

A geomorfologia e as variações da cobertura glacial das ilhas Greenwich, Livingston, Robert e Snow, Antártica, entre 1956 e 2021

Dall Amaria Soffiatti, D. (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL) ; Kellem da Rosa, K. (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL) ; Petsch, C. (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA) ; Lorenz, J. (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL) ; Cardia Simões, J. (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

RESUMO

O trabalho visa investigar as características geomorfológicas e a variação da cobertura glacial nas últimas décadas das Ilhas Greenwich, Livingston, Robert e Snow, South Shetlands. As séries temporais NDSI e NDWI das imagens Landsat 4, 7 e 8 foram criadas para avaliar a mudança na área glacial. Os parâmetros hipsométricos, de área e de inclinação atuais foram gerados a partir do DEM. As ilhas têm 1.039,4 km² de área glacial total em 2020/2021 e tiveram 203,6 km² (16,4%) de perda de área desde 1956. A perda de área está associada a características ambientais como batimetria, elevação, área e declividade. As geleiras com término marinho tiveram uma perda mais significativa quando comparadas às geleiras terrestres (ambiente de margem de gelo de menor declive). A Ilha Livingston tem maiores dimensões, mais valores de declividade na classe >25°, mais geleiras de descarga (frente de gelo em ambientes glaciomarinhas profundos) e os maiores valores percentuais de variação da cobertura glacial.

PALAVRAS CHAVES

Retração Glacial; Sensoriamento Remoto; NDSI; NDWI; Landsat

ABSTRACT

The work aims to investigate the geomorphological characteristics and the glacial coverage variation in the last decades of the Greenwich, Livingston, Robert and Snow Islands, South Shetlands. The NDSI and NDWI time series from Landsat images 4, 7 and 8 were created to assess change in glacial area. The current hypsometric, area and slope parameters were generated from DEM. The islands has 1.039,4 km² the total glacial area in 2020/2021 and had 203,6 km² (16,4%) area loss since 1956. The area loss is associated with environmental characteristics such as bathymetry, elevation, area and slope. The marine ice-calving glaciers had a more significant loss when compared to land-terminating glaciers (lower slope ice-margin environment). Livingston Island has more dimensions, more slope values in >25 class, more discharge glaciers (ice front in deep glaciomarine environments) and has the highest percentage values of variation in the glacial coverage.

INTRODUÇÃO

1. Introdução O recuo acelerado de geleiras da região norte da Península Antártica (PA) nas últimas décadas é visto como consequência da tendência de aquecimento atmosférico observada desde meados do século XX (RIGNOT et al., 2019). Uma das consequências da retração glacial é a transformação de geleiras marinhas em geleiras com término em terra. O surgimento de novas paisagens altera a geomorfologia, albedo e ecossistemas locais (PERONDI et al, 2020). Além disso, as características físicas de cada ambiente podem promover ou retardar o processo de retração glacial local. Geleiras de descarga, presentes em ilhas como a Livingston e Greenwich, drenam suas massas de gelo diretamente para o mar ou para plataformas de gelo (SILVA, 2019). A sensibilidade das geleiras depende também do seu regime termal basal, o qual pode ser de base termal úmida, politermal ou congelada (BENN; EVANS, 2010). As ilhas Shetlands do Sul estão localizadas em uma região Antártica sob influência marítima (BRAITHWAITE; RAPER, 2007) e possuem geleiras com bases termais úmidas e quentes, portanto, apresentam maior sensibilidade. O estudo de Lorenz (2021) viabilizou a verificação e comparação das mudanças de área para a Ilha Rei George (IRG) desde a década de 1980 e evidenciou a perda de área de 101,34 km² (9%). A taxa de perda de área para a IRG foi de 3,17 km²/ano no período de 32 anos. A autora gerou shapefiles com informações

