

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 16/09/2022.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MICROBIOLOGIA APLICADA

FUNGOS DE SOLOS DE RECUO DE GELEIRAS ANTÁRTICAS:
AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE E ECOLOGIA

JULIANA APARECIDA DOS SANTOS

Rio Claro - SP

2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
MICROBIOLOGIA APLICADA

**FUNGOS DE SOLOS DE RECUO DE GELEIRAS ANTÁRTICAS:
AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE E ECOLOGIA**

JULIANA APARECIDA DOS SANTOS

Orientadora: Profa. Dra. Lara Durães Sette

Co-orientador: Prof. Dr. Rubens Tadeu Delgado Duarte

Tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciências Biológicas (Microbiologia Aplicada).

Rio Claro - SP

2020

S237f Santos, Juliana Aparecida dos
Fungos de solos de recuo de geleiras antárticas: avaliação da diversidade e ecologia / Juliana Aparecida dos Santos. -- Rio Claro, 2020
185 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientadora: Lara Durães Sette
Coorientadora: Rubens Tadeu Delgado Duarte

1. Fungos Antárticos. 2. Recuo de Geleiras. 3. Metabarcoding. 4. Diversidade Fúngica. 5. Ecologia Microbiana. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: FUNGOS DE SOLOS DE RECUO DE GELEIRAS ANTÁRTICAS:
AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE E ECOLOGIA

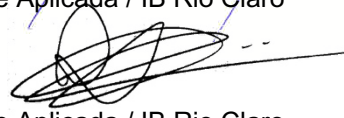
AUTORA: JULIANA APARECIDA DOS SANTOS

ORIENTADORA: LARA DURÃES SETTE

COORIENTADOR: RUBENS TADEU DELGADO DUARTE

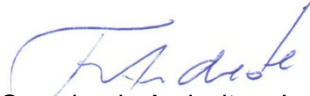
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIAS BIOLÓGICAS (MICROBIOLOGIA APLICADA), área: Microbiologia Aplicada pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. LARA DURÃES SETTE 
Departamento de Biologia Geral e Aplicada / IB Rio Claro

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES 
Departamento de Biologia Geral e Aplicada / IB Rio Claro

Profa. Dra. MILENE FERRO 
Pós-Doutoranda do Centro de Estudos de Insetos Sociais / IB Rio Claro

Profa. Dra. AMANDA GONÇALVES BENDIA 
Pós-Doutoranda do Departamento de Oceanografia Biológica / Universidade de São Paulo

Prof. Dr. FERNANDO DINI ANDREOTE 
Departamento de Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ)

Rio Claro, 16 de setembro de 2020

Dedico a minha filha Clara

AGRADECIMENTOS

Sou muito grata pela oportunidade de ter ingressado na Pós Graduação. Foi uma jornada com muitas transformações ao longo da caminhada. Houve momentos de extrema paixão e desilusão pela ciência, cada um com sua importância. Explorei e mergulhei em diversos contextos, conteúdos e áreas. Aos poucos compreendi minha maneira de ver e fazer ciência.

Todo esse processo só foi possível graças a minha orientadora prof. Lara D. Sette. Agradeço imensamente pela oportunidade de fazer parte do seu grupo de pesquisa. Sou grata por cada palavra, apoio, ajuda, amizade, orientação e compreensão. Agradeço por toda confiança e liberdade, com certeza isso foi fundamental durante minha caminhada.

Ao co-orientador desse trabalho, prof. Rubens Duarte por todas as experiências proporcionadas, ensinamentos, conversas e incentivo. Agradeço imensamente por ter me recebido em seu grupo de pesquisa e ter apresentando a Bioinformática.

Ao prof. André por todos ensinamentos, ajuda e diversas conversas que foram muito produtivas durante todo esse tempo.

Ao Programa Antártico Brasileiro, por viabilizar o presente projeto, oferecendo toda a logística, através da Aeronáutica e Marinha brasileira, para o acesso à Antártica. E ao grupo Endurance, que nos auxiliaram em todos os momentos antárticos.

Aos integrantes antigos e atuais do LAMAI. Tive a oportunidade de ver esse laboratório nascer e acompanhar todo processo. São tantas pessoas especiais que somaram na minha vida nesse longo período que prefiro não citar o nome para não correr o risco de esquecer de alguém. Agradeço por tornarem a rotina laboratorial mais leve e divertida.

A todos do laboratório LESF, por todo companheirismo, conversas e ajudas.

Agradeço a todos do laboratório de Microbiologia do solo (UFSC) pela acolhida, chimarrão, cafés e amizades. Agradeço em especial ao lab. LEMEx, a esse grupo de pessoas tão motivadas a fazer e divulgar ciência.

Ao Davi, Gabizinha e Priscila aprendi muito sendo co-orientadora de seus projetos, foi uma lição valiosa.

Agradeço minha grande amiga Lia, como ouvi certa vez, amizades antárticas são para sempre. É difícil expressar toda minha gratidão, foram muitas aventuras (com emoções), cafezinhos, conversas, ajudas e momentos especiais. E ao seu noivo Marcos, que tornou um grande amigo.

Aos meus amigos Maria e Quimi, sou muito grata por ter vocês na minha vida. Agradeço em especial ao Quimi por todos os ensinamentos, ajudas e conversas que contribuíram tanto para meu trabalho quanto para minha vida. Vocês moram no meu coração.

Às minhas amigas Fabi e Thais agradeço por todos os momentos, jantarzinhos, cafés, barzinhos e tantas coisas boas vividas juntas que deixaram a vida mais leve e especial.

À minha eterna amiga Gabi, o tempo passa, a distância aumenta e a gente continua sempre com assuntos para longas e boas conversas. Agradeço muito por toda ajuda, apoio, incentivo e por fazer parte da minha vida.

À minha amiga Lisa, admiro tanto essa mulher forte e guerreira. Um exemplo de mãe e doutoranda. Gratidão por tudo, em especial por me ajudar na introdução ao mundo da “maternidade”.

Às minhas maninhas Loris e Brenda, gratidão por todas as risadas, momentos lindos e por compartilharem comigo a busca do caminho do autoconhecimento.

À minha amiga Aline, por todas nossas conversas, pela amizade, abraços apertados e o yoga que deixaram os dias mais leves.

À amiga Irina, essa Cubana tão especial que alegrou minha vida e me fez ver o mundo de outra forma. Agradeço por mesmo longe fazer parte dos meus dias.

À Raiane, nossa amizade vem desde a graduação, juntas desbravamos o TCC. Obrigada por continuar na minha vida, por todo incentivo e palavras bonitas.

Às “Xeramelas”, Alice, Bruna, Lila e Amanda. Gratidão pela oportunidade de ter vivido com vocês, mesmo que por um tempo curto. Aprendi a ver a vida de uma forma mais leve.

Agradeço a República Ninho pela acolhida em Florianópolis. Conheci tantas pessoas especiais, foram tantos momentos bons que ficaram guardados para sempre.

À minha amiga Mariana, agradeço pela amizade, pelo incentivo para começar a correr, por todos nossos ‘rolezinhos’ gastronômicos pela ilha e por todas aventuras.

À Dani por toda amizade, conversas, praias, desabafos e tantos momentos bons.

Ao Ednilson, agradeço a amizade, incansáveis trocas de informações, colaboração, ensinamentos e por toda ajuda.

Agradeço imensamente aos meus pais, Silvana e João. Gratidão por todo apoio, por serem meu porto seguro e meu exemplo de vida.

À minha irmã Dani por ser essa mulher corajosa que sempre vai à luta dos seus sonhos, agradeço por sempre poder contar com você.

Ao meu maninho Ryan, sou muito grata por ter você na minha vida, sua bondade e jeito tranquilo me traz inspiração.

Ao meu companheiro Maicos. Agradeço por todo apoio, incentivo e por caminhar ao meu lado. Gratidão por me entender tão bem e apoiar até minhas ideias malucas. Fico feliz em iniciar uma nova jornada ao seu lado, agora pais da Clara.

À minha filha Clara, muito em breve vamos conhecê-la. Mesmo ainda habitando meu útero, já transformou amorosamente tudo por aqui. Gratidão pela oportunidade de ser sua mãe, vamos viver uma bela aventura juntas.

Agradeço a todas as mulheres que ocuparam seus devidos lugares na Ciência, a todas que lutam para ter voz ativa, e em especial a todas mães cientistas. A educação é nossa maior ferramenta.

Agradeço a todos pesquisadores que fazem Ciência no Brasil, por resistirem a tempos tão sombrios.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo número **2015/25170-1**, pela bolsa de Doutorado concedida e pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

"O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001"

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*In an honest search for knowledge you quite often have to
abide by ignorance for an indefinite period... The
steadfastness in standing up to [this requirement], nay in
appreciating it as a stimulus and a signpost to further
quest, is a natural and indispensable disposition in the
mind of a scientist.*

Erwin Schrodinger

RESUMO

A retração frontal de geleiras é frequentemente considerada como um sinal evidente de aquecimento global. Os solos de geleiras abrigam uma comunidade microbiana ativa de decompositores e frente à retração contínua do gelo, o solo passa a representar um gradiente de fatores físicos, químicos e biológicos que refletem as mudanças regionais ao longo do tempo. A micologia antártica é uma ciência relativamente recente e pouco se conhece sobre a natureza biológica desse grupo de micro-organismos. O presente trabalho é parte dos projetos FAPESP 2016/07957-7, PROANTAR/CNPq MICROSFERA e CNPq Universal (407986/2018-9) e teve como objetivo principal conhecer a diversidade de fungos (utilizando métodos dependentes e independentes de cultivo) de amostras de solo de recuo de duas geleiras situadas na Península Fildes (Ilha Rei George), bem como avaliar a estrutura da comunidade de fungos e correlacioná-la à composição dos solos amostrados. Os resultados obtidos no método dependente de cultivo revelaram a diferença na composição das comunidades fúngicas ao longo do recuo da geleira Collins e a presença de isolados ainda não reportados no ambiente Antártico. Foi isolado um total de 309 fungos distribuídos em 19 gêneros. Os representantes dos gêneros *Pseudogymnoascus* e *Mortierella* apresentaram alta prevalência e dominância em todas as amostras. Os dados revelaram a presença de fungos filamentosos pertencentes ao Filo Basidiomycota, raramente isolados na Antártica. As variações ambientais demonstraram ter influenciado os gêneros *Pseudogymnoascus* e *Pseudeutorium*. A abordagem independente de cultivo (*metabarcoding* de DNA ITS1) das amostras do transecto das geleiras Collins e Baranowski, forneceu informações sobre a diversidade e composição das comunidades fúngicas desses ecossistemas. As geleiras Baranowski e Collins apresentaram diferenças na composição das comunidades fúngicas, com predominância de fungos pertencentes aos Filos Ascomycota e Basidiomycota. A composição da comunidade foi espacialmente auto-correlacionada e os resultados indicam uma certa relação com diferentes fatores ambientais, tais como, Argila, Ca e Mn. Os dados obtidos pelo método independente de cultivo possibilitaram acessar uma maior diversidade de fungos quando comparado com o método baseado em cultivo utilizado para avaliar as amostras de solos da geleira Collins. Contudo, os dois métodos revelaram a predominância do Filo Ascomycota no ambiente. No método dependente de cultivo o gênero *Pseudogymnoascus* foi o mais

abundante, corroborando os resultados de outros estudos onde este gênero se apresenta como predominante em amostras marinhas e terrestres da Antártica. Porém, no método independente de cultivo representantes do gênero *Pseudogymnoascus* não foram os prevalentes nas amostras de solo estudadas. Esta abordagem revelou um total de 190 gêneros nas amostras de solos do recuo da geleira Collins e Baranowski. Os gêneros *Verrucaria*, *Mortierella* e *Peniophora* apresentaram alta abundância e prevalência em todas as amostras. Os resultados gerados nesse trabalho contribuem para a elucidação de lacunas no meio científico, trazendo inovação, conhecimento e dados que podem ser futuramente explorados em âmbito ecológico biotecnológico.

