

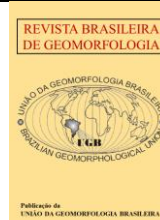


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 27, nº1 (2026)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v27i1.2741>



Artigo de Pesquisa

Fenologia do gelo de lagos nas penínsulas Byers, Keller e Fildes, Antártica Marítima, no período de 2014 – 2023 com dados SAR

Ice Phenology of Lakes in the Byers, Keller, and Fildes Peninsulas, Maritime Antarctica, from 2014 to 2023 Using SAR Data

Jorge Antônio Viel ¹, Kátia Kellem da Rosa ², Carina Petsch ³, Luiz Felipe Velho ⁴, Danielle Dall Amaria Soffiatti ⁵, Federico Aita ⁶ e Rosemary Vieira ⁷

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus* Bento Gonçalves, Bento Gonçalves, Brasil. ja-viel89@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4139-9623>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, Brasil. katiakellem@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-9658>

³ Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Geociências, Santa Maria, Brasil. carinapetsch@gmail.com.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, *Campus* Porto Alegre, Porto Alegre, Brasil. lfelho@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-7544>

⁵ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, Brasil. danielled.soffiatti@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0381-9775>

⁶ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Geografia, Porto Alegre, Brasil. federico.aita2704@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-5447-8498>

⁷ Universidade Federal Fluminense, Departamento de Geografia, Niterói, Brasil. rosemaryvieira@id.uff.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-2890>

Recebido: 18/08/2025; Aceito: 23/01/2026; Publicado: 27/03/2026

Resumo: esta pesquisa investigou a fenologia do gelo em vinte e cinco lagos das penínsulas Fildes e Keller (Ilha Rei George) e Byers (Ilha Livingston), Antártica, utilizando dados SAR (Sentinel-1), entre 2014 e 2023. Foi aplicado um limiar de retroespalhamento para a superfície congelada nas imagens. A fenologia dos lagos foi analisada para os meses de outubro a março. Os lagos foram caracterizados quanto ao contexto de declividade, altitude e distância da costa. Atividades de campo foram realizadas para a validação. As variações do retroespalhamento e do congelamento e descongelamento da superfície dos lagos estão relacionadas com a temperatura média do ar, precipitação e vento. A temperatura média do ar é o principal fator na variação da cobertura de gelo, com redução no número de dias congelados em anos com maior ocorrência de temperaturas positivas, especialmente durante eventos *El Niño*. 2015 e 2019 apresentaram menor descongelamento e 2023 apresentou a menor extensão da ocorrência (99,15%) da superfície com gelo. Variações de velocidade e direção do vento, além do contexto geográfico dos lagos, como a distância da costa e a altitude, influenciaram as diferenças entre os lagos. As imagens SAR demonstraram eficácia para o mapeamento e monitoramento da cobertura de gelo superficial em ambientes glaciais e periglaciais, evidenciando seu potencial em estudos de resposta lacustre à variabilidade climática.

Palavras-chave: Lagos proglaciais 1; comportamento sazonal 2; cobertura de neve e gelo 3; mudanças climáticas 4; SAR 5.

Abstract: This study examined the ice phenology of twenty-five lakes located in the Fildes and Keller peninsulas (King George Island) and the Byers Peninsula (Livingston Island), Antarctica, using SAR (Sentinel-1) data from 2014 to 2023. A backscatter threshold was established for ice-free and frozen surfaces in S1 images. The temporal analysis of lake phenology was conducted covering the months from October to March. The slope context, altitude, and distance from the coast of the lakes were characterized. Field activities were carried out to validation. Temporal backscatter analysis revealed seasonal patterns of lake surface freezing and thawing, which were correlated with climatic variables, including mean air temperature, precipitation, and wind. Mean air temperature emerged as the primary driver of ice cover variability, with fewer frozen days observed in years of increased positive temperatures, particularly during El Niño events. The years 2015 and 2019 exhibited less thawing, while 2023 recorded the lowest extent of frozen lake surfaces (99.15%). Local factors, including wind speed and direction, and coast distance and altitude, also influenced the observed patterns. Sentinel-1 imagery proved effective for mapping and monitoring lake surface ice cover in glacial and periglacial environments, underscoring its potential for assessing lacustrine responses to climate variability.

Keywords: Proglacial lakes 1; seasonal behavior 2; snow and ice cover 3; climate change 4; SAR 5.

1. Introdução

O arquipélago das Shetland do Sul está localizado na região Antártica Marítima. Esta região possui relevância no monitoramento ambiental, pois geleiras antárticas e subantárticas em latitudes próximas a 60°Sul e de menor continentalidade têm uma sensibilidade maior no balanço de massa do que as de latitudes mais altas, esse fator se deve a uma maior influência marítima e por estar em temperatura próxima ao ponto de fusão sob pressão (MARSHALL, 2021). Além disso, geleiras e paisagens subpolares são propensas a experimentar transformações em uma escala de décadas como resposta ao aquecimento global (MARSHALL, 2021). Por exemplo, as recentes mudanças climáticas têm provocado impactos no sistema natural, incluindo mudanças na distribuição espacial do sistema glacial (CARRIVICK & HECKMANN, 2017). Sendo assim, áreas cobertas por geleiras são substituídas por áreas livres de gelo, nas quais ocorrem a rápida formação e o aumento do número de lagos (SHUGAR et al., 2020).

Neste contexto, a região da Península Antártica (PA) tem registrado um dos aquecimentos atmosféricos mais rápidos do planeta desde a década de 1950 (VAUGHAN et al., 2003; TURNER, 2004; JONES et al., 2016; BLITZ, 2018; TURNER et al., 2021). Na região da PA nas últimas décadas, também há o aumento significativo das áreas livres de gelo (SHUGAR et al., 2020), o surgimento de novos lagos e o aumento de suas áreas, conforme demonstrado por Petsch et al. (2022). A relevância do monitoramento do comportamento do derretimento superficial dos lagos insere-se nesse contexto da necessidade do maior entendimento dos impactos das mudanças climáticas nesta região do planeta.

Os lagos glaciais e seus componentes são reconhecidos pela importância como indicadores do comportamento da Criosfera (CARRIVICK & HECKMANN, 2017). A formação periódica de lagos e a diminuição da cobertura de gelo ao longo do tempo, como resultado de variações sazonais e interanuais no clima, são chamadas de fenologia do gelo em lagos (KROPÁČEK et al., 2013; ŠMEJKALOVÁ et al., 2016).

Nesse sentido, o comportamento do congelamento e derretimento do gelo de lagos glaciais pode ser um indicador das variações na temperatura do ar em diferentes escalas de tempo (ZHANG & PAVELSKY, 2019). A cobertura de gelo dos lagos é essencial para limitar as taxas de evaporação no inverno, sem a qual os níveis dos lagos, a extensão das águas superficiais e, em última análise, a quantidade de água doce disponível seriam drasticamente reduzidos (WOOLWAY et al., 2020). Contudo, há uma compreensão limitada dos padrões espaciais da fenologia ou de como esses padrões são influenciados por vários fatores climáticos e geomórficos (O'REILLY et al., 2015), sobretudo para a Antártica, incluindo a sua região marítima subpolar.

O derretimento e o congelamento da superfície de lagos na península Fildes, na Antártica Marítima, foram analisados por Rosa et al. (2020), durante o período de julho de 2016 a dezembro de 2018, e mostraram a potencialidade do Sentinel 1A (S1). Nesse viés, o Sensoriamento Remoto por satélite fornece uma alternativa viável para detectar e monitorar mudanças na cobertura de gelo em lagos de alta latitude (DUGUAY et al., 2012; ZHANG & PAVELSKY, 2019). Imagens SAR (Synthetic Aperture Radar) têm sido usadas para caracterizar a fenologia do gelo de lagos em regiões polares (PETSCH et al. 2020; DIRSCHERL et al. 2021). A avaliação do potencial e das limitações da utilização das imagens SAR, como o S1, é relevante para estabelecer uma rede de monitoramento da variabilidade da cobertura de gelo dos lagos localizados nas áreas livres de gelo. Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é investigar a fenologia do gelo de vinte e cinco lagos distribuídos nas áreas livres de gelo das

penínsulas Fildes, Byers e Keller e a resposta à variabilidade climática, por meio da análise temporal de imagens SAR, no período de 2014 a 2023.

2. Área de Estudo

O trabalho avalia a fenologia dos lagos localizados em três penínsulas distintas das Ilhas Shetland do Sul, localizadas na Antártica Marítima (Figura 1). Há diversos lagos localizados nas áreas livres de gelo das ilhas Shetland do Sul; destes, os maiores estão localizados na Península Byers (Ilha Livingston) e na Península Fildes (Ilha Rei George). Desta forma, esses lagos estão inseridos em um contexto geográfico único, com condições glaciais e periglaciais específicas, conforme demonstrado por Petsch et al. (2022). A maior parte das pesquisas sobre os lagos das áreas livres de gelo das Shetland do Sul se dedica à caracterização mineralógica, química e geoquímica dos sedimentos dos lagos (ALFONSO et al., 2015; VIEIRA et al., 2015; GALVÃO et al., 2020) e não há registro histórico da fenologia desses lagos. Para a região subpolar Antártica, as informações e o monitoramento da fenologia do gelo dos lagos ainda são incipientes. Ademais, não existe uma quantidade significativa de investigações sobre a influência das características como área e contexto geográfico no comportamento da cobertura de gelo superficial dos lagos. Nas penínsulas Keller, Byers e Fildes há lagos que abastecem as estações antárticas, que podem ser beneficiadas, em seu planejamento logístico, com informações do comportamento fenológico do gelo superficial dos lagos. Desta forma, estudaram-se 13 lagos localizados na Península Fildes, 10 lagos estudados na Península Byers e 2 lagos localizados na Península Keller.

As penínsulas Fildes e Keller estão localizadas na Ilha Rei George (IRG), que é a maior ilha das Shetland do Sul, com aproximadamente 1.250 km². A Ilha Livingston (IL), onde se localiza a Península Byers, é a segunda maior ilha do arquipélago. Ambas as ilhas são delimitadas ao norte pela Passagem de Drake e ao sul pelo Estreito de Bransfield.