quanto à área total e linha de frente para 1988/1989 e 2020 das geleiras da IRG, auxiliando na continuidade do monitoramento ambiental da área. Para as demais ilhas das Shetlands do Sul evidenciam-se alguns estudos (JONSELL et al., 2012; FATRAS; FERNANDEZ-PALMA; MARTILLO, 2020; OLIVEIRA, 2020) sobre a retração glacial e perda de massa para alguns setores, com pouca cobertura temporal. O Sensoriamento Remoto (SR) é frequentemente utilizado em análises e monitoramento de geleiras (HILLEBRAND et al., 2018; PETSCH, 2020; ROSA et al., 2021), principalmente no continente Antártico, devido ao alto custo e complexidade para realização dos trabalhos de campo. Portanto, esse estudo tem como objetivo analisar a geomorfologia e investigar a variação da cobertura glacial das ilhas Greenwich, Livingston, Robert e Snow, Shetlands do Sul, nas últimas décadas com a utilização de SR.

1.1 Área de estudo

O arquipélago Shetland do Sul, composto por 29 ilhas, está localizado cerca de 130 km a noroeste da PA, entre as latitudes 61° e 63° 30' S e longitudes 53° 55' e 62° 50' W. Em geral, as ilhas possuem baixa continentalidade e estão próximas ao ponto de fusão do gelo sob pressão (JONSELL et al., 2012). As ilhas sediam diversas estações de pesquisa e possuem áreas livres de gelo costeiras consideradas como ASPAS (Antarctic Specially Protected Area) ou ASMAS (Antarctic Specially Managed Areas) como a Baía do Almirantado, onde situa-se a Estação Antártica Comandante Ferraz, devido ao seus valores para o ambiente, ecossistemas, história e pesquisa científica (ATS, 2023). As ilhas Livingston, Greenwich, Robert e Snow, pertencentes às Shetland do Sul, localizam-se entre a Passagem de Drake e o Estreito de Bransfield (Figura 1). A ilha Livingston possui a segunda maior extensão de área do arquipélago, com cerca de 866,8 km². As geleiras presentes no arquipélago são consideradas de alta sensibilidade às mudanças climáticas, que influenciam diretamente no balanço de massa local (MACKINTOSH; ANDERSON; PIERREHUMBERT, 2017), logo o seu monitoramento é importante para entendermos como as demais áreas glaciais podem responder a variações semelhantes (LORENZ, 2021).

MATERIAL E MÉTODOS

2. Métodos Para obtenção das margens glaciais, foram selecionadas imagens ópticas dos satélites Landsat 4, 7 e 8, dos anos de 1989, 2002, 2003, 2020 e 2021, disponibilizadas no portal U.S. Geological Survey (USGS). As imagens escolhidas foram registradas entre os meses de janeiro a março (estação de ablação), não indicam precipitação recente e apresentam baixa nebulosidade, são elas:

1.LT04_L2SR_217104_19890128_20200917_02_T2;
2.LE07_L2SR_219104_20020130_20201112_02_T2;
3.LE07_L2SR_217104_20030119_20200916_02_T2;
4.LC08_L2SR_219104_20200209_20201016_02_T2; 5.LC08_L2SR_217104_20210112_20210308_02_T2.