Palavras-chave: Fungos Antártico; Recuo de geleira; Ecologia Microbiana; Diversidade Fúngica

ABSTRACT

Glacial retreat is often considered a clear sign of global warming. Glacier soils harbor an active microbial community of decomposers, and under the continuous retraction of glaciers, the soil starts to represent a gradient of physical, chemical, and biological factors that reflect local changes over time. Antarctic mycology is a relatively recent science and little is known about the biological nature of fungi in this environment. The present work is part of three projects (FAPESP 2016/07957-7, PROANTAR/CNPq MICROSFERA and CNPq Universal (407986/2018-9)) and it aimed at assessing the diversity of fungi (by the use of culture-dependent and -independent methods) from samples of glacier soil collected after glacial retreat of Collins and Baranowski glaciers (Fildes Peninsula, King George Island). Moreover, it also aimed at evaluating the structure of the fungal community and correlating it to the composition of the sampled soils. The results obtained using the culture-dependent approach revealed a difference in the composition of fungal communities along the retreat of Collins glacier. They also showed the presence of isolates that have not been reported in Antarctica yet. A total of 309 fungi distributed in 19 genera were obtained. Representatives of the genera *Pseudogymnoascus* and *Mortierella* were the most abundant in all samples. The data revealed the presence of filamentous fungi belonging to the phylum Basidiomycota, rarely found in Antarctica. Environmental variations proved to have influenced the genera *Pseudogymnoascus* and *Pseudeutorium*. The culture-independent approach (ITS1 DNA metabarcoding) of the samples from the transect of Collins and Baranowski glaciers provided information on the diversity and composition of fungal communities in those ecosystems. Collins and Baranowski glaciers showed differences in the composition of their fungal communities, with the predominance of fungi belonging to the phyla Ascomycota and Basidiomycota. The composition of the community was spatially auto-correlated and the results indicate a certain relation with different environmental factors, such as, clay, Ca and Mn. The data obtained by the culture-independent approach revealed a higher diversity of fungi in the samples from Collins glacier when compared to the culture-dependent one. Nevertheless, both approaches revealed a predominance of the phylum Ascomycota in the environment. The genus *Pseudogymnoascus* was the most abundant genus retrieved by the culture-dependent method, which confirms the results of other studies in which *Pseudogymnoascus* isolates were found to be predominant in terrestrial and marine Antarctic samples. Nonetheless, representatives of that genus were not found to be prevalent in the soil

samples when the culture-independent method was applied. This approach revealed a total of 190 fungi genera from all soil samples from Collins and Baranowski glaciers. The genera *Verrucaria*, *Mortierella* and *Peniophora* were highly abundant and prevalent in all samples. The results obtained in this work contribute to the elucidation of gaps in the scientific knowledge and bring innovation and data that can be explored in the future in the ecological and biotechnological areas.

Key words: Antarctic fungi; Glacier retreat; Microbial Ecology; Fungal Diversity

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	20
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1. Antártica	23
2.2. Aquecimento global e a retração de geleiras na Península Antártica	25
2.3. Geleira Collins	26
2.4. Geleira Baranowski	29
2.5. Antártica como habitat microbiano	31
2.6. Diversidade de fungos de ambientes antárticos	34
2.7. Ecologia microbiana de recuo de geleiras.....	36
2.8. Sequenciamento de alto rendimento aplicado à identificação de fungos.....	39
2.9. Metabarcoding empregados no estudo das comunidades microbianas em ambientes frios	40
3. OBJETIVOS	42
3.1. Objetivo geral.....	42
3.2. Objetivo específico	42
CAPÍTULO 1	43
Abstract	44
1. INTRODUCTION	45
2. METHODS.....	46
2.1. Sampling Site.....	46
2.2. Physicochemical Analysis	47
2.3. Fungal Isolation	47
2.4. Fungal Identification	48
2.5. Accession Numbers	49
2.6. Structure and Composition of Fungal Communities	49
3. RESULTS	49
3.1. Fungi from Collins Glacier Soil Samples	49

3.2. Structure and Composition of the Fungal Communities	52
4. DISCUSSION	56
Author Contributions	60
Funding.....	60
Acknowledgments.....	60
References	61
Supplementary material	66
CAPÍTULO 2	86
RESUMO	87
1. INTRODUÇÃO	88
2. MATERIAL E MÉTODOS	90
2.1. Amostras	90
2.2. Análises físico-químicas do solo	91
2.3. Extração de DNA	91
2.4. Amplificação do DNA genômico extraídos das amostras de solo de recuo da geleira Collins e Baranowski	92
2.5. Análises de bioinformática	92
2.5.1. Pré-processamento.....	92
2.5.1.1. Análises das Sequências Obtidas pela Plataforma Miseq Illumina.....	92
2.5.1.2. Extração da região ITS	93
2.5.1.3. Filtragem das sequências ITS.....	93
2.6. Métodos estatísticos	94
3. RESULTADOS	97
3.1. Análise dos parâmetros físico-químicos dos solos	97
3.2. Análise de diversidade e estrutura da comunidade fúngica das geleiras Baranowski e Collins	99
3.3. Estrutura da comunidade fúngica da cronossequência das geleiras Baranowski e Collins	104
3.4. A estrutura do microbioma do recuo das geleiras Collins e Baranowski	107

3.4.1. O core do microbioma	107
3.4.2. Espécies indicadoras	114
3.5. Diferenças na estrutura da comunidade fúngica entre as amostras do recuo das geleiras Baranowski e Collins	115
3.5.1. Agrupamento Hierárquico	115
3.5.2. Modelo Dirichlet-multinomial	116
3.5.3. Abundância diferencial	116
3.6. Diversidade e riqueza fúngica dos solos de recuo de geleira	118
3.7. Variação na composição de espécies entre as amostras das geleiras Baranowski e Collins	121
3.8. Correlações da estrutura das comunidades fúngicas com fatores ambientais	123
4. Discussão	136
4.1. Análise dos parâmetros físico-químicos do solo.....	136
4.2. Diversidade e estrutura da comunidade fúngica	137
4.3. A estrutura do microbioma dos solos de recuo das geleiras Collins e Baranowski	140
4.4. Diferenças na estrutura da comunidade fúngica das amostras de solo das geleiras Collins e Baranowski	142
4.5. Diversidade e riqueza fúngica dos solos de recuo das geleiras Collins e Baranowski	143
4.6. Variação na composição de espécies entre as amostras das geleiras Baranowski e Collins	144
Conclusão	147
Referência	148
Anexo	155
DISCUSSÃO INTEGRADA	165
CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	170
REFERÊNCIAS	172

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. (A) Continente antártico com a Península Antártica mostrada em círculo; (B) Península Antártica e Arquipélago de Shetlands do Sul, com a Ilha King George mostrada no círculo; (C) A Baía do Almirantado na Ilha King George é destacada com um asterisco (Fonte: Souza et al., 2020).....	24
Figura 2. (A) Localização da Antártica com polígono vermelho destacando a Ilha Rei George; (B) Ilha Rei George com uma linha em vermelho em destaque para a península Fildes; (C) Península Fildes e geleira Collins (Fonte: PETSCH, 2018).....	27
Figura 3. Recuo da geleira Collins representado por uma linha de neve nos anos 1989, 2000 e 2006 (com base na imagem do satélite QuickBird obtido em 2006) (Fonte: SIMÕES et al., 2015).	28
Figura 4. (A) Antártica; (B) Ilha Rei George (KGI); (C) Área ASPA 128; (D) Costa ocidental da Baía do Almirantado (Fonte: Sziło et al., 2018).	29
Figura 5. Geleira Baranowski. A comparação da imagem de satélite Planet Scope (2018) com BAS (1956), fotos aéreas Polonesa (1979) e Geo-Eye1 (2011) (Fonte: PUDEŁKO et al., 2018).	31

CAPÍTULO 1

Figure 1. Collins Glacier (Fildes Peninsula, South Shetlands Archipelago, King George Island, Maritime Antarctica). (A, B) Map of the sampling region; (C) sampling.	47
Figure 2. Proportions of filamentous fungal isolates (taxa) in the Collins Glacier retreated soil samples.	50
Figure 3. Dendrogram of the Bray–Curtis similarity measures for the filamentous fungi recovered from the Collins Glacier retreat-exposed soil samples.	53
Figure 4. Distance-based redundancy analysis (dbRDA) ordination based on the weighted Sorensen distance with plotting of the environmental parameters and the fungal community at each collection point.	55
Figure 5. Pearson correlation between the diversity indices and environmental data.	56

CAPÍTULO 2

Figura 1. Ilha Rei George, Península Fildes (A); Recuo da geleira Collins (B); Recuo da geleira Baranowski (C).	91
Figura 2. O diagrama de Venn demonstrando a distribuição das ASVs fúngicas nas amostras de solos da geleira Baranowski e Collins. São indicadas as porcentagens de ASVs compartilhadas e encontradas exclusivamente em cada geleira.....	101
Figura 3. Abundância relativa dos grupos taxonômicos em âmbito de Filo para as geleiras Baranowski e Collins.....	102
Figura 4. Mapa de calor demonstrando a abundância relativa de cada classe em cada amostra de solo (expressa em metros) das geleiras Collins e Baranowski.	103
Figura 5. Gráfico de prevalência (prevalência de taxa versus contagem total) representando a diversidade de filo entre as amostras. Cada ponto corresponde a um táxon diferente ou único. O eixo y representa a fração das amostras que esses táxons estão presentes.	104
Figura 6. Abundância das sequências classificadas ao nível de Filo das amostras das geleiras Collins e Baranowski.....	105

Figura 7. Abundância relativa em âmbito de Filo do Core Micobioma das geleiras Baranowski e Collins	108
Figura 8. Análise baseada na prevalência (50%) e abundância (1%) das ASVs presentes no total de amostras da geleira Baranowski e Collins. Na figura estão demonstradas as 50 ASVs com maior prevalência.....	109
Figura 9. Mapa de calor do total de ASVs com prevalência de 50% e abundância de 1% no conjunto de dados das geleiras Baranowski e Collins	110
Figura 10. Filos presentes no Core do Micobioma das amostras de solos da geleira Baranowski	111
Figura 11. Core do Micobioma presente nas amostras de solo da geleira Baranowski.	112
Figura 12. Filos presentes no Core do Micobioma das amostras de solos da geleira Collins.	113
Figura 13. Core do Micobioma associado as amostras de solo da geleira Collins	113
Figura 14. Core do micobioma as amostras das geleiras Baranowski e Collins e número de ASVs compartilhado	114
Figura 15. Agrupamento hierárquico das amostras do transecto das geleiras Baranowski (vermelho) e Collins (azul) realizado por meio da ferramenta Deseq2 e matriz de distância Euclidiana.	115
Figura 16. Abundância diferencial das amostras derivadas do transecto das geleiras Baranowski e Collins	117
Figura 17. Análise de abundância diferencial entre as amostras das duas geleiras pelo método Deseq. As principais ASVs diferentemente abundantes no recuo da geleira Collins versus geleira Baranowski. Alterações no log2 razão de expressão foram mostradas para ASVs com um valor p corrigido por BH-FDR <0,1 (13 táxons em âmbito de gênero). Cada ponto reflete um ASV distinto. Os ASVs são apresentados pelos gêneros fúngicos no eixo x e colorido pelo filo.	118
Figura 18. Índices de diversidade e riqueza. As amostras de cada recuo de geleira foram agrupadas para a construção dos boxplots.	120
Figura 19. Análise de componentes principais (PCA) com a transformação CLR correlacionando a comunidade fúngica com as amostras do recuo da geleira Baranowski e Collins. Os números em metros terminados em “C” correspondem às amostras da geleira Collins e “B” da Baranowski	122
Figura 20. Análise de coordenadas principais utilizando a distância Hellinger correlacionando a comunidade Fúngica com as amostras do recuo da geleira Baranowski e Collins.	122
Figura 21. Gráfico de análise de redundância (RDA) utilizando a matriz de distância Hellinger, para visualizar os resultados do micobioma no espaço bidimensional para variáveis ambientais individuais nos dois locais, Collins (triângulo)e a Baranowski(círculo). Os símbolos coloridos representam os pontos amostrados em metros.	123
Figura 22. Resultados obtidos na análise de Mantel com a matriz de distância Hellinger e correlação de Person para os parâmetros de dissimilaridade ambiental, composição fúngica e distância geográfica para amostras do solo das geleiras Baranowski e Collins.	124