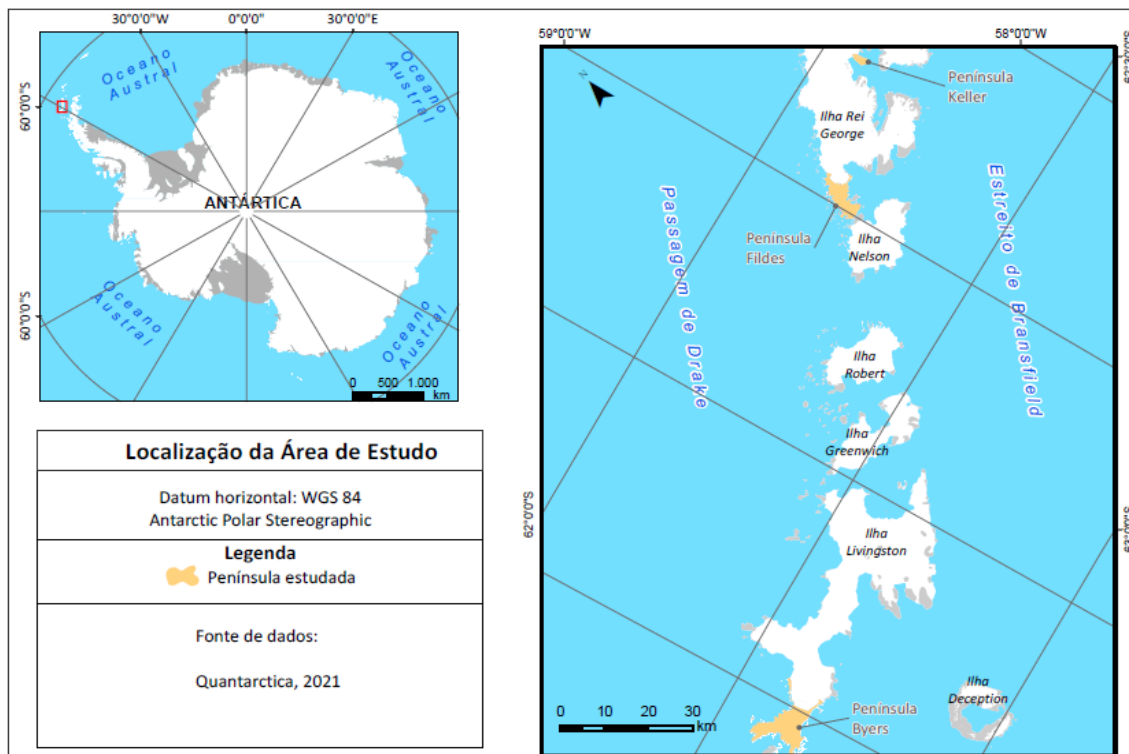


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Dados: Quantarctica (MATSUOKA et al., 2021).

A Península Fildes é limitada a nordeste pela geleira Collins, possui 15 km², localiza-se no setor ocidental da IRG (Baía Maxwell) e possui elevação máxima de 270 m. Seu relevo caracteriza-se predominantemente por superfícies erodidas, superfícies planas nos terraços marinhos e superfícies elevadas no interior (CURL, 1980), configurando um conjunto de plataformas com relevo suave e ondulado (ANDRADE, 2017). Os canais glaciofluviais, comuns nas áreas livres de gelo da Antártica Marítima durante o verão, possuem alta capacidade

de modelar a geomorfologia dos ambientes periglaciais, resultando em conformações no relevo com formato “V” (ANDRADE, 2017).

A Península Keller, onde está localizada a Estação Brasileira Comandante Ferraz (EACF), localiza-se na Baía do Almirantado e possui elevação máxima de 332,8 m (Monte Birkenmajer). O relevo da Península Keller é predominantemente composto pela classe forte ondulada e montanhosa (MENDES JR et al., 2010). Essas duas classes ocupam quase 50% da Península Keller. Seu relevo caracteriza-se por acumulações detríticas de natureza variável e por diversos tipos de feições, como níveis de terraços e morainas, depósitos de tálus e cristas rochosas (FRANCELINO et al., 2004).

A Península Byers possui a maior extensão de área livre de gelo da Antártica Marítima (FARIA, 2010). Localiza-se no setor ocidental da Ilha Livingston; possui 60 km² e elevação máxima de 150 m. A mesma é limitada a nordeste pela praia Ivanov, separada pelo Domo Rotch e pela crista Urvich a leste. A área deglaciada da Península Byers é caracterizada por numerosos vales erodidos por geleiras, frequentemente formando lagos, incluindo o Limnopolar (PABLO, 2024). Ademais, sua constituição e estrutura geológica condicionam em parte a topografia da península, com os principais relevos situados nos setores de rochas vulcânicas onde se localizam proeminentes cerros e pequenos promontórios que coincidem com afloramentos basálticos ou andesíticos (FARIA, 2010). Por fim, são identificados diversos canais e lagos, sendo os maiores lagos o Midge, o Limnolar e o Basalt (IVANOV, 2010).

Quadro 1. Área e códigos dos lagos estudados nas Penínsulas Fildes, Keller e Byers. Coordenadas UTM, datum horizontal WGS 84, Fuso 21, (penínsulas Fildes e Keller) e Fuso 20 (península Byers).

Localização	Código	Área do lago (ha)	Altitude Geométrica (m)	Coordenada do ponto central do lago (UTM)	
				Este (m)	Norte (m)
Península Fildes	1	9,57	29	400528	3103711
	2	9,32	38	397678	3102696
	3	4,14	36	398476	3101437
	4	3,71	69	397699	3101437
	5	3,07	63	398940	3105321
	6	3,00	88	398738	3105052
	7	2,72	42	397580	3103226
	8	2,58	108	400569	3104268
	9	1,95	141	396123	3099200
	10	1,39	63	397806	3100071
	11	1,17	84	398648	3106056

	12	1,15	144	395833	3099233
	13	1,11	83	399746	3105525
Península Keller	14	0,22	9	427204	3115465
	15	0,18	5	427233	3115723
Península Byers	1	4,48	75	597695	6945836
	2	3,63	0	594728	6949365
	3	3,48	0	595101	6947905
	4	3,14	71	597494	6946479
	5	2,58	0	594866	6950069
	6	2,56	0	595729	6946520
	7	2,44	68	598221	6945389
	8	1,61	49	603842	6947828
	9	1,37	51	604007	6947680
	10	1,31	57	597111	6947815

3. Materiais e Métodos

3.1. Dados

Para compor o banco de dados da pesquisa, foram usados diversos materiais de diferentes fontes (Quadro 2). Salienta-se que os dados SAR foram processados utilizando *Sentinel Application Platform* (SNAP) e, para a integração dos dados espaciais - vetoriais e raster - foi utilizado o ArcGIS.

Quadro 2. Apresentação dos dados utilizados e dos produtos que foram gerados na pesquisa.

Dados	Modo de aquisição e polarização	Período	Estrutura do dado	Resolução espacial (m)	Acurácia vertical relativa (m)	Fonte
Sentinel-1A banda C sensor SAR	IW (HH+HV)	2014-2023	Raster	10	-	ESA
DEM REMA 8	-	2018	Raster	8,8	0,6	PGC
Limite dos lagos	-	2023	Vetor	-	-	Petsch et al. (2018)
Limite dos lagos com NDWI	-	2023	Vetor	-	-	Petsch et al. (2022)

As imagens Sentinel-1A (S1) no modo IW são disponibilizadas a cada 12 dias e foram adquiridas para o período 2014–2023. As imagens são do nível de processamento 1 GRD (*Ground Range Detect*) e utilizam a banda C para realizar o levantamento de dados (ESA, 2022). O ângulo de incidência é de 29,1° a 46°. As imagens foram obtidas gratuitamente no *site* da Agência Espacial Europeia (ESA). Escolheram-se as imagens Sentinel no modo IW, pois as mesmas podem ser obtidas gratuitamente; ademais, por se tratar de um dado SAR, as mesmas podem ser utilizadas a despeito da cobertura de nuvens. Para a correção do terreno no processamento das imagens, foi utilizado o modelo digital de elevação REMA 8 (Modelo de Referência de Elevação da Antártica) com resolução espacial de 8 metros.

Para a delimitação do perímetro dos lagos da Península Keller e Fildes foram utilizadas duas técnicas complementares. Primeiramente, os lagos foram vetorizados utilizando uma imagem de radar Sentinel-1A datada de 25 de fevereiro de 2020. A escolha da data ocorreu, pois, segundo o Copernicus Climate Change Service (C3S), o mês de fevereiro de 2020 registrou temperaturas do ar mais elevadas, atípicas para a região. Sendo assim, a possibilidade de os lagos estudados estarem com áreas da superfície congelada seria praticamente nula. Classificou-se a imagem de acordo com o limiar de retroespalhamento, sendo o limiar inferior a -15 dB considerando água livre de gelo (VIEL et al., 2022).

Da mesma forma, utilizou-se o limite dos lagos disponibilizado no estudo realizado por Petsch et al. (2022). Os autores utilizaram uma imagem Landsat 8, sensor OLI com resolução espacial de 30 metros, e por meio do índice NDWI, realizaram o inventário e levantamento dos lagos da área de estudo. Utilizou-se essa abordagem para o inventário inicial dos lagos. Com o inventário inicial dos lagos, procedeu-se ao refinamento da identificação dos lagos e à posterior vetorização dos limites dos mesmos. Os vetores obtidos pelos dados SAR foram validados através de observações de campo, realizadas na Península Keller, no verão e no início do outono do ano de 2023.

3.2 Determinação dos coeficientes de retroespalhamento da superfície dos lagos na imagem Sentinel-1A

Realizou-se uma análise multitemporal do retroespalhamento e da dinâmica de congelamento e descongelamento da superfície dos lagos com áreas superiores a 1 hectare localizados nas Penínsulas Fildes, Keller e Byers. Cabe destacar que analisou-se, apenas para a Península Keller, devido à possibilidade da realização de campo, lagos com área superficial inferior a um hectare. A área mínima de 1 hectare considera a resolução espacial das imagens utilizadas conforme Viel et al. (2022). Dessa forma, analisaram-se 138 cenas de imagens Sentinel-1A, no modo IW, obtidas para os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro para o período de 2014 a 2023. Esse período foi escolhido, pois caracteriza o início do projeto Sentinel (2014) e abrange os meses de primavera, verão e início de outono.

O SAR utiliza ondas para detectar a presença de objetos e determinar a sua posição. Diferente da iluminação solar, que envolve o envio de radiações paralelas e contínuas de luz sobre uma superfície, o SAR envia séries descontínuas de pulsos de fótons de uma fonte pontual, que se espalha sobre o terreno como um feixe angular (LILLESAND et al., 2008). Considerou-se que o sinal retroespalhado pelo alvo é influenciado pelas características do pulso incidente (comprimento de onda, polarização), pela geometria do sistema radar em relação à superfície terrestre e pela geometria do pulso em relação ao alvo (LILLESAND et al., 2008). Diversos trabalhos estudaram o

comportamento do gelo utilizando imagens de radar, variando quanto à abordagem, tecnologia e regiões analisadas. Por exemplo, Duguay et al. (2012), Murfitt e Brown (2017) e Zhang e Pavelsky (2019) trazem diferentes contextos. Jeffries et al. (1994) utilizaram imagens SAR, banda C, para estudar a fenologia do gelo dos lagos na encosta norte do Alasca nos invernos de 1991 e 1992, identificando valores de retroespalhamento entre -16 dB e -22 dB para superfícies congeladas. Em comparação, Duguay et al. (2012) empregaram Radarsat, banda C e polarização HH, para monitorar o início do congelamento e o degelo em lagos subárticos canadenses, com validação de campo entre novembro de 1997 e maio de 1998. Surdu et al. (2015) analisaram a fenologia do gelo em 14 lagos na Planície Costeira do Alasca, usando Radarsat-2, banda C (2005-2011), validando com imagens ópticas MODIS.

