



Teledetecção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000

ULISSES F. BREMER¹, JORGE ARIGONY-NETO^{1,2} e JEFFERSON C. SIMÕES²

¹Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas, Departamento de Geografia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil

²Institut für Physische Geographie, Universität Freiburg, Werderring 4, D-79085 Freiburg, Alemanha

ABSTRACT

This paper investigates morphological features of the ice cap and glaciers of King George Island (KGI), South Shetlands, Antarctica, mainly to determine variations in glacier front positions from 1956 to 2000, using maps produced from aerial photogrammetric surveys and satellite imagery. Glacier front positions were determined using three multispectral SPOT images taken in 1988, 1995, and 2000. These were compared to their positions in 1956, determined from the aerial photographs. A new digital topographic database, as a basic Geographic Information System (GIS)-layer for environmental monitoring, improves data quality derived from previous studies. Seventy ice drainage basins were identified, covering 1044 km² (91.5%) of the KGI present area. General glacier retreat has been observed for 44 years, more intensely in Admiralty Bay and the eastern side of the island. Relatively small ice masses with subpolar to temperate thermal regime, the case for the South Shetland Archipelago, may respond rapidly to changes in atmospheric temperature. Therefore, changes observed in KGI may be related to an increase in temperature, recorded in this region during the last 5 decades.

Key words: glacial drainage basins, glacier retreat, King George Island, Antarctica.

INTRODUÇÃO

A teledetecção possibilita abordar multidisciplinarmente vários aspectos das regiões polares. Na busca por uma melhor compreensão do ambiente global, esta ferramenta vem sendo utilizada por diferentes ramos das ciências, na tentativa de apontar soluções para questões que, nas últimas décadas, têm alertado a humanidade. Como exemplo, destacam-se aquelas que decorrem do aquecimento da atmosfera do planeta. Neste contexto, a criosfera vem sendo estudada para incrementar o conhecimento de suas interações com a atmosfera e os oceanos. As massas de gelo que se encontram perto do ponto de fusão

sob pressão (*pressure melting point*) respondem rapidamente às alterações nos parâmetros atmosféricos. Assim, despertam o interesse da comunidade científica por serem importantes alvos para o monitoramento ambiental.

O uso da teledetecção, para auxiliar a compreensão dos processos característicos dessas massas de gelo, tem crescido no contexto global. O aprimoramento técnico dos mecanismos de integração de dados também tem colaborado para a análise de feições glaciais, pois possibilitam a observação do comportamento da cobertura de gelo do planeta ao longo do tempo.

O presente estudo analisa as bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George (IRG) através da uti-

Correspondência para: Ulisses Franz Bremer
E-mail: bremer@ufrgs.br

lização de dados teledetectados e de campo. Busca-se verificar mudanças na superfície da cobertura de gelo, suas características morfológicas e dinâmicas. As informações obtidas de imageamento de satélites e fotografias aéreas são integradas em produtos cartográficos.

A ilha, parte do arquipélago das Shetlands do Sul, está na região onde são observadas as médias de temperatura atmosférica mais altas na Antártica. Ou seja, a IRG é um importante local para os estudos sobre as interações da atmosfera com a criosfera antártica. A retração observada nas frentes de geleiras de 45 bacias de drenagem, entre 1956 e 1995, resultou na perda de 89 km² da cobertura de gelo (Bremer 1998 inédita). Isso representou a redução de 7,1% da área que a IRG tinha no final de 1956 (Bremer 1998 inédita). Essas observações ressaltam a importância das pesquisas glaciológicas da zona antártica marítima (Holdgate 1977), pois, provavelmente, estas mudanças estão correlacionadas à elevação da temperatura atmosférica neste setor antártico (Feron et al. 2004, neste volume), onde as médias de temperatura nos meses mais quentes oscilam entre 0 e 2°C (Young 1991).

PROPRIEDADES DA NEVE E DO GELO RELEVANTES PARA A TELEDETECÇÃO

É postulado fundamental da teledeteção o fato de que cada alvo possui uma identidade eletromagnética. Para a neve, a resposta espectral está diretamente relacionada a variáveis tais como: teor de água livre em seu sistema de poros, tamanho e formato dos grãos, conteúdo de impurezas, espessura das camadas e rugosidade superficial. A sua idade também influencia na resposta espectral, pois a neve nova, de deposição recente, tem reflectância muito alta no espectro visível. Com o tempo, os cristais de neve modificam-se e os grãos aumentam de diâmetro, ocorrendo adição natural de impurezas, o derretimento e o recongelamento nas camadas superficiais. Ocasionalmente, então, diminuição da reflectância. Hall e Martinec (1985) afirmam que esse fenômeno é especialmente observável através de comprimentos de ondas mais longos, como no infravermelho pró-

ximo. Com relação ao gelo, é possível constatar nos comprimentos de onda do espectro visível e do infravermelho próximo uma grande variabilidade em sua reflectância. Esta depende, fundamentalmente, do teor de impurezas, da ocorrência ou não de derretimento superficial e do tipo de cobertura sobre a geleira. Uma baixa reflectância caracteriza o gelo de geleira, mas mesmo numa zona de acumulação, onde este tipo de gelo ocupa o maior volume, altos valores de reflectância são esperados devido à cobertura de neve superficial.