Figura 23. Resultados obtidos na análise de Mantel com a matriz de distância Hellinger e correlação de Pearson para os parâmetros de dissimilaridade de composição fúngica e parâmetros ambientais para amostras do solo das geleiras Baranowski e Collins	128
Figura 24. Correlação de Pearson entre a composição da comunidade fúngica e dados ambientais das amostras do transecto da geleira Baranowski.	131
Figura 25. Correlação de Pearson entre a composição da comunidade fúngica e dados ambientais das amostras do transecto da geleira Collins	132
Figura 26. Correlação de Pearson entre a composição das espécies indicadoras e dados ambientais das amostras do transecto da geleira Collins.	133
Figura 27. Correlação de Pearson entre a composição das espécies indicadoras e dados ambientais das amostras do transecto da geleira Baranowski.	135

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Table 1. Indices and richness estimator (α -diversity) for the correlated sampled points in meters from the retreating Collins Glacier.	52
Table 2. Analysis of generalized linear models (GLM) between the cultivable fungus community and the environmental variables of the Collins Glacier (Fildes Peninsula, South Shetlands Archipelago, King George Island, Maritime Antarctica).....	54

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Pontos de coleta das amostras em metros e coordenadas geográficas dos solos associados à cronossequência do recuo das geleiras Baranowski e Collins.....	90
Tabela 2. Dados de pH e composição granulométrica das amostras de solo do recuo da geleira Baranowski e Collins.	97
Tabela 3. Composição físico-química das amostras de solo das geleiras Baranowski e Collins.	98
Tabela 4. Correlação de Spearman entre os parâmetros ambientais e os pontos de coletas (metros) das geleiras Baranowski e Collins.	98
Tabela 5. Quantificação do produto de PCR das amostras do recuo da geleira Collins e Baranowski.....	99
Tabela 6. Resultados obtidos após a análise dos dados de sequenciamento quanto ao número de reads totais, número de reads após o filtro de qualidade e número de ASVs, em cada amostra analisada.	100
Tabela 7. Core Micobioma das amostras das geleiras Baranowski e Collins em âmbito de Filo.	108
Tabela 8. Índices de riqueza e diversidade para comunidade fúngica das amostras de solo do recuo da geleira Baranowski e Collins.	120
Tabela 9. Proporção de variação na composição da comunidade fúngica presente nas amostras do solo da geleira Collins, no nível da comunidade total (todos os fungos), e dos quatro principais filos, explicados pelos parâmetros ambientais, com análise multivariada permutacional de variância, com base na matriz da comunidade de fungos transformada por Hellinger. Variáveis significativas (em negrito).	129
Tabela 10. Proporção de variação na composição da comunidade fúngica presente nas amostras do solo da geleira Baranowski, no nível da comunidade total (todos os fungos), e dos quatro principais filos, explicados pelos parâmetros ambientais, com análise multivariada permutacional de variância, com base na matriz da comunidade de fungos transformada por Hellinger. Variáveis significativas (em negrito).	130

LISTA DE ABREVIATURAS

% - por cento

°C - graus Celsius

ALDEx2 - Análise da abundância diferencial, levando em consideração a variação da amostra.

ASPA - Área Especialmente Protegida na Antártica

ASV - *Amplicon Sequence Variant*

BDA - Ágar Dextrose Batata

BLAST- *Basic Local Alignment Search Tool* (Ferramenta de busca de alinhamento local básica)

Ca - Cálcio

Cu - Cobre

clr - razão de log centralizada

CoDA - *Compositional Data Analysis* (Análises de dados composicionais)

DESeq - Análise de expressão diferencial baseada na distribuição Binomial Negativa

DNA - Ácido desoxirribonucléico

EDTA - ácido etilenodiamino tetra-acético

Fe - Ferro

g.L⁻¹ - gramas por litro

GenBank - *Genetic Sequence Database*

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ITS - *Internal Transcribed Spacer* (Espaçador Transcrito Interno)

K - Potássio

KGI - Ilha Rei George

L- Litros

M - Molar

m – Metros

MA2% - Malte 2% Ágar

MCMC - Monte Carlo da cadeia de Markov

Mg - Magnésio

min - minutos

mL – mililitro

Mn – Manganês

NCBI - *National Center for Biotechnology Information* (Centro Nacional de Informação Biotecnológica)

ng - nanogramas

NGS - *Next Generation Sequencing* (Sequenciamento de nova geração)

OTU - *Operational Taxonomic Unit* (Unidade taxonômica operacional)

P - Fósforo

pb - Pares de bases

PCA - Análise do componente principal;

PCoA - Análise de coordenadas principais

PCR - *Polimerase Chain Reaction* (Reação da Polimerase em Cadeia)

PDA – *Potato Dextrose Agar* (Agar Batata Dextrose)

PDA10X - *Potato Dextrose Agar* (Agar Batata Dextrose) – diluído 10 vezes

PERMANOVA - Análise multivariada permutacional de variância

pH - concentração hidrogênica

sp - Espécie

QIIME - *Quantitative Insights Into Microbial Ecology*

UNITE - *User-friendly Nordic ITS Ectomycorrhiza Database* (Banco de dados de sequências da região ITS)

Zn – Zinco

1. INTRODUÇÃO

A Antártica é um dos ambientes terrestres fisicamente e quimicamente mais extremos. O continente Antártico e as ilhas subantárticas são consideradas as últimas áreas selvagens remanescentes do planeta. Essas áreas remotas permanecem, em grande parte, livres de impactos antropogênicos diretos, como superpopulação e superexploração de ecossistemas nativos (MITTERMEIER et al., 2003), embora não sejam imunes a processos antropogênicos globais mais amplos, como mudanças climáticas e poluição de longo alcance (BARGAGLI, 2006; TURNER et al., 2009).

Atualmente, a Antártica permanece coberta por mantas de gelo continentais, apresentando cerca de 0,2% de sua área total livre de gelo (BURTON-JOHNSON et al., 2016), essa proporção é um pouco maior na região da Península Antártica (~ 3%) (LEE et al., 2017). A Península Antártica representa uma massa de gelo pequena e está localizada próxima do ponto de fusão sob pressão, respondendo rapidamente às mudanças climáticas. É considerada uma das áreas de aquecimento mais rápido do planeta e sofre os maiores impactos com as mudanças climáticas globais (TURNER et al., 2009; DE MENEZES et al., 2020).

Nas últimas décadas, o recuo das geleiras nas regiões da Península Antártica e sub-Antártica tem apresentado uma crescente aceleração devido às mudanças climáticas (COOK, 2005; GORDON et al., 2008; KONRAD et al., 2018). O recuo de geleiras mesmo possuindo idade diferente, pode apresentar uma história biótica e abiótica semelhante, fornecendo um sistema experimental ideal para estudar mecanismos de processos de estabelecimento de comunidades através do tempo e do espaço (BROWN; JUMPPONEN, 2014; DINI-ANDREOTE et al., 2015; FREEDMAN; ZAK, 2015).

À medida que as geleiras recuam, o solo recém exposto pelo descongelamento é afetado por uma sequência de processos que levam à sua formação, que é influenciada principalmente por plantas pioneiras, micro-organismos e animais marinhos (JENNY, 1946; SIMAS et al., 2008; THOMAZINI et al., 2015). Os micro-organismos possuem um papel crucial no desenvolvimento do solo, na ciclagem biogeoquímica e facilitam a colonização por plantas durante a sucessão primária (FIERER et al., 2010). Apesar de sua importância, a dinâmica primária de sucessão das comunidades microbianas e seus processos de colonização permanecem pouco compreendidos (BRADLEY et al., 2014; BROWN; JUMPPONEN, 2014). Como a colonização por plantas é muito mais lenta do que a por micro-organismos ao longo

do recuo de uma geleira (SCHMIDT et al., 2014), o entendimento dos fundamentos da dinâmica sucessional microbiana está se tornando cada vez mais importante. O desenvolvimento do solo ao longo de cronosequências glaciais tem sido correlacionado com a sucessão primária de micro-organismos do solo (SIGLER et al., 2002).

Os fungos são considerados um dos primeiros colonizadores do solo e possuem papel crucial na formação de solo fértil que sustentará o crescimento e o desenvolvimento de uma comunidade vegetal (FIERER et al., 2010; BRADLEY et al., 2014). Dada a taxa sem precedentes do aumento dos recuos de geleiras induzidas por mudança climáticas (STOCKER et al., 2013) é necessário entender como a composição da comunidade fúngica responde a esses ambientes. Visto que possivelmente muitas espécies poderão ser extintas antes de serem descobertas, a coleta de espécimes e o compartilhamento aberto desses recursos são necessários (COSTELLO et al., 2013; MONASTERSKY, 2014). O estudo da biodiversidade do solo de recuo de geleira se mostra importante para que as futuras alterações decorrentes do descongelamento possam ser monitoradas (WALTER et al., 2006).

No entanto, se tratando de estudos de ecologia microbiana, um dos pontos limitantes da microbiologia clássica é o isolamento dos micro-organismos, uma vez que não se conhece um meio de cultura universal contendo todos os fatores requeridos pela maioria dos micro-organismos existentes no ambiente (HANDELSMAN, 2004). Com isso, o conhecimento sobre a diversidade de micro-organismos, principalmente de ambientes extremos, torna-se limitado.

Entretanto, com o avanço da microbiologia, genética e biologia molecular, surgiram novas técnicas capazes de acessar a diversidade e estudar a ecologia microbiana. O sequenciamento de alto rendimento (HTS), particularmente o *metabarcoding* ambiental, vem fornecendo novas oportunidades para analisar grandes números de amostras com baixo custo (CAPORASO et al. 2012), possibilitando a exploração mais precisa da biodiversidade e da composição da comunidade microbiana (BUÉE et al., 2009; JUMPPONEN; JONES, 2009; BLAALID et al., 2012). Contudo, mesmo diante dos avanços moleculares, a identificação de fungos por métodos tradicionais é de fundamental importância para alimentar os bancos de dados. Espécimes cultiváveis e bem documentados são essenciais para reconstruir filogenias robustas (PEAY, 2014).