Valores específicos de retroespalhamento também variam. Murfitt e Duguay (2020) relataram um valor de -21,72 dB para lagos congelados, e Hillebrand et al. (2019), para superfícies descongeladas, encontraram valores inferiores a -17 dB, com valores entre -14 e -17 dB quando até 60% da área está congelada. Tais diferenças reforçam que o retorno do radar depende da geometria do alvo e das condições ambientais, como o vento. Exemplificando a escolha de parâmetros do sensor, Husman et al. (2021) utilizaram Sentinel-1A nas polarizações VV e VH para o rio Athabasca devido à maior sensibilidade à rugosidade do vento em comparação à HH, que pode dificultar a distinção entre gelo e água (Long et al., 1996). Hillebrand et al. (2019) estudaram gelo marinho na PA usando Sentinel-1A em órbita descendente, enquanto Malenovsky et al. (2012) argumentam que ambas as órbitas devem ser consideradas para monitoramento, por redução de efeitos de *fore-shortening* e *layover* em regiões montanhosas. Da Rosa et al. (2020) encontraram valores de retroespalhamento superiores a -14 dB para a superfície congelada dos lagos.

Os coeficientes de retroespalhamento foram obtidos por meio do processamento de imagens SAR. As mesmas foram processadas no *software* SNAP (ESA, 2025) fornecido gratuitamente pela Agência Espacial Europeia. O referido *software* foi desenvolvido especificamente para o processamento das imagens disponibilizadas pelos satélites Sentinel (ESA, 2023). As imagens foram obtidas na Plataforma *Copernicus* da ESA, o nível de obtenção das mesmas é GRD (*Ground Range Detected*) e passaram por processamentos que incluem a aplicação da órbita, a calibração, o coregistro, a conversão dos valores de retroespalhamento para dB e aplicação do filtro Lee-sigma, janela 5 x 5 para a remoção do *speckle*. O co-registro e a correção do terreno (ortorretificação) converte os dados da geometria do terreno para σ° usando o MDE. Para a correção do terreno, utilizou-se o MDE REMA. Ademais, para a análise temporal dos valores de retroespalhamento, foi aplicada a etapa de normalização do ângulo de incidência conforme Eq. (1) (TOPOUZELIS, 2016; ZHOU e ZHENG, 2017; HILLEBRAND, et al. 2019). As etapas de processamento das imagens S1 - IW são ilustradas na Figura 2. Devido às características das imagens e da área de estudo, utilizou-se o ângulo de 37° como referência (Figura 2).

$$\sigma_{ref}^\circ = \frac{\sigma_\theta^\circ \cos^2(\theta_{ref})}{\cos^2(\theta)} \quad (\text{Equação 01})$$

Onde:

σ_{ref}° : Coeficiente de retroespalhamento normalizado;

θ : Ângulo incidente local;

σ_θ° : Coeficiente de retroespalhamento mensurado;

θ_{ref} : Ângulo de referência.

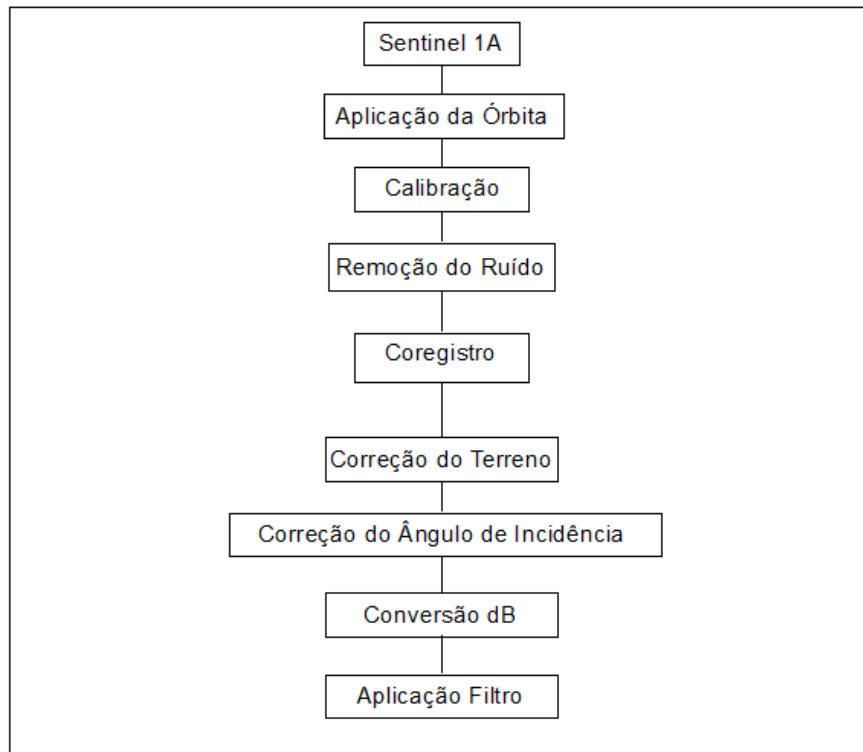


Figura 2. Fluxo de processamento das imagens S1-IW utilizadas para a definição dos coeficientes de retroespalhamento da superfície dos lagos.

3.3 Retroespalhamento e a sua relação com as variáveis climatológicas

Os valores de retroespalhamento foram extraídos por meio do centróide, gerado automaticamente, dos vetores dos lagos estudados. A dinâmica de congelamento e descongelamento dos lagos foi relacionada com as variáveis de precipitação (mm), direção do vento, velocidade do vento (km/h) e temperatura média ($^{\circ}\text{C}$, diária e mensal), temperaturas máximas e temperaturas mínimas do ar e número de dias com valores acima de 0°C . Para o cálculo da soma de dias com temperaturas positivas foram computados a quantidade de dias que registram temperaturas $> 0^{\circ}\text{C}$.

Para a elaboração da análise dos lagos, foram utilizados os dados da estação meteorológica Presidente Eduardo Frei Montalva ($62,19194^{\circ}$ sul, $58,98278^{\circ}$ oeste e altitude de 45 metros), de 1994 a 2023. A referida estação meteorológica está localizada na Península Fildes e fica a uma distância aproximada de 32 quilômetros da Península Keller e a 117 quilômetros da Península Byers. Utilizaram-se dados de uma única estação meteorológica para as três penínsulas, pois, de acordo com o estudo de Blitz et al. (2018), a série de temperatura média do ar da estação Bellinghausen, situada na mesma península que a estação Eduardo Frei, pode ser utilizada para complementar e avaliar a consistência das séries de dados obtidas na Ilha Livingston. A utilização de modelos de reanálise atmosférica poderá ser relevante em futuros estudos sobre a temática.

3.4 Análise estatística dos valores de retroespalhamento

Para a análise da distribuição dos dados obtidos para cada lago estudado, utilizou-se o teste de normalidade Shapiro-Wilk, para determinar a tendência de distribuição dos mesmos. Conforme Razali e Wah (2011), o poder dos testes de normalidade varia com o nível de significância e o tamanho da amostra. Para a realização das análises estatísticas, utilizou-se a plataforma *Google Colab*, a qual fornece um ambiente interativo de programação e colaboração em nuvem. Utilizaram-se *scripts* na linguagem *Python* para produzir os gráficos relacionados à análise temporal. Ademais, utilizou-se o *software* Past para análise e apresentação gráfica das médias de temperatura, precipitação, velocidade e direção do vento.

3.5 Retroespalhamento e a sua relação com declividade, hipsometria e distância da linha de costa

Por fim, desenvolveu-se a análise espacial das variáveis de declividade, hipsometria e distância da linha de costa, como informação complementar ao entendimento da fenologia do gelo dos lagos. Para tal, utilizaram-se técnicas de Geoprocessamento. A declividade foi gerada em porcentagem por meio da função *Slope* do software ArcGis. Para medir a distância da linha de costa, utilizou-se a função *Near* do software ArcGis, que apresenta como resposta os pontos mais próximos entre os vetores analisados, considerando uma linha reta, utilizando como base os vetores contendo o limite dos lagos e o vetor com a linha de costa. Para a análise da hipsometria e da declividade, utilizou-se o MDE REMA 8, com resolução espacial de 8,8 metros. A hipsometria foi gerada com equidistância de 20 metros, adequada para a acurácia vertical do MDE utilizado. Distribuíram-se os dados de hipsometria em 5 classes, 0 a 20 metros, 20 a 40 metros, 40 a 60 metros, 60 a 80 metros e, por fim, valores superiores a 80 metros. Os vetores dos lagos foram sobrepostos à camada de hipsometria e analisados por meio da respectiva classe na qual os mesmos estão inseridos. Já para a declividade, geraram-se 6 classes de amplitudes de 0 a 3%; 3 a 8%; 8 a 20%; 20 a 45%; 45 a 75%; e acima de 75%. Da mesma forma, os vetores dos lagos foram sobrepostos à camada de declividade e analisados por meio da classe na qual os mesmos estão inseridos. Na Figura 3 é possível observar o fluxograma completo do desenvolvimento do trabalho.

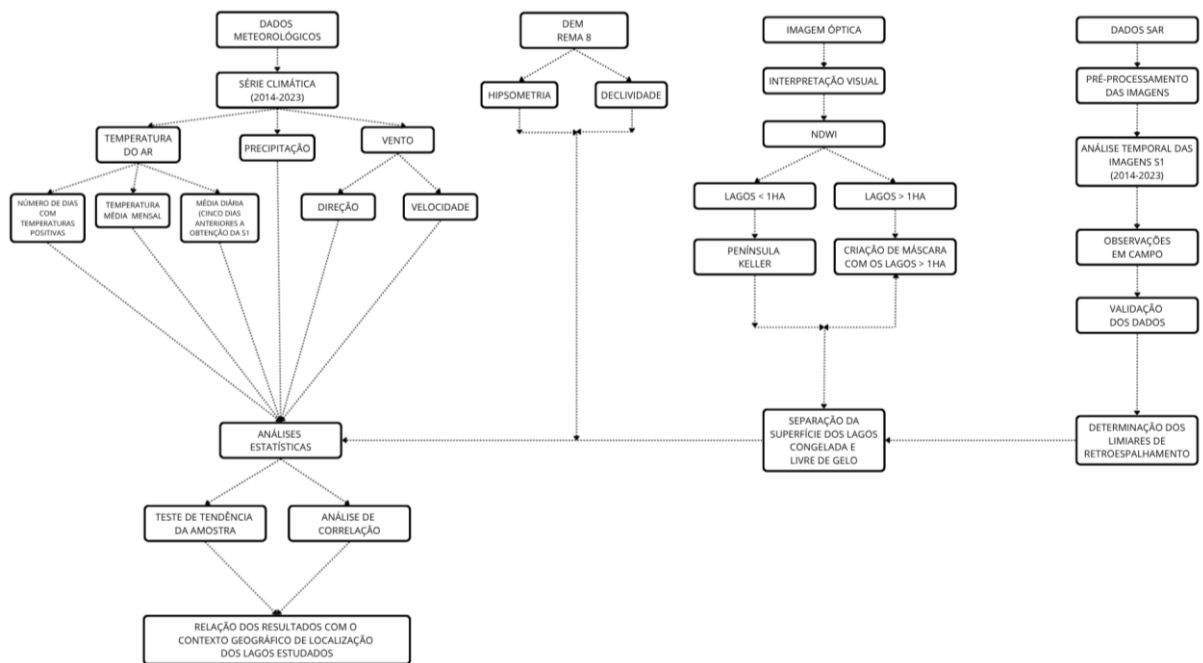


Figura 3. Fluxograma de obtenção e análise da fenologia do gelo dos lagos.

