

Estudo das variações espaço-temporais de fácies de geleiras da região nordeste da península Antártica (1993-2000) através de imagens ERS AMI SAR

Cláudio Wilson Mendes Júnior¹
Jorge Arigony-Neto²
Rafael da Rocha Ribeiro¹
Jefferson Cardia Simões¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/NUPAC
Caixa Postal 96 – 91501-970 – Porto Alegre-RS, Brasil
geoclaudio@yahoo.com.br

² Universidade Federal do Rio Grande – FURG/ICHI
Av. Itália, km 8 - 96201-900 – Rio Grande - RS, Brasil
jorgearigony@furg.br

Abstract. ERS AMI SAR images acquired in the summer 1993 and 1996-97 and spring 1996 and 2000 were used for analyses of spatio-temporal variations of glacier facies (GF, i.e., dry-snow zone, percolation zone, wet-snow zone and glacier ice) on the northeastern region of the Antarctic Peninsula (AP). The study area includes James Ross, Vega, Eagle and Corry islands and the northern region of the Trinity Peninsula. Algorithms based on decision rules were developed to discrimination of the GF in ERS AMI SAR images. Total areas and maximum values of altitude of the GF were calculated and images of variation and frequency in these zones were generated by using GIS spatial analysis tools. Furthermore, the GF dynamics were compared with mean daily surface air temperatures measured by meteorological stations. Significant changes were observed on the GF in the AP from 1993 to 2000. The GF dynamics showed good correlations with interannual and sazonal variations of the surface air temperatures. The spatio-temporal variations were interpreted as responses of the diferent glaciers to the climatic, oceanographic and topographic parameters. The highest variations in GF were detected on the east side of Trinity Peninsula, northwestern region of James Ross island, eastern tip of Vega island and western part of Eagle island.

Palavras-chave: *glacier facies, Antarctic Peninsula, fácies glaciais, península Antártica, ERS AMI SAR.*

1. Introdução

Mudanças significativas em sistemas glaciais da península Antártica (PA) foram observadas nas últimas décadas, como a retração de frentes de geleiras, desintegração de plataformas de gelo e redução do gelo marinho sazonal. Neste contexto, um grande número de geleiras dessa região apresentou variações nos balanços de massa e energia superficial, nos padrões de acumulação e ablação e na aceleração do fluxo glacial (Arigony-Neto, 2006).

A análise de variações espaço-temporais de fácies ou zonas superficiais características das geleiras, como as zonas de neve seca, percolação, neve úmida e gelo exposto (Paterson, 1994), pode fornecer evidências para a detecção de mudanças climáticas e glaciológicas que estão ocorrendo na PA (Rau *et al.* 2001).

Imagens de Sensoriamento Remoto (SR) podem ser aplicadas no estudo da dinâmica dessas zonas superficiais de neve e gelo (ZSNG) em uma escala espacial e temporal adequadas para estudos glaciológicos (Vogt e Braun, 2004). Essas imagens multitemporais podem contribuir para o estudo das ZSNG, sobretudo em áreas de difícil acesso e com altos custos logísticos, como as regiões polares (Bremer *et al.*, 2004).

Dentre os diferentes tipos de imagens que podem ser aplicadas nestes estudos, as imagens de RADAR têm a vantagem de serem obtidas sem interferências da cobertura de nuvens ou independente da iluminação solar, que são condições frequentemente desfavoráveis para o estudo das regiões polares, especialmente da PA (Bremer *et al.*, 2004).

Imagens SAR (RADAR de Abertura Sintética) foram utilizadas em diversos estudos para o monitoramento de ZSNG da PA (Braun *et al.*, 2000; Rau *et al.*, 2001, 2004; Rau e Braun, 2002; Rau, 2003; Arigony-Neto, 2006; Arigony-Neto *et al.*, 2006, 2007).

Este estudo tem como objetivo o uso de imagens SAR do Instrumento de Microondas Ativo (AMI) dos Satélites de Sensoriamento Remoto Europeus 1 e 2 (ERS-1/2) no monitoramento de variações espaço-temporais de ZSNG da PA.

2. Área de estudo

A área de estudo abrange parte da região setentrional da PA (Figura 1), também conhecida como península Trinity (PT), e um arquipélago à leste desta península, onde estão localizadas as ilhas James Ross (IJR), Vega (IV), Eagle e Corry (IEC), entre as latitudes $63^{\circ}15'S$ e $64^{\circ}30'S$ e as longitudes $56^{\circ}20'O$ e $59^{\circ}00'O$. O arquipélago estudado é banhado pelo mar de Weddell e separado da PT pelo canal Príncipe Gustav (Figura 1).