O presente trabalho é parte dos projetos FAPESP 2016/07957-7,

PROANTAR/CNPq MICROSFERA (A Vida Microbiana na Criosfera Antártica: Mudanças Climáticas e Bioprospecção) e CNPq Universal (407986/2018-9) e teve como foco caracterizar a comunidade de fungos de solo de recuo de geleiras Antárticas utilizando abordagem dependente e independente de cultivo (*metabarcoding*). Para tanto, a diversidade taxonômica foi avaliada por meio da composição da diversidade alfa e beta das comunidades de fungos de amostras do recuo das geleiras Collins e Baranowski. Também foram avaliados os parâmetros ambientais que possivelmente influenciaram a composição e diversidade das comunidades fúngicas (e.g. como pH, micronutrientes). Os resultados obtidos nesse estudo fornecem informações inéditas sobre a diversidade e o potencial adaptativo de comunidades fúngicas em recuo de geleiras, bem como sobre os processos ambientais e ecológicos que os moldam. Além de ter colaborado para uma maior compreensão sobre o potencial de adaptação de fungos em dois recuos de geleiras com idades e condições distintas.

A presente tese está estruturada em quatro partes:

- Parte introdutória escrita em língua portuguesa composta por resumo, palavras-chave, introdução, revisão da literatura e objetivos.
- Capítulo 1. Consiste em um artigo (publicado) oriundo da tese, escrito em língua inglesa intitulado: “Fungal community in Antarctic soil along the retreating Collins Glacier (Fildes Peninsula, King George Island)”.
- Capítulo 2. Escrito em língua portuguesa, intitulado: “Diversidade e Sucessão Ecológica de Fungos Antárticos de Solo do Recuo da Geleira Collins e Baranowski”.
- Parte final escrita em língua portuguesa, síntese das discussões e conclusões.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

- Nossos resultados mostraram que os solos presentes no recuo de geleiras Antárticas, mesmo sujeitos às condições extremas do ambiente, demonstraram ser uma rica fonte para o isolamento e obtenção de dados relacionados às comunidades fúngicas.
- O método dependente de cultivo revelou uma diversidade representada principalmente por Ascomycota e fungos cosmopolitas. Representantes dos gêneros *Pseudogymnoascus* e *Pseudeutorium* responderam às variações ambientais correspondentes à distância da geleira, fósforo e argila.
- O gênero *Pseudogymnoascus* apresentou maior predominância nos dados obtidos com o método dependente de cultivo. No entanto, a análise *metabarcoding* revelou este não representa o gênero mais abundante no recuo da geleira Collins.
- O isolamento de fungos representantes do Filo Basidiomycota, e alta taxa de recuperação de DNA ambiental de Agaricomycetes (Basidiomycota) no solo dos recuos, sugerem que esses ambientes estão sofrendo modificações na estrutura da comunidade devido ao aquecimento ambiental.
- A metodologia *metabarcoding* revelou diferenças significativas na composição fúngica das geleiras Baranowski e Collins. Sugerindo que o tempo de recuo pode ter selecionado algumas espécies nesses ambientes.

- Os estudos de *metabarcoding* e metagenômica baseados em HTS podem agregar valor na avaliação da integridade ecológica e da saúde dos ecossistemas antárticos. Quando aplicados a grandes números de amostras, em grandes escalas espaciais e em várias biotas, essas abordagens podem ampliar nossa compreensão sobre a biodiversidade antártica em escala continental.
- O conhecimento da microbiota em solos expostos pelo recuo das geleiras dependerá da maior disponibilidade de dados gerados tanto por métodos de isolamento e cultivo quanto por abordagens independentes de cultivo, bem como de esforços para avaliar quantitativamente a influência de vários processos ambientais na composição da microbiota. Isso permitirá tomar decisões preditivas, colaborando com uma melhor compreensão dos processos subjacentes que impulsionam o desenvolvimento da comunidade microbiana em solos expostos, tanto para sistemas de geleiras de pequena escala quanto para recuo de calotas de gelo em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, B. J.; BARDGETT, R. D.; AYRES, E.; WALL, D. H.; AISLABIE, J.; BAMFORTH, S. et al. Diversity and distribution of Victoria Land biota. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 38, n. 10, p. 3003-3018, 2006.
- ALCAZAR, A.; GARCIA-DESCALZO, L.; CID, C. Microbial evolution and adaptation in icy worlds. *Astrobiology: Physical Origin, Biological Evolution and Spatial Distribution*, p. 81-95, 2010.
- ANESIO, A. M.; LUTZ, S.; CHRISMAS, N. A. M.; BENNING, L. G. The microbiome of glaciers and ice sheets. *Biofilms Microbiomes*, v.3, n.1, p. 1-11, 2017.
- ANESIO, A. M.; LAYBOURN-PARRY, J. Glaciers and ice sheets as a biome. *Trends in Ecology Evolution*, v.27, n.4, p.219–225, 2012.
- ARENZ, B.E.; HELD, B.H.; JURGENS, J.A.; FARRELL, R.L.; BLANCHETTE, R.A. Fungal diversity in soils and historic wood from the Ross Sea Region of Antarctica. *Soil Biology & Biochemistry*, Elmsford, v. 38, n. 10, p. 3057-3064, 2006.
- ARENZ, B. E.; BLANCHETTE, R. A. Distribution and abundance of soil fungi in Antarctica at sites on the Peninsula, Ross Sea Region and McMurdo Dry Valleys. *Soil Biology & Biochemistry*, Elmsford, v. 43, p. 308-315, 2011.
- ANTARCTIC TREATY SECRETARIAT. Parties, 2011. Disponível em <www.ats.aq/devAS/ats_parties.aspx?lang=e>.
- BARGAGLI, R. Antarctic ecosystems: environmental contamination, climate change, and human impact. *Springer Science & Business Media*, v.175, 2006.
- BARRAND, N. E.; VAUGHAN, D. G.; STEINER, N.; TEDESCO, M.; KUIPERS MUNNEKE, P.; VAN DEN BROEKE, M. R.; HOSKING, J. S. Trends in Antarctic Peninsula surface melting conditions from observations and regional climate modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v.118, n.1, p. 315-330, 2013.
- BATISTA, T. M.; HILARIO, H. O.; DE BRITO, G. A. M.; MOREIRA, R. G.; FURTADO, C.; DE MENEZES, G. C. A. et al. Whole-genome sequencing of the endemic Antarctic fungus *Antarctomyces pellizariae* reveals an ice-binding protein, a scarce set of secondary metabolites gene clusters and provides insights on Thelebolales phylogeny. *Genomics*, 2020.
- BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. *Glaciers and Glaciation*. Londres: Arnold, p.734 2010.
- BIASI, C.; RUSALIMOVA, O.; MEYER, H.; KAISER, C.; WANKE, W.; BARSUKOV, P.; JUNGER, H.; RICHTER, A. Temperature-dependent shift from labile to recalcitrant carbon sources of arctic heterotrophs. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, v.19, p.1401-1408, 2005.
- BIRKENMAJER, K. Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). 1956-2001. *Bulletin of Polish Academy of Sciences: Earth Sciences*, v. 50, n.1, p 5-19. 2002.
- BLAALID, R.; CARLSEN, T. O. R.; KUMAR, S.; HALVORSEN, R.; UGLAND, K. I.; FONTANA, G.; KAUSERUD, H. Changes in the root-associated fungal communities along a primary succession gradient analysed by 454 pyrosequencing. *Molecular ecology*, v.21, n.8, p. 1897-1908, 2012.
- BOCKHEIM, J. G. Soil-Forming Factors in Antarctica . In: *The soils of Antarctica*, Springer Internacional Publishing Switzerland, p. 5-20, 2015.

- BOETIUS, A.; ANESIO, A. M.; DEMING, J. W.; MIKUCKI, J. A.; RAPP, J. Z. Microbial ecology of the cryosphere: sea ice and glacial habitats. *Nature Reviews Microbiology*, v.13, n.11, p. 677-690, 2015.
- BOKHORST, S.; METCALFE, D.B.; WARDLE, D.A. Reduction in snow depth negatively affects decomposers but impact on decomposition rates is substrate dependent. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 62, p. 157-164, 2013.
- BOLCH, T.; KAMP, U. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER data. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, n. 41, p. 37- 48, 2006.
- BORE, E.K.; HALICKI, S.; KUZYAKOV, Y.; DIPPOLD, M.A. Structural and physiological adaptations of soil microorganisms to freezing revealed by position-specific labeling and compound-specific ¹³C analysis. *Biogeochemistry*, v.143, p.207–219, 2019.
- BOTTOS, E. M.; SCARROW, J. W.; ARCHER, S. D.; MCDONALD, I. R.; CARY, S. C.; BOTTOS, E. M. et al. Bacterial community structures of Antarctic soils. In: *Antarctic terrestrial microbiology*. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 9-33, 2014.
- BRADLEY, J. A.; SINGARAYER, JOY S.; ANESIO, ALEXANDRE M. Microbial community dynamics in the forefield of glaciers. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, v. 281, n. 1795, p. 20140882, 2014.
- BRAUN, M.; GOSSMANN, H. Glacial changes in the area of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, Antarctica. In: BEYER, L.; BÖLTER, M. *Geocology of Terrestrial Antarctic Oasis*. Berlin-Heidelberg:Springer Verlag, p. 75–89,2002.
- BRAUN, M.; HOCK, R. Spatially distributed surface energy balance and ablation modelling on the ice cap of King George Island (Antarctica). *Global and Planetary Change*, v. 42, n. 1, p. 45–58, 2004.
- BREMER, U. F. Morfologia e bacias de drenagem na cobertura de gelo da ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre, 135 p., 1998.
- BRIDGE, P.D.; NEWSHAM, K.K. Soil fungal community composition at Mars Oasis, a southern maritime Antarctic site, assessed by PCR amplification and cloning. *Fungal Ecol.*, v.2, p.66–74, 2009.
- BRIDGE, P.; SPOONER, B. Non-lichenized Antarctic fungi: transient visitors or members of a cryptic ecosystem? *Fungal Ecol.*, v.5, p.381–394, 2012.
- BROWN, S. P.; JUMPPONEN A. Contrasting primary successional trajectories of fungi and bacteria in retreating glacier soils. *Molecular Ecology*, v.23 p.481-497, 2014.
- BUÉE, M.; REICH, M.; MURAT, C.; MORIN, E.; NILSSON, R. H.; UROZ, S.; MARTIN, F. 454 Pyrosequencing analyses of forest soils reveal an unexpectedly high fungal diversity. *New phytologist*, v.184, n.2, p.449-456, 2009.
- BURLANDO, P.; PELLICCIOTTI, F.; STRASSER, U. Modelling mountainous water systems between learning and speculating looking for challenges. *Hidrology Research*, n. 33, n. 1, p. 47–74, 2002.
- BURROWS, S. M.; ELBERT, W.; LAWRENCE, M. G.; PÖSCHL, U. Bacteria in the global atmosphere—part 1: review and synthesis of literature data for different ecosystems. *Atmos. Chem. Phys.*, v.9, p.9263–9280, 2009.

BURTON-JOHNSON, A.; BLACK, M.; FRETWELL, P.; KALUZA-GILBERT, J. An automated methodology for differentiating rock from snow, clouds and sea in Antarctica from Landsat 8 imagery: a new rock outcrop map and area estimation for the entire Antarctic continent. *The Cryosphere*, v. 10, p. 1665-1677, 2016.

CANINI, F.; GEML, J.; D'ACQUI, L. P.; SELBMANN, L.; ONOFRI, S.; VENTURA, S.; ZUCCONI, L. Exchangeable cations and pH drive diversity and functionality of fungal communities in biological soil crusts from coastal sites of Victoria Land, Antarctica. *Fungal Ecology*, v.45, p.100923, 2020.