4. Resultados

4.1. Análise de validação para as datas de campo e dos valores mensais médios de retroespalhamento no período 2014-2023 para os lagos estudados nas penínsulas Fildes, Keller e Byers

A validação do limiar adotado considerou o trabalho de Da Rosa et al. (2020) e de Viel et al. (2022), que indicaram que o retroespalhamento mostrou-se um bom indicador de mudanças na fenologia do gelo dos lagos. Viel et al. (2022) demonstraram uma correspondência visual entre a cobertura de gelo flutuante e as áreas livres de gelo na superfície do lago nas imagens S1, nas fotografias e na imagem TSX ao analisar os lagos da Península Fildes em fevereiro de 2015. Seguindo as recomendações de Viel et al. (2022), também foram utilizadas observações de campo para a validação em um lago da Península Keller para o verão do ano de 2022/2023 (Tabela 1). Na Figura 4, pode-se observar imagens S1 obtidas em datas distintas, a primeira obtida no dia 21/02/2023, com a superfície do lago completamente descongelada. A segunda, datada no dia 07/10/2023, com a superfície do lago totalmente congelada.

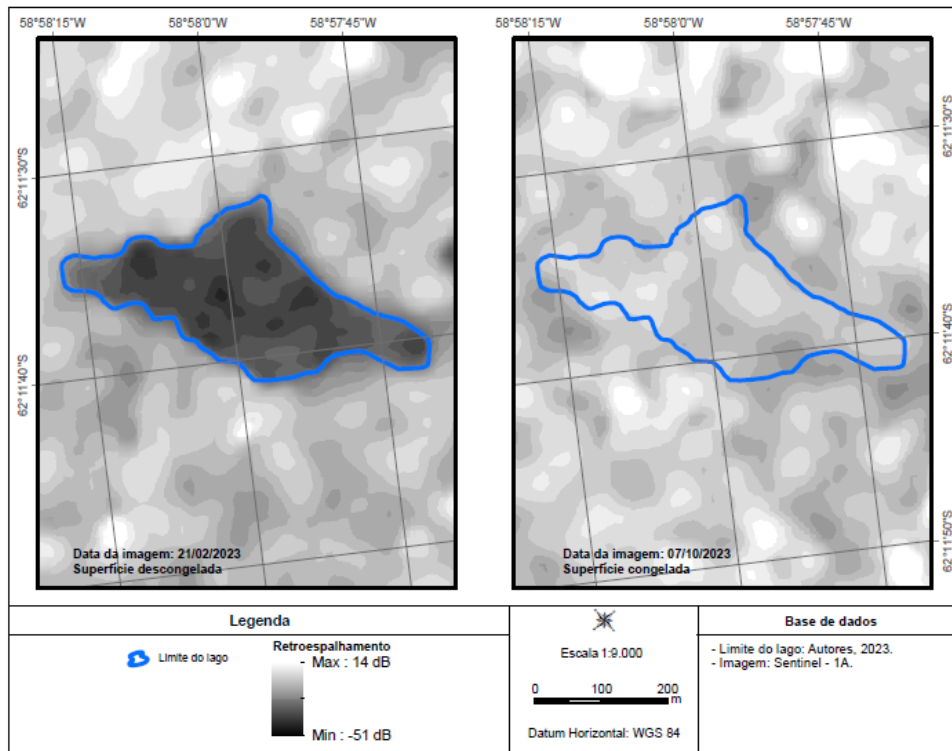

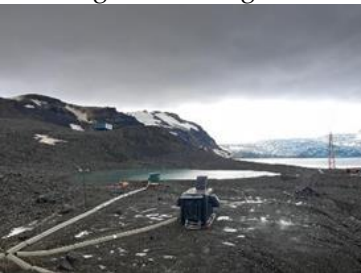


Figura 4. Ocorrência de área superficial livre de gelo dos lagos localizados na península Keller na data de 21/02/2023, interpretada a partir do limiar inferior a -15 dB para a água livre de gelo e da observação de campo.

Na Tabela 01, pode-se observar quatro fotografias obtidas em campo dos lagos da Península Keller. As quatro imagens foram obtidas no mesmo dia das imagens do satélite Sentinel A1. Nas fotografias obtidas em campo, é possível observar que os lagos estão completamente livres de gelo. Na imagem de radar, obtêm-se diferentes respostas (< -15 dB para a superfície do lago livre de gelo e > -14,9 dB para a superfície congelada do lago). A maioria dos lagos da Península Fildes (exceto o lago 11) tem valores de retroespalhamento maiores na primavera, diminuindo em direção ao início do verão (dezembro e janeiro) e ao final do verão (fevereiro e março). Os lagos voltados para a Baía Maxwell apresentaram comportamentos semelhantes, enquanto o lago 11, voltado para a Passagem de Drake, teve um comportamento distinto. Para os lagos (exceto os lagos 1, 4 e 7) da Península Byers, verifica-se que os valores são maiores na primavera e decrescem em direção ao início do verão (dezembro e janeiro) e ao final do verão (fevereiro e março).

A análise dos valores mensais médios de retroespalhamento no período 2014-2023 para os lagos demonstrou que o mês de janeiro apresentou, predominantemente, valores de retroespalhamento entre -24 dB e -15 dB (Figura 5), sendo os menores valores obtidos no ano de 2023 e os maiores, no ano de 2016. Da mesma forma, nota-se que os anos de 2015 e 2016 apresentaram uma maior amplitude dos valores de retroespalhamento e o ano de 2020 apresentou menor amplitude. Em relação ao comportamento dos valores médios do retroespalhamento para o mês de janeiro ao longo da série, verifica-se uma queda em 2020 e 2023 e os valores médios estão abaixo de -15 dB em todos os anos.

Tabela 1. Fotografias registradas em trabalho de campo nas mesmas datas da obtenção das imagens de radar.

Data da imagem	Fotografia	Condição da superfície	Valor de retroespalhamento (dB)
28/01/2023	<p>Água livre de gelo</p> 	Superfície do lago completamente livre de gelo	< -15 dB
09/02/2023	<p>Água livre de gelo</p> 	Superfície do lago completamente livre de gelo	< -15 dB
21/02/2023	<p>Água livre de gelo</p> 	Superfície do lago completamente livre de gelo	< -15 dB
28/04/2023	<p>Congelamento do lago</p> 	Superfície do lago com congelamento	> - 14,9 dB

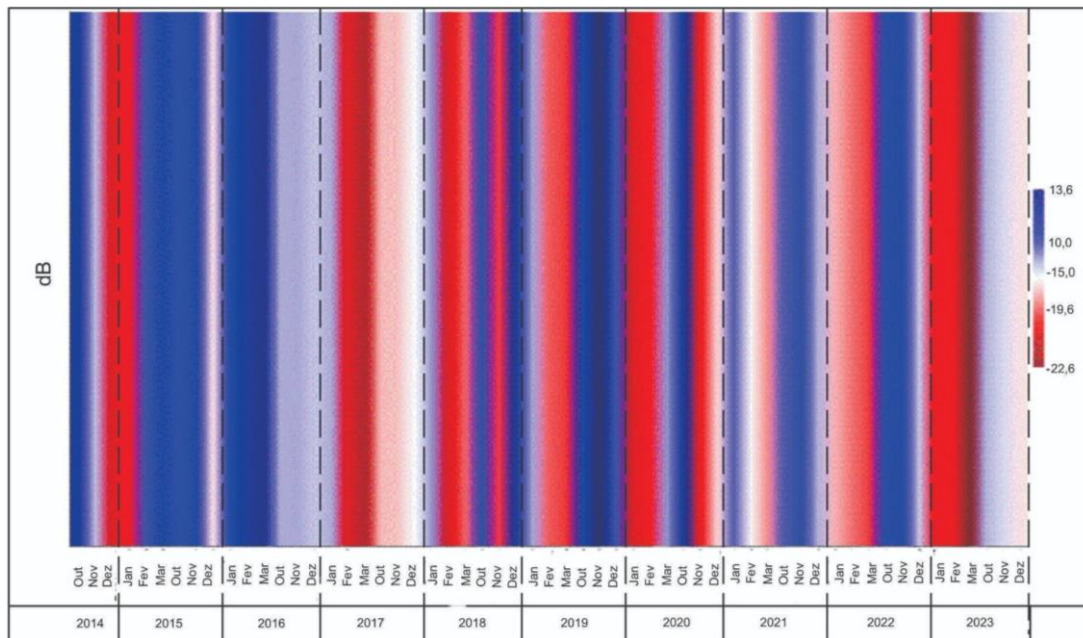


Figura 5. Variação nos valores médios de retroespalhamento agrupados por meses para os lagos no período 2014-2023. Os valores de retroespalhamento abaixo do limiar de -15 dB são considerados como águas livres de gelo (VIEL et al., 2022). Os menores valores foram obtidos no ano de 2023 e os maiores, no ano de 2016.

O mês de fevereiro apresentou valores de retroespalhamento entre -24 dB e -13 dB, sendo no ano de 2017 a maior amplitude. O mês de fevereiro apresentou os maiores valores de retroespalhamento em 2015 e 2016. O mês de março apresentou valores de retroespalhamento entre -26 dB e -9 dB (Figura 5), em que 2023 apresentou os menores valores e 2015 e 2016 os maiores valores e amplitudes. Para o mês de março, nota-se, também, a diminuição dos valores médios a partir de 2017.

Quanto ao mês de outubro, há valores de retroespalhamento que variam de -21 dB a -9 dB, sendo o ano 2017 o que apresentou os menores valores e 2014 os maiores valores de amplitude. Os valores médios aumentam até 2020, quando inicia um declínio nos valores.

O mês de novembro apresentou valores de retroespalhamento que variam entre -22 dB e -11 dB (Figura 5), sendo o ano de 2015 o que apresentou os menores valores. Destaca-se que os anos de 2015 e 2014 foram os anos que apresentaram a maior amplitude. O ano de 2019 apresentou, para o respectivo mês, um comportamento atípico, concentrando os valores de retroespalhamento entre -15 dB e -12 dB (Figura 5). No mês de dezembro, os valores de retroespalhamento que variam de -22 dB e -14 dB (Figura 5), sendo a maior amplitude no ano de 2022. Há uma alta variabilidade dos valores no mês ao longo dos anos, exceto no ano de 2018, o qual apresentou valores de retroespalhamento concentrados em -15 dB e com pouca variabilidade.

4.2. Análise da série climática e dos valores anuais de retroespalhamento no período 2014-2023 para os lagos estudados nas penínsulas Fildes, Keller e Byers

A temperatura média do ar apresentou uma tendência de aumento ($p = 0,0041$) a partir de 2014 até 2023 (Figura 6). A análise de tendência mostrou que não se encontra tendência no aumento da temperatura mínima apresentando ($p = 0,11$), porém, para a temperatura máxima, apresentou ($p = 0,0038$), sendo assim, registrando uma tendência de aumento estatisticamente significativa.

