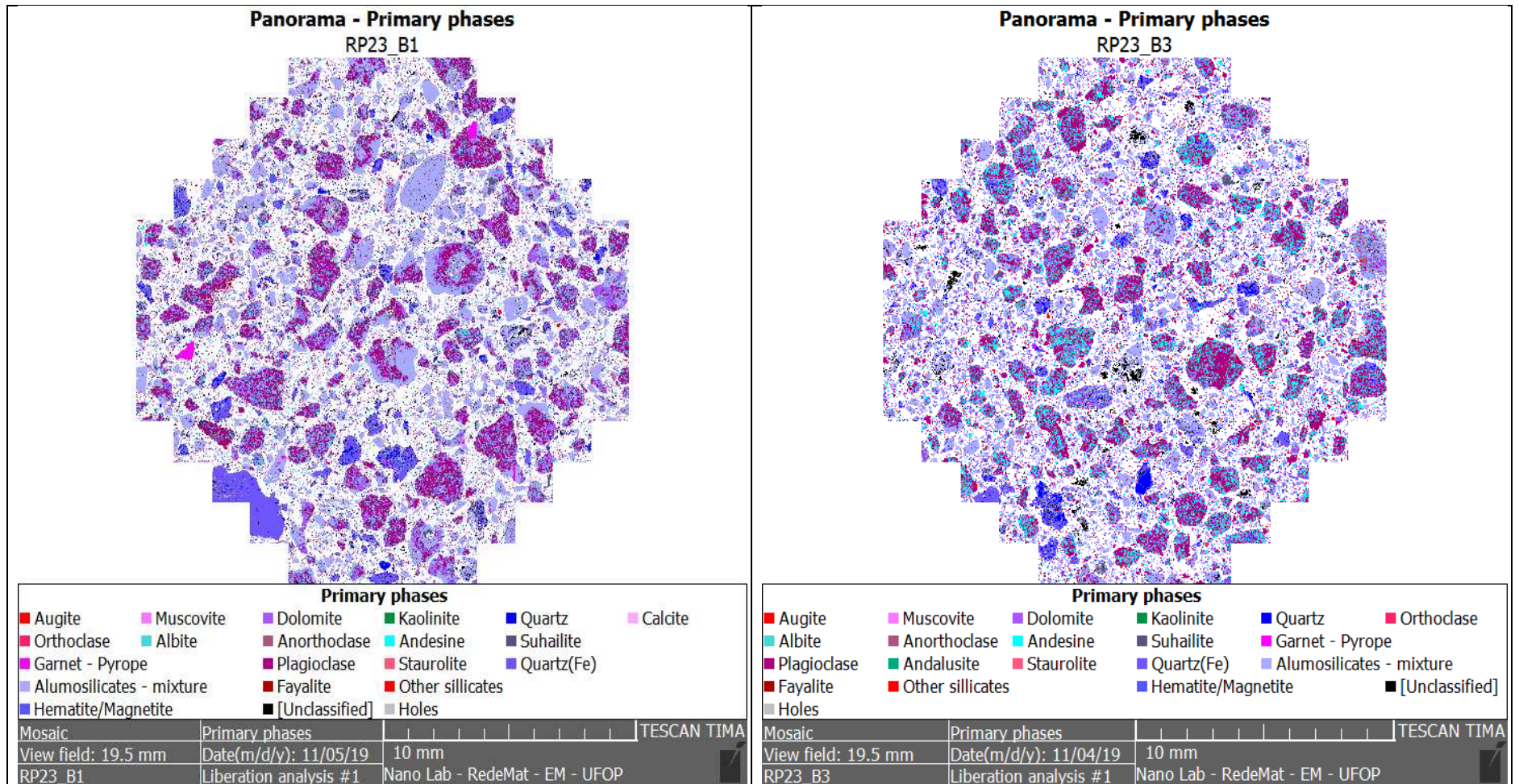




Figure 7c – Different minerals are present in the primary mineralogical phases of soil P23 - Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic), in Stansbury peninsula, Nelson Island.



The soil mineralogical mapping by MLA revealed the random mixing of the selected soils (P10 – Cryosol, P18 – Regosol and P23 – Cambisol) in the Stansbury peninsula (Figure 4), with no preferential distribution of any mineral phase in any particular grain size with quartz grains in large or small particle size by image interpretation.

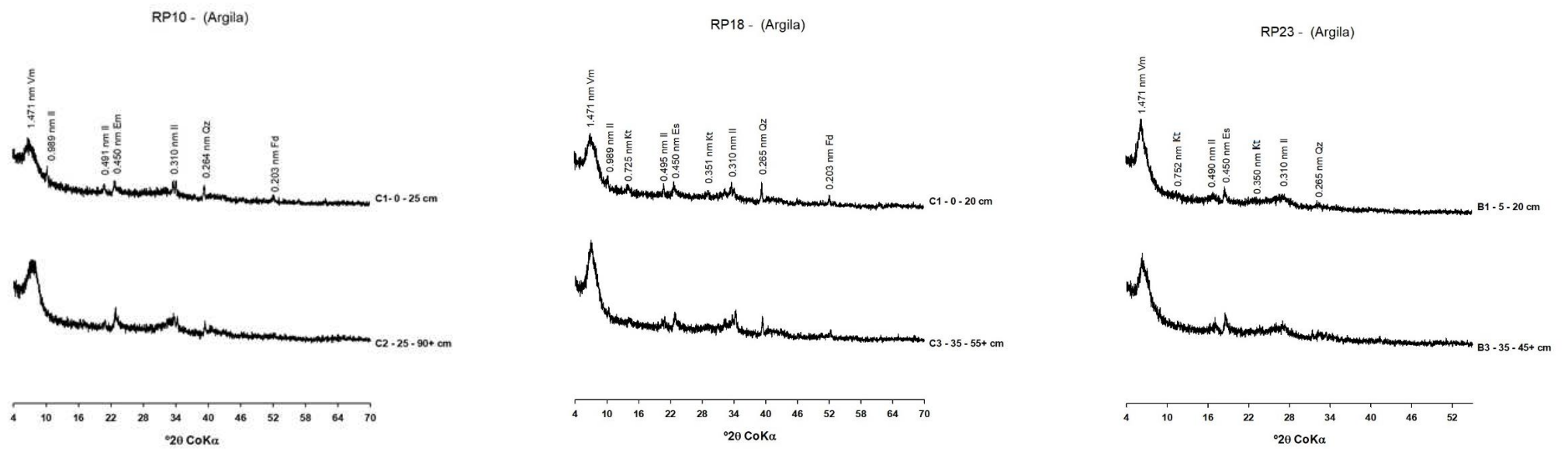
The highest amounts of dolomite, plagioclase, quartz (and andesine were detected in P10 horizons, a Cryosols (Table 3), whereas the two other soils (P18 – Regosol and P23 – Cambisol), had comparable amounts. The composition was varied, since P10 and P18 had low percentages of plagioclases in comparison to dolomite and quartz, whereas P23 – Cambisol showed the opposite trend.

The amount of Andesine varied from 5.86 to 6.23% in the Cryosol (P10), whereas the Regosol (P18) had 8.08 and 4.61% in C1 and C3, respectively, and Cambisol (P23) had 4.09 and 8.59 %. Other silicates, anorthoclase, Fe-oxides (hematite/magnetite), calcite and albite were also detected in the soils, with minor proportion and lower figures.

### 3.3.2. Mineralogy by DRX

The clay fraction mineralogy by DRX of representative soils is presented in Figure 8 (4 to 52 °2 $\theta$ CoK $\alpha$ ). The Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic) (P10), showed vermiculite (1.47nm), illite (0.989nm / 0.491nm / 0.310 nm), smectite (0.450 nm), quartz (0.264) with minor peaks of Feldspars (0.203 nm). In the Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic) (P18), vermiculite (1,471 nm), illite (0.989 nm / 0.495 nm / 0.310 nm), Kaolinite (0.725 nm / 0.351 nm), smectite (0.450 nm), quartz (0.265 nm) and feldspar (0.203 nm) were detected. In the Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) (P23), vermiculite (1,471 nm), kaolinite (0.750 nm/ 0.350 nm), illite (0.490 nm / 0.310 nm), smectite (0.450 nm) and quartz (0.265 nm).

Figure 8 – DRX of selected soils from the Stansbury peninsula (P10, P18 and P23) and identified minerals: vermiculite (Vm), illite (Il), kaolinite (Kt), smectite (Em), quartz (Qz) and feldspar (Fd).



### 3.4. Soil distribution and classification

The soils mapping of the Stansbury peninsula resulted in 21 associations of soil classes, as shown in Figure 9. The associations are described in Table 5 with their areas. The pedodiversity of Stansbury results from varying geoenvironmental conditions and soil-forming processes.

In the central, flat area of the peninsula, patterned ground soils are predominant (Cryosols), usually associated with the qualifier “Fluvic”, representing the largest area (26 %) where freezing and thawing processes are dominant. Volcanic Tuffs and basalts are the main substrates, forming circular patterns (1m to 1.2 m in diameter), evidencing active cryoturbation.

The cryoclastic processes indicating the sub-category “Turbic” occur mainly on volcanic tuffs result in general cryoturbation in these soils. The landscape is dotted of outcrops, channels and lakes, colluvic, fluvic, leptic, lithic and skeletal qualifiers in Leptols, Fluvisols and Regosols, the most common soils after the Cryosols. Most soils are young-aged, shallow and with high rockness.

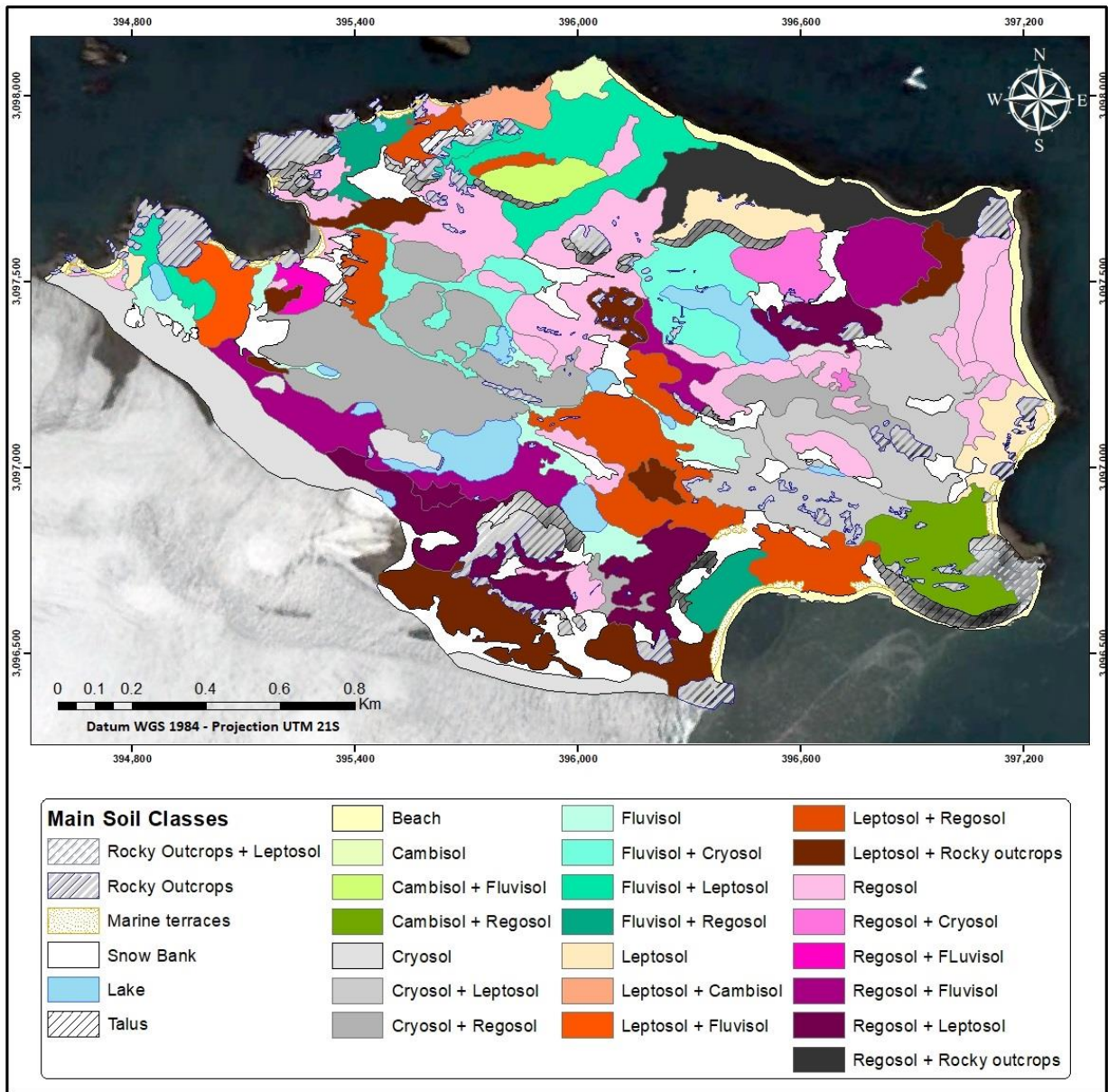
The detailed map (1: 2500) of soil associations in the Stansbury peninsula (Annex I), is presented in a simplified form in Figure 6, mapping all 21 soil associations. Stansbury has a total area of 286,4 hectares, and snowbanks cover 18.3 ha (6.4 % of the ice-free area). Rocky outcrops are frequent and were mapped with 15.1 ha (5.29 %).

The soil association of Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Lithic Leptosol (Fluvic, Novic) is the largest association mapped with 14.2 ha (4.97 % of the area), followed by Cambic Cryosol (Fluvic, Novic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) with 13.3 ha and a Turbic Cryosol (Fluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) with 13.2 ha.

The Turbic Cryosol (Skeletic, Novic) moraine phase is distinguishable as a single soil class with 12.2 ha (4.26 % of the ice-free area). Proglacial lakes occupy 8.5 ha (3 %).

Other Landforms mapped were Talus and Beaches which account for 2.87 % and 2.14 % of the area, respectively.

Figure 9 – Map of the main soil classes that occur in Stansbury peninsula, Nelson Island



Fonte: Autor.

Table 5 – Detailed Soils Associations of Stansbury peninsula, Nelson Island.

<b>Landforms and Soil Class Associations</b>	<b>Area (ha)</b>
Snow Bank	18.3
Rocky Outcrops	15.1
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Lithic Leptosol (Fluvic, Novic)	14.2
Cambic Cryosol (Fluvic, Novic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Rocky Outcrops	13.3
Turbic Cryosol (Fluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic)	13.2
Turbic Cryosol (Skeletic, Novic) Moraine phase	12.2
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Rocky Outcrops	10.3
Leptic Skeletic Fluvisol (Turbic) + Lithic Histic Skeletic Leptosol (Ornithic) + Albic Histic Spodzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic) + Rocky Outcrops	10.1
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Rocky Outcrops	9.5
Skeletic Colluvic Regosol (Arenic) Marine terrace phase + Rocky Outcrops	8.8
Lake	8.5
Colluvic Regosol (Ornithic, Fluvic) + Leptic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Rocky Outcrops	8.5
Talus	8.2
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)	7.6
Leptic Cambisol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Rocky Outcrops	7.0
Turbic Cryosol (Fluvic) + Skeletic Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic) + Rocky Outcrops	6.9
Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Rocky Outcrops	6.6
Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic) + Turbic Cryosol (Arenic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Rocky Outcrops	6.2
Beach	6.1
Colluvic Leptic Skeletic Regosol (Gelic, Fluvic) + Stagnic Skeletic Fluvisol (Oxyaquic)	4.8
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)	4.7
Other Associations	86.4
	<b>286.4 ha</b>

#### 4. DISCUSSION

Compared to other islands in the South Shetlands, the active layer at Nelson Island is thin, so that it is more susceptible to climate change. According to Rosa et al. (2021), between 1989 and 2020, 12 km<sup>2</sup> of the island's glacier was lost, which accounts for 8.4% of its area. As a result, proglacial areas expanded, representing Key monitoring sites for climate change studies.

The northwestern area of the Stansbury peninsula is the preferential area for marine birds and mammals nesting/resting places. Hence, higher values of nutrients are recorded in their soils (P22, P23). This region, soils have greater acidity, similarly to other ornithogenic ice-free areas elsewhere in the Shetlands, where strong acidification promotes/accelerates chemical weathering and silicate minerals formation (SIMAS et al. 2008, SCHAEFER et al. 2014).

The local hydrology is typical of paraglacial environments (KNIGHT AND HARRISSON, 2018). Between 1989 and 2020, the waterlogging and shallow lacustrine environments increased 5.4 ha to 29.2 ha (ROSA et al. 2021). Lakes alone occupy 8.5 ha of Stansbury peninsula, which represents 35% of all lakes on According to Rodrigues et al. (2019), the formation of marine terraces on Nelson Island is probably from the mid-Holocene (ca. 6 kyr) onwards following the general deglaciation of the South Shetlands.

The volcanic rocks (basalt lavas and tuffs) are important parent materials in the local landscape, likewise Daher et al. (2019) in Barrientos where similar rocks occur with mafic mineralogical components that facilitate the chemical weathering, through fractures, joints, and faults, enhancing soil formation, vegetation establishment and organic matter accumulation.

The climate condition at Stansbury peninsula, with a northwest face towards the Drake Passage, is harsh due to strong northwest polar winds, promoting widespread wind ablation, erosion and contributes to physical weathering, with a high prevalence of

periglacial processes under wet conditions, typical of this zone of South Shetlands areas, open to the Drake (SCHAEFER et al. 2015; DAHER et al. 2019).

The local active layer depth, reaching a maximum of 90 cm (means of 30 to 40 cm) characterizes shallow soils and is consistent with other places in maritime Antarctica (MICHEL et al. 2014; ALMEIDA et al. 2017; LUPACHEV et al. 2019) where permafrost has been reported, like Hope Bay (PEREIRA et al., 2014). In drier areas at the Weddel sea zone, at Seymour Island, dry permafrost occurred at 90 cm (SOUZA et al., 2014) whereas Daher et al. (2019) reported depths down to 100 cm in the adjacent James Ross Island, also with dry permafrost.

The clay content at Stansbury peninsula soils is consistent with Antarctic soils from elsewhere, usually not exceeding 30% (MICHEL et al. 2006; PEREIRA et al. 2014; DAHER et al. 2019). There are few records of soils with clay contents greater than 30%, such as an Ornithogenic Haploturbels from Hope Bay, which reached 41% (PEREIRA et al. 2014), a Turbic Cryosol from Keller Peninsula, 34% (FRANCELINO et al. 2011) and a Hyperthionic Leptic Cambisol in the Barton Peninsula, 31% (LOPES et al. 2017). Incipient downward movement clay in subsurface horizons was detected, similarly to soils described by Francelino et al. (2011) in Keller peninsula and Michel et al. (2014) in Fildes peninsula, suggesting little translocation of clay.

It is clear that enhanced clay formation only occurs where ornithogenesis or sulphurization take place in maritime Antarctica soils. The alkalinity of soils in Stansbury peninsula is comparable to semiarid soils of James Ross (DAHER et al., 2019), and Seymour island (SOUZA et al., 2014; GJROUP et al., 2020). Other Maritime Antarctica soils are mostly acidic (FRANCELINO et al. 2011; SCHAEFER et al. 2015; LOPES et al. 2017). Michel et al. (2014) found acid and alkaline soils in Fildes peninsula, varying pH values between 4.93 to 8.76. In Ardley island, acidic and alkaline soils with pH varying between 4.52 and 7.69 occur side by side (MICHEL et al. 2014). The soil pH that accounts for high acidification is highly dependent on the presence of marine bird guano.

The amounts of available P in the Stansbury peninsula is in the lower range of values for Antarctic soils (MICHEL et al., 2014; LOPES et al., 2017). In Stansbury peninsula soils, potassium values varied between 24 and 323 mg dm<sup>-3</sup>, lower than those from elsewhere in Antarctica, like Keller (FRANCELINO et al., 2011) Barton (LOPES et al. 2017), and Robert Island (DAHER et al., 2019). Higher values of K were attributed to leachates from nesting areas or to marine spray, leading to soil salinity in some places.

Exchangeable Calcium and Magnesium in soils of the Stansbury peninsula were typical of this region (FRANCELINO et al., 2011; LOPES et al., 2017), and base saturation is high in all profiles, with or without ornithogenic influence (SIMAS et al. 2015; BOCKHEIM 2015). Most soils did not have evidences of biological activity, compared to ice-free areas such as Harmony Point (RODRIGUES et al., 2020) and Fildes Peninsula and Ardley Island (Michel et al., 2014).

The organic matter found in the soils of the Stansbury peninsula is similar to non-ornithogenic soils in Maritime Antarctica, highlighting the role of fauna in enhanced OM (FRANCELINO et al., 2011; MICHEL et al., 2014; SOUZA et al., 2014; SCHAEFER et al. 2015; LOPES et al., 2017). With less OM, little chemical reaction with the local bedrock occurs, corroborating the limited chemical weathering observed. This is evident by comparing Harmony Point and Stansbury peninsula, since the former has abundant bird-life (penguins mostly) and marine mammals (seals) (RODRIGUES et al., 2020), with the huge sea→land transfers of organic matter, as guano.

The observation of primary minerals in the clay fraction is commonplace in Antarctic soils (MICHEL et al., 2014; BOCKHEIM et al., 2015; SIMAS et al., 2017; LUPACHEV et al., 2019), and indicates incipient chemical weathering, whereas cryoturbation and freezing and thawing process is responsible for the typical break-up of silt and clays, without much chemical reaction (SCHAEFER et al., 2015).

The elemental mapping (Figure 9) indicates that these soils have a matrix with abundant amorphous minerals and isotropic clay minerals that are difficult to identify, besides the primary mineral grains. Much of the fines material that surrounds the large

mineral grains, of feldspars and mafic minerals, is also constituted of fragmented minerals, leading to the presence of primary minerals in the clay fraction. This attribute has also been reported in clays of Hope Bay soils (SCHAEFER et al., 2015), and Barton (LOPES et al., 2017). The presence of 2:1 minerals (smectite) indicates limited chemical weathering and leaching, and 2:1 minerals are dominant. The presence of vermiculites and illites is common in the clay fraction of Antarctic soils both in the maritime region (SCHAEFER et al., 2015; LOPES et al., 2017) and in the dryer continental region (DAHER et al., 2019; GJROUP et al., 2020).

The small Fluvisols area under ornithogenic influence occurs in northwestern Stansbury, where Fur Seals (*Arctocephalus leopard*), and Elephant Seals (*Hydrurga leptonyx*) together with Adelia penguins (*Pygoscelis adeliae*), petrels (*Oceanites oceanicus*), skuas (*Catharacta lonnbergii*), terns (*Sterna vittata*) and seagulls (*Larus dominicanus*) occur. Many large areas have been described by other studies (PEREIRA et al. 2013; NEUFELD et al. 2015; PUTZKE et al. 2015; SCHIMTZ et al. 2018).

Cryosols are the dominant soils in maritime Antarctica (SIMAS et al. 2008; ZHAO et al. 2008; ZHU et al. 2014; MICHEL et al. 2014A; MICHEL et al. 2014B; VIEIRA et al. 2015; Lupachev et al. 2019; THOMAZINI et al. 2019). In the Stansbury peninsula, they occur with typical periglacial features, on turbic soils, as reported by Francelino et al. (2011) in Keller, in Barton by Lopes et al. (2017) and in Fildes peninsula and Ardley island (MICHEL et al. 2014).

## 5. CONCLUSIONS

Soils at Stansbury peninsula are predominantly skeletal, gravelly, with little organic matter and little fauna activity, poor vegetation cover. The eutrophic character is due to the limited weathering and leaching of volcanic rocks, resulting in the presence of primary minerals in the clay fraction. Soils display a prominent action of physical weathering and freezing and thawing process, resulting in the typical patterned ground (Cryosols), under active periglacial processes.

Stansbury's unique proglacial and periglacial geoenvironments are influenced by melting water and widespread snowbanks, under wet polar oceanic climate conditions. Strong cryoturbation by freezing/thawing processes and limited chemical weathering preserves the primary minerals constituents even in the clay fraction.

The organic-matter poor Stansbury Soils are very contrasting with the other large ice-free area of Nelson Island, at Harmony Point, where most soils are highly enriched with Organic matter, and marine bird activity is widespread and locally abundant. This illustrates how the biological factor represents a key aspect in driving soil formation in Maritime Antarctica.

## 6. REFERENCES

BOCKHEIM, J.G. **The Soils of Antarctica**. 2015. DOI: 10.1007 / 978-3-319-05497-1. Available in: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-05497-1>.

DE FILIPPO, B.V.; & RIBEIRO, A.C. **Análise química do solo**. 2.ed. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 26p.

FRANCELINO, M.R.; *et al.* **Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica**. *Catena*. 2011. v. 85, p. 194–204. DOI: 10.1016 / j.catena.2010.12.007.

GEE, G.W.; Bauder, J.W. **Particle-size analysis**. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. 1986. 383–412.

GROUPS, R.S. **Recommended codes for the reference soil groups, qualifiers and specifiers**. *World Reference Base [SI: sn]*, 2006. p. 127–128.

HARRIS, C.M. **Wildlife Awareness Manual: Antarctic Peninsula, South Shetland Islands, South Orkney Islands**. Wildlife Information Publication No. 1. Prepared for the UK Foreign & Commonwealth Office and HMS Endurance. Environmental Research & Assessment, Cambridge. 2006.

LOPES, D.V.; *et al.* **Soils and Evolution of the Landscape in a Periglacial Environment on the Barton Peninsula, Antarctic Maritime**. *Department of Geography magazine, special volume, Axis 11*. 2017, 259-267. Doi: 10.11606 / rdg.v0ispe.132721.

LÓPEZ-MARTÍNEZ, J.; *et al.* **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. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.018>.

LUPACHEV, A.V.; *et al.* **Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica)**. *Catena*, 2020. Doi: 10.1016 / j.catena.2020.104613.

MICHEL, R.F.M.; *et al.* **Soils and Landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica**. *Geomorphology*. 2014. Doi: 10.1016/j.geomorph.2014.03.041.

MICHEL, R.F.M.; *et al.* **Active-layer thermal monitoring on the Fildes Peninsula, King George Island, maritime Antarctica**. *Solid Earth*. 2014, 5: 1361-1374. Doi: 10.5194 / se-5-1361-2014.

MINK, S.; *et al.* **Insights into deglaciation of the largest ice-free area in the South Shetland Islands (Antarctica) from quantitative analysis of the drainage system**. *Geomorphology*. 2014. v. 225, n. C, p. 4–24. DOI: 10.1016 / j.geomorph.2014.03.028. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.028>.

MENDONÇA, T; *et al.* **Clay Mineralogy of Gelic Soils from the Fildes Peninsula, Maritime Antarctica**. *Soil Science Society of America Journal*. 2013, 77: 1842-1851. DOI: 10.2136 / sssaj2012.0135.

NAVAS, A.; *et al.* **Soil characteristics on varying lithological substrates in the South Shetland Islands, maritime Antarctica**. *Geoderma*. 2008 v. 144, n. 1–2, p. 123–139. DOI: 10.1016 / j.geoderma.2007.10.011.

NEUFELD, Â; *et al.* **Methane and nitrous oxide fluxes in relation to vegetation covers and bird activity in ice-free soils of Rip Point, Nelson Island, Antarctica**. *Polar Research*. 2015. v. 34, n. 2015, p. 1–12, DOI: 10.3402 / polar.v34.23584. .

OLIVA, M.; RUIZ-FERNANDES, J. **Geomorphological processes and frozen ground conditions in Elephant Point (Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica)**. *Geomorphology*. 2017. 368-379. DOI: 10.1016 / j.geomorph.2016.01.020.

PEREIRA, A.B.; PUTZKE, J. **The Brazilian research contribution to knowledge of the plant communities from Antarctic ice free areas**. *Proceedings of the Brazilian Academy of Sciences*. 2013. vol. 85, p. 923–935.

PIRES, K. D. S.; *et al.* **Mineralogical characterization of iron ore tailings from the quadrilátero ferrífero, Brazil, by electronic quantitative mineralogy**. *Materials Research*. 2019. 22, 1–7. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0194>

ROQUE, M.P.B.; *et al.* **Preliminary Geomorphological Mapping of Seymour Island, Antarctica**. *Proceedings of the National Congress of Physical Geography*, 2017. Doi: 10.20396 / sbgfa.v1i2017.2576.

SAMPAIO, N. P.; *et al.* **The formation of Brazilian minerals database for integrated SEM-EDS system applied to the gold ore characterization.** *Holos.* 2018. v. 3, p. 2-22.

SCHAEFER, C.E.G.R.; *et al.* **Soils and Landforms at Hope Bay, Antarctic Peninsula: Fomation, Classification, Distribution, and Relationships.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2015, 79: 175-184. Doi: 10.2136 / sssaj2014.06.0266.

SCHAEFER, CEGR; *et al.* **Active thermal layer monitoring of a Dry Valley of the Ellsworth Mountains, Continental Antarctica.** *Catena.* 2017. 149, 603-615. Doi: 10.1016 / j.catena.2016.07.020.

SIMAS, F.N.B.; *et al.* **Genesis, properties and classification of Cryosols from Admiralty Bay, maritime Antarctica.** *Geoderma.* 2008 v. 144, p. 116–122. DOI: 10.1016 / j.geoderma.2007.10.019.

SPELLIE, J.L.; *et al.* **The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution.** *Scientific Reports - British Antarctic Survey.* [Ps: sn]. 1984.

Schmitz, D.; Putzke, J.; Schaefer, C.E.G.R. **Three decades of plant sucession at Rip Point, Nelson Island, maritime Antartica.** Conference: Polar 2018- SCAR & IASC Conference Davos – Switzerland.

SOUZA, K.K.D.; *et al.* **Soil formation in Seymour Island, Weddell Sea, Antarctica,** *Geomorphology.* 2014. v. 225, n. C, p. 87–99. DOI: 10.1016 / j.geomorph.2014.03.047. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.03.047>.

SYLVESTER, P. J. **Use of the mineral liberation analyzer (MLA) for mineralogical studies of sediments and sedimentary rocks.** *Quantitative Mineralogy and Microanalysis of Sediments and Sedimentary Rocks.* 2012. May, 1–16. [https://www.researchgate.net/publication/240305728\\_Use\\_of\\_the\\_Mineral\\_Liberation\\_A\\_nalyzer\\_MLA\\_for\\_mineralogical\\_studies\\_of\\_sediments\\_and\\_sedimentary\\_rocks](https://www.researchgate.net/publication/240305728_Use_of_the_Mineral_Liberation_A_nalyzer_MLA_for_mineralogical_studies_of_sediments_and_sedimentary_rocks)

THOMAZINI, A.; *et al.* **The current response of soit thermal regime and carbon Exchange of a paraglacial coastal land system in maritime Antarctica.** *Land Degrad Dev.* 2020; 31: 655-666. Doi: 10.1002 / ldr.3479.

TATUR, A.; MYRCHA, A. **Ornithogenic soils on King George Island. South ShetlandIslands (maritime Antarctic Zone).** *Pol. Polar Res.* 1984. 5, 31–60.

## **CAPÍTULO 2**

**SOIL TEMPERATURE MONITORING IN PARA-PERIGLACIAL AREAS AT STANSBURY PENINSULA, NELSON ISLAND, MARITIME ANTARCTICA.**

## ABSTRACT

Identification of strategic areas to evaluate climatic alterations is one of the major goals aimed by scientists worldwide. It is known that glaciers and ice sheets have advanced and retreated over time, and their behavior can be regarded as one of our indicators of climate change. Therefore, para-periglacial areas could be specified as a gradient from proglacial to periglacial geoenvironments where processes related to pedogenesis are more expressive while weathering conditions improve. These areas are important for monitoring and evaluating alterations in soil temperature and their influence on maintaining permafrost and depth changes of active-layer. The objective of this study was to characterize the pedoclimatic regime, based on the monitoring of permafrost and the active layer, in a para-periglacial ice-free area between the Nelson Glacier and the Fildes Strait, on Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctic maritime. Results show that the lowest monthly temperature recorded in Stansbury, at the depths of 5, 30, 50 and 100 cm in the CALM Sensor, presented average values during the monitoring period (February 2018 to December 2019) of  $-0.96$ ,  $-0.93$ ,  $-0.93$  and  $-0.96$  °C, respectively. The monitoring of soil temperature in Stansbury peninsula demonstrates the glacial influence on the thermal regime of the soil. Active layer and the permafrost had characteristics of strong influence on the surface with freezing and thawing events related to the ice-free area due climatic characteristics as air temperature and ice-cover maintenance. Did also regard to relief features, where landscape forms and slope of the terrain have a decisive influence over soil thermal regime. Soil temperatures strongly affects the buffering effect described by our investigation on different depths of the temperature sensors' readings. While surface temperatures reflect the erratic effect of daily and seasonal temperature change at the sites, the behavior is more homogeneous at greater depths. To observe any kind of trend it is recommended that monitoring has to be continued to assess greater modeling statistical significance to infer long-term pedoclimatic behavior more appropriately, due the short-term monitoring period of this investigation.

Keywords: Permafrost. Active layer. Climate change.

## RESUMO

A identificação de áreas estratégicas para avaliar as alterações climáticas é um dos principais objetivos almejados por cientistas de todo o mundo. As geleiras e mantos de gelo avançaram e recuaram ao longo do tempo, e seu comportamento pode ser considerado um de nossos indicadores das mudanças climáticas. Portanto, as paisagens para-periglaciais podem ser especificadas como um gradiente de geoambientes proglaciais a periglaciais onde os processos relacionados à pedogênese são mais expressivos enquanto as condições climáticas melhoram. Essas áreas são locais importantes para monitorar e avaliar as alterações na temperatura do solo e sua influência na manutenção do permafrost e nas mudanças de profundidade da camada ativa. O objetivo deste estudo foi caracterizar o regime pedoclimático, baseado no monitoramento do permafrost e da camada ativa, em um ambiente para-periglacial sem cobertura de gelo entre a geleira Nelson e o estreito de Fildes, na península de Stansbury, Ilha Nelson, Antártica Marítima. Os resultados mostraram para a temperatura do solo, que a menor temperatura mensal registrada em Stansbury, nas profundidades de 5, 30, 50 e 100 cm no Sensor CALM, teve leituras médias no período de monitoramento (fevereiro de 2018 a dezembro de 2019) de  $-0,96^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,93^{\circ}\text{C}$ ,  $-0,93^{\circ}\text{C}$  e  $-0,96^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. O monitoramento da temperatura do solo na península de Stansbury demonstra a influência glacial no regime térmico dos solos. A camada ativa e ao permafrost têm características de forte influência na superfície pelos eventos de congelamento e descongelamento relacionados à área livre de gelo devido às características do clima como a temperatura do ar e a manutenção da cobertura de gelo. Também devido às características do relevo, onde as formas da paisagem e a declividade do terreno têm influência decisiva no regime térmico do solo. As temperaturas do solo têm uma forte influência do efeito tampão descrito por nossa investigação em diferentes profundidades de leituras dos sensores de temperatura. Enquanto as temperaturas da superfície refletem o efeito errático da mudança de temperatura diária e sazonal nos locais, em profundidades maiores, o comportamento é mais homogêneo. As séries temporais de temperatura realizadas para todos os sensores indicam uma tendência de resfriamento na temperatura do solo da Península de Stansbury, com uma característica de

sazonalidade não estacionária. No entanto, recomenda-se que o monitoramento seja continuado para avaliar maior significância estatística na modelagem para inferir mais adequadamente o comportamento pedoclimático de longo prazo, devido ao curto período de monitoramento desta investigação.

Palavras-chave: Permafrost. Camada ativa. Mudanças climáticas.

## 1. INTRODUCTION

Identification of strategic areas to evaluate climatic alterations is one of the major goals aimed by scientists worldwide concerned about the human influence over the global climate. It is known that glaciers and ice sheets have advanced and retreated over time, and their behavior can be regarded as one efficient indicator of climate change (TWEED & CARRIVICK, 2015). In the last decades, the rate of regional warming has varied considerably, profoundly modifying many ecosystem processes, especially in polar regions (TURNER et al., 2016; SCHAEFER et al., 2016).

Ice-free areas next to glaciers forming a gradient environment of proglacial, paraglacial and periglacial areas, are especially important (BOCKHEIM, 1995; GUGLIELMIN, 2006; CARRIVICK & HECKMANN, 2017). In fact, paraglacial environments may include both proglacial and periglacial environments and fluvial and mass movement landforms and processes (SLAYMAKER, 2014). In addition, specific polar regions as proglacial areas that have been through recent (considering geological time) loss of glacier ice cover and still are influenced by the glaciers nearby (CARRIVICK & HECKMANN, 2017). Adjacent regions to glaciers are focus of several studies and definitions of these environments are widely discussed among specialists which have not been in agreement (LOPES, 2020; SLAYMAKER, 2011; FRENCH, 2007). The consensus is that more than geographic distribution in the landscape, rather is about the processes involved (CARRIVICK & HECKMANN, 2017; SLAYMAKER, 2014).