CAPORASO, J. G.; KUCZYNSKI, J.; STOMBAUGH, J.; BITTINGER, K.; BUSHMAN, F. D.; COSTELLO, E. K.; FIERER, N.; PENA, A. G.; GOODRICH, J. K.; GORDON, J. I.; HUTTLEY, G. A.; KELLEY, S. T.; KNIGHTS, D.; KOENIG, J. E.; LEY, R. E.; LOZUPONE, C. A.; MCDONALD, D.; MUEGGE, B. D.; PIRRUNG, M.; REEDER, J.; SEVINSKY, J. R.; TURNBAUGH, P. J.; WALTERS, W. A.; WIDMANN, J.; YATSUNENKO, T.; ZANEVELD, J.; KNIGHT, R. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. *Nature methods*, v. 7, n. 5, p. 335, 2010.

CAVICCHIOLI, R.; SIDDIQUI, K.S.; ANDREWS, D.; SOWERS, K.R. Low-temperature extremophiles and their applications. *Curr. Opi. Biotechnol.*, v.13, p.253–261, 2002.

CHOWN, S. L. Antarctic marine biodiversity and deep-sea hydrothermal vents. *PLoS Biol*, v. 10, n. 1, p. e1001232, 2012.

CHOWN, S. L.; CLARKE, A.; FRASER, C. I.; CARY, S. C.; MOON, K. L.; MCGEOCH, M. A. The changing form of Antarctic biodiversity. *Nature*, v.522, n.7557, p.431-438, 2015.

Christner BC, Priscu JC. Earth's icy biosphere. In *Third International Conference on Mars Polar Science and Exploration* 2003.

CLARKE, A. Evolution, adaptation and diversity: global ecology in an Antarctic context. In: HUISKES, A. H. L.; GIESKES, W. W. C.; ROZEMA, J.; SCHORNO, R. M. L.; VAN DER VIES, S. M.; WOLFF, W. J. (Ed.). *Antarctic Biology in a Global Context*, Leiden: Backhuys Publishers, p.3-17, 2003.

COLLINS, T.; MARGESIN, R. Psychrophilic lifestyles: Mechanisms of adaptation and biotechnological tools. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, v.103, p.2857–2871, 2019.

COOK, A. J; FOX, A. J; VAUGHAN, D. G; FERRIGNO, J. G. Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. *Science*, v. 308, p. 541–544, 2005.

CORINALDESI, C.; BEOLCHINI, F.; DELL'ANNO, A. Damage and degradation rates of extracellular DNA in marine sediments: implications for the preservation of gene sequences. *Molecular Ecology*, v. 17, n. 17, p. 3939-3951, 2008.

COSTELLO, M. J.; MAY, R. M.; STORK, N. E. Can we name earth's species before they go extinct?. *Science*, v. 339, p.413-416, 2013.

COWAN, D. A.; TOW, L. A. Endangered Antarctic environments. *Ann.Rev.Micro*, p.649-681, 2004.

COX, F.; NEWSHAM, K. K.; BOL, R.; DUNGAIT, J. A. J.; ROBINSON, C. H. Not poles apart: Antarctic soil fungal communities show similarities to those of the distant Arctic. *Ecol. Lett.*, v.19, p.528–536, 2016.

COX, F.; NEWSHAM, K. K.; ROBINSON, C. H. Endemic and cosmopolitan fungal taxa exhibit differential abundances in total and active communities of Antarctic soils. *Environmental Microbiology*, v. 21, n.5, p.1586–1596, 2019.

- CUFFEY, K. M.; PATERSON, W. S. B. *The Physics of Glaciers*. Oxford: Pergamon/Elsevier Science, p.380, 2014.
- CZECHOWSKI, P.; CLARKE, L. J.; COOPER, A.; STEVENS, M. I. A primer to metabarcoding surveys of Antarctic terrestrial biodiversity. *Antarctic Science*, v. 29, n. 1, p. 3-15, 2017
- DĄBSKI, M.; ZMARZ, A.; RODZEWICZ, M.; KORCZAK-ABSHIRE, M.; KARSZNIA, I.; LACH, K. M. et al. Mapping Glacier Forelands Based on UAV BVLOS Operation in Antarctica. *Remote Sensing*, v.12, n.4, p.630, 2020.
- DE MENEZES, G. C. A.; PORTO, B. A.; AMORIM, S. S.; ZANI, C. L.; DE ALMEIDA ALVES, T. M.; JUNIOR, P. A. S.; et al. Fungi in glacial ice of Antarctica: diversity, distribution and bioprospecting of bioactive compounds. *Extremophiles*, p. 1-10, 2020.
- DE SOUSA, J. R.; GONÇALVES, V. N.; DE HOLANDA, R. A.; SANTOS, D. A.; BUELONI, C. F.; COSTA, A. O. et al. Pathogenic potential of environmental resident fungi from ornithogenic soils of Antarctica. *Fungal biology*, v. 121, n. 12, p. 991-1000, 2017.
- DEINER, K.; BIK, H.; MÄCHLER, E.; SEYMOUR, M.; LACOURSIÈRE-ROUSSEL, A.; ALTERMATT, F. et al. Environmental DNA metabarcoding: Transforming how we survey animal and plant communities. *Molecular Ecology*, v.26, p.5872–5895, 2017.
- DELL'ANNO, A.; DANOVARO, R. Extracellular DNA plays a key role in deep-sea ecosystem functioning. *Science*, v. 309, n. 5744, p. 2179-2179, 2005.
- DEMING, J. W. Psychrophiles and Polar Regions. *Curr Opin Microbiol.*, v.5, p.301–309, 2002.
- DEONALLI, D.; SHARMA, R.; JANGID, K. Microbial Community Dynamics During Soil Ecosystem Development. In *Mining of Microbial Wealth and MetaGenomics*, p. 57-82, 2017
- DHAKAR, K.; PANDEY, A. Microbial Ecology from the Himalayan Cryosphere Perspective. *Microorganisms*, v.8, n.2, p. 257, 2020.
- DING, Z.; LI, L.; CHE, Q.; LI, D.; GU, Q.; ZHU, T. Richness and bioactivity of culturable soil fungi from the Fildes Peninsula, Antarctica. *Extremophiles*, v. 20, n. 4, p. 425-435, 2016.
- DINI-ANDREOTE F.; PYLRO V. S.; BALDRIAN P.; VAN ELSAS J. D.; SALLES J. F. Ecological succession reveals potential signatures of marine-terrestrial transition in salt marsh fungal communities. *The ISME journal*, v. 10, n. 8, p. 1984-1997, 2016.
- DREESENS, L. L.; LEE, C. K.; CARY, S. C. The distribution and identity of edaphic fungi in the McMurdo Dry Valleys. *Biology*, v.3, n.3, p.466-483, 2014.
- DRESCH, P.; FALBESONER, J.; ENNEMOSER, C.; HITTORF, M.; KUHNERT, R.; PEINTNER, U. Emerging from the ice-fungal communities are diverse and dynamic in earliest soil developmental stages of a receding glacier. *Environmental microbiology*, v.21, n.5, p. 1864-1880, 2019.
- DUARTE, A. W. F.; BARATO, M. B.; NOBRE, F.S; POLEZEL, D. A.; DE OLIVEIRA, T. B.; DOS SANTOS, J. A; RODRIGUES, A.; SETTE, L. D. Production of cold-adapted enzymes by filamentous fungi from King George Island, Antarctica. *Polar Biology*, v.41, p. 2511-2521, 2018.
- DUARTE, A. W. F.; DAYO-OWOYEMI, I.; NOBRE, F.S.; PAGNOCCA, F. C.; CHAUD, L. S. C.; PESSOA JR, A.; FELIPE, M. G. A.; SETTE, L. D.; Taxonomic assessment and enzymes production by yeasts isolated from marine and terrestrial Antarctic samples. *Extremophiles*, v. 17, n. 6, p.1023-1035, 2013.

DUARTE, A. W. F.; PASSARINI, M. R. Z.; DELFORNO, T. P.; PELLIZZARI, F. M.; CIPRO, C. V. Z.; MONTONE, R. C.; PETRY, M. V.; PUTZKE, J.; ROSA, L. H.; SETTE, L. D. Yeasts from macroalgae and lichens that inhabit the South Shetland Islands, Antarctica. *Environmental Microbiology Reports*, v. 8, n. 5, p. 874-885, 2016.

DUARTE, A. W. F.; PASSARINI, M. R. Z.; DELFORNO, T. P.; PELLIZZARI, F. M.; CIPRO, C. V. Z.; MONTONE, R. C.; PETRY, M. V.; PUTZKE, J.; ROSA, L. H.; SETTE, L. D. Yeasts from macroalgae and lichens that inhabit the South Shetland Islands, Antarctica. *Environmental Microbiology Reports*, v. 8, n. 5, p. 874-885, 2016.

DYURGEROV, M. B.; MEIER M. F. Glaciers and the changing Earth system: a 2004 snapshot, INSTAAR Occasional Paper, v. 58, 2005.

EDWARDS, A.; IRVINE-FYNN, T.; MITCHELL, A. C.; RASSNER, S. M. E. A germ theory for glacial systems? *Wiley Interdiscip Rev Water*, v.1, p. 331–340, 2014.

FASTIE, C. L. Causes and ecosystem consequences of multiple pathways of primary succession at Glacier Bay, Alaska. *Ecology*, v.76, p.1899–1916, 1995.

FEDERHEN, S. The NCBI taxonomy database. *Nucleic acids research*, v. 40, n. D1, p. D136-D143, 2012.

FIERER, N.; NEMERGUT, D.; KNIGHT, R.; CRAINE, J. M. Changes through time: integrating microorganisms into the study of succession. *Res Microbiol.*, v. 61, p.635–642, 2010.

FRASER, C. I.; TERAUDS, A.; SMELLIE, J.; CONVEY, P.; CHOWN, S. L. Geothermal activity helps life survive glacial cycles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 15, p. 5634-5639, 2014.

FREEDMAN, Z.; ZAK, D.R. Soil bacterial communities are shaped by temporal and environmental filtering: Evidence from a long-term chronosequence. *Env. Microbiol.*, v.17, p.3208–3218, 2015.

FRENOT, Y.; GLOAGUEN, J.; CANNAVACCIUOLO, M.; BELLIDO, A. Primary succession on glacier forelands in the subantarctic Kerguelen Islands. *Journal of Vegetation Science*, v. 9, n. 1, p. 75-84, 1998.

FREY, B.; RIEDER, S. R.; BRUNNER, I.; PLÖTZE, M.; KOETZSCH, S.; LAPANJE, A. et al. Weathering-associated bacteria from the Damma Glacier forefield: physiological capabilities and impact on granite dissolution. *Appl Environ Microbiol.*, v.76, p. 4788–4796, 2010.

FURBINO, L. E.; GODINHO, V. M.; SANTIAGO, I. F.; PELLIZZARI, F. M.; ALVES, T. M. A.; ZANI, C. L.; JUNIOR, P. A. S.; ROMANHA, A. J.; CARVALHO, A. G. O.; GIL, L. H. V. G.; ROSA, C. A.; MINNIS, A. M.; ROSA, L. H. Diversity patterns, ecology and biological activities of fungal communities associated with the endemic macroalgae across the Antarctic Peninsula. *Microbial Ecology*, v. 67, p. 775-787, 2014.