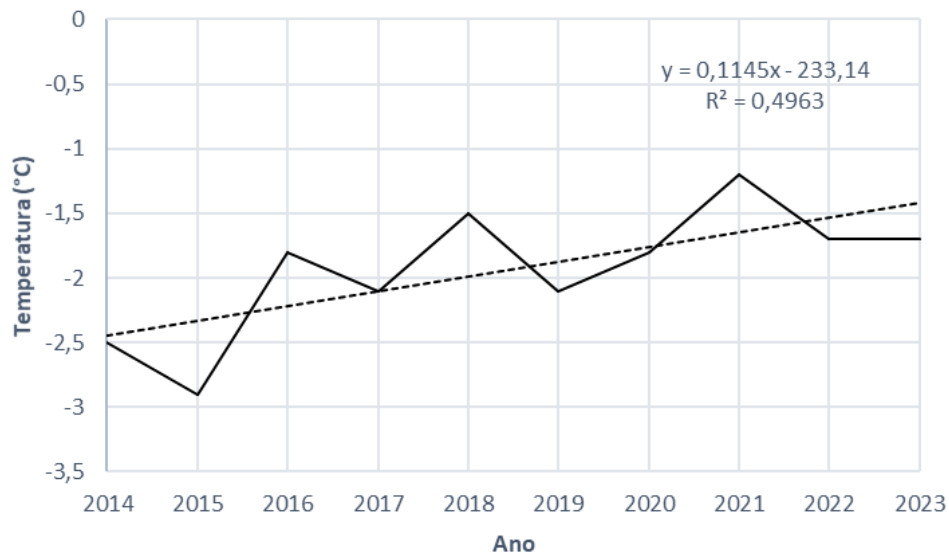


Figura 6. Valores da temperatura média do ar para o período 2014 - 2023.

Os meses de janeiro, fevereiro e março (2014-2023) possuem médias mais elevadas de temperaturas médias do ar, apresentando, na sua maioria, temperaturas positivas (Figura 7). De forma geral, quanto à média mensal da temperatura do ar, nota-se que os meses de outubro e novembro apresentam temperaturas mais amenas em relação aos meses de janeiro e fevereiro.

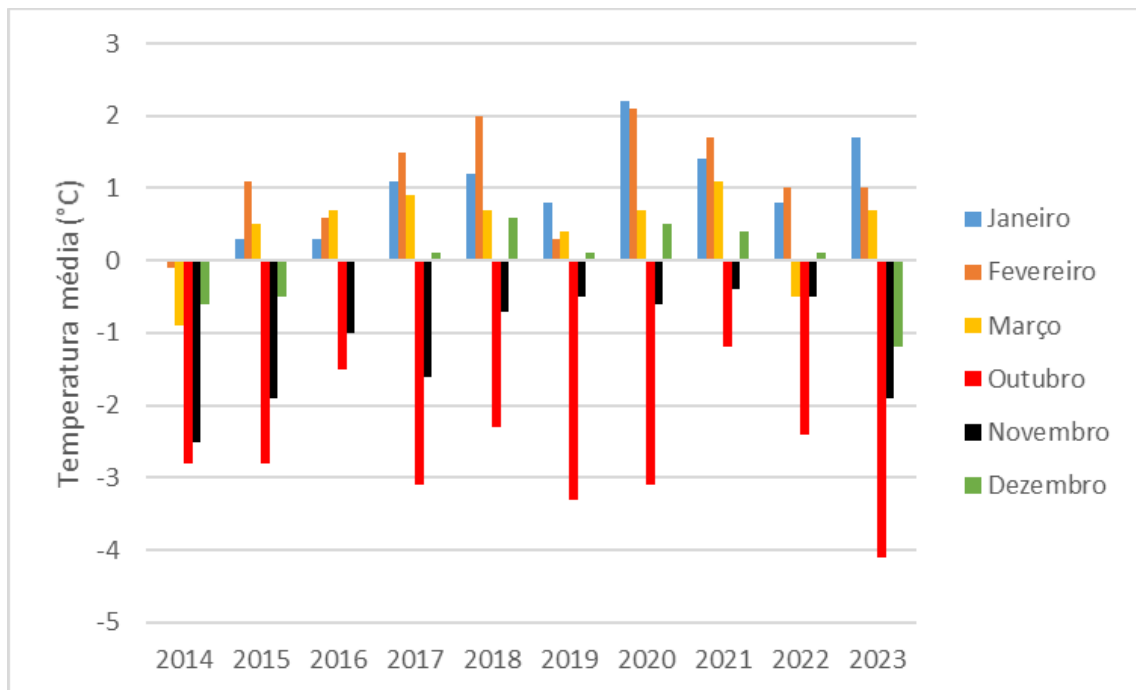


Figura 7. Temperatura média do ar nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro para o período entre 2014 e 2023.

Observa-se que a partir de 2018, a precipitação diminuiu, registrando os valores mais baixos do período (Figura 8). Ressalta-se que o mês de outubro de 2017 apresentou maior precipitação dentre os demais, registrando medições acima de 250 mm. Da mesma forma, identificou-se que para os anos de 2021, 2022 e 2023 ocorreu uma diminuição da precipitação.

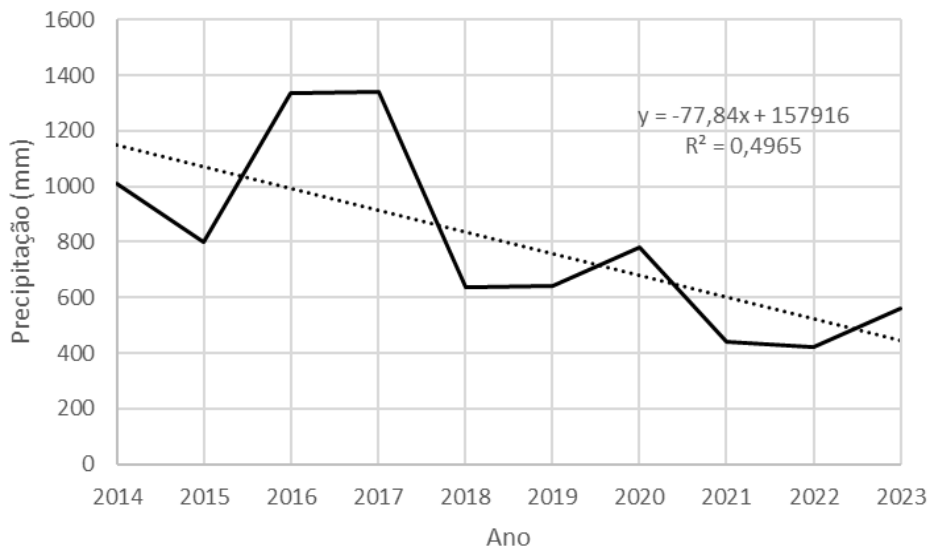


Figura 8. Distribuição anual da precipitação total entre 2014 e 2023.

A velocidade média anual do vento se mantém constante desde 2014, tendo um leve aumento nos anos de 2021 e 2022 (Figura 9). Dos registros da direção do vento, observa-se que a predominante é a oeste. Analisando a distribuição da velocidade do vento por mês, no período entre 2014 e 2023, identifica-se que a velocidade do vento se manteve praticamente estável, com média de 17,22 km/h, raramente ficando abaixo de 10 km/h.

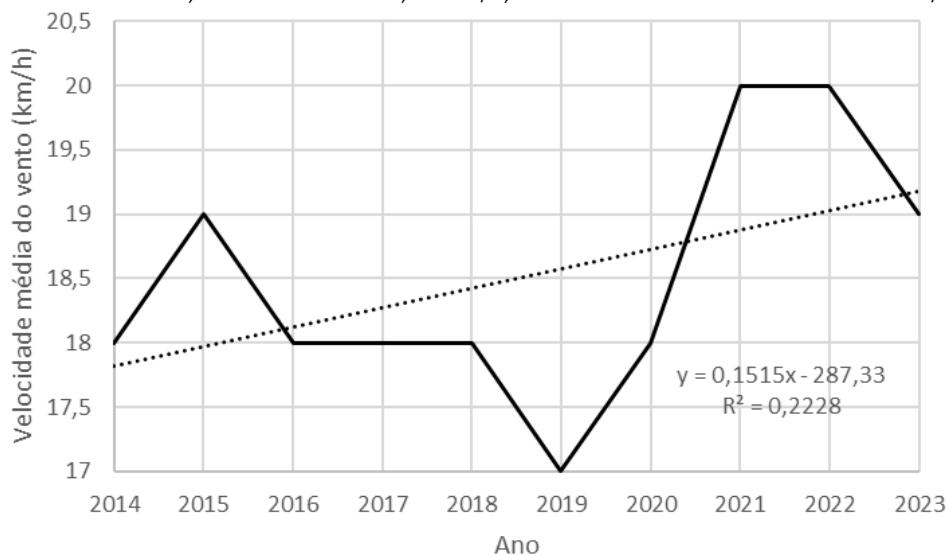


Figura 9. Distribuição anual da velocidade do vento do período 2014-2023.

4.3. Relação entre retroespalhamento, vento, temperatura média do ar e dias com temperatura positiva (STP) no verão do período 2017-2023

Em 2017, os lagos analisados das Penínsulas Fildes e Keller mostraram valores de retroespalhamento maiores em dezembro, coincidindo com a diminuição da velocidade do vento. Para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2017, observa-se, para as três penínsulas estudadas, que os valores de retroespalhamento respondem às condições sinóticas, diminuindo os valores de retroespalhamento, exceto na Península Keller, com o aumento da temperatura do ar.

Em relação a 2018, observa-se, para as Penínsulas Fildes, Keller e Byers, que os valores de retroespalhamento aumentam no início da série, refletindo uma ligeira queda da temperatura média do ar. Após outubro, os valores de retroespalhamento diminuem, refletindo o aumento de temperatura e o número de dias com temperaturas positivas, condição que perdura nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2019.

O mês de novembro de 2019 mostra uma diminuição dos valores de retroespalhamento, refletindo o aumento da temperatura. A partir de meados de dezembro, ocorre um aumento na temperatura média do ar, fazendo com que os valores de retroespalhamento diminuam para as três penínsulas. Cabe destacar, que para os meses de

janeiro, fevereiro até os primeiros 15 dias de março de 2020, a temperatura média do ar permaneceu positiva (Figura 10).