Para-periglacial areas could be specified as a gradient region from paraglacial to periglacial geoenvironments, where processes related to pedogenesis are more expressive while weathering conditions improve but are difficult to separate on the landscape. These areas are important for monitoring and evaluating alterations in soil temperature and its influence on maintaining permafrost and depth changes of active-layer. The permafrost can be defined as a thick subsurface layer of soil that remains frozen, with water or not, occurring at  $0^{\circ}\text{C}$  for at least two consecutive years, and active layer is the seasonally thawed surface layer above permafrost (SOIL AMERICAN

SOCIETY, 2020; BOCKHEIM et al., 2015; WORLD REFERENCE BASE, 2014). Several factors have influence over the distribution of permafrost such as air temperature, relief, presence of vegetation, proximity to glaciers, hydrology, snow cover, source material and the soils themselves (BOCKHEIM 1995; FRENCH, 2007; LOPES, 2020; SLAYMAKER, 2011; SLAYMAKER, 2014; CARRIVICK & HECKMANN, 2017), and environmental conditions are determining for permafrost maintenance.

The thermal behavior of the soil indicates that air temperature is decisive for the maintenance of permafrost (BOCKHEIM, 2015), and the dynamics of the active layer during the freezing and thawing events, occurring from Antarctic regions to high mountainous tropical continental regions (MICHEL et al., 2014; GJROUP et al., 2011). Permafrost and active-layer exhibit thermal behavior that can consistently reflect changes in the temperature regime of the environment, making the areas where they occur strategic for monitoring events of changes in soil temperature and humidity of proglacial areas (FRANCELINO et al., 2011; MICHEL et al., 2014; BOCKHEIM et al., 2015; SCHAEFER et al., 2017; WINSVOLD et al., 2018; OLIVA AND FERNÁNDEZ, 2017; FATRAS et al., 2020).

In several ice-free areas throughout the South Shetlands Islands, specific studies have been carried out on pedoclimatic dynamics and their influences on soil formation (MOURA et al., 2011; MICHEL et al., 2014a; MICHEL et al., 2014b; VIEIRA et al., 2015; CHAVES et al., 2017; LUPACHEV et al., 2019), but always in a punctual approach, installing a single monitoring system in the area. As long-term records of Ground Soil Temperature (GST) and active layer change are needed to calibrate the general circulation used to create future climatic scenarios (GUGLIELMIN, 2006), it is important to monitoring these indicators is continuing in the framework of several international programs such as the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) which is mainly focused on the Arctic.

Therefore, the objective of this study was to characterize the pedoclimatic regime, based on the temperature monitoring of permafrost and the active layer conditions, in a

para-periglacial environment between the Nelson Glacier and the Fildes Strait, on the Stansbury peninsula, Nelson Island. Specifically, we aimed to: i) register during two years the soil thermal regime in six different sites at the same depths to compare temperature measures among depths in toposequence; ii) evaluate if the distance from the glacier, proximity to rivers, maintained ice cover or vegetal presence interferes in the thermal variation; iii) elucidate a correlation between soil physical characteristics and readings of the mean, minimum and maximum temperatures, using a principal component analysis; and iv) discuss about regional factors determining the presence of permafrost continuity and active-layer depth.

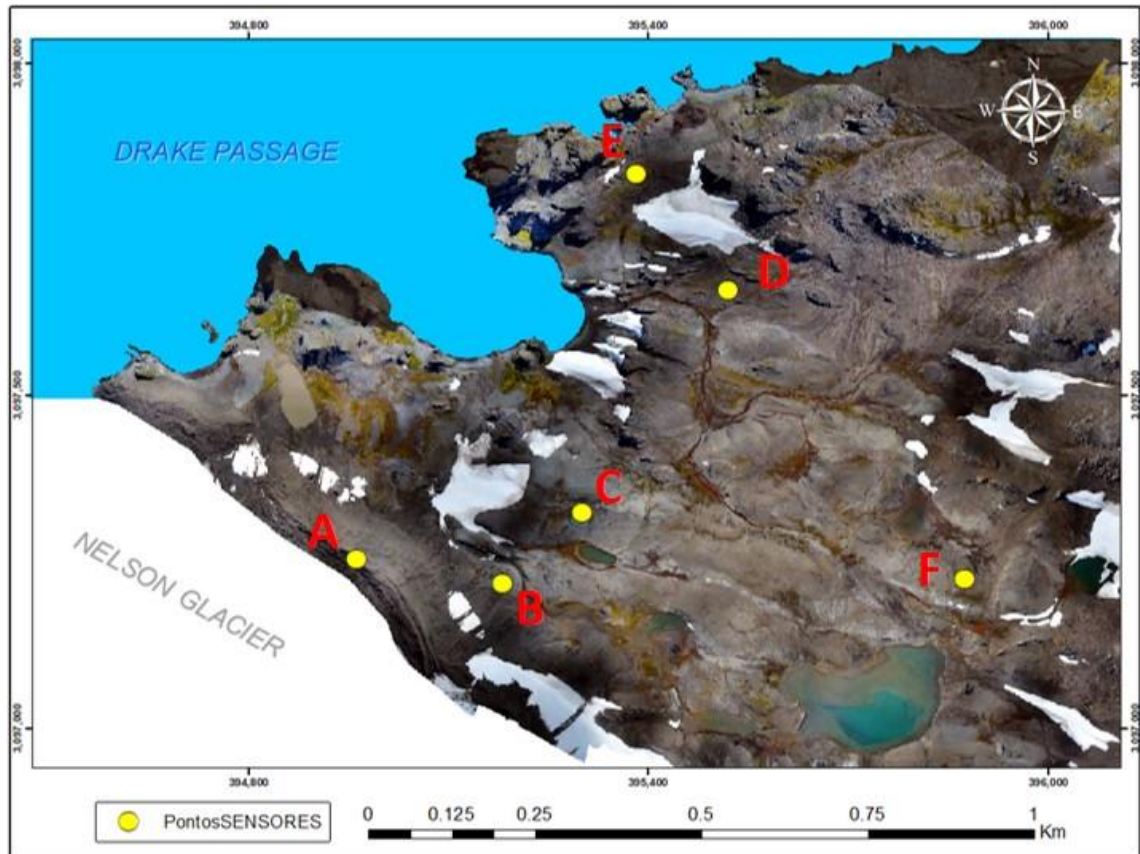
## **2. MATERIAL AND METHODS**

### **6.3. Study area and monitoring sensors' location**

Stansbury Peninsula is located at the north part of Nelson Island with a 289 ha ice-free area. Stansbury is one of the few ice-free areas in the South Shetland Islands, presenting a domain of periglacial, glacial, fluvial and coastal landscapes, where permafrost is commonly present (LÓPEZ-MARTÍNEZ et al., 2016). The climate of the region is sub-Antarctic maritime, according to Köppen classification, which includes strong winds, high weather variability, and relatively mild temperatures varying from average annual air temperature of -2.2 °C and the average summer air temperature slightly greater than 0 °C (FERRON et al. 2004). Precipitation varies from 350 and 500 mm per year with rainfalls during summer.

In Stansbury peninsula, water follows along the geographical faults in the current surface relief. The peninsula features an ice dome, an exhalation-denudation plateau, an ancient abrasion surface, a recent abrasion platform and uplifted marine terraces (ZAMORUYEV, 1972a, b; GOVORUKHA, 1973a). It consists mainly of volcanic rocks of olivine-basalts and basaltic andesites, with rare occurrences of pyroxene-andesites and dacites, dated at the beginning of the Cenozoic (Paleocene - Eocene) (SMELIE et al. 1984).

Figure 1 – Location of the Ibuttons Sensors (A,B,C,D and E) and CALM Sensor (F).



Source: Author

#### 6.4. Geospatial Analysis

An aerial photogrammetric survey of the area was performed using Unmanned Aerial Vehicle (UAV), model Phantom 4 Pro. Orto-rectified mosaics were generated using Agisoft Photoscan software. A digital elevation model (DEM) with a final spatial resolution of 10 cm was also generated. Forty-eight control points were collected using a dual-frequency GNSS receiver (L1 and L2).

From the DEM was possible to perform geospatial analyses using ArcGis Software to obtain maps of terrain slope used to argue about the influence of solar exposition in the thermal regime of soils and describe the influence of other factors on the gradient para-periglacial delimitation. The results of meters above sea level (m.a.s.l.) obtained from the Digital Elevation Model (DEM), the slope categories in percentage and the Solar Radiation values of each cell in MegaWatt hour per square meter (MWh m<sup>-2</sup>) maps were elaborated.

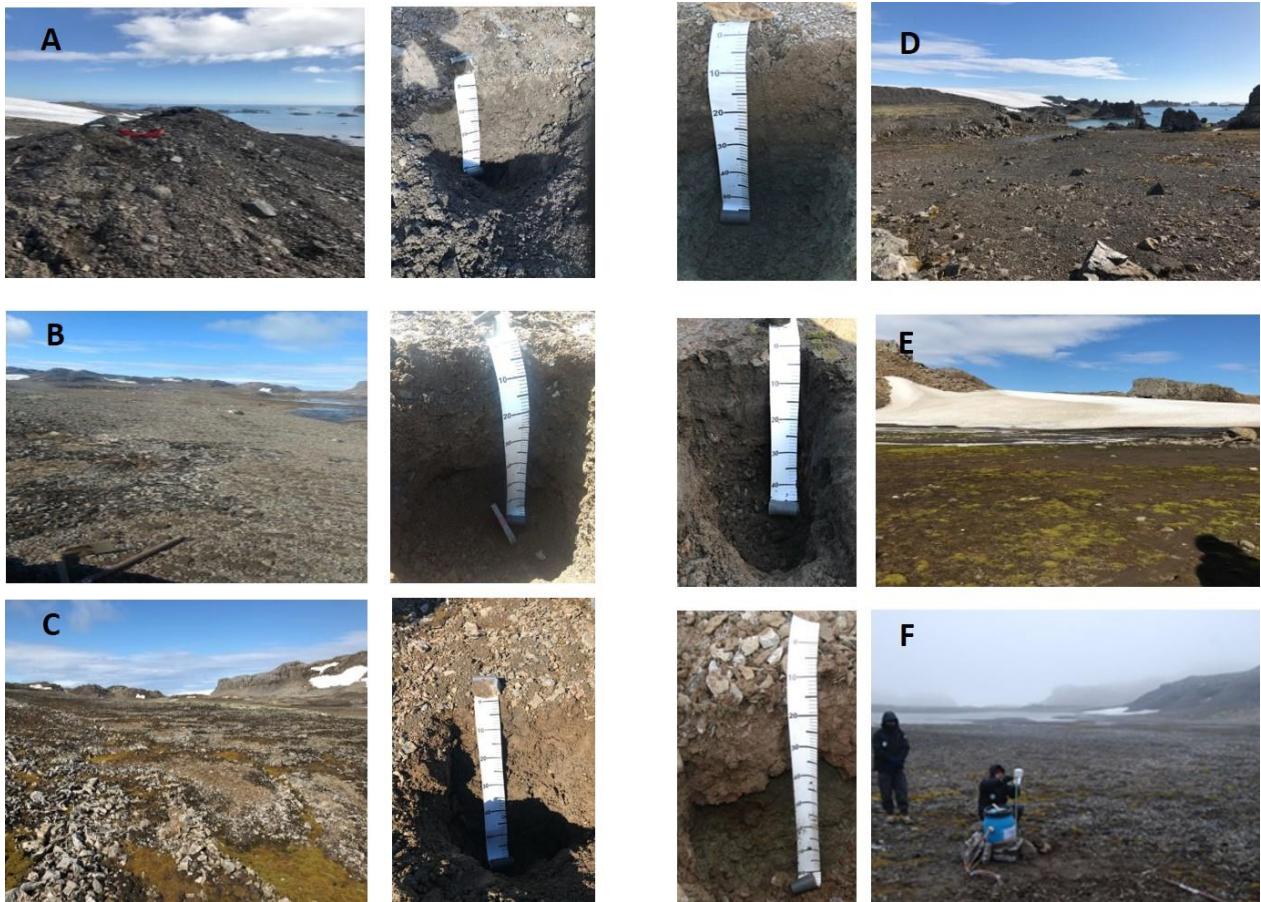
For the solar radiation data, we used the solar radiation analysis tools from ArcGIS software's Toolbox, which calculates insolation across a landscape or for specific locations, based on methods from the hemispherical viewshed algorithm developed by Rich et al. (Rich 1990, Rich et al. 1994) and further developed by Fu and Rich (2000, 2002).

The total amount of radiation calculated for a particular location or area is given as global radiation. The direct, diffuse, and global insolation calculation is repeated for each feature location or every location on the topographic surface, producing insolation maps for an entire geographic area. In this study we divided the sampled period into four seasons from January to June and June to December of 2018, and January to June and June to December of 2019, according to the period of soil temperature monitoring.

## **6.5. Environments and Soil Characterization**

To stratify the area of the peninsula, was used the geoenvironments elaborated in chapter one, defined here in this study as the landscape sector with similar pedological, geological and morphological characteristics related to glacial conditions, glacier proximity, distance of the beach, relevant rocky outcrops and parent material influence on the landscape formation.

Figure 2 – Soil Profiles opened where the monitoring sensors were installed in Stansbury, Nelson Island, Maritime Antarctic: *Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)* (A), *Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)* (B), *Turbic Cryosol (Fluvic)* (C), *Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)* (D), *Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)* (E), *Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)*(F).



Source: Author.

Through systematic observations of the geoenvironments, soil profiles were opened, described and sampled in February 2018 to represent the pedological variations where all monitoring sensors have been installed. For sample collections, the Antarctic Soil and Permafrost Group (ANPAS) recommendations were followed (BOCKHEIM et al. 2006). Based on field morphological observations and later on the results of physical

and chemical analyzes, the soils were classified according to the World Reference Base of Soil (WRB, 2014).

## 6.6. Physical-chemical characterizations

The color, gravel content and fine earth (< 2.0 mm), were obtained, determining the soil texture by dispersion in distilled water, sieving and weighing to separate the coarse and fine sand fractions, followed by sedimentation to determine the silt and clay fractions (GEE & BAUDER, 1986).

The pH was measured in water and KCl and CaCl 1 mol L<sup>-1</sup> solutions, in the proportion 1: 2.5. Exchangeable cations were extracted by KCl mol. L<sup>-1</sup> and quantified by atomic absorption spectrometry (Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>) and by titration with NaOH (Al<sup>3+</sup>). Na<sup>+</sup>, extracted with 1.0 mol L<sup>-1</sup> ammonium acetate solution at pH 7.0, was quantified by flame photometry.

Potential acidity (H+Al) was extracted with 0.5 mol L<sup>-1</sup> calcium acetate at pH 7.0 and quantified by titration with NaOH. Available P and K<sup>+</sup> exchangeable were extracted by Mehlich-1, where P was quantified by the ascorbic acid method, as described by Kuo (1996), and K<sup>+</sup> was determined by flame photometry.

Organic matter (OM) content was estimated after the determination of organic C using Walkley Black method, without heating. Total nitrogen (N<sub>total</sub>) was estimated using the Kjeldahl method and the remaining phosphorus (P-rem) in calcium chloride. 0.01 mol L<sup>-1</sup> with an initial concentration of 60 mg L<sup>-1</sup> of P determined according to De Filippo & Ribeiro (1997).

## 6.7. Pedoclimatic Monitoring Sensors

Six monitoring sites were installed, one recorded soil temperature and soil moisture data, and five were equipped with three Ibuttons sensors each, which recorded only

temperature (Figure 3). The records were made during 21 months, recorded hourly by the CALM-S site for temperature and humidity, and every two hours by the Ibuttons® sensors.

The monitoring sites were arranged in a vertical array, and the sensors were installed directly in the soil profile at different depths (Table 1). The horizontal array did vary accordingly to the region slope, covering the representative surface topography of the landscape unit within the investigated area, considering the orientations of Guglielmin (2006). After all monitoring systems were installed, data is considered to assume the same period of time recording data from February 24th, 2018 until December 5th, 2019 (728 days).

Table 1 – Description of ground temperature and humidity CALM Sensor and Ibuttons sensors installed at five (5, 10, 30, 50 and 100 cm) and three (10, 50 and 100 cm), respectively. GPS readings of elevation and their coordinates in UTM (Datum WGS 1984 – Projection UTM 21S) and soil classification according to World Reference Base, of Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctica.

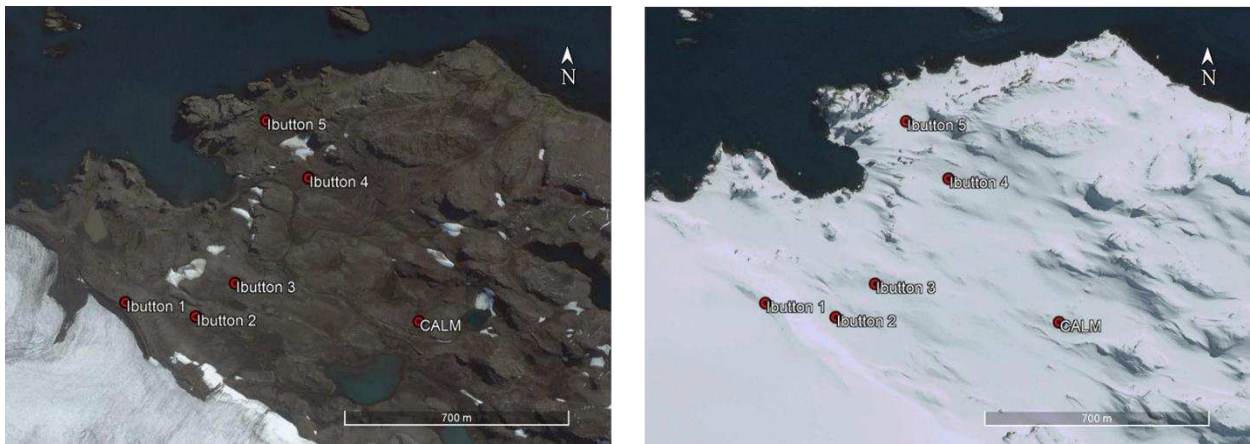
Soil Profile	Sensors	GPS Elev.	Glacier distance	Location	Classification
		----- <i>(m)</i> -----		<i>UTM</i>	<i>WRB</i>
<b>A</b>	<b>Ibutton 1</b>	62	32	394961/3097255	<i>Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)</i>
<b>B</b>	<b>Ibutton 2</b>	30	183	395181/3097218	<i>Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)</i>
<b>C</b>	<b>Ibutton 3</b>	31	345	395300/3097325	<i>Turbic Cryosol (Fluvic)</i>
<b>D</b>	<b>Ibutton 4</b>	20	713	395519/3097659	<i>Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)</i>
<b>E*</b>	<b>Ibutton 5</b>	7	770	395381/3097834	<i>Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)</i>
<b>F</b>	<b>CALM</b>	35	590	395876/3097224	<i>Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)</i>

\*Sensor was not recovered from the ground due to ice-cover at the time of collection.

The second mission to the area was realized to collect all systems with Ibuttons sensors and also collect with a notebook with CR1000 software, to download the readings performed by the CALM system connected to a data logger (model CR 1000, Campbell Scientific Inc., Utah, USA).

At the time it was possible to remove only 4 ibutton systems from the ground, as one of them (Ibutton 5) was completely covered with ice during the mission. Another two systems had part of the sensors totally under frozen-ground conditions and it was only possible to collect partially of the sensors and the temperature measures. Logistic and climatic adversities are usually concerning scientists that perform research in Antarctica.

Figure 3 – Sensors location map and comparison of two different Google Earth images showing the snow cover variation in the studied region of Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctic maritime.



Source: Google Earth, 2022.

#### 6.7.1. Temperature and Humidity Monitoring with CALM Sensor

A temperature and moisture monitoring system (Figure 4) was installed following the protocol of the Circumpolar Active Layer Monitoring South Hemisphere (CALM-S), composed of an air temperature sensor model T-107 (1 m from the surface); two CS-616 soil moisture sensors (30 and 80 cm); five Type E (chromel-constantan) Thermocouple soil temperature sensors (05, 10, 30, 50 and 100 cm). In this particularly permanent monitoring system, one sensor was installed at 1 m above ground for air temperature measurements (protected by a radiation shield), used as local temperature control for the study.

Figure 4 – Photography of the soil temperature and moisture CALM Sensor location of the monitoring site of the Terrantar / UFV / INCT project, in Stansbury peninsula, Nelson Island, maritime Antarctic.

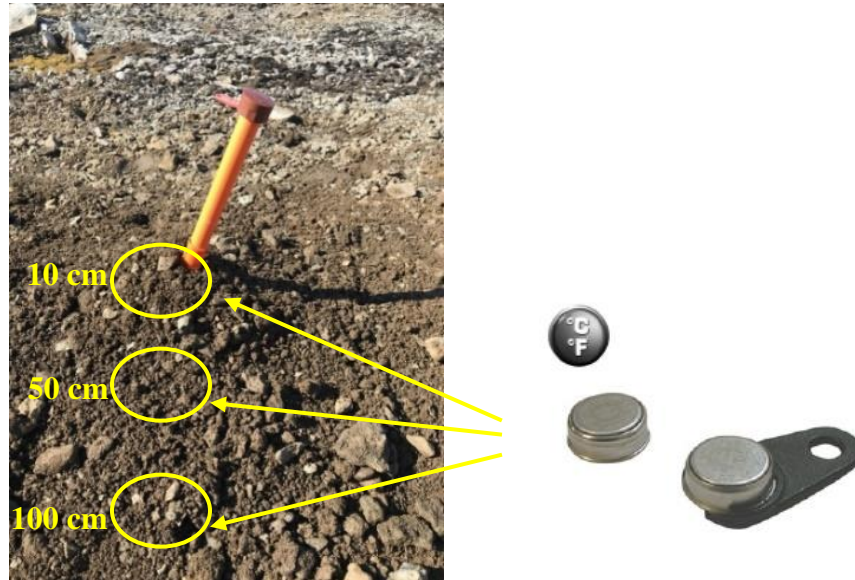


Source: Author.

#### 6.7.2. Temperature Monitoring with Ibuttons Sensors

Five monitoring systems were installed to cover a possible variation in pedoclimatic gradient across the northwest ice-free region of Stansbury peninsula with soil temperature readers at depths of 10, 50 and 100 cm, using Ibuttons-type sensors, where each set of three thermometers were fixed in PVC pipe and allocated where soil profiles were opened. In those soils where the 100 cm depth was not possible to reach to soil description, the PVC was allocated carefully in the ground mass with the help of a straight digger used to adequately allocate the monitoring depth as in toposequence from the border of the moraine between the Nelson glacier and the northwest ice-free area of the peninsula, at the altitudes and coordinates shown in Table 1.

Figure 5 – Data collection systems with soil temperature sensors (Ibuttons) were installed at three depths (10, 50 and 100 cm).



To perform the comparative analysis among the temperature data collected by the different pedoclimatic sensors, we used all sensors information to general description and exploratory analyses, but for a detailed comparison of the same depths readings to describe the possible pedoclimatic gradient we used only the data collected by the Ibuttons' Sensors 1 and 2, which had been entirely collected with three depths thermal monitoring data.

## 6.8. Data Processing

### 6.8.1. Descriptive Statistics and Exploratory Analysis

All the temperature and humidity data collected by the CALM sensor and temperature data collected by the Ibuttons' sensors were processed in the R environment (RStudio Team, 2020) and the analysis was performed with several packages supported

by the Github community and free access scripts downloaded and executed in open access software's.

Data collected received general descriptive statistics, aiming to previously evaluate the behavior of the readings at the different monitoring sites. We obtained the maximum, minimum, average and quartile values of all readings. The kurtosis was calculated to characterize the general distribution of the readings, the asymmetry coefficient to assess the distribution of the readings in relation to the maximum and minimum extremes, and the standard deviations and coefficient of variation of the readings, to evaluate the dispersion of the data as exploratory analysis of everything that has been recorded.

About the soils' physical and chemical characteristics where the sensors were installed, we perform a principal component analysis (PCA) to the analyzes results, regarding similarities and correlations among them, so that may contribute to explain the thermal regime behavior in the study area and if some of this characteristics does have influence over the GST and if contributes to explain the thermal gradient among the monitoring sites.

#### 6.8.2. Permafrost and Active-Layer Monitoring

With the temperature and humidity readings realized by the CALM sensor, was characterized permafrost which is dependent on the regional climate (BOCKHEIM 2015), and the local active layer thickness, which is dependent on GST sensibility to climatic elements (GUGLIELMIN, 2006). In the South Shetlands islands, the active layer is usually between one and two meters thick (MICHEL et al., 2014b; BOCKHEIM, 2015), so we tried to evaluate in this study if the behavior of the continuity of permafrost is similar in the Stansbury peninsula. As an innovation, this study hypothesizes that the proximity to glaciers is an important driver to pedoclimatic characteristics. For that, we carried out the temperature study considering the distance gradient from the glacier to the beach, in a

transitory situation from the para-periglacial environment, using the Ibuttons sensors system installed to assess whether the behavior of soil temperature correlates with the distance from Nelson glacier.

Using R environment and specific scripts to assess the data (RSTUDIO TEAM, 2020), we calculated the thawing days (days in which all hourly soil temperature measurements are positive and at least one reading is warmer than 0.5 °C), freezing days (days in which all hourly soil temperature measurements are negative and at least one reading is colder than -0.5 °C), isothermal days (days in which all the hourly measurements range only between  $\pm 0.5$  °C), freeze-thaw days (days in which there are both negative and positive temperatures with at least one value higher than 0.5 °C or lower than -0.5 °C), thawing degree days (TDD, obtained by the cumulative sum of the mean daily temperatures above 0 °C) and freezing degree days (FDD, obtained by the cumulative sum of the mean daily temperatures below 0 °C) according to Guglielmin et al. (2008). The active-layer thickness and permafrost presence was estimated using an algorithm in R software using the maximum and minimum means regression values.

The script (RSTUDIO TEAM, 2020) used was based on the usual CALM sensors calculations and we normalized the measures of the Ibuttons Sensors to perform the same analysis and compare the thermal temperature value among readings, and despite Ibuttons sensors have registered for every two hours, the normalization performed to the data did increase robustness to the dataset and allowed comparison to the readings made by the CALM sensors. The results obtained and the measures' comparison allowed us to elucidate the elements necessary to infer about the relation of GST, permafrost continuity, active-layer thickness, climatic elements' influence and terrain characteristics, to the pedoclimatic regime in the northwest ice-free area in Stansbury peninsula.

## 7. RESULTS

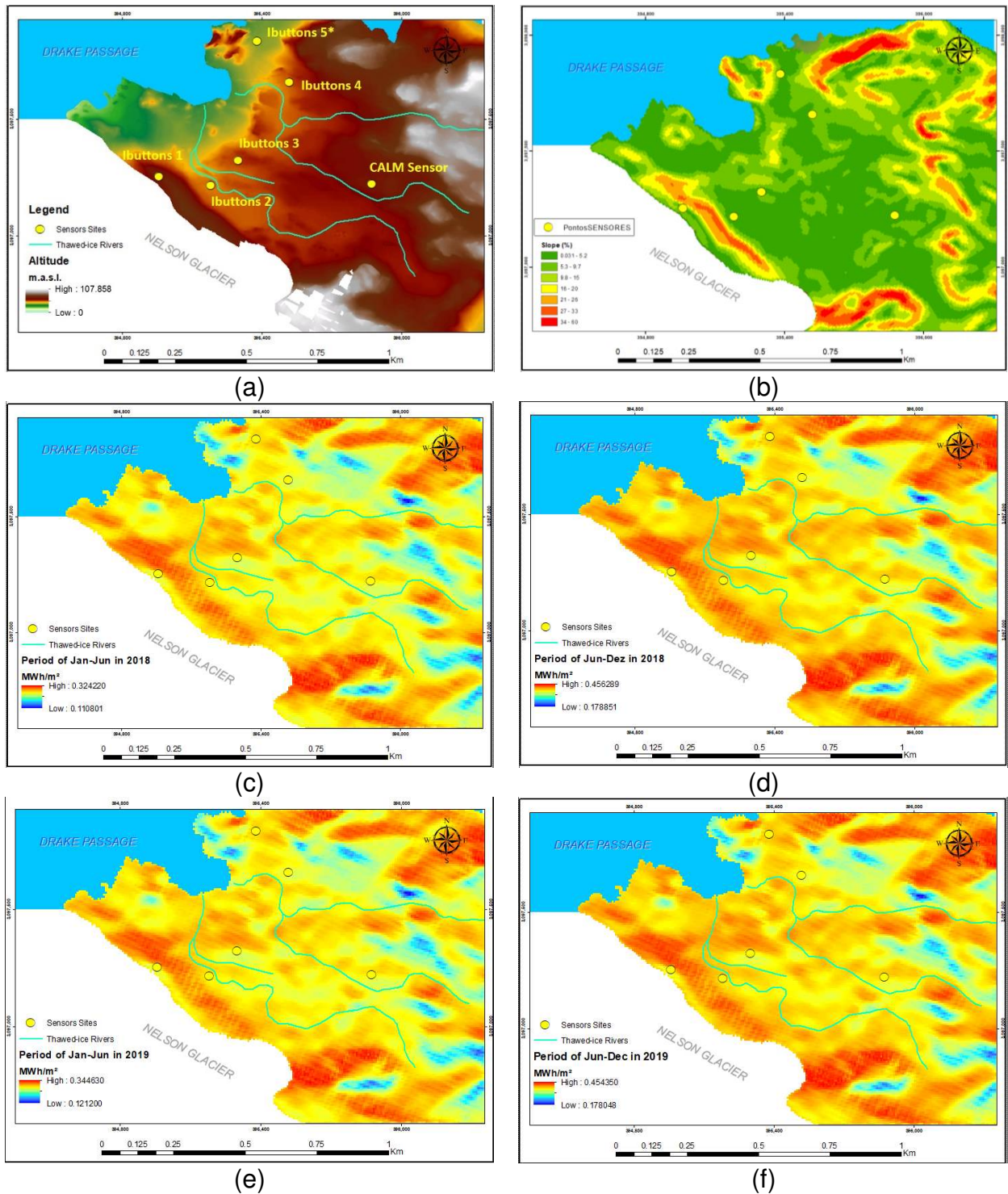
### 7.3. Geospatial and Terrain Analysis

From the aero-photogrammetric survey performed with the UAV, we presented the resulting maps for: Digital Elevation Model (DEM), Slope and Solar Radiation, assuming modeling values of radiation in a perfect condition of weather, considering no variations due to clouds cover. The period considered was splitted in two, from January to June, and July to December, for both years (2018 and 2019), resulting in four solar radiation maps.

The relief did influence and landscape exposition as shown in solar radiation maps (Figure 6) has slight differences across the landscape since the altitude varied between 7 to 62 m.a.s.l regarding Ibuttons' Sensors 5 to 1, respectively. The lowest sensor (Ibuttons 5) was installed near the beach, next to Fildes' Strait, but has no temperature information, because we could not recover the Ibuttons' sensors due to ice-cover presence during the rescue mission in December 2019. This situation indicates that GST in that site was beneath 0°C. Permafrost and active layer can be considered in these situations as continually frozen at the moment.

Field observations during both missions to the area, in addition to image analysis, such as those available on Google Earth, were considerate to evaluate the evolution of ice-cover and its' thawing and freezing process (Figure 3). All these elements associated with the DEM, Slope percentage and solar radiation maps, suggest that there is a very short period of time that soils where Ibuttons' sensor 5 was installed are exposed without snow cover.

Figure 6 – Raster Images of digital elevation model (a), slope percentage (b), and solar radiation mean from the periods from: January to June, 2018 (c); June to December 2018 (d); January to June of 2019 (e); and June to December of 2019, with the location of the pedoclimatic sensors in Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctic maritime



The average estimative of solar radiation ( $\text{MWh m}^{-2}$ ) during the research period in the Stansbury peninsula is detailed in Table 2. Mean values to the period from January to July 2018 resulted of  $0.37 \text{ MWh m}^{-2}$ , from June to December 2018 values of  $0.27 \text{ MWh m}^{-2}$ , from January to June 2019 of  $0.0.37 \text{ MWh m}^{-2}$  and from June to December 2019 average solar radiation value of  $0.25 \text{ MWh m}^{-2}$ . Solar Radiation incidence in an area is a considerable factor when discussing GST; however, as demonstrated in Table 2, no statistical difference among the soil profiles was observed.

Table 2 – Numerical Results to elevation, slope and mean solar radiation incidence in MegaWatt hour per square meter ( $\text{MWh m}^{-2}$ ) during study period (January to June of 2018; June to December of 2018; January to June of 2019; June to December of 2019), and profiles where pedoclimatic monitoring sensors were installed in Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctic maritime.

Soil Profiles	Sensors	Mean Solar Radiation ( $\text{MWh m}^{-2}$ )				Elevation (m)	Slope (%)
		2018-I	2018-II	2019-I	2019-II		
A	lbutton 1	0.25	0.37	0.27	0.37	61.68	2.2
B	lbutton 2	0.26	0.38	0.28	0.38	29.64	2.0
C	lbutton 3	0.24	0.36	0.26	0.36	31.45	2.9
D	lbutton 4	0.24	0.36	0.26	0.35	20.40	6.5
E*	lbutton 5*	0.27	0.39	0.29	0.39	6.87	5.2
F	CALM	0.26	0.38	0.28	0.38	34.49	2.0
<i>Min. value</i>		<i>0.35</i>	<i>0.26</i>	<i>0.36</i>	<i>0.24</i>	<i>6.87</i>	<i>2.02</i>
<i>Max. value</i>		<i>0.39</i>	<i>0.29</i>	<i>0.39</i>	<i>0.27</i>	<i>61.68</i>	<i>6.52</i>
<i>Mean value</i>		<i>0.37</i>	<i>0.27</i>	<i>0.37</i>	<i>0.25</i>	<i>30.76</i>	<i>3.46</i>
<i>Median</i>		<i>0.37</i>	<i>0.27</i>	<i>0.38</i>	<i>0.25</i>	<i>30.55</i>	<i>2.52</i>
<i>Standart-deviation</i>		<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>18.17</i>	<i>1.92</i>

The slight differences between the incidence of average solar radiation on the ice-free area during the year, and among sensors, indicates that other factors related to the coverage and occupation of the areas, the influence of the thawing ice rivers and hydrophilic conditions, can be more determinant in the thermal variation of soils.

#### 7.4. Geoenvironments and Soil Characteristics

The most expressive characteristic of the soils where the sensors (Table 3) were installed is that four of them contain more than 35% (by volume) of rock fragments and gravel with diameters greater than 2 mm, within shallow depths (less than 50 cm) (WRB, 2014). The Skeletal characteristic suggests that soil texture can be decisive to determine the pedoclimatic regime of soil, once higher contents of fine material suggest a higher buffer effect regulating the temperature regime. At the microscale, variations of thermal properties can occur according to the presence of boulders of differing lithologies (e.g., basalt and granite) and pockets of silty-clay matrix (GUGLIELMIN, 2006).

In those soils where Skeletal character was identified, clay content varied from 29 % in the B horizon of *Turbic Skeletic Cryosol (Fluvisol)* to values of 16 % in C1 horizon of the *Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvisol)*. Despite the *Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)* doesn't have Skeletic character, with almost none content of gravel in superficial horizons sampled, it resulted in high values of sand (up to 88%), what indicates clearly the sediment contribution to the soil mass, at the periglacial marine terrace geoenvironment. The influence of the sea and persistent ice-cover during so much time, is considerably determinant to the GST regime, in addition to the main characteristic denoted by the fluvial influence of thawed-ice rivers, and the Oxyaquic character which indicates the constant hydromorphic condition which enhances specific buffered thermal behavior.

In this study, the soils sampled did vary from grayish-brown in Turbic Cryosols, with skeletal character, to light olive-brown to Turbic Cryosol (Fluvisol). Soil color is important to consider once the reflectance of solar radiation may be influenced by the surface albedo which is related to the source material (e.g. iron-magnesian rocks are darker, absorbing more heat energy than other andesine rocks and tuffs), the presence of plant communities and the period of persistent snow cover on the soil until total thawing, can make a difference in the thermal regime of these soils, and is registered.

Table 3 – Physical characterization of the soils where the pedoclimatic monitoring sites were allocated in Stansbury, Nelson Island, Antarctic maritime.

