



Mapeamento das Zonas de Neve Úmida e de Percolação por Meio do Sentinel-2 Mapping of Moist Snow and Percolation Zones Through Sentinel-2

Fernando Luis Hillebrand¹;
Cristiano Niederauer da Rosa¹ & Ulisses Franz Bremer¹

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático,
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto
Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43136, salas 208 e 210, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS – Brasil
E-mails: fernando.hillebrand@rolante.ifrs.edu.br; cristianonrd@gmail.com; bremer@ufrgs.br*

Recebido em: 02/04/2018 Aprovado em: 18/09/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_96_103

Resumo

O propósito deste trabalho consistiu em avaliar a aplicação de índices de sensoriamento remoto como o NDSI e NDSW e análises de geoprocessamento para mapear a ocorrência de água, zonas de neve em percolação e úmida, bem como a identificação das altitudes característica de cada zona de neve mapeada na Ilha Dundee situada na Península Antártica. Para tal, foi utilizada uma imagem Sentinel-2 representativa de um período de ablação correspondente ao fim do verão de 2016. Como resultado verificou-se que a interação entre os índices NDSI e NDSW possibilitou a distinção e delimitação das distintas zonas de neve. As análises de geoprocessamento que envolveram a sobreposição da classificação da cobertura da terra a partir dos índices, com os dados altimétricos advindos do Modelo Digital de Elevação ASTER GDEM, permitiram a identificação de algumas faixas altimetrias características de cada zoneamento. Na data analisada, foi identificado que 17,87% da área total da ilha foi classificada como zona de neve úmida e 81,15% como zona de neve em percolação. Contudo, estes resultados comprovam a eficácia da metodologia empregada com base em imagens do sensor MSI do satélite Sentinel-2 no mapeamento das distintas zonas de neve na área de estudo reunindo ferramentas de geoprocessamento.

Palavras-chave: NDSI; NDWS; Neve úmida; Neve em percolação; Sentinel-2

Abstract

The purpose of this work consists of an application of remote sensing indices such as NDSI and NDSW and geoprocessing analyzes to map an occurrence of water, percolation and moist snow zones, as well as an identification of the characteristic altitudes of each snow zone mapped in the Dundee Island located on the Antarctic Peninsula. For this, a Sentinel-2 image representative of an ablation period corresponding to the end of summer of 2016 was used. As a result an interaction between the NDSI and NDSW indexes allowed a distinction and delimitation of the different zones of snow. As geoprocessing analyzes that involved an overlapping of the land cover classification from the indices, with the altimetric data from the Digital Elevation Model ASTER GDEM, allowed an identification of some bands altimetry characteristic of each zoning. Data base analysis was identified with 17.87% of the total area of the island for the class of moist snow and 81.15% as zone of snow in percolation. However, these results prove the effectiveness of the methodology used based on images of the MSI sensor of the Sentinel-2 satellite in the mapping of the several snow areas in the study area, bringing together geoprocessing tools.

Keywords: NDSI; NDWS; Moist snow; Percolation snow; Sentinel-2

1 Introdução

A maioria do gelo das geleiras da Terra é encontrada nos mantos de gelo que recobrem mais de 99% do continente Antártico (13,6 milhões de Km² de gelo), o que representa 92% de todo gelo das geleiras do planeta (Christopherson, 2012).

Com uma topografia montanhosa e temperaturas médias do ar no verão superiores a 0°C, ao nível do mar a Península Antártica, tem características diferentes daquelas observadas na área central do Continente Antártico (Vaughan *et al.*, 2003). Devido a suas características geográficas ela torna-se um importante controlador do clima, da circulação marinha e da dinâmica glacial da Antártica Ocidental (King & Turner, 1997).

Segundo White *et al.* (1992) apesar do clima ser um fator dominante no regime térmico das geleiras, a topografia também apresenta significativa influencia neste regime, direcionando o padrão de precipitação, orientação da geleira, o que determina a intensidade da radiação solar recebida pela superfície, responsável por caracterizar os padrões de temperatura do solo, ar e taxas de evaporação.

As geleiras oriundas de áreas de neve permanente ocorrem tanto em regiões de altas latitudes geográficas como em regiões com elevada altitude. No entanto, Christopherson (2012) atribui a nomenclatura linha de neve, especificamente, ao local de elevação mais baixa onde a neve pode se manter durante o ano todo. Além disso, sua altitude controlada pela temperatura atmosférica e pelo volume de neve precipitada (Simões, 2004).