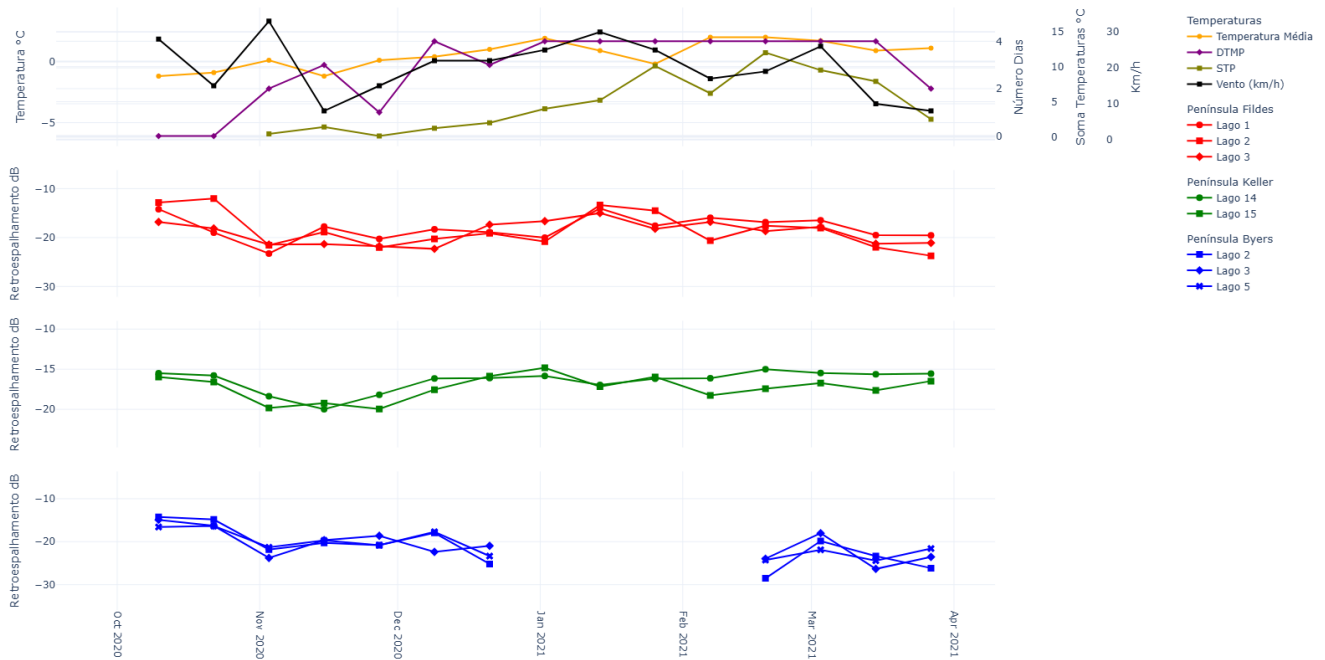


Figura 10. Relação entre os valores de retroespalhamento, temperatura média do ar, somatório dos dias com temperatura positiva (STP) e do número de dias com temperatura positiva (DTMP) (considerando os 5 dias antes da obtenção da imagem) e vento (diário) dos lagos localizados nas penínsulas Keller, Byers e Fildes. a) características dos meses de outubro, novembro e dezembro do ano de 2019 e de janeiro, fevereiro e março de 2020 (período com dados de campo na Península Fildes).

Para os meses de outubro e novembro de 2021, ocorreu uma diminuição dos valores de retroespalhamento, refletindo o aumento da temperatura média do ar, com um ligeiro aumento dos valores de retroespalhamento e diminuição da temperatura média do ar em dezembro. Da mesma forma, os valores do retroespalhamento começam a diminuir no final de dezembro e se mantêm baixos até o final do verão de 2022, refletindo o aumento da temperatura. Para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2021, ocorreu uma diminuição dos valores de retroespalhamento acompanhando a diminuição da temperatura média do ar. A partir de outubro de 2022, os valores de retroespalhamento baixam e permanecem baixos até o final do verão de 2023, refletindo o aumento da temperatura média do ar. E nas fotografias obtidas em campo em 2023 é possível observar que os lagos estão completamente livres de gelo e os valores para essa classe. Os valores aumentam apenas no início do outono. Para esses meses, considerando o ponto central, foram entre -16,87 dB e -19,34 dB, e apresentam-se baixos em outubro, novembro e dezembro de 2023.

4.5 Características hipsométricas, distância da costa e declividade dos lagos

Os lagos 14 e 15, localizados na Península Keller, possuem altitudes entre 0 e 20 m, além de estarem próximos à costa. Sendo que os lagos 14 e 15 estão localizados a 139 m e 138 m da costa, respectivamente. Os lagos estudados na Península Fildes, especificamente os lagos 1, 2, 3, estão localizados entre 20 e 40 m de altitude; por outro lado, os lagos 4, 5, 7, 10 enquadram-se entre 40 e 60 m. Por fim, os lagos 6, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 encontram-se localizados a uma altitude entre 60 e 140 m (Figura 11).

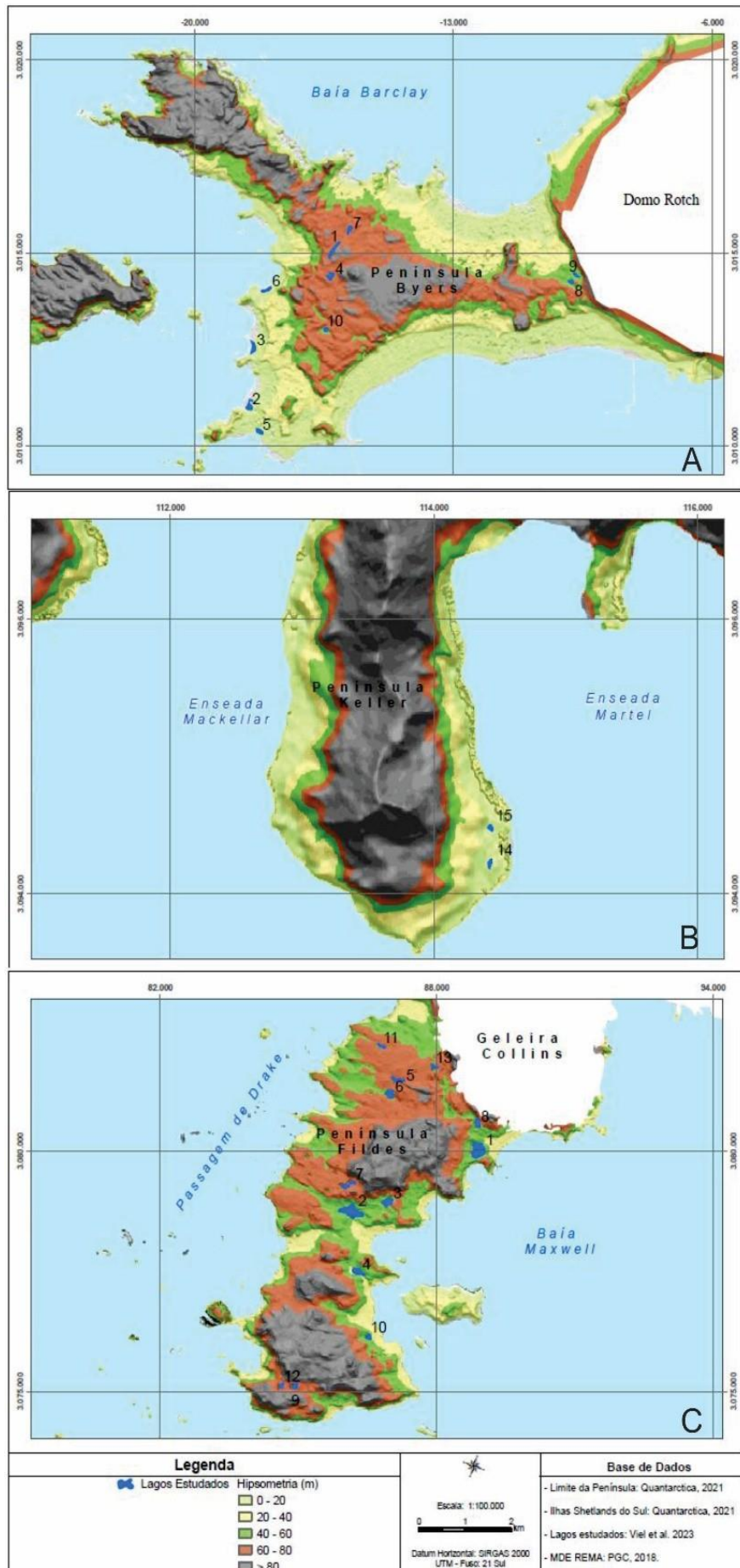


Figura 11. Altitudes dos lagos estudados nas Penínsulas Fildes, Keller e Byers.

Em relação à distância da costa, ressalta-se que o Lago 11, distinto dos demais, apresentou distância de 503 m da costa e está voltado para a Passagem de Drake. Os lagos 1, 2, 3, 4, 8 e 10, por sua vez, voltam-se para a Baía de Maxwell. Os lagos estudados na Península Byers estão inseridos em um contexto de elevação entre 0 e 80 m. Sendo assim, os lagos 1, 4 e 7 estão inseridos em uma classe de elevação entre 60 e 80 m e os lagos 8, 9 e 10 estão localizados em uma elevação entre 40 e 60 m. Por fim, os lagos 2, 3, 5 e 6 encontram-se distribuídos em uma altitude entre 0 e 20 m.

Quando se analisa a distância da linha de costa em relação aos lagos, observa-se que os lagos 1, 4 e 7 estão localizados a uma distância da costa de 1272 m, 1.200 m e 1.178 m, respectivamente (Figura 11). Ademais, a declividade em que os lagos estão inseridos foi analisada, e a partir disto não foram encontradas significativas distinções envolvendo a localização dos mesmos. Observa-se que os lagos estudados nas três penínsulas estão inseridos em um contexto de baixa declividade. Sendo os mesmos localizados em declividades entre 0 e 20%.

5. Discussões

Os valores de retroespalhamento refletem também as mudanças em variáveis não climáticas, como as variáveis morfométricas dos lagos (profundidade, área, volume) e elevação (SURDU et al., 2015; LUND et al., 2022). Os resultados mostram que a variação no comportamento dos lagos quanto aos valores de retroespalhamento e à presença da superfície congelada é influenciada por fatores geográficos, como altitude e proximidade da costa, além da exposição aos ventos úmidos, especialmente no caso dos lagos da Península Byers. Adicionalmente, dentre os lagos estudados nesta península, destacam-se os lagos 1, 4 e 7 por apresentarem valores de retroespalhamento com comportamento diverso dos demais. Assim, esses mesmos lagos dispõem de proteção contra a influência do vento, apesar de contextos ambientais diferentes, sendo que os lagos 1 e 4 voltam-se para a Baía de Osogovo e o lago 7 para a Baía Barclay. Conforme Sobiech e Dierking (2013), em ambientes costeiros ou montanhosos, as condições do vento mudam em escalas locais segundo as condições altimétricas do entorno. Mais especificamente, os lagos 2, 3, 5 e 6, próximos à costa da Baía de Osogovo, também se encontram abrigados do vento; já os lagos 10 e 11, próximos ao Domo Rotch, estão sob possível influência da recarga de água e sedimento proveniente deste domo. Por fim, variáveis como o calor específico fazem com que a temperatura da água não mude na mesma proporção que o ambiente. Ainda, grandes lagos possuem maior área superficial e, portanto, são mais afetados pela ação do vento, que provoca ondas e facilita a quebra do gelo.

A partir desse contexto, é possível explicar as distinções, dentre outros fatores, utilizando os valores de hipsometria na área em que os lagos estão localizados. Consequentemente, ambientes costeiros ou montanhosos podem alterar variáveis como umidade no solo, velocidade do vento e exposição solar, modificando constantemente a geometria dos alvos (SOBIECH e DIERKING, 2013).

Da mesma forma, para os lagos da Península Fildes, destaca-se que o lago 11 apresenta valores de retroespalhamento elevados no período estudado e representa o único lago voltado para a Passagem de Drake, com maior influência do vento. Em contraste, os lagos 1, 2, 3, 4, 8 e 10, ao estarem voltados para a Baía Maxwell, estão mais protegidos da influência do vento. Em relação à diferença entre os lagos, constata-se que os lagos 14 e 15, localizados na Península Keller e voltados para a Enseada Martel, apresentam valores de retroespalhamento semelhantes devido ao contexto ambiental de maior proteção contra o vento, diferenciando-se de outros lagos menos protegidos. Adicionalmente, o lago 8 é influenciado pela proximidade da Geleira Collins, ao contrário dos demais. Esse fator está relacionado com a maior entrada de água de degelo sazonal da geleira que promove uma movimentação da água, uma mistura das camadas d'água e o derretimento superficial, o que pode resultar em uma diminuição dos valores de retroespalhamento, conforme Surdu et al. (2015).