Sensor & Horizons	Depth (cm)	Dry Color	Sand Silt Clay Gravel				Textural Class
			%				
<b>Ibutton 1 – Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)</b>							
C1	0-15	2,5 YR 4/2	60	20	20	53	Sandy Loam
C2	15-28	2,5 YR 4/2	52	24	24	66	Sandy Loam
C3	28-45+	5 Y 4/1	48	28	24	72	Sandy-Clay-Loam
<b>Ibutton 2 – Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)</b>							
A	0-10	2,5 YR 5/4	37	38	25	45	Loam
C1	10-20	2,5 YR 5/4	36	34	29	63	Clay Loam
C2	20-40	10 YR 5/3	59	20	21	65	Sandy-Clay-Loam
<b>Ibutton 3 – Turbic Cryosol (Fluvic)</b>							
A	0-5	2,5 Y 5/4	43	36	21	61	Loam
C1	5-20	2,5 Y 5/3	44	36	20	51	Loam
C2	20-35	2,5 Y 5/3	39	44	17	50	Loam
C3	35-60+	5 Y 5/3	42	40	18	33	Loam
<b>Ibutton 4 – Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)</b>							
C1	0-20	10 YR 4/2	57	26	17	46	Sandy Loam
C2	20-35	10 YR 4/2	61	19	20	37	Sandy Loam
C3	35-55+	10 YR 4/3	52	27	21	33	Sandy-Clay-Loam
<b>Ibutton 5 – Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)</b>							
A	0-5	10 YR 4/2	67	18	15	2	Sandy Loam
C1	5-10	10 YR 3/2	88	4	8	3	Loamy Sand
C2	10-18	10 YR 4/1	83	6	11	2	Loamy Sand
C3	18-25	10 YR 4/2	84	6	10	18	Loamy Sand
C4	25-45+	10 YR 3/2	84	5	11	48	Loamy Sand
<b>CALM – Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)</b>							
C1	0-25	10 YR 4/2	45	39	16	76	Loam
C2	25-90+	10 YR 5/2	48	31	21	69	Loam

The soils varied from 40 to 90+ cm depth, and was impossible to reach 100 cm in depth for classifying the horizons, while the only profile possible to reach more than 60 cm depth was achieved in the CALM sensor installation, with a depth slightly greater than 90 cm. The influence of shallower soils may be attributed to permafrost presence with

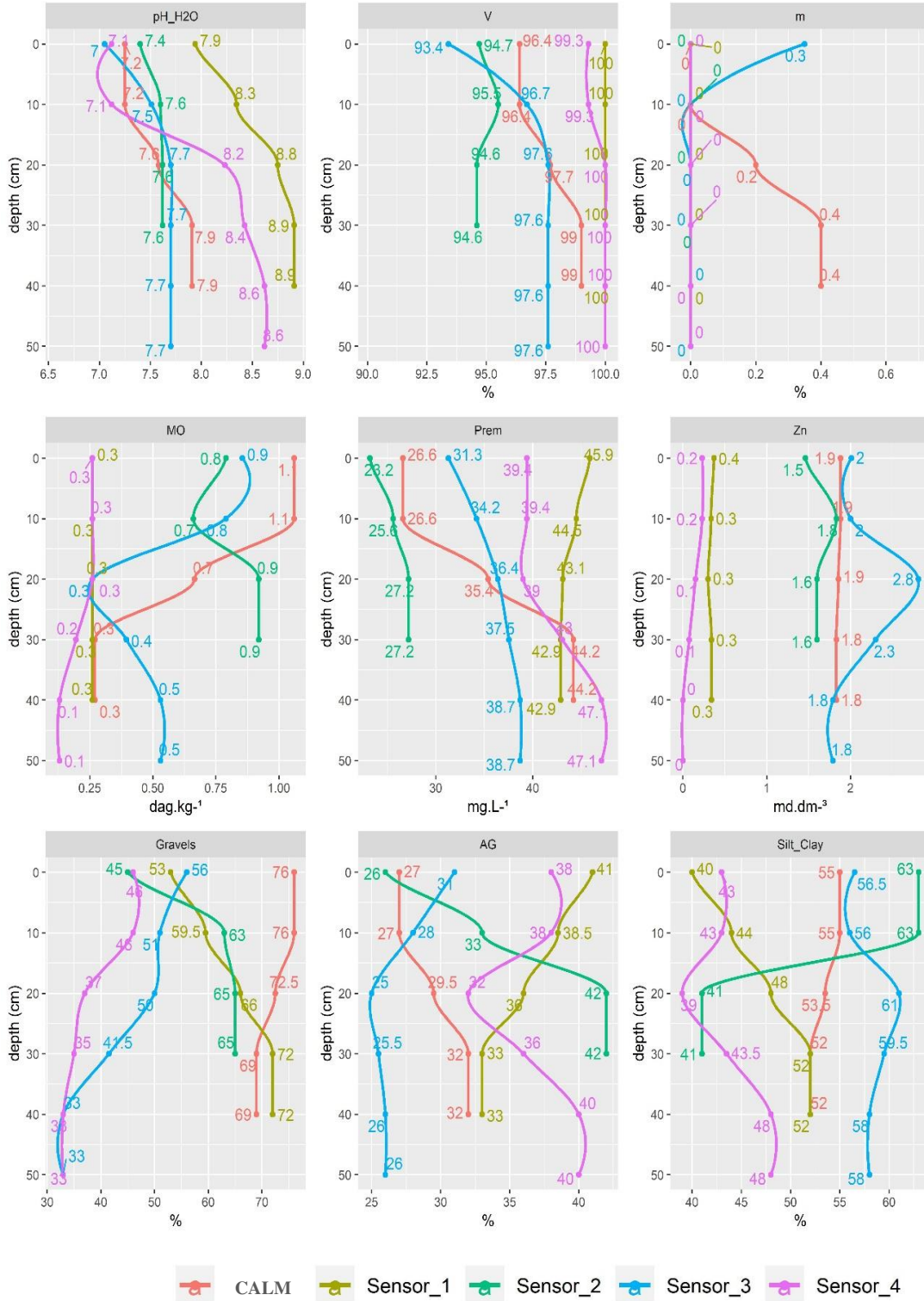
high content of water, such as other aspects that could be investigated about the soil conditions and attributes which gathers soils samples with similar characteristics, aiming to characterize the pedoclimatic regime drivers.

Using Algorithm for Quantitative Pedology (AQP) in R (BEAUDETTE et al., 2013) is possible to illustrate the chemical and physical characteristics behavior in soil depth (Figure 7) as Ibutton 1 Sensor is found in the most alkaline soils, with maximum base saturation, with high contents of remaining phosphorus, and high percentages of coarse material, while the textural relationship shows high contents of silt and clay. As this sensor presents the lowest average temperature records of all sensors, which may, according to factors influencing the transmission of thermal energy through the profile, which can be evaluated in robust series crossing the in-depth percentage data and historical readings from monitoring sites to assess more significant trends in this regard.

The variation in organic matter contents was low in total values, and compared to each other there is a difference, for example, the soils where Ibutton 2 was installed showed the triple that of other sites. It is possible to observe the behavior of OM at the CALM Sensor site, where in the superficial horizon there is higher content, and it decays strongly from ten centimeters until reaching levels of  $0.3 \text{ dag kg}^{-1}$  from thirty centimeters down. This behavior for MO was very similar for soils where Ibutton 3 was installed, with differences for the other profiles.

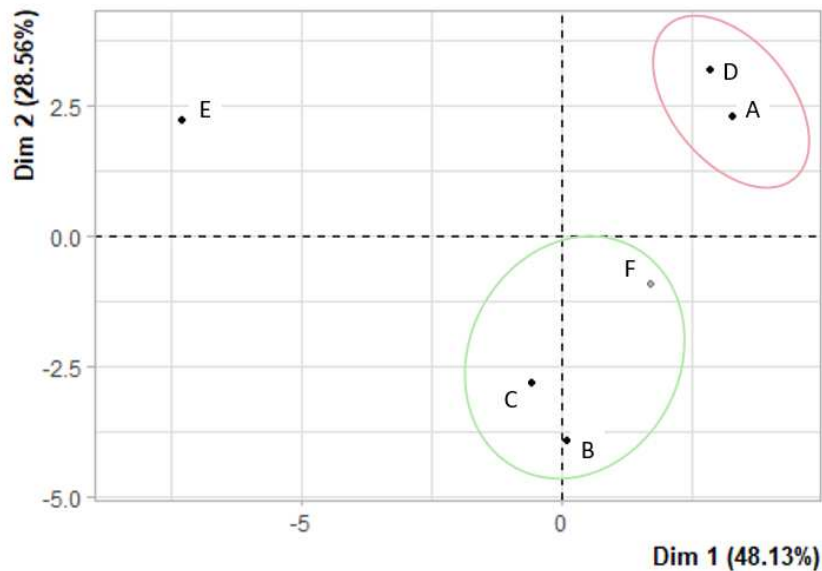
The zinc grades that clearly separate the monitoring sites into two grade groups varied strongly, whereas in depth there was not such a strong change. Soils where Ibutton 1 and Ibutton 4 were installed, had similar levels of zinc, both showing ice influence, on the one hand in the vicinity of the jelly, on the other by the frozen layer for a longer period than in the rest of the area. The other soils (where Ibutton 2 and 3 were installed) have had higher zinc contents.

Figure 7 – Vertical physical and chemical content behavior of the soil profiles where CALM Sensors and Ibutton Sensors were installed in Stansbury peninsula, Nelson Island.



To perform an accurate investigation about the soil characteristics that may have influence over the thermal behavior of the GST, we used a Principal Component Analysis (PCA) on the physical and chemical results, aiming to identify other correlations among the soil conditions. PCA results shown in Figure 8 elucidate these differences, where dimension 1 explained 48.11% and dimension 2 explained 28.56%, separating the six soil profiles where the sensors have been installed in three clusters.

Figure 8 – Individuals factor map and Hierarchical tree of the Soil Profiles (A, B, C, D, E and F) area gathered in three group' clusters.



Dimension 1 particularly distinguishes Soil Profile - E (to the left of the graph, characterized by a strongly negative coordinate on the axis). These Soil form a cluster sharing high values for the variables DP (Particle density), m, Al (aluminum) and Sand (variables are sorted from the strongest). - low values for the variable S\_A (silt and Clay). Variables pH<sub>2</sub>O and V are highly correlated with this dimension (respective correlation of 0.91, 0.93). These variables could therefore summarize themselves the dimension 1.

Dimension 2 opposes Soil Profiles D and A (to the top of the graph, characterized by a strongly positive coordinate on the axis) to Soil Profiles B, C and F (to the bottom of

the graph, characterized by a strongly negative coordinate on the axis). The group in which the Soil Profiles D and A stand (characterized by a positive coordinate on the axis) shares high values for the variables P (phosphorous) and pKCl, and low values for the variable H+Al. The group in which the Soil Profiles B and C stand (characterized by a negative coordinate on the axis) is sharing high values for the variables Zn, MO and Mg (variables are sorted from the strongest).

The results indicate that similarities among sampled soils in three clusters differed the Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic) considerably from the others, which could be confirmed not only by the difference among physical characteristics, but also with morphological and the geoenvironmental position in the landscape. This soil profile was opened at 7 m.a.s.l. and 780 meters from Nelson Glacier, very close to the beach of Fildes' Strait. We observe the strong influence of the sea over the soil in the marine terrace, so as the slope percentage (5.2%), the second higher value among the sensors' locations. Snow-cover is a determining GST buffering, as we have observed not only in the field (during both missions to the area) but also in the satellite images showing the behavior of thawing and freezing seasons (Figure 3) maintaining snow-cover in specific areas for a longer time. These results indicate that the fact of being far away from the Glacier doesn't affect considerably the thermal regime of the soil, such as the other relief factors that imposes micro-climate conditions to the pedoclimatic regime.

Soil Profiles A and D, representing Turbic Cryosol (Skeletal, Novic) and Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic) respectively, differ in elevation (62 and 20 m.a.s.l.) and glacier's distance (32 and 713 m). Despite this difference in landscape position, they were grouped together in the PCA showing chemical similarities of phosphorous content and pKCl. Mean solar radiation (Table 2) during the sampled period is also similar to both soils, and what differs the most is the slope percentage (2.18 to 6.52%). These both sandy loam soils, are similar to the morphological scope, showing slight increase in textural class and for chroma as it goes deeper in the soil profile.

## 7.5. Pedoclimatic Monitoring

After soil characterization, we present in Table 3 the descriptive statistics resulting from the pedoclimatic monitoring carried out on the northwest of Stansbury peninsula. For the CALM sensor at five depths (5, 10, 30, 50 and 100 cm), and the lbuttons sensors 1 and 2 at three depths (10, 50 and 100 cm) and for the lbuttons 3 and 4 sensors at depths of 50 and 10 cm, respectively.

Table 3 – Descriptive Statistic's Results of the temperatures registered by the CALM sensor and the lbuttons Sensors, in the respective depths of analysis.

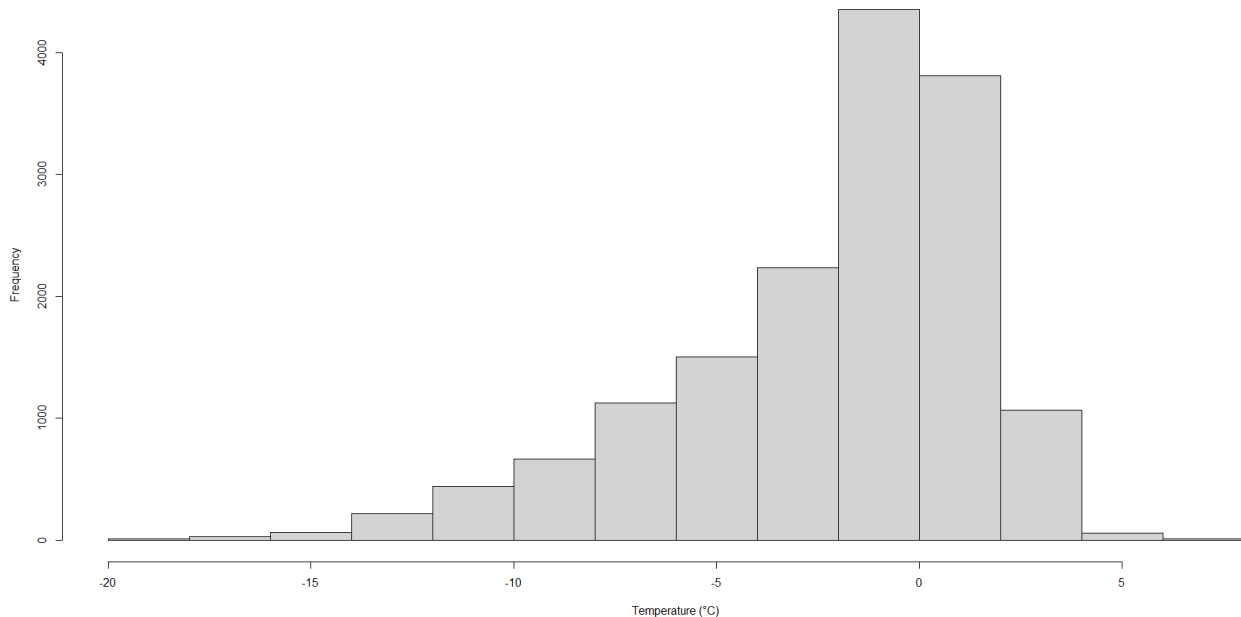
Sensor	AIR	CALM				lbuttons_1			lbuttons_2		
depth (cm)		5	30	50	100	10	50	100	10	50	100
Tmin	18.90	-4.76	-4.01	-3.69	-3.30	-12.00	-10.50	-5.00	-12.00	-6.50	-3.00
Tmax	6.80	8.48	3.00	1.75	0.49	14.00	4.00	0.50	24.00	5.00	1.00
Mean	-2.21	-0.96	-0.93	-0.93	-0.96	-1.42	-1.71	-1.73	-0.99	-0.79	-0.89
Median	-1.16	-0.62	-0.47	-0.49	-0.50	-1.50	-1.50	-1.50	-1.00	-0.50	-0.50
Assimetry	-1.09	0.63	-0.16	-0.44	-0.69	0.09	-0.50	-0.26	0.72	-0.05	-0.32
Kurtosis	1.01	0.81	-0.67	-0.81	-0.84	0.29	-0.36	-1.53	3.05	-0.85	-1.50
SD	3.79	2.03	1.49	1.30	1.05	3.31	2.66	1.68	3.67	2.19	1.20

Generally evaluating the results presented in Table 3, maximum temperatures registered by all the sensors show that the closer to the Nelson's Glacier, cooler was the maximum soil temperature registered at 100 cm, comparing lbutton's 1 Sensor and CALM Sensor, distant 32 and 590 meters from the Glacier, respectively. The latter Sensor is located more to the central region of the peninsula. The lbutton 2 Sensor, despite that it is located more close to the Glacier then CALM Sensor, it did register maximum temperatures above the isothermal interval of 0.5°C.

The temperature data have shown minimum air temperature records of -18.9 ° C, recorded on July 3rd, 2018 at 11 A.M. and the maximum temperature record of 6.8 ° C on November 21th, 2019 at 2 P.M. Average temperature measure during the period was - 2.21 ° C. The standard deviation of the air temperature readings of 3.79 ° C, asymmetry,

and kurtosis, demonstrates that the greatest heterogeneity of temperature readings was the air temperature, in addition to being characteristic of surface depths, where the variation was also more heterogeneous. The histogram, showing the readings distribution for air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) can be observed in Figure 9. Note that major readings are around  $0^{\circ}\text{C}$  and most of them have registered negative readings rather than positive along the sampled period of time.

Figure 9 – The histogram of air temperature made by the CALM Sensor is used as a reference for local air temperature in Stansbury peninsula, Nelson Island, Antarctic maritime.



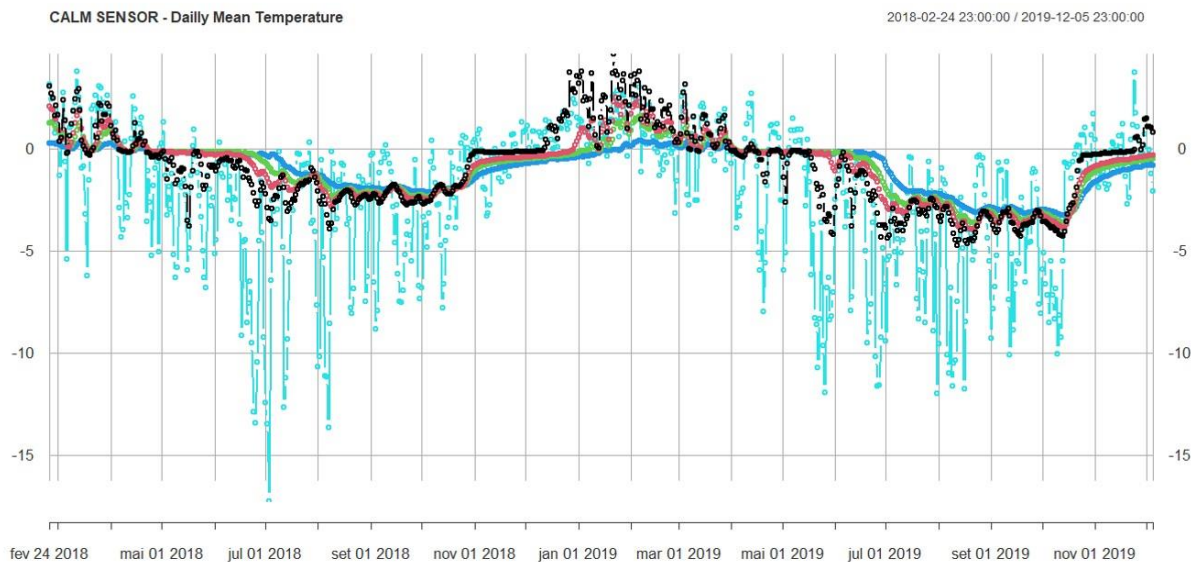
#### 7.5.1. Permafrost monitoring by CALM Sensor

For CALM sensor, a more robust monitoring system usually installed across Antarctica to monitor GST, we observed that at 5 cm depth from the ground, a minimum temperature of  $-4.7^{\circ}\text{C}$  was recorded on 12<sup>th</sup> August, 2019 at 8 P.M. and the maximum temperature recorded was  $8.5^{\circ}\text{C}$ , on 22<sup>th</sup> January, 2019 at 4 P.M. The average

temperature was  $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with a standard deviation of  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , indicating by the asymmetry and kurtosis the discrete variable behavior of the temperature records, oscillating around  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

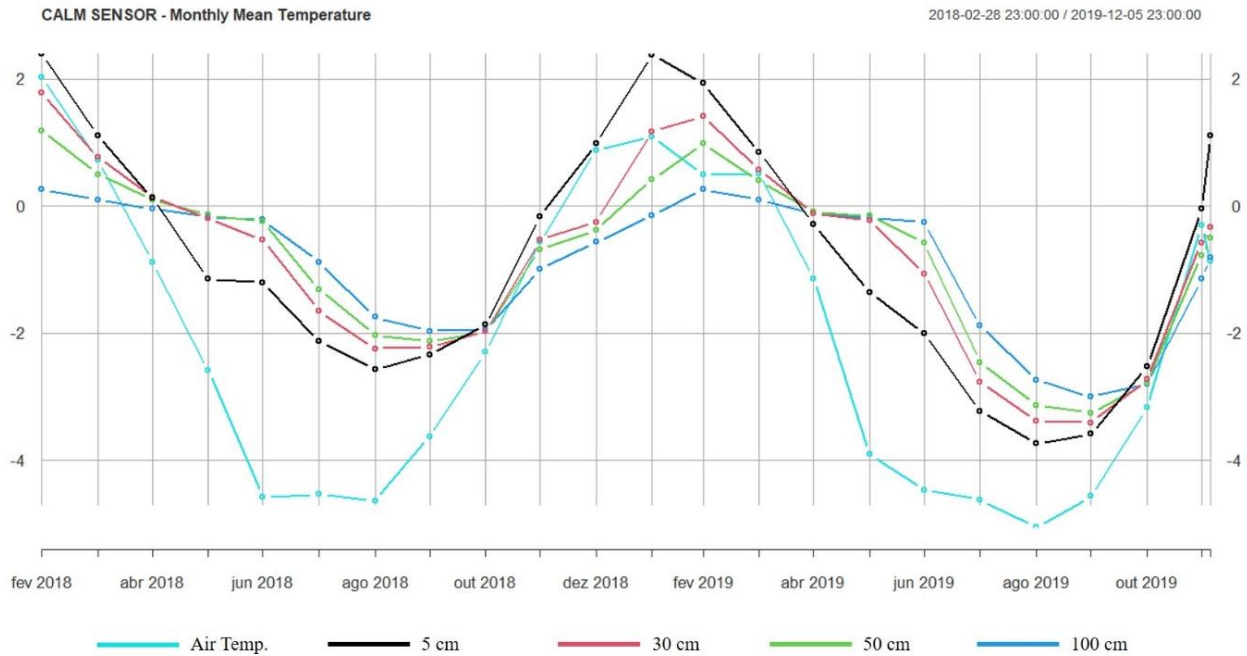
This layer is much exposed to atmospheric conditions and the high variation in air temperature influences the thermal regime of the soil at 5 cm. However, the amplitude is discrete compared to air temperature variation (Figure 10), which suggests the buffering effect in pedoclimatic variation even at small depths in soils with Skeletic character like the Cryosol where the CALM sensor was installed.

Figure 10 – Graphic showing the daily mean temperature measures for air temperature and the CALM sensor readings for 5, 30, 50 and 100 cm, respectively, for 21 months.



The monthly averages recorded in the CALM Sensor in the two years of monitoring are shown in Figure 11. It is observed how the second year presented lower averages than in the first year both in air temperature and in soil temperature, in all depths analyzed.

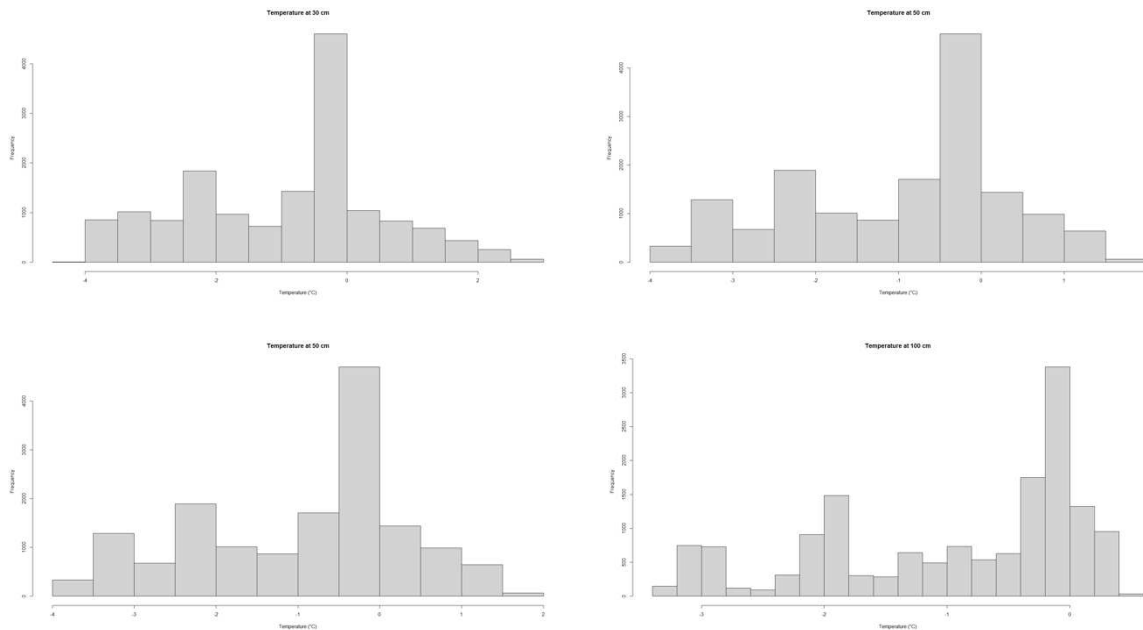
Figure 11 – Monthly mean temperature measures for Air temperature and CALM sensor's depths of 5, 30, 50 and 100 cm.



The monthly average readings recorded by the CALM Sensor demonstrate that the differences between the maximum and minimum average air temperatures during the sample period are striking. With records of temperatures below  $-4^{\circ}\text{C}$  in June and August 2018 and for a longer period in 2019, keeping below that temperature between June and September.

At a depth of 10 cm, the Type E (chromel-constantan) Thermocouple soil temperature sensor malfunctioned and has not registered temperatures properly. To 30 cm depth we registered a minimum temperature of  $-4^{\circ}\text{C}$  on August 22th, 2019 at 3 A.M., and the highest temperature of almost  $3^{\circ}\text{C}$  on January 23th, 2019 at midnight. This result shows the effect what sun incidence during the “night” is constant at the peak of the summer, and high temperatures may occur even during the night, and the soil keeps the buffer effect of maintaining heat for some period after the most incident sun light to the soil.

Figure 12 – Histograms of air and Control Site temperature readings at depths of 5, 30, 50 and 100 cm.



At the depth of 50 cm, we registered  $-3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , also on August 22th at 9 P.M., and maximum temperature registered of  $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  on February 7<sup>th</sup>, 2019 at 5 A.M. The temperature registered at 50 cm shows that a buffer effect occurs as it deepens in the soil profile, and slightly protects it from the constant and fast atmosphere temperature alterations.

At 100 cm depth we observe this behavior with a minimum temperature registered of  $-3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and a maximum of  $0.485\text{ }^{\circ}\text{C}$ , also more discrete alteration. The standard deviation confirms this behavior as it diminishes while depths increase (Table 3), so as can be confirmed by the histograms presented in figure 12, showing the frequency of the temperature readings made by CALM sensor.

### 7.5.2. Permafrost monitoring with Ibuttons Sensors

In general, Ibuttons have registered much lower temperatures at superficial depths than CALM Sensor, which indicates that proximity to the Glacier may have some influence over the pedoclimatic regime. With the temperature records presented in Table 3 it is possible to observe that Ibutton's Sensors, at 10 cm depth, reached a minimum temperature of  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  for both Ibutton 1 and Ibutton 2 sensors. Ibutton 4 Sensor, which also had the 10 cm sensor collected, has recorded  $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  as minimum temperature during the sampled period. For the maximum temperature, the three sensors recorded 14, 24 and  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. These results shown that Ibuttons did record almost two times the temperature values recorded by the CALM sensor (Table 3), at this depth.

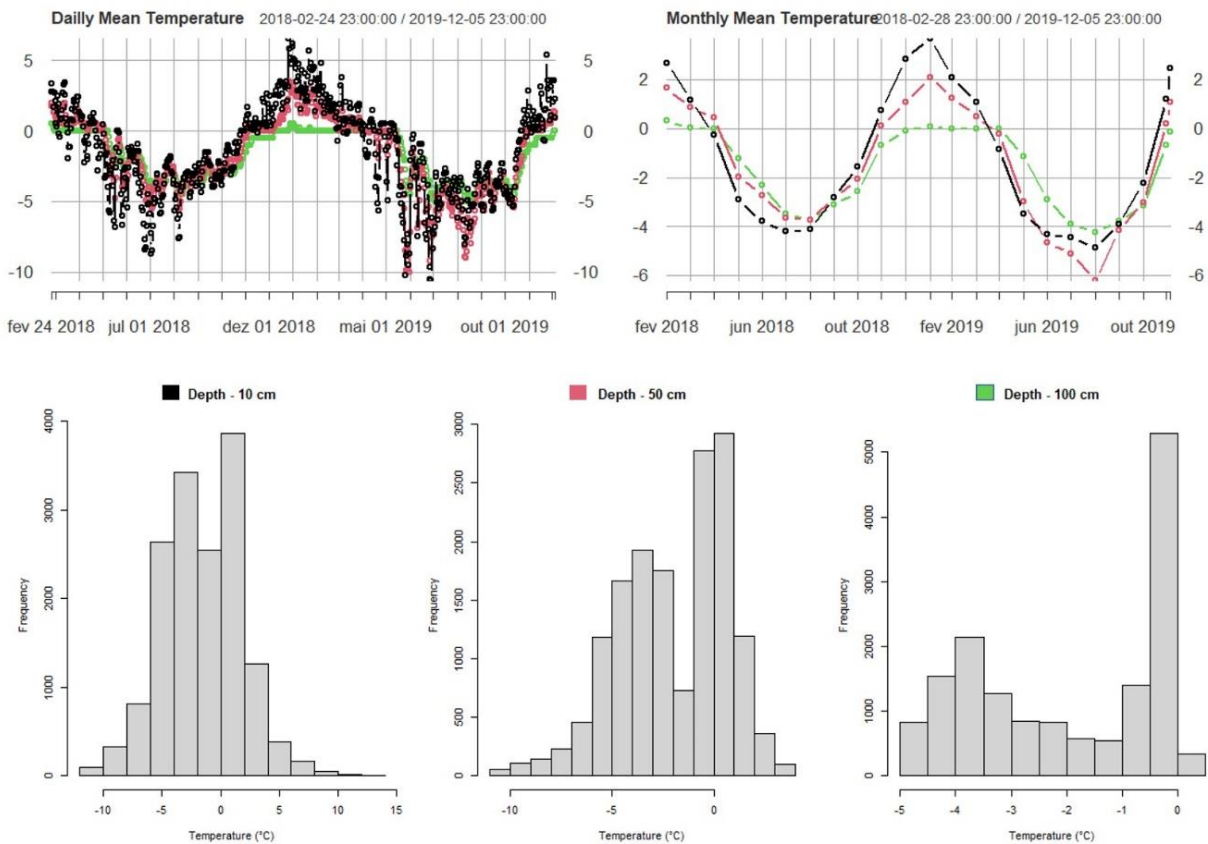
For 50 cm, Ibutton's Sensors 1, 2 and 3 had temperature data collected. The minimum temperature of each Ibuttons Sensors was  $-10$ ,  $-6.5$  and  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively, and the maximum temperature was 4, 5 and  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . For 100 cm, only Ibutton sensors 1 and 2 were entirely collected (all three depths installed have been collected) and provided the complete data-set planned in the beginning. Therefore, these are the sensors chosen to be compared with the CALM system in the further detailed analysis performed in this study.

#### 7.5.2.1. IButton 1 Sensor

Ibutton 1 Sensor was installed in a Turbic Cryosol (Skeletal, Novic) at the top of the moraine next to Nelson Glacier (32 meters), and 62 meters above sea level. During soil profile description, we reached 90 cm because the bottom layer was frozen. The soil mass presents a lot of rocky and clayed material, without A horizon, neither vegetation cover. Evidences of cryoturbation were observed of a mix material of basalt, andesite and volcanic tuff. A fine material covering the moraine with bouquets commonly observed of 30 to 40 cm, and fragments commonly seen of 15 to 20 cm. For the Ibutton Sensor 1 the histogram shows the temperature readings range and the daily and monthly graphs detail

the behavior of the readings along the monitoring period, shown in figure 13, where the majority of the readings did maintain temperature under 0°C.

Figure 13 – Daily and Monthly mean temperature measures for Ibutton 1 sensor's depths of 10, 50 and 100 cm and histogram showing the temperature registered during the period of February/2018 to December/2019.

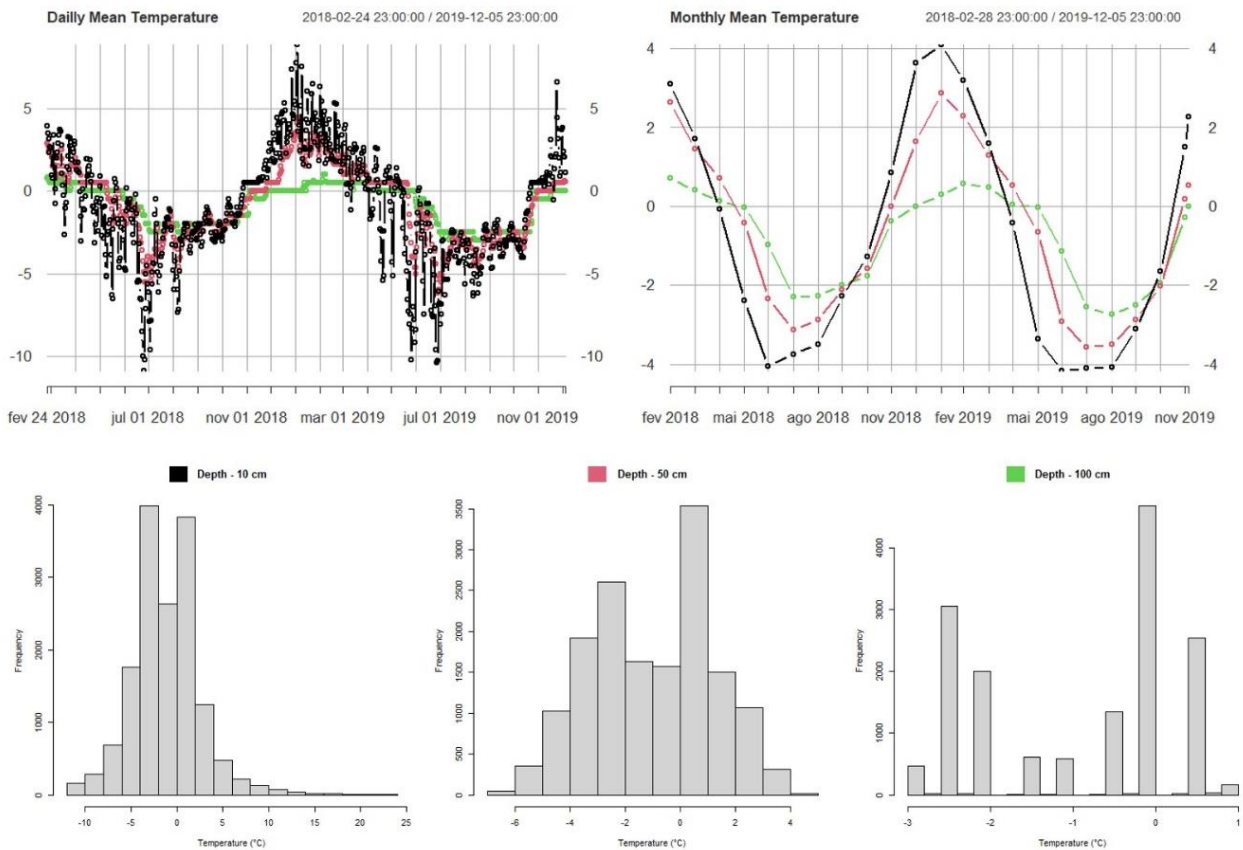


#### 7.5.2.2. IButton 2 Sensor

Ibutton 2 Sensor was installed in a Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic) at a slope local area surrounded by thawed-ice rivers, at the moraine base. Flat local relief with no evidence of cryoturbation neither patterned soils. The sensor was installed deeper than it was possible to reach for soil profile description, with the help of a straight digger. The soil

has much gravel in its ground mass and was difficult to dig. The sensor at the top of the moraine next to Nelson Glacier (183 meters), and 30 meters above sea level. During the soil profile description, we reached 90 cm because the bottom layer was frozen. Anyway, here the temperature variation demonstrates a higher amount of readings over 0°C, indicating that permafrost is present, but discontinuous.

Figure 14 – Daily and Monthly mean temperature measures for Ibutton 2 sensor’s depths of 10, 50 and 100 cm and histogram showing temperature registered during the period of February/2018 to December/2019



## 7.6. Comparison of the pedoclimatic behavior registered by the sensors

From the temperature recorded by the three sensors, we performed the comparison of Thaw days (TD), Freeze Days (FD), Isothermal Days (ID) and freeze-thaw days (FTD). Humidity was also recorded at two depths (30 and 80 cm) to better understand the cycle of water availability due thawing (Figure 15), and to infer about permafrost continuity and active-layer thickness.