GARCÍA-DESCALZO, L.; GARCÍA-LÓPEZ, E.; POSTIGO, M.; BAQUERO, F.; ALCAZAR, A.; CID, C. Eukaryotic microorganisms in cold environments: examples from Pyrenean glaciers. *Frontiers in Microbiology*, v. 4, p. 55, 2013.

GARCÍA-LÓPEZ, E.; ALCÁZAR, P.; POSTIGO, M.; CID, C. The effect of climate change on microbial communities from glaciers. *Glaciers: Formation, Climate Change and Their Effects*, ed. N. Doyle (New York, NY: Nova Science Publishers, Inc.), p. 71-88, 2016.

GODINHO, V. M.; FURBINO, L. E.; SANTIAGO, I. F.; PELLIZZARI, F. M.; YOKOYA, N. S.; PUPO, D.; ALVES, T. M. A.; JUNIOR, P. A. S.; ROMANHA, A. J.; ZANI, C. L.; CANTRELL, C. L.; ROSA, C. A.; ROSA, L. H. Diversity and bioprospecting of fungal communities associated

with endemic and cold adapted macroalgae in Antarctica. *The ISME Journal*, v. 7, n. 7, p. 1434-1451, 2013.

GODINHO, V. M.; GONÇALVES, V. N.; SANTIAGO, I. F.; FIGUEREDO, H. M.; VITORELI, G. A.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARBOSA, E. C.; OLIVEIRA, J. G.; ALVES, T. M. A.; ZANI, C. L.; JUNIOR, P. A. S.; MURTA, S. M. F.; ROMANHA, A. J.; KROON, E. G.; CANTRELL, C. L.; WEDGE, D. E.; DUKE, S. O.; ALI, A.; ROSA, C. A.; ROSA, L. H. Diversity and bioprospection of fungal community present in oligotrophic soil of continental Antarctica. *Extremophiles*, v. 19, n. 3, p. 585-596, 2015.

GONÇALVES, V. N.; CARVALHO, C. R.; JOHANN, S.; MENDES, G.; ALVES, T. M. A.; ZANI, C. L.; JUNIOR, P. A. S.; MURTA, S. M. F.; ROMANHA, A. J.; CANTRELL, C. L.; ROSA, C. A.; ROSA, L. H. Antibacterial, antifungal and antiprotozoal activities of fungal communities present in different substrates from Antarctica. *Polar Biology*, v. 38, n. 8, p. 1143-1152, 2015.

GONÇALVES, V. N.; VAZ, A. B. M.; ROSA, C. A.; ROSA, L. H. Diversity and distribution of fungal communities in lakes of Antarctica. *FEMS Microbiology Ecology*, v. 82, n. 2, p. 459-471, 2012.

GORDON, J. E.; HAYNES, V. M.; HUBBARD, Alun. Recent glacier changes and climate trends on South Georgia. *Global and Planetary Change*, v. 60, n. 1-2, p. 72-84, 2008.

GOSTINČAR, C.; MUGGIA, L.; GRUBE, M. Polyextremotolerant black fungi: oligotrophism, adaptive potential, and a link to lichen symbioses. *Frontiers in Microbiology*, v. 3, p. 390, 2012.

HANDELSMAN, J. Metagenomics: application of genomics to uncultured microorganisms. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, v. 69, n. 1, p. 195-195, 2004.

HANSON, C. A.; FUHRMAN, J. A.; HORNER-DEVINE, M. C.; MARTINY, J. B.; H. Beyond biogeographic patterns: processes shaping the microbial landscape. *Nat. Rev. Microbiol.*, v.10, p.497–506, 2012.

HAWKSWORTH, D. L. & LÜCKING, R. Fungal diversity revisited: 2.2 to 3.8 million species. *Microbiol. Spectr.*, v.5, p. 79-95, 2017.

HIBBETT, D.; ABARENKOV, K.; KÖLJALG, U.; ÖPIK, M.; CHAI, B.; COLE, J. Sequence-based classification and identification of Fungi. *Mycologia*, v. 108, n. 6, p. 1049-1068, 2016.

HIBBETT, D.S.; OHMAN, A.; GLOTZER, D.; NUHN, M.; KIRK, P.; NILSSON, R. H. Progress in molecular and morphological taxon discovery in Fungi and options for formal classification of environmental sequences. *Fungal Biol. Rev.*, v.25, p. 38–47, 2011.

HIBBETT, D. S.; OHMAN, A.; KIRK, P. M.; Fungal ecology catches fire. *New Phytol.*, v.184, p.279–282, 2009.

HOBBS, W. O.; TELFORD, R. J.; BIRKS, H. J. B.; SAROS, J. E.; HAZEWINDEL, R. R.; PERREN, B. B. et al. Quantifying recent ecological changes in remote lakes of North America and Greenland using sediment diatom assemblages. *PloS one*, v. 5, n. 4, p. e10026, 2010.

HODKINSON, I. D.; COULSON, S.J.; WEBB, N.R. Community assembly along proglacial chronosequences in the high Arctic: vegetation and soil development in north-west Svalbard. *J. Ecol.*, v.914, p.651–663, 2003.

HODSON, A.; ANESIO, A. M.; TRANTER, M.; FOUNTAIN, A.; OSBORN, M.; PRISCU, J. et al. Glacial ecosystems. *Ecological monographs*, v. 78, n. 1, p. 41-67, 2008.

HOEGH-GULDBERG, O.; JACOB, D.; BINDI, M.; BROWN, S.; CAMILLONI, I.; DIEDHIOU, A. et al. Impacts of 1.5 C global warming on natural and human systems. Global warming of 1.5° C. An IPCC Special Report, 2018.

HOTALING, S.; HOOD, E.; HAMILTON, T. L. Microbial ecology of mountain glacier ecosystems: biodiversity, ecological connections and implications of a warming climate. *Environ. Microbiol.*, v.19, p.2935–2948, 2017.

JENNY, H. Arrangement of soil series and types according to functions of soil-forming factors. *Soil Science*, v.61, n.5, p. 375-392, 1946.

JIAHONG, W.; JIANCHENG K.; ZICHU X.; JIANKANG, H.; LLUBERAS, A.; Climate, Mass Balance and Glacial Changes on Small Dome of Collins Ice Cap. King George Island, Antarctica. *Antarctic Research*, v.1, p.52-61, 1994.

JONES, P. D. Antarctic temperatures over the present century—a study of the early expedition record. *Journal of Climate*, v.3, n.11, p.1193-1203, 1990.

JONES, P. D.; MARSH, R.; WIGLEY, T. M. L.; PEEL, D. A. Decadal timescale links between Antarctic Peninsula ice-core oxygen-18, deuterium and temperature. *The Holocene*, v.3, n.1, p.14-26, 1993.

JUMPPONEN, A., JONES, K. L. Massively parallel 454 sequencing indicates hyperdiverse fungal communities in temperate *Quercus macrocarpa* phyllosphere. *New Phytologist*, v.184, n.2, p. 438-448, 2009.

KARSCH-MIZRACHI, I.; TAKAGI, T.; COCHRANE, G.; INTERNATIONAL NUCLEOTIDE SEQUENCE DATABASE COLLABORATION. The international nucleotide sequence database collaboration. *Nucleic Acids Research*, v. 46, n. D1, p. D48-D51, 2018.

KAŠTOVSKÁ, K.; STIBAL, M.; ŠABACKÁ, M.; ČERNÁ, B.; ŠANTRŮČKOVÁ, H.; ELSTER, J. Microbial community structure and ecology of subglacial sediments in two polythermal Svalbard glaciers characterized by epifluorescence microscopy and PLFA. *Polar Biology*, v.30, n.3, p.277-287, 2007.

KENNICUTT, M. C.; CHOWN, S. L.; CASSANO, J. J.; LIGGETT, D.; PECK, L. S.; MASSOM, R. et al. A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond. *Antarctic Science*, v. 27, n. 1, p. 3-18, 2015.

KLEINTEICH, J.; HILDEBRAND, F.; BAHRAM, M.; VOIGT, A. Y.; WOOD, S. A.; JUNGBLUT, A. D. et al. Pole-to-pole connections: similarities between Arctic and Antarctic microbiomes and their vulnerability to environmental change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 5, p. 137, 2017.

KNAP, W.H.; OERLEMANS, J.; CADÉE, M. Climate Sensitivity of the ice cap of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Ann. Glaciol.*, v. 23, p.154–159, 1996.

KONRAD, H.; SHEPHERD, A.; GILBERT, L.; HOGG, A. E.; MCMILLAN, M.; MUIR, A.; SLATER, T. Net retreat of Antarctic glacier grounding lines. *Nature Geoscience*, v. 11, n. 4, p. 258-262, 2018.

KOSTRZEWSKI, A.; RACHLEWICZ, G.; ZWOLINSKI, Z. Geomorphological map of the western coast of Admiralty Bay, King George Island. In *Relief, Quaternary Paleogeography and Changes of the Polar Environment*; Maria Curie-Skłodowska University Press: Lublin, Poland, p. 71–77, 1998.

KOSTRZEWSKI, A.; RACHLEWICZ, G.; ZWOLINSKI, Z. The relief of the Western coast of Admiralty Bay, King George Island, South Shetlands. *Quaest. Geogr.*, v.22, p.43–58, 2002.

LEE, J. R.; RAYMOND, B.; BRACEGIRDLE, T. J.; CHADÈS, I.; FULLER, R. A.; SHAW, J. D.; TERAUDS, A. Climate change drives expansion of Antarctic ice-free habitat. *Nature*, v. 547, n. 7661, p. 49-54, 2017.

LIGHTHART, B.; SHAFFER, B.T. Airborne bacteria in the atmospheric surface layer: temporal distribution above a grass seed field. *Applied and Environmental Microbiology*, v.61, p.1492-1496, 1995.

LINDAHL, B. D.; NILSSON, R. H.; TEDERSOO, L.; ABARENKOV, K.; CARLSEN, T.; KJØLLER, R. et al. Fungal community analysis by high-throughput sequencing of amplified markers—a user's guide. *New phytologist*, v. 199, n. 1, p. 288-299, 2013.

LIPSON, D.A.; SCHMIDT, S.K. Seasonal changes in an alpine soil bacterial community in the Colorado Rocky Mountains. *Appl. Environ. Microb.* v.70, p.2867-2879, 2004.

LÓPEZ-BUENO, A.; TAMAMES, J.; VELÁZQUEZ, D.; MOYA, A.; QUESADA, A.; ALCAMÍ, A. High diversity of the viral community from an Antarctic lake. *Science*, v. 326, n. 5954, p. 858-861, 2009.

MA, L. J.; ROGERS, S. O.; CATRANIS, C. M.; STARMER, W. T. Detection and characterization of ancient fungi entrapped in glacial ice. *Mycologia*, v.92, p.286–295 2000.

MAKHALANYANE, T. P.; VALVERDE, A.; BIRKELAND, N. K.; CARY, S. C.; TUFFIN, I. M.; COWAN, D. A. Evidence for successional development in Antarctic hypolithic bacterial communities. *The ISME journal*, v. 7, n. 11, p. 2080-2090, 2013.

MARCO, M.; BROCCA, S.; ORLANDO, M.; LOTT, M. The “cold revolution”. Present and future applications of cold-active enzymes and ice-binding proteins. *New Biotechnol.*, v.55, p.5–11. 2019.

MARGESIN, R.; MITEVA, V. Diversity and ecology of psychrophilic microorganisms. *Res Microbiol.*, v.162, n.3, p.346–361, 2011.

MARIZCURRENA, J. J.; CERDÁ, M. F.; ALEM, D.; CASTRO-SOWINSKI, S. Living with Pigments: The Colour Palette of Antarctic Life. In *The Ecological Role of Micro-organisms in the Antarctic Environment*; Castro-Sowinski, S., Ed.; Springer Polar Sciences p. 65–82, 2019.

MARSHALL, W.A. Biological particles over Antarctica. *Nature*, v.383, p.680, 1996.

MARSHALL, W.A.; Chalmers, M.O. Airborne dispersal of Antarctic algae and cyanobacteria. *Ecography*, v.20, p.585-594, 1997.

MARSHALL, W. A. Aerial transport of keratinaceous substrate and distribution of the fungus *Geomyces pannorum* in Antarctic soils. *Microbial Ecology*, v. 36, n. 2, p. 212-219, 1998.

MARSTON, R. A. Geomorphology and vegetation on hillslopes: interactions, dependencies and feedback loops. *Geomorphology*, v.116, n. 3, p. 206–217, 2010.

MARTINY, J. B. H.; BOHANNAN, B. J. M.; BROWN, J. H.; COLWELL, R. K.; FUHRMAN, J. A.; GREEN, J. L. et al. Microbial biogeography: putting microorganisms on the map. *Nat Rev Microbiol.*, v.4, p.102–112, 2006.

MÄUSBACHER, R.; MULLER, J.; MUNNICH, M.; SCHMIDT, R. Evolution of postglacial sedimentation in Antarctic lakes (King George Island). *Zeitschrift für Geomorphologie*, v. 33, p. 219–234, 1989.

- MCGEOCH, M. A.; SHAW, J. D.; TERAUDS, A.; LEE, J. E.; CHOWN, S. L. Monitoring biological invasion across the broader Antarctic: a baseline and indicator framework. *Global Environmental Change*, v. 32, p. 108-125, 2015.
- MENEZES, G. C.; AMORIM, S. S.; GONÇALVES, V. N.; GODINHO, V. M.; SIMÕES, J. C.; ROSA, C. A.; ROSA, L. H. Diversity, Distribution, and Ecology of Fungi in the Seasonal Snow of Antarctica. *Microorganisms*, v.7, n.10, p. 445, 2019.
- MERBOLD L.; ROGIERS, N.; EUGSTER, W. Winter CO₂ fluxes in a sub-alpine grassland in relation to snow cover, radiation and temperature. *Biogeochemistry*, v.111, p.287-302, 2012.
- MILNER, A. M.; FASTIE, C. L.; CHAPIN, F. S.; ENGSTROM, D. R.; SHARMAN, L.C. Interactions and linkages among ecosystems during landscape evolution. *BioScience*, v. 57, n. 3, p. 237–247, 2007.
- MÖLLER, C.; DREYFUSS, M. M. Microfungi from Antarctic lichens, mosses and vascular plants. *Mycologia*, v.88, p.922-933, 1996.
- MONASTERSKY, R. Biodiversity: Life—a status report. *Nature News*, v. 516, n. 7530, p. 158, 2014.
- MOREAU, M.; MERCIER, D.; LAFFLY, D.; ROUSSEL, E. Impacts of recent paraglacial dynamics on plant colonization: A case study on Midtre Lovénbreen foreland, Spitsbergen (79 N). *Geomorphology*, v. 95, n. 1-2, p. 48-60, 2008.
- MURRAY, A. E.; WU, K. Y.; MOYER, C. L.; KARL, D. M.; DELONG, E. F. Evidence for circumpolar distribution of planktonic Archaea in the Southern Ocean. *Aquatic Microbial Ecology*, v.18, p. 263-273, 1999.
- NEWSHAM, K.; HOPKINS, D.; CARVALHAIS, L. et al. Relationship between soil fungal diversity and temperature in the maritime Antarctic. *Nature Clim Change*, v.6, p.182–186, 2016.
- NGUYEN, N. H.; SMITH, D.; PEAY, K.; KENNEDY, P. Parsing ecological signal from noise in next generation amplicon sequencing. *New Phytologist*, v. 205, n. 4, p. 1389-1393, 2015.
- NIEDERBERGER, T.; BOTTOS, E. M.; SOHM, J. A.; GUNDERSON, T. E.; PARKER, A. E.; COYNE, K. J.; CARY, S. C. Rapid microbial dynamics in response to an induced wetting event in antarctic dry valley soils. *Frontiers in microbiology*, v.10, p. 621, 2019.
- NIEDERBERGER, T. D.; SOHM, J. A.; GUNDERSON, T. E.; PARKER, A. E.; TIRINDELLI, J.; CAPONE, D. G.; CARY, S. C. Microbial community composition of transiently wetted Antarctic Dry Valley soils. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, p. 9, 2015.
- NILSSON, R. H.; ANSLAN, S.; BAHRAM, M.; WURZBACHER, C.; BALDRAN, P.; TEDERSOO, L. Mycobiome diversity: high-throughput sequencing and identification of fungi. *Nature Reviews Microbiology*, v. 17, n. 2, p. 95-109, 2019.
- NILSSON, R. H.; HYDE, K. D.; PAWŁOWSKA, J.; RYBERG, M.; TEDERSOO, L.; AAS, A. B.; et al. Improving ITS sequence data for identification of plant pathogenic fungi. *Fungal Diversity*, v. 67, n. 1, p. 11-19, 2014.
- NILSSON, R. H.; ABARENKOV, K.; KÖLJALG, U. Molecular techniques in mycological studies and sequence data curating: quality control and challenges. In: *Biology of microfungi.*, p. 47-64. 2016.

- O'BRIEN, H. E.; PARRENT, J. L.; JACKSON, J. A.; MONCALVO, J. M.; VILGALYS, R. Fungal community analysis by large-scale sequencing of environmental samples. *Appl. Environ. Microbiol.*, v.71, p.5544–5550, 2005.
- ONOFRI, S.; SELBMAN, L.; HOOG, G. S. et al. Evolution and adaptation of fungi at boundaries of life. *Adv Space Res.*, v.40, p.1657–1664, 2007.
- PACHAURI, R. K.; ALLEN, M. R.; BARROS, V. R.; BROOME, J.; CRAMER, W.; CHRIST, R. et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Ipcc*, p. 151, 2014.
- PAGE, R. D. BioNames: linking taxonomy, texts, and trees. *PeerJ*, v. 1, p. e190, 2013.
- PAGE, R. D. DNA barcoding and taxonomy: dark taxa and dark texts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 371, n. 1702, p. 20150334, 2016.
- PARK, B. K.; CHANG, S. K.; YOON, H. I.; CHUNG, H. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, v. 27, p. 633–635, 1998.
- PAUL, F.; KÄÄB, A.; MAISCH, M.; KELLENBERGER, T. W.; HAEBERLI, W. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, v. 31, 2004.
- PEARCE, D. A.; BRIDGE, P. D.; HUGHES, K.A.; SATTLER, B.; PSENNER, R.; RUSSELL, N. J. Microorganisms in the atmosphere over Antarctica. *FEMS Microbiology Ecology*, v.69, n.2, p. 143-157, 2009.
- PEARCE, D. A.; NEWSHAM, K.; THORNE, M.; CALVO-BADO, L.; KRSEK, M.; LASKARIS, P. et al. Metagenomic analysis of a southern maritime Antarctic soil. *Frontiers in Microbiology*, v. 3, p. 403, 2012.
- PEAY, K. G. Back to the future: natural history and the way forward in modern fungal ecology. *Fungal Ecology*, v.12, p. 4-9, 2014.
- PEGLER, D. N.; SPOONER, B.; SMITH, R.L. Higher fungi of Antarctica, the subantarctic zone and Falkland Islands. *Kew. Bull.*, v.35, p.499–562, 1980.
- PERINI, L.; GOSTINČAR, C.; GUNDE-CIMERMAN, N. Fungal and bacterial diversity of Svalbard subglacial ice. *Scientific reports*, v.9, n. 1, p. 1-15, 2019.
- PERONDI, C. Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinks, Baranowski, Tower e Windy, Ilha Rei George, Antártica, 2018.
- PESCIAROLI, C.; CUPINI, F.; SELBMANN, L. et al. Temperature preferences of bacteria isolated from seawater collected in Kandalaksha Bay, White Sea, Russia. *Polar Biol.*, v.35, p. 435-445, 2012.
- PESSI, I. S.; PUSHKAREVA, E.; LARA, Y.; BORDERIE, F.; WILMOTTE, A.; ELSTER, J. Marked succession of cyanobacterial communities following glacier retreat in the high Arctic. *Microbial ecology*, v. 77, n. 1, p. 136-147, 2019.
- PETSCH, C.; KUNST, A. V.; COSTA, R. M.; DA ROSA, K. K.; SIMÕES, J. C. Proposta de zoneamento para proteção de áreas sujeitas a intervenções antrópicas na Península Fildes, Antártica. *Revista Tocantinense De Geografia*, v.7, n.13, p.31-52, 2018.
- POINTING, S. B.; CHAN, Y.; LACAP, D. C.; LAU, M. C.; JURGENS, J. A.; FARRELL, R. L. Highly specialized microbial diversity in hyper-arid polar desert. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 47, p. 19964-19969, 2009.

- PRICE, P. B. Microbial genesis, life and death in glacial ice. *Can. J. Microbiol.*, v.55, p.1–11, 2009.
- PUDASAINI, S.; WILSON, J.; JI, M.; VAN DORST, J.; SNAPE, I.; PALMER, A. S.; BURNS, B. P.; FERRARI, B. C. Microbial diversity of Browning Peninsula, Eastern Antarctica revealed using molecular and cultivation methods. *Frontiers in microbiology*, v. 8, p. 591, 2017.
- PUDEŁKO, R.; ANGIEL, P.J.; POTOCKI, M.; JĘDREJEK, A.J.; KOZAK, M. Fluctuation of Glacial Retreat Rates in the Eastern Part of Warszawa Icefield, King George Island, Antarctica, 1979–2018. *Remote Sensing*, v. 10, n. 6, p. 892, 2018.
- PUTZKE, J., PEREIRA, A. B. The Antarctic mosses with special reference to the South Shetland Islands. Canoas: Ed. ULBRA, 2001.
- RACHLEWICZ, G. Glacial relief and deposits of the western coast of Admiralty Bay, King George Island, South Shetlands Islands. *Polish Polar Research*, v. 20, n. 2, p. 89 – 130. 1999.
- REYNOLDS, H. T.; BARTON, H. A. Comparison of the white-nose syndrome agent *Pseudogymnoascus destructans* to cave-dwelling relatives suggests reduced saprotrophic enzyme activity. *PLoS One*, v. 9, n. 1, p. e86437, 2014.
- ROSA, L.H.; VAZ, A. B. M.; CALIGIORNE, R. B.; CAMPOLINA, S.; ROSA, C. A. Endophytic fungi associated with the Antarctic Grass *Deschampsia antarctica* Desv. (Poaceae). *Polar Biol.*, v. 20, n.32, p.161-167, 2009.
- ROSA, K. K.; PETSCH, C.; CAMPANA, A. S.; SIMÕES, C. L.; GONÇALVES, M. A.; VIEL, J. A. Evolução de Ambientes Proglaciais em Resposta às mudanças climáticas. In: Anais XI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Maringá. UGB, 2016.
- ROSA, L. H.; ZANI, C. L.; CANTRELL, C. L.; DUKE, S. O.; DIJCK, P. V.; DESIDERI, A.; ROSA, C. A. Fungi in Antarctica: diversity, ecology, effects of climate change, and bioprospection for bioactive compounds. In: Rosa LH (eds) *Fungi of Antarctica*, Springer, Cham, p. 1-17, 2019.
- RÜCKAMP, M.; BRAUN, M.; SUCKRO, S.; BLINDOW, N. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change*, v.79, p. 99-109, 2011.
- RUISI, S.; BARRECA, D.; SELBMANN, L.; ZUCCONI, L.; ONOFRI, S. Fungi in Antarctica. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v.6, p.27-141, 2007.
- SANTOS, J. A.; MEYER, E.; SETTE, L. D. Fungal Community in Antarctic Soil Along the Retreating Collins Glacier (Fildes Peninsula, King George Island). *Microorganisms*, v. 8, n. 8, p. 1145, 2020.
- SCHADT, C.W.; MARTIN, A.P.; LIPSON, D.A.; SCHMIDT, S.K. Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils. *Science*, v.301, p.1359-1361, 2003.
- SCHLICHTING, H. M.; SPEZIALE, B. J.; ZINK, R. M. Dispersal of algae and protozoa by Antarctic flying birds. *Antarctic Journal*, v.13, p.147-149, 1978.
- SCHMIDT, S. K.; REED, S. C.; NEMERGUT, D. R.; STUART GRANDY, A.; CLEVELAND, C.C.; WEINTRAUB, M.N. et al. The earliest stages of ecosystem succession in high-elevation (5000 metres above sea level), recently deglaciated soils. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 275, n. 1653, p. 2793-2802, 2008.
- SCHOCH, C.L.; SEIFERT, K. A.; HUHNDOERF, C.; ROBERT, V.; SPOUGE, J. L.; LEVESQUE, C. A.; CHEN, W.; Fungal Barcoding Consortium. Nuclear ribosomal internal transcribed spacer

(ITS) region as a universal DNA barcode marker for Fungi. *Proc. Natl Acad. Sci.*, v.109, p. 6241–6246, 2012.

SERRANO, E.; LOPEZ-MARTINEZ, J. Rock glaciers in the South Shetland Islands, Western Antarctica. *Geomorphology*, v. 35, n. 1–2, p. 145–162, 2000.

SIERAKOWSKI, K.; KORCZAK-ABSHIRE, M.; JADWISZCZAK, P. Changes in bird communities of Admiralty Bay, King George Island (West Antarctica): Insights from monitoring data (1977–1996). *Pol. Polar Res.*, v.38, p.229–260, 2017.

SIGLER, W. V.; ZEYER, J. Microbial diversity and activity along the forefields of two receding glaciers. *Microb. Ecol.*, v.43, p.397–407, 2002.

SIMAS, F., C.; SCHAEFER, M. F. F.; DACOSTA, I. Genesis, properties and classification of cryosols from admiralty Bay, Maritime Antarctica. *Geoderma*, v. 144, n. 1–2, p. 116–122, 2008.

SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E.; FERRON, F. E. Morphology and variations of glacial drainage basins in King George Island ice field, Antarctica. *Annals of Glaciology*, v. 29, p. 220–224, 1999.

SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F. Investigation of King George Island ice cover using ERS1 SAR and SPOT imagery. *Selper*, v. 11, p. 56–60, 1995.

SIMÕES, C. L.; ROSA, K. K. D.; CZAPELA, F. F.; VIEIRA, R.; SIMOES, J. C. Collins Glacier Retreat Process and Regional Climatic Variations, King George Island, Antarctica. *Geographical Review*, v.105, p.462–471, 2015.

SINGH, P.; HANADA, Y.; SINGH, S. M.; TSUDA, S. Antifreeze protein activity in Arctic cryoconite bacteria. *Fems Microbiol. Lett.*, v.351, p.14–22, 2011.

SMITTENBERG, R. H.; GIERGA, M.; GÖRANSSON, H.; CHRISTL, I.; FARINOTTI, D.; BERNASCONI, S. M.; Climate-sensitive ecosystem carbon dynamics along the soil chronosequence of the Damma glacier forefield, Switzerland. *Glob Chang Biol.*, v.18 p.1941–1955, 2012.

STIBAL, M.; BRADLEY, J. A.; EDWARDS, A. et al. Ecossistemas glaciais são essenciais para compreender as respostas da biodiversidade ao recuo das geleiras. *Nat Ecol Evol.* v. 4, p. 686–687, 2020.

STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J. et al. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, v. 1535, 2013.

STRAUSS, S. L.; RUHLAND, C. T.; DAY, T. A. Trends in soil characteristics along a recently deglaciated foreland on Anvers Island, Antarctic Peninsula. *Polar Biol.*, v.32, p.1779–1788, 2009.

SZIŁO, J.; BIALIK, R. J. Bedload transport in two creeks at the ice-free area of the Baranowski Glacier, King George Island, West Antarctica. *Polish Polar Research*, v. 38, n. 1, p. 21–39, 2017.

SZIŁO, J.; BIALIK, R. J. Recession and ice surface elevation changes of Baranowski Glacier and its impact on proglacial relief (King George Island, West Antarctica). *Geosciences*, v. 8, n. 10, p. 355, 2018.

TABERLET, P.; COISSAC, E.; POMPANON, F.; BROCHMANN, C.; WILLERSLEV, E. Towards next-generation biodiversity assessment using DNA metabarcoding. *Molecular ecology*, v.21, n.8, p. 2045–2050, 2012.

- TEDERSOO, L.; BAHRAM, M.; PÖLME, S.; KÕLJALG, U.; YOROU, N. S.; WIJESUNDERA, R. et al. Global diversity and geography of soil fungi. *science*, v. 346, n. 6213, 2014.
- TEDERSOO, L.; BAHRAM, M.; TOOTS, M.; DIÉDHIOU, A. G.; HENKEL, T. W.; KJØLLER, R.; et al. Towards global patterns in the diversity and community structure of ectomycorrhizal fungi. *Mol Ecol.*, v.21, p. 4160–4170, 2012.
- TEDERSOO, L.; LINDAHL, B. Fungal identification biases in microbiome projects. *Environmental Microbiology Reports*, v. 8, n. 5, p. 774-779, 2016.
- TEIXEIRA, L. C.; PEIXOTO, R. S.; CURY, J. C.; SUL, W. J.; PELLIZARI, V. H.; TIEDJE, J.; ROSADO, A. S. Bacterial diversity in rhizosphere soil from Antarctic vascular plants of Admiralty Bay, maritime Antarctica. *The ISME journal*, v.4, n.8, p.989-1001, 2010.
- THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; TEIXEIRA, D. B., ALMEIDA, I. C. C.; LA SCALA JR, N.; CANELLAS, L. P. et al. CO₂ and N₂O emissions in a soil chronosequence at a glacier retreat zone in Maritime Antarctica. *Science of the Total Environment*, v.521, p.336-345, 2015.
- TIMLING, I.; WALKER, D.; NUSBAUM, C.; LENNON, N.; TAYLOR, D.; Rich and cold: diversity, distribution and drivers of fungal communities in patterned-ground ecosystems of the North American Arctic. *Mol. Ecol.*, v.23, p.3258-3272, 2014.
- TOSI, S.; CASADO, B.; GERDOL, R.; CARETTA, G. Fungi isolated from Antarctic mosses. *Polar Biology*, v. 25, n. 4, p. 262-268, 2002
- TRUONG, D. T.; TETT, A.; PASOLLI, E.; HUTTENHOWER, C.; SEGATA, N. Microbial strain-level population structure and genetic diversity from metagenomes. *Genome research*, v. 27, n. 4, p. 626-638, 2017.
- TURNER, J.; BINDSCHADLER, R.; CONVEY, P.; DI PRISCO, G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D.; MAYEWSKI, P.; SUMMERHAYES, C. Antarctic climate change and the environment. 2009.
- TURNER, J.; BARRAND, N. E.; BRACEGIRDLE, T. J.; CONVEY, P.; HODGSON, D. A.; JARVIS, M. et al. Antarctic climate change and the environment: an update. 2013.
- TURNER, J.; MARSHALL, G. J. Climate change in the polar regions. Cambridge University Press, 2011.
- UETAKE, J.; TANAKA, S.; HARA, K.; TANABE, Y.; SAMYN, D.; MOTOYAMA, H.; IMURA, S.; KOHSHIMA, S. Novel biogenic aggregation of moss gemmae on a disappearing African glacier. *PloS one*, v.9, n.11, p.e112510, 2014.
- VERANT, M. L.; METEYER, C. U.; SPEAKMAN, J. R.; CRYAN, P. M.; LORCH, J. M.; BLEHER, D. S. White-nose syndrome initiates a cascade of physiologic disturbances in the hibernating bat host. *BMC Physiol.*, v.14, p.10, 2014.
- VISHNIAC, H. S. Biodiversity of yeasts and filamentous microfungi in terrestrial Antarctic ecosystems. *Biodiversity and Conservation*, v. 5, n. 11, p. 1365-1378, 1996.
- WALKER, L. R.; DEL MORAL, R. Primary succession and ecosystem rehabilitation. Cambridge: Cambridge University Press, p.456, 2003.
- WENTZEL, L. C. P.; INFORSATO, F. J.; MONTROYA, Q. V.; ROSSIN, B. G.; NASCIMENTO, N. R.; RODRIGUES, A.; SETTE, L. D. Fungi from Admiralty Bay (King George Island, Antarctica) soils and marine sediments. *Microbial Ecology*, v.77, p.12-24, 2019
- WILLERSLEV, E.; HANSEN, A. J.; POINAR, H. N. Isolation of nucleic acids and cultures from fossil ice and permafrost. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 19, n. 3, p. 141-147, 2004.

WOUTERS, B.; MARTIN-ESPAÑOL, A.; HELM, V.; FLAMENT, T.; VAN WESSEM, J. M.; LIGTENBERG, S. R.; BAMBER, J. L. Dynamic thinning of glaciers on the Southern Antarctic Peninsula. *Science*, v. 348, n. 6237, p. 899-903, 2015.

WRIGHT, K. E.; WILLIAMSON, C.; GRASBY, S. E.; SPEAR, J. R.; TEMPLETON, A. S. Metagenomic evidence for sulfur lithotrophy by Epsilonproteobacteria as the major energy source for primary productivity in a sub-aerial arctic glacial deposit, Borup Fiord Pass. *Frontiers in microbiology*, v. 4, p. 63, 2013.

WUTKOWSKA, M.; VADER, A.; MUNDRA, S.; COOPER, E. J.; EIDENSEN, P. B. Dead or alive; or does it really matter? Level of congruency between trophic modes in total and active fungal communities in high arctic soil. *Frontiers in microbiology*, v. 9, p. 3243, 2019.

YAHR, R.; SCHOCH, C. L.; DENTINGER, B. T. M. Scaling up discovery of hidden diversity in fungi: impacts of barcoding approaches. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 371, n. 1702, p. 20150336, 2016.

ZHANG, X.; ZHANG, Y.; XU, X.; QI, S. Diverse deep-sea fungi from the South China sea and their antimicrobial activity. *Current Microbiology*, v.67, p.525–530, 2013.

ZHU, R.; BAO, T.; WANG, Q.; XU, H.; LIU, Y. Summertime CO₂ fluxes and ecosystem respiration from marine animal colony tundra in maritime Antarctica. *Atmospheric Environment*, v.98, p.190-201, 2014.

ZINGER, L.; SHAHNAVAZ, B.; BAPTIST F.; GEREMIA, R. A.; CHOLER, P. Microbial diversity in alpine tundra soils correlates with snow cover dynamics. *Isme J.* v.3, p.850-859, 2009.