Também foram utilizados dados vetoriais das margens glaciais, fornecidos pelo Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS), esses foram gerados com cartas topográficas dos anos de 1956 para a ilha Snow e 1957 para as ilhas Livingston, Greenwich e Robert. Para elaboração do mapa de localização foram utilizados shapefiles da porção oceânica da e linha de costa da PA, disponibilizados pela Antarctic Digital Database (ADD) (Figura 1). Durante o processamento das imagens, o Sistema de Informação Geográfica QGIS (versão 3.4.12) foi utilizado para a etapa de correção atmosférica, para minimizar ruídos existentes. Posteriormente, no ArcMap (versão 10.5), foi gerado para cada imagem: um RGB com composição de cor verdadeira, o índice Normalized Difference Snow Index (NDSI) e o índice Normalized Difference Water Index (NDWI). O NDSI é o resultado da razão entre as bandas verde (banda 2 nos sensores Thematic Mapper - TM, e banda 3 no sensor Operational Land Imager - OLI) e do infravermelho próximo (banda 5 nos sensores TM e banda 6 no sensor OLI) executada na ferramenta "raster calculator". $NDSI = (TM \text{ Banda } 2 - TM \text{ Banda } 5) / (TM \text{ Banda } 2 + TM \text{ Banda } 5)$ O NDSI classifica os alvos da imagem entre os valores -1 e 1, e permite diferenciar nuvens, neve e superfícies rochosas (KULKARNI et al, 2002; PETSCH et al, 2013). Já o NDWI é o resultado da razão entre as bandas verde e do infravermelho médio (banda 4 nos sensores TM e banda 5 no sensor OLI), também executada na ferramenta "raster calculator". $NDWI = (TM \text{ Banda } 2 - TM \text{ Banda } 4) / (TM \text{ Banda } 2 + TM \text{ Banda } 4)$ O índice permite realçar feições de água e áreas úmidas na imagem, também classifica os alvos entre os valores -1 e 1 (McFEETERS, 1996; BRENNER; GUASSELLI, 2015). Foram identificadas falhas e áreas com confusão de classe no NDSI, como na margem das geleiras marinhas, onde o índice considerou porções oceânicas como geleiras. Portanto, os índices NDSI e NDWI foram utilizados em conjunto na ferramenta "extract by