Os limites da área de estudo foram definidos na área de recobrimento das imagens ERS AMI SAR (órbitas-ponto: 109-4923 e 381-4923). Além das imagens com maior área de recobrimento sobre a IJR (Área 1 - 4.768 km^2), foram utilizadas imagens da área de intersecção entre as diferentes órbitas (Área 2 - 3.183 km^2), para aumentar a série temporal de dados.

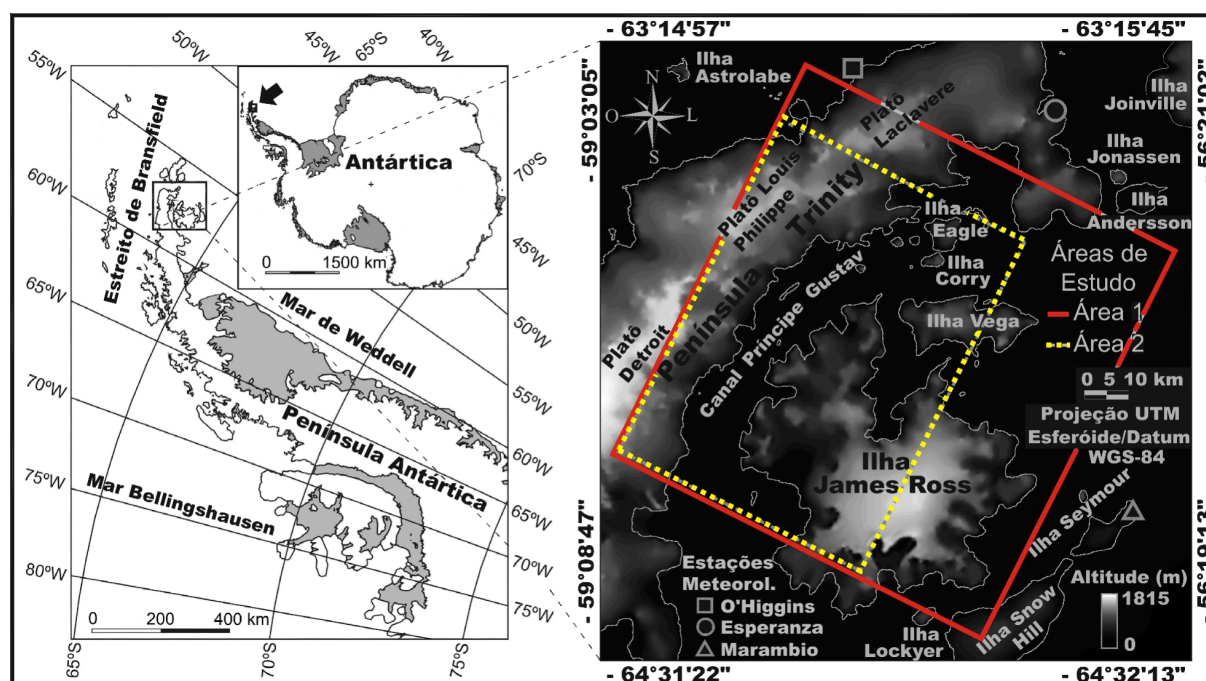


Figura 1. Área de recobrimento das imagens ERS AMI SAR na península Antártica

3. Estudo de zonas superficiais de neve e gelo através de imagens RADAR

Imagens de RADAR podem ser aplicadas no estudo de geleiras, inclusive na detecção de suas fácies superficiais. Segundo Paterson (1994), uma geleira pode apresentar cinco tipos de fácies ou zonas: zona de neve seca, zona de percolação, zona de neve úmida, zona de gelo sobreposto e área de ablação (Figura 2). A altitude dos limites dessas fácies (linha de percolação, linha de neve úmida e linha de neve) é variável no tempo, respondendo a mudanças nos balanços de energia e de massa das geleiras (Arigony-Neto, 2006).

As fácies clássicas definidas por Paterson (1994) foram discriminadas em imagens SAR da PA em estudo de Rau *et al.* (2001). Neste estudo, valores limiares de coeficiente de retroespalhamento foram utilizados para identificar quatro zonas de RADAR: zona de RADAR de neve seca, de percolação, de neve úmida e de gelo exposto (Figura 2).