Independentemente das características da massa glacial em si, o comportamento espectral da neve está diretamente relacionado à elevação solar. A radiação da neve e do gelo diminui significativamente quanto menor for a elevação solar.

O albedo de áreas cobertas de neve e suas mudanças, devido aos processos de contaminação, são fatores importantes na análise do comportamento da neve perante os sistemas sensores. A Sociedade Americana de Fotogrametria (ASP) desenvolveu diversos modelos de formulação complexa para calcular o albedo ou a refletividade da neve (American Society of Photogrammetry 1983). Wunderle e Saurer (1995) encontraram valores entre 0,76 e 0,92, com média em torno de 0,82, para o albedo da superfície de neve com percolação de água (zona de percolação) em áreas glaciais antárticas sob influência climática marítima, como é o caso das Shetlands do Sul.

Os efeitos atmosféricos também devem ser considerados, principalmente no caso de trabalhos que envolvem a coleta de dados a partir de sensores que atuam na faixa do infravermelho termal. Tais sensores têm suas medições afetadas pela atmosfera e entre eles estão os alvos dos quais se quer calcular a temperatura. Para a obtenção de medições mais precisas da temperatura de uma superfície glacial, é importante que haja uma camada de neve espessa, o suficiente para impedir que a radiação proveniente das camadas mais profundas afete o sinal observado. Além deste fato e dos efeitos atmosféricos, outros fatores que afetam a medição da temperatura da neve no infravermelho termal são: a sua própria tempe-

ratura, o tamanho dos cristais e o conteúdo de água em estado líquido.

As propriedades elétricas que regem a constante dielétrica da neve influenciam fortemente a emissão e o retorno de microondas. A presença de água líquida na neve é o principal fator de mudança desta constante. Este fator é primordial quando se trabalha com instrumentos que medem a radiação emitida: é o caso dos radiômetros. Também é fundamental para instrumentos que medem a intensidade de retorno de um sinal emitido: é o caso dos radares.

POTENCIAL E LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS DE TELEDETECÇÃO USADAS NESTE TRABALHO

Tendo prevalecido o uso de fotografias aéreas na década de 1960 e de reproduções fotográficas do imageamento obtido por satélites nos anos 70, a análise digital de dados orbitais tornou-se comum nos estudos glaciológicos, a partir de meados dos anos 80. Aliada a uma melhor resolução espacial, a versatilidade dos dados digitais revelou feições glaciológicas até então desconhecidas. Tais propriedades foram decisivas para o convencimento da comunidade glaciológica, na adoção de técnicas de exploração digital das cenas de áreas cobertas por neve e gelo adquiridas pelo sensor MSS (*multispectral scanner*). Esse sensor fez parte dos cinco primeiros satélites da série ERTS/Landsat.

Embora apresentassem um grande recobrimento lateral nas zonas de baixa latitude do globo, esses sensores mostravam certas restrições para o detalhamento de alvos glaciais devido à baixa resolução espacial do sistema $-79 \text{ m} \times 79 \text{ m}$. A refletância média de um pixel representa um mosaico de objetos heterogêneos. Assim, certas áreas imageadas não apresentavam a textura esperada para bem definir determinadas feições, por exemplo, zonas de fendas nas geleiras que são suavizadas devido à baixa resolução. Um outro problema dos sensores MSS decorria da freqüente saturação, uma vez que a radiação recebida excedia o valor máximo para o qual eram calibrados.

A despeito de suas limitações na década de 1980, reconhecia-se que, embora muita informação

pertinente às massas de gelo pudesse ser extraída da visão sinóptica, propiciada por produtos fotográficos Landsat, seus CCTs (*Computer Compatible Tapes*) forneciam informação digital bastante apta à manipulação e análise por computador (Dowdeswell 1984 inédita). Atualmente, para grande parte da Antártica, não é possível trabalhar com dados digitais MSS originais da primeira série Landsat. A baixa procura por estes produtos não promoveu a reprodução periódica, o que levou à deterioração dos CCTs com as imagens daquela zona do globo. Hoje, existem disponíveis, apenas sob a forma de produtos fotográficos, algumas poucas cenas livres de nuvens extraídas por esses sensores. A perda daqueles CCTs significa, portanto, uma lacuna temporal para o trabalho com dados digitais que necessitam confrontar cenas de 20 anos atrás com outras mais recentes.

Desde o lançamento do satélite Landsat 5, está disponível o sensor *Thematic Mapper* (TM), registrando 256 níveis de radiancia em 7 bandas de comprimento de onda, com uma resolução espacial de 30 m em seis bandas que são correspondentes ao espectro visível e infravermelho próximo e médio, e de 120 m na banda que corresponde ao infravermelho termal. O TM evoluiu ao proporcionar: uma resolução espacial mais fina, uma melhor discriminação espectral dos alvos, a maior fidelidade geométrica e uma melhor precisão radiométrica. Segundo Hall e Martinec (1985), é possível distinguir nuvens e neve pela banda 5 do TM, o que corresponde ao setor proximal do espectro infravermelho médio (1,55-1,75 μm). Apesar da melhor resolução do TM, o custo de seus dados para as ilhas Shetland do Sul inviabilizava sua aquisição por instituições brasileiras. Esse é um dos motivos para não utilizá-los neste trabalho.

