

Uso de imagens ERS SAR no monitoramento de zonas superficiais de neve e gelo da região nordeste da Península Antártica

Cláudio Wilson MENDES JÚNIOR¹, Jorge ARIGONY-NETO², Rafael da Rocha RIBEIRO¹ & Jefferson Cardia SIMÕES¹

1. Centro Polar e Climático, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mails: geoclaudio@yahoo.com.br, rrr3@pop.com.br, jefferson.simoies@ufrgs.br.

2. Laboratório de Monitoramento da Criosfera, Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Universidade Federal do Rio Grande. Av. Itália, km 8, CEP 96201-900, Rio Grande, RS, Brasil. E-mail: jorgearigony@furg.br.

Recebido em 12/2008. Aceito para publicação em 11/2009.

Versão online publicada em 29/05/2010 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Imagens ERS SAR adquiridas no verão austral de 1993 e 1996-97 e primavera de 1996 e 2000 foram usadas para a análise das variações espaço-temporais de fácies ou zonas superficiais de neve e gelo de geleiras (ZSNG, i.e., zonas de neve seca, percolação, neve úmida e gelo exposto) da região nordeste da Península Antártica (PA). A área de estudo compreende as ilhas James Ross, Vega, Eagle e Corry e a região norte da Península Trinity. Algoritmos baseados em regras de decisão foram desenvolvidos para discriminar as ZSNG nas imagens ERS SAR. Dados da cobertura de rochas e da linha de costa do *Antarctic Digital Database* foram usados para mascarar as áreas de rochas e áreas oceânicas, respectivamente. Através do uso de ferramentas de análise espacial de um SIG, foram calculados valores máximos de altitude e áreas totais das ZSNG e geradas imagens de suas variações e frequências. Além disso, a dinâmica das ZSNG foi comparada com dados de temperatura média diária do ar superficial medidas por estações meteorológicas. Mudanças significativas foram observadas em ZSNG na PA, de 1993 a 2000. A dinâmica das ZSNG mostrou boa correlação com as variações interanuais e sazonais da temperatura do ar superficial. As variações espaço-temporais foram interpretadas como respostas aos diferentes tipos de geleiras aos parâmetros climáticos, oceanográficos e topográficos. As maiores variações nas ZSNG foram observadas na região leste da Península Trinity, noroeste da ilha James Ross, leste da ilha Vega e oeste da ilha Eagle.

Palavras-chave: fácies de geleiras, Península Antártica, ERS SAR.

Abstract - USING ERS SAR IMAGES FOR THE MONITORING OF GLACIER FACIES ON THE NORTHEASTERN ANTARCTIC PENINSULA. ERS SAR images acquired in the austral 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 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 the GF discrimination in ERS SAR images. Rock and coastline data from the Antarctic Digital Database were used to mask outcropping rocks and sea water, respectively. Total areas and maximum values of GF altitudes were calculated and images of variations and frequency of 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 in GF on 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 different glaciers to the climatic, oceanographic and topographic parameters. The highest variations in GF were detected on the east side of the Trinity Peninsula, northwestern region of James Ross Island, eastern tip of Vega Island and western part of Eagle Island.

Keywords: glacier facies, Antarctic Peninsula, ERS SAR, hydrothermalism.

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 (Arigony-Neto, 2006). Dentre outros fatores, mudanças nas condições glaciológicas da região setentrional da PA estão relacionadas com o expressivo aquecimento do ar superficial nesta região, de 3°C, o qual foi um dos mais altos do planeta nos últimos 100 anos (Morris & Vaughan, 2003).

O aquecimento climático da região nordeste da PA (Skvarka & De Angelis, 2003), caracterizado por verões mais quentes, pelo aumento na frequência de dias com temperaturas positivas ao longo do ano e pela maior persistência das condições de ablação (Torinesi *et al.*, 2003; Vaughan, 2006), provocou a desintegração das plataformas de gelo Príncipe Gustav e Larsen A em 1994-95 (Rott *et al.*, 1996) e Larsen B em 2002 (Rack & Rott, 2004). Essa tendência de aquecimento resultou em balanços de massa negativos e na retração de frentes de várias geleiras dessa região, principalmente nas últimas duas décadas (Skvarka & De Angelis, 2003; Rau *et al.*, 2004). Variações altimétricas dos limites entre zonas superficiais de neve e gelo (ZSNG) e da posição frontal de diversas geleiras da PA evidenciam mudanças climáticas e glaciológicas locais em uma escala de tempo relativamente curta (Arigony-Neto, 2006; Arigony-Neto *et al.*, 2007, 2009).

Imagens de Sensoriamento Remoto (SR) podem ser utilizadas no monitoramento de ZSNG de geleiras, em uma escala espacial e temporal adequadas para estudos glaciológicos (Vogt & Braun, 2004). Dentre os diferentes tipos de sensores remotos que podem ser aplicados nestes estudos, o RADAR tem a vantagem de obter imagens em condições de baixa iluminação solar ou sob a cobertura de nuvens (Rees, 2006), que são condições frequentemente desfavoráveis para a teledetecção das regiões polares, especialmente na PA (Bremer *et al.*, 2004).

Arigony-Neto *et al.* (2007, 2009) já demonstraram a possibilidade de uso de dados SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), respectivamente dos satélites ERS-1/2 (*European Remote Sensing Satellite*) e Envisat (*Environmental Satellite*), para o monitoramento de variações altimétricas dos

limites entre ZSNG ao longo de uma linha central de fluxo das geleiras.

Este estudo tem como objetivo avaliar o uso de imagens do sensor ERS SAR no monitoramento de variações espaço-temporais nas ZSNG de geleiras da região nordeste da PA.

2. Área de estudo

A área de estudo abrange parte da região setentrional da PA, também conhecida como Península Trinity (PT), e um arquipélago a leste dessa península, onde estão localizadas as ilhas James Ross (IJR), Vega (IV), Eagle e Corry (IEC), entre as latitudes 63°15' S e 64°30' S e as longitudes 56°20' O e 59°00' O. Esse arquipélago é banhado pelo mar de Weddell e separado da PT pelo canal Príncipe Gustav (Fig. 1).

Os limites da área de estudo foram definidos segundo a área de recobrimento de imagens ERS SAR da órbita-ponto 109-4923 (Área 1 - 4.768 km²). Além dessas imagens, foram utilizadas imagens ERS SAR da órbita-ponto 381-4923. A área de intersecção entre essas diferentes órbitas-ponto (Área 2 - 3.183 km²) também foi analisada neste estudo, para aumentar a série temporal de dados (Fig. 1 e 2). A maior parte da área de estudo está localizada na costa leste da PT, que é caracterizada por um clima do tipo pseudocontinental, frio e seco (Martin & Peel, 1978). As imagens ERS SAR também recobrem parte da costa oeste da PT, onde o clima é do tipo polar marítimo, mais quente e úmido do que o da costa leste. A temperatura média anual na costa leste da PA é cerca de 7°C inferior a pontos de mesma latitude e altitude na costa oeste desta península. Esta marcada diferença climática é devida principalmente à topografia da PA, que é uma barreira à circulação atmosférica regional (Reynolds, 1981).

Registros das condições atmosféricas podem ser obtidos a partir de três estações meteorológicas localizadas próximas da área de estudo. Uma delas é a chilena General Bernardo O'Higgins (63°19' S e 57° 54' O - 10 m n.m.m), localizada na região noroeste da PT, próxima ao estreito de Bransfield; as outras duas estações são argentinas, sendo uma localizada à leste da IJR (estação Marambio - 64°14' S e 56°37' O - 198 m n.m.m) e outra no extremo norte da PT (estação Esperanza - 63°24' S e 57°00' O - 13 m n.m.m) (Fig. 1).

A temperatura média anual aumenta com a

posição latitudinal, sendo de $-8,5^{\circ}\text{C}$ na estação Marambio, de $-5,3^{\circ}\text{C}$ em Esperanza e de $-3,7^{\circ}\text{C}$ em O'Higgins (BAS, 2008a).

Na área de estudo, ocorrem vários tipos de geleiras, com terminações na terra e no mar (*i.e.*, geleiras de maré). Segundo classificação geomorfológica de Rau *et al.* (2005), utilizada no projeto GLIMS (*Global Land and Ice Measurements from Space*), os principais tipos de geleiras da área de estudo são calotas de gelo (*i.e.*, platôs

Detroit, Louis Philippe e Laclavere e IJR, IV e IEC), campos de gelo e geleiras de montanha, de vale, de descarga e de maré. Na figura 3, estão mapeados diferentes tipos de geleiras, segundo classificação de Rau *et al.* (2005), e a altimetria da área de estudo, baseada em Modelo Digital de Elevação (MDE) produzido por Liu *et al.* (2001). As áreas de maior altitude estão localizadas na calota de gelo da IJR (1.564 m) e nos platôs Detroit (1.536 m) e Louis Philippe (1.406 m).

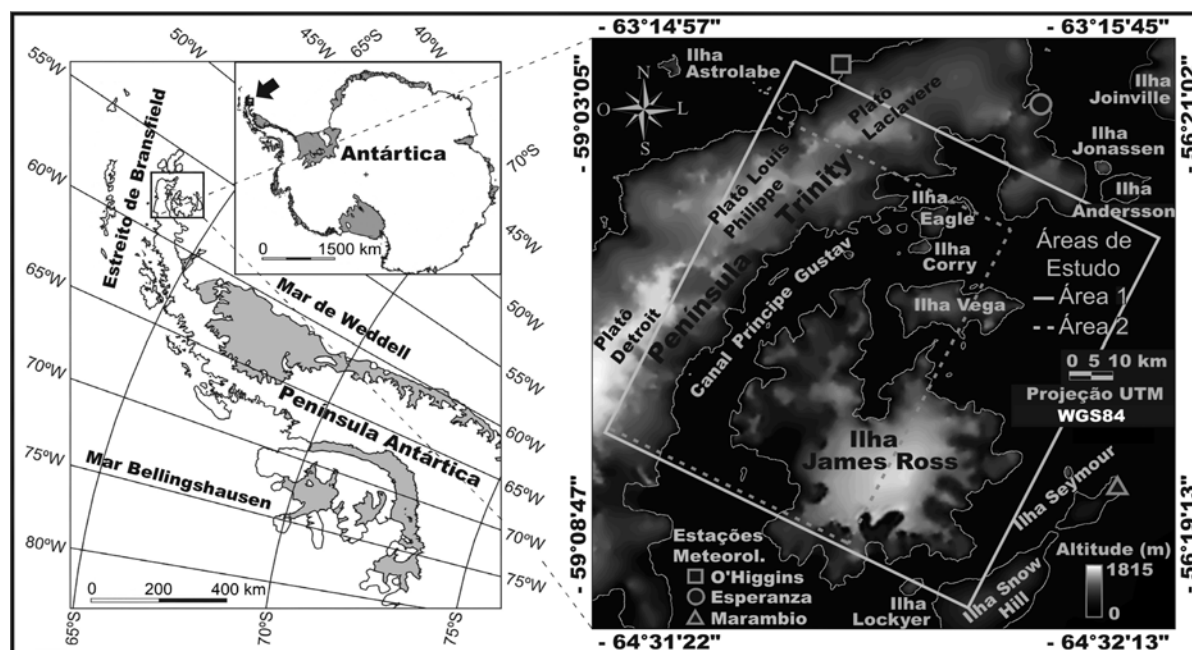


Figura 1. Localização da área de estudo na Península Antártica. As linhas brancas (contínua e tracejada) correspondem às duas áreas de estudo cobertas pelas imagens de satélite. As figuras geométricas representam as estações meteorológicas mencionadas no texto (conforme SCAR, 2000; Liu *et al.*, 2001; e BAS, 2008a).