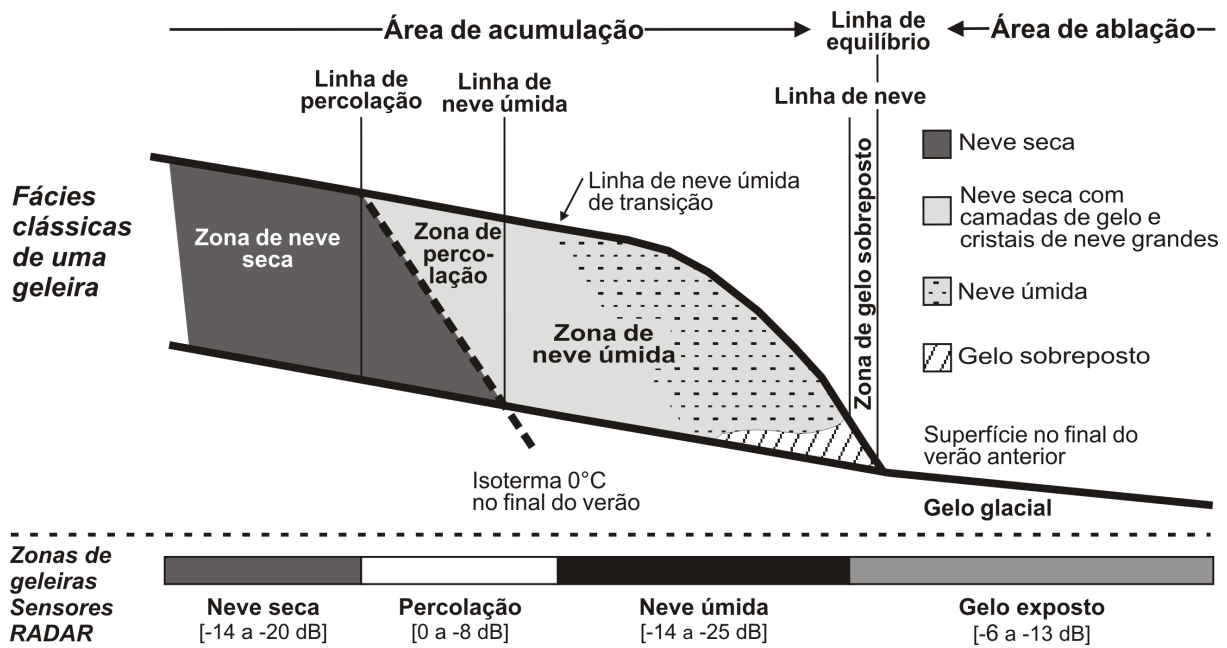


Figura 2. Fácies clássicas de uma geleira, segundo Paterson (1994), e comportamento espectral das fácies de geleiras detectadas por RADAR. Fonte: Rau *et al.* (2001).

4. Metodologia

As variações das ZSNG da PA foram analisadas através do processamento e classificação de um conjunto de seis imagens ERS AMI SAR obtidas na primavera e verão de 1996 e no verão de 1997, em duas diferentes órbitas. Além disso, foram utilizadas duas outras imagens desse mesmo sensor, sendo uma obtida no verão de 1993 e outra na primavera de 2000, que foram classificadas e comparadas com imagens da serie temporal 1996-1997.

4.1. Importação das imagens

Os arquivos ERS AMI SAR foram importados para o programa BEST (*Basic Envisat – and ERS – SAR Toolbox*), que foi utilizado para a reconstrução das imagens (Figura 3).