No que se refere ao monitoramento das zonas glaciais, o sensoriamento remoto apresenta-se como uma ferramenta interessante viabilizando a identificação dos processos de retração e avanço das geleiras. Segundo Cuffey & Paterson (2010) as zonas glaciais (Figura 1) são definidas como: i.) Zona de neve seca: onde não ocorre derretimento da neve, onde são observados apenas processos de metamorfismo na estrutura da neve. A fronteira entre esta zona e a próxima é chamada de linha de neve seca; ii.) Zona de percolação: nesta região ocorrem processos de derretimento na superfície, devido ao fato

da água poder percolar uma certa distância na neve a temperaturas abaixo de 0°C antes de congelar; iii.) Zona de neve úmida: no final do verão toda a neve depositada nesta zona desde o fim do último verão é elevada para 0°C ficando saturada de água. Caracteriza-se por ocorrer entre a linha de neve úmida e a linha de neve; iv.) Zona de gelo sobreposto: trata-se da zona da superfície de uma geleira onde ocorre derretimento total do pacote de neve na superfície, que logo após a percolação da água a mesma recongela a poucos metros de seu local de origem, formando lentes, camadas e glândulas de gelo; v.) Área de ablação: é a área abaixo da linha de equilíbrio.

Segundo Rau & Braun (2002), 80% do norte da Península Antártica é classificada como uma zona de neve em percolação.

No sensoriamento remoto para o estudo da criosfera, as diferenças na reflectância em diferentes faixas de comprimento de onda auxiliam na delimitação da geleira e de seus arredores, bem como também, na classificação dos tipos de superfície e zonas glaciais encontradas nela (Rees, 2006).

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a aplicabilidade da delimitação das distintas zonas glaciais e tipos de superfícies encontrados na Ilha Dundee, localizada na Península Antártica, por meio de índices de sensoriamento remoto como o NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) e NDWI (*Normalized Difference Water Index*), obtidos a partir do sensor MSI do satélite Sentinel-2.

2 Materiais e Métodos

A região de estudo é denominada como Ilha Dundee, localizada ao Norte da Península Antártica, entre as Latitudes 63°S e 64°S, e longitudes 54°W e 56°W, conforme ilustrado na figura 2.

2.1 Aquisição e Processamento das Imagens

Para analisar a aplicabilidade dos índices de sensoriamento remoto derivados do sensor MSI do satélite Sentinel-2, foi realizado o *download* das imagens do referido sensor, por meio do portal *Earth Explorer* da USGS (*United States Geological Sur-*

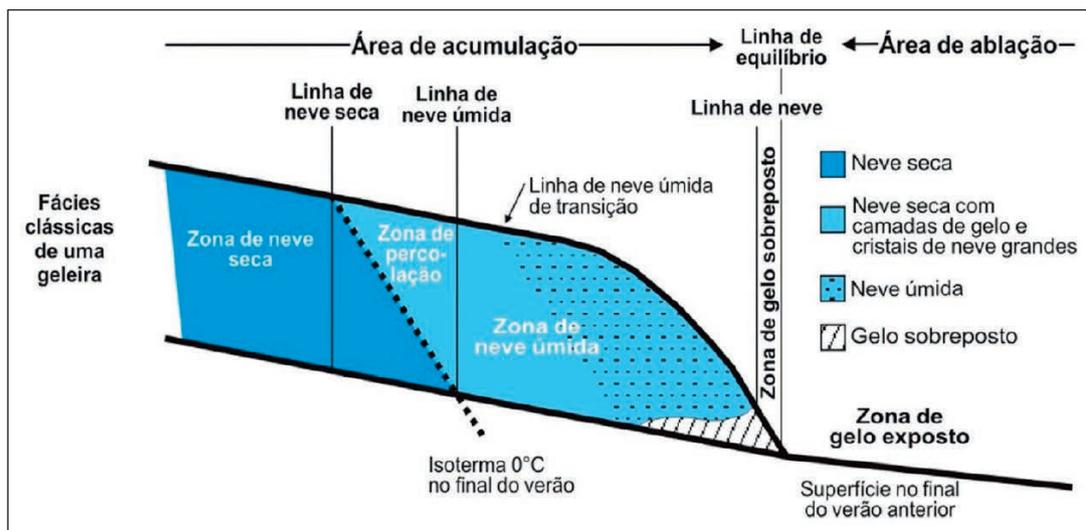


Figura 1 Zonas superficiais de geleira. Fonte: Cuffey & Paterson (2010).