Operando no satélite SPOT (*Système Probatoire pour l'Observation de la Terre*) desde 1986, os sensores HRV (*Haute Résolution Visible*) têm uma resolução espacial maior que a obtida pelos sensores a bordo dos satélites da série Landsat. Cada um desses sensores tem a capacidade de imagear uma área de 60 km \times 60 km, em visada vertical,

ou 80 km × 60 km em visada oblíqua. Este tipo de observação é possível em razão da inclusão de um espelho no curso óptico de cada sensor, o que possibilita fazer visadas oblíquas em relação à sua rota normal. Isto facilita a obtenção de cobertura estereoscópica de uma área a partir de diferentes ângulos e em órbitas sucessivas. Também permite imagear uma mesma área com várias repetições, diminuindo o intervalo de tempo entre uma e outra passagem do satélite.

Os sensores HRV têm também a capacidade de medir a radiação refletida pelos objetos na superfície da Terra, tanto no modo pancromático (P) quanto no multiespectral (XS). No modo P, a observação se realiza na banda espectral correspondente à parte visível do espectro – sem o azul, ou seja, nos comprimentos de onda compreendidos entre 0,51 μm e 0,73 μm . Neste modo, é feita amostragem em todos os 6000 detectores do sensor, obtendo-se dados com uma resolução espacial de 10 m. No modo XS, são obtidas imagens em duas bandas da porção visível do espectro: o verde – entre 0,50 μm e 0,59 μm , para a banda XS1; e vermelho – entre 0,61 μm e 0,68 μm , para a banda XS2. Uma outra banda, a XS3, corresponde aos comprimentos de onda de 0,79 μm a 0,89 μm , do infravermelho próximo. Os dados são obtidos com uma resolução espacial de 20 m, pois somente a metade dos detectores é utilizada na amostragem (SPOT Image 1989).

A principal restrição ao imageamento pelo HRV da região aqui estudada se dá por ocasião do inverno austral, quando a inclinação solar é muito baixa. O CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*), que opera os satélites SPOT, considera a data de 31 de março como limite para que o sistema continue suas tentativas de obtenção de imagens das ilhas Shetland do Sul, pois a partir desta data a luminosidade é insuficiente para isso. Um outro problema a ser considerado é sua incapacidade de obter informações de áreas cobertas de nuvens. Talvez este seja o principal fator que pode levar ao insucesso na obtenção de uma cena programada para este sensor na área deste estudo.

Apesar de não ser utilizado neste trabalho, de-

ve-se chamar a atenção para a aplicação do SAR (*Synthetic Aperture Radar*) em Glaciologia. Desde o advento do Satélite ERS-1 (*European Remote Sensing 1*), lançado pela *European Space Agency* (ESA) em julho de 1991, estes sensores são utilizados intensamente, pois os mesmos têm capacidade de imagear áreas cobertas de nuvens, podem adquirir cenas noturnas ou de períodos do ano sem iluminação solar. Esta versatilidade tornou tal instrumento imprescindível na investigação de áreas situadas em zonas de grande perturbação atmosférica, como a Península Antártica e as ilhas em suas proximidades. Hoje, as cenas obtidas pelos radares de abertura sintética estão sob grande demanda devido à grande versatilidade dos sensores do ERS-2, JERS-1 (o primeiro satélite japonês de recursos terrestres), e do satélite canadense Radarsat. A ESA programou o lançamento do CryoSat para 2004, que se trata de satélite com SAR dedicado à exploração da criosfera.

OS ESTUDOS DE TELEDETECCÃO DA ILHA REI GEORGE

Os primeiros dados teledetectados da ilha Rei George datam do verão de 1956–57. Esse levantamento aerofotográfico foi executado pela empresa canadense *Hunting Aerosurveys*, utilizando aviões *Canso* (Headland 1989). Desse aerolevanteamento, que recobriu todas as Shetlands do Sul e parte da Península Antártica, resultaram os primeiros mapas confiáveis da região e que foram elaborados pelo *Directorate of Overseas Survey* (D.O.S.) do Reino Unido. A ilha Rei George não teve o interior da calota de gelo recoberta pelo levantamento. A maior parte dos estudos realizados nas ilhas Shetland do Sul, ainda tem por base cartográfica aqueles mapas, hoje disponíveis na base de dados digitais da Antártica (*Antarctic Digital Database – ADD*). A Marinha Real britânica (*Royal Navy*) executou um aerolevanteamento de maior escala, para a costa da ilha Rei George em 1975 (Tabela I), o que permite detalhar a posição das frentes de gelo.

A análise de feições superficiais e da dinâmica da cobertura de neve, através de interpretação de da-

dos de imageamento multitemporal SPOT e ERS-1, foi inicialmente realizada na península Warszawa e áreas próximas (Andrade e Vicuña 1993, Börgel 1993, Wunderle et al. 1994). Em seguida, cenas orbitais possibilitaram avaliar a posição das frentes de gelo da baía do Almirantado (Muser 1995 inédito) e de todo o setor meridional da ilha (Simões e Bremer 1994, 1995), através das quais constatou-se o recuo dessas frentes, desde o aerolevanteamento de 1956. Uma análise preliminar de produtos orbitais, de dois terços (2/3) da ilha, forneceu dados que possibilitaram verificar um posicionamento médio da linha de neve acima de 350 m no final da década de 1990, e um retrocesso generalizado na grande maioria das frentes de gelo (Bremer e Simões 1995). As bacias de drenagem glacial da ilha puderam ser delimitadas pela primeira vez, a partir de um mosaico de cenas SPOT. Assim, foi constatada a retração predominante das frentes de gelo, ao longo de toda a costa, no período entre 1956 e 1995 (Bremer 1998 inédita).