De forma geral, foi verificada uma diminuição dos valores de retroespalhamento da primavera até o final do verão (dezembro a março) em todos os lagos, refletindo o ciclo de descongelamento de outubro a abril. conforme Surdu et al. (2015) destacam a queda dos valores de retroespalhamento com o aumento do descongelamento dos lagos. Esse ciclo está atrelado às variações ambientais diárias, incluindo aumento de radiação solar, albedo e temperatura média do ar. Ressalta-se que outubro apresentou as médias de temperatura mais baixas, predominantemente negativas, enquanto de janeiro a março as médias foram geralmente positivas.

Ao analisar os dados anuais, nota-se que 2015 e 2019 foram os anos com maior ocorrência de congelamento da superfície dos lagos, incluindo períodos de congelamento nos meses de verão. Em comparação, de 2020 até

2023, ocorreu um aumento sucessivo da temperatura média do ar, evidenciando maior derretimento para a primavera.

No que diz respeito à ocorrência de descongelamento na primavera, 2017 e 2023 se destacam em relação aos demais anos. Em 2017, os lagos estavam livres de gelo já no início da primavera, e os meses de fevereiro e março deste ano também se apresentaram livres de gelo. Tal comportamento pode estar relacionado ao SAM positivo (SURYAWANSHI et al., 2023), além de refletir as anomalias de 2016. Da mesma forma, o ano de 2023 evidência destaque em relação ao derretimento em fevereiro, março e na primavera. Os valores de retroespalhamento dos lagos estudados refletem, assim como ocorre com o gelo marinho na região, as mudanças observadas em janeiro e fevereiro de 2023, período marcado por declínio abrupto do gelo marinho da Antártica (SURYAWANSHI et al., 2023).

Dessa forma, os anos de 2015 e 2019 apresentaram menor descongelamento, enquanto o ano de 2023 apresentou um recorde com a menor extensão da ocorrência (99,15%) da cobertura congelada dos lagos. Observou-se que a temperatura média do ar é o principal fator na variação da cobertura de gelo, com redução no número de dias congelados em anos com maior ocorrência de temperaturas positivas, especialmente durante eventos El Niño. Por fim, modos de oscilações climáticas como SAM e ENOS podem alterar as características do ciclo de derretimento da superfície dos lagos (VIEL, 2024).

Além disso, os meses de janeiro e fevereiro apresentaram valores médios de retroespalhamento que indicam a ocorrência geral de lagos com superfície livre de gelo, exceto em janeiro de 2023. Já o mês de dezembro é caracterizado por maior variação na condição superficial dos lagos ao longo dos anos, excetuando 2018. Particularmente, o ano de maior variação em dezembro foi 2022.

Quanto ao mês de outubro, verificam-se valores de retroespalhamento que demonstram tanto características de congelamento quanto de gelo livre, dependendo do ano, sendo 2017 o que apresentou os menores valores e 2014 os maiores e de maior amplitude. Os valores médios aumentam até 2020, quando então inicia um declínio. Esse comportamento está relacionado ao ano de 2019, o qual, para o respectivo mês, apresentou comportamento atípico na primavera e no início do verão, concentrando os valores de retroespalhamento entre -15 dB e -12 dB. Destaca-se que, nesse ano, foram evidenciados lagos congelados em dezembro na Península Fildes.

A partir de 2020, a mudança observada na primavera se estende ao verão: janeiro apresentou a menor amplitude dos valores de retroespalhamento, caracterizando uma superfície livre de gelo. Analisando-se o somatório das temperaturas positivas, nota-se que janeiro e fevereiro de 2020 registraram os maiores valores. Esse comportamento no período 2014-2023 vai ao encontro de Turner et al. (2021), que verificaram aumentos significativos de dias quentes, assim como o recorde de temperatura positiva na região da PA no verão de 2020, de 18,4 °C.

Nota-se uma diminuição dos valores de retroespalhamento médio em março a partir de 2017, acompanhando a tendência de aumento da temperatura do ar mínima e média na região, o que favorece o derretimento da superfície dos lagos. Vieira et al. (2024) também registraram esse aumento de temperaturas na Estação Esperança, com mais dias acima de 0 °C. Hass (2023) aponta que derretimentos intensos podem resultar de temperaturas anormalmente altas a oeste e a leste da PA, cerca de 1,5 °C acima da média. O SAM, fortemente positivo, influencia a circulação dos ventos.

Os ciclos de congelamento e descongelamento dos lagos estudados são importantes indicadores climáticos devido à sua localização em altas latitudes, assim como destaca Surdu et al. (2015). Estudos da fenologia do gelo destacam como esses ciclos respondem diretamente às variações na temperatura do ar, sendo úteis para identificar mudanças climáticas regionais (ZHANG & PAVELSKY, 2019).

6. Conclusões

Os valores de retroespalhamento dos lagos é variável e depende do comportamento ambiental dos dias que antecederam a obtenção da imagem, verifica-se que além de responderem às variações de temperatura, os valores de retroespalhamento são influenciados, também, por fatores ambientais externos. A influência de fatores como a quantidade de umidade no entorno dos lagos, a velocidade do vento e a profundidade dos lagos pode ser avaliada em futuros estudos, a fim de aprofundar a análise e refinar a interpretação dos mecanismos que controlam as respostas observadas. Sendo assim, é difícil encontrar um padrão de comportamento, o que se observa, mesmo em um pequeno período de tempo, é uma tendência de aumento de temperatura média do ar refletida nos valores de retroespalhamento e, conseqüentemente, no comportamento da fenologia dos lagos.

Os resultados apontam que os valores de retroespalhamento dos lagos respondem às variações de temperatura do ar. De forma geral, o descongelamento dos lagos inicia-se em outubro, e a superfície congela novamente em abril. Assim, considera-se que as Ilhas Shetland do Sul são sensíveis a pequenas variações de temperatura, fazendo com que o ciclo de derretimento e congelamento da superfície dos lagos seja um importante indicador dessas flutuações na região.

A partir da identificação do limiar de retroespalhamento e considerando a sua variação no tempo, conclui-se que as imagens S1 são aplicáveis para detectar e continuar a monitorar as mudanças na cobertura de gelo em lagos de alta latitude. A utilização dessas imagens SAR também é relevante para o ambiente antártico, pois é difícil haver coleta de dados de campo e a cobertura frequente de nuvens limita o uso de sensores ópticos.

Ademais, recomenda-se a continuidade dos estudos para a determinação e entendimento dos valores de retroespalhamento no outono e no inverno, que não foram incluídos neste estudo, pois o ciclo de descongelamento é melhor representado na primavera e no verão. Como tal, este estudo representa um esforço inicial para contribuir para o monitoramento da fenologia do gelo dos lagos antárticos, diante do pequeno número de artigos publicados sobre o tema. Além disso, a compreensão da fenologia dos lagos localizados em altas latitudes contribui para o avanço de outras questões, como os processos ecológicos sobre a presença de gelo e sua decomposição e o balanço de carbono. Sendo assim, sugere-se a realização de testes utilizando os valores de retroespalhamento com limiares flexíveis para classificação automática de alvos.

Por fim, a carência de dados meteorológicos disponíveis para cada península estudada, foi uma limitação para a realização do trabalho. Ademais, o retroespalhamento pode ser um bom indicador de mudanças das características físicas dos alvos, porém demonstra-se limitado quando pretende-se realizar uma análise quantitativa das áreas dos lagos estudados. Contudo, os dados obtidos *in situ* sobre a fenologia dos lagos da Península Keller, desde do verão de 2023 até o início de outono de 2023, permitiu a confirmação dos resultados e a comparação com os valores de retroespalhamento obtidos por meio das imagens de radar S1.

Contribuições dos Autores: J.A.V.: Concepção, Metodologia, Investigação, Redação –versão inicial, revisão e edição. K.K.R.: Concepção, Metodologia, Investigação, Supervisão, Redação –versão inicial, revisão e edição. C.P.: Metodologia, Investigação, Curadoria de Dados, Redação –revisão e edição. L.F.V.: Metodologia, Curadoria de Dados, Redação –revisão e edição. D.D.A.S.: Investigação, Redação –revisão e edição. F.A.: Investigação, Redação –revisão e edição. R.V.: Metodologia, Redação –revisão e edição, Visualização.

Agradecimentos: À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, bem como ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALFONSO, J. et al. Geochemistry of recent lacustrine sediments from Fildes Peninsula, King George Island, Maritime Antarctica. *Antarctic Science*, v. 27, n. 5, p. 462–471, 2015.
2. ANDRADE, A. M. Variabilidade na camada ativa do solo na Meseta Norte e na superfície da Península Fildes, Ilha Rei George, Antártica Marítima. 2017. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
3. BLITZ, R.; NAVARRO, F. J.; OTERO, J. LAPAZARAN, J.; GONZALEZ, S. Effects of recent cooling in the Antarctic Peninsula on snow density and surface mass balance. *Polish Polar Research*, v. 39, p. 457–480, 2018.
4. C3S. Copernicus Climate Change Service. 2020 warmest year on record for Europe; globally, 2020 ties with 2016 for warmest year recorded, 2021.
5. CARRIVICK, J.; HECKMANN, T. Short-term geomorphological evolution of proglacial systems. *Geomorphology*, v. 287, p. 1–13, 2017.
6. CURL, J. E. A glacial history of the South Shetland Islands, Antarctica. Columbus: Ohio State University, 1980. p. 146.
7. DA ROSA, N. C.; BREMER, U. F.; FILHO, W. P.; SOUSA JÚNIOR, M. A.; KRAMER, G.; HILLEBRAND, L. F.; JESUS, J. B. DE. Freezing and thawing of lakes on the Nelson and King George Islands, Antarctic, using Sentinel 1A synthetic aperture radar images. *Environ Monit Assess*, v. 192, 559, 2020. DOI: /10.1007/s10661-020-08526-5.
8. DIRSCHERL, M.; DIETZ, A. J.; KNEISEL, C.; KUENZER, C. A. Novel method for automated supraglacial lake mapping in Antarctica using Sentinel-1 SAR imagery and deep learning. *Remote Sensing*, v. 13, 197, 2021. DOI: /10.3390/rs13020197.