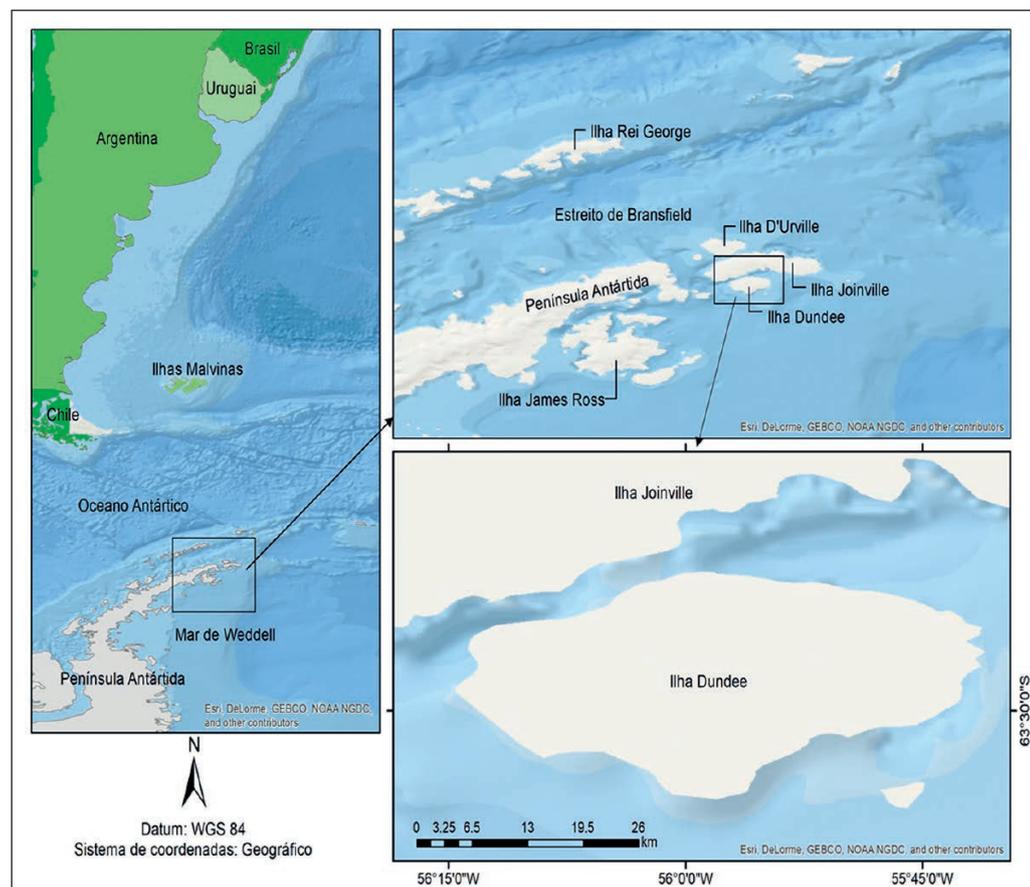


Figura 2 Localização da Ilha Dundee na Península Antártica.

vey) disponibilizado no sítio <https://earthexplorer.usgs.gov/>, referente a data de 22 de março de 2016, com ausência de nuvens na região de interesse. A adoção desta data foi devido a mesma representar um período de ablação, que coincide com o fim do verão e início da primavera no hemisfério Sul.

Na sequência foram selecionadas para análise as bandas 2 (490 nm), 3 (560 nm), 4 (665 nm), 8 (842 nm) e 11 (1.610 nm), com resoluções espaciais de 10 metros para as bandas 2, 3, 4 e 8 e de 20 metros para a banda 11 (ESA, 2017). Essas bandas foram submetidas a um pré-processamento realizado por meio

da ferramenta *Semi Automatic Classification Plugin* (SCP) (Congedo, 2013), que visou à correção dos efeitos atmosféricos pelo método de subtração do objeto escuro (DOS1). Nesta mesma ferramenta foi realizada uma reamostragem do tamanho dos pixels da banda 11, para a resolução espacial de 10 m e gerada uma composição entre todas as bandas selecionadas, dando origem a um arquivo imagem multibanda.

Após estas etapas foi realizado o recorte das bandas, bem como de sua composição, baseado em um retângulo envolvendo a área de estudo, onde foram realizadas as demais análises descritas a seguir por meio do *software* ArcGIS 10.3.

Na determinação das regiões de neve foi utilizado o NDSI, que segundo Kulkarni *et al.* (2002) e Negi *et al.* (2009), permite a discriminação entre neve e gelo, podendo mapear áreas de neve inclusive em locais cobertos por sombras ocasionadas pela topografia do local. Conforme a ESA (2017), o NDSI é composto pela razão entre as bandas da região do visível (banda 3) e outra do infravermelho médio (banda 11). Entretanto, ressaltam-se que, nas porções do visível e do infravermelho próximo do espectro, nuvens e neve refletem quantidades aproximadamente iguais de fluxo radiante, já na porção do infravermelho médio do espectro (especialmente entre 1.500 e 2.500 nm), as nuvens continuam a refletir quantidades substanciais de energia, enquanto a reflectância da neve aproxima-se de zero (Hall *et al.* 1995; Choi & Bindschadler, 2004). Esse fato faz com que o NDSI não seja usado apenas para a detecção de neve ou gelo, mas também, como indicativo da presença de nuvens no local, o que enfatiza a importância da utilização de imagens em que não há a presença de nuvens. A seguir, a equação (1) descreve a razão das bandas utilizadas para calcular o NDSI:

$$\text{NDSI} = (\text{Banda 3} - \text{Banda 11}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 11}) \quad (1)$$