It is possible to observe the variation of air temperature, where TD occurred during February and May, and that the summer of 2018-2019 has had particularly more TD, up to 15 days in December 2018, almost the same number of TD as occurred in March 2018 (16 days). However, the end of summer in 2017-2018 was more abrupt and had less TD (less 27 days), while 2019 did sum 59 TD from November 2018 to May 2019, with means values of 8,5 TD per month from January to April.

The records at 5 cm depth in the CALM Sensor had 115 TD, up to 29 days in January 2019, followed by February with 26 TD. The records made by Ibutton 1 Sensor at 10 cm registered more TD (187) than Ibutton 2 Sensor (174), both with more days than CALM Sensor. For all Sensors the records point to summer 2019 as the hottest during the period of monitoring, and January as the hottest month.

As it deepens, CALM Sensor recorded at 30 cm 110 TD, up to 28 days also in January 2019. Ibuttons' Sensors 1 and 2 registered at 50 cm depth 122 and 154 TD, respectively. Both maximum records for these two Sensors were registered at January 2019. Compared to the CALM Sensor record at 50 cm, it registered only 76 TD, and the maximum record was made in February 2019 (27 TD).

At 100 cm, only Ibutton 2 Sensor did register TD (13), while CALM Sensor and Ibutton 1 Sensor didn't register TD for that depth during the monitoring period. This result

suggests maintenance of permafrost in those latter sensors' soils, and that Ibutton 2 Sensor was installed in a place where other environmental characteristics have greater influence, despite the proximity to Nelson Glacier in comparison to CALM Sensor and to the physical characteristics regarding to soil textural gradient which also has not significant differences.

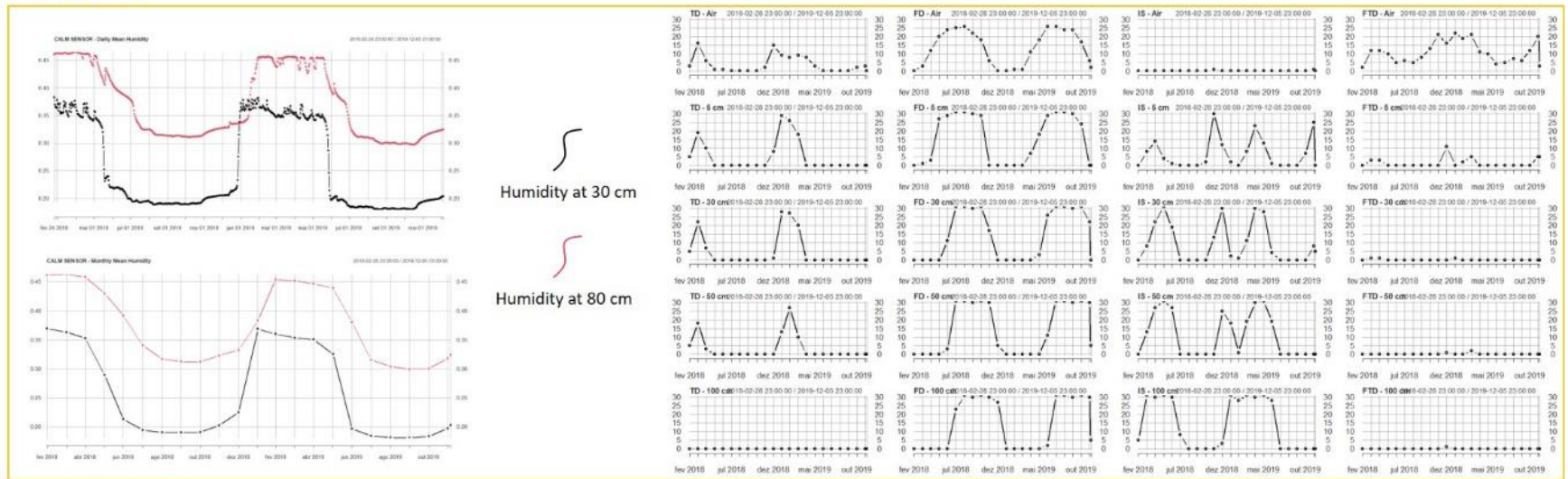
Results of FD registered to air temperature indicate 312 freeze days during the period, with only three months without any freeze day record (February 2018, December 2018 and January 2019). For all other months there was at least one freeze day record, despite summer and high-temperature measures registered. It is possible to observe at Figure 14 the graph variation showing the period from March to January, of both years, as well characteristic winter time.

Sensors results shown that same behavior but demonstrates an interesting fact due to the buffer effect that soil has in temperature variation. At the upper layer of CALM Sensor (5 cm), we registered 351 FD up to 31 in July and August from both years, which means that every day at these months had freeze days. The records shown that from May to October almost the entire month has freezing conditions. From October to April is marked with a long period (five months) without freeze days. This thermal behavior is the same as the Ibuttons' Sensors (at 10 cm depth), also showing a window of five months without FD.

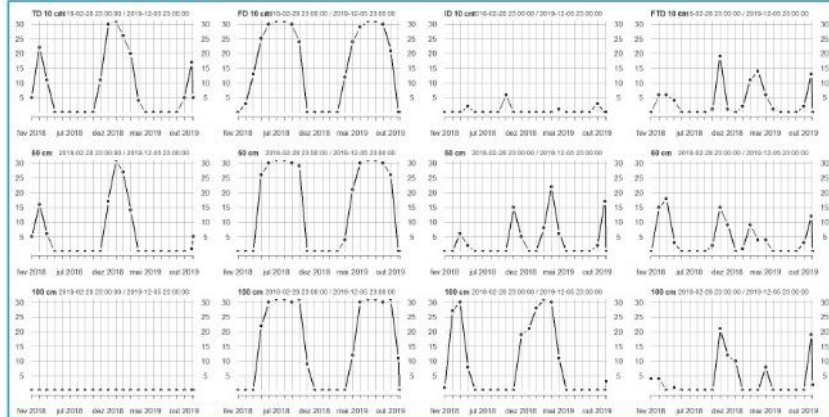
At 30cm depth CALM Sensor, 325 FD were recorded. At 50 cm, 330 FD. Compared to the Ibuttons' Sensors 1 and 2 which registered 350 and 320 FD, respectively, the three soils where the sensors were installed showed a similar buffering effect of maintaining the freezing condition during the time, very remarkable from May to November. At 100 cm depth CALM Sensor, Ibutton 1 Sensor and Ibutton 2 Sensor registered 332, 360 and 285 FD, respectively. These results suggest that proximity to Glacier and the frozen ground condition where Ibutton 1 Sensor was installed did influence the pedoclimatic regime as it deepens.

Figure 15 – Graphs of thaw days, freeze days, isothermal and freeze-thaw days for CALM Sensor, Ibutton 1 Sensor and Ibutton 2 Sensor, and Humidity graphs of two depths (30 and 80 cm) also registered by the CALM Sensor in Stansbury peninsula, Nelson Island.

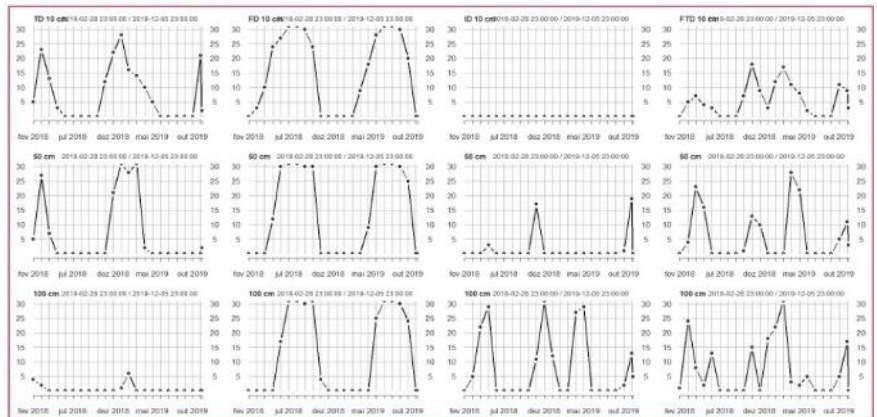
**CALM SENSOR**



**IBUTTON 1 SENSOR**



**IBUTTON 2 SENSOR**



When analyzing the records for air temperature, two ID, one in November 2018 and other in November 2019, were recorded. At 5 cm depth, CALM Sensor registered 150 ID, up to 30 ID in November 2019 and 25 ID in November 2019, both highest records made at this depth. Records made at 10 cm for Ibuttons' Sensors 1 and 2 did register 12 and 0 ID, respectively. At 30 cm depth, CALM Sensor recorded 212 ID during the period, with the highest readings in May 2018 (31 ID), December 2018 (30 ID) and April 2019 (30 ID).

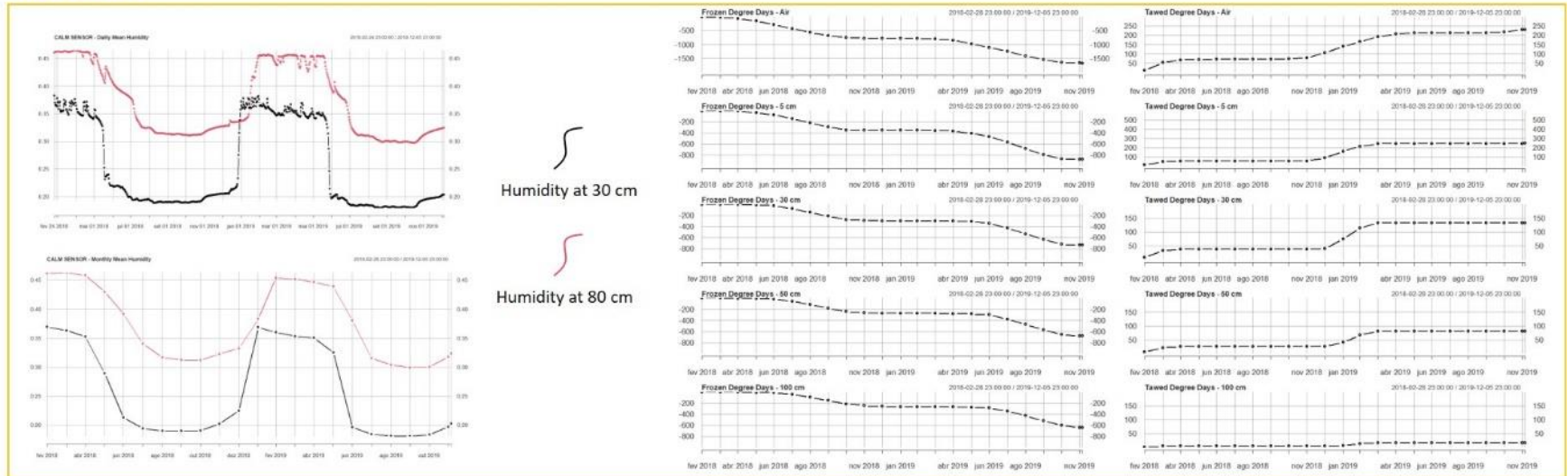
At 50 cm depth, which has records made by the three sensors, the results shown 241 ID for the CALM Sensor, 83 ID for Ibutton 1 Sensor and 40 ID for Ibutton 2 Sensor. At 100 cm depth, the records were 317, 209 and 186 ID, respectively.

Analyzing the air temperature variation on freeze-thaw days, the records registered 250 FTD, and every month during the period, have had readings. The highest occurred during 2018-2019 summer, with the highest record in January 2019 of 22 FTD. Air temperature has high variability compared to what was registered by all the sensors. At 5 cm depth, CALM Sensor did register only 3 TDD. Ibutton 1 Sensor and Ibutton 2 Sensor, at 10 cm, did register 86 FTD and 129 FTD, respectively. At 30 cm depth, CALM Sensor registered only 3 FTD.

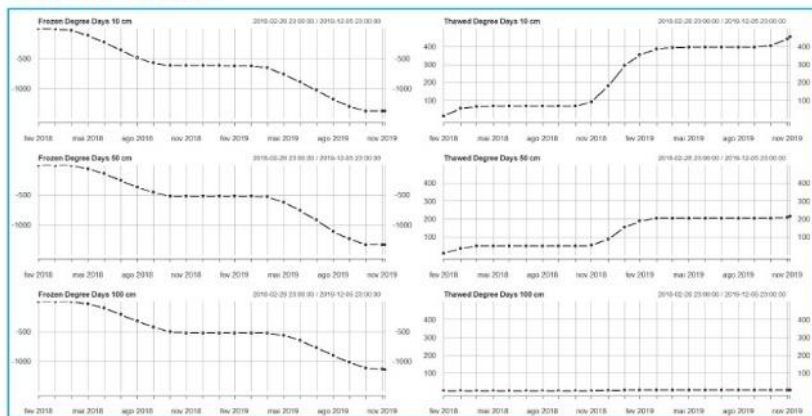
Analyzing the records made at 50 cm, CALM Sensor with 3 FTD did differ from Ibuttons' Sensors 1 and 2, which registered 95 and 136 FTD, respectively. The same thermal behavior occurred at 100 cm where CALM Sensor registered 1 FTD, also differing from both Ibuttons' Sensors 1 and 2, which registered 81 and 166 FTD. These results indicate that, the distance to Nelson Glacier, did influence even at great depths, and soil temperature varies considerably around the + 0,5 °C which is the criteria to define permafrost presence.

Figure 16 – Graphs of frozen degree days (FDD) and thawed Days degree days (TDD), recorded by CALM Sensor and Ibuttons 1 and 2 Sensors. Humidity is shown to help interpretation of the thawing-freezing process in Stansbury peninsula, Nelson Island.

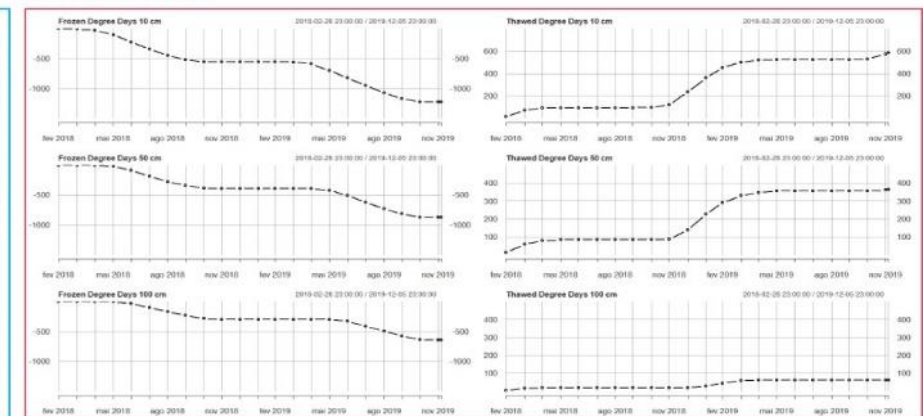
**CALM SENSOR**



**IBUTTON 1 SENSOR**



**IBUTTON 2 SENSOR**



While the behavior of the temperature readings demonstrates the character of the permafrost at the CALM-S Site monitored in a Cryosol of the Stansbury peninsula, it can be identified as a characteristic permafrost presenting periods of a strong influence of the climate in the variation of the surface temperature, during warmer months, resulting in freeze-thaw cycles to the other soils sampled with Ibuttons' sensors.

The results referring to Thawing Degree Days (TDD) regarding to the cumulative sum of the mean daily temperatures above 0 °C, are presented in Figure 16. The graphs show over the 23 months, air temperature reaching TDD of 230 °C day. Contrast with CALM Sensor which summarized at the different layers: 250 °C day (5 cm), 133 °C day (30 cm), 80 °C day (50 cm) and 64 °C day (100 cm). Ibutton 1 Sensor summarized TDD of 455 °C day (10 cm), 215 °C day (50 cm) and 6 °C day (100 cm). Ibutton 2 Sensor summarized TDD of 586 °C day (10 cm), 364 °C day (50 cm) and 61 °C day (100 cm).

The Freezing Degree Days (FDD) obtained by the cumulative sum of the mean daily temperatures below 0 °C were -3229 °C day (CALM Sensor), -2623 °C day (Ibutton 1 Sensor) and -2433 °C day (Ibutton 2 Sensor). Regarding to the different layers, CALM Sensor summarized FDD of - 874 °C (5 cm), - 735 °C day (30 cm), - 683 °C day (50 cm) and - 1670 °C day (100 cm).

Results of Ibutton 1 Sensor at the different layers summarized TDD of: -1377 °C (10 cm), - 1329 °C and - 1133 °C (100 cm). Ibutton 2 Sensor summarized TDD of: -1226 °C day (10 cm), - 875 °C day (50 cm) and - 639 °C day (100 cm). Note the differences among the sensors, which at around 30 and 50 cm did have agreement in the thermal behavior among CALM Sensor and Ibutton 2 Sensor, while Ibutton 1 Sensor had almost the double TDD than other two sensors suggesting that proximity to Nelson Glacier may have influenced major days of freezing temperatures at all layers.

To elucidate these variations across the three Sensors, Figure 17 shows the First Differences (FD) registered for each layer and also for air temperature. The plot of first differences of the hourly measurements gives us an idea of periods with great temperature oscillation. The graph shows a variation over the readings for air temperature during all

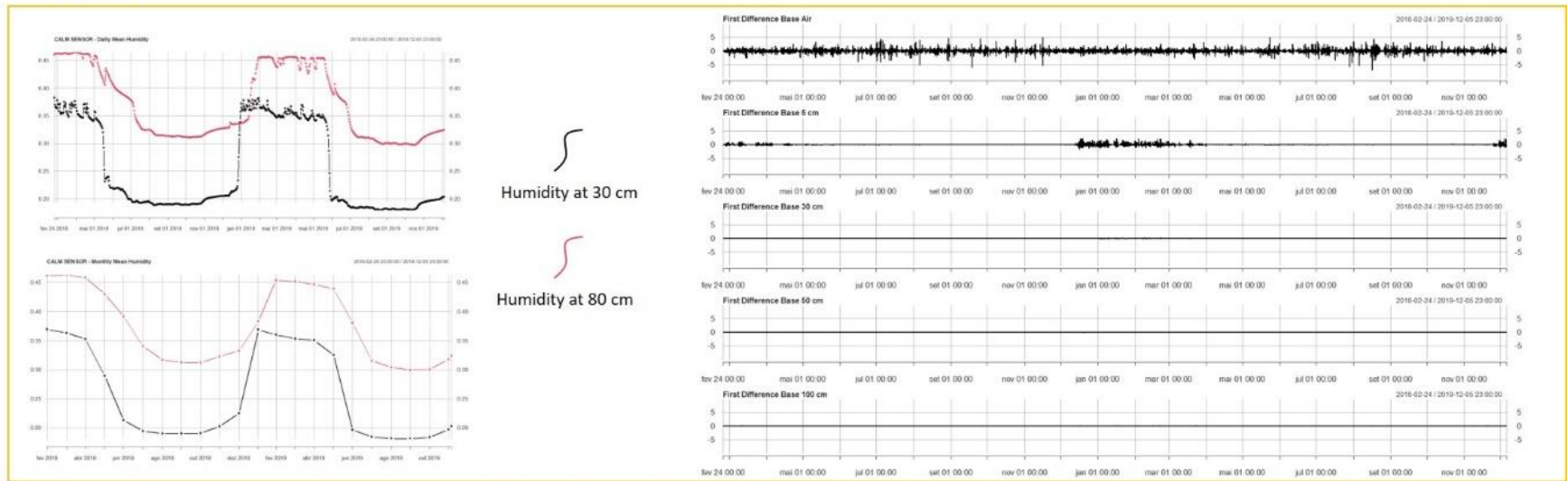
the sampled period, what is expected as air temperature changes frequently during the day.

Regarding to pedoclimatic behavior comparing different layers, for all sensors, at the surface it had higher variation for the three soils sampled. Accordance to summer season can also be noted as FD were concentrated from November 2018 to March 2019 with more expressive disturbance as shown in the graph, than other periods. Even so, it can be noted that disturbance began again after November 2019. From 50 to 100 cm, neither of the sensors did registered expressive FD.

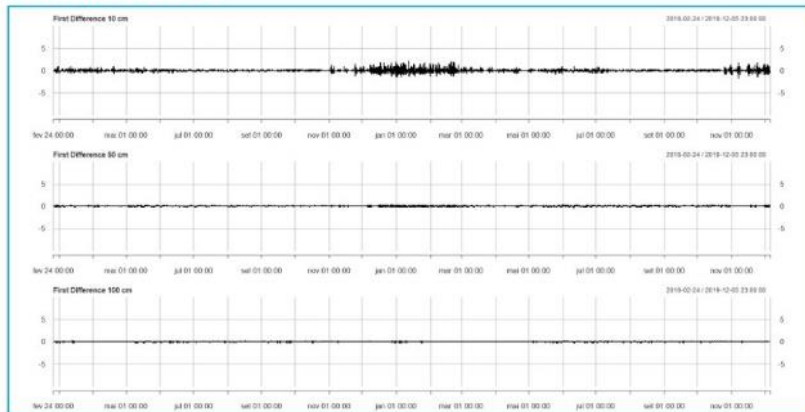
The decomposition of the time series (Figure 18) comparing the different behavior for the three sensors' layers reveals a great seasonal component associated with summer for all Sensors, with most of the noise also concentrated in the warmer months. At 50 cm of the CALM Sensor the behavior is more erratically, while both Ibuttons' sensors had more concentrated seasonal behavior during summer. The seasonal effect at 100 cm is shifted ahead, while noise is reduced. These indicate a small trend of reducing temperature readings, which will be discussed ahead with the time series modeling evaluation.

Figure 17 – Graphs presenting the First Difference (FD) registered by the CALM Sensor and Ibuttons Sensors 1 and 2. Humidity is also shown to help interpretation the pedoclimatic regime of the three soils in Stansbury peninsula, Nelson Island.

**CALM SENSOR**



**IBUTTON 1 SENSOR**



**IBUTTON 2 SENSOR**

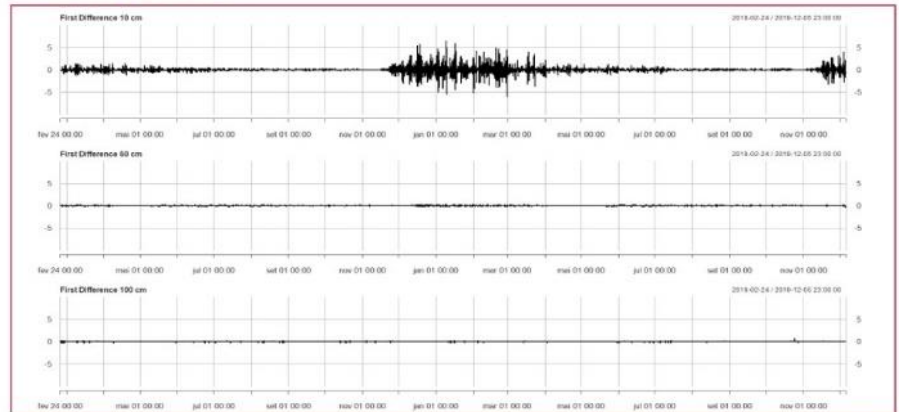
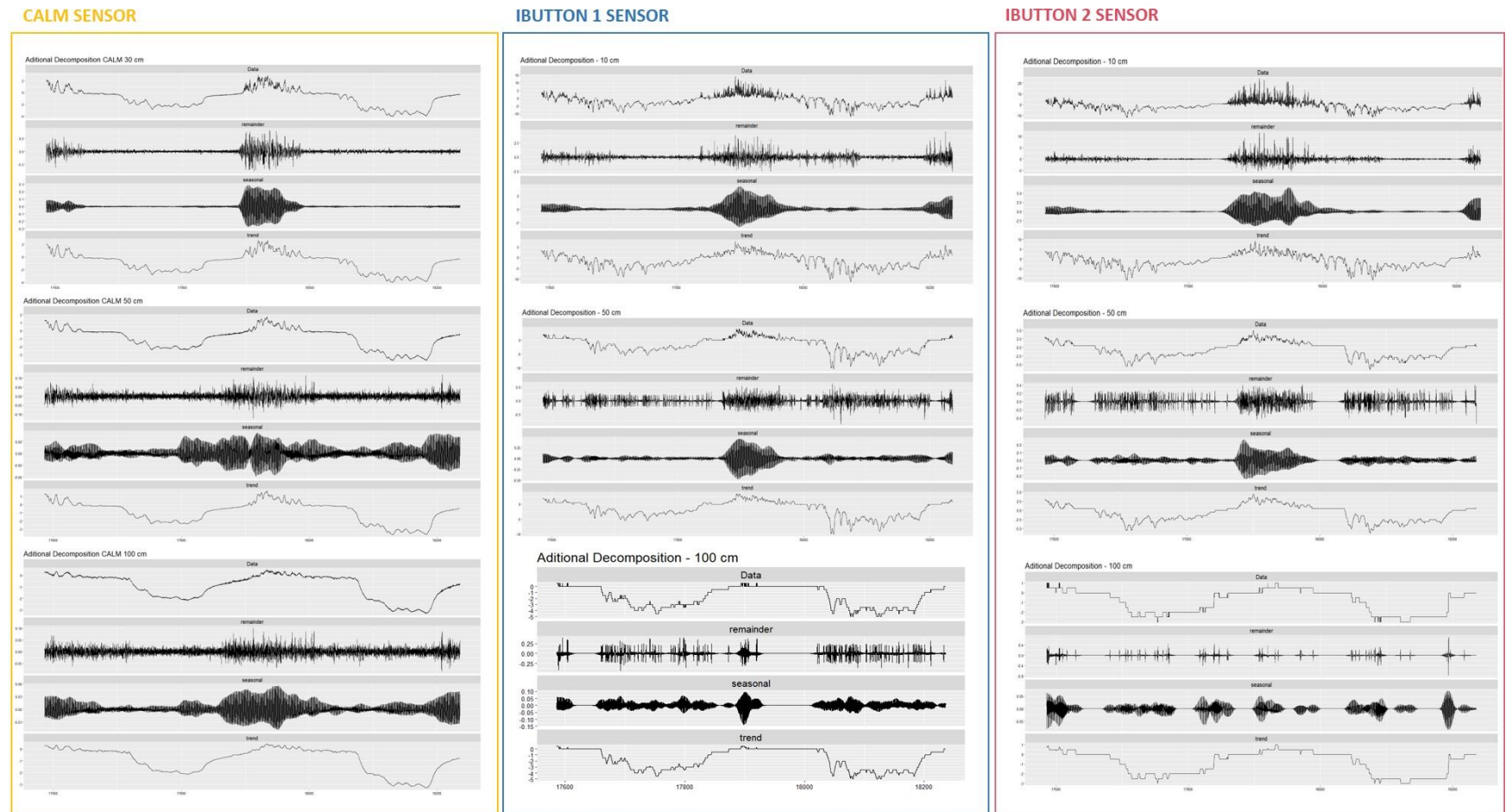


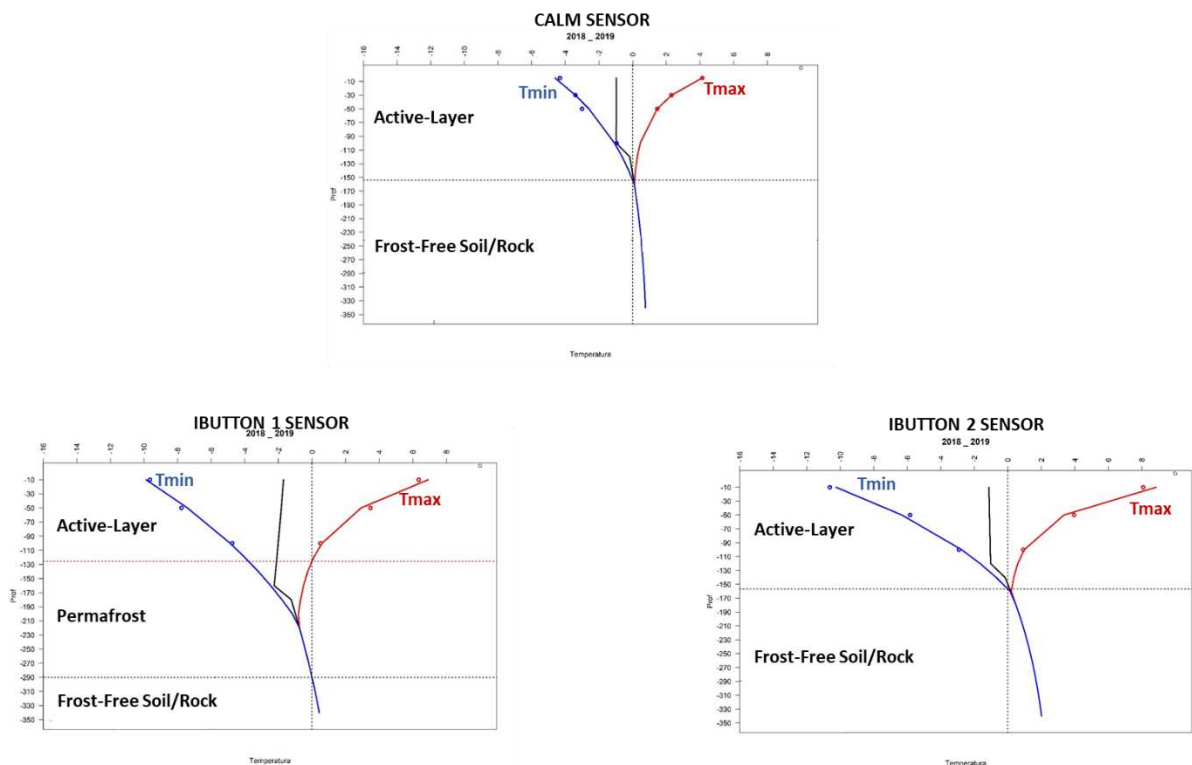
Figure 18 – Loess time series decomposition for three coincident layers (30-10 cm, 50 cm and 100 cm) for CALM Sensor, Ibutton 1 Sensor and Ibutton 2 Sensor.



## 7.7. Active-Layer thickness and Permafrost

The annual mean positive and negative temperatures for sampled layers where the sensors have been installed allow us to perform a statistical regression operation to estimate in ground depth the curve of mean maximum temperature (Tmax) and mean minimum temperature (Tmin). Where the curves cross the line indicated for 0 °C, indicates how deep the active-layer occurs and if there are thermal conditions for permafrost maintenance.

Figure 19 – Regressive estimation on Maximum and minimum means temperatures registered by the sensors to identify permafrost continuity and active-layer thickness.



Active-layer is thick for all soils where the sensors have been installed, but permafrost is continuous only to the Turbic Cryosol (Skeletal, Novic) where Ibutton 1 Sensor was installed, with an estimated thickness of 160 cm, while active-layer in this soil varies up to 127 cm depth. There were no estimative conditions (Tmax curve crossing Tmin curve under 0°C) of permafrost continuity for the other two soils. Active-layer instead has almost the same estimated maximum thickness of 153 and 155 meters for CALM Sensor and Ibutton 2 Sensor, respectively.

## 8. DISCUSSION

As researchers around the globe discuss about climate change and the importance of environmental monitoring (LIBISELLER & GRIMVALT, 2002), ice-free regions next to glaciers as proglacial, paraglacial and periglacial geoenvironments are areas especially important to address climate change (BOCKHEIM, 1995; GUGLIELMIN, 2006; CARRIVICK & HECKMANN, 2017). In fact, paraglacial environments may include both proglacial and periglacial environments and fluvial and mass movement landforms and processes (SLAYMAKER, 2014).

In this study, the differentiators assumed of these environments (Table 5) are as follows: periglacial environments are defined primarily in terms of process and secondarily in terms of distinctive forms. The necessary condition for the existence of a periglacial environment is intensive frost action and/or permafrost-related processes. Patterned ground is one of the many distinctive forms resulting from these processes, so as we observed also in the Stansbury peninsula.

The condition for proglacial geoenvironments is ice-marginal location. Glaci-fluvial, glaci-lacustrine and glaci-marine processes are the major processes of interest in such locations and they give rise to specific erosional and depositional forms. A dynamic system recovering from the disturbance of glaciation is the primary definition of a paraglacial system (SLAYMAKER, 2011). Paraglacial environments are defined neither by process nor location but by trajectory from proglacial to non-glacial environment (SLAYMAKER, 2011). These definitions suggest the importance of the depth to which surface temperature change influences ground temperatures, and is determined by below-ground processes of heat and mass transfer, and the soil thermal properties (RASMUSSEN ET AL.2018).

Paraglacial environments are undergoing a disturbance regime on the landscape (SLAYMAKER, 2014). For example, many periglacial environments are paraglacial in nature and, as such, have experienced an overall progressive amelioration of climate during the past 10 000–15 000 years following the retreat of the Late- Pleistocene ice sheets (WILEY & SONS, 2007).

Table 5 – Differentiation in the studied geoenvironments (adapted of Slaymaker, 2011)

Geoenvironments	Criteria		
	Transitional in Time/Space	Location	Process
Paraglacial	Degree of recovery from glaciation	Uplands Major Valleys	No storage Storage dominant
Proglacial		Ice-marginal	Erosional Depositional
Periglacial			Patterned ground

Regarding to ground soil temperature (GST), permafrost and active-layer we argue as Rasmussen et al. (2018) have discussed, as variations in grain size distribution and mineralogy of sediments play an important role for thermal conductivities, particularly in frozen state, and implies that permafrost thermal responses in heterogeneous terrain can be highly variable. In Antarctica, climate change has been characterized by regional differences (ZNÓJ et al., 2017), thus, long-term measures should be done about the periglacial conditions throughout maritime Antarctica, so as the relation of those measures to the regional climate, and permafrost conditions based on comprehension of the active-layer thickness (BOCKHEIM, 1995).

To address the thermal regime of the Stansbury peninsula it may be compared to Fildes Peninsula, where Michel et al. (2014b) monitored soil temperature from 2008 to 2012 showing air temperature averaged  $-2.3$  °C, with a maximum temperature of  $5.8$  °C and minimum of  $-21.2$  °C. In this study, in the period of 2018 to 2019, we observed mean temperature of  $-2.2$  °C, with a maximum of  $6.8$  °C and a minimum of  $-18.9$  °C. Hence, results suggest that little has changed in relation to air temperature almost a decade after. The similar landscape conditions, and the proximity of the areas may suggest that similar microclimatic environmental conditions are key-drivers to determine the temperature in Antarctica.

In comparison to other regions, Schaefer et al. (2016) in turn recorded monthly averages from January 2012 to December 2013 in a dry valley in the Ellsworth

Mountains, in continental Antarctica, reaching a much lower air temperature average of  $-19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , demonstrating the gigantic difference that the temperatures can have in Antarctica and how the sea part is relatively warmer. The lowest monthly averages recorded by them during the monitored period were recorded in August 2012 ( $-29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and in July 2013 ( $-27.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), as we registered minimum average temperatures of  $-4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2018) and  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (2019) both in August.

Regarding to soil temperature, the lowest monthly temperature recorded in Stansbury, at the depths of 5, 30, 50 and 100 cm in the CALM Sensor, had average readings of  $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.93\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. Higher values of soil temperature were registered by Michel et al. (2016) around 10, 30, 60 and 80 cm depth with averages of  $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively. Across King George Island, the measures of monitoring sensors which can be compared to this study show a great variation. This island is close to Nelson's island, but further north in terms of latitude, suggesting that little difference in geographic location can already influence the monthly temperature averages recorded for soil in superficial layers, influenced by external climatic conditions. Chaves et al. (2017) in Keller peninsula, situated lower in latitude than Stansbury, from January 2011 to December 2014 recorded soil temperatures at three depths (10, 30 and 80 cm) and registered averages of  $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  for all of them. Almeida et al. (2016) studying soil temperature regime from March 2011 to December 2015 registered at 1, 10, 30, 50 and 100 cm average temperatures of  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . These results show that not so much change occurs in terms of mean temperature variation for different soil layers in those islands.

The results of Thaw days, Freeze days, isothermal days and freeze-thaw days at depths of 5, 30 and 50 cm, registered by all sensors in the Stansbury peninsula match with the thermal behavior recorded by other studies in the region (MICHEL et al. 2014; CHAVES et al., 2016; ALMEIDA et al., 2016). As we compare the FDD and TDD registered in Stansbury peninsula with other studies around King George Island, Michel et al. (2014) in Fildes peninsula, recorded during 57 months TDD of  $902\text{ }^{\circ}\text{C day}$  at 10.5 cm,  $449\text{ }^{\circ}\text{C day}$  at 32.5 cm,  $96\text{ }^{\circ}\text{C}$  at 67.5 cm and  $64\text{ }^{\circ}\text{C}$  at 83.5 cm. Almeida et al. (2016) in Low Head, registered during 5 years TDD of  $1765\text{ }^{\circ}\text{C day}$  on the upper-

layers, 927 °C day at 50 cm and only 1.3 °C day at 100 cm. These results show a different thermal behavior to those found in Stansbury, which despite the shortest monitoring period, has important differences among the sensors, which behavior of CALM Sensor and Ibutton 1 Sensor followed the discrete increment in TDD for lower-layers, while Ibutton 2 Sensor had only 6 TDD at 100 cm, according to what Almeida et al. (2016) also registered.