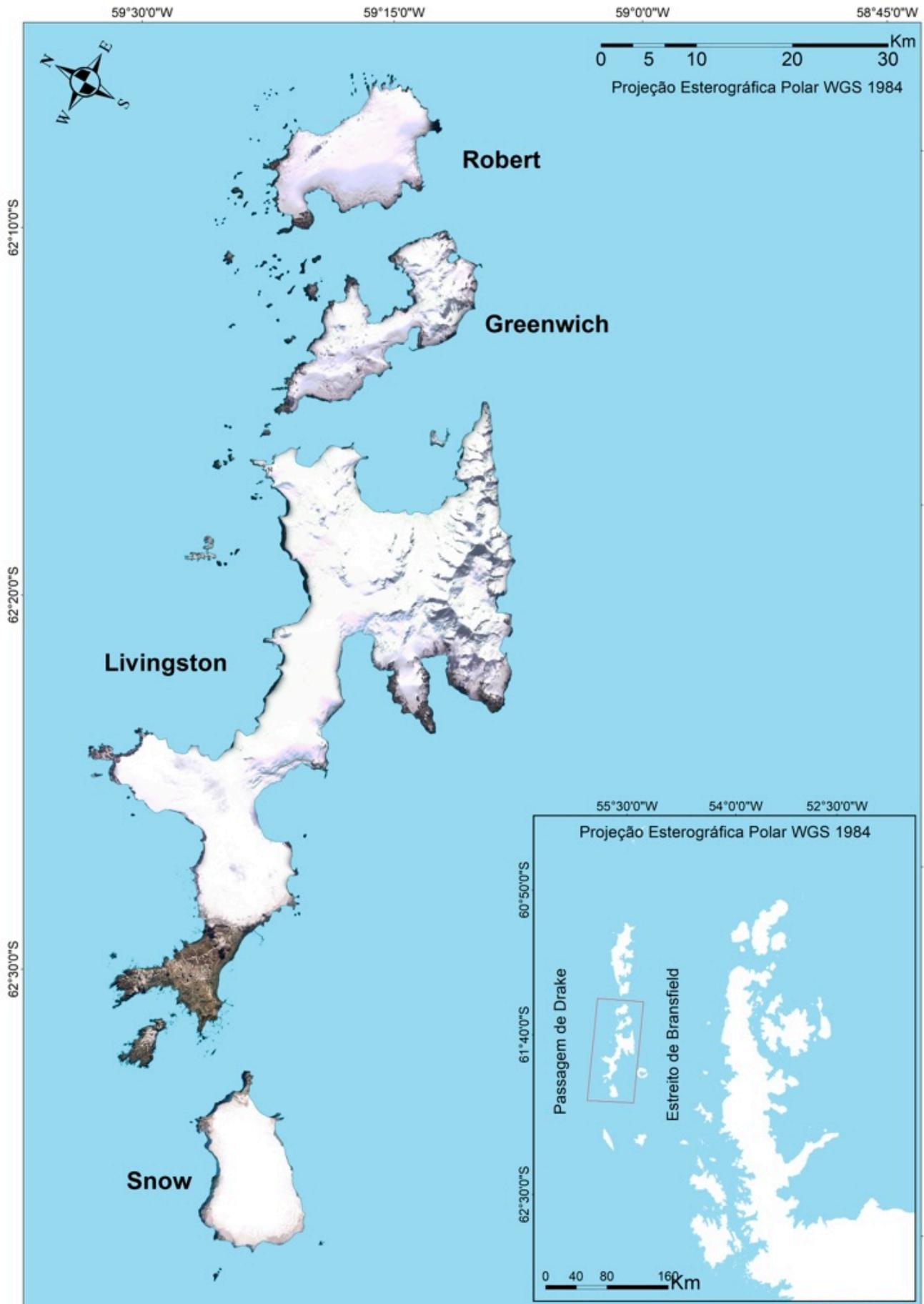
mask”, onde o segundo recortou o primeiro com base no contorno da água ao redor das ilhas. Áreas com a presença de gelo misturado com sedimento, sombras, pequenas nuvens e formações rochosas isoladas também apresentaram confusão de classes pelo NDSI. Para corrigir o erro foi preciso utilizar o método que combina a delimitação pelos índices com a delimitação visual, permitindo a correção e obtenção mais precisa das áreas dos campos de gelo e análise de suas variações. Por fim, foi realizada a análise geomorfométrica (hipsometria, relevo sombreado e declividade) utilizando recortes de dados do REMA 08 para cada ilha, o dado possui 8 metros de resolução espacial e 3,5 metros de acurácia vertical (HOWAT et al., 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As ilhas Greenwich, Livingston, Robert e Snow (Figura 1) apresentam elevações máximas entre 299,5 e 1.688,3 metros. Em todas as ilhas as áreas de maiores altitudes são cobertas por geleiras. A ilha Livingston é a maior ilha em extensão da área de estudo, com aproximadamente 866,8 km², possui elevações máximas de 1.688,3 metros, sendo o maior valor identificado pelos autores. Quanto a declividade, apesar de aproximadamente 343 km² (equivalente a 39,6% da área total) da ilha apresentar valores entre 0º e 4º, a Livingston possui a maior área com valores de declividade acima de 25º em comparação com as demais ilhas estudadas (cerca de 109,4 km²) (Figura 2). O relevo mais acidentado se concentra na porção sudeste. A ilha Greenwich é a segunda maior ilha em extensão, com cerca de 157 km², apresenta elevações máximas de 625 metros, a ilha tem duas feições mais elevadas, uma a sudeste e outra a noroeste, sendo a primeira mais expressiva. A porção sudeste da ilha também apresenta os maiores valores de declividade, o intervalo predominante é entre 4º e 8º, identificado em 28,9% da área total da ilha (cerca de 45,5 km²) (Figura 2). A ilha Robert possui aproximadamente 150 km² de extensão e possui elevações máximas de 362,7 metros concentradas em sua porção central. A maior parte das áreas com grandes declividades estão localizadas próximas às linhas de costa. Aproximadamente, 60% da extensão da ilha possui declividades entre 0º e 4º, indicando um relevo pouco acidentado (Figura 2). Já a ilha Snow é a menor em extensão, possui 130 km² e apresenta elevações máximas de 299 metros, distribuídas na área central da ilha. As áreas declivosas estão localizadas próximas à linha de costa, aproximadamente 