Devido a incapacidade do NDSI distinguir corpos d'água de gelo, o NDWI foi empregado visando a delimitação de regiões que possam conter água, ou elevada umidade, pois devido as altas absorções da radiação de ondas curtas entre a região do visível e do infravermelho próximo pela água, a

utilização deste índice se torna mais indicada para esse fim. Segundo Ji *et al.* (2009) o uso da banda do infravermelho médio produz o limiar mais estável para diferenciar lâmina de água, podendo ser utilizado para separar a lâmina de água dos outros alvos da imagem. Deste modo, para a delimitação de regiões que possam conter água, utilizou-se o NDWI conforme mostra a equação (2):

$$\text{NDWI} = (\text{Banda 3} - \text{Banda 8}) / (\text{Banda 3} + \text{Banda 8}) \quad (2)$$

2.2 Classificação da Cobertura da Terra

A classificação da cobertura da terra foi realizada perante as informações contidas nos índices de sensoriamento remoto supracitados. Assim sendo, foram definidos alguns limiares para cada índice, com base nas características da região de estudo.

Observando os valores de NDSI em alguns locais de interesse na imagem, foram selecionados os limiares de até 0,2 para as regiões em que não havia presença de neve (floração rochosa /gelo flutuando no mar), entre 0,2 e 0,67 locais com probabilidade alta de ser uma zona de neve úmida ou água e, maior que 0,67 zonas de neve.

O limiar utilizado para a definição dos corpos d'água, aplicado no NDWI, foi determinado a partir de pixels de água do oceano livre de gelo, aos arredores da ilha. Sendo este último com valor de 0.

Mediante a adoção dos limiares acima descritos, os índices empregados foram reclassificados por meio da ferramenta *Reclassify*, cujos resultados foram combinados perante a utilização da ferramenta *Combine*, cujo resultado é uma imagem raster combinada que carrega os valores de NDSI e NDWI.

Posteriormente a imagem *raster* combinada foi convertida para arquivo vetor, no qual foi realizada uma análise por atributos, considerando as seguintes relações entre os valores encontrados nos dois índices:

- a) Água: regiões com limiares indicativos de água no NDWI;
- b) Exposição rochosa: locais onde não foram indicadas presença de neve no NDSI;

c) Neve em percolação: regiões onde não foram detectadas áreas com água pelo NDWI e classificadas como zonas de neve pelo NDSI;

d) Neve úmida: áreas em que o NDWI indicou presença de água e o NDSI indicou presença de neve em percolação ou quando o NDWI não indicou presença de água mas o NDSI indicou neve úmida.

Para avaliar a relação da topografia com a distribuição das distintas zonas de neve na ilha, foi utilizado o DEM (*Digital Elevation Model*) denominado ASTER GDEM (*Global Digital Elevation Model*), com uma resolução espacial em 30 m e acurácia vertical em 20 m, obtido através do portal *Earth Explorer* da USGS anteriormente referenciado. A partir dele foi gerada a altimetria da área, sendo realizado em sequência a sua sobreposição e intersecção com as classes temáticas do uso da terra.

3 Resultados e Discussões

Conforme Paul *et al.* (2016), a resolução espacial mais elevada do Sentinel-2 em comparação com

a do Landsat (10 m contra 30 m) aliada a sua melhor resolução temporal ajudam a reduzir dois grandes problemas: a cobertura de detritos sobre as geleiras, o que viabiliza sua delimitação com maior precisão e, a possibilidade maior de aquisição de imagens livres de nuvem no final do período da ablação com extensão mínima de neve. Portanto, a aplicação das técnicas do NDSI e do NDWI (figuras 3 e 4) em imagem Sentinel-2 poderá resultar em uma delimitação mais precisa das componentes.

A tabela 1 e a figura 5 apresentam o resultado do mapeamento das classes temáticas: água exposta, exposição rochosa, neve e regiões prováveis de neve por meio da análise de atributos. Ressalta-se que a interação entre os dois índices estudados foi importante, pois ao aplicar análises que relacionem o NDSI e NDWI, o mapeamento das diferentes zonas de neve torna-se mais eficiente, permitindo a extração de um maior número de informações espectrais fornecido pelo sensor.