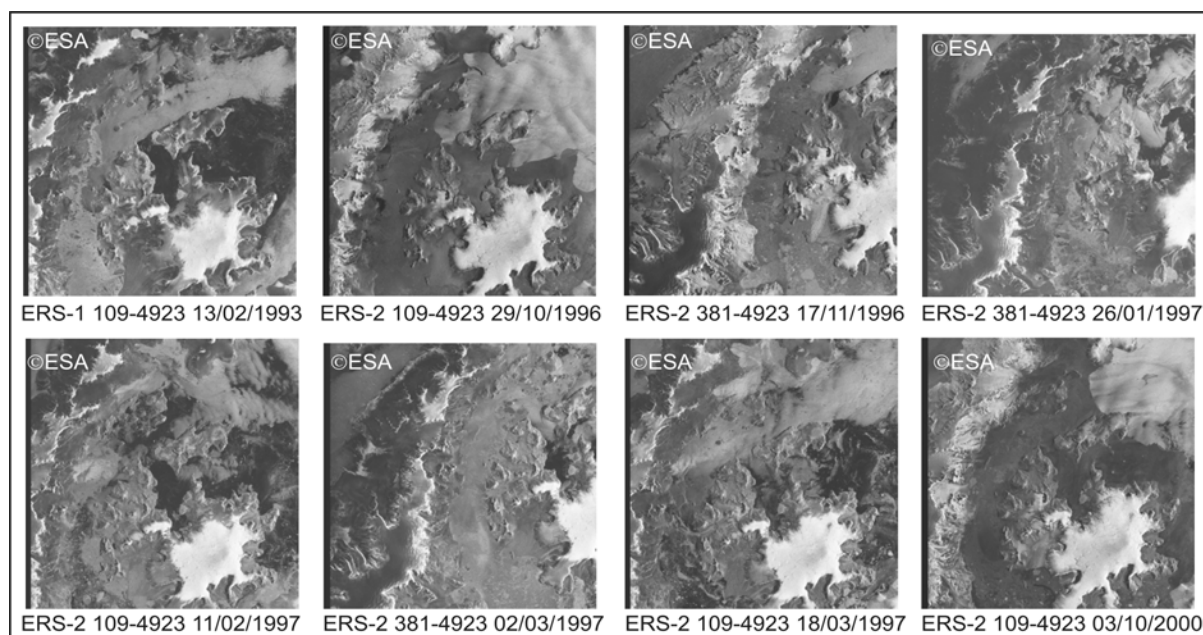


Figura 2. Órbitas-ponto e datas de aquisição das imagens ERS SAR.

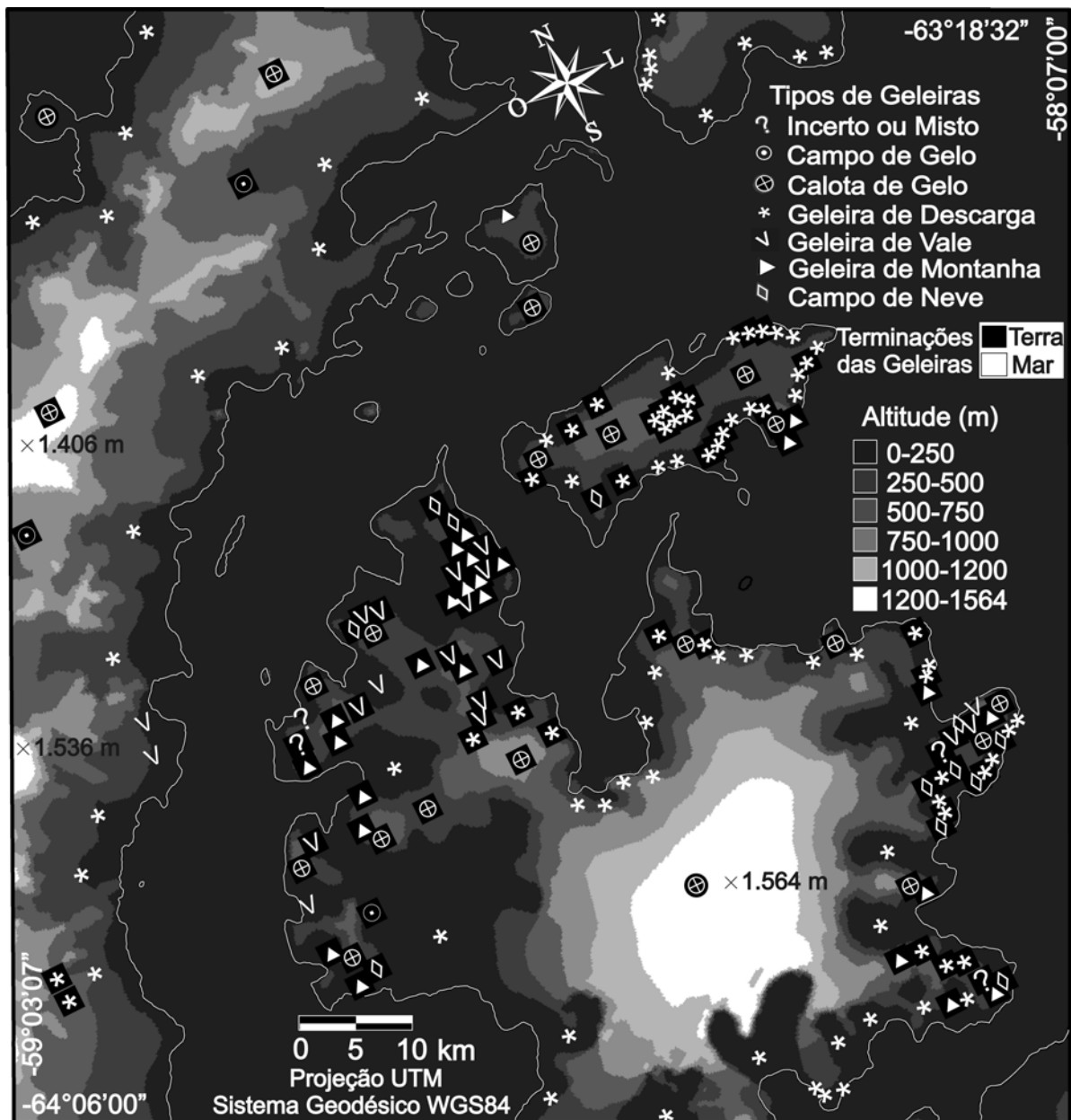


Figura 3. Altimetria e tipos de geleiras da área de estudo. As geleiras com terminações em terra estão diferenciadas das geleiras de maré por um quadrado preto sob o símbolo que as representam (conforme SCAR, 2000; Liu *et al.*, 2001; e Rau *et al.*, 2005).

Variações altimétricas dos limites entre fácies glaciais e uma forte tendência de retração da frente de várias geleiras da região leste da PT foram observadas no período 1992-2005, em imagens multitemporais de SR (Arigony-Neto, 2006; Arigony-Neto *et al.*, 2007, 2009). Diversas geleiras da IJR, com terminações na terra e no mar, e geleiras da IV, com terminações na terra, apresentaram perda superficial e grande retração de suas posições frontais desde 1975 (Skvarka *et al.*, 1995), principalmente a partir da última década (Skvarka & De Angelis, 2003). Geleiras com terminações na terra são bastante escassas

na Antártica e ocorrem na ilha Vega e principalmente nas regiões norte e noroeste da IJR (Skvarka & De Angelis, 2003).

3. O uso de imagens ERS SAR e RADAR no estudo de ZSNG

3.1 Imagens ERS SAR

O primeiro satélite de observação da Terra desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA), o ERS-1, foi lançado em julho de 1991

e está fora de operação desde março de 2000. Para dar continuidade à missão ERS, a ESA desenvolveu um segundo satélite, o ERS-2, que está em órbita desde abril de 1995. Além disso, o contínuo monitoramento da superfície terrestre com dados SAR de alta resolução foi garantido pelo lançamento do satélite Envisat, em março de 2002 (ESA, 2007).

Os satélites da série ERS possuem uma órbita polar hélio-síncrona, numa altitude nominal de 785 km, inclinada 98,5° em relação ao plano equatorial, tornando possível a aquisição de imagens em altas latitudes. Estes satélites possuem diferentes tipos de sensores para o estudo da superfície terrestre, principalmente de fenômenos oceanográficos e dinâmica da criosfera. Dentre estes sensores orbitais, destaca-se o *Active Microwave Instrument* (AMI), que possui um sensor SAR de alta resolução espacial, capaz de gerar dados que podem ser reconstruídos na forma de imagens digitais em estações de recepção terrestres. O AMI SAR obtém imagens na banda C (comprimento de onda de 5,6 cm) e com uma polarização vertical (VV). Possui um ângulo de incidência de 23° e sua resolução temporal é de 3, 35 ou 168 dias, dependendo do modo de aquisição programado (ESA, 2007).

Neste estudo, foram utilizados dados ERS-1/2 AMI SAR no modo Imagem de Precisão (PRI), que consistem em imagens de média resolução espacial (aproximadamente 30 m), calibradas e com correções radiométricas relativas à antena, mas sem correções para os efeitos radiométricos provocados pelo relevo. Estas imagens não são ortorretificadas, têm um recobrimento no terreno de 100 km² e estão na projeção do tipo *ground range*.

3.2 Imagens de RADAR

O sensor RADAR tem grande potencial de aplicação em estudos de massas de neve e gelo, pois a radiação de microondas pode penetrar no pacote de neve, além de apresentar alta sensibili-

dade à rugosidade da superfície. A interpretação dos sinais retroespalhados pela neve e gelo pode ser considerada complexa, pois o sinal RADAR, além de depender das características do sensor (banda, polarização e geometria de aquisição), depende das propriedades elétricas (constante dielétrica, estado físico, conteúdo de água líquida e de impurezas) e geométricas (tamanho e forma dos grãos, rugosidade da superfície, espessura das camadas e estratigrafia) da neve e do gelo (Massom & Lubin, 2006; Rees, 2006).

Imagens de SR podem ser aplicadas no estudo de geleiras, inclusive na detecção das fácies superficiais descritas por Paterson (1994). Segundo este autor, uma geleira pode apresentar cinco fácies ou zonas: zona de neve seca, percolação, neve úmida, gelo sobreposto e área de ablação (Fig. 4). 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) podem ser discriminadas em imagens de sensores RADAR. Rau *et al.* (2001) identificaram quatro ZSNG detectáveis em imagens SAR: zonas de RADAR de neve seca, percolação, neve úmida e de gelo exposto. Na figura 4 estão descritos valores limiares de coeficiente de retroespalhamento (s^0) de ZSNG da PA, durante o verão austral, medidos por sensores RADAR, na banda C e polarização VV, de acordo com estudo de Rau *et al.* (2001) e validados por Arigony-Neto (2006). Todavia, as ZSNG detectadas por sensores remotos não correspondem necessariamente às fácies clássicas propostas por Paterson (1994), pois estas últimas abrangem toda a coluna estratigráfica do pacote de neve e gelo. Assim, as ZSNG detectadas por sensores remotos podem apresentar uma dinâmica maior do que as fácies de uma geleira, em uma escala de tempo de semanas ou até dias, conforme variações das condições meteorológicas locais (Arigony-Neto, 2006).