MATERIAIS E MÉTODOS

Verificar e avaliar mudanças na área coberta de neve e gelo da ilha Rei George, nas quatro últimas décadas, têm sido possível a partir da interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélites, além da análise de dados de observações de campo. Estudos de Malagnino e Strelin (1992), e Skvarca (1993a,b), que apresentaram sucesso no monitoramento de grandes áreas cobertas de gelo através da interpretação de dados orbitais multitemporais, serviram como referencial metodológico neste trabalho.

Análises laboratoriais de fotografias aéreas e imagens de satélite foram seguidas pelo reconhecimento da área em campo. As etapas posteriores envolveram o pré-processamento de imagens, o processamento e a classificação das imagens, a elaboração de mosaicos das cenas de trabalho e a integração dos dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), a partir das quais foram avaliados os resultados.

BASES CARTOGRÁFICAS, AEROFOTOGRAMETRIA E DE IMAGEAMENTO ORBITAL

Um mosaico de imagens SPOT e um modelo digital de elevação (MDE) da ilha Rei George (Braun et al. 2001) foram disponibilizados no formato digital de exportação de dados do *software* ARC/INFO, pelo Instituto de Geografia Física (IPG) da Universidade de Freiburg, Alemanha.

Imagens Landsat (1979), SPOT (1988, 1994, 1995 e 2000), fotografias aéreas (1975), carta aeronáutica da península Fildes, carta batimétrica da baía do Almirantado, e cartas da ilha Rei George, apresentadas na Tabela I, fazem parte do acervo de imagens e mapas do Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas (NUPAC) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A base de dados digitais da Antártica (ADD) e o *Composite Gazetteer of Antarctica* encontram-se disponíveis no portal eletrônico do Comitê Científico de Pesquisa Antártica (SCAR) na Internet (www.scar.org).

DADOS CARTOGRÁFICOS

As duas cartas do D.O.S., em escala 1: 200.000, foram utilizadas para a construção de um mapa-base para auxiliar a análise das imagens e também para servir de documentos básicos na extração dos pontos de controle, para o georreferenciamento das imagens de satélite.

Cartas da Academia Polonesa de Ciências (PAN), foram utilizadas para verificar a posição das frentes de geleiras que desembocam na baía do Almirantado e para comparar com a posição dos contatos entre os afloramentos rochosos e o gelo registrados nas cartas do D.O.S. Utilizou-se também a carta-imagem da Força Aérea Chilena (FACH) para comparação de feições do mesmo tipo na área da península Fildes. As cartas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil foram utilizadas para verificação da linha de costa da ilha em posição mais atual.

TABELA I

Dados utilizados para detecção de mudanças nas geleiras da ilha Rei George.

Título	Data	Escala/ Resolução	Fonte	Projeção e <i>Datum</i>	Origem dos dados	Dados inte- grados ao SIG
ADD, versão 3	2000	1: 200.000	www.scar.org	Projeção Estereográfica Polar, WGS 84	Mapas do <i>Directorate of Overseas Survey (D.O.S.)</i> de 1968	Linha de costa em 1956
Admiralty Bay	1990	1: 50.000	<i>Nakladem Instytutu Ekologii (PAN)</i>	Sistema de Coorde- nadas de Gauss-Krüger e coordenadas geo- gráficas, geóide Krassowski, 1942	Levantamento de campo com teo- dolito e foto- grafias aéreas de 1978 e 1979	Divisores de bacias de dre- nagem da área da baía do Almirantado
Baía do Almirantado	1992	1: 40.000	DHN	Projeção de Mercator, WGS 84	Levantamentos da DHN e cartas batimétricas existentes	Deslocamentos e reconhe- cimento
Carta Aero- náutica de la Península Fildes	1993	1: 20.000	FACH			Posição das frentes de gelo
<i>Composite Gazetteer of Antarctica</i>	2000		<i>SCAR Work- ing Group of Geodesy and Geographic Information</i>			Topônimos
Divisores de drenagem glacial da ilha Rei George	1998		Bremer (1998)		Interpretação de imagens <i>SPOT</i>	Bacias de drenagem glacial
Fotografias aéreas	1975	1: 11.000	<i>Royal Navy</i>			Posição das frentes de gelo
Imagens MSS5 do satélite Landsat2	20/ fev/ 1979	79 m	Cenas 232-103 e 232-104			Posição das frentes de gelo
Imagens XS do satélite SPOT-1	19/ fev/ 1988	20 m	SPOT IMAGE Cena 725-478 (<i>Figure 1</i>)			Posição das frentes de gelo
Imagens XS do satélite <i>SPOT-3</i>	29/ mar/ 1995	20 m	SPOT IMAGE Cena 725-477 (<i>Figure 1</i>)			Posição das frentes de gelo
Levantamento com GPS	2000	15 m	LAPAG e IPG	UTM, WGS 84	Levantamentos com GPS em 1997-98 e 2000 pelas Expedições Brasileira- Alemãs	Pontos de controle

TABELA I (continuação)