Avaliando a tabela 1, constata-se que 17,87% do total da área da Ilha Dundee foi mapeada como neve úmida, o que já era esperado por tratar-se de um

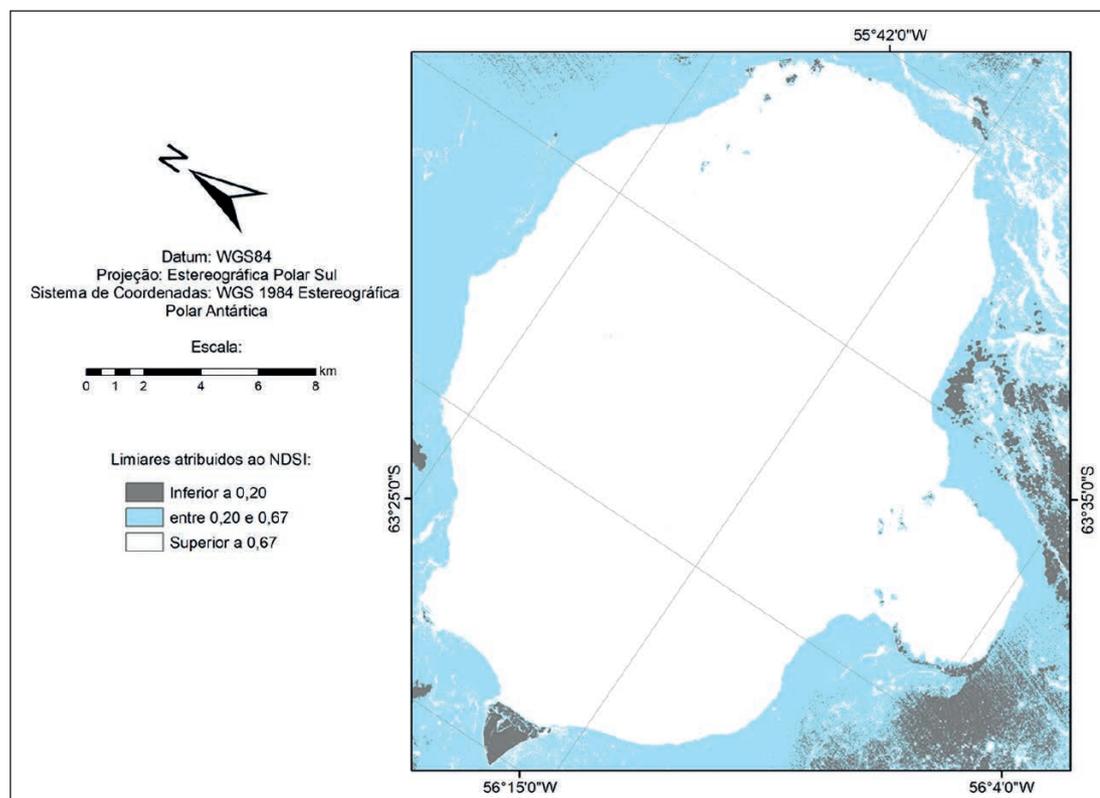


Figura 3
Imagem classificada pelos limites do NDSI.