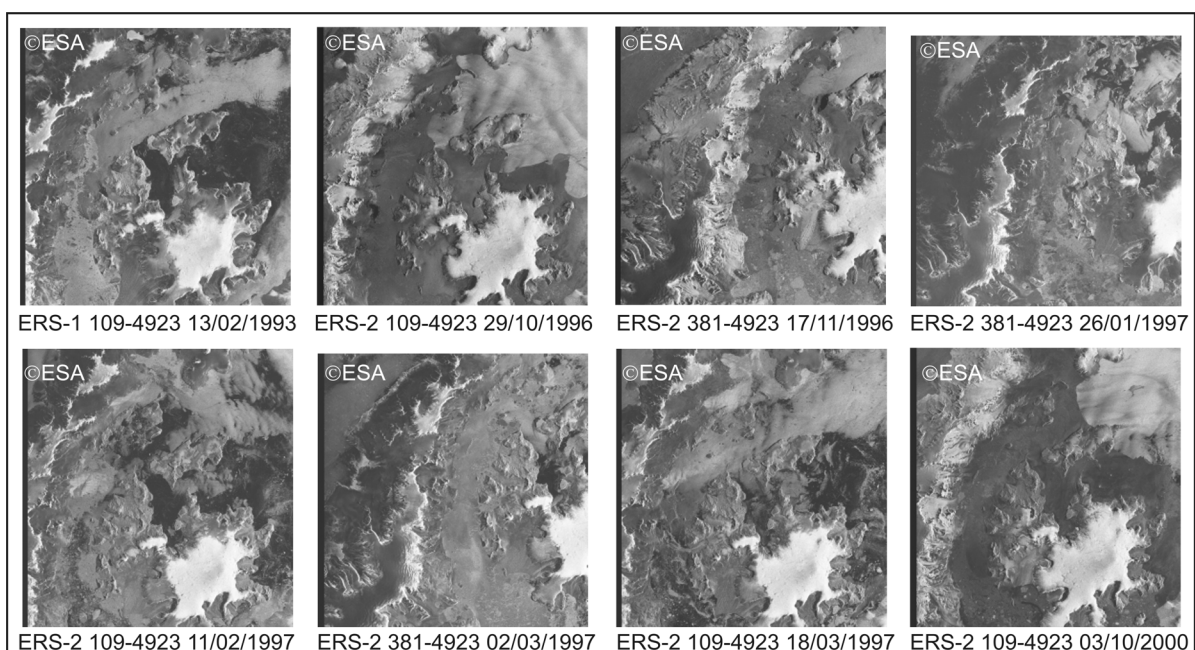


Figura 3. Órbitas-ponto e datas de aquisição das imagens ERS AMI SAR

4.2. Calibração radiométrica

Através do BEST, as imagens de amplitude foram convertidas para imagens de potência e estas últimas foram então convertidas para imagens *sigma nought* (σ^0), em decibéis.

4.3. Co-registro das imagens

Neste estudo, sete imagens foram co-registradas a uma imagem de referência selecionada. O BEST processa o co-registro de forma automática, sem a necessidade da seleção manual de pontos de amarração. No co-registro, nenhum erro médio quadrático foi superior a 0,3 pixels. O método de reamostragem utilizado foi o de convolução cúbica.

4.4. Filtragem do ruído *speckle*

Para a filtragem do ruído *speckle* foi utilizado o programa ERDAS *Imagine*TM (*Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC*). As imagens foram filtradas com o uso de um filtro do tipo mediana, com uma janela móvel 5 x 5. Segundo Arigony-Neto (2006), o filtro mediana, além de apresentar alta eficiência computacional, é um dos métodos mais eficientes no processamento de imagens SAR para a classificação de ZSNG.

4.5. Ortorectificação das imagens

Para o georreferenciamento das imagens, foram utilizados pontos de controle do terreno (PCTs) obtidos a partir do mosaico do projeto *Geoscientific Information System Antarctica* (GIA) (Bennat *et. al.*, 1998). Os dados de elevação do terreno foram extraídos de uma subcena do MDE do *Radarsat Antarctic Mapping Project* (RAMP) (Liu *et. al.*, 2001).

A correção geométrica das imagens ERS SAR foi processada com o uso do MDE RAMP e com a definição do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator, zona 21 sul e com o esferóide e *datum World Geodetic System 1984* (UTM 21S WGS84) para as imagens de saída. Para o georreferenciamento, foram escolhidos cinco PCTs na imagem de referência (mosaico GIA) e em feições homólogas da imagem ERS SAR utilizada como referência para o co-registro. Como as imagens já estavam co-registradas, o modelo desenvolvido para a correção geométrica da imagem de referência foi utilizado para a correção das demais. No georreferenciamento das imagens, o erro médio quadrático foi inferior a um pixel. O método de reamostragem utilizado foi o de convolução cúbica.

4.6. Classificação das imagens

As imagens ortorectificadas foram utilizadas para a classificação das ZSNG da área de estudo. Primeiramente, estas imagens foram cruzadas com uma máscara da linha de costa, obtida a partir da Base de Dados Digitais da Antártica (ADD) (SCAR, 2000).

Para a classificação das ZSNG, foi desenvolvido um algoritmo de classificação por regras de decisão, que foi implementado na Linguagem de Modelagem Espacial (*Spatial Modeler Language - SML*) do ERDAS *Imagine*TM. Neste algoritmo, foram definidos limiares do coeficiente de retroespalhamento para cada ZSNG, baseado nos limiares σ^0 das zonas de geleira detectadas por RADAR da PA definidos por Rau *et. al.* (2001) e validados por Arigony-Neto *et al.* (2007) (Figura 2).

A cobertura superficial de rochas, presente nas imagens ERS AMI SAR, não foi classificada através do uso desse algoritmo, devido à confusão espectral das rochas com ZSNG. Assim, essa classe foi eliminada a partir da utilização dos vetores das áreas de rochas da PA, do ADD (SCAR, 2000), que foram sobrepostos às imagens classificadas.