Título	Data	Escala/ Resolução	Fonte	Projeção e <i>Datum</i>	Origem dos dados	Dados inte- grados ao SIG
MDE da ilha Rei George	2000	100 m	IPG	UTM, WGS 84	Dados apresentados na Tabela 3.2	Divisores de bacias de drenagem
Mosaico de imagens SPOT XS	2000	20 m	IPG (Figure 1)	UTM, WGS 84	Imagens SPOT XS, cenas 725-478 de 26/nov/1994, 725-477 de 29/mar/1995 e 725-478 de 23/fev/2000	Posição das frentes do gelo
<i>Zatoka Admiralicji</i>	1980	1: 25.000	<i>Nakladem Instytutu Ekologii (PAN)</i>	Sistema de Coorde- nadas de Gauss-Krüger e coordenadas geo- gráficas, geóide Krassowski, 1942	Levantamento de campo com teo- dolito e foto- grafias aéreas de 1978 e 1979	Topônimos

DADOS LANDSAT

Foram utilizadas as imagens MSS-5 do Landsat 2, correspondendo a cenas das órbitas 232-103 e 232-104. Nesta última órbita, uma cena MSS-7 foi adquirida. Devido à melhor penetração na atmosfera dos comprimentos de onda na faixa correspondente ao vermelho do espectro visível, cenas no Canal 5 são particularmente interessantes na comparação das diferentes feições glaciais de grandes áreas, proporcionando um melhor contraste nas imagens. Por sua vez, a Banda 7 deste sensor é interessante para definir a linha de costa. A má penetração da energia nos comprimentos de onda do infravermelho próximo na água, onde são absorvidos praticamente sem reflexão, facilita a distinção dos contatos entre rocha e água. Convém destacar que estas cenas Landsat eram as únicas fontes de dados de teledeteção para o norte da ilha Rei George, até a obtenção de uma imagem SPOT em 1995.

DADOS SPOT

As principais imagens de trabalho aqui utilizadas são provenientes deste satélite. Sua área de abrangência pode ser verificada no mapa índice representado na Figura 1. Trata-se das cenas multi-

espectrais (725 478 de 19/fevereiro/88, 725 477 de 29/março/95, e 725 478, de 23/fevereiro/2000) obtidas por sensores HRV, cujo mapa índice pode ser observado na Figura 1.

Cabe ressaltar que, além das dificuldades impostas pelas condições meteorológicas nas Shetlands do Sul, a obtenção de imagens de satélite daquela área é dificultada pelos seus custos. Assim, a integração de esforços entre os grupos de pesquisas antárticas do NUPAC e do IPG tem possibilitado o intercâmbio de informações e dados, agilizando os trabalhos.

DADOS DE CAMPO

As observações e dados, obtidos em trabalhos de campo, são frutos da situação real, portanto, é importante aglutiná-los aos dados extraídos da interpretação de produtos teledetectados. A ilha Rei George foi analisada durante quatro campanhas de verão, estação do ano na qual haviam sido tomadas as fotografias aéreas e obtidas as imagens orbitais. Análises visuais destes produtos foram feitas como apoio para os trabalhos de campo.

As atividades exploratórias foram realizadas desde as áreas livres de gelo, que são próximas da costa, até os pontos mais altos dos domos glaciais.

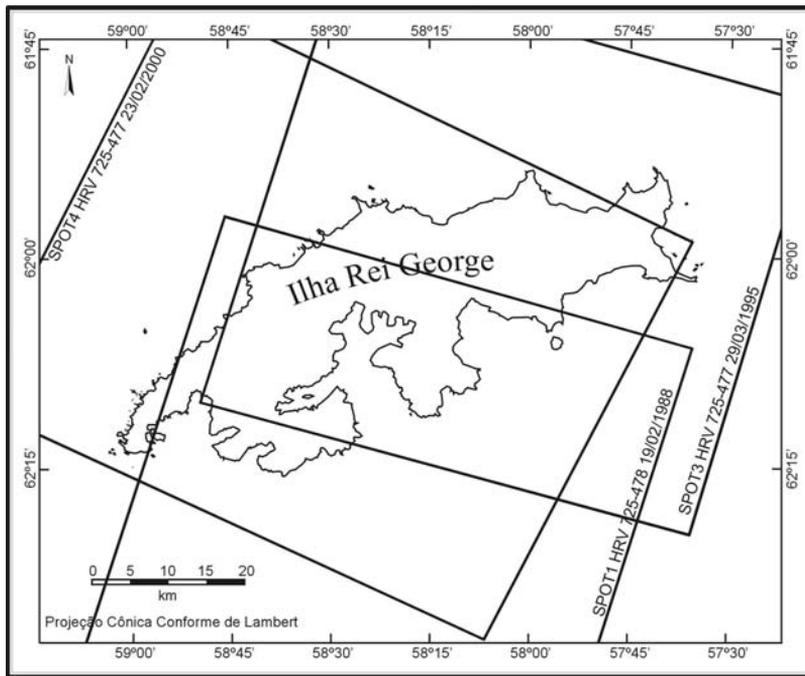


Fig. 1 – Mapa índice das cenas SPOT utilizadas para delimitar as bacias de drenagem e comparar a posição das frentes de gelo da ilha Rei George entre 1956 e 2000.

As expedições foram organizadas pelo Laboratório de Pesquisas Antárticas e Glaciológicas (LAPAG), no âmbito das operações do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), de janeiro a março de 1994, de dezembro de 1994 a janeiro de 1995, de novembro de 1995 a março de 1996 e de dezembro de 1999 a março de 2000. Recentemente, LAPAG foi reestruturado como *Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas* (NUPAC).