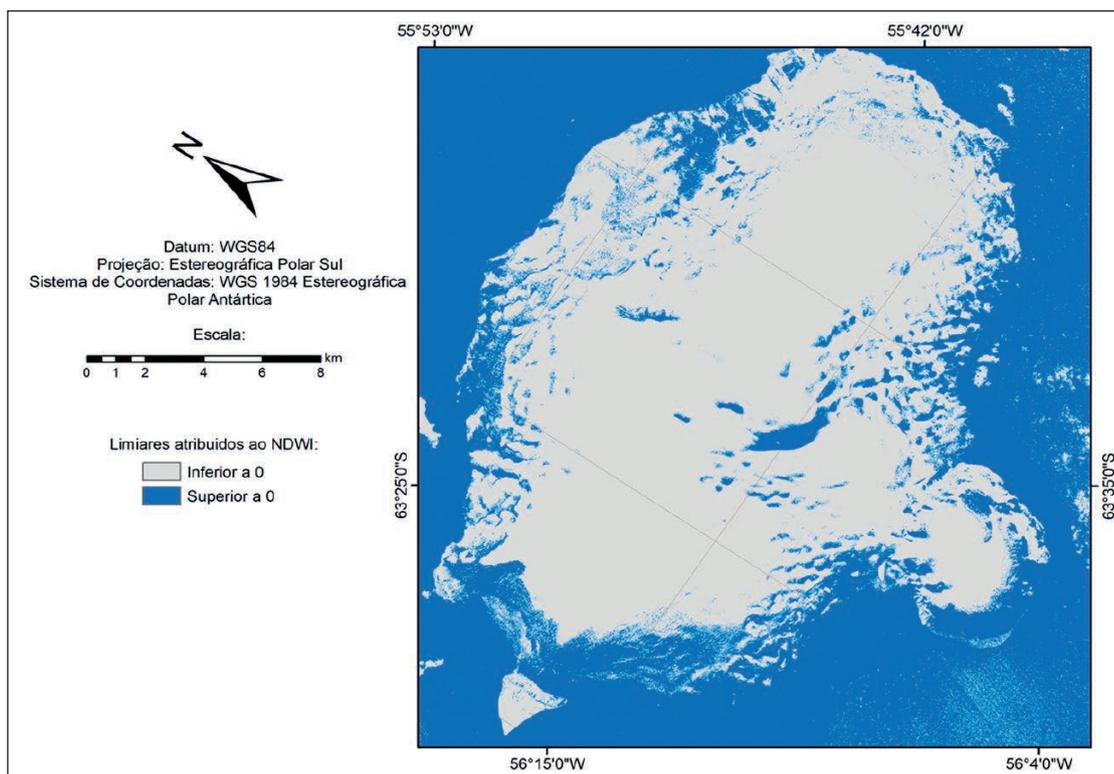


Figura 4
 Imagem clas-
 sificada pelos
 limiares do
 NDWI.

Classe Temática	Área (Km ²)	Percentual em Relação a Área Total (%)
Neve úmida	64,47	17,87
Neve em percolação	292,76	81,15
Água	0,11	0,03
Exposição rochosa	3,37	0,93
Total	360,71	100,00

Tabela 1 Área mapeada para cada classe temática, com seu respectivo percentual levantado em relação a área total da Ilha Dundee

período correspondente ao fim do verão e, 81,15% da ilha consiste em regiões de neve em percolação. Esta grande área classificada como zona de neve em percolação se deve ao fato da Ilha Dundee possuir baixas altitudes ortométricas.

Para avaliar a influência da topografia da área na distribuição das classes temáticas, foi realizado a sobreposição e a intersecção dos vetores de cobertura da terra com a altimetria gerada por meio da imagem ASTER GDEM (tabela 2 e figura 6).

Analisando a tabela 2, observa-se que a altitude média da zona de neve em percolação situa-se em 261,28 m. Este fator confirma a classificação correta

Classe Temática	Altitude Mínima (m)	Altitude Média (m)	Altitude Máxima(m)
Neve úmida	0	261,28	703
Neve em Percolação	0	134,52	613
Água	0	90,74	540
Exposição Rochosa	0	21,30	462

Tabela 2 Distribuição altimétrica para cada classe temática na Ilha Dundee

desta zona de neve, pois um dos fatores para a classificação de uma determinada região em zona de neve seca é sua altitude. Nos trabalhos de Arigony-Neto *et al.* (2007), as zonas de radar para neve seca ocorrem apenas acima de 800 e 1.200 m de altitude, respectivamente, nas partes sul e norte da Península Antártica. Já Peel (1992) delimita as zonas de neve seca em regiões localizadas com uma temperatura média anual inferior a -11°C. Com base nas temperaturas médias anuais das estações que cercam a Península Antártica, Rau & Braun (2002) estimaram em seus trabalhos a altitude da isoterma -11°C, adotando um limite altimétrico em 800 m para áreas ao norte de 67,5° S e 600 m para regiões ao sul.

Mapeamento das Zonas de Neve Úmida e de Percolação por Meio do Sentinel-2
 Fernando Luis Hillebrand; Cristiano Niederauer da Rosa & Ulisses Franz Bremer