This disparity to the readings among the same conditions inside an ice-free area such as what occurs in Stansbury compared to other monitored ice-free areas as Fildes, Keller and Low Head, confirms that under the snow cover and independent of its thickness, the soil temperature is buffered and remains below 0 °C even with positive air temperatures (GUGLIELMIN, 2006). According to other simulations validated by field measurements, annual mean ground temperatures were 1 °C higher at a snow patch site than a nearby site with similar sediment type, but average landscape-scale snow depth. This is mainly due to snow insulation during winter (Rasmussen et al., 2018).

Considering that the monitoring sites were installed in February 2018 at the end of the austral summer, the trend of soil cooling would be predominant and the soil temperature tends to cool more and more, in a buffered behavior, responding to temperature changes of the air and other factors like snow-cover, as we found in field and could not recover all Ibuttons Sensors due soil-freeze or snow-cover over the entire Sensor's Site. The high cost of the equipment of these monitoring sites could be replaced by similar, but efficient self-recording temperature sensors, which can reduce costs associated with more suitable techniques which combined with an air temperature record and snowmelt model, the date snow cover disappears can be used to approximate the amount of snow that accumulated at the start of the melt season (LUNDQUIST & LOTT, 2008).

Although one may say that is not important to perform such a study because much has been published around the theme, we defend it as Bockheim (1995) concluded about the need of measures on the activity of periglacial features throughout the maritime islands of East Antarctica. Thus, based on the results and relevance of

the pedoclimatic investigation performed in this study, and to other studies that were carried out monitoring the thermal regime of soils in other parts of Antarctica, both maritime (MICHEL et al., 2014; ALMEIDA et al., 2016; SCHAEFER et al., 2016; CHAVES et al., 2017; THOMAZINI et al., 2019, ROSA et al., 2021) and continental (GUGLIELMIN, 2006; SCHAEFER et al., 2019), it is necessary to continue monitoring in this peninsula, in addition to being part of the robust soil monitoring network carried out by Brazilian Scientific Program in Antarctica.

## **9. CONCLUSIONS**

Soil temperature monitoring in Stansbury peninsula demonstrates the glacial influence on the thermal regime of the soils. Active layer and permafrost characteristics have strong influence on the surface with freezing and thawing events related to climatic characteristics as air temperature and snow cover maintenance, much regarding relief features, where landscape forms and slope of the terrain have a decisive influence over soil thermal regime.

Soil temperature monitoring strongly shows the buffering effect that soil have described by our investigation on different depths of the temperature sensors' readings. While surface temperatures reflect the erratic effect of daily and seasonal temperature change at the sites, at greater depths, the behavior is more homogeneous.

Micro-climate characteristics have great influence over soil temperature, and different GST were registered at different regions of Stansbury, having influence by Glacier proximity, the other factors as snow-cover are also important, and monitor temperature variations with depth at each grid point, or at least at points representative of different snow accumulation conditions, are recommended.

## 10. REFERENCES

- ALMEIDA, I. C. C.; *et al.* **Long term active layer monitoring at a warm-based glacier front from maritime Antarctica.** *Catena*. 2017. 149(July), 572–581. DOI: 10.1016/j.catena.2016.07.031
- BEAUDETTE, D.E.; ROUDIER, P. **Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists.** *Computers & Geosciences*. 2013. 52: 258-268. Doi: 10.1016/j.cageo.2012.10.020.
- BOCKHEIM, J. G. **Permafrost Distribution in the Southern Circumpolar Region and its Relation to the Environment: a Review and Recommendations for Further Research.** *Permafrost and Periglacial Processes*. 1995. 6, 27–45
- BOCKHEIM, J. G. **The Soils of Antarctica.** *World Soils Book Series*. 2015. DOI 10.1007/978-3-319-05497-1\_2.
- BISKABORN, B. K.; *et al.* **Permafrost is warming at a global scale.** *Nature Communications*. 2019. 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4>
- CARRIVICK, J.L.; HECKMANN, T. **Short-term geomorphological evolution of proglacial systems.** *Geomorphology*. 2017. 287: 3-28. Doi: 10.1016/j.geomorph.2017.01.037.
- CHAVES, D. A.; *et al.* **Active layer and permafrost thermal regime in a patterned ground soil in Maritime Antarctica, and relationship with climate variability models.** *Science of the Total Environment*. 2017. 584–585, 572–585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.077>
- CORREIA, A., OLIVA, M., & RUIZ-FERNÁNDEZ, J. **Evaluation of frozen ground conditions along a coastal topographic gradient at Byers Peninsula (Livingston Island, Antarctica) by geophysical and geocological methods.** *Catena*. 2016. 149, 529–537. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.006>
- MEALS, D.W. **Statistical analysis for monotonic trends.** Tech Notes 6, November 2011. Developed for U.S. Environmental Protection Agency by Tetra Tech, Inc., Fairfax, VA, 23 p.
- ERMOLIN, E.; *et al.* **Ground ice in permafrost on Seymour (Marambio) and Vega Islands, Antarctic Peninsula.** *Annals of Glaciology*. 2004. 39, 373–378. DOI: 10.3189/172756404781814122
- FATRAS, C.; FERNANDEZ-PALMA, B.F.; MARTILLO, C. **Estimating ice retreat on Greenwich island. – Antarctica between 1956 and 2019 using optical and SAR imagery.** *Polar Science*. 2020. Doi: 10.1016/j.polar.2020.100526.

FERRON, F.A.; *et al.* **Air temperature time series for King George Island, Antarctica.** *Pesquisa Antártica Brasileira*. 2004. 4, 155-169.

FRANCELINO, M.R.; *et al.* **Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica.** *Catena*. 2011. 85: 194-204. Doi: 10.1016/j.catena.2010.12.007.

GJORUP, D. F.; *et al.* **Pedoclimate monitoring in the periglacial high mountain soils of the Atacama Desert, northern Chile.** *Permafrost and Periglacial Processes*. 2019. 30(4), 310–329. <https://doi.org/10.1002/ppp.2029>.

GUGLIELMIN, M. **Ground surface temperature (GST), active layer and permafrost monitoring in continental Antarctica.** *Permafrost and Periglacial Processes*. 2006. 17(2), 133–143. <https://doi.org/10.1002/ppp.553>.

LIBISELLER, C.; GRIMVALL, A. **Performance of partial Mann-Kendall tests for trend detection in the presence of covariates.** *Environmetrics*. 2002. 13(1), 71–84. <https://doi.org/10.1002/env.507>

LUNDQUIST, J. D.; LOTT, F. **Using inexpensive temperature sensors to monitor the duration and heterogeneity of snow-covered areas.** *Water Resources Research*. 2010. 46(4). <https://doi.org/10.1029/2008WR007035>.

MICHEL, R. F. M.; *et al.* **Soils and landforms from Fildes Peninsula and Ardley Island, Maritime Antarctica.** *Geomorphology*. 2014. v. 225, n. C, p. 76–86. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.041.

MICHEL, R.F.M.; *et al.* **Active-layer thermal monitoring on the Fildes Peninsula, King George Island, maritime Antarctica.** *Solid Earth*. 2014. 5, 1361-1374. Doi:10.5194/se-5-1361-2014.

MINK, S.; *et al.* **Insights into deglaciation of the largest ice-free area in the South Shetland Islands (Antarctica) from quantitative analysis of the drainage system.** *Geomorphology*. 2014. 225(C), 4–24. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.028

OLIVA, M.; RUIZ-FERNÁNDEZ, J. **Geomorphological processes and frozen ground conditions in Elephant Point (Livingston Island, South Shetland Islands, Antarctica).** *Geomorphology*. 2017. 293: 368-379. Doi: 10.1016/j.geomorph.2016.01.020.

O'NEILL, T. A. **Protection of Antarctic soil environments: A review of the current issues and future challenges for the Environmental Protocol.** *Environmental Science and Policy*. 2017. 76(July), 153–164. DOI: 10.1016/j.envsci.2017.06.017.

ROSA, K. K. DA; *et al.* **Expansion of glacial lakes on Nelson and King George Islands, Maritime Antarctica, from 1986 to 2020.** *Geocarto International*. 2021. 0(0), 1–11. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886342>

- RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, PBC, Boston, MA. 2020. URL <http://www.rstudio.com/>.
- SCHAEFER, C.E.G.R.; *et al.* **Active layer thermal monitoring of a Dry Valley of the Ellsworth Mountains, Continental Antarctica**. *Catena*. 2017. 149: 603-615. Doi: 10.1016/j.catena.2016.07.020.
- SIMAS, F.N.B.; *et al.* **Soils of the South Orkney and South Shetland Islands, Antarctica**. In: Bockheim J. (eds) *The Soils of Antarctica*. 2015. World Soils Book Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_13).
- SLAYMAKER, O. **Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments**. *Quaestiones Geographicae*. 2011. 30(1), 85–94. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0008-y>.
- SLAYMAKER, O. **Proglacial, periglacial or paraglacial?** Geological Society, London, Special Publications. 2009. v. 320, n. 1, p. 71–84.
- SMELLIE, J.L.; **The geology of the South Shetland Islands: VI. Stratigraphy, geochemistry and evolution**. Cambridge, British Antarctic Survey. 1984. 85pp.
- THOMAZINI, A.; *et al.* **The current response of soil thermal regime and carbon exchange of a paraglacial coastal land system in maritime Antarctica**. *Land Degradation & Development*. 2019. 31-5. 655-666. Doi: 10.1002/ldr.3479.
- TURNER, J.; *et al.* **Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability**. *Nature*. 2016. 535(7612), 411–415. DOI: 10.1038/nature18645.
- WINSVOLD, S.H.; *et al.* **Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping**. *The cryosphere*. 2018. 12: 867-890. Doi: 10.5194/tc-12-867-2018.
- VIEIRA, R.; *et al.* **Análisis Sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima**. *Investigaciones Geográficas*. 2015. n. 49, p. 3. DOI: 10.5354/0719-5370.2015.37511.
- ZNÓJ, A.; *et al.* **Rapid environmental changes in the Western Antarctic peninsula region due to climate change and human activity**. *Applied Ecology and Environmental Research*. 2017. 15(4), 525–539. [https://doi.org/10.15666/aeer/1504\\_525539](https://doi.org/10.15666/aeer/1504_525539).

### **CAPÍTULO 3**

**DINÂMICA DE CARBONO EM DIFERENTES COMUNIDADES VEGETAIS DA  
PENÍNSULA STANSBURY, ILHA DE NELSON, ANTÁRTICA MARÍTIMA.**

## RESUMO

Áreas livres de gelo pelas regiões polares são importantes pools de investigações científicas, por constituírem-se em ambientes de fronteira entre os ambientes congelados e os recentemente descobertos pelo gelo, importantes para o entendimento de fenômenos únicos no planeta com relações diretas com o clima. É cada vez mais importante entender se os ecossistemas terrestres na Antártica atuam como dreno ou fonte de carbono (C) e os efeitos das mudanças climáticas na troca de CO<sub>2</sub>-C do solo. A dinâmica do carbono (troca de CO<sub>2</sub>-C no solo) e os atributos do solo variam consideravelmente em áreas livres de gelo da Antártica Marítima e entender essa relação é importante para compreender as mudanças climáticas e a importância das áreas onde ocorre essa dinâmica. Dessa forma, o objetivo geral do trabalho foi estimar a dinâmica de C para troca líquida de CO<sub>2</sub> na península Stansbury, Ilha Nelson. O estudo de dinâmica do C foi realizado em fevereiro de 2018, em duas principais comunidades de vegetais, classificadas como Sítios nesse estudo: Sítio 1 com tapete de musgo, predominantemente colonizado por *Saniona unicata* (Hedw.) Loeske); e Sítio 2, com uma comunidade composta predominantemente por *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory e *Deschampsia antarctica* Desv. As variáveis respiração do ecossistema (ER), troca líquida de carbono (NEE) e produção primária bruta (GPP) foram determinadas medindo CO<sub>2</sub> fluxos de *in situ* com um sistema de câmara automática fechada (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA). Ao mesmo tempo foram também medidas *in loco*, a temperatura do solo (ST) e a umidade do solo (SM). Os resultados indicam que a vegetação com maiores registros de observação na área está representada por carpetes de musgos da briófito *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske, pelos líquens de *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory e as plantas vasculares *Deschampsia antarctica* Desv. Resultados sobre os solos indicam que são predominantemente esqueléticos, com pouca matéria orgânica (valor médio de 19 g.kg<sup>-1</sup> e mediana de 9 g.kg<sup>-1</sup>), pouca presença de fauna observada durante o campo, pouca cobertura vegetal observada pela península e valores altos de CTC relacionados ao intemperismo e lixiviação incipientes das rochas vulcânicas. Os resultados relacionados ao fluxo de CO<sub>2</sub>-C indicaram que o ER variou do valor mínimo de 0,05 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> no Sítio 2 ao máximo de 3,34 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> no Sítio 1. Observou-se que a ER média era duas vezes maior no Sítio 1 do que no Sítio 2. A

maior força de dreno de CO<sub>2</sub> foi observada no Sítio 1 (0,57 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), juntamente com maior carbono orgânico do solo (45,6 g.kg<sup>-1</sup>). Por outro lado, a menor intensidade dreno de CO<sub>2</sub> ocorreu no Sítio 2 (0,25 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>). Existe uma correlação negativa significativa entre NEE e SM, indicando o potencial de sítio hidromórfico no armazenamento de carbono orgânico do solo. A análise espacial dos valores das variáveis indica que o local do Sítio 1 é mais homogêneo (maiores valores de alcance) do que no Sítio 2. O mapeamento dessas comunidades vegetais com auxílio de ortomosaico possibilitou reconhecer que os vegetais do Sítio 1 ocupam, generalizadamente, em torno de 11,25 ha e os do Sítio 2 ocupam 5,1 ha da península. Extrapolando os resultados do experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C das comunidades vegetais de cada sítio para a cobertura vegetal da península toda, identificou-se que elas são responsáveis pela remoção de carbono da atmosfera na ordem de 2,81 gCO<sub>2</sub>.s<sup>-1</sup> e 0,56 gCO<sub>2</sub>.s<sup>-1</sup>, para carpetes de musgos da briófito *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske e a comunidade de líquens de *Usnea arantiaco-atra* (Jacq.) Bory e as plantas vasculares *Deschampsia antarctica* Desv., respectivamente. Conclui-se que essas áreas são importantes para drenar carbono da atmosfera e a manutenção da cobertura vegetal na Antártica é fundamental, o que justifica que mais cuidados sejam tomados nas atividades antrópicas por lá no que se refere às perturbações dessas comunidades vegetais.

Palavras-chave: Fluxo de carbono. Respiração. Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

Ice-free areas in the polar regions are important pools of scientific investigation, as they constitute boundary environments between frozen environments and those recently discovered by ice. It is increasingly important to understand whether terrestrial ecosystems in Antarctica act as a sink or source of C and the effects of climate change on soil carbon exchange. Carbon dynamics (exchange of CO<sub>2</sub>-C in soil) and soil attributes vary considerably in ice-free areas of the Antarctic Sea. Thus, the general objective of this research was to estimate the balance between sequestration or CO<sub>2</sub> emissions in the Stansbury Peninsula, Nelson Island. From the estimation of the carbon flux of two of the main vegetal communities of the Stansbury Peninsula, the carbon feedback in maritime Antarctica was discussed, based on what occurs in the studied peninsula. The CO<sub>2</sub>-C flux study was carried out in February 2018, in the two main vegetation communities: moss carpet community, predominantly colonized by *Saniona uncinata* (Hedw.) Loeske; and the community is predominantly composed of *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory and *Deschampsia antarctica* Desv. The variables ecosystem respiration (ER), net carbon exchange (NEE) and gross primary production (GPP) were determined by measuring CO<sub>2</sub> *in situ* fluxes with an automatic closed chamber system (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA). The results indicate that the most observed vegetation in the area is represented by carpets of bryophyte *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske, by the lichens of *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory and the vascular plants *Deschampsia antarctica* Desv. The soils are predominantly skeletal, with little organic matter and little faunal activity, deficient vegetation cover and eutrophic character due to limited weathering and leaching of volcanic rocks. The results related to the CO<sub>2</sub>-C flux indicated that the ER ranged from 0.05 to 3.34  $\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$  in the communities studied. It was observed that the mean ER was twice as high in community 1. The highest CO<sub>2</sub> drain force was observed in community 1 (0.57  $\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ), together with the highest soil organic carbon (4.56 dag.kg<sup>-1</sup>). On the other hand, the lowest CO<sub>2</sub> drain intensity occurred in community 2 (0.25  $\mu\text{mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ ). There is a significant negative correlation between SEN and SM, indicating the potential of a hydromorphic site in soil organic carbon storage. Spatial analysis indicates that community 1 location is more homogeneous (higher reach values) than community 2. The mapping of these plant communities with the aid of

orthomosaic made it possible to recognize that community 1 occupies around 11.25 ha and community 2 occupies 5.1 ha of the peninsula. Extrapolating the results of the CO<sub>2</sub>-C flux experiment to communities 1 and 2, it was identified that they are responsible for removing carbon from the atmosphere in the order of 2.81 gCO<sub>2</sub>.s<sup>-1</sup> and 0.56 gCO<sub>2</sub>.s<sup>-1</sup>, respectively. It is concluded that the maintenance of vegetation cover areas in Antarctica is fundamental and justify that more care be taken in human activities with regard to disturbances in these communities.

Keywords: Carbon Flux. Respiration. Climate change.

## 1. INTRODUÇÃO

A importância dos gases de efeito estufa (GEE) no clima da Terra é bem conhecida, mas há uma necessidade crítica de uma abordagem hierárquica para o estudo dos impactos das mudanças climáticas nas interações planta-solo e no ciclo do carbono que incorpora mecanismos e respostas que ocorrem em diferentes escalas temporais e espaciais (BARDGETT et al., 2013). As regiões polares são importantes *pools* de investigações, por constituírem-se em ambientes de fronteira entre os ambientes congelados e os recentemente descobertos pelo gelo (BOCKHEIM, 2007). Um grande foco das investigações científicas nessas regiões polares, se refere à proporção do carbono orgânico do solo (SOC) no permafrost próximo à superfície.

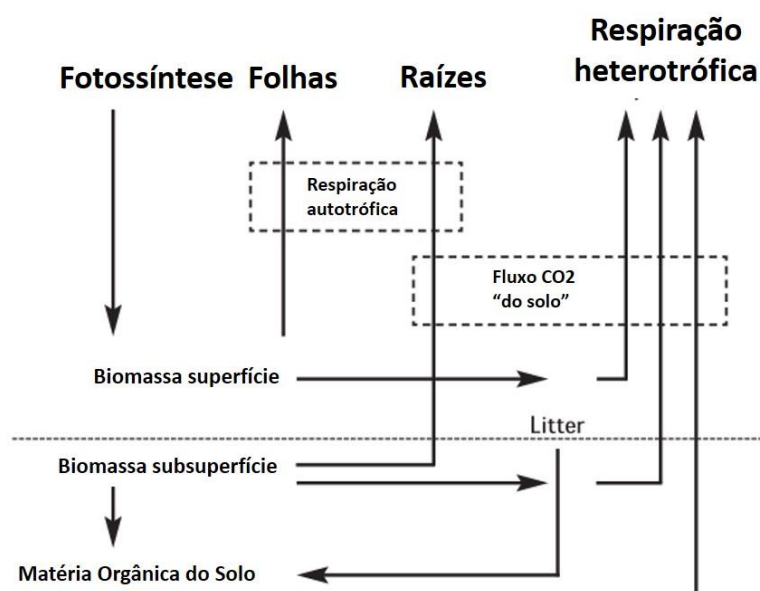
A presença de permafrost refere-se a uma camada de solo congelado que permanece igual ou abaixo de 0 ° C por pelo menos dois anos consecutivos (SOIL AMERICAN SOCIETY, 2020; BOCKHEIM et al., 2015; WORLD REFERENCE BASE, 2014). A sua manutenção fundamenta-se em processos que são altamente influenciados pela temperatura e umidade do solo (CANONNE et al., 2012; ZHU et al., 2014). Toda preocupação se refere ao carbono que poderia ser oxidado durante o aquecimento de ambientes polares para produzir gases de efeito estufa à base de C e promover o feedback positivo (DADIDSON & JANSSENS, 2006; BOCKHEIM, 2007)

Especificamente, nos ecossistemas terrestres da Antártica, o número limitado de estudos que tratam das emissões de GEE, explicado pelas dificuldades de realizar tais medições em condições extremas, e a ideia de que baixas temperaturas equivalem a baixas taxas de fluxos de GEE, resultou em uma limitada compreensão da capacidade desses ecossistemas de trocar GEE com a atmosfera (OERTEL et al., 2016). No entanto, como resultado das mudanças climáticas contínua, essas áreas estão passando por períodos cada vez mais longos livres de gelo e neve, com temperaturas mais altas e aumento da atividade biológica (AMESBURY et al., 2017; SANCHO et al., 2017).

É cada vez mais importante entender se os ecossistemas terrestres na Antártica atuam como dreno ou fonte de C, os efeitos das mudanças climáticas na

troca de carbono do solo. O carbono é fixado pelas plantas através do balanço entre a fotossíntese bruta e a respiração, contrabalanceada entre autotrófica (carbono fixado fotossinteticamente pela planta e perdido no metabolismo dela) e heterotrófica (que se refere a respiração de todos os organismos do ecossistema), representado no diagrama de fluxo da figura 1 (KIRSCHBAUM et al., 2001).

Figura 1 – Diagrama representativo do fluxo de carbono no ecossistema (adaptado de Kirschbaum et al., 2001).



O fluxo do carbono do ecossistema consiste na respiração autotrófica das folhas e raízes e a respiração heterotrófica dos organismos do solo, e pode incluir a ação da mineralização da matéria orgânica (KIRSHCBAUM et al., 2001). São variáveis consideradas para o estudo de fluxo de carbono a: Respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE) e a produção primária bruta (GPP) (KIRSCHBAUM et al., 2001). O resultado para que o ecossistema seja considerado como dreno ou fonte de carbono, dependerá do cálculo entre a síntese de compostos orgânicos do CO<sub>2</sub> atmosférico, a conversão biótica de carbono orgânico em CO<sub>2</sub> por

todos os organismos em um ecossistema e a troca líquida de dióxido de carbono no ecossistema (THOMAZINI et al., 2016).

A flora de ecossistemas terrestres que contribui para o SOC na Antártica Marítima é constituída, basicamente, por vegetais inferiores, caracterizados pela presença de cianobactérias, algas verdes, fungos, líquens e musgos (PUTZKE & PEREIRA, 2001), e somente duas espécies de vegetais superiores, a gramínea *Deschampsia antarctica* e a cariofilácea *Colobanthus quitencis* (CONVEY et al., 2011; PUTZKE & PEREIRA, 2015). Estas plantas são altamente especializadas e a ocorrência dessas comunidades vegetais pode ser indicador de mudanças ambientais (FRANCELINO, 2004). A dinâmica do carbono (troca de CO<sub>2</sub>-C no solo) e os atributos do solo variam consideravelmente em áreas livres de gelo da Antártica Marítima (THOMAZINI et al., 2014). Assim, variáveis diretamente relacionadas à distribuição/características das comunidades vegetais e os atributos do solo, como carbono orgânico, temperatura e umidade do solo, também podem ser usadas como indicadores sensíveis a mudanças climáticas em áreas livres de gelo na Antártica Marítima (FRANCELINO et al., 2011; THOMAZINI et al., 2014).

Na Antártica, onde comunidades vegetais ocorrem, é muito provável que haja correlação com aumento da fertilidade do solo e da capacidade de emitir CO<sub>2</sub> do ecossistema (DURÁN et al., 2021) e considerando as alterações na temperatura e disponibilidade de água, pode-se aumentar concentrações de carbono e de matéria orgânica no solo (HORROCKS et al., 2020), portanto é de grande relevância científica investigar essas áreas para monitoramento das mudanças climáticas.

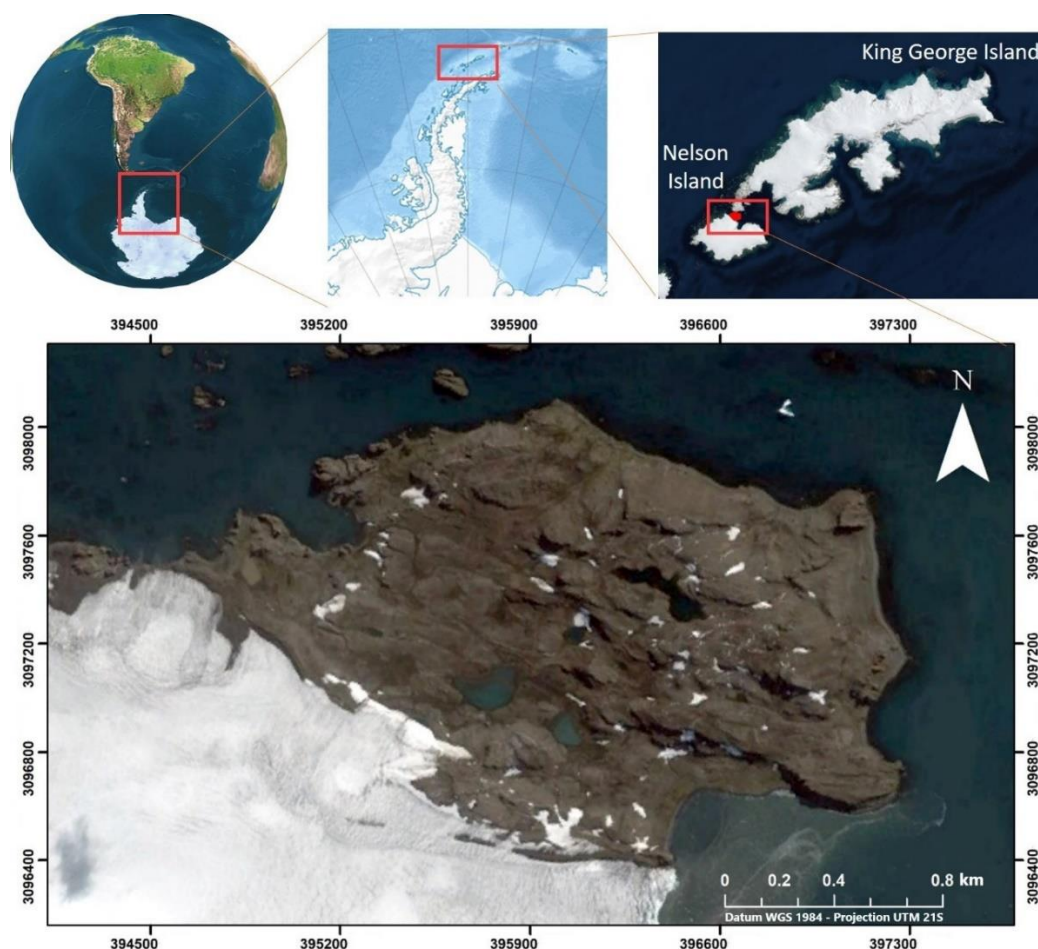
Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa foi estimar a dinâmica da emissão de CO<sub>2</sub> na península Stansbury. Especificamente nosso objetivo foi: i) reconhecer as principais comunidades vegetais de ocorrência na península; ii) quantificar as trocas líquidas de CO<sub>2</sub>-C de duas comunidades vegetais, temperatura e umidade do solo em duas das principais comunidades vegetais encontradas (*Saniona unicata* e *Usnea aurantiaco-atra* e *Deschampsia sp.*); iii) analisar as relações entre os atributos dos solos e o SOC; iv) mapear e classificar as comunidades de *Saniona unicata* e *Usnea aurantiaco-atra* com a *Deschampsia sp.* da península com uso de aerofotogrametria; e v) estimar o fluxo de carbono dessas comunidades vegetais para a península Stansbury, Ilha Nelson.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Localização

A Ilha Nelson faz parte do Arquipélago das Shetlands do Sul, próxima à Ilha Rei George (Figura 2) e possui cerca de 168,8 km<sup>2</sup>, dos quais 95% são ocupados por geleiras que atingem até 324 m de altitude. Sua geologia é muito semelhante à península vizinha de Fildes, composta por rochas vulcânicas, principalmente basaltos, tufos, andesitos e aglomerados (GRIKUROV & POLYAKOV, 1968; BARTON, 1965; SMELLIE, 1984). Lentas piroclásticas (tufos e lápilis) e vulcanoclásticas de cores cinza escuro ocorrem entre as lavas e aglomerados e concentram a macro e microflora local (BASTOS et al., 2013).

Figura 1 – Mapa de localização da Península Stansbury, na Ilha Nelson, parte do arquipélago das Ilhas Shetlands do Sul, a oeste da península Antártica.



Fonte: Autor.

A península Stansbury, localizada no norte da Ilha Nelson, separa a Passagem de Drake da Baía Maxwell. É também banhada pelo estreito de Fildes, que separa a Ilha Nelson da Ilha Rei George (PÜTZKE et al., 1998). As comunidades vegetais que ocorrem por lá são semelhantes às encontradas em outras áreas livres de gelo na Antártica Marítima (PUTZKE et al., 1998; ALBUQUERQUE et al., 2012; NEUFELD et al., 2015; SCHMITZ, 2015; THOMAZINI et al., 2016).

Stansbury possui 289 hectares, sendo a segunda maior área livre de gelo da Ilha de Nelson e uma das poucas áreas livres de gelo presentes nas Ilhas Shetland do Sul, apresentando um domínio de paisagens periglaciais, glaciais, fluviais e costeiras, onde o permafrost está comumente presente (LÓPEZ-MARTÍNEZ et al., 2016).

O clima da região é marítimo subantártico, de acordo com a classificação de Köppen, que inclui ventos fortes, alta variabilidade climática e temperaturas relativamente amenas variando entre a temperatura média anual do ar de  $-2,2^{\circ}\text{C}$  e a temperatura média do ar no verão ligeiramente superior a  $0^{\circ}\text{C}$  (FERRON et al. 2004). A precipitação gira em torno de 750 mm por ano com chuvas durante o verão (PALYAKOV et al., 2020).

## **2.2. Reconhecimento das Comunidades Vegetais**

No trabalho de campo realizado em fevereiro de 2018, durante a 36ª Operação Antártica Brasileira - OPERANTAR XXXVI, realizou-se o reconhecimento das principais comunidades vegetais por toda a península Stansbury totalizando 23 sítios de reconhecimento, identificados com ponto de Sistema Global de Navegação por Satélite - GNSS, onde também ocorreu a abertura de perfis para classificação dos solos de acordo com a World Reference Base of Soils - WRB (2014). Para cada local de reconhecimento das principais comunidades vegetais, também foram coletadas amostras de solos para análises físico-químicas.

### 2.3. Análises físicas e químicas

O solo foi amostrado na camada de 0 a 20 cm de profundidade nos 23 pontos de reconhecimento da vegetação pela península e nas comunidades vegetais onde o fluxo de CO<sub>2</sub>-C foi monitorado. A análise textural foi realizada por peneiramento e método da pipeta, porém, com utilização de agitação lenta (50 rpm) por 16 horas (RUIZ, 2005a) e determinação do silte por pipetagem (RUIZ, 2005b). A argila dispersa em água foi determinada seguindo metodologia descrita para análise granulométrica, com agitação rápida (12000 rpm por 15 minutos) e suprimindo-se o uso do dispersante químico (EMBRAPA, 2017).

O pH foi determinado em água e em solução de KCl e CaCl 1 mol L<sup>-1</sup> em suspensão solo/solução na proporção 1:2,5. Os cátions trocáveis foram extraídos por KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e quantificados por espectrometria de absorção atômica (Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>) e por titulometria com NaOH (Al<sup>3+</sup>). O Na<sup>+</sup>, extraído com solução de acetato de amônio 1,0 mol L<sup>-1</sup> a pH 7,0, foi quantificado por fotometria de chama.

P disponível e K<sup>+</sup> trocável foram extraídos pelo extrator Mehlich-1, onde P foi quantificado pelo método do ácido ascórbico, como descrito por Kuo (1996), e K<sup>+</sup> determinado por fotometria de chama. O teor de matéria orgânica (MO) foi estimado após a determinação do C orgânico pelo método Walkley Black, sem aquecimento e o nitrogênio total (N<sub>total</sub>) foi estimado através do método Kjeldahl e por fim, o fósforo remanescente (P-rem) em cloreto de cálcio 0,01 mol L<sup>-1</sup> com concentração inicial de 60 mg L<sup>-1</sup> de P determinado segundo De Filippo & Ribeiro (1997).

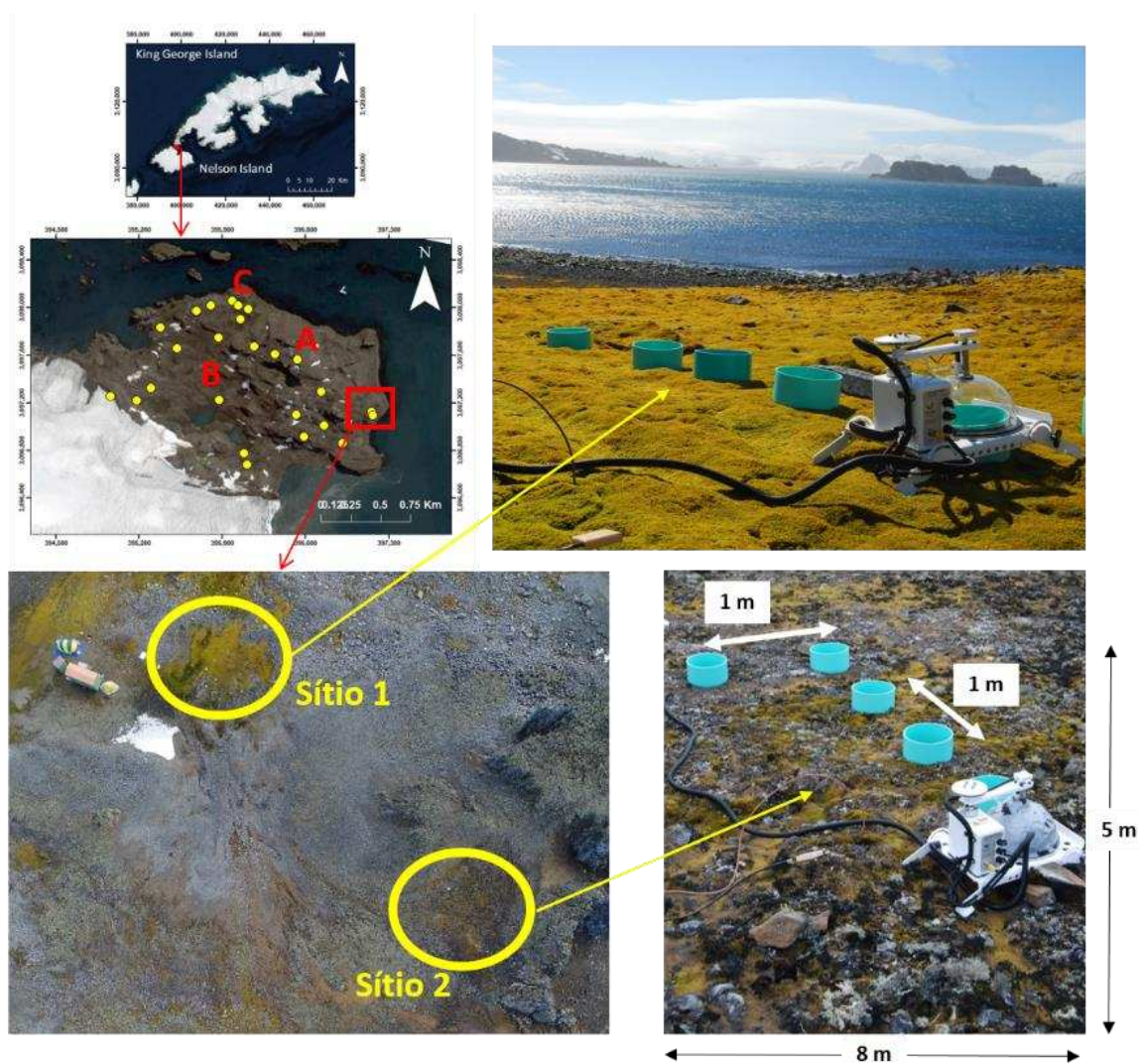
### 2.4. Desenho experimental

O experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C foi realizado em duas comunidades vegetais notadamente de ocorrência expressiva pela península Stansbury (SCHIMTZ et al., 2020; PUTZKE & PEREIRA, 1998a;1998b). Foi estabelecida uma grade regular de 40 pontos (5 x 8 m), com uma distância de separação de 1 m (Figura 2) para amostragem do fluxo. A vegetação do sítio 1 é uma comunidade de tapete de musgo, predominantemente colonizada por *Saniona unicata* (Hedw.) Loeske); e no Sítio 2, a

comunidade vegetal é composta predominantemente por *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory e *Deschampsia antarctica* Desv.