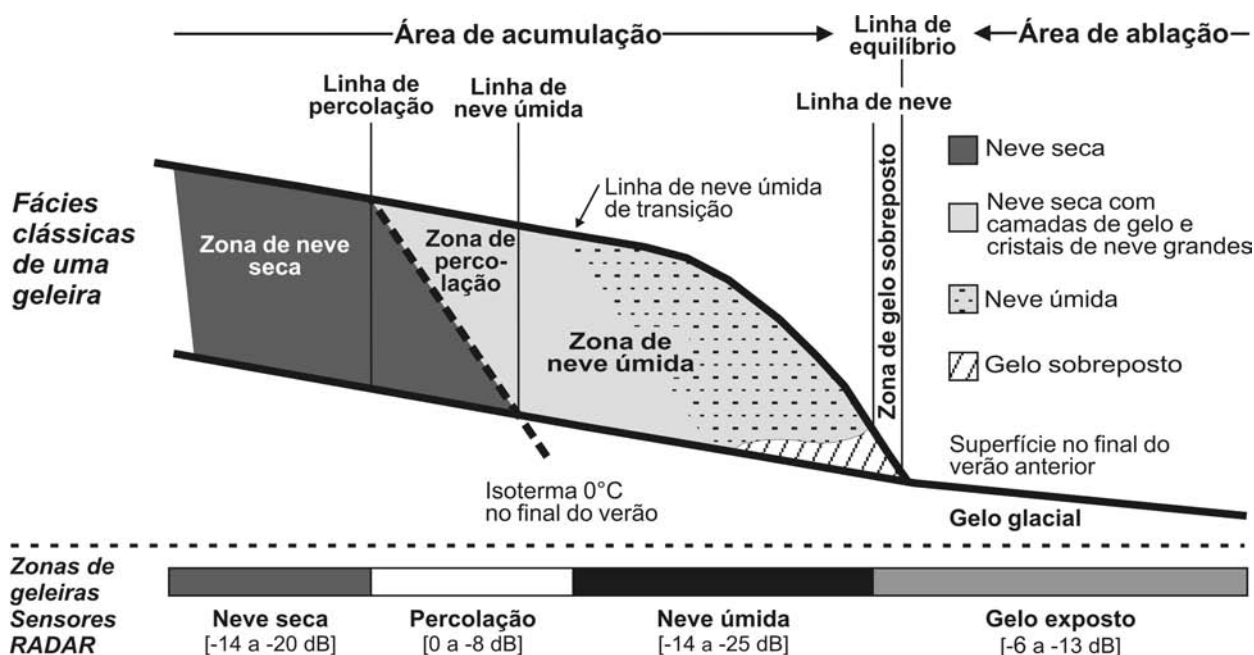


Figura 4. Fácies de uma geleira, segundo Paterson (1994), e comportamento espectral das zonas de geleiras detectadas por RADAR (modificado de Rau *et al.*, 2001).

4. Metodologia

As variações das ZSNG da PA foram analisadas através do processamento e classificação de um conjunto de seis imagens ERS SAR obtidas na primavera de 1996 e verão 1996-1997, 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 as imagens do período 1996-1997 (Fig. 2).

4.1 Calibração radiométrica

Para a correção radiométrica das imagens foi utilizado o programa BEST (*Basic Envisat and ERS SAR Toolbox*), desenvolvido pela ESA. Nos algoritmos implementados no BEST para a calibração radiométrica de imagens ERS SAR, baseados em estudo de Laur *et al.* (2004), os parâmetros utilizados são basicamente o ângulo de incidência da antena, a constante de calibração absoluta, o padrão de ganho da antena, perda propagada no *range* e o efeito de saturação ADC (*analogue-to-digital converter*) (ESA, 2006).

As imagens ERS SAR com valores de amplitude foram convertidas para imagens de potência do sinal retroespalhado (*Power*). Após serem corrigidas da saturação ADC (conversão analógico-digital), as imagens *Power* foram

convertidas para imagens *sigma nought* (s^0), em decibéis. Esta conversão é necessária para a correção de uma série de efeitos radiométricos e também para a obtenção de imagens de coeficiente de retroespalhamento em *ground range*, que refletem as propriedades físicas dos alvos iluminados.

4.2 Co-registro das imagens

Além da calibração radiométrica, o programa BEST foi utilizado para o co-registro das imagens. Neste estudo, sete imagens foram co-registradas a uma imagem de referência selecionada (ERS-1, órbita-ponto 109-4923, de 13/02/93 – Fig. 2). O BEST processa o co-registro de forma automática, sem a necessidade da seleção manual de pontos de amarração (*tie points*). No registro de cada imagem, nenhum erro médio quadrático foi superior a 0,3 *pixels*. O método de reamostragem utilizado foi o de convolução cúbica. As imagens co-registradas foram exportadas como arquivos binários, no formato BIL (*Band Interleaved by Line*), que é compatível com muitos programas de processamento de imagens.

4.3 Filtragem do ruído *Speckle*

Para a filtragem do ruído *speckle*, característico das imagens SAR, foi utilizado o programa

ERDAS *Imagine*TM (Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC). Dentre vários tipos de filtros testados, o melhor resultado obtido na redução do ruído *speckle*, na suavização das imagens e na preservação dos limites das feições imageadas, foi com o uso do filtro mediana, com uma janela móvel de 5 x 5 *pixels*. 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.

4.4 Correção geométrica das imagens

A correção geométrica das imagens foi processada através do módulo de RADAR do ERDAS *Imagine*TM. Metadados dos arquivos-imagem (geometria de aquisição, parâmetros do sensor, orbitais e das efemérides), bem como um MDE e pontos de controle do terreno (PCT), foram utilizados para o georreferenciamento e ortorretificação das imagens (Leica Geosystems, 2005a).

Os pontos de controle do terreno (PCTs) utilizados no georreferenciamento foram obtidos a partir de um mosaico de imagens do satélite LANDSAT 5-TM, integrante do *Geoscientific Information System Antarctica* (GIA). Este mosaico apresenta uma resolução espacial de 30 m e é composto por mais de 40 cenas, adquiridas no período de 1986 a 1990, georreferenciadas na projeção cônica conforme de Lambert (Bennat *et al.*, 1998). Através do ERDAS *Imagine*TM, o sistema de projeção deste mosaico foi convertido para a projeção Universal Transversa de Mercator, zona 21 sul, e os dados foram referenciados ao elipsóide *World Geodetic System* 1984 (UTM 21S WGS84).

Os dados de elevação do terreno foram extraídos de uma subcena do MDE do *Radarsat Antarctic Mapping Project* (RAMP), com resolução espacial de 200 m e coordenadas no sistema de projeção estereográfica polar (Liu *et al.*, 2001). No ERDAS *Imagine*TM, o sistema de projeção e elipsóide de referência do MDE RAMP foi convertido para o mesmo do mosaico Landsat 5-TM (UTM 21S WGS84) e a sua resolução original foi reamostrada para um valor de 100 m, utilizando o método de interpolação bilinear.

A correção geométrica das imagens foi processada com o uso do MDE RAMP e da projeção UTM 21S e elipsóide WGS84 para as imagens de saída. Para o georreferenciamento, foram escolhidos cinco PCTs na imagem de referência (mosaico Landsat 5-TM) e em feições homólogas presentes em cada imagem ERS SAR. No georreferenciamento, o erro médio quadrático não foi superior a 1 *pixel*. Para a reamostragem dos níveis de cinza dessas imagens, foi utilizado o método de interpolação por convolução cúbica.

4.5 Classificação das imagens ERS SAR

As imagens ortorretificadas foram utilizadas para a classificação das ZSNG da área de estudo. Outras áreas também iluminadas pelo sensor SAR, como massas de gelo flutuantes (plataformas de gelo, *icebergs* e gelo marinho), não foram classificadas neste estudo. Para a exclusão dessas áreas nas imagens, foram utilizadas ferramentas de análise espacial do ERDAS *Imagine*TM. Neste programa, as imagens ortorretificadas foram cruzadas com uma imagem-máscara da área de estudo, obtida a partir da conversão de um arquivo vetorial da linha de costa do *Antarctic Digital Database - ADD* (SCAR, 2000). Para o cruzamento das imagens, a projeção original da imagem-máscara, do tipo estereográfica polar, foi convertida para o mesmo sistema de projeção, elipsóide de referência das imagens ortorretificadas (UTM 21S WGS84).

As ZSNG foram discriminadas nas imagens ERS SAR por meio de um algoritmo de classificação por regras de decisão, adaptado de Arigony-Neto (2006) e Arigony-Neto *et al.* (2007, 2009), implementado na Linguagem de Modelagem Espacial (*Spatial Modeler Language - SML*) do ERDAS *Imagine*TM. Neste algoritmo, foram definidos limiares s^0 para cada ZSNG, baseados no estudo de Rau *et al.* (2001) (Fig. 4 e Tab. 1). Para a discriminação das zonas de neve seca e de neve úmida (que apresentam valores s^0 superpostos), foram utilizados limiares altimétricos (H) das fácies glaciais do norte da Península Antártica (Tab. 1), obtidos a partir de estudos de Rau & Braun (2002) e de Rau (2003), e validados por Arigony-Neto *et al.* (2007, 2009).

Tabela 1. Limiares s^0 e H, utilizados para a classificação de ZSNG da área de estudo (conforme Rau *et al.*, 2001; Rau & Braun, 2002; e Rau, 2003).

Zonas superficiais	Retroespalhamento s^0 (dB)	Altitude H (m)
Neve Seca	$-14 > s^0 > -20$	H > 1200 (linha de neve seca)
Percolação	$0 > s^0 > -8$	-
Neve Úmida	$-14 > s^0 > -25$	H < 1200 (linha de neve seca)
Gelo Exposto	$-6 > s^0 > -13$	H < 500 (linha de neve)

Apesar de não ocorrerem zonas de neve seca na área de estudo, uma regra de decisão foi implementada para a discriminação dessa zona superficial, com o objetivo de identificar erros na classificação e também para possibilitar o uso desse algoritmo na classificação de imagens SAR de outras áreas da PA. A zona superficial de neve seca somente é encontrada no interior dos mantos de gelo (antártico e groenlandês), em áreas de grandes altitudes da PA e em geleiras de montanha muito elevadas, onde a temperatura do ar superficial nunca se eleva acima do ponto de fusão, mesmo no auge do verão (Simões, 2004).

Na classificação das ZSNG, o algoritmo extrai automaticamente os valores s^0 e H das imagens ERS SAR ortorretificadas e do MDE RAMP, respectivamente. As regras de decisão associam cada pixel da imagem SAR a uma única zona superficial, de acordo com os valores limiares s^0 e H definidos no algoritmo (Tab. 1), produzindo assim uma imagem classificada, cujos *pixels* apresentam um único valor associado a cada ZSNG. Além das regras de decisão, foi implementada neste algoritmo uma função de filtragem de pós-classificação, para a geração de classes temáticas mais contínuas e coerentes. O filtro utilizado foi do tipo *Focal Majority*, baseado no critério da vizinhança, que substitui o valor do pixel central pelo valor mais freqüente em uma janela móvel de 5 x 5 *pixels* (Leica Geosystems, 2005b).