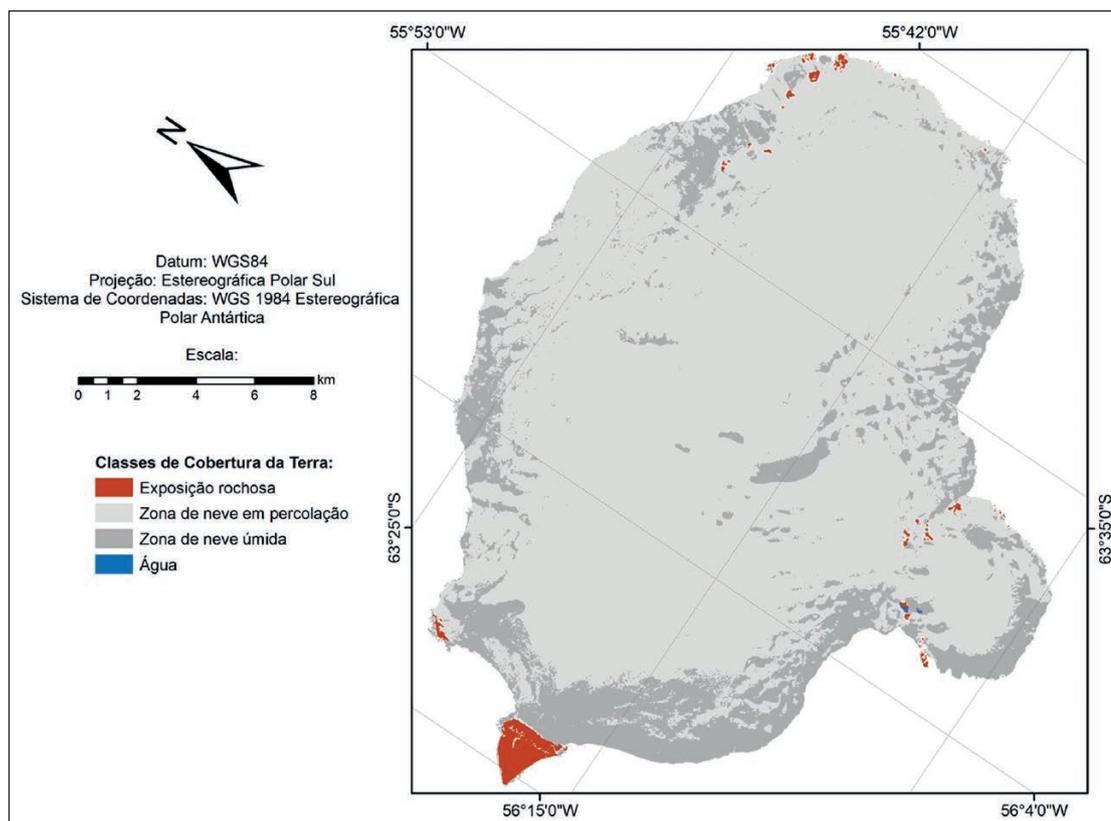


Figura 5 Imagem reclassificada por meio da aplicação do NDSI e NDWI.

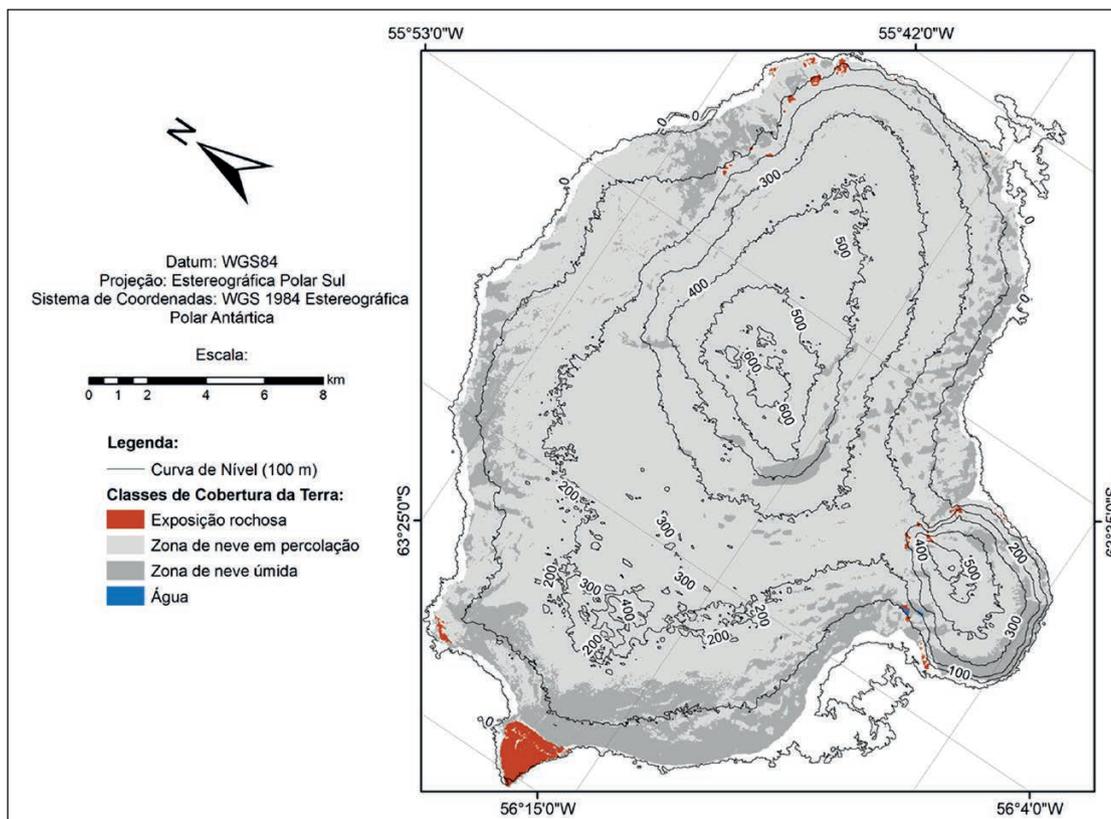


Figura 6 Imagem reclassificada por meio da aplicação do NDSI e NDWI sobreposta ao Modelo Digital de Elevação do ASTER GDEM.

Além disso, entre as altitudes 703 m a 462 m não foram detectadas regiões com exposição rochosa e a presença de água no continente só foi encontrada em altitudes inferiores a 540 m, sendo que, os corpos d'água delimitados em regiões de altitudes mais elevadas, fornecem indícios da presença de lagos supraglaciais oriundos do degelo, que devido às características topográficas da área, acumulam-se em regiões de depressão.