As variáveis que foram utilizadas como indicadores são: Respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), produção primária bruta (GPP), mantendo-se as siglas das variáveis em inglês por convenção, foram determinadas medindo os fluxos de CO<sub>2</sub> *in situ* com um sistema de câmara automática fechada (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA).

Figura 2 – Localização do experimento com IRGA e desenho amostral dos sítios 1 (com *Saniona unciata*) e 2 (com *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory e *Deschampsia antarctica* Desv), na península Stansbury, Ilha Nelson, Antártica Marítima



Fonte: Autor.

As medições ocorreram ao longo de dois dias (14 e 15 de fevereiro de 2018). A troca de CO<sub>2</sub>-C foi medida usando um sistema de troca de CO<sub>2</sub> (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, EUA) contendo um analisador de gás infravermelho (modelo LI-8100A), um sistema multiplexador (modelo LI-8150), uma câmara clara (modelo LI-8100-104C), uma câmara opaca (modelo LI-8100-104) e um laptop para coleta de dados. Este sistema operou ao mesmo tempo durante as medições e quantifica a concentração por meio de espectroscopia de absorção óptica. O sistema foi calibrado na fábrica usando gases de precisão (padrões de gás CO<sub>2</sub>) em temperaturas controladas.

Anéis de PVC (20 cm de diâmetro) foram inseridos no solo previamente para aferições em cada um dos pontos da grade, atingindo uma profundidade padrão de 3 cm. As emissões de CO<sub>2</sub>-C do solo em cada ponto da grade foram baseadas em uma única medição ao longo de 1,5 min. A umidade (US) e a temperatura do solo (TS) foram mensuradas ao mesmo tempo da leitura de troca de CO<sub>2</sub>-C. O monitoramento foi feito com sondas de temperatura do solo (termopar Campbell L107E, precisão de  $\pm 0,2$  ° C) e sondas de umidade do solo (refletômetro de conteúdo de água CS656, precisão de  $\pm 2,5\%$ ). Todas as sondas foram conectadas a um registrador de dados Campbell Scientific CR 1000, registrando dados a cada intervalo de 1 segundo durante 1,5 min.

## **2.5. Sensoriamento Remoto**

Para inferir sobre a estimativa de fluxo de CO<sub>2</sub>-C realizada pelas principais comunidades vegetais que ocorrem pela península Stansbury, utilizou-se o reconhecimento em campo realizado em 2018, e a imagem do ortomosaico confeccionado a partir de fotogrametria aérea digital (FAD) com uso de Aeronave remotamente pilotada (ARP) durante o campo na OPERANTAR XXXVI.

Como o levantamento aerofogramétrico utilizou câmera fotográfica sensível ao espectro do visível (RGB), acrescentou-se à análise imagens do satélite Landsat 8, a fim de aumentar as bandas espectrais além do visível, com o objetivo de ampliar a base de informações sobre a área no espectro do infravermelho e o que pode nos

indicar ao mapear os índices de vegetação e o índice de umidade pela área da península Stansbury.

### 2.5.1. Landsat 8

O satélite Landsat 8 foi lançado em órbita em fevereiro de 2013, com sistemas de sensores Operational Land Imager (OLI) e o Thermal Infrared Sensor (TIRS). O OLI abrange as bandas do visível e infravermelho e o TIRS duas bandas termais. As bandas do satélite Landsat 8 de interesse foram a Banda 4, do Vermelho do visível (comprimento de onda de 0.630 a 0.680  $\mu\text{m}$ ), a Banda 5 do Infravermelho próximo (NIR) (0.845 a 0.885  $\mu\text{m}$ ) e a Banda 6 do Infravermelho onda curta (SWIR1) (1.56 a 1.66  $\mu\text{m}$ ) (Santos, 2016). As imagens do Landsat 8 de fevereiro de 2021 foram processadas para obtenção de dois índices relacionados ao reconhecimento da ocorrência das comunidades vegetais em Stansbury.

O índice de vegetação - NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, sigla em inglês) proposto por Rouse et al. (1973), obtido pela razão entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância do vermelho (R), dividida, respectivamente, pela soma das mesmas, de acordo com a expressão (1).

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR}-\text{R})}{(\text{NIR}+\text{R})}$$

O índice de umidade - NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), usa bandas NIR e SWIR, que na imagem Landsat 8 refere-se às bandas 5 e 6, respectivamente. Torna-se importante avaliar o índice de umidade pela península devido à forte influência que a temperatura e a umidade tem no desenvolvimento das comunidades vegetais pelas áreas livres de gelo (FRANCELINO et al., 2011; THOMAZINI et al., 2014). A equação (GAO, 1996), para calcular o NDMI é:

$$\text{NDMI} = \frac{(\text{NIR}-\text{SWIR1})}{(\text{NIR}+\text{SWIR1})}$$

### 2.5.2. Levantamento aerofotogramétrico

Foi realizado um levantamento aerofotogramétrico da área com Aeronave Remotamente Pilotada (ARP), modelo Phantom 4 Pro. O desenvolvimento recente das técnicas de fotogrametria digital aérea (FDA) e os softwares especializados permitem a geração de resultados baseadas em fotografias de alta resolução, considerando a sobreposição apropriada das fotografias entre as linhas de voo e entre as fotografias entre si (MIELCAREK et al., 2020).

Ao total foram obtidas 1.570 fotos aérea, que cobriram 92% de toda a área da península. Utilizou-se sobreposição de 70 % de sobreposição entre fotografias e 60 % de sobreposição entre linhas, o que permitiu gerar mosaicos ortorretificados, com resolução espacial de 4 cm utilizando o software Agisoft Photoscan. Quarenta e oito pontos de controle foram coletados usando um receptor GNSS de dupla frequência (L1 e L2) para o georreferenciamento dos mapas e do ortomosaico.

O ortomosaico foi usado então para realizar o mapeamento das comunidades vegetais a partir do reconhecimento das principais comunidades vegetais, pela área. Essas áreas foram então utilizadas juntamente com os resultados de fluxo de carbono (CO<sub>2</sub>-C) realizado com o IRGA. Em seguida, utilizou-se esses dados conjuntamente para calcular as estimativas de CO<sub>2</sub> que são sequestrados ou liberados, em média, pelas comunidades vegetais presentes na península Stansbury.

## 2.6. Geo-espacialização dos resultados para toda a paisagem

Utilizou-se software R (RSTUDIO TEAM, 2020) para realizar as análises exploratórias e estatísticas descritivas dos resultados das análises físico-químicas dos solos onde instalou-se os dois sítios do experimento de fluxo CO<sub>2</sub>-C, além de amostras de 0 a 5 cm dos 23 pontos amostrados pela península. Também foram utilizados os resultados do experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C, nos dois sítios, um com ocorrência de carpete de musgos com predomínio de *Sanionia uncinata* (Sítio 1) e na comunidade vegetal de *Usnea antarctica* e *Deschampsia antarctica* (Sítio 2).

No que se refere às variáveis respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), produção primária bruta (GPP), os valores médios foram atribuídos ao carpete de musgos (com predominância de *Sanionia uncinata*) e da comunidade de *Usnea antarctica* e *Deschampsia antarctica*. Por fim, estimou-se para a área toda mapeada dessas comunidades com base nos valores médios das variáveis (ER, GPP, NEE) resultantes do experimento, de acordo com a área mapeada das comunidades vegetais da península Stansbury, de acordo com experimento.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Características da vegetação de Stansbury

A vegetação com maior frequência na amostragem dos 23 pontos de levantamento realizada pela península Stansbury está representada por carpetes de musgos da briófito *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske. (AMBLYSTEGIACEAE), que foi observada em praticamente todos os pontos amostrais (Tabela 3), variando ocorrência com densos carpetes de musgos até ralas e esparsas colônias. Esta situação é bastante comum na Antártica Marítima, sendo este tipo de musgo o que mais ocorre em praticamente todos os tipos de substratos estáveis (SCHMITZ, 2015), apresentando a maior biomassa entre os tapetes de musgos nas áreas livres de gelo (PUTZKE & PEREIRA, 2001; FRANCELENO, 2004). Ao comparar com outra área livre de gelo próxima a península Stansbury, numa condição climática muito parecida, na vizinha península Fildes, sob influência parecida das águas oceânicas da Passagem do Drake e do Estreito de Brainsfield, a cobertura vegetal é também comumente composta por tapetes de musgos com predominância de *Sanionia uncinata* (MICHEL et al., 2014).

Resultados dessa observação nos carpetes de musgo com *S. uncinata*, podem ser confirmados em outras áreas da Antártica Marítima como nas ilhas Orkney do Sul (GUGLIELMIN et al., 2008), e nas Sethlands do Sul, nas Ilhas Elefante e Deception (PEREIRA & PUTZKE, 2013), e em outros pontos da Ilha Rei George

(PEREIRA & PUTZKE, 2013), como na Baía do Almirantado (MENDONÇA et al., 2010), congregando as áreas de Hennequin Point (VIEIRA et al., 2013), península Keller (FRANCELINO, 2004; THOMAZINI et al., 2014) e em Tomas Point, próximo à estação de pesquisa polonesa Artowski (THOMAZINI et al., 2014).

Diversas espécies de vegetais se desenvolvem em associação com *Sanionia uncinata*, sugerindo que as mesmas condições que favorecem a ocorrência desse musgo, promove também condições favoráveis para outros musgos como por exemplo a associação entre *Sanionia uncinata* and *Polytrichastrum alpinum* que em Half Moon, outra ilha mais ao sul do arquipélago das Shetlands, também ocorreu em áreas estáveis da paisagem (SCHMITZ, 2015).

Tabela 3 – Localização dos 23 pontos amostrados com a classificação de solos (WRB, 2014) e as descrições das comunidades vegetais do local.

Nº	Alt.	E	N	Classificação na WRB	Descrição do reconhecimento de vegetação
P1	60	397160	3097123	Skeletal Leptosol (Ornithic, Colluvic, Fluvic)	Líquens fruticulosos onde a maior frequência é <i>Usnea aurantiaco-atra</i> (Jacq.) Bory e <i>Deschampsia antarctica</i> Desv. As briófitas são pequenas populações de <i>Sanionia uncinata</i> (Hedw.) Loeske e <i>Politrichastrum alpinum</i> Hedw.
P2	73	396760	3097008	Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic)	Área com presença significativa do líquen <i>Leptogium menziesii</i> Mont., os musgos estão representados por pequenas populações de <i>S. uncinata</i> sobre o solo e <i>Andreaea gainii</i> Card. Em fragmentos de rocha.
P3	94	396524	3097101	Cambic Cryosol (Fluvic, Novic)	Área muito pobre em vegetação onde ocorrem pequenas e raras populações de <i>P. alpinum</i> e <i>S. uncinata</i> .
P4	76	395871	3097748	Gelistagnic Cambisol (Oxyaquic, Skeletic)	Comunidade vegetal típica de musgos em carpete com predomínio de <i>S. uncinata</i> com pequenas e raras populações de <i>Bryum</i> SP. E nas linhas de drenagem presenças significativa de <i>Prasiola crispa</i> (Lightfoot) Kützing
P5	45	396057	3097905	Albic Histic Podzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic)	Comunidade de musgos em carpete com predominância de <i>S. uncinata</i> e com ocorrência significativa de <i>P. alpinum</i> . Os líquens estão representados significativamente por <i>Cladonia</i> spp.
P6	22	396119	3097989	Lithic Histic Skeletic Leptosol (Ornithic)	Comunidade de musgos em carpete com predominância de <i>S. uncinata</i> e significativa presença cespèdes da grama <i>Deschampsia antarctica</i> Desv. Nas linhas de drenagem é freqüente a alga <i>P. crispa</i> .
P7	83	396167	3097675	Colluvic Regosol (Ornithic, Fluvic)	Comunidade de musgos em carpete com maior cobertura vegetal de <i>S. uncinata</i> e frequentes populações de <i>P. alpinum</i> . Nos fragmentos de rocha ocorrem os líquens <i>Usnea antarctica</i> Du Rietz e <i>U. Aurantiaco-atra</i> .
P8	99	396346	3097609	Turbic Cryosol (Arenic)	Ocorrência de raras populações de <i>S. uncinata</i> e <i>P. alpinum</i> . Fragmentos de rochas abundantes com líquens crustosos <i>Placopsis antarctica</i> D.J. Galloway e <i>Rhizocarpon geographicum</i> (L.) DC.
P9	101	396731	3097294	Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic)	Sem vegetação
P10	51	395876	3097224	Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic)	Comunidade descontínua de musgos em carpete com predominância de <i>S. uncinata</i> com pequenas e raras populações de <i>Bryum</i> SP. Os líquens estão representados por <i>U. antarctica</i> e <i>R. Geographicum</i> sobre pequenos fragmentos de rocha.
P11	45	396912	3096862	Leptic Cambisol (Colluvic)	Comunidade de musgos em carpete com predominância de <i>S. uncinata</i> , com pequenas e raras populações de <i>Pholia nutans</i> e <i>Bryum</i> SP.
P12	79	396589	3096913	Turbic Cryosol (Fluvic)	Comunidade de musgos em carpete com pequenas e raras populações de <i>P. nutans</i> e <i>Bryum</i> SP.
P13	47	396085	3096777	Skeletal Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic)	Área pobre em vegetação com pequenas e raras populações de <i>S. uncinata</i> fragmentos de rocha com líquens crustosos <i>P. antarctica</i> e <i>R. geographicum</i> .
P14	61	396111	3096679	Turbic Cryosol (Fluvic)	Área pobre em vegetação com pequenas e raras populações de <i>S. uncinata</i> e <i>P. alpinum</i> .
P15	68	394961	3097255	Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)	Sem Vegetação.
P16	38	395181	3097218	Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)	Sem Vegetação.
P17	42	395300	3097325	Turbic Cryosol (Fluvic)	Cobertura vegetal formada por uma densa e descontínua comunidade de Musgos em Carpete composta por <i>S. uncinata</i> com pequenas e raras populações de <i>P. alpinum</i> .
P18	34	395519	3097659	Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)	Cobertura vegetal do entorno do local formada por densa e descontínua comunidade de musgos em carpete formada por <i>S. uncinata</i> e entremeada por musgo dois.
P19	14	395381	3097783	Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)	Comunidade descontínua de musgos em carpete formado por <i>S. uncinata</i> com abundantes populações de <i>Bryum</i> SP. Próximo a praia.
P20	13	395676	3097973	Lithic Skeletic Leptosol (Ornithic, Novic)	Comunidade de tundra Fanerogâmica Antártica, formada por <i>Deschampsia antarctica</i> Desv. Com <i>P. crispa</i> .
P21	3	395807	3098017	Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic)	Comunidade de musgos em carpete formada por <i>S. uncinata</i> e pequenas populações de <i>Syntrichia princeps</i> (De Not.) Mitten., <i>Bryum</i> sp. E raros cespèdes de <i>D. Antarctica</i> .
P22	7	395983	3098058	Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic)	Densa e espessa comunidade de turfa formada por <i>P. alpinum</i> e com <i>S. uncinata</i> .
P23	21	396036	3098018	Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic)	RP23: A vegetação está representada apenas por <i>P. Crispa</i> .

A briófito *Polytrichastrum alpinum* (Hedw.) G. L. Smith, da família POLYTRICHACEAE também foi identificada na Ilha Nelson (Rip Point) por Pereira e Putzke (2013) e também por Schmitz et al. (2018) que monitora a vegetação da costa da península, corroborando o reconhecimento de sua ocorrência nestes resultados. Diferente destes estudos prévios, durante a amostragem no interior da península e esse musgo foi encontrado de forma esparsa, sendo reconhecido predominantemente em apenas dois locais (P3 e P22) sobre dois solos distintos, um Cambic Cryosol (Fluvisol, Novic) e um Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvisol), a 94 e 7 metros de altitude, respectivamente.

É restrita a ocorrência deste musgo, assim como Schmitz (2015) também observou em Half Moon, onde eles não formam extensas áreas e ocorrem em pequenas colônias. Por outro lado, na Ilha Rei George, ao investigar a composição de vegetais sob ninhais de Skuas (*Catharacta spp.*) de Hennequin Point, Albuquerque et al. (2012) constatou a *Polytrichastrum alpinum* como sendo a segunda espécie de musgo mais frequente, chamando a atenção ao fato do maior desenvolvimento dos solos onde este tipo de fungo se encontra, principalmente devido as características de incipiente processo pedogenético, a partir do caráter câmbico conferido pela classificação dos solos onde reconhecemos essa ocorrência, como no que foi constatado nos ninhais de Hennequin Point.

Os líquens do gênero *Usnea* spp. representantes da família PARMELIACEAE, um dos mais importantes líquens da Antártica (Bokhorst et al. 2016), ocorrem pela península Stansbury de forma esparsa, geralmente associados ao caráter esquelético dos solos. *Usnea aurantiaco-atra* (Jacq.) Bory foi observada apenas na região do experimento amostral (P1), sobre um Skeletic Leptosol (Ornithic, Colluvisol, Fluvisol) a 60 metros de altitude, em comunidade vegetal do tipo líquens fruticulosos com *Deschampsia antarctica* Desv. Sobre o segundo líquen do gênero *Usnea* observamos a ocorrência de *Usnea antarctica* Du Rietz. em fragmentos de rocha sobre um Colluvisol Regosol (Ornithic, Fluvisol) a 83 metros de altitude.

A ocorrência de *Usnea antarctica* em fragmentos de rocha também foi reportada por Thomazini et al. (2016) na península Keller, onde eles realizaram um experimento semelhante de fluxo de CO<sub>2</sub>-C sob essa comunidade vegetal. Esse macro líquen também foi observado por Cannone et al. (2012) em maiores latitudes,

na Baía Marguerite, Ilha de Anchorage, porém com ocorrência maior do foi observado em Stansbury, em relação aos musgos. Essa característica de predominância de *Usnea antarctica* Du Rietz também ocorreu na ilha Rei George, observado por Albuquerque et al. (2012) e Vieira et al. (2013) em Hennequin Point, ao passo que em Half Moon, Schmitz (2015) observou a espécie *Usnea aurantiacoatra* (Jacq.) Bory com maiores, frequência (34,63) e índice de significância ecológica (63,17), do que a *Usnea antarctica*.

Na Antártica, as Magnoliophytas (plantas vasculares) estão representadas apenas por duas espécies nativas: uma pertencente à família POACEAE, *Deschampsia antarctica* Desv. e outra pertencente à família CARYOPHYLLACEAE, *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl, esta última não sendo reconhecido na amostragem que se realizou em Stansbury. Já a *Deschampsia antarctica* aparece com predominância apenas no P20 - Lithic Skeletic Leptosol (Ornithic, Novic), a 13 metros de altitude, juntamente com rala presença de *Prasiola crispa*. Esta agiosperma (*Deschampsia* sp.) aparece também em comunidade vegetal no ponto amostral P1, onde encontra-se o sítio 2 do experimento sob o Skeletic Leptosol (Ornithic, Colluvic, Fluvic), juntamente com a *Usnea aurantiacoata*, relatada anteriormente. Essa angiosperma é a mais desenvolvida espécie vegetal presente na Antártica atualmente, e tem sua condição de ocorrência mantendo-se constante de acordo com recente estudo que avaliou durante duas décadas (1990 a 2008) a população de *Deschampsia antarctica*, nas Ilhas Argentinas, na península Antártica (PARNIKOZA et al., 2009).

Nas linhas de drenagem há presenças significativa de *Prasiola crispa* (Lightfoot) Kützing, representante da família PRASIOLOACEAE. Esta alga macroscópica terrestre, muito conhecida na Antártica (PEREIRA & PUTZKE, 2013), geralmente presente em regiões úmidas das áreas livres de gelo e também crescem associadas a colônias e ninhos de aves, onde a condição de baixo pH e teores maiores de nutrientes é favorável (KOVACIK & PEREIRA, 2001; FRANCELENO et al., 2011; THOMAZINI, 2016). Esta condição favorável devido ao baixo pH e saturação de bases, teores altos de fósforo, carbono e nitrogênio, é facilmente distinguível entre solos ornitogênicos e não ornitogênicos observado por Simas et al. (2007) próximo à estação de pesquisa de Artowsky, na Baía do Almirantado.

Em Hennequin Point, esta alga também foi observada em ninhos de Skuas (ALBUQUERQUE et al., 2012). Nessa mesma área também ocorreu onde houve 100% de cobertura vegetal no ponto amostral do experimento de gases do efeito feito por Vieira et al. (2013), demonstrando que é bastante recorrente pela Antártica Marítima, geralmente associada com outra macroalga do mesmo gênero, a *Prasiola calophylla* (Carmichael ex Greville) Kützing, conforme relatado por Schimtz (2015) em Half Moon.

A influência da proximidade do litoral nas áreas livres de gelo favorece o crescimento dessa macroalga que tem uma capacidade muito maior do que outras espécies na ciclagem de nutrientes, tendo conseguido colonizar grandes áreas costeiras, tanto nas áreas livres de gelo na porção marítima quanto na continental da Antártica (KOVACIK & PEREIRA, 2001). A relação com a maior disponibilidade de umidade, a partir do incremento das áreas de lagos que vem ocorrendo nos últimos anos (1986 a 2020) na península Stansbury (ROSA et al., 2021) pode promover condições favoráveis para o desenvolvimento de comunidades de macroalgas terrestres.

Características relacionadas com a presença de aves em Stansbury são mais restritas, devido à baixa frequência de animais na área, principalmente em comparação com outras regiões da Ilha Nelson, como em Harmony Point onde a influência da atividade de aves cria condições para a *Prasiola crista* ocorrer (RODRIGUES et al., 2021). Há um papel importante em formar solos em condições ornitogênicas pela ação dessa macroalga (KOVACIK E PEREIRA, 2001), e como não há grandes colônias de aves (pinguins ou outras espécies) por Stansbury, essa espécie fica mais restrita a áreas úmidas, pela abundante rede de drenagem da península.

Outras espécies foram observadas, porém sem serem predominantes nas áreas amostradas. Observou-se entre os líquens a presença de *Cladonia* spp., *Leptogium menziesii* Mont., raras *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. Em fragmentos de rocha com líquens crustosos *Placopsis antarctica* D.J. Galloway e *Rhizocarpon geographicum* (L.) DC. e por fim, outros musgos como a *Andreaea gainii* Card., *Bryum* sp. geralmente associados em comunidades vegetais de musgos com *S. uncinata*, e

pequenas populações de *Syntrichia princeps* (De Not.) Mitten., *Bryum* sp. e raros céspedes de *Deschampsia antarctica*.

### 3.2. Características físico-químicas dos solos amostrados

Na península Stansbury, os solos são predominantemente esqueléticos, apresentando esse classificador categórico da WRB em onze dos 23 solos amostrados. Possuem muito cascalho (Tabela 4), com pouca matéria orgânica, pouca atividade faunística, cobertura vegetal deficiente e o caráter eutrófico se deve ao intemperismo e lixiviação limitados das rochas vulcânicas.

Tabela 4 – Análise exploratória dos resultados das análises físicas na camada superficial (0 – 5cm) nos 23 pontos de amostragem da vegetação e dos solos da península Stansbury.

23 amostras (de 0-5 cm)	>2mm	Areia	Silte	Argila	DP
Valor mínimo	2	35	4	7	2.4
Valor máximo	76	87	48	25	2.6
Valor médio	41.17	61.5	22.1	16.35	2.5
Mediana	45	64	20	16	2.5
Coef. De Variação	0.446	0.22	0.49	0.259	0

Essa característica textural dos solos onde o experimento foi instalado, em geral assemelha-se com os valores médios encontrados em outros pontos da península, onde a fração areia gira em torno dos 60 % do total. Acerca da textura franco-arenosa nos solos de Stansbury, a fração textural no solo onde o experimento foi instalado é franca e franca-arenosa (Tabela 5), para os sítios 1 e 2.

Os resultados químicos das amostras de solo retiradas dos locais onde o experimento com fluxo de CO<sub>2</sub>-C foi realizado (Figura 7), demonstram que as condições em que as comunidades vegetais dos sítios 1 e 2, com carpete de musgo de *Sanionia uncinata* e comunidade vegetal de *Usnea antarctica* com *Deschampsia antártica* se desenvolvem em solos com baixa acidez, pH variando entre 5,7 a 6,4, o que se assemelha aos valores médios observados na amostragem de solos pela

península (Tabela 6) e também observado por Schmitz et al., (2020), ao estudar as comunidades vegetais no litoral da península.

Tabela 5 – Textura do solo nos sítios em comparação com as médias de 23 amostras.

Nº	Prof.	Areia	Silte	Argila	DP	Classe textural
	cm	-----	g.kg	-----	g.cm <sup>-3</sup>	
<b>Sítio 1 – carpete de musgo de <i>Sanionia uncinata</i></b>						
A1.1	0 - 5	550	250	200	2.33	Franco-argilo arenosa
A1.2	0 - 5	220	490	290	2.13	Franco-Argilosa
A1.3	0 - 5	570	290	140	2.47	Franco-Arenosa
<b>Sítio 2 – comunidade vegetal de <i>Usnea antarctica</i> e <i>Deschampsia antarctica</i></b>						
A2.1	0 - 5	630	170	200	2.44	Franco-argilo arenosa
A2.2	0 - 5	680	120	200	2.27	Franco-argilo arenosa
A2.3	0 - 5	750	80	170	2.41	Franco-arenosa
A2.1	5-20	670	160	170	2.47	Franco-arenosa
A2.2	5-20	740	90	170	2.38	Franco-arenosa
A2.3	5-20	780	80	140	2.41	Franco-arenosa
<b>Médias dos atributos físicos dos solos dos sítios</b>						
<i>Sítio</i> 1	0 - 5	450	340	210	2.31	<i>Franca</i>
<i>Sítio</i> 2	0 - 5	690	120	190	2.37	<i>Franco arenosa</i>
	5 - 20	730	110	160	2.42	<i>Franco arenosa</i>

Valores semelhantes de acidez aos encontrados em Stansbury foram registrados por Duran et al. (2021), na Ilha de Livingstone, que comparou atributos do solo sob coberturas criptogâmicas de líquens, musgos e áreas sem cobertura, e encontraram valores de baixa acidez, com valores de pH 6,26, 6,25 e 6,42, respectivamente.

De uma forma geral, a acidez do solo está associada a contribuição de animais e aves (SIMAS et al., 2007), como pode ser observado em Harmony Point, onde solos com influência de deposição de guano, foram mais ácidos em profundidade (RODRIGUES et al., 2021). Cannone et al. (2012) avaliaram fluxo de CO<sub>2</sub> entre diferentes comunidades vegetais de Rothera Point, na Ilha de Anchorage, e em todos os sítios que eles amostraram, observaram solos mais ácidos variando em pH de 3,65 onde haviam *Deschampsia* sp. até 3,76 em áreas livres de cobertura vegetal.

Tabela 6 – Resultados da estatística descritiva das análises químicas da camada subsuperficial (0 a 5 cm) de todos os 23 pontos amostrais de reconhecimento da vegetação e classificação de solos, na península Stansbury, Ilha Nelson, Antártica Marítima.

	<b>pH</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Na</b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Al<sup>3+</sup></b>
		mg.dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>		
Valor mínimo	4,8	18,4	82	144,4	2,23	1,89	0
Valor máximo	7,9	537	270	561	39,5	18,9	24,3
Valor médio	6,6	109	166,5	298,3	18,0	9,59	1,87
Mediana	6,6	64,8	154	273	19,2	9,0	0
Coef. De Variação	0,1	1,1	0,314	0,38	0,48	0,43	3,04

	<b>H+Al</b>	<b>SB</b>	<b>t</b>	<b>T</b>	<b>V</b>	<b>ISNa</b>	<b>MO</b>
	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>			%		g kg	
Valor mínimo	0	5,13	14,0	15,1	12	1,45	2,6
Valor máximo	38,2	57,5	57,5	58,6	100	12,4	88,9
Valor médio	5,03	29,3	31,2	34,4	85	4,11	18,7
Mediana	2,1	32,1	32,1	35,0	93	3,63	9,2
Coef. De Variação	1,72	0,4	0,31	0,26	0,3	0,56	1,18

Os teores de fósforo nos sítios variaram, em média, de 134 a 148 mg dm<sup>-3</sup>, valores que são maiores do que a média de P encontrada pela península, conforme análise exploratória realizada na amostragem dos solos. O fósforo geralmente é fortemente influenciado pela presença de animais e aves (SCHAEFER et al., 2014). Na península Keller valores de fósforo foram semelhantes aos encontrados em Stansbury, variando entre 132 a 253 mg kg<sup>-1</sup> nos sítios em que realizou o experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C em diferentes coberturas vegetais, corroborando semelhanças que possam vir a ser comparadas em termos de gases produzidos por essas comunidades.

Tabela 7 – Características químicas dos solos das duas comunidades vegetais do experimento de fluxo CO<sub>2</sub>-C.

Nº	Prof. cm	pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	ISNa	MO	Ntotal	P-rem
			mg.dm <sup>-3</sup>			cmolc.dm <sup>-3</sup>							%	g.kg <sup>-1</sup>	dag.kg <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	
<b>Sítio 1 – carpete de musgo de Sanionia uncinata</b>																	
A1.1	0 - 5	6,45	160,6	159	289	16,23	5,55	0	2,9	23,44	23,44	26,34	89	4,77	77,7	0,397	28,5
A1.2	0 - 5	5,85	158,3	166	318	16,41	5,79	0	4,7	24,01	24,01	28,71	83,6	4,82	128,4	0,588	28,4
A1.3	0 - 5	6,8	126,8	130	282	12,05	3,54	0	2,6	17,15	17,15	19,75	86,8	6,21	29,6	0,162	24,2
<b>Sítio 2 – comunidade vegetal de Usnea antarctica e Deschampsia antarctica</b>																	
A2.1	0 - 5	5,95	93,9	165	258	7,04	6,34	0,29	9,3	14,92	15,21	24,22	61,6	4,63	52,7	0,268	18
A2.2	0 - 5	5,52	139,4	178	263	6,64	6,4	0,88	10,5	14,64	15,52	25,14	58,2	4,55	69,1	0,211	17,5
A2.3	0 - 5	5,59	169,7	173	256	5,97	5,83	0,78	10	13,36	14,14	23,36	57,2	4,76	42,8	0,271	22,2
A2.1	5-20	6,71	121,1	146	298	7	4,74	0	6,4	13,41	13,41	19,81	67,7	6,54	46,1	0,289	14,8
A2.2	5-20	6,21	132,6	149	256	7,68	6,28	0,29	10,5	15,46	15,75	25,96	59,6	4,29	59,3	0,234	15,4
A2.3	5-20	6,31	185,4	161	273	7,38	6,27	0,29	9,7	15,25	15,54	24,95	61,1	4,76	69,1	0,252	19,9
<b>Médias dos atributos químicos dos solos dos sítios</b>																	
Sítio 1	0 - 5	6,37	148,57	151,67	296,33	14,90	4,96	0,00	3,40	21,53	21,53	24,93	86,47	5,26	78,5	0,38	27,03
Sítio 2	0 - 5	5,69	134,33	172,00	259,00	6,55	6,19	0,65	9,93	14,31	14,96	24,24	59,00	4,65	54,9	0,25	19,23
	5 - 20	6,41	146,37	152,00	275,67	7,35	5,76	0,19	8,87	14,71	14,90	23,57	62,80	5,20	58,2	0,26	16,70

O potássio, por sua vez, variou entre 151 e 172 mg.dm<sup>-3</sup> em média para os sítios 1 e 2, respectivamente, também dentro da média de teores de K encontrados na amostragem feita pelos solos da península Stansbury. São valores mais altos em comparação com os valores encontrados em todos os sítios investigados por Thomazini et al. (2016) na península Keller, variando de 48 a 96 mg.dm<sup>-3</sup>, levando a crer que a condição de exposição ao oceano revolto, mais exposta às intemperes do spray salino que recaem sobre a península Stansbury, do que a condição de maior proteção que há na Baía do Almirantado, onde a península Keller está situada.

Em relação a saturação de bases (SB), os valores encontrados para os sítios 1 e 2 foram 21.53 e 14.31 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> na camada superficial, sendo caracterizados por valores menores que em média foram observados na amostragem dos solos por toda a península. Em Harmony Point, na mesma Ilha Nelson, Rodrigues et al. (2021) avaliaram a contribuição das aves e mesmo sendo áreas de maior deposição de guano, tiveram valores semelhantes, variando entre 18.5 a 23.9 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>. Esta comparação de resultados descreve que em relação às bases trocáveis, provenientes do material de origem, não variaram na Ilha de Nelson, demonstrando a importância que a contribuição da nidificação das aves tem no aspecto nutricional relacionado com outros elementos como o fósforo e o nitrogênio.

A acidez trocável (H+Al), influenciada pela deposição de guano por animais e aves, no estudo em Harmony Point chegou a 21.1 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>, ao passo que na área do experimento em Stansbury não foram maiores que 9.93 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>, descrevendo o que foi observado em relação ao H+Al avaliado na amostragem por toda a área com valor médio de 5 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>, mesmo havendo uma leitura de 38.2 cmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>, registrado na camada superficial do RP23 – Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic), associado a influência ornitogênica que usualmente confere ambientes com maior acidez trocável (SIMAS et al., 2007; MENDONÇA et al., 2011; SCHAEFER et al., 2014; RODRIGUES et al., 2021).

A matéria orgânica (MO) nos sítios 1 e 2 resultaram em teores médios de 78,5 e 54,9 g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. São níveis maiores do que os encontrados no restante da amostragem pela península Stansbury, que giraram em torno de 19 g.kg<sup>-1</sup>, tendo sido registrado apenas uma vez um valor mais alto, no perfil RP05 – Albic Histic Podzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic), novamente associado ao caráter ornitogênico.

Entretanto, Rodrigues et al. (2021) registrou maiores teores de MO em Harmony Point, com influência da deposição de guano e alcançou registros maiores variando de 90 a 162 g.kg<sup>-1</sup>. Em Keller, com o experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C, Thomazini et al. (2016) registrou valores entre 36 e 136 g.kg<sup>-1</sup>, este último registro no sítio onde havia um tapete de musgos, composto amplamente de *Sanionia uncinata*, situação com semelhanças entre os sítios de fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo pelos tapetes de musgos proposto para a península Stansbury.

A diversidade e composição de espécies vegetais, detalhadas a partir da identificação taxonômica de comunidades vegetais na Antártica, são amplamente estudadas nas áreas livres de gelo do arquipélago das ilhas Shetlands do Sul (PEREIRA & PUTZKE 1998a, 1998b; PUTZKE & PEREIRA, 2013; SCHMITZ et al., 2018, 2020). Aspectos relacionados com especificidades do microambiente contribuindo para específicas associações em padrões de diversidade de espécies entre plantas não vasculares e gradientes pedoambientais que promovem uma “filtragem” pedoambiental para a ocorrência de tipos diferentes em comunidades vegetais (SCHMITZ et al., 2020). Este estudo realizado nesta pesquisa, por outro lado, se propôs a lançar um olhar geral nas principais associações independente do detalhamento necessário de espécies, buscando principalmente lançar o olhar investigativo sobre a contribuição dessas comunidades vegetais em ecossistemas que drenam ou emitem gases do efeito estufa para a atmosfera.

### **3.3. Experimento de Fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo**

Os resultados (Tabela 8) do experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo com influência de *Sanionia uncinata* (Sítio 1) e com influência de *Usnea antarctica* e *Deschampsia antarctica* (Sítio 2) estão apresentados na análise exploratória das estatísticas descritivas de respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), produção primária bruta (GPP), temperatura do solo (ST) e umidade do solo (SM).

Tabela 8 – Resultados e estatística descritiva das variáveis respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), produção primária bruta (GPP), temperatura do solo (ST) e umidade do solo (SM) do experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo, nas comunidades vegetais selecionadas na península Stansbury.