Devido à ambigüidade existente entre as ZSNG e a cobertura superficial de rochas, presente na área de estudo, esta última não foi classificada através do uso deste algoritmo. Assim, os limites das áreas de rochas do ADD (SCAR, 2000) (Fig. 5A) foram reprojatados para o sistema UTM 21S WGS84 e utilizados para eliminar essas áreas das imagens classificadas.

As imagens classificadas pós-processadas foram utilizadas para a elaboração de mapas temáticos multitemporais das ZSNG e rochas da

área de estudo (Fig. 5).

4.6 Análise espacial das imagens classificadas

As imagens classificadas pós-processadas das ZSNG, o MDE RAMP, um arquivo vetorial do GLIMS com a classificação morfológica das geleiras (Rau *et al.*, 2005) e a máscara da área de estudo foram importados para o programa ArcGIS™ (ESRI, Inc.). Operações de tabulação cruzada entre as imagens classificadas das áreas 1 e 2, a imagem-máscara e o MDE RAMP foram processadas para o cálculo das altitudes mínimas e máximas e das áreas das ZSNG e rochas da área de estudo. Os resultados obtidos consistiram em um conjunto de dados tabulares destas variáveis, descritos na tabela 2.

O conjunto de imagens com recobrimento total sobre a área 1 (Fig. 5B, 5C, 5F, 5H e 5I) apresenta resolução temporal inferior ao das imagens da área 2, pois esta última é composta pela intersecção das áreas destas imagens com as áreas de imagens ERS SAR de diferentes datas (Fig. 5D, 5E e 5G). Em razão das distintas áreas de recobrimento e da resolução temporal destes conjuntos de dados, duas séries temporais foram organizadas para a análise espaço-temporal das ZSNG: série temporal 1, composta pelas cinco imagens com recobrimento sobre a área 1, e série temporal 2, composta pelas oito imagens da área 2 (Fig. 5).

As altitudes mínimas calculadas das ZSNG da PT, IJR, IV e IEC apresentaram valores constantes e iguais aos da tabela 2, nas duas séries temporais, enquanto as altitudes máximas e as áreas das ZSNG apresentaram valores diferentes.

Na figura 6, estão representadas graficamente as altitudes máximas e as áreas das ZSNG, referentes às datas de aquisição das imagens das séries temporais 1 e 2.

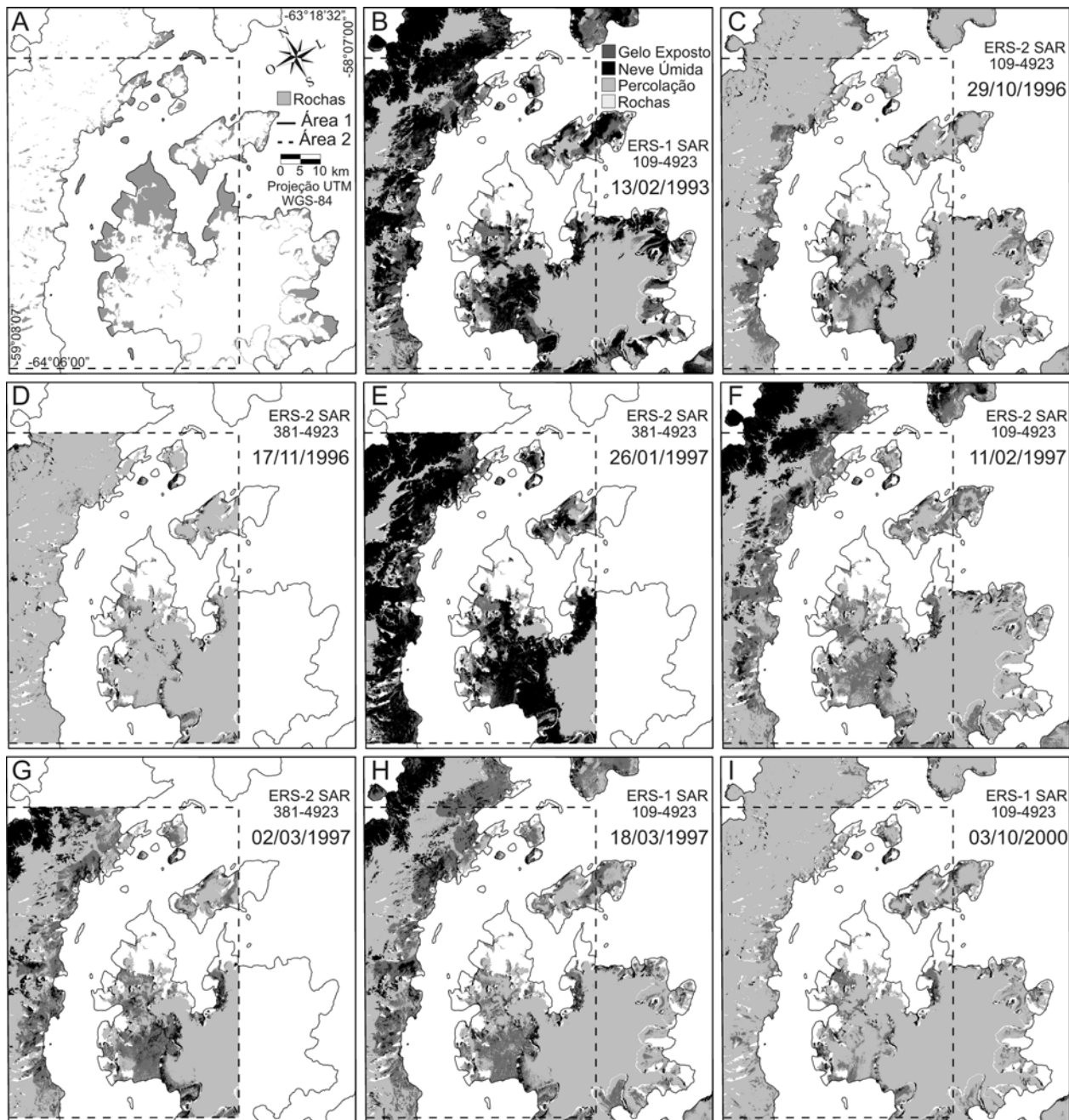


Figura 5. Subcena das rochas da região nordeste da PA e mapas temáticos multitemporais das ZSNG da área de estudo. Estes mapas foram elaborados a partir das imagens ERS SAR classificadas. Os limites da linha contínua definem a área 1 e os da linha tracejada a área 2.

Tabela 2. Altitudes mínima e máxima, área total das ZSNG e de rochas da PT, IJR, IV e IEC.

<i>Local</i>	Altitude Mín. e Máx. (m)		ZSNG (km ²)		Rochas (km ²)		Máscara (km ²)	
	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
PT	20 - 1537	20 - 1537	2009	1432,3	102,3	81,7	2111,3	1514
IEC	21 - 515	21 - 515	38,9	38,9	17	17	55,9	55,9
IV	19 - 825	20 - 678	196	126,7	64,8	49	260,8	175,7
IJR	19 - 1564	21 - 1526	1858,4	1072,2	481,2	364,8	2339,6	1437
Total	19 - 1564	20 - 1537	4102,3	2670,1	665,3	512,5	4767,6	3182,6

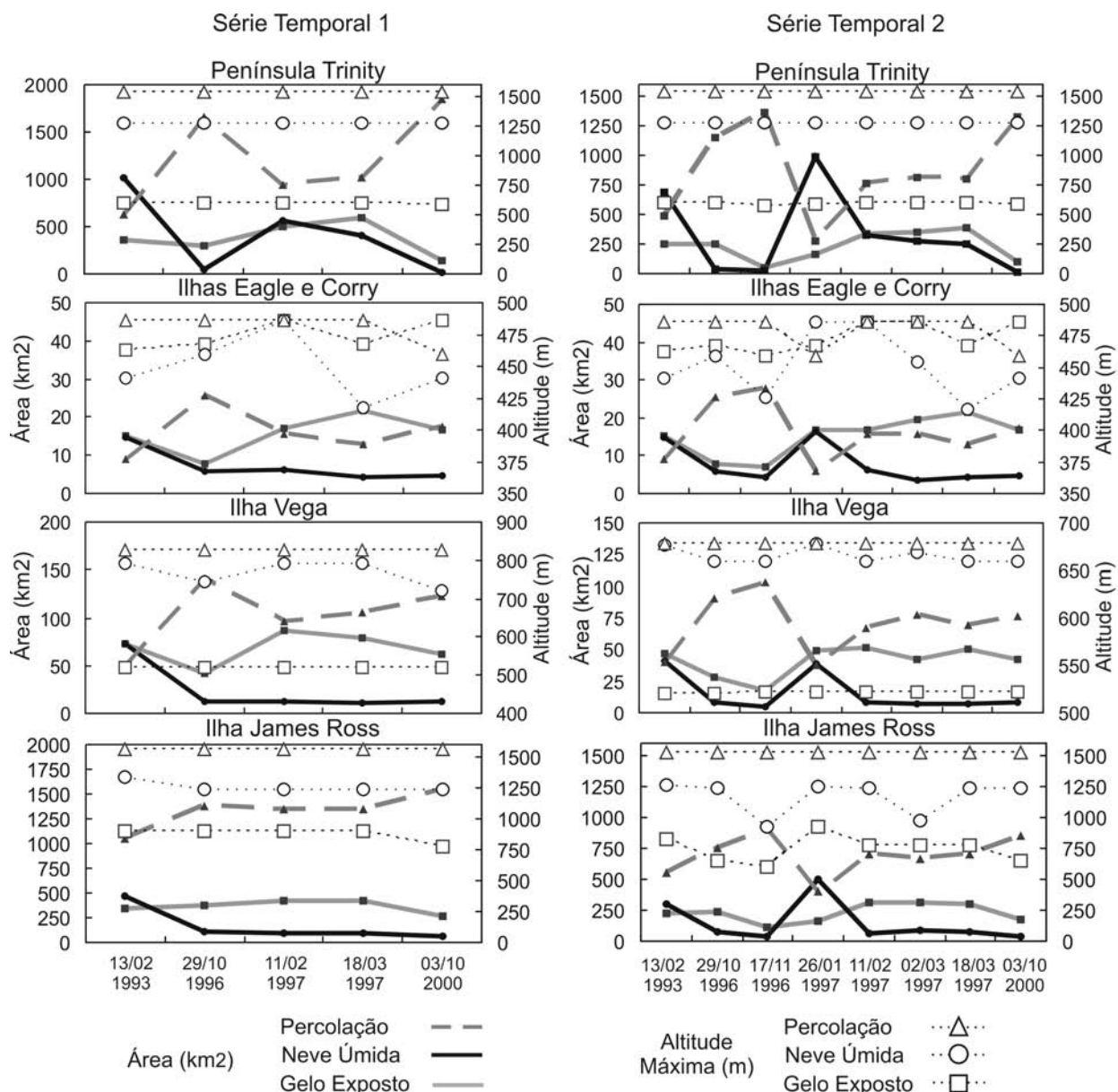


Figura 6. Altitude máxima e área das ZSNG da área de estudo nas datas de aquisição das imagens das séries temporais 1 e 2.