4.7. Elaboração dos mapas temáticos

As imagens classificadas foram utilizadas para a elaboração de mapas temáticos multitemporais das ZSNG e rochas da área de estudo (Figura 4).

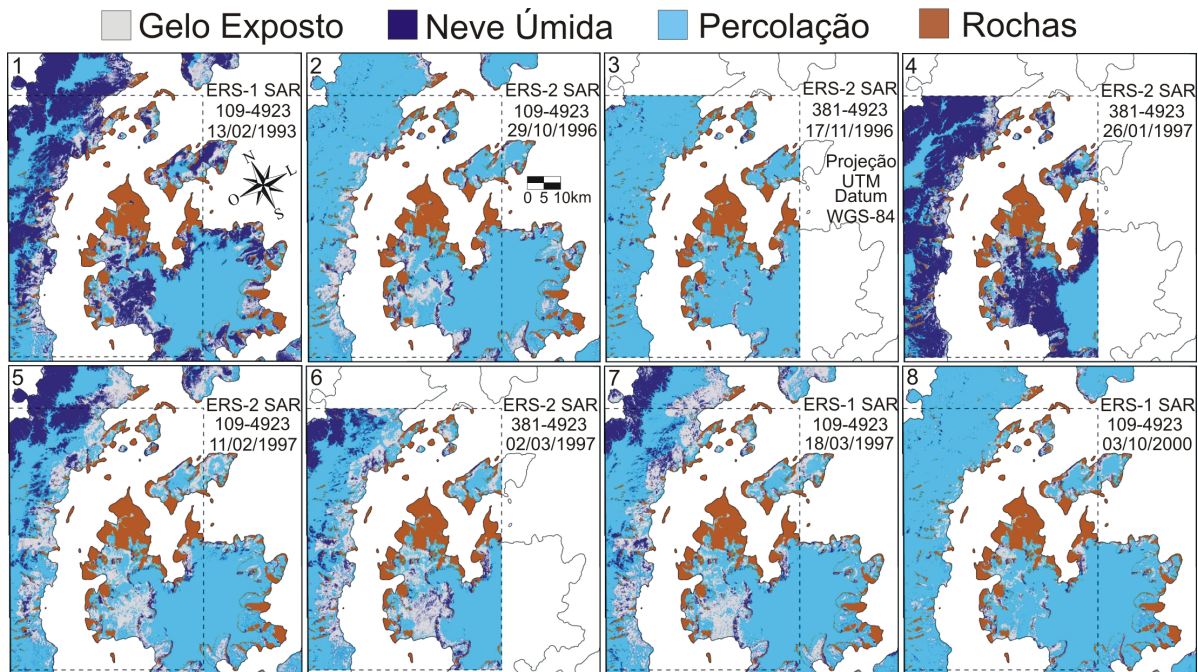


Figura 4. Mapas temáticos multitemporais das ZSNG e rochas da área de estudo

4.8. Análise dos dados multitemporais em Sistema de Informações Geográficas (SIG)

Devido a diferenças na resolução temporal das áreas 1 e 2 (Figura 1), duas séries temporais foram organizadas para a análise espacial das ZSNG: série temporal 1 e 2.

As imagens classificadas, o MDE RAMP, dados de classificação morfológica de geleiras da área de estudo do projeto GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*– Rau *et al.*, 2005) e a máscara da área de estudo foram armazenados no SIG ArcGIS™ (ESRI, Inc.).

Neste SIG, a variabilidade das ZSNG da área de estudo foi analisada para as séries temporais 1 e 2. Os resultados obtidos foram imagens com índices de frequência e variabilidade das ZSNG (Figura 5), sendo uma imagem para cada série temporal analisada.

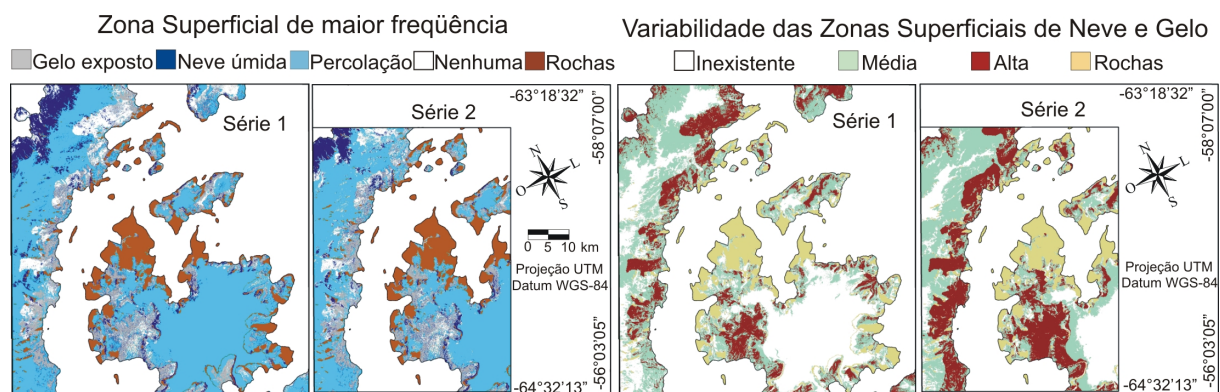


Figura 5. ZSNG mais freqüentes e variabilidade das ZSNG nas séries temporais 1 e 2