76,9 km² (59,6% da área total da ilha) apresentam declividades entre 0º e 4º, também indicando um relevo pouco acidentado (Figura 2) Os resultados obtidos indicam que os campos de gelo de todas as ilhas apresentaram variações. A cobertura glacial da ilha Livingston passou de 832,2 km² em 1957 para 738 km² em 1989 e 679 km² em 2020, uma redução total equivalente a 18,4% ou 153,2 km², com uma taxa de retração de aproximadamente 2,4 km²/ano, sendo essa a maior taxa da área de estudo (Figura 3). A cobertura glacial se manteve mais estável na região sudeste, onde o se localizam as maiores elevações e declividades. Acredita-se que as geleiras apresentaram menor variação neste setor por serem geleiras com término em terra. As geleiras com término marinho no interior de baías apresentaram maiores variações, destacando-se as margens sudoeste e extremo leste. A área do campo de gelo da Ilha Greenwich variou de 144,9 km² em 1957 para 141,2 km² em 1989 e 127 km² em 2021, recuo equivalente a 17,9 km² ou 12,3%, com taxa de retração de 0,27 km²/ano (Figura 3). A retração da cobertura glacial foi mais expressiva na porção noroeste e em geleiras com desprendimento no mar, iniciando a formação de baías e acentuando as já existentes. A cobertura glacial da ilha Robert variou de 147,6 km² em 1957 para 143 km² em 1989, 131 km² em 2003 e 126 km² em 2021, uma redução total de aproximadamente 21,6 km² ou 14,6%, com taxa de retração equivalente a 0,34 km²/ano (Figura 3). O recuo da cobertura glacial foi maior em geleiras com desprendimento no mar, também contribuindo para formação de baías, principalmente na metade oeste da ilha. Por fim, a área do campo de gelo da ilha Snow passou de 117,3 km² em 1956 para 110 km² em 2002 e 107,04 km² em 2020, recuo equivalente a 9,9 km² ou 8,4%, com taxa de retração equivalente a 0,16 km²/ano, sendo esses os menores valores encontrados na área de estudo (Figura 3). A variação da cobertura glacial da ilha Snow foi bem distribuída em sua margem, apresentando recuos em todos os setores, com destaque para a porção sudoeste, que também possui geleiras marinhas e obteve recuos expressivos. Não foi possível gerar valores de cobertura glacial das quatro ilhas para todos os anos analisados. Fatores como recorte de área das imagens, cobertura de nuvens e precipitação recente foram limitantes para geração de dados. Apesar da Livingston ter maiores elevações e uma grande área glacial, essa ilha foi a que apresentou maior perda percentual de área no período. Observa-se que essa ilha