Uma operação aritmética de diferença normalizada entre cada par de imagens classificadas de datas consecutivas foi processada para a detecção de variações nas ZSNG. Os dados analisados compreenderam as imagens obtidas entre 29/10/1996 e 18/03/1997 (Fig. 5C, 5D, 5E, 5F e 5G) e as imagens de 13/02/1993 (Fig. 5B) e 03/10/2000 (Fig. 5I), sendo estas últimas posteriormente comparadas com as imagens de

11/02/1997 (Fig. 5F) e 29/10/1996 (Fig. 5C), respectivamente. As imagens-diferença resultantes foram reclassificadas em áreas sem variação de ZSNG e em áreas de ZSNG modificadas para zonas de gelo exposto, neve úmida ou percolação. As datas de aquisição das imagens utilizadas neste processamento estão indicadas na parte inferior de cada imagem-diferença (Fig. 7).

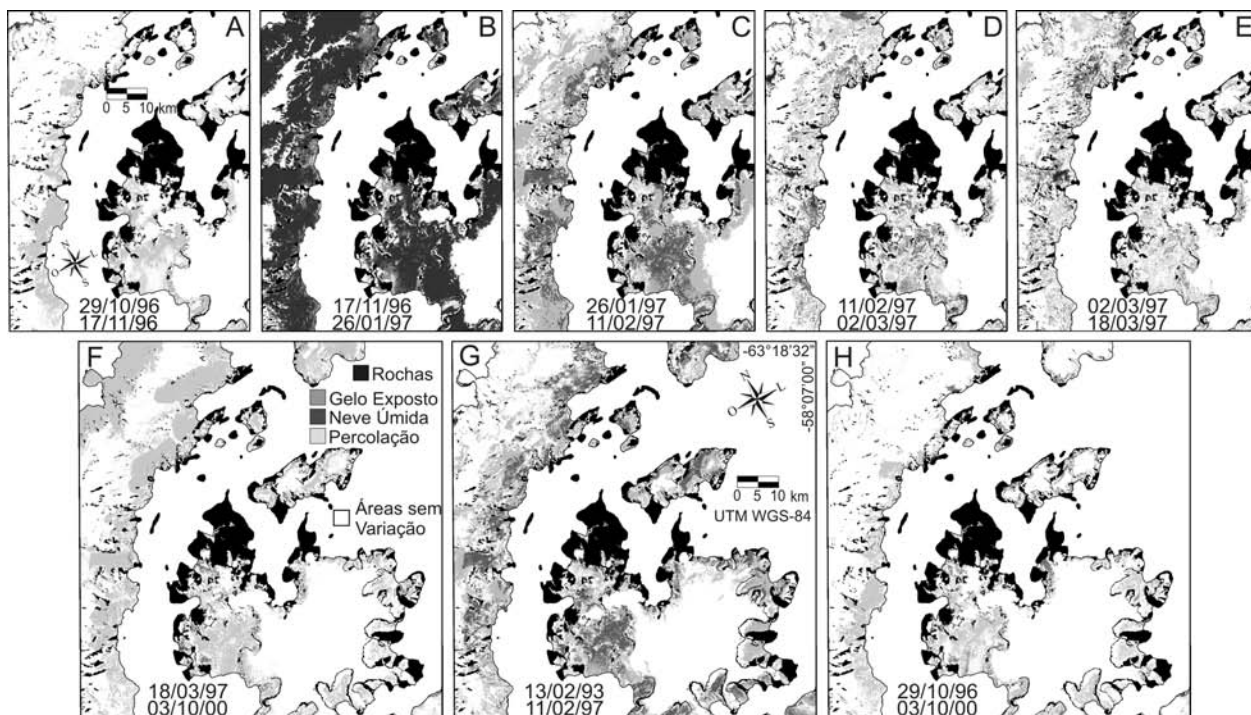


Figura 7. Imagens-diferença, com áreas sem variação das ZSNG e áreas de ZSNG modificadas para zonas superficiais de gelo exposto, neve úmida ou percolação.

A variabilidade das ZSNG da área de estudo também foi analisada para as séries temporais 1 e 2, através de uma ferramenta de cálculo estatístico de múltiplas imagens do programa ArcGIS™. Os resultados obtidos foram duas imagens com índices de variabilidade das ZSNG (inexistente, média e alta), uma para cada

série temporal analisada (Fig. 8A e 8B). As altitudes mínimas e máximas e as áreas das classes de variabilidade foram quantificadas, através da tabulação cruzada entre as imagens de variabilidade, a imagem-máscara e o MDE RAMP (Tab. 3).

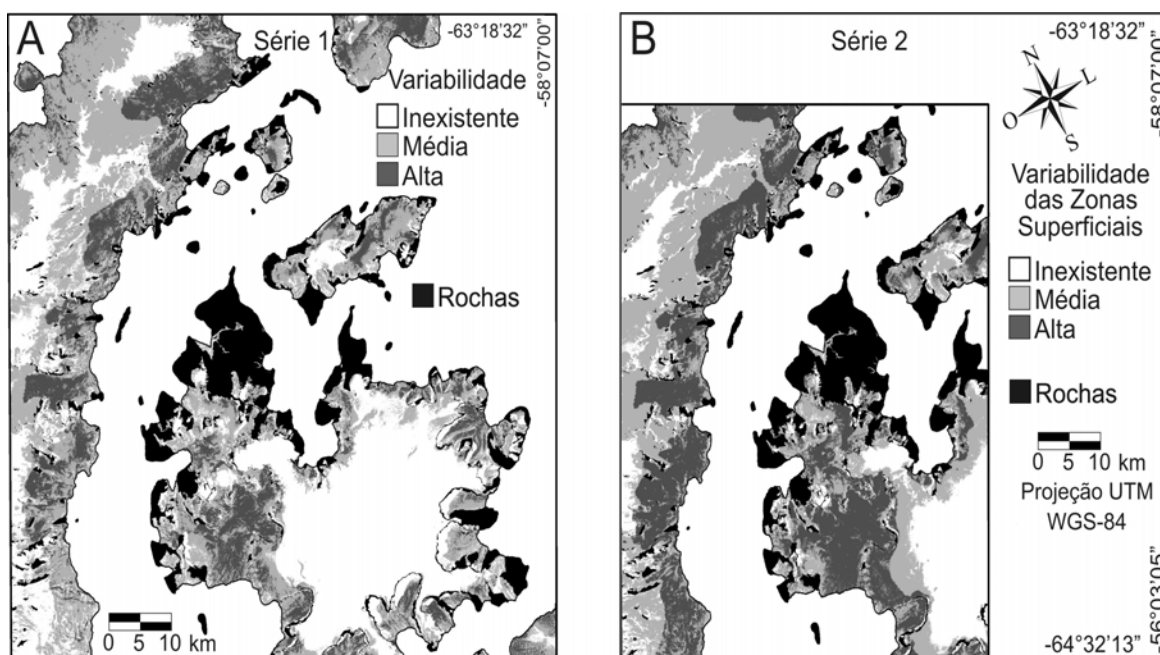


Figura 8. Variabilidade das ZSNG nas séries temporais 1 e 2.

Tabela 3. Altitudes mínima e máxima e áreas das classes de variação das ZSNG nas séries temporais 1 e 2.

Local	Variação das ZSNG	Altitude Mín.e Máx. (m)		Área (km ²)			
		Série 1	Série 2	Série 1	% ZS	Série 2	%ZS
Península Trinity	Inexistente	21 - 1537	21 - 1537	573,2	28,5	220,4	15,4
	Média	20 - 1272	20 - 1272	996	49,6	754,9	52,7
	Alta	20 - 590	20 - 590	439,8	21,9	456,9	31,9
Ilhas Eagle e Corry	Inexistente	21 - 459	21 - 459	7,2	18,5	3,2	8,2
	Média	21 - 486	21 - 459	22,5	57,8	18,9	48,6
	Alta	21 - 486	21 - 486	9,2	23,7	16,8	43,2
Ilha Vega	Inexistente	19 - 825	20 - 678	50,3	25,7	19,3	15,3
	Média	19 - 793	20 - 678	108,9	55,6	71,7	56,6
	Alta	19 - 521	20 - 522	36,8	18,8	35,6	28,1
Ilha James Ross	Inexistente	19 - 1564	21 - 1526	1058,5	57	371	34,6
	Média	19 - 1343	21 - 1263	541,4	29,1	378,4	35,3
	Alta	19 - 896	21 - 830	258,5	13,9	322,8	30,1

A ferramenta de cálculo estatístico de múltiplas imagens também foi aplicada para a identificação de áreas com ZSNG de maior frequência, nas séries temporais 1 e 2 (Fig. 9A e

9B). As altitudes mínimas e máximas e as áreas das ZSNG foram quantificadas, através da tabulação cruzada destas imagens com a imagem-máscara e o MDE RAMP (Tab. 4).

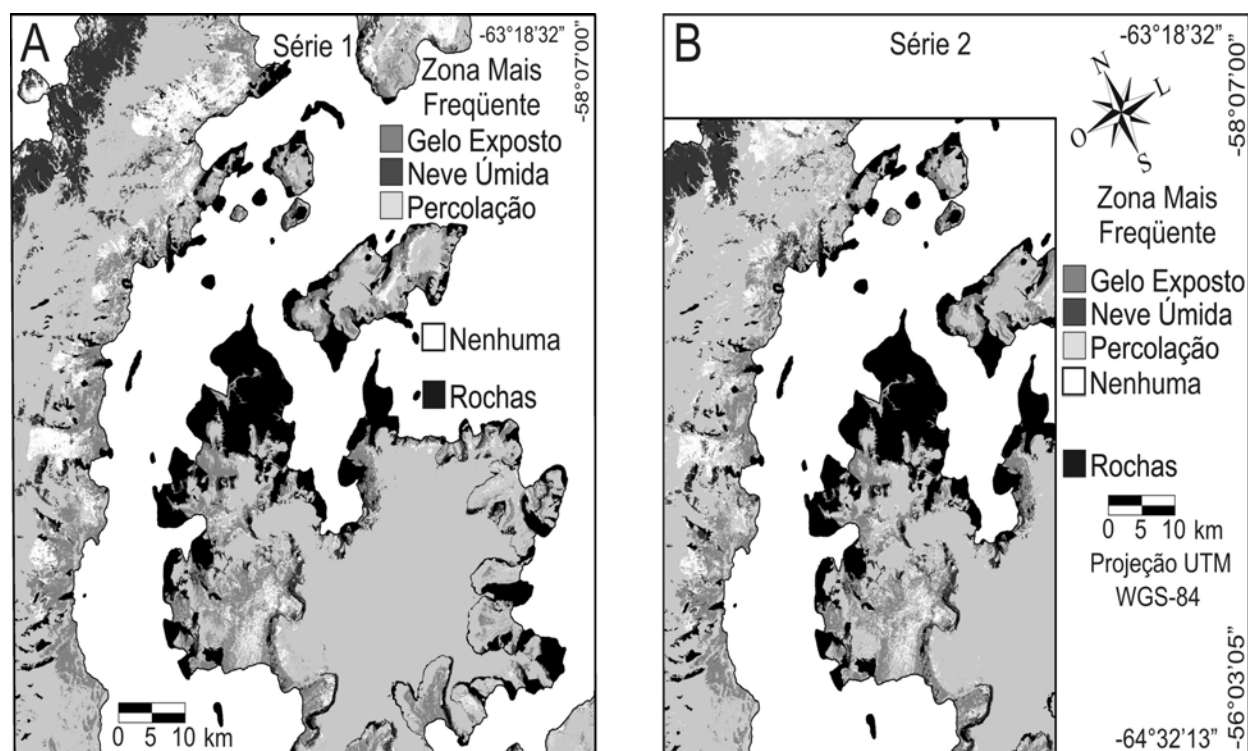


Figura 9. ZSNG mais frequentes nas séries temporais 1 e 2.