Operações de tabulação cruzada entre as imagens classificadas das séries 1 e 2 (Figura 4), a imagem-máscara (Figura 1) e o MDE RAMP foram processadas para o cálculo das áreas e altitudes máximas das ZSNG da área de estudo durante o período 1993-2000 (Figura 6).

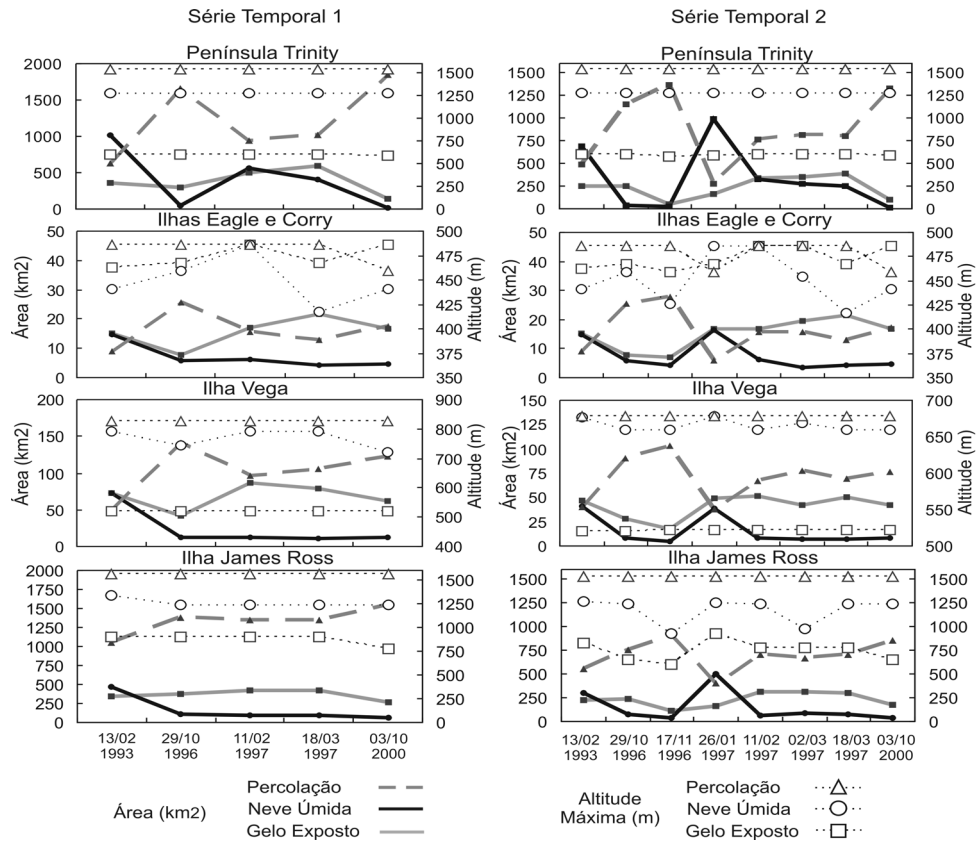


Figura 6. Área e altitude máxima das ZSNG nas séries temporais 1 e 2

4.9. Temperatura média diária do ar superficial durante o período estudado

Os dados de áreas e alturas máximas das ZSNG das séries temporais foram comparados com dados da temperatura média diária do ar superficial de três estações meteorológicas localizadas próximas da área de estudo: General Bernardo O'Higgins (63°19' S e 57° 54' O – 10 m n.m.m), Marambio (64°14' S e 56°37' O – 198 m n.m.m) e Esperanza (63°24' S e 57°00' O – 13 m n.m.m) (Figuras 1 e 7).