possui a classe de declividade maior que 25° com maior área quando comparada às demais ilhas. No entanto, o setor com as maiores declividades não foi o que apresentou as maiores perdas de área. A sua diferença em relação às outras ilhas está associada à presença de uma maior proporção de geleiras de desprendimento que fluem para fiordes caracterizados por altas amplitudes batimétricas (por exemplo as Baías Walker, South e Moon). Esse fator influencia na estabilidade da groundline das geleiras em contato com o oceano, na velocidade de fluxo e possui implicações para o balanço de massa glacial.

Figura 1



Mapa de localização das ilhas Greenwich, Livingston, Robert e Snow. Fonte: elaboração dos autores, 2023.

Figura 2

Declividade	Livingston	Greenwich	Robert	Snow
0° - 4°	39,6%	23,7%	59,6%	59,6%
4° - 8°	24,3%	28,9%	25,9%	30,4%
8° - 16°	15,6%	27,9%	10,4%	7,5%
16° - 25°	7,9%	10,7%	2,3%	1,6%
>25°	12,6%	8,8%	1,8%	0,9%

Porcentagem de área total por intervalos de declividade por ilha. Fonte: elaboração dos autores, 2023.

Figura 3

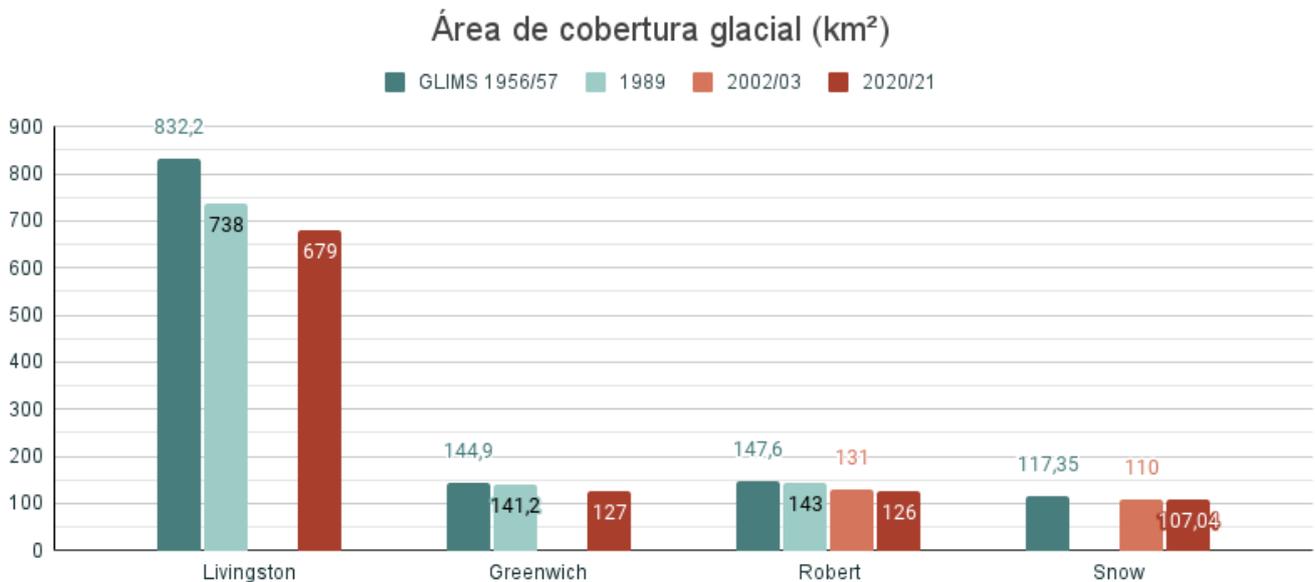


Gráfico da variação da cobertura glacial na área de estudo entre os anos 1956 e 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

4. Considerações finais O uso do SR e geoprocessamento permitiu o monitoramento das geleiras da área de estudo para o período de 65 anos. Esse monitoramento é fundamental, para conhecer o ritmo de retração glacial dos últimos anos, e principalmente, quais foram os setores de maior perda ou de estabilização. Além de avaliar as características morfométricas, contribui na compreensão de quais variáveis estão associadas a porções de maior retração. Destaca-se que as geleiras de frente em mar, foram as que mais retraíram no período, contribuindo para formação e avanço de baías, esse comportamento foi observado em todas as ilhas analisadas. A metodologia de delimitação da margem glacial pelos índices NDSI e NDWI se mostrou eficiente, apesar da necessidade de correções pontuais pela metodologia visual. Foram encontradas poucas imagens Landsat consideradas

adequadas na área de estudo, principalmente pela presença de nebulosidade, o que foi um fator limitante para a resolução temporal do trabalho. Para maior detalhamento temporal, recomenda-se a combinação de diferentes satélites e/ou a utilização de sensores ativos. Por fim, como recomendações, os erros de mensuração dos campos de gelo, gerados para cada imagem, serão quantificados e analisados nas etapas seguintes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, ao PROANTAR, à PROPESQ UFRGS, ao Programa de Pós-graduação em Geografia da UFRGS e ao CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ATS. Secretariat of the Antarctic Treaty, 2023. Area Protection and Management / Historic Sites and Monuments. Disponível em: <<https://www.ats.aq/e/protected.html>>.
- BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. Glaciers e glaciation. 2. ed. Nova York: Hodder Education, 2010. 801 p.
- BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS. Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17. (SBSR), 2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015. p. 3693-3699. Internet. ISBN 978-85-17-0076-8. IBI: <8JMKD3MGP6W34M/3JM4C23>. Available from: <ibi:8JMKD3MGP6W34M/3JM4C23>.
- BRAITHWAITE, R. J.; S. C. B. RAPER. Glaciological conditions in seven contrasting regions estimated with the degree-day model. *Annals of Glaciology* 46, 297-302, 2007.
- Esri Inc. ArcMap (versão 10.5.1). Redlands, Estados Unidos, 2016.
- FATRAS, C.; FERNANDEZ-PALMA, B.; MARTILLO, C. Estimating ice retreat on Greenwich island - Antarctica between 1956 and 2019 using optical and SAR imagery. *Polar Science*, v. 24, n. 100526, 2020.
- HILLEBRAND, F.; ROSA, C.; BREMER, U. Mapeamento das Zonas de Neve Úmida e de Percolação por Meio do Sentinel-2. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, n. 3, p. 96-103, 2018.
- HOWAT, I. M.; PORTER, C.; SMITH, B. E.; NOH, M.-J.; MORIN, P. The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere*, v. 13, p. 665-674, 2019. <https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019>.
- JONSELL, U. Y.; NAVARRO, F.; BAÑON, M. A.; LAPAZARAN, J.; OTERO, J. Sensitivity of a distributed temperature-radiation index melt model based on AWS observations and surface energy balance fluxes, Hurd Peninsula glaciers, Livingston Island, Antarctica. *The Cryosphere*, v. 6, n. 3, p. 539-552, 2012.
- KULKARNI, A. V.; SRINIVASULU, J.; MANJUL, S. S.; MATHUR, P. Field based spectral reflectance to develop NDSI method for the snow cover. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 30, p. 73-80, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02989978>
- LORENZ, Julia. Variações de área das geleiras e o estado atual da linha de neve transitória dos campos de gelo da ilha Rei George, Antártica, usando sensores remotos orbitais. TCC (Graduação).- Curso de Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021. 90 p.
- MACKINTOSH, A. N.; ANDERSON, B. M.; PIERREHUMBERT, R. T. Reconstructing Climate from Glaciers, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 45, n. 1, p. 649-680, 2017.
- McFEETERS, S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal Of Remote Sensing*. v. 17, p. 1425-1432, 1996.
- OLIVEIRA, Manoela A. G. Evolução de lagos marginais ao gelo em resposta à retração em resposta à retração de geleiras nas Ilhas Nelson e Rei George, Antártica Marítima. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- PERONDI, C.; ROSA, K. K.; PETSCH, C.; IDALINO, F. D.; OLIVEIRA, M. A. G.; LORENZ, J. L.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. RECENTES ALTERAÇÕES NAS GELEIRAS E NOS SISTEMAS PARAGLACIAIS, ANTÁRTICA MARÍTIMA. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 6, n. 2, p. 292-301, 2020. DOI: 10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19301.
- PETSCH, C.; ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; BRAUN, M.; COSTA, R.; SIMÕES, J. Los efectos de los cambios climáticos en los sistemas glaciales, proglaciales y periglaciales del glaciar Collins, isla Rey Jorge, Antártica, del final de la Pequeña Edad del Hielo al siglo XXI. *Investigaciones Geográficas*, n. 103, 2020.

- PETSCH, C.; SIMÕES, J. C.; SALDANHA, D. L. Proposta de metodologia para diferenciação de alvos glaciais na Península Antártica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, 2013. p. 3979-3985. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). IBI: <3ERPFQRTRW34M/3E7GLMD>. Available from: <ibi:3ERPFQRTRW34M/3E7GLMD>.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System (versão 3.10). 2021. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>.
- RIGNOT, E.; MOUGINOT, J.; SCHEUCHL, B.; BROEKE, V. D.; WESSEM, V.; MORLIGHEM, M. Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979– 2017, Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 4, p. 1095– 1103, 2019.
- ROSA, K. K.; OLIVEIRA, M.; PETSCH, C.; AUGER, J.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J.; Expansion of glacial lakes on Nelson and King George Islands, Maritime Antarctica, from 1986 to 2020. Geocarto International, v. 37, n. 15, p. 4454-4464, 2021. DOI: 10.1080/10106049.2021.1886342
- SILVA, A. B.; ARIGONY-NETO, J.; BICCA, C. E. CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DAS GELEIRAS DA PENÍNSULA ANTÁRTICA. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 20, n. 3, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1547.