Tabela 4. Altitudes mínima e máxima e área das ZSNG com maior frequência nas séries temporais 1 e 2.

Local	ZSNG mais Frequente	Altitude Mín.e Máx. (m)		Área (km ²)			
		Série 1	Série 2	Série 1	% ZS	Série 2	%ZS
Península Trinity	GE	20 - 598	20 - 598	314,7	15,7	213,8	14,9
	NU	20 - 1270	20 - 1270	289,6	14,4	156,4	10,9
	P	20 - 1537	20 - 1537	1087,9	54,2	842,1	58,8
	Nenhuma	20 - 590	20 - 1270	316,8	15,7	220	15,4
Ilhas Eagle e Corry	GE	21 - 467	21 - 467	14,3	36,8	13,2	33,9
	NU	21 - 441	21 - 441	4,3	11,1	3,4	8,7
	P	21 - 486	21 - 486	16,8	43,2	17,6	45,2
	Nenhuma	21 - 467	21 - 459	3,5	8,9	4,7	12,2
Ilha Vega	GE	19 - 521	20 - 521	62,2	31,7	37,5	29,6
	NU	19 - 746	20 - 659	9,9	5,1	5,5	4,3
	P	19 - 825	20 - 678	106,6	54,4	71,5	56,4
	Nenhuma	19 - 521	20 - 659	17,3	8,8	12,2	9,7
Ilha James Ross	GE	19 - 896	21 - 769	338,9	18,2	221,7	20,7
	NU	19 - 1239	21 - 1239	80,7	4,3	59,3	5,5
	P	19 - 1564	21 - 1526	1333,9	71,8	696,4	65
	Nenhuma	19 - 896	21 - 1239	104,9	5,7	94,8	8,8

5. Resultados e discussão

5.1 Temperatura do ar superficial e variações nas ZSNG

A temperatura do ar superficial pode ser considerada como um dos principais parâmetros meteorológicos que influenciam no balanço de energia do pacote de neve (Schneider, 2000). Arigony-Neto (2006) observou uma forte correlação entre variações altimétricas nos limites entre fácies glaciais e da posição frontal de diversas geleiras da região leste da PT com o aumento da temperatura média do ar superficial, no período 1992-2005. Com base nestas evidências, pode-se concluir que este parâmetro é fundamental para a interpretação das variações das ZSNG que ocorreram na área de estudo.

As temperaturas médias diárias do ar superficial nas estações meteorológicas da área de estudo (O'Higgins, Esperanza e Marambio), em

períodos definidos segundo as datas de aquisição das imagens ERS SAR (29/01/93 a 13/02/93, 14/10/96 a 18/03/97 e 16/09/00 a 03/10/00), bem como a análise estatística destes dados, estão apresentados, respectivamente, na figura 10 e na tabela 5.

As estações Esperanza e Marambio estão localizadas em regiões caracterizadas por alta variabilidade climática interanual e sazonal (Skvarca & De Angelis, 2003). Devido à influência de massas de ar do Mar de Weddell, ocorre uma alta correlação entre as temperaturas do ar registradas nestas estações (Skvarca *et al.*, 1998). Os coeficientes de correlação (R) entre as temperaturas médias diárias do ar superficial nas estações meteorológicas estudadas, durante os períodos analisados, estão descritos na tabela 6, onde pode-se observar a alta correlação entre os registros de temperatura nas estações Esperanza e Marambio.

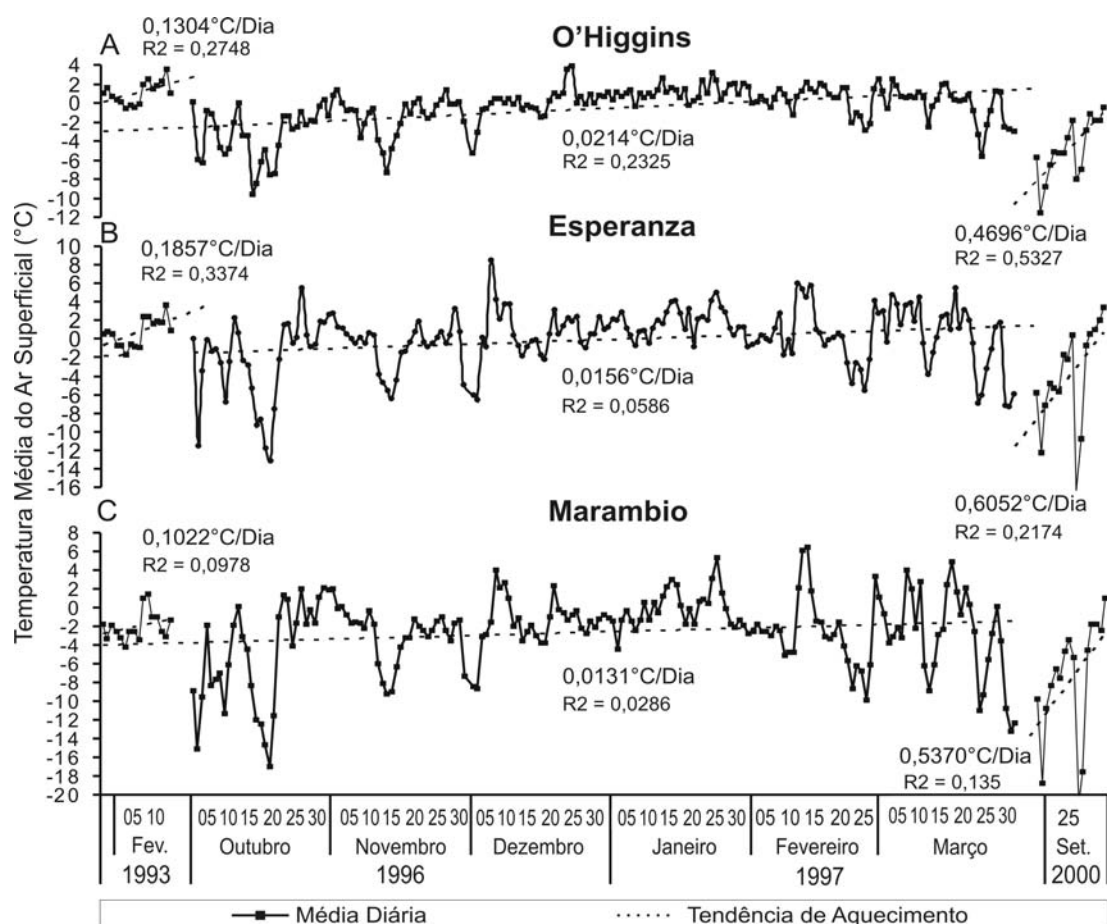


Figura 10. Temperaturas médias diárias do ar superficial e tendência de aquecimento (°C) nas estações meteorológicas O'Higgins, Esperanza e Marambio, em períodos definidos segundo as datas de aquisição das imagens ERS SAR (conforme BAS, 2008b).

Tabela 5. Temperaturas do ar superficial nas datas de aquisição das imagens (TDI) e temperaturas média, mínima, máxima, desvio-padrão e dias com temperaturas positivas (DTP) em períodos definidos segundo as datas de aquisição das imagens ERS SAR, nas estações meteorológicas O'Higgins, Esperanza e Marambio.

Período		29/01/91	14/10/96	30/10/96	18/11/96	27/01/97	12/02/97	03/03/97	16/09/00
Estação	Dias	16	16	19	70	16	19	16	16
O'Higgins	Méd.	1,07	-3,99	-1,88	0,36	0,74	0,57	0,67	-4,81
	σ	1,18	2,98	2,30	1,37	0,94	1,62	1,21	3,11
	Mín.	-0,53	-9,58	-7,36	-5,28	-1,25	-2,80	-2,55	-11,56
	Máx.	3,60	-0,30	1,32	3,85	2,05	2,50	2,52	-0,50
	TDI	1,00	-0,30	-0,17	1,07	0,70	0,15	0,35	-0,50
	DTP	13	0	4	30	14	14	12	0
Esperanza	Méd.	0,70	-3,04	-0,91	1,05	0,58	0,34	1,86	-4,08
	σ	1,52	5,52	2,78	2,37	1,83	3,34	2,55	5,54
	Mín.	-1,63	-13,18	-6,40	-6,50	-1,64	-5,57	-3,81	-16,33
	Máx.	3,65	5,52	2,78	8,50	5,96	5,75	5,53	3,43
	TDI	0,90	1,94	-1,35	2,91	5,96	-0,30	5,53	3,43
	DTP	9	6	9	32	9	11	11	5
Marambio	Méd.	-2,00	-5,07	-2,63	-1,14	-2,46	-2,26	-1,44	-7,704
	σ	1,56	6,48	3,61	2,48	1,68	4,56	3,98	6,453
	Mín.	-4,23	-17,05	-9,20	-8,70	-5,16	-9,84	-8,86	-20,94
	Máx.	1,40	2,04	2,10	5,31	2,13	6,43	4,85	1,05
	TDI	-1,33	1,10	-3,28	-0,16	2,13	-1,81	1,63	1,05
	DTP	1	4	4	15	1	5	5	1

Tabela 6. Coeficientes de correlação entre as temperaturas médias diárias do ar superficial nas estações O'Higgins (O), Esperanza (E) e Marambio (M), nos diferentes períodos analisados.

Período	29/01/93 – 13/02/93			14/10/96 – 18/03/97			16/09/00 – 03/10/00		
Estação	O	E	M	O	E	M	O	E	M
O	-	0,7856	0,5345	-	0,7835	0,7259	-	0,8772	0,8342
E	-	-	0,6005	-	-	0,9013	-	-	0,9678

Coeficientes de correlação também foram calculados entre os dados de altitude máxima e área das ZSNG, nas séries temporais 1 e 2 (Fig. 6), com os dados de temperatura média do ar superficial nos períodos analisados na tabela 5. A altura mínima das ZSNG não foi analisada neste

estudo, pois esta variável apresentou valores constantes nas séries temporais e, portanto, com baixa correlação com as variações de temperatura do ar superficial. Os valores R calculados estão descritos na tabela 7.

Tabela 7. Coeficientes de correlação (R) entre as temperaturas médias do ar superficial nas estações O'Higgins (O), Esperanza (E) e Marambio (M), e as altitudes máximas e as áreas das ZSNG nas séries temporais 1 e 2.