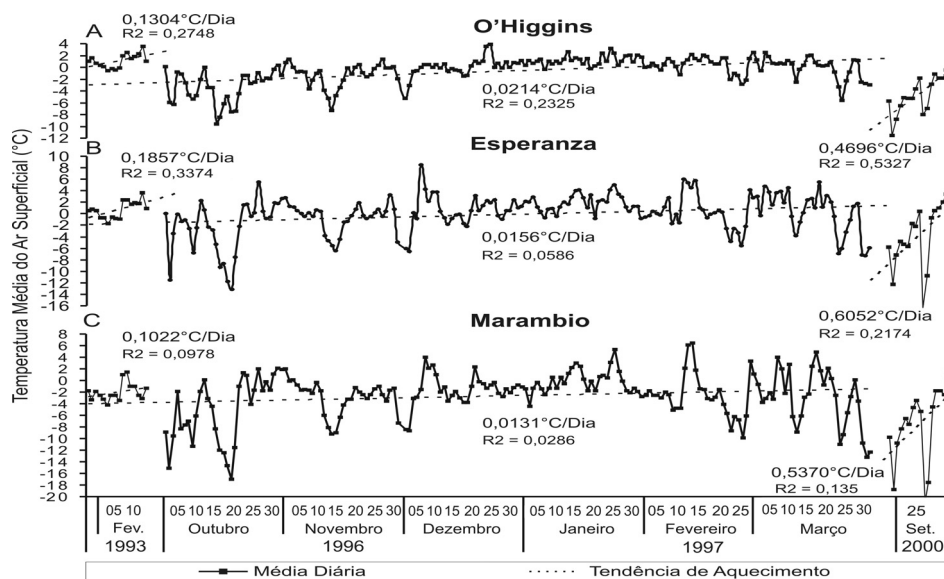


Figura 7. Temperatura média diária do ar superficial durante o período estudado, nas estações O'Higgins, Marambio e Esperanza. Fonte: *British Antarctic Survey* (BAS, 2008).

5. Conclusões

Com base na análise dos dados multitemporais produzidos, conclui-se que mudanças significativas ocorreram nas ZSNG da área de estudo durante o período 1993-2000, principalmente nas áreas de menores altitudes, onde os processos glaciais foram mais intensos.

Através da análise das imagens e dos dados tabulados dos índices de variabilidade das ZSNG, verificou-se que as áreas de maior variabilidade da PT estão localizadas na costa leste, na altitude máxima de 590 m. Nessas áreas, predominam geleiras de descarga com terminações no mar e, em menor número, geleiras com terminações na terra, segundo classificação de Rau *et. al* (2005).

As áreas de maior altitude da área de estudo não apresentaram variações nas ZSNG e estão localizadas nas calotas de gelo do platô Laclavere e Louis Philippe e da IV e IJR. Variações significativas nas ZSNG foram observadas na região oeste da ilha Eagle (em calota de gelo com terminações no mar) e na região leste da IV, onde ocorre uma calota de gelo e várias geleiras de descarga com terminações na terra e no mar (Rau *et al.*, 2005).

Áreas de maior variabilidade foram identificadas em toda a costa da IJR, na altitude máxima de 830 m. Na IJR, variações de maior expressão ocorreram na região noroeste, caracterizada por várias geleiras de montanha, de vale, de descarga e calotas de gelo com terminações na terra e no mar. Variações significativas nas ZSNG da IJR também ocorreram na região norte, onde predominam geleiras de montanha e de vale, com terminações na terra, e na região leste, caracterizada por geleiras de descarga, de vale, de montanha e campos de neve, na sua maioria com terminações na terra (Rau *et al.*, 2005).

A dinâmica das ZSNG da área de estudo está relacionada com a grande variabilidade climática interanual e sazonal da região nordeste da PA. A alta variabilidade na temperatura média diária do ar superficial e a alta frequência de dias com temperaturas positivas ao longo do período 1996-97 (Figura 7) provocaram mudanças significativas nas ZSNG. As variações das áreas das ZSNG na PT apresentaram alta correlação com as temperaturas médias diárias do ar superficial. Para as variações de altitude máxima das ZSNG, não foi observada uma correlação significativa com os registros de temperatura.

A temperatura média diária do ar superficial, apesar de ser um dos principais parâmetros meteorológicos que influenciam no balanço de energia do pacote de neve, não pode ser considerada como um fator único para explicar as variações nas ZSNG. Outros fatores devem ser considerados, como eventos de precipitação e ventos, assim como a morfologia de geleiras e processos relacionados. Além de todos esses fatores, variações nas ZSNG podem ser influenciadas por fatores oceânicos (temperatura, correntes, etc.), principalmente em geleiras de maré, que apresentam terminações sob ação direta do oceano.

Com relação à metodologia proposta, os resultados da análise de imagens demonstraram um grande potencial de sua aplicação na geração de uma base de dados multitemporal de boa resolução, para o monitoramento das ZSNG.

As imagens ERS AMI SAR apresentaram resoluções espacial e temporal adequadas para o estudo da dinâmica das ZSNG da área de estudo. A metodologia de classificação de imagens baseada em regras de decisão, de fácil implementação e com baixo tempo computacional, produziu resultados satisfatórios para o monitoramento das ZSNG estudadas.

Agradecimentos

Este estudo foi realizado como contribuição a dois projetos financiados pelo CNPq: (1) Expedições multidisciplinares ao manto de gelo Antártico (520190/2006-8) e (2) Impacto das mudanças climáticas nas massas de gelo da Península Antártica (550041/2007-9). As imagens ERS-1/2 AMI SAR foram gentilmente fornecidas pelo Instituto de Geografia Física da Universidade de Freiburg (Alemanha). Os autores são apoiados por bolsas do CNPq.

Referências Bibliográficas

Arigony-Neto, J. **Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula – a centerline approach combining satellite and GIS data**. 2006. 136 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade de Freiburg (Albert-Ludwigs), Freiburg, 2006.

Arigony-Neto, J.; Saurer, H.; Jaña, R.; Rau, F.; Simões, J.C.; Goßmann, H. Monitoring snow parameters on the Antarctic Peninsula using satellite data: a new methodological approach. **EARSel eProceedings**, v.1, n.5, p.100-110, 2006.

Arigony-Neto, J.; Rau, F.; Saurer, H.; Jana, R.; Simões, J. C.; Vogt, S. A time series of SAR data for monitoring changes in boundaries of glacier zones on Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v.1, n.46, p.55-60, 2007.

BAS. **Surface data. Marambio, Esperanza and O'Higgins meteorological stations. Surface Data**. Cambridge: British Antarctic Survey, 2008. Disponível em: <<http://www.antarctica.ac.uk/met/metlog>> Acesso em: 10 jan. 2008.

Bennat, H.; Heidrich, H.; Grimm, J. Sievers, J.; Walter, H.; Wiedemann, A. Das "Geowissenschaftliche Informationssystem Antarktis" (GIA) am Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG). In: GOßMANN, H. (Org.) **Patagonien und Antarktis – Geofernerkundung mit ERS-1-Radarbildern**. Göttingen: Justus Perthes, 1998. p.13-34. (Petermanns Geographische Mitteilungen, 287)

Braun M.; Rau, F.; Saurer, H.; Goßmann, H. Development of radar glacier zones on the King George Island ice cap, Antarctica, during the austral summer 1996/97 as observed in ERS-2 SAR-data. **Annals of Glaciology**, n.31, p.357-363, 2000.

Bremer, U. F.; Arigony-Neto, J.; Simões, J. C. Teledetecção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. **Pesquisa Antártica Brasileira**, n.4, p.37-48, 2004.

Liu, H., Jezek, K.C.; Zhao, L.; Zhao, Z. **RADARSAT Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2**. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2001. Disponível em: <<http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html>> Acesso em: 11 out. 2007.

Paterson, W.S.B. **The physics of glaciers**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 480 p.

Rau F.; Braun, M.; Friedrich, F.; Weber, F.; Goßmann, H. Radar glacier zones and its boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. **EARSel eProceedings**, v.1, n.1, p.317-27, 2001.

Rau, F.; Braun, M. The regional distribution of the dry snow zone on the Antarctic Peninsula north of 70° south. **Annals of Glaciology**, n.34, p.95-100, 2002.

Rau, F. The upward shift of the dry snow line on northern Antarctic Peninsula. **EARSel eProceedings**, v.1, n.2, p.113-121, 2003.

Rau, F.; Mauz, F.; De Angelis, H.; Jaña, R.; Arigony-Neto, J.; Skvarca, P.; Vogt, S.; Saurer, H.; Goßmann, H. Variations of glacier frontal positions on the northern Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, n.39, p.525-530, 2004.

Rau, F.; Mauz, F.; Vogt, S.; Khalsa, J.S; Raup, B. **GLIMS regional Center Antarctic Peninsula**. Freiburg: Freiburg University (Albert-Ludwigs), 2005. 36 p. Disponível em <http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf> Acesso em: 11 out. 2007.

SCAR. **Antarctic Digital Database. Version 3**. Cambridge: Scientific Committee on Antarctic Research, 2000. Disponível em: <http://www.nerc-bas.ac.uk/public/magic/add_home.html> Acesso em: 11 out. 2007.

Vogt, S.; Braun, M. Influence of glaciers and snow cover on terrestrial and marine ecosystems as revealed by remotely-sensed data. **Pesquisa Antártica Brasileira**, n.4, p.105-118, 2004.