4 Conclusões e Recomendações

As imagens do sensor MSI do satélite Sentinel-2 apresentarem elevado potencial no mapeamento das distintas zonas de neve na área de estudo. A metodologia aplicada demonstrou-se eficaz, revelando a importância da interação entre técnicas de sensoriamento remoto multiespectral e geoprocessamento, podendo ser aplicada no mapeamento das zonas de neve do Continente Antártico ou em outras regiões com acúmulo de neve, porém limitado zonas com altitude inferior a 800 m ou com isoterma de temperatura média anual superior a -11°C .

Constatou-se neste trabalho também, que a aplicação isolada de cada um destes índices de diferença normalizada, não possibilita a distinção correta das regiões de água e neve, uma vez que a zona de neve úmida também absorveu a radiação de ondas curtas entre a região do visível e do infravermelho próximo, classificando incorretamente áreas de neve como água, o que valoriza ainda mais a interação entre os índices de sensoriamento remoto, que permitiu a delimitação das regiões de neve úmida ou em percolação, característicos da área analisada na data estudada.

Já a análise da influência da topografia na distribuição espacial das classes de cobertura da terra, constatou-se que as áreas de água e exposição rochosa encontram-se em altitudes ortométricas mais baixas em relação a zonas de neve em percolação. Além disso, a topografia também auxiliou na caracterização da zona de neve predominante na Ilha Dundee, sendo neste caso a neve em percolação devido às altitudes baixas da ilha, com média de 261,28 m.

5 Agradecimento

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Cód-

go de financiamento 001, e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo fomento ao desenvolvimento desta pesquisa.

6 Referências

- Arigony-Neto, J.; Rau, F.; Saurer, H.; Jaña, R.; Simões, J.C. & Vogt, S. 2007. A time series of SAR data for monitoring changes in boundaries of glacier zones on the Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 46: 55-60.
- Choi, H. & Bindschadler, R. 2004. Cloud Detection in Landsat Imagery of Ice Sheets using Shadow Matching Technique and Automatic Normalized Difference Snow Index Threshold Value. *Remote Sensing of Environment*, 91: 237-242.
- Christopherson, R.W. 2012. *Geossistemas: uma introdução e geografia física*. 7.ed. Porto Alegre: Bookman. 728p.
- Congedo, L. 2013. Semi-automatic classification plugin for QGIS. *Sapienza Univ*: 1-25.
- Cuffey, K. & Paterson, W.S.B. 2010. *The Physics of Glaciers*. 4.ed. Oxford: Pergamon/Elsevier Science. 380p.
- ESA. 2017. *European Space Agency*. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-m-si>. Acesso em: 08 de Julho de 2017.
- Hall, D.K.; Riggs, G.A. & Salomonson, V.V. 1995. Development of Methods for Mapping Global Snow Cover using Moderate Resolution Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 54: 127-140.
- Ji, L.; Li Z. & Bruce W. 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75: 1307-1317.
- King, J.C. & Turner, J. 1997. *Antarctic Meteorology and Climatology*. Cambridge: Cambridge University Press. 409p.
- Kulkarni, A.V.; Srinivasulu, J.; Manjul, S.S. & Mathur, P. 2002. Field based spectral reflectance to develop NDSI method for the snow cover. *J. Indian Soc. Remote Sensing*, 30: 73-80.
- Negi, H.S.; Kulkarni, A.V. & Semwal, B.S. 2009. Estimation of snow cover distribution in Beas basin, Indian Himalaya using satellite data and ground measurements. *Journal Earth System Science*, 118: 525-538.
- Paul, F.; Winsvold, S.H.; Kaab, A.; Nagler, T. & Schwaizer, G. 2016. Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 575: 1-15.
- Peel, D.A. 1992. Spatial temperature and accumulation rate variations in the Antarctic Peninsula. Cambridge, *British Antarctic Survey*.
- Rau, F. & Braun, M. 2002. The regional distribution of the dry-snow zone on the Antarctic Peninsula North of 70°S . *Annals of Glaciology*, 34: 95-100.
- Rees, G.W. 2006. *Remote Sensing of Snow and Ice*. Londres: Taylor and Francis. 285p.
- Simões, J.C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4: 119-154.
- Vaughan, D.G.; Marshall, G.J.; Connolley, W.M.; Parkinson, C.; Mulvaney, R.; Hodgson, D.A.; King, J.C.; Pudsey, C.J. & Turner, J. 2003. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climate Change*, 60: 243-274.
- White, I.D.; Mottershead, D.N. & Harrison, S. 1992. *Environmental System: An introductory text*. 2.ed. Londres: Chapman & Hall. 616p.