Temperatura Média ar superficial x Área ZSNG					Temp. Média ar superficial x Altitude Máx. ZSNG				
Local	Zona Superf.	O	E	M	Local	Zona Superf.	O	E	M
PT Série 1	Gelo Exposto	0,5884	0,5529	0,4115	PT Série 1	Gelo Exposto	0,3697	0,2718	0,1266
	Neve úmida	0,6652	0,6370	0,6554		Neve úmida	0,4935	0,3167	0,2361
	Percolação	0,7944	0,7575	0,7286		Percolação	0,0176	0,0153	0,0109
PT Série 2	Gelo Exposto	0,8040	0,8369	0,9028	PT Série 2	Gelo Exposto	0,6158	0,5942	0,6586
	Neve úmida	0,8733	0,7434	0,7756		Neve úmida	0,6974	0,4952	0,5290
	Percolação	0,9730	0,9013	0,9290		Percolação	0,0321	0,0227	0,0301
IEC Série 1	Gelo Exposto	0,5633	0,6596	0,4696	IEC Série 1	Gelo Exposto	0,2685	0,3125	0,4569
	Neve úmida	0,4779	0,2933	0,3798		Neve úmida	0,0372	0,1956	0,1249
	Percolação	0,7996	0,7495	0,6535		Percolação	0,6376	0,6366	0,7914
IEC Série 2	Gelo Exposto	0,5752	0,5789	0,3301	IEC Série 2	Gelo Exposto	0,0477	0,1715	0,3594
	Neve úmida	0,3962	0,3508	0,4084		Neve úmida	0,1639	0,0606	0,1020
	Percolação	0,6739	0,6459	0,5089		Percolação	0,3098	0,2598	0,3122
VG Série 1	Gelo Exposto	0,6211	0,5864	0,3575	VG Série 1	Gelo Exposto	0,1592	0,2634	0,1783
	Neve úmida	0,4163	0,3578	0,4002		Neve úmida	0,5558	0,4771	0,5305
	Percolação	0,6065	0,5942	0,4557		Percolação	0,0135	0,0227	0,0156
VG Série 2	Gelo Exposto	0,8387	0,8229	0,7019	VG Série 2	Gelo Exposto	0,0902	0,1978	0,0063
	Neve úmida	0,4644	0,3060	0,3723		Neve úmida	0,9708	0,9573	0,9903
	Percolação	0,7990	0,6638	0,6555		Percolação	0,0134	0,0128	0,0145
IJR Série 1	Gelo Exposto	0,4609	0,4004	0,2318	IJR Série 1	Gelo Exposto	0,7669	0,7412	0,6894
	Neve úmida	0,4254	0,4204	0,4940		Neve úmida	0,0178	0,0243	0,1295
	Percolação	0,6466	0,6138	0,6121		Percolação	0,0156	0,0124	0,0113
IJR Série 2	Gelo Exposto	0,6605	0,7265	0,7959	IJR Série 2	Gelo Exposto	0,6376	0,6366	0,7914
	Neve úmida	0,4074	0,3481	0,4345		Neve úmida	0,4727	0,3171	0,3814
	Percolação	0,7185	0,6014	0,7094		Percolação	0,0424	0,0311	0,0452

Como pode ser observado na tabela 7, a série de dados com maior resolução temporal apresentou valores R superiores. A variável com maior correlação com os dados de temperatura média do ar superficial (Tab. 5) foi a área de zona superficial de percolação.

As variações existentes nas áreas das ZSNG da PT, IV e IEC apresentaram maior correla-

ção com as temperaturas médias da estação O'Higgins, seguido das estações Esperanza e Marambio. Os registros destas estações apresentaram maior correlação com as áreas de ZSNG da PT, e, em ordem decrescente, com a IV e IEC. Com relação à IJR, foi observada uma maior correlação das variações das áreas de ZSNG com os dados de temperatura média da estação Marambio.

5.2 Análise da dinâmica das ZSNG

Os dados de temperatura, os mapas temáticos e os dados quantitativos multitemporais foram utilizados para uma breve análise da dinâmica das ZSNG da área de estudo.

As imagens de variabilidade das séries temporais 1 e 2 (Fig. 8) apresentaram resultados diferentes, devido ao uso de imagens na série temporal 2 que não foram consideradas na série temporal 1. Por exemplo, nas áreas de maior altitude da área de estudo, as imagens da série 2 caracterizaram-se por áreas sem variabilidade mais restritas, devido ao uso exclusivo da imagem de 26/01/97, que apresentou variações de ZSNG em parte destas áreas (Fig. 5E). No caso das imagens de ZSNG de maior frequência, não ocorreram diferenças expressivas entre as séries temporais (Fig. 9A e 9B), pois as imagens exclusivas da série 2 não tiveram variações suficientes para promover alterações significativas nos resultados.

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 (Fig. 8 e Tab. 3). Nestas 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) (Fig. 3).

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 (Fig. 3 e 8). Áreas de maior variabilidade foram identificadas em toda a costa da IJR, na altitude máxima de 896 m (Fig. 8 e Tab. 3). 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 na IJR também ocorreram em geleiras com terminações na terra da região norte, onde predominam geleiras de montanha e de vale, e na região leste, caracterizada por geleiras de descarga, de vale, de montanha e campos de neve (Fig. 3 e 8).

Geleiras com terminações na terra são de particular interesse para estudos das interações entre o gelo e parâmetros climáticos, pois sua atividade está diretamente relacionada com mudanças atmosféricas locais (Skvarka & De

Angelis, 2003). No caso das geleiras de maré, além da circulação atmosférica e da topografia subglacial, estas são influenciadas por parâmetros oceanográficos e, portanto, não são indicadas para relacionar variações das ZSNG com mudanças do ar superficial (Arigony-Neto, 2006).

As áreas de maior altitude da área de estudo não apresentaram variações nas ZSNG (Fig. 3 e 8) e estão localizadas nas calotas de gelo dos platôs Laclavere e Louis Philippe (PT) e nas calotas de gelo da IV e IJR (Fig. 1 e 3). Nestas áreas, ocorre aumento da precipitação nival, de forma mais intensa na costa oeste da PT, assim como a redução da temperatura do ar superficial (Turner *et al.*, 2002). Apesar das baixas temperaturas, estas foram suficientes para promover o derretimento superficial e a percolação de água no pacote de neve, com posterior recongelamento, formando assim zonas de percolação. Esta zona superficial permaneceu inalterada nas áreas de maior altitude, como pode ser observado nas figuras 8 e 9.

A IJR apresentou grande extensão de áreas com ZSNG permanentes nas séries temporais 1 e 2 (Fig. 8 e Tab. 3). Nas séries temporais analisadas, a zona de maior frequência nas áreas de maior elevação da calota de gelo é a de percolação (Fig. 3 e 9, Tab. 4). A menor posição latitudinal, grandes altitudes e a influência de massas de ar frias e estáveis, oriundas do Mar de Weddell, resultam em temperaturas médias anuais inferiores na IJR em relação às demais áreas analisadas neste estudo (Skvarka *et al.*, 1998). Durante o período analisado, as temperaturas médias anuais na estação Marambio, que está localizada próxima à IJR, foram menores do que as registradas nas estações Esperanza e O'Higgins (Fig. 10 e Tab. 5). Temperaturas médias mais elevadas e a maior frequência de dias com temperaturas positivas nas estações Esperanza e O'Higgins (Tab. 5), contribuíram para o derretimento do pacote superficial de neve e conseqüentemente para uma maior variação das ZSNG em áreas próximas a estas estações meteorológicas, como a PT, IV e IEC (Fig. 8 e Tab. 3).

As ZSNG da área de estudo apresentaram grandes variações interanuais. Por exemplo, em imagens obtidas na mesma época do ano, como as de 13/02/93 e 11/02/97 (Fig. 5B e 5F), foram constatadas diferenças evidentes na localização e extensão das ZSNG. Na imagem de 13/02/93 foram observadas grandes extensões de neve úmida, principalmente na região costeira da PT e na região noroeste da IJR, enquanto na imagem

de 11/02/97 esta zona de neve úmida estava concentrada somente nas regiões noroeste e nordeste da PT. A maior parte das áreas de neve úmida da imagem de 13/02/93 aparece como zonas de gelo exposto na imagem de 11/02/97 (Fig. 7G). Em um período relativamente curto, boa parte desta zona de gelo exposto era coberta por uma zona de neve úmida, como pode ser observado na imagem de 26/01/1997 (Fig. 5E). Estas variações indicam que grandes extensões do pacote de neve saturado de água derreteram e escoaram superficialmente, dando lugar a uma zona de gelo exposto. Provavelmente, este fenômeno está relacionado com a alta frequência de dias com temperaturas positivas observadas nas estações O'Higgins e Esperanza durante o período 27/01/97 a 11/02/97 (Tab. 5).

Com base na análise estatística dos dados de temperatura média diária do ar superficial (Fig. 10), verificou-se que o verão 1996/97 apresentou temperaturas médias de 0,9°C na estação Esperanza, de 0,5°C em O'Higgins e de -1,46°C em Marambio. Estas temperaturas médias de verão relativamente altas na região nordeste da PA, caracterizadas por um grande número de dias com temperaturas positivas (Fig. 10 e Tab. 5), foram favoráveis para o aumento da extensão de zonas de neve úmida e de gelo exposto na área de estudo. O derretimento superficial de geleiras e o aumento de água de degelo estão relacionados com a temperatura média do ar na estação do verão (TMAV). Segundo Skvarka & De Angelis (2003), a TMAV é um parâmetro meteorológico importante para o estudo da dinâmica glacial de geleiras.

Variações interanuais pouco significativas nas ZSNG também ocorreram na área de estudo. Em imagens obtidas em datas próximas de anos diferentes, na estação da primavera austral (29/10/1996 e 03/10/2000 - Fig. 5C e 5I), as variações nas ZSNG ocorreram somente na costa leste da PT e na região noroeste da IJR (Fig. 7H). Em geral, as variações foram pouco significativas em todas as imagens obtidas na primavera. Durante o período analisado, as estações de primavera foram caracterizadas por temperaturas médias negativas (Tab. 5), que contribuíram para a predominância de zonas de percolação e para a baixa ocorrência de zonas de neve úmida em todas as imagens obtidas nesta estação do ano.

Nas imagens ERS SAR de 1996-97 foram observadas grandes variações nas ZSNG. Entre 29/10/96 e 17/11/96, ocorreu um aumento da

área de percolação e uma redução na área das zonas de neve úmida e de gelo exposto em toda a área de estudo (Fig. 6 e 7A). Na zona de percolação, sucessivos eventos de derretimento e congelamento no interior do pacote de neve provocaram o aumento do tamanho dos grãos e a formação de estruturas internas (lentes, camadas ou veios de gelo), que atuaram como fortes espalhadores volumétricos da radiação de microondas. A alta frequência de temperaturas médias negativas no período 14/10/96 - 29/10/96 (Fig. 10) contribuiu para a redução da área de neve úmida em toda a área de estudo e também para reduzir a altitude máxima desta zona superficial na IEC e na IJR (Fig. 6).

Na imagem ERS SAR de 26/01/97, foi observada uma grande extensão de neve úmida (Fig. 5E). No período 17/11/1996 - 26/01/1997, a área de estudo apresentou uma expressiva redução da zona de percolação e o aumento das zonas gelo exposto e de neve úmida (Fig. 7B), decorrentes do aumento da temperatura média e da maior persistência de dias com temperaturas positivas, principalmente nas estações O'Higgins e Esperanza (Fig. 10 e Tab. 5). A persistência de temperaturas positivas provocou o derretimento de grandes extensões de neve superficial, resultando em água líquida infiltrada no interior do pacote de neve, que provocou forte atenuação da radiação de microondas. Todavia, é importante ressaltar que o derretimento pode ocorrer mesmo com temperaturas do ar negativas, caso o pacote de neve contenha energia suficiente armazenada. Portanto, simples modelos de derretimento da neve ou de balanço de massa baseados em dias com temperaturas positivas, medidos em estações meteorológicas próximas, tendem a subestimar a energia disponível para o derretimento no pacote de neve (Arigony-Neto, 2006).