Dia	Sítio	Média	Mediana	Min	Max	EP	CV	Ass	Curt
<b>ER (<math>\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math>)</b>									
Dia 1	Sítio 1	0,79	0,59	0,09	3,34	0,10	0,825	2,18	5,43
	Sítio 2	0,61	0,46	0,05	2,68	0,08	0,861	1,99	4,49
Dia 2	Sítio 1	1,20	1,10	0,19	3,26	0,11	0,594	0,91	0,28
	Sítio 2	0,87	0,78	0,05	2,81	0,10	0,703	1,08	0,79
<b>NEE (<math>\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math>)</b>									
Dia 1	Sítio 1	-1,23	-0,86	-4,33	-0,15	0,17	-0,879	-1,31	1,03
	Sítio 2	-0,04	-0,05	-0,87	0,89	0,07	-11,284	0,29	0,26
Dia 2	Sítio 1	0,10	0,22	-3,75	3,68	0,27	16,849	-0,28	-0,21
	Sítio 2	-0,45	-0,30	-2,43	0,22	0,08	-1,129	-1,87	5,00
<b>GPP (<math>\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}</math>)</b>									
Dia 1	Sítio 1	-2,02	-1,67	-6,51	-0,49	0,22	-0,674	-1,45	2,05
	Sítio 2	-0,64	-0,57	-2,93	0,81	0,12	-1,178	-0,83	1,48
Dia 2	Sítio 1	-1,10	-1,0	-6,75	2,74	0,32	-1,821	-0,50	0,23
	Sítio 2	-1,32	-1,13	-3,71	0,08	0,15	-0,699	-0,78	0,06
<b>ST (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>									
Dia 1	Sítio 1	4,35	4,29	3,15	5,72	0,10	0,146	0,33	-0,62
	Sítio 2	4,69	4,64	4,11	5,36	0,05	0,067	0,09	-0,22
Dia 2	Sítio 1	6,30	6,19	4,98	7,85	0,11	0,114	0,54	-0,23
	Sítio 2	4,44	4,40	3,15	5,92	0,11	0,152	0,42	-0,19
<b>SM (<math>\text{m}^3.\text{m}^{-3}</math>)</b>									
Dia 1	Sítio 1	0,24	0,24	0,17	0,32	0,70	0,185	0,20	-1,31
	Sítio 2	0,20	0,19	0,16	0,25	0,34	0,109	0,67	-0,51
Dia 2	Sítio 1	0,23	0,21	0,17	0,31	0,62	0,175	0,52	-1,19
	Sítio 2	0,18	0,17	0,16	0,21	0,16	0,056	1,05	1,39

n = 40; EP- Erro padrão; Min—mínimo; Max—máximo; CV—coeficiente de variação; Ass—Assimetria; Curt—curtose. Valores negativos representam remoção e valores positivos representam emissões.

A variação de temperatura pode acelerar ou estabilizar processos bioquímicos e os resultados obtidos no experimento em Stansbury apontam que a temperatura, para os dois dias, variou das médias de 4,35 °C a 6,30 °C para o Sítio 1 e 4,69 °C a 4,44 °C para o Sítio 2. De modo geral o segundo dia registrou maiores temperaturas no solo que o primeiro, em ambos os Sítios. Valores mais altos de temperatura do solo foram registrados no sítio 1, não só em média, mas também em valor absoluto (7,85 °C). No sítio 1 também foi registrado a menor temperatura (3,15 °C), porém em dia distinto do registro da maior temperatura.

A umidade do solo variou pouco entre os dias de experimento, porém houve diferenças entre os sítios. Os maiores registros de umidade ocorreram no Sítio 1, variando entre 0,17 a 0,32 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> no primeiro dia e 0,18 a 0,31 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> no segundo, demonstrando ser semelhante ao Sítio 2, que registrou 0,16 a 0,25 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> no primeiro dia e 0,17 a 0,21 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> no segundo dia. A média e mediana entre os valores de umidade não tiveram diferença, e corroboram a diferença pouco expressiva de umidade entre os sítios, que variou em média de 0,24 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> e 0,23 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> no primeiro e segundo dia para o Sítio 1 e 0,20 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup> e 0,18 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>, para o Sítio 2. Associação de maior umidade (0,32 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>) com maior efeito de dreno para o CO<sub>2</sub> também foi observado no sítio com carpete de musgo em Keller, com valor bruto de 1,54 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (THOMAZINI et al., 2016).

Para o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, durante o primeiro dia, sob o carpete de musgos com predomínio de *Saniona uncinata* (Sítio 1), observou-se médias de ER de 0,79 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e GPP de - 2,02 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> resultando em NEE de - 1,23 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, caracterizando o sítio 1 como dreno de CO<sub>2</sub>. No sítio 2, na comunidade vegetal com associação de *Usnea antarctica* com *Deschampsia antarctica*, observou-se ER de 0,60 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> e GPP de - 0,64 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> resultando em discreto NEE de - 0,04 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, praticamente zerando o balanço de CO<sub>2</sub> neste sítio.

Resultados para o segundo dia, apontam para uma alteração no comportamento entre os sítios, onde o Sítio 1 passou a ter NEE de 0,10 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> passando a fonte de CO<sub>2</sub>, e no Sítio 2 NEE de - 0,45 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. No segundo dia, devido ao maior aumento de temperatura no Sítio 1, houve um aumento na ER e redução do NEE. Variações semelhantes de comportamento do fluxo de CO<sub>2</sub>

do solo foram encontrados em estudo com *Sanionia* realizados próximo a geleira Ecology, perto da estação polonesa de pesquisa Artowski com variação de 2,38 a 0,00  $10 \mu \text{ mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (THOMAZINI et al., 2014), e na península Keller (THOMAZINI et al., 2016), ambas áreas em que o ecossistema com comunidades vegetais semelhantes foram estudadas.

Resultados das análises exploratórias espaciais (Figura 3) indicam que a correlação negativa entre NEE e SM varia de acordo com as condições dos Sítios, onde maior umidade foi observada no Sítio 1. Também o teor de carbono orgânico do solo mostrou-se maior no Sítio 1 do que no Sítio 2, apresentando 45,6 g  $\text{kg}^{-1}$  e 31,5 g  $\text{kg}^{-1}$ , respectivamente. Os valores de SM apresentaram ligeira diferença entre os Sítios, mas mesmo assim o padrão de troca de carbono se mantém.

Os resultados indicam que diferentes vegetações caracterizam diferenças no regime das trocas de  $\text{CO}_2$ -carbono do solo, mais importante que a variação de temperatura, o que poderia ser explicado pela presença de tapete de musgo de *Sanionia unicata*, em comparação ao local 2 com comunidade de *Usnea sp* e *Deschampsia*, corroborando que variação espacial da emissão de gás carbônico se relacionam com a vegetação e o desenvolvimento dos solos no ecossistema investigado (THOMAZINI et al., 2014).

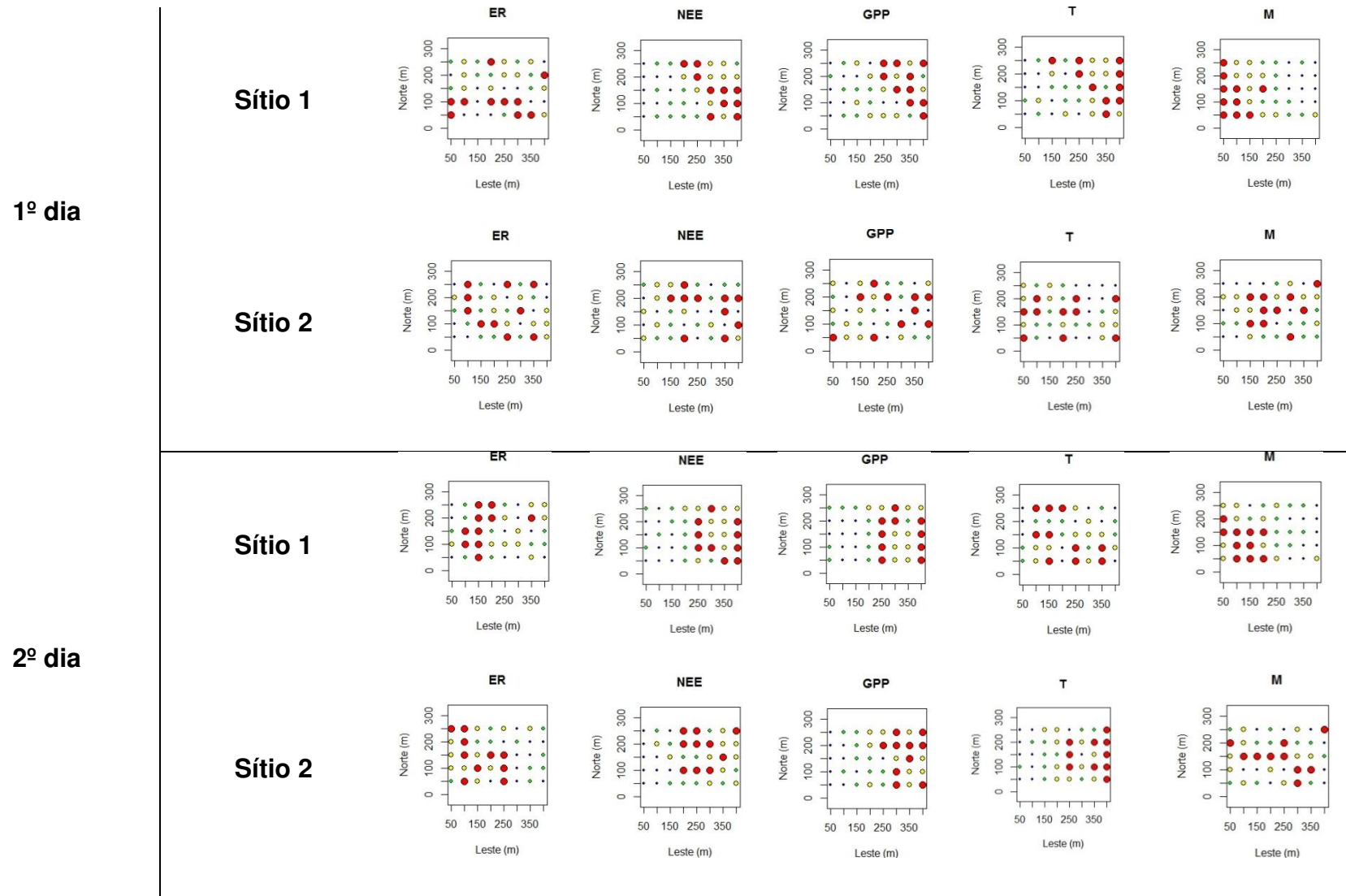


Figura 3 – Resultados das análises exploratórias espaciais nos dois Sítios em ambos os dias. Os círculos vermelhos indicam maior valor da variável pela grade amostral do experimento realizado na península Stansbury, Ilha Nelson.

A umidade média do solo foi maior no Sítio 1 em ambos os dias monitorados. No entanto, sob o aquecimento atual do clima, estes locais poderão agir progressivamente como uma fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (THOMAZINI et al., 2014). Nota-se que a resposta de alteração da temperatura do solo nas duas comunidades vegetais não é a mesma. A GPP será uma função das duas variáveis relacionadas com umidade e temperatura, além de composição da comunidade vegetal que está sob o solo, conferindo ao ecossistema a característica funcional de drenar CO<sub>2</sub> da atmosfera. Mesmo com aumento de 1,95°C, o sítio 1 ainda continua atuando como dreno na média. Com esse aumento de temperatura, a ER aumentou 0,41 μ mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Percebe-se que a umidade está bem próxima, muito diferente das outras comunidades vegetais onde as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> diminuíram de 2.38 para 0.00 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ao passo que a temperatura nos 5 cm do solo aumentou (de 1.9 a 7°C) próximo da geleira Ecology (THOMAZINI et al., 2014).

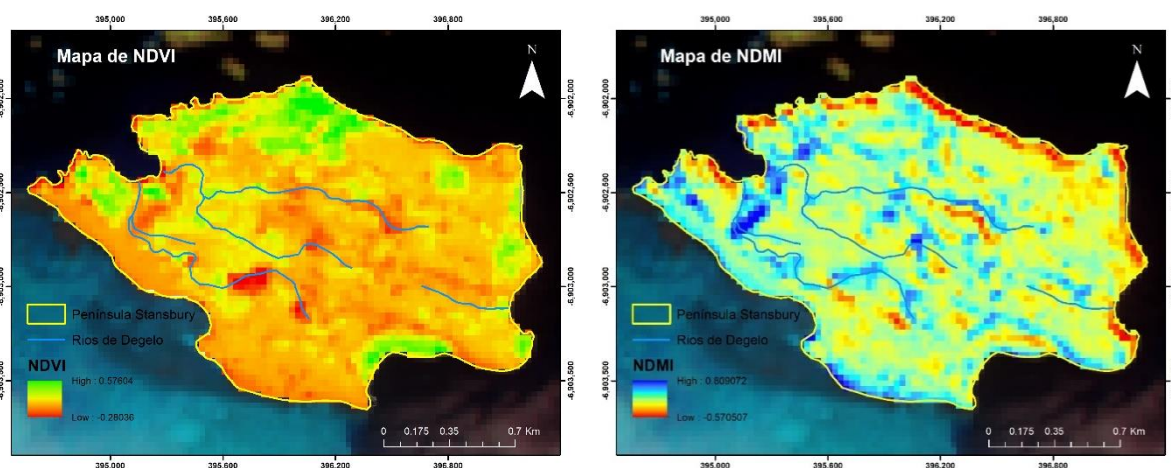
Os resultados indicam a capacidade dos tapetes de musgo (especialmente da *Sanionia uncinata*) em atuar como dreno de carbono, onde a umidade do solo é elevada. Por outro lado, de acordo com outros estudos realizados em áreas livres de gelo na Antártica, onde o guano é depositado, a temperatura do solo é aumentada, levando ao aumento da mineralização da matéria orgânica do solo, respiração do ecossistema, atuando como fonte de carbono para a atmosfera (MENDONÇA et al., 2010; THOMAZINI et al., 2014). Por outro lado, as turfeiras podem ser formadas devido ao derretimento da neve / gelo, armazenando grandes quantidades de carbono. O balanço de sequestro e liberação de C precisa ser mais pesquisado na Antártica Marítima, para elucidar a dinâmica atual para outras áreas diferentes sem gelo (MENDONÇA et al., 2010).

### 3.4. Sensoriamento Remoto

As imagens obtidas do Landsat 8 permitiram calcular os índices NDVI e NDMI (Figura 4), para o ano de 2021. Fatores regionais são relevantes para correlacionar com o fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo, uma vez que áreas com solo exposto por mais tempo e distante de geleiras, demonstram maior potencial de emissão de CO<sub>2</sub> do que áreas recentemente expostas (THOMAZINI et al., 2014).

A umidade e a temperatura são fatores que influenciam na emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, e contribui para entender a dinâmica de ocupação do solo pela vegetação, considerando a influência da água, como pode-se observar na figura 4, demonstrando o mapeamento dos índices pela península Stansbury.

Figura 4 – Mapa de NDVI e NDMI obtida pelas bandas de refletância atmosférica corrigida do Landsat 8, fevereiro de 2021, da península Stansbury.

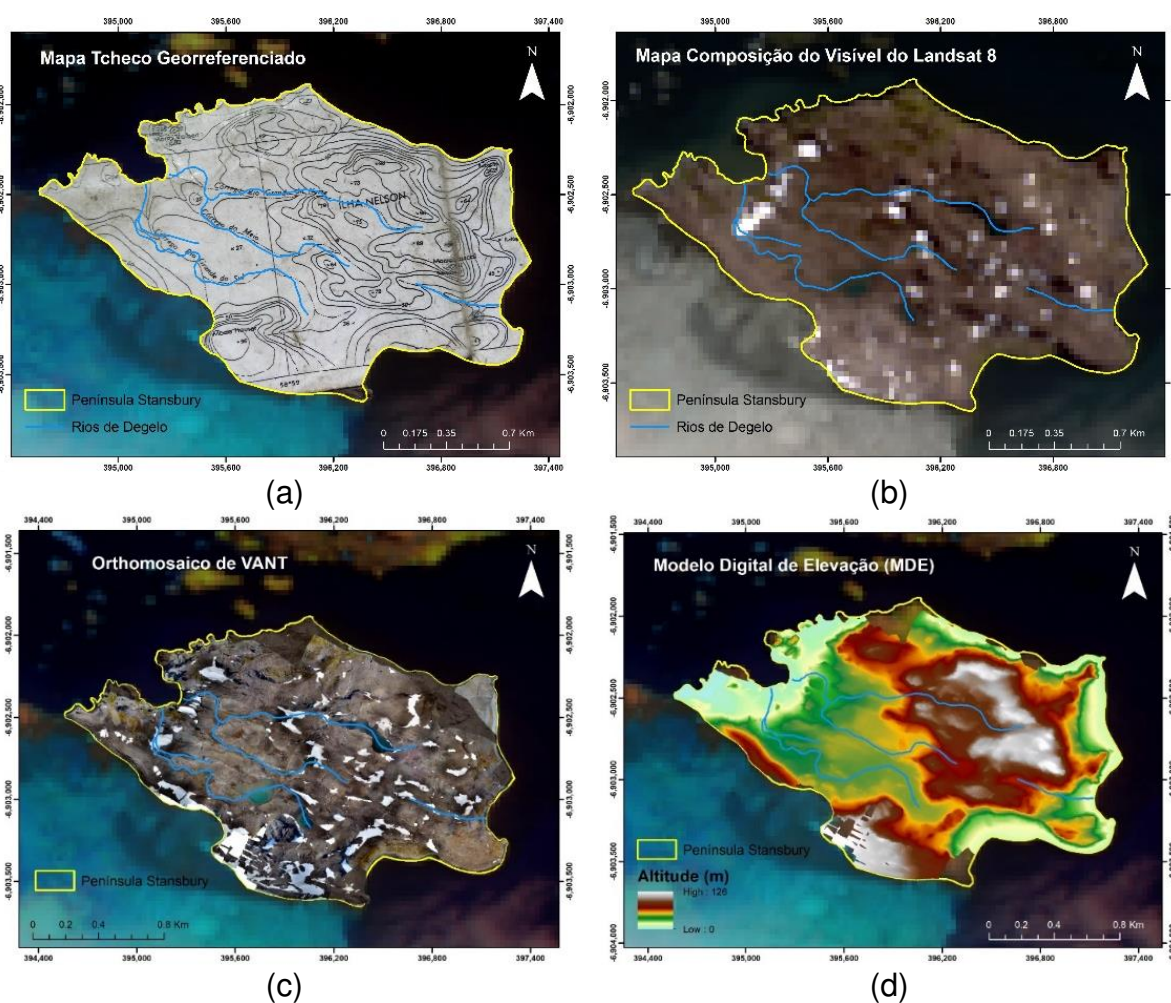


As regiões da península com maiores NDMI coincidem com as áreas com bancos de neve que persistem na imagem mesmo em fevereiro de 2021, atestando serem áreas que possivelmente ficam com cobertura de neve o ano todo, conferindo aos solos que estão debaixo, a manutenção de temperaturas próximas de zero, e portanto são áreas onde o carbono está aprisionado e a perda de cobertura de neve nessas áreas pode significar emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, portanto são áreas importantes de serem monitoradas, ainda mais pelo padrão resiliente que esses bancos de neve apresentam mantendo-se presentes mesmo durante o verão austral.

### 3.5. Aerofotografias

A figura 5 demonstra a comparação do potencial de informação que a fotometria e o sensoriamento remoto para realizar estudos nos ambientes extremos da Antártica. Foi possível georreferenciar um mapa encontrado em um abrigo civil (Eco-Nelson Station) tcheco, com as curvas de nível da península Stansbury e os nomes de córregos de degelo, picos, praias e rochosos (Fig. 5-a). Comparando-se entre as imagens do Landsat 8 (Fig. 55-b) e a do levantamento realizado com ARP, foi possível caracterizar as estruturas da paisagem com base nessas nomenclaturas.

Figura 5 – Mapas de curva de nível (encontrado no abrigo), e mapas exploratórios da península Stansbury, Ilha de Nelson, Antártica Marítima.



O ortomosaico produzido com levantamento aerofotogramétrico com ARP (Figura 5-c) proporciona um mapeamento muito mais detalhado da área, e a resolução

espacial em comparação com a composição da imagem LandSat 8 no visível (RBG) (Figura 5-b).

O modelo digital de elevação realizado é o mais preciso até então, com altitude máxima na península atingindo 128 metros no pico mais alto, denominado de Monte Paschoal (Figura 6-a), na região centro-sudeste da península. A drenagem também foi identificada, voltada em sua maioria do sentido sudeste-noroeste correndo por três rios: Córrego Rio Grande do Norte, Córrego do Meio e Córrego Rio Grande do Sul. Apenas um curso de drenagem mais expressivo corre no sentido oeste-leste, até a praia na pequena baía de Frantz (Figura 5-a) que se forma na Ilha Nelson.

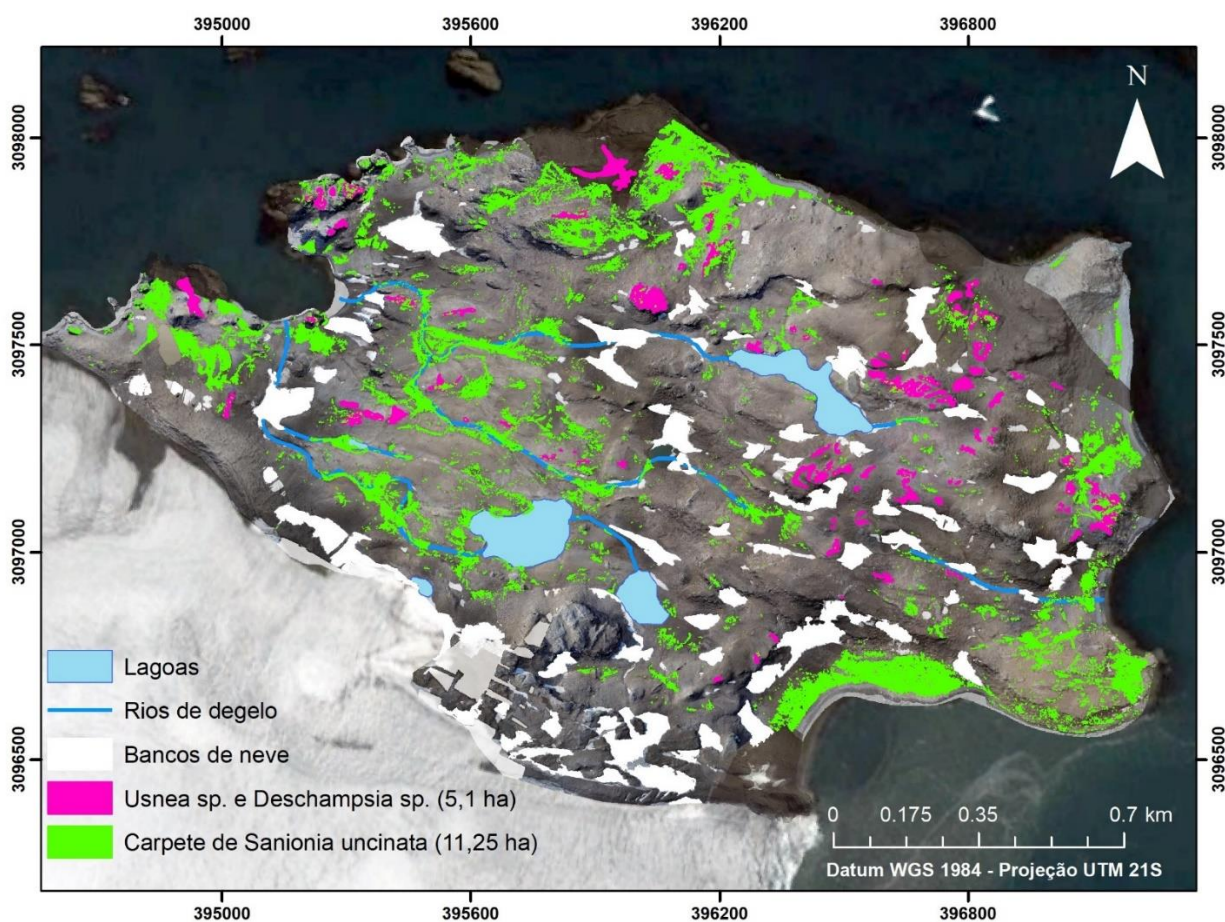
### **3.6. Mapeamento das Comunidades Vegetais**

O mapeamento da vegetação, considerou o carpete de musgos com predomínio de *Sanionia uncinata* e na comunidade vegetal de líquens *Usnea antarctica* e *Deschampsia antarctica*. As áreas identificadas foram respectivamente de 11.25 ha para os musgos e 5.01 ha para os líquens, 6.5 ha ocupados por lagoas, 17.75 ha de bancos de neve, e salvo esparsas comunidades vegetais que não podem ser observadas nem pelas imagens do levantamento aerofotogramétrico, a grande maioria da área, consideráveis 245 ha de áreas sem cobertura.

O detalhamento que o levantamento de cobertura do solo com ARP é demonstrado na comparação com o mapeamento seguindo o protocolo conforme Santos (2016), que usou a banda 5 do infravermelho próximo (NIR) para mapear as vegetações a partir de imagens Landsat 8, em Harmony Point, na mesma Ilha Nelson. Para o campo de musgos, reconheceu em torno de 42 ha. Ao utilizar o mesmo método com a imagem de Stansbury, o carpete de musgo correspondeu a uma área de 26 hectares, mais do que o dobro do que de fato existe na área a partir do mapeamento que se realizou com o ortomosaico (Figura 6).

Com a imagem obtida pelo ARP, o mapeamento da vegetação, assim como outras feições como bancos de neve e lagoas, puderam ser mapeadas com uma precisão e acurácia maior do que se o mapeamento fosse realizado com imagem Landsat, devido a melhor resolução da imagem.

Figura 6 – Mapa de vegetação de *Sanionia uncinata* e da comunidade de *Usnea* sp. e *Deschampsia* sp. a partir do ortofotomosaico fruto do levantamento com ARP na península Stansbury, Ilha Nelson, Antártica Marítima.



### 3.7. Fluxo de Carbono pela vegetação em Stansbury

Estimar o fluxo de  $\text{CO}_2\text{-C}$  do solo é complexo e correlaciona várias condições para que seja promovido o sequestro ou a liberação de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera pelos ecossistemas (TIFAFI, 2018). Com base no experimento amostral entre as duas comunidades vegetais avaliadas neste estudo, que apresenta uma técnica concatenada ao uso de levantamento fotogramétrico realizado com ARP no mapeamento das comunidades vegetais de interesse, calculou-se as áreas de ocorrência de carpete de musgos com predomínio de *Sanionia uncinata* e a área com comunidade vegetal de *Usnea antarctica* e *Deschampsia antarctica*.

Áreas com maior exposição do solo e cobertura vegetal têm menos variabilidade espacial nas emissões de CO<sub>2</sub>, em comparação com áreas mais próximas de geleira (THOMAZINI et al., 2014), ou áreas com diferenças de umidade e temperatura do solo (DAVIDSON & JANSSENS, 2006; GUGLIELMIN et al., 2007; MENDONÇA et al., 2010), além das diferentes ferramentas e técnicas utilizadas para compreender a dinâmica do carbono nos solos (TIFAFI, 2018).

A metodologia estimou o fluxo de carbono das principais comunidades vegetais com base no mapeamento realizado na imagem ortorretificada, extrapolando os resultados deste experimento (Tabela 9) e dos resultados de Thomazini et al. (2016) para sem cobertura vegetal.

Tabela 9 – Apresentação das médias das variáveis do experimento de fluxo de CO<sub>2</sub>-C do solo, a área mapeada na península Stansbury e o carbono estimado.

Referências <sup>1</sup>	ER	NEE	ST	SM	Área em Stansbury	TCest
	Média em $\mu\text{ mol CO}_2\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$		$^{\circ}\text{C}$	$\text{m}^3\text{ m}^{-3}$	ha	$\text{gCO}_2\text{ ha}^{-1}\text{ s}^{-1}$
<i>Sainonia uncinata</i>	1,00	-0,57	5,33	0,24	11,25	-0,25
<i>Usnea+Deschampsia</i>	0,74	-0,25	4,56	0,19	5,1	-0,11
<i>Solo/Rocha exposta*</i>	0,24*	0,12*	5,99*	0,12*	245	0,05

<sup>1</sup>Respiração do ecossistema (ER), troca líquida de CO<sub>2</sub> do ecossistema (NEE), temperatura do solo (ST) e umidade do solo (SM) \*Dados para áreas sem cobertura de vegetação, consideradas pelo estudo de Thomazini et al. (2016), realizado na península Keller, Ilha Rei George, Antártica marítima.

Convencionou-se aqui neste estudo os preceitos de que 1 mol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> corresponde a 440 kg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> de acordo com Kirschbaum et al. (2001). Considerando as áreas mapeadas na imagem ortorretificada, os campos de musgo com predominância de *Sanionia uncinata* possuem uma área de 11,25 hectares pela península Stansbury. O experimento realizado para essa comunidade vegetal resultou em remoção de 0,25 gramas de CO<sub>2</sub> por segundo, em média para cada metro quadrado dessa comunidade. Partindo do pressuposto que temos 11,25 hectares, totalizam 2,81 gCO<sub>2</sub> s<sup>-1</sup>. Na comunidade composta por *Usnea* e *Deschampsia*,

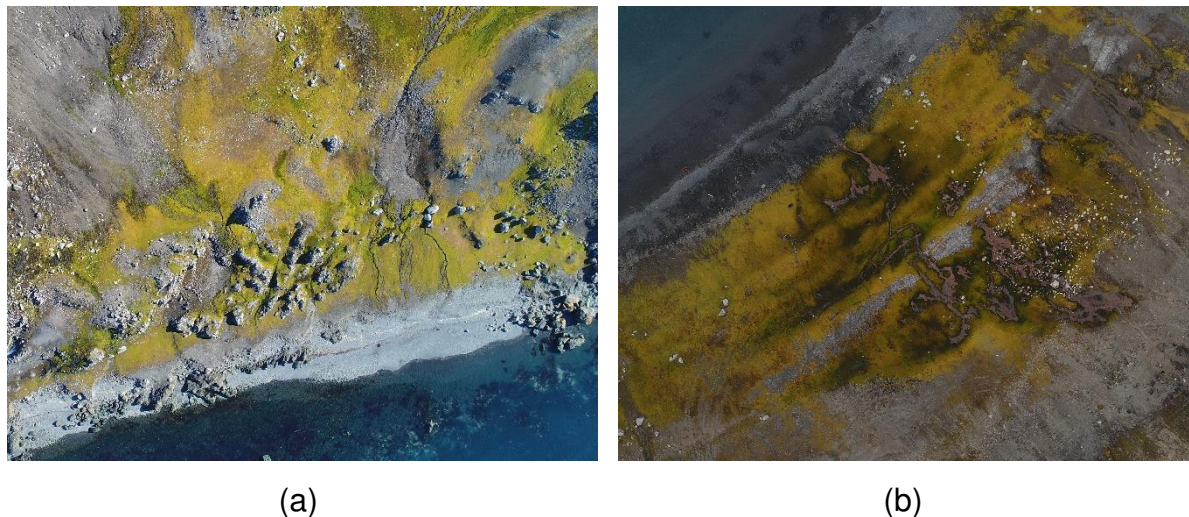
estimou-se a remoção de 0,11 gramas de CO<sub>2</sub> por segundo por hectare e, referente a área mapeada de 5,1 ha, em média estimamos que essas comunidades sejam responsáveis por removerem 0,56 g CO<sub>2</sub> s<sup>-1</sup>.

Considerou-se a título de comparação os resultados do fluxo de CO<sub>2</sub>-C que Thomazini et al. (2016) encontraram para áreas sem cobertura vegetal na península Keller, Ilha Rei George, área próxima na Antártica Marítima, de emissões de 0,05 g CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>. Dessa forma, a área de solo exposto e rocha estimada em 245 hectares de Stansbury, 12,25 gCO<sub>2</sub> s<sup>-1</sup>, assumindo que não haja nenhum tipo de cobertura vegetal nessas áreas, o que é uma estimativa superestimada, pois sabe-se que mesmo em pequenas associações e ocorrências dispersas, muitas são as comunidades vegetais que se formam entre as rochas e solo dessas áreas livres de gelo, não tendo sido mapeadas neste estudo.

Geralmente, locais com comunidades de vegetação bem desenvolvidas tendem a ter maior C orgânico total do solo do que locais sem vegetação (STRAUSS et al., 2009). Além disso, as áreas mais secas são mais comuns longe da geleira (STRAUSS et al., 2009), sem a influência da umidade proveniente do processo de derretimento, o que contribui para o estabelecimento da vegetação (CANNONE et al., 2012) e condições para a decomposição microbiana da matéria orgânica, principalmente com a influencia de animais, como pinguins (MENDONÇA et al., 2011).

Os solos são os principais componentes dos ecossistemas terrestres e o maior reservatório de carbono orgânico da Terra, sendo muito reativos à perturbação humana e às mudanças climáticas (TIFAFI, 2018). Ações locais antrópicas são as mais impactantes no que se refere a comunidades de musgos nas áreas livres de gelo, como pode ser observado comparando-se um campo de *Sanionia uncinata* sem a perturbação humana e o que ficou para trás onde localizava-se um antigo abrigo na península Stansbury, demonstrando o efeito drástico que seres humanos podem causar a essas comunidades (Figura 7).

Figura 7 – Fotografias aéreas de campos de musgos sem a interferência humana (a) e com o resultado da interferência humana (b) deixada como legado na península Stansbury.



Avaliando os resultados aqui encontrados, observa-se que ao passo que as condições climáticas se alteram, as comunidades vegetais de musgos e líquens podem alterar sua composição de espécies e qualquer aumento na área ocupada por criptogramas em ecossistemas terrestres da Antártica (devido ao aumento da estação de crescimento e condições de aquecimento cada vez mais) provavelmente resultará em aumentos paralelos na fertilidade do solo, bem como em uma capacidade aprimorada de emitir CO<sub>2</sub> (DURÁN et al., 2021). Adicionado aos impactos que a ação humana pode causar.

#### 4. CONCLUSÕES

Na península Stansbury ocorrem diversas comunidades vegetais similares às encontradas em outras ilhas pela Antártica marítima. Principalmente comunidades de musgos com ocorrência predominante de *Sanionia uncinata* e líquens de *Usnea spp.*, com ocorrências esparsas de *Polytrichastrum spp* a grama *Deschampsia* e a macroalga *Prasiola crispa*, seguindo as linhas de drenagem. Contudo, a área sem cobertura vegetal de acordo com o mapeamento realizado, demonstra haver um caráter de emissões de carbono no total da área.

A ocorrência dessas comunidades está intrinsicamente associada a condições de umidade e temperatura e às características dos solos, além da influência da visitação e do estabelecimento de animais, principalmente aves. Em Stansbury a presença desses animais influencia a presença de matéria orgânica e o fluxo de carbono dos ecossistemas com comunidades vegetais.

Manutenção de áreas de cobertura vegetal na Antártica são fundamentais e justificam que mais cuidados sejam tomados nas atividades antrópicas no que se refere às perturbações dessas comunidades. A península Stansbury demonstra o legado de descaso que as ocupações humanas sem o cuidado com essas vegetações tão singulares e sensíveis, pode acarretar em termos de prejudicar a remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera, impacto que pode e deve ser evitado.

## 5. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. P. de, *et al.* **Plant Composition of Skuas Nests at Hennequin Point, King George Island, Antarctica.** American Journal of Plant Sciences, 03(05), 2021. 688–692. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.35082>.

ALMEIDA, I. C. C. *et al.* **Active layer thermal regime at different vegetation covers at Lions Rump, King George Island, Maritime Antarctica.** Geomorphology, 225(C), 2014. 36–46. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.03.048.

BARDGETT, R. D. *et al.* **Hierarchical responses of plant-soil interactions to climate change: Consequences for the global carbon cycle.** Journal of Ecology, 101(2), 2013. 334–343. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12043>

BASTOS, B. L., *et al.* **Uma flora do final do cretáceo na ilha nelson, ilhas Shetland do Sul, Península Antártica.** Revista Brasileira de Paleontologia, 16(3), 2013. 441–464. <https://doi.org/10.4072/rbp.2013.3.06>

BOCKHEIM, J. G., & HINKEL, K. M. **The Importance of “Deep” Organic Carbon in Permafrost-Affected Soils of Arctic Alaska.** Soil Science Society of America Journal, 71(6), 2007. 1889–1892. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0070n>

BOCKHEIM, J. G. **Soil-Forming Factors in Antarctica.** In J. G. Bockheim (Ed.), The Soils of Antarctica, World Soils Book Series XV, 2015. p. 322. Springer.

BOKHORST, S., *et al.* **Usnea antarctica, an important Antarctic lichen, is vulnerable to aspects of regional environmental change.** *Polar Biol* 39, 2016. 511–521. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1803-z>.

CANNONE, N., *et al.* **CO<sub>2</sub> fluxes among different vegetation types during the growing season in Marguerite Bay (Antarctic Peninsula).** *Geoderma*, 2012. 189–190, 595–605. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.026>

DAVIDSON, E. A., & JANSSENS, I. A. **Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change.** *Nature*, 440(7081), 2006. 165–173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>

DURÁN, J., *et al.* **In-situ soil greenhouse gas fluxes under different cryptogamic covers in maritime Antarctica.** *Science of the Total Environment*, 2021. 770, 144557. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144557>

FAO. **Soil Organic Carbon the Hidden Potential.** Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., Wiese, L., 2017. *Soil Organic Carbon the Hidden Potential, Banking.* doi:10.1038/nrg2350. In *Banking* (Issue March).