9. DUGUAY, C.; BROWN, L.; KANG, K.-K.; KHEYROLLAH POUR, H. The Arctic lake ice, in "State of the Climate in 2011". *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, p. S152-S154, 2012.
10. ESA. The European Space Agency. TerraSAR-X ESA archive. 22 abr. 2022. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/catalog/terrasar-x-esa-archive>. Acesso em: 24 set. 2022.
11. ESA. The European Space Agency. Imagens Sentinel. Disponível em: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Acesso em: 20 dez. 2023.
12. ESA. The European Space Agency. Sentinel Application Platform (SNAP) – ESA Sentinel Scientific Toolbox: version 9.0.0. Disponível em: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>. Acesso em: 6 nov. 2025.
13. FARIA, A. L. L. DE. Solos, geomorfologia e relações ecológicas na parte sudoeste da Península de Byers, Ilha Livingston, Antártica Marítima. 2010. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.
14. FRANCELINO, M.R. Geofomas da Península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental. In: SCHAEFER, C.E.G.R.(Ed.); FRANCELINO, M.R.; SIMAS, F.N.; ALBUQUERQUE FILHO, M.R. Ecossistemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima, Viçosa, NEPUT, 2004. p.15- 25.
15. GALVÃO, J. C. de M., et al. Analysis of shallow lake sediments in the Fildes Peninsula, King George Island, Maritime Antarctica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21, p. 217 - 234, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i2.1738.
16. HILLEBRAND, L. F.; DA ROSA, C. N.; COSTI, J.; BREMER, U. F. Mapeamento do gelo marinho na Península Antártica com imagens Sentinel-1A. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 42, p. 59-71, 2019. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_59_71.
17. IVANOV, L. L. Antarctica: Livingston Island and Greenwich, Robert, Snow and Smith Islands. Scale 1:120000 topographic map. Troyan: Manfred Wörner Foundation, 2010.
18. JEFFRIES, M. O.; MORRIS, K.; WEEKS, W. F.; WAKABAYASHI, H. Structural and stratigraphic features and ERS-1 synthetic aperture radar backscatter characteristics of ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-1992. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 22459-22471, 1994. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/94jc01479>.
19. JONES, J. M. Assessing recent trends in high-latitude southern hemisphere surface climate. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 917–926, 2016.
20. MENDES JUNIOR, C. W.; DANI, N.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; JÚNIOR, E. S. F.; ERWES, H. J. B. Análise morfométrica da Península Keller, Antártica, através do SIG. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 62/04, p. 1–12, 2010.
21. KROPÁČEK, J.; MAUSSION, F.; CHEN, F.; HOERZ, S.; HOCHSCHILD, V. Analysis of ice phenology of lakes on the Tibetan Plateau from MODIS data. *Cryosphere*, v. 7, p. 287–301, 2013. DOI: 10.5194/tc-7-287-2013.
22. LILLESAND, T. E.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. *New York: John Wiley & Sons*, 7ª ed., 750 p., 2008.
23. LONG, D. G.; COLLYER, R. S.; ARNOLD, D. V. Dependence of the normalized radar cross section of water waves on Bragg wavelength–wind speed sensitivity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 34, p. 656–666, 1996. DOI: 10.1109/36.499745.
24. LUND, J.; FORSTER, R.; DEEB, E. J.; LISTON, G. E.; SKILES, M.; MARSHALL, H. P. Interpreting Sentinel-1 SAR Backscatter Signals of Snowpack Surface Melt/Freeze, Warming, and Ripening, through Field Measurements and Physically-Based SnowModel. *Remote Sensing*, v. 14, p. 1 - 28, 2022. DOI: 10.3390/rs14164002.
25. MATSUOKA, K.; SKOGLUND, A.; ROTH, G.; POMEREU, J.; GRIFFITHS, H.; HEADLAND, R.; HERRIED, B.; KATSUMATA, K.; BROCCO, A. L.; LICHT, K.; MORGAN, F.; NEFF, P. D.; RITZ, C.; SCHEINERTL, M.; TAMURA, T.; PUTTE, A. V. de; BROEKE, M. V. de; DESCHWANDEN, A. V.; DESCHAMPS-BERGER, C.; LIEFFERINGE, B. V.; TRONSTAD, S.; MELVÆR, Y. Quantarctica, an integrated mapping environment for Antarctica, the Southern Ocean, and sub-Antarctic islands. *Environmental Modelling and Software*, v. 140, p. 1- 14, 2021. DOI: 10.21334/NPOLAR.2018.8516E961.
26. MARSHALL, S. J. Regime shifts in glacier and ice sheet response to climate change: examples from the Northern Hemisphere. *Frontiers in Climate*, v. 3, 2021.
27. MURFITT, J.; BROWN, L. C. Lake ice and temperature trends for Ontario and Manitoba: 2001 to 2014. *Hydrological Processes*, v. 31, p. 3596-3609, 2017. DOI: 10.1002/hyp.11295.
28. MURFITT, J.; DUGUAY, C. R. Assessing the performance of methods for monitoring ice phenology of the world's largest high Arctic lake using high-density time series analysis of Sentinel-1 data. *Remote Sensing*, v. 12, p. 1-25, 2020. DOI: 10.3390/rs12030382.
29. O'REILLY, C. M. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letters*, v. 42, p. 1-9, 2015. DOI: 10.1002/2015GL066235.

30. PABLO, M. A. de. Timelapse images datasets (2017–2022) from Livingston and Deception Islands, Antarctica, to study snow cover and weather conditions at the PERMATHERMAL monitoring network. *Data in Brief*, v. 52, p. 1 - 14, 2024. DOI: /10.1016/j.dib.2023.109970.
31. PETSCH, C.; ROSA, K. K. DA.; OLIVEIRA, M. A. DE.; VELHO, L. F.; SILVA, S. L. C. S.; SOTILLE, M. E.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. An inventory of glacial lakes in the South Shetland Islands (Antarctica): temporal variation and environmental patterns. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, p. 1–26, 2022.
32. PETSCH, C.; COSTA, R. M.; SIMÕES, J. C.; SOTILLE, M. E.; ROSA, K. K. DA. Cambios climáticos y aumento de la vegetación en la Península Fildes, Antártica. *Investigaciones Geográficas*, v. 57, p. 18-31, 2018. DOI: 10.5354/0719-5370.2019.52147.
33. PETSCH, C.; COSTA, R. M.; ROSA, K. K. DA.; VIEIRA, R.; BRAUN, M. H.; SIMÕES, J. C. Desenvolvimento hidrológico e fenologia de lagos da Península Fildes – Antártica. *Geociências*, v. 39, n. 2, p. 145–162, 2020. DOI: 10.5016/gv39i2.14453.
34. RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2011.
35. ROSA, C. N.; BREMER, U. F.; FILHO, W. P.; JUNIOR, M. A. S.; KRAMER, G.; HILLEBRAND, F. L.; JESUS, J. B. Freezing and thawing of lakes on the Nelson and King George Islands, Antarctica, using Sentinel-1A synthetic aperture radar images. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, p. 559, 2020.
36. SHUGAR, D. H.; BURR, A.; HARITASHYA, U. K.; KARGEL, J. S.; WATSON, S. C.; KENNEDY, M. C.; BEVINGTON, A. R.; BETTS, R. A.; HARRISON, S.; STRATTMAN, K. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change*, v. 10, P. 939–945, 2020.
37. SURDU, C. M.; DUGUAY, C. R.; POUR, H. K.; BROWN, L. C. Ice freeze-up and break-up detection of shallow lakes in Northern Alaska with spaceborne SAR. *Remote Sens.* 7, 6133–6159. 2015.
38. SURYAWANSHI, K.; JENA, B.; BAJISH, C. C.; ANILKUMAR, N. Recent Decline in Antarctic Sea Ice Cover From 2016 to 2022: Insights From Satellite Observations, Argo Floats, and Model Reanalysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 75, p. 193 – 212, 2023. DOI:/10.16993/tellusa.3222.
39. SIMÕES, J.C.; DANI, N.; BREMER, U. F.; AQUINO, F. E.; ARIGONY-NETO, J. Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, v.4, p.49-56, 2004.
40. ŠMEJKALOVÁ, T.; EDWARDS, M. E.; DASH, J. Arctic lakes show strong decadal trend in earlier spring ice-out. *Scientific Reports*, v. 6, p. 1-8, 2016. DOI: 10.1038/srep38449.
41. SOBIECH, J.; DIERKING, W. Observing lake- and river-ice decay with SAR: Advantages and limitations of the unsupervised k-means classification approach. *Annals of Glaciology*, v. 54, p. 65-72, 2013. DOI: 10.3189/2013AoG62A037.
42. SURDU, C. M.; DUGUAY, C. R.; POUR, H. K.; BROWN, L. C. Ice freeze-up and break-up detection of shallow lakes in northern Alaska with space-borne SAR. *Remote Sensing*, v. 7, p. 6133-6156, 2015. DOI: 10.3390/rs70506133.
43. TOPOUZELIS, K.; SINGHA, S.; KITSIOU, D. Incidence angle normalization of wide swath SAR data for oceanographic applications. *Open Geosciences*, v. 8, p. 450–464, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/geo-2016-0029>. Acesso em: 23 jul. 2024.
44. TURNER, J. Extreme temperatures in the Antarctic. *Journal of Climate*, v. 34, p. 2653–2668, 2021.
45. TURNER, J. The SCAR READER project: toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2890–2898, 2004.
46. VAUGHAN, D. G. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climate Change*, v. 60, p. 243–274, 2003.
47. VIEIRA, R.; CARDOSO, P.; ROSA, K. K. DA.; PETSCH, C.; LIRIO, J. M. Changes and collapse in lacustrine system in Antarctic Peninsula ice-free area: Boeckella and Buenos Aires lakes. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.96, n.2, 2024. DOI: 10.1590/0001-3765202420240578
48. VIEIRA, R.; ROSA, K. K. DA.; SIMÕES, C. L.; FERREIRA, F.; SANTOS, J. V.; GONÇALVES, M.; RODRIGUES, R. I.; FELIZARDO, J. P. Análisis sedimentológico y geomorfológico de áreas lacustres en la Península Fildes, Isla Rey Jorge, Antártica Marítima. *Investigaciones Geográficas*, v. 0, p. 3–30, 2015.
49. VIEL, J. A. Fenologia do gelo de lagos nas penínsulas Byers, Keller e Fildes, Antártica Marítima, no período de 2014 a 2023 com dados SAR. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia. 2024. 131p.
50. VIEL, J. A.; PETSCH, C.; VELHO, L. F.; ROSA, K. K. Lake ice phenology: a comparison between TSX and Sentinel-1 images using field data analysis in a maritime Antarctica region. *Investigaciones Geográficas*, n. 63, p. 89–103, 2022.
51. WATCHAM, E. P.; BENTLEY, M. J.; HODGSON, D. A.; ROBERTS, S. J.; FRETWELL, P. T.; LLOYD, J. M.; LARTER, R. D.; WHITEHOUSE, P. L.; LENG, M. J.; MONIEN, P.; MORETON, S. G. A new Holocene relative sea level curve for the South

- Shetland Islands, *Antarctica. Quaternary Science Reviews*, v. 30, p. 3152–3170, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.021>. Acesso em: 23 jul. 2024.
52. WOOLWAY, R. I.; KRAEMER, B. M.; LENTERS, J. D.; MERCHANT, C. J.; O'REILLY, C. M.; SHARMA, S. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, p. 388–403, 2020.
53. ZHANG, S.; PAVELSKY, T. M. Remote sensing of lake ice phenology across a range of lake sizes, ME, USA. *Remote Sensing*, v. 11, p. 1–13, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs11141718>. Acesso em: 23 jul. 2024.
54. ZHOU, C.; ZHENG, L. Mapping radar glacier zones and dry snow line in the Antarctic Peninsula using Sentinel-1 images. *Remote Sensing*, v. 9, p. 1171, 2017.



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