Entre 26/01/96 e 11/02/97 foi observada uma redução da extensão de zona de neve úmida na área de estudo. Na maior parte das áreas de neve úmida foi observada uma zona de gelo exposto (Fig. 7C), devido ao baixo espalhamento superficial provocado pela superfície densa e rugosa dessa ZSNG (Fig. 4). Neste período, boa parte do pacote de neve úmido derreteu completamente, contribuindo assim para o aumento da zona de gelo exposto. Conseqüentemente, a linha de neve de geleiras deslocou-se à montante, caracterizando assim um balanço de massa negativo em geleiras da área de estudo.

Nas imagens de 11/02, 02/03 e 18/03/

1997 (Fig. 5F, 5G e 5H), as áreas de gelo exposto, neve úmida e percolação apresentaram mudanças pouco significativas na IJR, pois as temperaturas médias foram negativas e com baixas variações durante esse período (Fig. 10, Tab. 5). As áreas de percolação foram predominantes na IJR, seguido pelas de gelo exposto e de neve úmida, sendo que a última foi pouco expressiva neste período, devido às baixas temperaturas do ar superficial. Na IEC e IV, ocorreram vários dias com temperaturas positivas durante este período (Tab. 5), os quais, dentre outros fatores, contribuíram para a ocorrência de variações nas zonas de percolação e de gelo exposto. Apesar da persistência de períodos de derretimento, não foram observadas variações significativas nas ZSNG na PT. Mesmo com a alta correlação existente entre as variações das áreas de ZSNG com as temperaturas médias do ar superficial (Tab. 7), não foram observadas mudanças significativas nas zonas superficiais da PT durante este período, provavelmente devido à influência de outros fatores (*i.e.*, precipitação nival, etc.).

6. Conclusões e recomendações

Através da análise dos dados multitemporais, conclui-se que mudanças significativas ocorreram nas ZSNG da área de estudo, principalmente nas áreas de menores altitudes, onde os processos glaciais foram mais intensos. A extensão e a localização destas ZSNG são variáveis no tempo, respondendo a mudanças nos balanços de energia e massa de geleiras e, portanto, são indicadores sensíveis das condições meteorológicas e glaciológicas locais.

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

A temperatura média do ar superficial, apesar de ser um dos principais parâmetros meteorológicos que influenciam no balanço de energia do pacote de neve, não pode ser conside-

rada como um fator único para explicar as variações nas ZSNG. Outros fatores são relevantes, como a precipitação de chuva ou de neve, assim como a morfologia de geleiras e processos relacionados, como o desprendimento de massas de gelo, erosão eólica e avalanches. Além de todos estes fatores, variações nas ZSNG podem ser influenciadas pela circulação oceânica e também pela circulação atmosférica induzida pelo gelo marinho sazonal, principalmente em geleiras de maré, que possuem terminações sob ação direta do oceano. Assim como a temperatura do ar superficial, alguns destes fatores podem ter contribuído para provocar variações na extensão das ZSNG na IV, IJR e IEC, pois as correlações destas variações com os dados de temperatura média de estações meteorológicas apresentaram valores menos significativos do que os obtidos para a PT.

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 estudo da dinâmica das ZSNG. Para o monitoramento das ZSNG, recomenda-se a pesquisa prévia das condições atmosféricas locais no período a ser analisado, principalmente de dados de temperaturas do ar superficial, para a seleção das datas de aquisição das imagens de SR. A quantidade total de imagens utilizadas não é um fator primordial para detectar variações nas ZSNG, devendo ser selecionadas imagens que apresentem menor correlação espacial, como algumas das imagens utilizadas na série temporal 2.

As imagens ERS SAR apresentaram resoluções espacial, radiométrica e temporal adequadas para a análise da dinâmica das ZSNG da área de estudo. A baixa resolução espectral destas imagens e a ambigüidade existente entre o retroespalhamento de ZSNG com áreas de rochas limitaram o uso de classificadores não-supervisionados e supervisionados. Classificadores mais complexos e inteligentes, baseados no uso de redes neurais ou mesmo no reconhecimento de padrões texturais e/ou morfológicos poderiam ter sido aplicados para a detecção das ZSNG nas imagens SAR. No caso deste estudo, optou-se por utilizar uma metodologia de classificação de imagens mais simples, baseada em regras de decisão, de fácil implementação e com baixo tempo computacional, que produziu resultados satisfatórios para o monitoramento das ZSNG.

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 SAR foram gentilmente fornecidas pelo Instituto de Geografia Física da Universidade de Freiburg (Alemanha). CWM Jr. e RRR são bolsistas do CNPq.

Referências

- Arigony-Neto, J. 2006. *Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula - a centerline approach combining satellite and GIS data*. Freiburg, 136 p. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade de Freiburg (Albert-Ludwigs).
- 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(1): 55-60.
- Arigony-Neto, J., Saurer, H., Simões, J.C., Rau, F., Jaña, R., Vogt, S. & Goßmann, H. 2009. Spatial and temporal changes in dry-snow line altitude on the Antarctic Peninsula. *Climatic change*, 94(1): 19-33.
- BAS. British Antarctic Survey. 2008a. Annual, seasonal and monthly temperature statistics and trends in the Marambio and Esperanza surface temperature data. *O'Higgins station data*. Disponível em: <<http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/>> Acesso em: 10 jan. 2008.
- BAS. British Antarctic Survey. 2008b. Surface Data. Marambio and Esperanza station. 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. 1998. Das "Geowissenschaftliche Informationssystem Antarktis" (GIA) am Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG). In: Goßmann, H. (Ed.). *Patagonien und Antarktis - Geofernerkundung mit ERS-1-Radarbildern*. Göttingen, Justus Perthes, p. 13-34.
- Bremer, U.F., Arigony-Neto, J. & Simões, J.C. 2004. Teledetecção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4(1): 37-48.
- ESA. European Space Agency. 2006. *BEST (Basic Envisat and ERS SAR Toolbox) user manual. Version 4.0.5*. Frascati, ESA, 173 p. Disponível em: <ftp://ftp.esrin.esa.it/pub/astbxftp/BEST_SUM_v4_05.zip> Acesso em: 11 out. 2007.
- ESA. European Space Agency. 2007. ERS Design. Disponível em <<http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=4221>> Acesso em: 11 out. 2007.
- Laur, H., Bally, P., Meadows, P., Sanchez, J., Schättler, B., Lopinto, E. & Esteban, D. 2004. *Derivation of the Backscattering coefficient s^0 in ESA ERS SAR PRI products*. Document ESA/ESRIN, ESTN-RS-PM-HL09. Berlin, ESA, v.2, 53 p.
- Leica Geosystems. 2005a. *Imagine orthoradar tour guide*. In: Leica Geosystems. *Imagine Radar Mapping suite user's guide*. Georgia, Leica Geosystems, p. 5-82.
- Leica Geosystems. 2005b. Radar concepts. In: Leica Geosystems. *ERDAS Field Guide*. Georgia, Leica Geosystems, p. 305-337.
- Liu, H., Jezek, B., Biyan, L. & Zhao, Z. 2001. *RADARSAT Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2*. Boulder, National Snow and Ice Data Center. Disponível em <<http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html>> Acesso em: 11 out. 2007.
- Martin, P.J. & Peel, D.A. 1978. The spatial distribution of 10 m temperatures in the Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 20(1): 311-317.
- Massom, R. & Lubin, D. 2006. *Polar Remote Sensing. Volume II: Ice Sheets*. Chichester, Springer-Verlag, 426 p.
- Morris, E.M. & Vaughan, D.G. 2003. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of variability of ice shelves. In: Domack, E., Leventer, A., Burnett, A., Bindshaller, R., Convey, P. & Kirby, M. (Eds.). *Antarctic Peninsula climate variability historical and paleoenvironmental perspectives*. Washington, American Geophysical Research, p.61-68.
- Paterson, W.S.B. 1994. *The physics of glaciers*. Amsterdam, Elsevier, 480 p.
- Rack, W. & Rott, H. 2004. Pattern of retreat and disintegration of Larsen B Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 39(1): 505-510.
- Rau, F. 2003 The upward shift of the dry snow line on northern Antarctic Peninsula. *EARSeL eProceedings*, 2(1): 113-121.
- Rau, F. & Braun, M. 2002. The regional distribution of the dry snow zone on the Antarctic Peninsula north of 70° south. *Annals of Glaciology*, 34(1): 95-100.
- Rau, F., Braun, M., Friedrich, F., Weber, F. & Goßmann, H. 2001. Radar glacier zones and its boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. *EARSeL eProceedings*, 1(1): 317-27.
- Rau, F., Mauz, F., De Angelis, H., Jaña, R., Arigony-Neto, J., Skvarca, P., Vogt, S., Saurer, H. & Goßmann, H. 2004. Variations of glacier frontal positions on the northern Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 39(1): 525-530.
- Rau, F., Mauz, F., Vogt, S., Khalsa, J.S. & Raup, B. 2005. *Illustrated GLIMS glacier classification manual. GLIMS guides and tutorials*. Berlin, Institut für Physische Geographie and National Snow and Ice Data Center, 36 p. Disponível em <http://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf> Acesso em: 11 out. 2007.
- Rees, W.G. 2006. *Remote sensing of snow and ice*. Boca

- Raton, Taylor & Francis, 284 p.
- Reynolds, J.M. 1981. The distribution of mean annual temperatures in the Antarctic Peninsula. *British Antarctic Survey Bulletin*, 54(1): 123-133.
- Rott, H., Skvarca, P. & Nagler, T. 1996. Rapid collapse of northern Larsen ice shelf, Antarctica. *Science*, 5250(271): 788-792.
- SCAR. Scientific Committee on Antarctic Research. 2000. *Antarctic Digital Database. Version 3. Download Data*. Disponível em: <<http://www.add.scar.org:8080/add/registered/download.jsp>> Acesso em: 11 out. 2007.
- Schneider, C. 2000. Energy and mass balance at the surface in the wet snowzone of Northeast Glacier, Antarctic Peninsula. *Polarforschung*, 67 (1/2): 65-75.
- Simões, J.C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve e do gelo. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4(1): 119-154.
- Skvarca, P., Rott, H. & Nagler, T. 1995. Satellite imagery, a baseline for glacier variation study on James Ross Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*, 21(1): 291-296.
- Skvarca, P., Rack, W., Rott, H. & Donangelo, T.I. 1998. Evidence of recent climatic warming on the eastern Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, 27(1): 628-632.
- Skvarca, P. & De Angelis, H. 2003. Impact assessment of regional climatic warming on glaciers and ice shelves of the northeastern Antarctic Peninsula. In: Domack E.; Leventer, A.; Burnett, A.; Bindshadler, R.; Convey, P. & Kirby, M. (Eds.): *Antarctic Peninsula climate variability: historical and paleoenvironmental perspectives*. Antarctic Research Series, 79. Columbia, American Geophysical Union, p. 69-78.
- Torinesi, O., Fily, M. & Genthon, C. 2003. Interannual variability and trend of the Antarctic Ice Sheet summer melting period from 20 years of spaceborne microwave data. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38 (1): 147-152.
- Turner, J., Lachlan-Cope, T.A., Marshall, G.J., Morris, E.M., Mulvaney, R. & Winter, W. 2002. Spatial variability of Antarctic Peninsula net surface mass balance. *Journal of Geophysical Research*, 107(D13): 4173-4191.
- Vaughan D. G. 2006. Recent trends in melting conditions on the Antarctic Peninsula and their implications for ice-sheet mass balance and sea level. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 38(1): 147-152.
- Vogt, S. & Braun, M. 2004. Influence of glaciers and snow cover on terrestrial and marine ecosystems as revealed by remotely-sensed data. *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4(1): 105-118.