FOGWILL, C. J., *et al.* **Southern Ocean carbon sink enhanced by sea-ice feedbacks at the Antarctic Cold Reversal.** *Nature Geoscience*, 13(7), 2020. 489–497. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0587-0>

FRANCELINO, M. R. **Ecosistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima: solos, geomorfologia e cobertura vegetal da Península Keller.** 2004. 102P. Disponível em: [http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/solos e nutricao de plantas/2004/181260f.pdf](http://alexandria.cpd.ufv.br:8000/teses/solos_e_nutricao_de_plantas/2004/181260f.pdf)

FRANCELINO, M. R., *et al.* **Geomorphology and soils distribution under paraglacial conditions in an ice-free area of Admiralty Bay, King George Island, Antarctica.** *Catena*, 2011. 85(3), 194–204. DOI: 10.1016/j.catena.2010.12.007

GAO, B.C. **NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space.** *Rem. Sens. Environ.* 1996. 58, 257-266.

GUGLIELMIN, M., ELLIS EVANS, C. J., CANNONE, N. **Active layer thermal regime under different vegetation conditions in permafrost areas. A case study at Signy Island (Maritime Antarctica).** *Geoderma*, 2008. 144(1–2), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.010>

KIRSCHBAUM, M. U. F., *et al.* **Nett Biome Production.** NEE Workshop Proceedings, 2001. April, 18–20.

KUO, S. **Phosphorus.** In D. L. Sparks. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 3- Chemical Methods.* SSSA, Madison, WI. 1996. p. 869-919

MENDONÇA, E. D. S., *et al.* **Spatial variability models of CO<sub>2</sub> emissions from soils colonized by grass (*Deschampsia antarctica*) and moss (*Sanionia***

**uncinata) in Admiralty Bay, King George Island.** *Antarctic Science*, 2011. 23(1), 27–33. <https://doi.org/10.1017/S0954102010000581>

MIELCAREK, M., KAMIŃSKA, A., & STEREŃCZAK, K. **Digital aerial photogrammetry (DAP) and airborne laser scanning (ALS) as sources of information about tree height: Comparisons of the accuracy of remote sensing methods for tree height estimation.** *Remote Sensing*, 2020. 12(11). <https://doi.org/10.3390/rs12111808>

MOURA, P. A., *et al.* **Distribution and characterization of soils and landform relationships in Byers Peninsula, Livingston Island, Maritime Antarctica.** *Geomorphology*, 2012. 155–156, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.011>

NEUFELD, Â. D. H., *et al.* **Methane and nitrous oxide fluxes in relation to vegetation covers and bird activity in ice-free soils of Rip Point, Nelson Island, Antarctica.** *Polar Research*, 2015. 34, 1–12. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.23584>

ØVSTEDAL, D.O.; LEWIS-SMITH, R.I. **Lichens of Antarctica and South Georgia: Guide to their Identification and Ecology** Cambridge University Press. Cambridge, 2001. 411p.

PEREIRA, A. B., & PUTZKE, J. **The Brazilian research contribution to knowledge of the plant communities from Antarctic ice free areas.** *Anais Da Academia Brasileira de Ciencias*, 2013. 85(3), 923–935. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652013000300008>

PUTZKE, J.; & PEREIRA, A.B. **The lichens of Rip Point, Nelson Island, Antarctica.** *Pesq Antártica Bras.* 1998a. 3(1): 87-101.

PUTZKE, J.; & PEREIRA, A.B. **Mosses communities of Rip Point in Northern Nelson Island, Antarctica.** *Pesq Antártica Bras.* 1998b. 3(1): 104-115.

PUTZKE, J.; & PEREIRA, A.B. **The Antarctic Mosses with Special Reference to the South Shetland Islands.** EDUL- BRA, Canoas, 2001.

ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.** In *Earth Resources Technology Satellite- 1 Symposium,3*, 1973. Proceedings. Washington, 1973, v.1, Sec. A, p. 309-317.

ROSA, K. K. da, *et al.* **Expansion of glacial lakes on Nelson and King George Islands, Maritime Antarctica, from 1986 to 2020.** *Geocarto International*, 2021. 0(0), 1–11. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1886342>

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R.** RStudio, PBC, Boston, MA. 2020. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>.

SCHMITZ, D. **Comunidades Vegetais de Área de Degelo da Ilha Half Moon, Arquipélago das Shetlands do Sul, Antártica.** 2015. 1–48.

SCHMITZ, D., *et al.* **Avaliação De Gradiente Pedoambiental Usando Análise De Componentes Principais (Pca) Na Antártica Marítima.** Aplicações Da Linguagem R Em Análises de Vegetação. 2020. March, 43–55.  
<https://doi.org/10.22533/at.ed.3552009035>

SIMAS, F. N. B., *et al.* **Ornithogenic cryosols from Maritime Antarctica: Phosphatization as a soil forming process.** Geoderma. 2007. 138(3–4), 191–203.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.011>

THAKUR, M. P., *et al.* **Reduced feeding activity of soil detritivores under warmer and drier conditions.** Nature Climate Change. 2018. 8(1), 75–78.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0032-6>

THOMAZINI, A., *et al.* **Spatial Variability of CO<sub>2</sub> Emissions from Newly Exposed Paraglacial Soils at a Glacier Retreat Zone on King George Island, Maritime Antarctica.** Permafrost and Periglacial Processes. 2014. 25(4), 233–242.  
<https://doi.org/10.1002/ppp.1818>

THOMAZINI, A., *et al.* **CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica.** Science of the Total Environment. 2015. 521–522, 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.110>

THOMAZINI, A., *et al.* **Geospatial variability of soil CO<sub>2</sub>-C exchange in the main terrestrial ecosystems of Keller Peninsula, Maritime Antarctica.** Science of the Total Environment. 2016. 562, 802–811.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.043>

TIFANI, M. **Different soil study tools to better understand the dynamics of carbon in soils at different spatial scales, from a single soil profile to the global scale.** Climatologie. Université Paris-Saclay, 2018. Français

WATTS, A. C., AMBROSIA, V. G., HINKLEY, E. A. **Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use.** Remote Sensing. 2012. 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>

VIEIRA, S. R., *et al.* **Detrending non stationary data for geostatistical applications.** Bragantia, 2010. 69(suppl), 01–08. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052010000500002>

VIEIRA, F.C.B.; *et al.* **In situ methane and nitrous oxide fluxes in soil from a transect in Hennequin.** Chemosphere. 2013. Jan;90(2):497-504.  
[doi:10.1016/j.chemosphere.2012.08.013](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.08.013) 90, 497–504.

## CONCLUSÃO GERAL

Como conclusão dessa pesquisa temos que a área livre de gelo onde se encontra o mais antigo abrigo de pesquisa brasileira “Astrônomo Cruls”, é uma área relevante para pesquisa e monitoramento das alterações climáticas na Antártica Marítima. Por lá, ocorrem processos pedogenéticos únicos, à semelhança de outras áreas livres de gelo na Antártica Marítima. Por ser uma área de visitação restrita de animais mamíferos de grande porte e de aves, desde pinguins a Skuas, condiciona ao ambiente a formação dos solos principalmente pela ação do intemperismo físico das rochas.

O regime térmico dos solos na península, caracterizados pelo permafrost descontínuo e camada ativa pouco espessa, são característica comuns pelas áreas livres de gelo na Antártica Marítima. A temperatura dos solos é influenciada pela distância da geleira Nelson, além da permanência de bancos de neve sob o solo um fator importante, muito fortemente influenciada pelo relevo.

Manter o sítio de monitoramento ativo nessa área é estratégico pela proximidade da área do principal aeroporto do Arquipélago das Ilhas Shetlands do Sul, fator que reduz a demanda logística para o Programa Antártico Brasileiro, o que agiliza e barateia as ações de manutenção do sensor.

As comunidades vegetais que ocorrem na península estão adaptadas às condições de temperatura e umidade do solo, sensíveis a suas alterações o que pode caracterizar relevantes indicadores de alterações no clima local e regional. Acompanhar a ocorrência dessas comunidades pela área é relevante para o monitoramento das mudanças climáticas na Antártica Marítima.




Há uma tendência de melhorar as pesquisas otimizando análises, melhorando acurácia e precisão das estimativas ao concatenar as tradicionais técnicas e métodos dos trabalhos de campo com técnicas de sensoriamento remoto e aprendizagem de máquinas a partir dos algoritmos disponíveis atualmente. Avanços assim darão robustez nos registros de dados, com séries temporais maiores e com melhor

resolução temporal, característica da importância de ampliar cada vez mais as pesquisas e as inovações tecnológicas e metodológicas na ciência que o Brasil e o as outras nações fazem na Antártica.

A pesquisa realizada pelo Brasil neste inóspito continente, por um lado pode parecer desnecessário para um país tão distante e com tantos problemas sociais e econômicos dentro do seu território. Entretanto essa pesquisa conclui que é de fundamental importância para a comunidade científica nacional, que sejam feitos investimentos cada vez maiores nessa temática para que não apenas as forças armadas do Brasil tenham melhores condições de continuar apoiando a realização do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), como também para os Ministérios da Educação e da Ciência, Tecnologia e Inovação, fundamentais para a realização desse importante trabalho que dá e dará ao Brasil, o status de nação com as maiores contribuições científicas sobre a Antártica. A comunidade científica mundial agradece. A natureza e todos os seres vivos daquele continente, e do mundo, merecem.

**APÊNDICES:**

**Relatório de Campo dos Perfis**

Data: 12 de fevereiro	
<b>RP001 – 13:03</b> 60m / 397160 - 3097123	<b>Skeletal Leptosol Ornithic</b>
	--A—0-10 --C1 – 10-25 --C2 – 25-32 --C3 – 32-50 (fragmentário)  alto do morro Acima do acampamento (onde foi feito o experimento de carbono na parte alta) Material de origem de andesito
	





Data: 12 de fevereiro	
<b>RP001 - AmostraExtra- 13:36</b> 62m / 397166 - 3097097	<b>Skeletal Leptosol</b>
	Foram coletadas amostras de 0 -10 e 10 -20, característica amarelada, com presença de óxidos. Há intemperismo forte e mais argila em função de presença de sulfeto de ferro (andesito piritizado).
	

Data: 12 de fevereiro – 14:08	
RP002 – 50m – 396760 – 3097008	<b>Leptic Regosol (Arenic, Colluvic)</b>
	<p>--A – 0-5  --C1 – 5-35  --C2 – 35-55+</p> <p>Screeslope (próximo à área que o Márcio comentou sobre a questão)  Observação: água minando a 55 cm devido ao deslocamento subsuperficial do degelo  Não foi observado efeito de crioturbação.  O C1 tem mais fragmentos rochosos.  Grão simples sem estrutura (maciça).  Basalto ou fragmentos e tufo vulcânicos.  Cobertura de vegetação será descrita pelo prof. Batista.</p>
	

Data: 12 de fevereiro -14:52	
<b>RP003</b> 70m – 396524 / 3097101	<b>Cambic Cryosol Reductaquic</b>
	-- Bi – 0-30 -- BC – 30-60+ Relevo plano – topo da paisagem – basalto Padrão rochoso em superfície Basalto coberto por tufo vulcânico Próximo ao outro padrão que vimos Sem horizonte A Bi bastante argiloso.
	 

Data: 13 de fevereiro, terça-feira, 12:31	
<b>RP004</b> 42m / 395871 – 3097748	<b>Gelistagnic Cambisol (Oxyaquic, <u>S</u>keletal)</b>
	<p>A – 0-10          B1 – 10-35          B2 – 35-50+</p> <p>Alto de um morro com presença de semionia, úsnia e andreia (musgo preto).          Topo da paisagem. Topo de topossequência.          Área com drenagem com afloramento de basalto.          A bastante úmido sujeito a encharcamento          O gelistagnic se refere a uma camada congelada impedindo a drenagem de descer</p>
	

13 de fevereiro, terça-feira, 12:52	
<b>RP005</b> 22m / 396057 - 3097905	<b>Albic Histic Spodzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic)</b>
	<p>           A – 0-5 hístico            E – 5-10            10-13 → Camada de material fíbrico (Batista disse ser turfa). Material de politrichuum saniona enterrada            Bh – 13-22 irregular            B – 22-35            BC – 35-50+ rochoso         </p> <p>           Transição irregular entre horizontes. Mais clara que difusa. O A é hístico, Bh irregular e BC rochoso;            Material de origem é basalto. Topo do afloramento coberto por sedimentos e vegetação. Relevo local é plano e regional ondulado escarpado.            Horizontes irregulares.            Rochosidade fragmentada em BC            Sem evidência de crioturbação            Evidencia de ninhal de skua e petrel (nas rochas)            Ao classificar como leptico, considerou-se que a rochosidade está a menos do que 100cm.         </p>
	

13 de fevereiro, terça-feira, 13:40	
<b>RP006</b> 7m / 396119 - 3097989	<b>Stagnic Leptosol (Ornithic, Skeletic)</b>
	<p>A1 – 01-10          A2 – 10-30          Cr</p> <p>Ficamos na dúvida ao classificar se poderia ser fluvisol          Área com drenagem estagnada pela rochiosidade com água aflorando no fundo do A2 (30cm)          Material fibrico em A1          Topo do afloramento          Sem evidência de crioturbação          Material escuro          Material de origem é basalto fragmentando</p>
	 

Data: 13 de fevereiro, terça-feira, 14:47

**RP007**

76m / 396167 - 3097675

**Colluvic Regosol Ornithic**



A – muito fino menos de 5cm

C1 – 5-25

C2 – 25-33

C3 – 33-43 irregular entre 40 e 454

C4 – 43-55+



Área com jasper próximo (martin)

Alto de morro onde há a sensação de  
escorrimento de água do degelo.

Relevo local suave/plano e regional montanhoso  
virado para fildes.



13 de fevereiro, terça-feira, 15:25	
<b>RP008</b> 93m / 396346 - 3097609	<b>Turbic Cryosol Arenic</b>
	<p>C1 – 0-15  C2 – 15-40  C3 – 40+</p> <p>Plano local – suave ondulado regional. Ao lado de carpete estriado.  Local com solos padrões de congelamento e descongelamento. Pedregoso são tufo vulcânicos.  Basalto com tufo vulcânicos sobrepostos.  Padrão circular (1m a 1,20m de diâmetro)  Evidência de crioturbação  Solos homogêneos  Início de fragmentos rochosos a 60cm  Aparentemente sem influencia deguano.  Possivelmente terá menor fósforo do que os anteriores.  Crioturbação quase forma uma estruturazinha  Outro evento é a hinversão de horizontes que é causado pela crioturbação  Material homogêneo selecionado pela crioturbação.</p>
	 

13 de fevereiro, terça-feira, 15:52	
<b>RP008 – AMOSTRAEXTRA 2</b>	<b>Leptic Regosol Skeletic</b>
	90m / 396534 - 3097565
	

15 de fevereiro, quinta-feira, mais ou menos 17h		
<b>RP009</b> 105m / 396731 – 3097294	<b>Colluvic Regosol Skeletic</b>	
	<p>A – 0-10 C1 10-30 C2 30-40+</p> <p>Área com bastante jasper adjacente Relevo local plano, regional suave ondulado Screeslope com jasper fragmentado mais tufos vulcânicos Declividade de mais ou menos 10° Sem evidência de crioturbação Bem drenado com rara presença de musgo Ocorreu um eclipse solar depois.</p>	
		

16 de fevereiro, sexta-feira, 17h30	
<b>RP010</b> 53m / 395876 - 3097224	<b>Turbic Cryosol (Reductaquic, Gelic, Skeletic)</b>
	<p>C1 – 0-25 C2 – 25-90+</p> <p>Área com solos padrões e com evidência de crioturbação subsuperficial (com menos de 80cm) Presença de água devido ao degelo do permafrost Padrões circulares Relevo local plano / regional plano suave ondulado Próximo a um canal de degelo Profundidade alcançada de 90cm devido a camada congelada que não permitiu a entrada do sensor.</p> <p>Sensores de temperatura instalados a 5-10-30-50 e 100 cm assim como de umidade (2) a 90 e 30 cm.</p> <p>Rochosidade na camada C1 e abaixo solo acinzentado com características de perda de coloração pela ação da água.</p> <p>Vegetação Batista.</p>
	

Sábado, 17 de fevereiro, perto do abrigo tcheco, Nikon 16:00

**RP011**

24m / 396912 - 3096862

**Leptic Cambisol Colluvis**



A – 0-10  
 AB – 10-20  
 B – 20-30  
 Cr – 30-50+





No morro entre as deságuas da bacia do abrigo  
 Aqui o solo já apresenta pedogênese incipiente  
 As transições entre horizontes são difusas  
 B tem estrutura granular pequena a moderada  
 Descrito moderadamente úmido





Área de basalto





Relevo suave ondulado (15º) com linhas de rocha  
 Sem evidência de crioturbação nem camada ativa  
 Cobertura pequena de musgo em carpete,  
 demonstra que é úmida tem “polha”. Cresce entre  
 pedras.



Data: 17 de fevereiro, sábado	
<b>RP012</b> 60m / 396589 - 3096913	<b>Turbic Cryosol Reductaquic</b>
	A – 0-5 C1 – 5-20 C2 – 20-45 C3 – 45-50+
	Área de solos com padrão semi circular de 0,8 a 1 metro de diâmetro. Com fragmentos de basalto e andesito Área plana num fundo de vale suspenso. Presença de Horizonte A (fraco) Camada ativa de 55 cm. Material bem selecionado.
	

17 de fevereiro, sábado, 17h25 (Nikon)		
<b>RP013</b> 48m / 396085 - 3096777	<b>Subaquatic Fluvisol Oxyaquic</b>	
	A – 0-10 C1 – 10-20 C2 – 20-40+	
	Solo com representatividade dos deltas destas áreas (próximo dos lagos) Delta do rio Grande do Sul Área do basalto Relevo plano 5° Quase uma bacia fechada (aparentemente) cabeceira	
		

17 de fevereiro, sábado, 18:06 (Nikon horário antigo)	
<b>RP014</b> 35m / 396111 - 3096679	<b>Turbic Cryosol Reductaquic</b>
	C1 – 0-10 C2 – 10-20 C3 – 20-45 C4 – 45-60+  Camada ativa a 50cm Tufos vulcânicos Relevo plano 8° Padrão semi-circular estriado (diâmetro de 1 a 1,2 metros) Solos coletados no centro do padrão Material areno-argiloso (aparentemente)
	 




18 de fevereiro, domingo		
<b>RP015</b> 152m / 394961 - 3097255	<b>Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)</b>	
	<p>C1 – 0-15 C2 – 15-28 C3 – 28-45+</p> <p>Alto da moraina ao lado da geleira Em profundidade há uma camada congelada (80cm) Material bastante pedregoso e argiloso Sem A Crista de moraina Sem cobertura de vegetação Moraina frontal/terminal Evidência de crioturbação Mistura de material principalmente basalto, andesito e tufa vulcânica a 40 metros da geleira Material fino cobrindo a moraina com matacões comuns de 30 a 40 cm e fragmentos comuns de 15 a 20 cm.</p>	
		

18 de fevereiro, domingo, 14:25	
<b>RP016</b> 58m / 395181 - 3097218	<b>Turbic Cryosol (Skeletal, Novic)</b>
	<p>A – 0-10  C1 – 10-20  C2 – 20-40  Cr – 40-70+</p> <p>Rochas presentes em C1 e C2 presentes (possível) altamente pedregoso  2º ponto do sensor ibutton  Estamos num morrote separado da parea ao redor pela água na base da moraina  Relevo plano na base da bacia (Rio do Sul)  Relevo local plano, suavíssimo ondulado  Na moraina há gelo em 10cm onde eu tirei uma “rocha de água”  Evidência de crioturbação  Não é solo padrão  Enterramento dos ibuttons foi márcio e andre – eu fiz na primeira  O GPS bateu na rocha do lado  Perfil de sensor 2  Leica ponto “drone19”  Pedregosidade início a 50cm</p>
 	 

18 de fevereiro, domingo, 15:47		
<b>RP017</b> 33m / 395300 - 3097325	<b>Turbic Cryosol (Reductaquic, Gelic)</b>	
	A – 0-5 C1 – 5-20 C2 – 20-35 C3 – 35-60+ <p> Área mais ao centro da baixada, porém em local mais elevado entre rio dfel sul e rio do meio  A com cor mais escura  Solos com padrão semi curcular  Relevo plano  Tufo vulcânico mais basalto  Padrão de 1 a 1,5m  Padrão semi-circular/estriad  Solo coletado no centro do padrão  Active layer a 30cm  Permafrost a 80cm  Sensor de 10cm ficou cm a temperatura do ar  Sensor a 15 a 20 metros do ponto do GPS leica (rochas) para leste olhando para o final da moraina para leste na geleira que batista comentou  <b>SENSOR 3</b> </p>	
		

18 de fevereiro,	
<b>RP018</b> 13m / 395519 - 3097659	<b>Colluvic Endogleyic Regosol Turbic</b>
	<p>C1 – 0-20 C2 – 20-35 C3 – 35-55+</p> <p>C2 e C3 com material coluival C3 acinzentado Sensor 4 teve o ibutton de 10 centímetros colocado na altura de 5 cm. Localizado paralelo a moraina à sul do GPS leica Textura areno siltosa com pouca argila (predomínio de areia fina) Não plástico e não pegajoso Descrito úmido Sem evidência de crioturbação Horizonte glei a 30 cm (Textura mais arenosa) areia muito fina no glei Local (slope) rampa de deposição a 30 metros do afloramento rochoso Declive de 15° Erosão laminar aparente sem horizonte A Material de origem o basalto Gelestignatic (OK)</p>
	 





18 de fevereiro, domingo, final do dia		
<b>RP019</b> 8m / 395381 – 30977834		<b>Stagnic Fluvisol (Oxyaquic, Skeletic)</b>
		<p>           A – 0-5            C1 – 5-12            C2 – 12-18            C3 – 18-25 vermelinha            C4 25-45+         </p> <p>           Perto da praia            Delta de degelo            Próximo de terraço marinho de 3º nível            Seixos rolados a 35cm            Sem evidência de crioturbação            Relevo plano            Material de origem são sedimentos não consolidados         </p>
		

20 de fevereiro, terça-feira	
<b>RP_EXTRA_3</b> 4m / 395684 - 3097973	<b>Litic ornitosol hystic</b>
	Amostra extra coletada CONGELADA para análise com mercúrio. Local de talos de matacões em escarpa/afloramento de basalto Ninhal de Gaivotas ( <i>Laurus</i> ) Presença intensa de conchas Próximo à ilhota do estreito de Fields
	

20 de fevereiro, terça-feira, 10:43	
<b>RP020</b> 4m / 395676 - 3097973	<b>Lithic Leptosol (Ornithic, Skeletic, Novic)</b>
	<p>A – 0-20          AC – 20-35          Cr – 35-50+</p> <p>Foram coletadas amostras de A e AC.          Há grande diferença de estrutura.          Do lado dos filhotes da gaivota branca que são cinzas e nasceram no último verão.          A diferença de A e B se configura no teor de matéria orgânica (Tomazini)          A não ser que tenha diferença morfológica dentro do A (0-20)          É nítido no cordão rochoso (Tomazini, apud Schaefer) muito comum.          O A é formado pela M.O., ácidos e tal... (Tomazini)          Não tem essa característica de perfil no SiBCS 4 metros</p>
	 

20 de fevereiro, terça-feira		
<b>RP021</b> 3m / 395807 – 3098017	<b>Leptic Cambisol (Colluvic, Novic)</b>	
	A1 – 0-12 A2 – 12-22 AC – 22-35 C – 35-45+	
Ponto de coleta próximo à coleta realizada pelo André. Beira do estreito. Baixada. Comunidade mista descrita pelo Batista. Rampa de colúvio em talos de basalto Coleta só até AC.		
		

20 de fevereiro, terça-feira	
<b>RP022</b> 7m / 395983 - 3098058	<b>Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic)</b>
	<p>           A – 0-10 hístico            2B – 10-22            AB – 22-40            Bi – 40-60+         </p> <p>           O dois do 2B é referente à descontinuidade.            O lítico da nomenclatura é referente à característica de haver pedregosidade dentro dos 100cm.         </p> <p>           Estamos numa rampa de colúvio, sopé de escarpa de basalto com declividade de 25°            Material de colúvio faz o Aenterrado.            Estruturazinha e tudo            Área próximo à ninho de petrel.         </p>
	

20 de fevereiro, terça-feira	
<b>RP023</b> 21m / 396036 – 3098018	<b>Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic)</b>
	<p>           A – 0-5            B1 – 5-20            B2 – 20-35            B3 – 35-45            Cr – 45-55+         </p> <p>           Coletas feitas do A ao B3.            Alto do morro (olhando de baixo pareceu ponto de sela da escarpa).            Perfil dos B cores variegadas (lindo !)            Próximo a ninhal de petrel.            Essa área de coleta deve ter sido um antigo ninhal de petrel (abandonado)            Apresenta bolsões de fosfatização ao longo de todo perfil            Transição plana e abrupta do A para B         </p>
	 

## Análise Estatística Exploratória das Análises Físicas e Químicas

Perfil	AG	AF	Silte	Argila
Min. : 1.0	Min. :22.40	Min. : 9.30	Min. : 7.70	Min. : 7.00
1st Qu.: 6.5	1st Qu.:34.35	1st Qu.:13.65	1st Qu.:14.75	1st Qu.:12.90
Median :12.0	Median :40.30	Median :17.00	Median :24.00	Median :16.40
Mean :12.0	Mean :44.73	Mean :17.63	Mean :23.01	Mean :16.27
3rd Qu.:17.5	3rd Qu.:55.50	3rd Qu.:20.90	3rd Qu.:28.50	3rd Qu.:19.30
Max. :23.0	Max. :72.70	Max. :33.70	Max. :43.00	Max. :25.00
S_A	DP	Cascalho	pH20	pKCl
Min. :14.70	Min. :2.4	Min. :14.60	Min. :5.000	Min. :3.400
1st Qu.:30.30	1st Qu.:2.5	1st Qu.:36.30	1st Qu.:6.700	1st Qu.:4.500
Median :42.30	Median :2.5	Median :43.00	Median :7.300	Median :4.800
Mean :39.26	Mean :2.5	Mean :42.09	Mean :7.096	Mean :4.826
3rd Qu.:47.90	3rd Qu.:2.5	3rd Qu.:49.65	3rd Qu.:7.650	3rd Qu.:5.250
Max. :59.60	Max. :2.7	Max. :72.50	Max. :8.500	Max. :6.300
P	K	Na	Ca	Mg
Min. : 23.4	Min. : 48.3	Min. :136.8	Min. : 5.10	Min. : 3.40
1st Qu.: 40.8	1st Qu.:121.2	1st Qu.:237.6	1st Qu.:14.90	1st Qu.: 7.75
Median : 63.8	Median :173.5	Median :280.8	Median :20.10	Median : 9.30
Mean :102.5	Mean :170.7	Mean :315.2	Mean :20.62	Mean :10.00
3rd Qu.:114.2	3rd Qu.:218.6	3rd Qu.:358.6	3rd Qu.:27.40	3rd Qu.:13.15
Max. :326.8	Max. :295.7	Max. :716.7	Max. :35.70	Max. :17.30
Al	H_Al	SB	t	T
Min. : 0.00	Min. : 0.000	Min. : 9.40	Min. :15.00	Min. :16.00
1st Qu.: 0.00	1st Qu.: 1.000	1st Qu.:26.80	1st Qu.:27.05	1st Qu.:32.60
Median : 0.00	Median : 1.500	Median :33.20	Median :33.30	Median :34.60
Mean : 1.33	Mean : 3.604	Mean :32.42	Mean :33.75	Mean :36.01
3rd Qu.: 0.10	3rd Qu.: 2.850	3rd Qu.:37.20	3rd Qu.:39.15	3rd Qu.:40.00
Max. :16.40	Max. :22.800	Max. :51.60	Max. :51.70	Max. :52.50
V	m	ISNa	MO	Ntotal
Min. : 28.80	Min. : 0.000	Min. : 1.700	Min. :0.200	Min. :0.00000
1st Qu.: 90.75	1st Qu.: 0.000	1st Qu.: 2.650	1st Qu.:0.450	1st Qu.:0.00000
Median : 95.10	Median : 0.000	Median : 3.300	Median :0.700	Median :0.00000
Mean : 89.53	Mean : 4.704	Mean : 4.165	Mean :1.252	Mean :0.05217
3rd Qu.: 97.80	3rd Qu.: 0.300	3rd Qu.: 4.900	3rd Qu.:1.150	3rd Qu.:0.10000
Max. :100.00	Max. :55.800	Max. :11.900	Max. :6.200	Max. :0.30000
Prem	Cu	Mn	Fe	Zn
Min. :12.30	Min. : 2.30	Min. : 13.20	Min. : 76.0	Min. :0.1000
1st Qu.:34.00	1st Qu.: 4.05	1st Qu.: 34.55	1st Qu.:143.8	1st Qu.:0.3500
Median :37.00	Median : 5.10	Median : 45.60	Median :166.6	Median :0.8000
Mean :35.02	Mean : 5.50	Mean : 51.77	Mean :179.9	Mean :0.9783
3rd Qu.:41.40	3rd Qu.: 6.45	3rd Qu.: 67.80	3rd Qu.:211.2	3rd Qu.:1.2500
Max. :44.00	Max. :10.80	Max. :106.00	Max. :312.6	Max. :2.9000

### Classificação Detalhada dos Solos e Mapeamento Detalhado:

Detailed classification	Main Classes	Area (ha)	%
Banco de Neve	Snow Bank	18.3	6.40
Afloramento Rochoso	Rocky Outcrops	15.1	5.29
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Lithic Leptosol (Fluvic, Novic)	Regosol + Leptosol	14.2	4.97
Cambic Cryosol (Fluvic, Novic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Cryosol + Leptosol	13.3	4.63
Turbic Cryosol (Fluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic)	Cryosol + Regosol	13.2	4.60
Turbic Cryosol (Skeletic, Novic) fase Moraina	Cryosol	12.2	4.26
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Regosol	10.3	3.60
Leptic Skeletic Fluvisol (Turbic) + Lithic Histic Skeletic Leptosol (Ornithic) + Albic Histic Spodzol (Ruptic, Oxyaquic, Ornithic) + Afloramento Rochoso	Fluvisol + Leptosol	10.1	3.54
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Rocky outcrops	9.5	3.30
Skeletic Colluvic Regosol (Arenic) fase TerraÃ§o Marinho + Afloramento Rochoso	Regosol + Rocky outcrops	8.8	3.07
Lake	Lake	8.5	2.97
Colluvic Regosol (Ornithic, Fluvic) + Leptic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Regosol	8.5	2.96
TalÃs	Talus	8.2	2.87
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)	Regosol + Fluvisol	7.6	2.67
Leptic Cambisol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Cambisol + Regosol	7.0	2.46
Turbic Cryosol (Fluvic) + Skeletic Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic) + Afloramento Rochoso	Cryosol + Leptosol	6.9	2.40
Turbic Skeletic Reductaquic Cryosol (Fluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Cryosol + Regosol	6.6	2.31
Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic) + Turbic Cryosol (Arenic) + Skeletic Leptosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Fluvisol + Cryosol	6.2	2.18
Beach	Beach	6.1	2.14
Colluvic Leptic Skeletic Regosol (Gelic, Fluvic) + Stagnic Skeletic Fluvisol (Oxyaquic)	Regosol + Fluvisol	4.8	1.67
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic, Turbic)	Regosol	4.7	1.64

Skeletal Stagnic Fluvisol (Oxyaquic) + Turbic Cryosol (Fluvic)	Fluvisol + Cryosol	4.4	1.53
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic)	Regosol	4.2	1.45
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) fase TerraÃ§o Marinho pedregoso	Leptosol + Regosol	4.1	1.45
Turbic Cryosol (Fluvic) + Skeletic Regosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Cryosol + Regosol	3.4	1.19
Colluvic Leptic Skeletic Regosol (Gelic, Fluvic) + Turbic Leptic Cryosol (Fluvic)	Regosol + Cryosol	3.2	1.11
Lithic Leptosol (Skeletal, Novic) + Stagnic Fluvisol (Oxyaquic, Skeletic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Fluvisol	3.1	1.08
Skeletal Leptosol (Ornithic, Colluvic, Fluvic) + Skeletic Leptosol (Colluvic, Novic) + Afloramento Rochoso	Leptosol	3.1	1.07
Lithic Skeletic Leptosol (Turbic)	Leptosol	3.0	1.05
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Rocky outcrops	3.0	1.04
Colluvic Regosol (Fluvic) fase TerraÃ§os marinhos	Regosol	2.7	0.95
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Regosol	2.6	0.92
Gelistagnic Cambisol (Oxyaquic, Skeletic) + Leptic Skeletic Fluvisol (Turbic) + Afloramento Rochoso	Cambisol + Fluvisol	2.6	0.89
Colluvic Regosol (Arenic)	Regosol	2.4	0.85
Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) fase TerraÃ§o Marinho	Fluvisol + Regosol	2.4	0.84
Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic) + Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Fluvisol + Regosol	2.2	0.78
Skeletal Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Leptic Skeletic Regosol (Fluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Regosol	2.2	0.77
Afloramento Rochoso + TalÃªs	Rocky Outcrops	2.2	0.75
Lithic Skeletic Leptosol (Colluvic) + Leptic Skeletic Cambisol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Cambisol	2.1	0.72
TerraÃ§o Marinho	Marine terraces	2.0	0.71
Stagnic Skeletic Fluvisol (Oxyaquic)	Fluvisol	1.9	0.65
Stagnic Fluvisol (Oxyaquic, Skeletic) + Lithic Leptosol (Skeletal, Novic) fase Musgo	Fluvisol + Leptosol	1.8	0.62
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Stagnic Fluvisol (Oxyaquic)	Regosol + Fluvisol	1.7	0.60
Skeletal Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Rocky outcrops	1.7	0.58
Turbic Cryosol (Reductaquic, Skeletic) + Colluvic Endogleyic Regosol (Turbic) + Afloramento Rochoso	Cryosol + Regosol	1.5	0.53
Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic)	Regosol	1.4	0.49

Lithic Skeletic Leptosol (Ornithic, Novic) + Colluvic Skeletic Regosol (Turbic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Regosol	1.4	0.48
Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic)	Fluvisol	1.4	0.47
Leptic Colluvic Regosol (Fluvic, Turbic)	Regosol	1.3	0.47
Colluvic Skeletic Regosol (Skeletic)	Regosol	1.3	0.45
Leptic Cambisol (Endo-ornithic, Colluvic) + Leptic Cambisol (Ornithic, Skeletic) + Afloramento Rochoso	Cambisol	1.3	0.44
Turbic Leptic Cryosol (Fluvic)	Cryosol	1.2	0.43
Skeletic Subaquatic Fluvisol (Oxyaquic)	Fluvisol	1.2	0.42
Colluvic Skeletic Stagnic Regosol (Fluvic) + Stagnic Fluvisol (Oxyaquic, Skeletic) + Afloramento Rochoso	Regosol + FLuvisol	1.2	0.41
Skeletic Leptosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Rocky outcrops	1.1	0.38
Protostagnic Fluvisol (Oxyaquic)	Fluvisol	1.0	0.36
Stagnic Fluvisol (Oxyaquic, Skeletic)	Fluvisol	0.8	0.28
Afloramento Rochoso + Lithic Leptosol (Skeletic, Novic)	Rocky Outcrops + Leptosol	0.8	0.27
Afloramento Rochoso + Lithic Leptosol (Skeletic, Novic) + Leptic Cambisol (Colluvic)	Rocky Outcrops + Leptosol	0.7	0.26
Colluvic Skeletic Regosol (Turbic)	Regosol	0.7	0.24
Colluvic Regosol (Fluvic)	Regosol	0.7	0.24
Skeletic Leptosol (Colluvic) +Leptic Colluvic Regosol (Turbic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Regosol	0.7	0.23
Colluvic Skeletic Regosol (Fluvic) + Skeletic Lithic Leptosol (Fluvic, Novic) + Afloramento Rochoso	Regosol + Leptosol	0.6	0.22
Leptic Skeletic Fluvisol (Turbic) + Skeletic Leptosol (Colluvic, Fluvic) + Afloramento Rochoso	Fluvisol + Leptosol	0.6	0.21
Colluvic Skeletic Regosol (Turbic) fase TalÃs	Regosol	0.5	0.18
Skeletic Stagnic Fluvisol (Oxyaquic)	Fluvisol	0.4	0.16
Lithic Leptosol (Skeletic, Novic)	Leptosol	0.4	0.14
Turbic Cryosol (Skeletic, Fluvic)	Cryosol	0.4	0.13
Skeletic Colluvic Regosol (Oxyaquic, Novic)	Regosol	0.3	0.12
Turbic Skeletic Cryosol (Fluvic)	Cryosol	0.3	0.09
Colluvic Regosol (Skeletic)	Regosol	0.3	0.09
Campo de blocos + Afloramento Rochoso	Rocky Outcrops	0.3	0.09
Skeletic Leptosol (Colluvic) + Afloramento Rochoso	Leptosol + Rocky outcrops	0.2	0.08
Colluvic Skeletic Regosol (Turbic, Fluvic) + Turbic Cryosol (Fluvic)	Regosol + Cryosol	0.2	0.07
		286.4	100.0

Mapa Detalhado de Solos:

