

VARIAÇÃO NA COBERTURA DE GELO DOS LAGOS NA ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA, USANDO TSX E SENTINEL 1

Rosa, K.K. (UFRGS) ; Viel, J.A. (UFRGS, IFRS) ; Petsch, C. (UFSM) ; Vieira, R. (UFF) ; Simões, J.C. (UFRGS)

RESUMO

O objetivo do trabalho é obter o mapeamento da fenologia de lagos das áreas livres de gelo da Ilha Rei George usando dados Sentinel -1 (C band SAR) e TerraSAR-X (TDX). Foi definida a Península Fildes como recorte espacial para representar os lagos da ilha. Os dados obtidos por meio de radar foram comparados com os dados e imagens coletadas em campo. Obteve-se o limiar de retroespalhamento para água livre de cobertura de gelo e para a classe cobertura de neve e gelo nos lagos para a área escolhida como recorte espacial na imagem TDX e a Sentinel 1. Sendo assim, os resultados obtidos foram relativamente próximos, apesar da diferença na resolução espacial das imagens utilizadas. Os resultados de fevereiro de 2015 foram comparados com os de fevereiro de 2020 e verificam-se alterações em resposta às variáveis ambientais.

PALAVRAS CHAVES

geomorfologia glacial; formas glacialacustres; sensoriamento remoto; cobertura de neve e gelo; variabilidade climática

ABSTRACT

The work aims to investigate the phenology mapping of lakes in the ice-free areas of King George Island using Sentinel -1 (C band SAR) and TerraSAR-X (TDX) data. The in Fildes Peninsula subset was chosen to represent the island's lakes in this study. Data obtained using radar were compared with data and photography's collected in the field working. The backscatter threshold was obtained for both water free of ice and ice cover in the lakes. Thus, the values obtained were relatively similar, despite the difference in the spatial resolution of the images used. The February 2015 results were compared with February 2020 and showed variations in response to environmental variables.

INTRODUÇÃO

Os processos de formação periódica de lagos e de variação da cobertura de gelo, bem como as mudanças no tempo são chamados de fenologia do gelo do lago e são resultado de variações sazonais e interanuais nas condições meteorológicas (Kropáček et al 2013). Para os lagos glaciais e paraglaciais, ainda há uma compreensão limitada dos padrões espaciais da fenologia ou como esses padrões são influenciados por vários fatores climáticos e geomórficos (O'Reilly et al. 2015). O mapeamento da cobertura de gelo e neve desses lagos é relevante para estudos ambientais na ilha Rei George. Autores demonstram que o sensoriamento remoto por satélite fornece uma alternativa viável para detectar e monitorar mudanças na cobertura de gelo em lagos de alta latitude (Latifovic e Pouliot, 2007; Duguay et al., 2012; Murfitt e Brown 2017). As imagens SAR são usadas para caracterizar a fenologia do gelo do lago para áreas livres de gelo das regiões polares em diferentes escalas espaço-temporais (Guo et al 2018). A aquisição frequente de dados de radiômetro de micro-ondas e séries temporais completas de imagens são valiosas para estudos de fenologia do gelo (Helfrich et al., 2007). O retorno do sinal SAR dos lagos de gelo e lagos abertos foi amplamente documentado em várias latitudes, incluindo o Alasca com dados ERS 1 (Jeffries et al., 1994), o subártico canadense (Duguay et al., 2002) com Radarsat C, a Planície Costeira Ártica do Alasca com Radar de Abertura Sintética Avançada (ASAR) Wide Swath e RADARSAT-2 ScanSAR (Surdu et al., 2015) e o no Canadá com dados RADARSAT-2 (Murfitt et al., 2018). As imagens TerraSAR-X (polarização HH) permitiram um detalhamento temporal sem precedentes para lagos proglaciais tornando possível o mapeamento dos lagos de cobertura de gelo (Petsch et al., 2020). Antonova et al. (2016) monitoraram a fenologia do gelo em lagos do delta do rio Lena usando backscatter TerraSAR-X. Sobiech e Dierking (2013) utilizaram imagens TerraSAR-X HH para dividir as frações de

gelo e água em lagos e canais de rio no delta do rio Lena. Recentemente, alguns investigadores demonstraram o potencial dos dados do radar de abertura sintética (SAR) Sentinel-1 para monitorar a cobertura de gelo do lago no Canadá (modo Extra Wide e polarização HH) (Duguay et al., 2015), em lagos rasos no norte do Alasca (modo EW e polarização HH) (Wakabayashi & Motohashi, 2018), na Península Fildes, Antártica marítima (modo IW e polarização HH) (da Rosa et al., 2020). Ainda para a Antártica, Dirscherl et al (2021) elaboraram o primeiro método integrado de deep learning para o mapeamento de extensão de lago supraglacial usando imagens Sentinel-1. A validação de dados obtidos com imagens SAR, comumente é realizada por interpretação visual de imagens óticas, como a Sentinel 2 (Murfit e Duguay 2020; Tom et al. 2020), MODIS (Murfit e Duguay 2020; Qi et al 2020) e Landsat (Geldsetzer e Sanden, 2013; Zhang et al 2020) e dados de campo (Zhang et al 2020). A avaliação do desempenho dos Dados do Sentinel-1 para Monitoramento da Fenologia do Gelo dos lagos da Antártica pode fornecer séries temporais de alta densidade e análise usando vários sensores. Com vários dados de satélite, o Sentinel-1 EW pode oferecer cobertura temporal junto com os dados Sentinel-1 IW, tornando possível monitorar com mais precisão e detalhe temporal a cobertura de gelo dos lagos antárticos. Na ilha rei George, o processo de retração da geleira produz ambientes distintos com fluxos de fusão provenientes da geleira, originando lagos (SIMÕES et al. 2015). O objetivo do trabalho é investigar a variação na cobertura de gelo dos lagos comparando duas estações de ablação (de 2015 e de 2020) na ilha Rei George, Antártica, usando TSX e Sentinel 1.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi definida a Península Fildes como recorte espacial para representar os lagos da ilha nessa pesquisa. A península Fildes localiza-se na parte sul da ilha Rei George (62°08' e 62°14'S; 59°02' e 58°51'O), é limitada a nordeste por um pequeno domo de gelo, a geleira Collins, aproximadamente na latitude 62°12'S e longitude 58°57'O, com uma área de 15 km² e elevação máxima de 270 m (SIMÕES et al. 2015). A velocidade de deslocamento do gelo na geleira Collins é baixa, sendo estimada entre 0,15 e 3,72 m a-1, enquanto no domo de gelo principal da ilha Rei George o valor máximo atinge 112,1 m a-1 (RÜCKAMP et al. 2010). Vieira et al. (2015) apontam que predominam formas proglaciais associadas à atividade da geleira e formas paraglaciais que já sofrem interferência de outros agentes como vento, água de fusão de neve e precipitação líquida na porção norte da península Fildes. Na porção central, em direção ao sul, os ambientes periglaciais possuem processos paraglaciais, movimento de massa nas vertentes, vento, água de fusão da neve e permafrost (VIEIRA et al. 2015). As imagens Sentinel 1 - EW e TerraSAR-X (TDX) foram adquiridas sobre a área de estudo. Elas foram adquiridas no dia 09/03/2015. A imagem TSX de 2015 é StripMap, com resolução espacial de 3 metros. O modo de polarização é Single. A imagem é Spatially Enhanced Product (SE) e entregue no formato Ellipsoid Enhanced Corrected (EEC), com geometria do mapa com correção de terreno, usando um modelo digital de elevação (DEM) projetado e amostrado para a referência WGS84 elipsóide. Esta pesquisa utilizou dados do Sentinel -1 (banda C SAR) adquiridos no modo Extra Wide (EW). Este modo emprega a técnica de Observação do Terreno com Varreduras Progressivas SAR (TOPSAR) para adquirir dados em uma área muito mais ampla usando cinco subfaixas e adquire dados em uma faixa de 400 km com uma resolução espacial de 20 m por 40 m e o ângulo de incidência do modo EW é de 19 a 47° (ESA, 2020). O ângulo de incidência da S1 varia de 18,4 a 45,9 e da TSX variou entre 41.78 e 44.00. Os dados S1 Ground Range Detecte (GRD) foram baixados do Copernicus Open Access Hub da Agência Espacial Europeia (ESA) e inseridos no software Sentinel Toolbox para análise posterior. Os produtos de nível 1 detectados no alcance do solo (GRD) consistem em dados de SAR focalizados que foram detectados, analisados e projetados no alcance do solo usando o elipsóide terrestre modelo WGS84 (Filipponi, 2019). Dados de polarização HH foram usados nesta pesquisa para S1 EW. As etapas para pré-processar os dados Copernicus Sentinel-1 GRD foram: aplicação do arquivo de órbita, remoção de ruído termal, remoção de ruído de borda, calibração, filtragem, correção de terreno e conversão para um coeficiente de retroespalhamento (em dB) no SNAP. Para o conjunto dos lagos foram calculados valores estatísticos como a média de σ° e a mediana σ° (Surdu et al 2015). Além disso, o limiar de retroespalhamento do radar do mar aberto e do gelo do lago (flutuante) foi observado durante os dados de fevereiro de 2015 e de 2020. Os dados obtidos por meio de radar foram comparados com os dados e imagens coletadas em campo (apenas em 2015). Foram considerados os vetores dos lagos extraídos a partir

da interpretação visual, de uma imagem QuickBird de 28 de fevereiro de 2008 e imagem Sentinel de 2018 na área livre de gelo da Península Fildes. A Estação Presidente Eduardo Frei Montalva forneceu dados para a análise da relação entre as variáveis temperatura, precipitação e vento e valores de retroespalhamento. Os dados meteorológicos foram obtidos da estação da Base Frei nas coordenadas de latitude -62.19194 e de longitude -58.98278 e altitude de 45 m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados mostram que os valores de σ° na cobertura do lago de gelo exibem um sinal de retorno de -16,9 dB a 27 dB para TDX e de -15,9 dB a -0,8 dB para Sentinel-1 EW em 2015. Os resultados mostram que os valores de σ° na cobertura do lago de águas abertas exibem um sinal de retorno de -33 dB a -17 dB para TDX e de -23 dB a -16 dB para Sentinel-1 EW em 2015. Como exemplo, o lago 5 é ilustrado na figura 1. Os resultados mostram valores de retroespalhamento para a água aberta nos lagos de -21 dB a -32 dB para TSX e de -15 dB a -18 dB para Sentinel-1 EW em 2015. O intervalo de retroespalhamento encontrado para a cobertura de gelo e neve na superfície dos lagos na imagem S-1 EW foi de -14 dB a -8 dB e na TSX de -20 dB a -1,7 dB. A superfície sem gelo superficial (água aberta) nos lagos em número de pixels varia entre 9394 e 85 na imagem TSX e entre 16 a 4 na S-1 EW em 2015 (Figura 2). Na S-1 EW a maior parte dos lagos possui 0 número de pixels livres de gelo (água aberta), o que não é verificado na TSX. A superfície com a classe não água aberta é identificada em todos os lagos por ambos os sensores e varia entre 733 a 51 em número de pixels na imagem TSX e entre 54 a 1 em número de pixels na S-1 EW. Ao analisar as proporções das classes em cada imagem por lago em 2015, verifica-se que na imagem TSX nenhum dos lagos apresenta 100% de não água aberta, mas há valores percentuais crescentes ao comparar os seguintes lagos: 8, 9, 4, 10, 3 e 6. Os lagos 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 e 10 apresentam-se 100% não água aberta na imagem S-1 EW. Assim, os lagos 2 e 7 passaram a ter água livre de gelo (>90% da área total do lago) na TSX para 100% (da área total do lago) com gelo na S-1 EW. Os lagos 1 e 5 se destacam por apresentarem % de água livre de gelo na superfície tanto na imagem TSX (>90% da área total do lago) quanto na S-1 EW (7% e 36%, respectivamente). A comparação entre fevereiro de 2015 e fevereiro de 2020 por S1 no lago Uruguai mostra a diminuição dos valores de retroespalhamento no lago 5 para fevereiro de 2015. O valor médio de retroespalhamento encontrado passa de -13 para -22 entre fevereiro de 2015 e 2020. Há uma relação com a temperatura média de fevereiro para os dois meses e há a anomalia nas temperaturas máximas considerando esse mês em uma série climatológica. Já a temperatura média do ar para 2015, quando se considera as últimas 6 horas, passou de -0,5 C° para 0,5C° entre o momento da aquisição da TDX e S1, respectivamente. Já a temperatura média do ar para 2015, quando se considera as últimas 12 horas, passou de -0,5C° para 0,4C° entre o momento da aquisição da TDX e S1, respectivamente. O valor encontrado para a cobertura de gelo do lago para o Sentinel-1 concorda com Wakabayashi e Motohashi (2018). Os autores analisaram as imagens Sentinel 1, o modo de imagem de faixa Extra-Wide (EW) e a polarização HH e encontraram limiares superiores a -14 dB para a classe parcialmente congelada na superfície dos lagos. Rosa et al (2020) obtiveram valores de σ° maiores que -14 dB para água congelada (entre -14 e -17 dB para a superfície, com até 60% de sua área congelada), indicando retroespalhamento Diferença entre modos ou condições de cobertura do lago em períodos de fusão. O valor encontrado para a cobertura de gelo do lago (variando de -15,9 dB a -0,8 dB) para Sentinel-1 pode indicar o início da formação de um gelo superficial nos lagos neste momento deste dia. Surdu et al. 2015 encontrou retornos variando de -15,9 dB a -4,8 dB para Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) e de -17,4 dB a -11,7 dB para dados RADARSAT-2 (HH) para início da formação de gelo na superfície dos lagos. Esse valor pode ser usado no futuro monitoramento de eventos de congelamento. Jeffries et al. (1994) encontraram, ao avaliar dados de lagos rasos e banda ERS 1 C, baixos valores de retroespalhamento de -17 a -18 dB e atribuídos ao momento da formação inicial de gelo, uma natureza especular e uma absorção do sinal de radar no leito do lago. De acordo com a direção do vento no dia, verifica-se que os lagos possivelmente estavam mais expostos interferindo nos valores de backscattering. Em 2015, todos os lagos têm águas abertas na TDX, mas na S1 EW não. Carina encontrou que a precipitação se mostrou como uma importante variável na formação da superfície líquida. O vento predominante não vinha do mar aberto Drake. Considerando o horário da imagem S1, estes ventos poderiam ter resfriado a superfície (temperatura do ar menor ao longo das últimas horas) levando a parte

congelada da superfície de lagos (ex. os aparentemente menores e rasos e sem recebimento de descarga de água degelo de canais de maior vazão). Como o retroespalhamento de gelo ou água depende do comprimento de onda do radar, polarização e ângulo de incidência (Mäkynen et., 2002). O retroespalhamento co-polarizado da água varia principalmente com a velocidade do vento, mas também com a direção do vento em relação à direção de visão do SAR (Vachon e Dobson, 2000; Sletten e Hwang, 2011). Os limiares de retroespalhamento em TerraSAR-X e Sentinel-1 podem ser usados para monitoramento de cobertura de gelo de lago/eventos de gelo de lago em ambientes glaciais e periglaciais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Obteve-se o limiar de retroespalhamento, para água livre de cobertura de gelo e com cobertura de neve e gelo nos lagos para a área escolhida como recorte espacial na imagem TDX e a Sentinel 1. Sendo assim, os valores obtidos foram relativamente próximos, apesar da diferença na resolução espacial das imagens utilizadas. Foram avaliadas as potencialidades da TerraSAR-X e Sentinel 1 para mapeamento de fenologia de lagos e demonstrou-se a relação entre os dados de retroespalhamento com os dados meteorológicos. Os resultados de fevereiro de 2015 foram comparados com os de fevereiro de 2020 e demonstraram variações em resposta às variáveis ambientais. É relevante estender a série temporal para investigar se 2020 representa uma condição de anomalia em relação aos demais anos da série. O intervalo de retroespalhamento nas imagens pode ser usado para monitorar a cobertura de gelo de lagos e a extensão dos eventos no sistema paraglacial. O papel da água de degelo entrando no lago e atuando no ciclo degelo/congelamento pode ser explorado para avançar na temática.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- ANTONOVA, S., KÄÄB, A., HEIM, B., LANGER, M., BOIKE, J. Principal Component Analysis of TerraSAR-X backscatter and coherence stacks one year (2012-2013) in the Lena River Delta, links to GeoTIFFs. PANGAEA, p. 169-191, 2016: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.872142>
- CAI, Y., KE, C.Q., YAO, G. & SHEN, X. MODIS observed variations of lake ice phenology in Xinjiang, China. *Climatic Change*, v. 158, n. 3-4, p. 575-592, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02623-2>
- DA ROSA, C.N., BREMER, U.F., PEREIRA FILHO, W. et al. Freezing and thawing of lakes on the Nelson and King George Islands, Antarctic, using Sentinel 1A synthetic aperture radar images. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 559, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08526-5>
- 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, n. 2, p. 197, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13020197>
- DUGUAY, C.R., BERNIER, M., GAUTHIER, Y. & KOURAEV, A. Remote Sensing of Lake and River Ice. *Remote Sensing of the Cryosphere*, v. 12, p. 273-306, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118368909.ch12>
- 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, n. 7, p. S152-S154. 2012. https://www.researchgate.net/publication/236173579_The_Arctic_Lake_ice_In_State_of_the_Climate_in_2011
- DUGUAY, C. R., PROWSE, T. D., BONSAI, B. R., BROWN, R. D., LACROIX, M. P., & MÉNARD, P. Recent trends in Canadian lake ice cover. *Hydrological Processes*, v. 20, n 4, p. 781-801, 2006. <https://doi.org/10.1002/hyp.6131>
- DUGUAY, C.R., PULTZ, T.J., LAFLEUR, P.M. & DRAI, D. RADARSAT Backscatter Characteristics of Ice Growing on Shallow Subarctic Lakes, Churchill, Manitoba, Canada. *Hydrological Processes*, v. 16, n. 8, p. 1631-1644. 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.1026>

- GELDSETZER, T. & SANDEN, J.J. Identification of polarimetric and nonpolarimetric C-band SAR parameters for application in the monitoring of lake ice freeze-up. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 39, n. 3, p. 263-275. 2013. <https://doi.org/10.5589/m13-033>
- GUO, L., WU, Y., ZHENG, H., ZHANG, B., LI, J., ZHANG, F. & SHEN, Q. Uncertainty and Variation of Remotely Sensed Lake Ice Phenology across the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, v. 10, n.10, p. 1534. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10101534>
- 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, n. 11, p. 22459 - 22471. 1994. <https://doi.org/10.1029/94JC01479>
- LATIFOVIC, R. & POULIOT, D. Analysis of climate change impacts on lake ice phenology in Canada using the historical satellite data record. *Remote Sensing Environment*, v. 106, n. 4, p. 492-507. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.015>
- 102 *Investigaciones Geográficas*, 2022, (63), 89-103
- MURFITT, J. & BROWN, L. C. 2017. Lake ice and temperature trends for Ontario and Manitoba: 2001 to 2014. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 21, p. 3596 - 3609. <https://doi.org/10.1002/hyp.11295>
- MURFITT, J., BROWN, L.C. & HOWELL, S.E.L. Evaluating RADARSAT-2 for the Monitoring of Lake Ice Phenology Events in Mid-Latitudes. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, p. 1 - 26. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10101641>
- 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, n. 3, p. 1 - 25. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12030382>
- O'REILLY, C.M., SHARMA, S., GRAY, D.K., HAMPTON, S.E., READ, J.S., ROWLEY, R.J. et al. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Geophysical Research Letter*, v. 42, n. 24, p. 1 - 9. 2015 <https://doi.org/10.1002/2015GL066235>
- PETSCH, C., COSTA, R. M., ROSA, K. K. DA., VIEIRA, R. & SIMÕES, J. C. Geomorfologia glacial e contexto paleoglaciológico da Península Fildes, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 4, p. 795-809. 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v20i4.1480>
- 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. <https://doi.org/10.1038/srep38449>
- 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, n. 62, p. 65-72. 2013. <https://doi.org/10.3189/2013AoG62A037>
- SURDU, C. M., DUGUAY, C. R., BROWN, L. C. & PRIETO, F. D. Response of ice cover on shallow lakes of the North Slope of Alaska to contemporary climate conditions (1950–2011): radar remote-sensing and numerical modeling data analysis. *The Cryosphere*, v. 8, n. 1, p. 167-180. 2014. <https://doi.org/10.5194/tc-8-167-2014>
- 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 Sensing*, v. 7, n. 5, p. 6133-6159, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70506133>
- Vieira, G.; Mora, C.; Pina, P.; Schaefer, C. E. R. A proxy for snow cover and winter ground surface cooling: Mapping *Usnea* sp. communities using high resolution remote sensing imagery (Maritime Antarctica). *Geomorphology*, v. 225, p. 69-75. 2014.
- WAKABAYASHI, H. & MOTOHASHI, K. Monitoring Freezing and Thawing of Shallow Lakes in Northern Alaska Using Sentinel-1 Data. Trabalho apresentado no International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Espanha. 2018.
- ZHANG, S. & PAVELSKY, T.M. Remote Sensing of Lake Ice Phenology across a Range of Lakes Sizes, ME, USA. *Remote Sensing*, v. 11, n. 14, p. 1 -13. 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11141718>
- ZHANG, S., PAVELSKY, T. M., ARP, C. D. & YANG, X. Remote sensing of lake ice phenology in Alaska. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 6, p. 1 - 12. 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abf965>