Nos deslocamentos entre as partes mais baixas da cobertura de gelo, abaixo de 350 m de altitude, rumo ao topo da ilha (aproximadamente a 700 m de altitude), observa-se variações no pacote superficial de neve e nos fatores que afetam sua resposta espectral. Nas partes mais baixas, a neve encontra-se saturada de água, com grãos arredondados e sem compactação. No plano intermediário, ocorre mudança para um pacote de neve mais compactado e pouco úmido, que era constituído por neve de grãos de menor diâmetro, até atingir as partes mais altas da ilha (> 550 m de altitude). Lá, onde a granulome-

tria da neve era menor do que nas altitudes inferiores e mais compactada, ocorre somente percolação e recongelamento da água de derretimento, não se produzindo saturação do pacote de neve superficial.

Nos meses de fevereiro de 1994, 1996 e 2000, utilizando-se botes infláveis motorizados e tendo como base a Estação Antártica Comandante Ferraz, na península Keller, fez-se reconhecimento geral das frentes de geleiras que descarregam na baía do Almirantado. Com o apoio da Estação Antártica Polonesa Henryk Arctowski, também foram utilizados botes infláveis motorizados nos deslocamentos para as geleiras da orla sudoeste desta baía e, fora dela, para acesso ao divisor das geleiras Windy e Tower que drenam para o estreito de Bransfield.

Na última campanha foram obtidos pontos de controle através de um Sistema de Posicionamento Global (GPS). Foi usado um par de receptores *Magellan Pro Mark X-CM* para levantamento diferencial, com antena geodésica e baterias recarregáveis. A precisão desse equipamento na área de estudo foi

testada em um ponto de coordenadas conhecidas, a estação de triangulação da DHN, próximo à EACF. As coordenadas de cada local foram obtidas através da média de 1500 pontos coletados por tomada, o que possibilita uma precisão de até 15 m RMS (*root mean square*). Utilizando-se a média de 1000 pontos, diminui-se o erro para 12,2 m – compatível com as recomendações do manual do GPS para este tipo de levantamento.

INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS

Este estudo procurou determinar as mudanças ocorridas nas frentes de gelo da ilha Rei George ao longo de 44 anos, através da comparação de dados dos sensores satelitais obtidos em fevereiro de 2000, com os produtos cartográficos resultantes de um aerolevanteamento realizado entre dezembro de 1956 e janeiro de 1957.

Para a obtenção da linha de costa no ano 2000, foi digitalizado o mosaico de imagens SPOT, elaborado por Braun et al. (2001). Tendo como base os trabalhos de Bremer (1998 inédita) e Simões et al. (1999), delimitou-se, com a utilização do software ARC/INFO, as bacias de drenagem glacial sobre o mosaico de imagens SPOT, com as curvas de nível sobrepostas.

Utilizando as curvas de nível geradas pelo MDE da ilha Rei George, Arigony-Neto (2001 inédita) melhorou a precisão da delimitação das bacias de drenagem, realizada nos trabalhos anteriores. Estas curvas possibilitaram demarcar com maior nitidez os limites onde as mudanças de declividade são suaves e não permitem a precisa distinção no mosaico, como no limite noroeste da geleira Domeyko. O MDE, no formato digital, foi inserido no sistema a partir da conversão do formato de exportação de dados do ARC/INFO (.E00) para o formato de dados *raster* deste software (GRID). Para a representação da topografia em mapas, foram geradas curvas de nível com 50 metros de equidistância. Porém, constatou-se que, em alguns locais, as curvas de nível não correspondem com segurança aos divisores interpretados no mosaico. Isso se deve

à carência de dados atualizados para a elaboração do MDE. Para essa delimitação, consideraram-se os melhores conjuntos de evidências, obtidas através do mosaico digital e das curvas de nível. Conforme as sugestões de Sievers e Bennat (1989), adotou-se a projeção cartográfica Cônica Conforme de Lambert, com dois paralelos padrão. Como elipsóide de referência, adotou-se o Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84), devido a sua ampla utilização em projetos de mapeamento e pesquisa na Antártica.

A linha de costa para 1956 foi então convertida de .E00 para o formato *Coverage*, de arquivos vetoriais do software ARC/INFO. Também foi necessário transformar a referência geodésica da Projeção Estereográfica Polar (utilizada no ADD) para a Projeção Cônica Conforme de Lambert.

DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A utilização de cartas atualizadas é instrumento imprescindível em trabalhos que, como este, se ocupa não somente da delimitação de bacias de drenagem, mas também de quantificar taxas de avanço e retração de geleiras. Através da comparação de um mapa atual com mapas anteriores, pode-se observar se houve aumento ou diminuição na área de uma dessas bacias. Aliando-se a isso, o conhecimento da espessura desse gelo permitiria estimar ganhos ou perdas volumétricas.

Cartas em escala 1: 50.000, representando a topografia através de curvas altimétricas espaçadas em 20 m, são instrumentos necessários para a construção de modelos digitais do terreno. Essas cartas são imprescindíveis em uma análise precisa de bacias de drenagem. Os mapas de 1968, elaborados pelo D.O.S., que são os únicos instrumentos cartográficos disponíveis para análise da cobertura total da ilha até 2000, apresentam curvas de nível espaçadas em 100 m, e com partes inferidas. Ou seja, esses mapas não são indicados para utilização em modelagem digital do terreno.

A sobreposição de produtos satelitais em uma ampliação dos mapas do D.O.S. para a escala 1: 100.000 permitiu determinar a posição das frentes

de gelo em 1988. Apesar das distorções decorrentes da falta de correção geométrica das imagens, a interpretação desses produtos iniciais forneceu uma noção geral do comportamento das massas de gelo da ilha entre 1956 e 1988. Posteriormente, dados topográficos obtidos por Braun et al. (2001), possibilitaram uma melhor definição do estado atual das massas de gelo da ilha. Esses dados compõem o maior intervalo de tempo entre os produtos analisados até o momento, ou seja, as fotografias aéreas de 1956 e a imagem do satélite SPOT 4, de 2000 (Arigony-Neto 2001 inédita). A partir desta imagem, e com uso do ARC/INFO, foi possível calcular a área da ilha Rei George em fevereiro de 2000, 1142 km².

A integração dos produtos orbitais com as curvas de nível permitiu a melhor caracterização dos 1044 km² de gelo que cobrem a ilha. Melhorando a demarcação dos seus limites, dos divisores de gelo e de suas 70 bacias de drenagem. É possível observar o controle estrutural marcante das bacias de drenagem em blocos que seguem um alinhamento SW-NE, havendo um platô associado que corresponde às partes mais elevadas da ilha. Pode-se observar uma disposição paralela nos divisores das bacias de drenagem que são voltadas para a passagem de Drake, controladas por blocos no sentido SE-NW nos setores ocidental e noroeste da costa e por blocos no sentido S-N, no setor setentrional desta costa. As massas de gelo fluem dos domos glaciais por meio de bacias de drenagem de diferentes amplitudes e sob variadas condições topográficas. Podem ser encontradas na ilha desde bacias amplas e com declives suaves até outras constrictas lateralmente e com declive abrupto. Delimitou-se 32 bacias que drenam o gelo para a baía do Almirantado, 5 para o estreito de Bransfield, 4 para a baía Legru, 4 para a baía Rei George, 3 para a baía Sherratt, 3 bacias para a baía Destruction, 5 drenam para a baía Vênus e enseada Esmeralda e 5 drenam para a angra Corsair. Outras 5 são voltadas para a costa noroeste e oeste da passagem de Drake, incluindo-se aí as maiores bacias de drenagem da ilha, além de 4 que drenam para a baía Maxwell (Figura 2).

A diminuição do gelo foi mais acentuada nas

bacias de drenagem que descarregam nas baías do Almirantado, Rei George e Sherratt, que são voltadas para o Leste e Sudeste. Essas bacias são mais íngremes que aquelas que drenam para a passagem de Drake, na costa voltada para o Oeste e Noroeste. A frente da geleira Lange, na baía do Almirantado, por exemplo, perdeu aproximadamente 2 km², tendo recuado 1,4 km, o maior observado para todas as geleiras da ilha. Provavelmente, essas mudanças estão correlacionadas à elevação da temperatura atmosférica naquela região da Antártica. A retração de geleiras observada na ilha pode ser visualizada na Figura 2; nela, compara-se a posição da linha de costa de 1956 com a de 2000.

TRABALHOS FUTUROS

Uma delimitação eficiente das bacias de drenagem da ilha pode ser obtida a partir de um mapeamento mais preciso, com curvas de nível em intervalos menores. O levantamento por rádio-ecossondagem (RES), de toda a ilha, é importante para melhor definir a espessura do gelo. Um levantamento por GPS diferencial pode ser feito, por exemplo, usando uma moto-de-neve ou um veículo sno-cat, definindo a topografia em detalhe. Parte desses levantamentos já foi realizada através de cooperação teuto-brasileira, ao longo de 450 km de linhas de RES e GPS diferencial, nos verões de 1997-98, e de 1999-2000.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), pelo financiamento dos projetos (Processos 48.1308/95-4 e 48.024.3/00-0), que resultaram neste trabalho e ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), coordenado pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), pelo apoio logístico. Agradecem também à *Polkiej Akademii Nauk* pelo apoio logístico prestado na margem oeste da baía do Almirantado e ao *Institut für Physische Geographie da Albert-Ludwigs-Universität* de Freiburg, Alemanha, pelo empréstimo do par de GPS utilizado em campo.

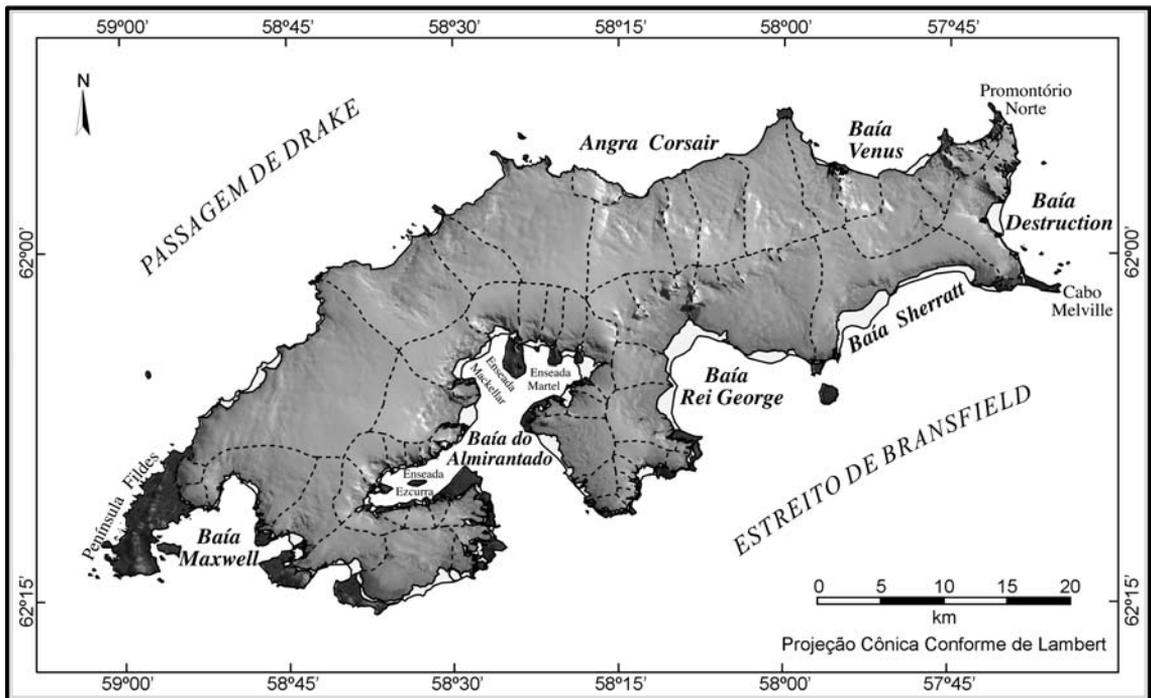


Fig. 2 – Delimitação das bacias de drenagem (BD) da ilha Rei George, a partir da integração da imagem de 2000 e do MDE de 2001.

RESUMO

Este artigo investiga feições morfológicas da calota de gelo e geleiras da ilha Rei George (IRG), arquipélago das Shetlands do Sul, Antártica, principalmente para determinar variações na posição das frentes das geleiras entre 1956 e 2000, usando mapas produzidos a partir de levantamentos aerofotogramétricos e imagens de satélite. As posições das frentes de geleiras foram determinadas usando três imagens multiespectrais SPOT obtidas em 1988, 1995 e 2000. Essas foram, então, comparadas com as posições em 1956, determinadas a partir das fotografias aéreas. Para melhorar a qualidade dos dados de estudos anteriores, uma nova base topográfica digital serve como plano básico de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), para o monitoramento ambiental. Setenta bacias de drenagem do gelo foram identificadas, elas cobrem 1044 km² (91,5%) da área da IRG. A retração geral das geleiras foi observada ao longo dos 44 anos, mais intensamente na baía do Almirantado e no lado leste da ilha. Massas de gelo relativamente pequenas e com regime termal subpolar a temperado, o caso do arquipélago das Shetlands do Sul, podem responder rapidamente às mudanças na temperatura atmosférica. Desta maneira, mudanças

observadas no gelo da ilha Rei George podem estar relacionadas ao aumento da temperatura, registrada na região durante as últimas 5 décadas.

Palavras-chave: bacias de drenagem do gelo, retração glacial, ilha Rei George, Antártica.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. 1983. Manual of Remote Sensing, v 1. Falls Church: ASP. 1232 p.
- ANDRADE B E VICUÑA P. 1993. Determinación del ambiente periglacial en la costa sur de la Isla Rey Jorge mediante el uso de SPOT-1. Rev SELPER 9: 79–82.
- ARIGONY-NETO J. 2001. Determinação e interpretação de características glaciológicas e geográficas com sistema de informações geográficas na Área Antártica Especialmente Gerenciada baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 84 p. Dissertação de mestrado inédita.
- BÖRGEL R. 1993. Respuestas topoclimáticas analizadas en una imagen multiespectral SPOT-1. Rev Selper 9: 36–38.

- BRAUN M, SIMÕES JC, VOGT S, BREMER UF, BLINDOW N, PFENDER M, SAURER H, AQUINO FE e FERRON FA. 2001. An improved topographic database for King George Island – compilation, application and outlook. *Antarct Sci* 13: 41–52.
- BREMER UF. 1998. Morfologia e bacias de drenagem da cobertura de gelo da ilha Rei George, Antártica. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 119 p. Dissertação de mestrado inédita.
- BREMER UF e SIMÕES JC. 1995. Teledetecção de mudanças ambientais na ilha Rei George, Antártica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 6., Goiânia. Anais..., Goiânia, p. 258–261.
- DOWDSEWELL JA. 1984. Remote sensing studies of Svalbard glaciers. Cambridge: Jesus College, 250 p. Tese de doutorado inédita.
- FERRON FA, SIMÕES JC, AQUINO FE e SETZER AW. 2004. Air temperature time series for King George Island, Antarctica. *Pesq Antart Bras* 4: 155–169.
- HALL DK e MARTINEC J. 1985. Remote sensing of ice and snow. London: Chapman & Hall. 189 p.
- HEADLAND RK. 1989. Chronological list of antarctic expeditions and related historical events. Cambridge, Cambridge University Press, 730 p.
- HOLDGATE MW. 1977. Terrestrial ecosystems in the Antarctic. *Philos Trans R Soc London*, 279B (963): 5–25.
- MALAGNINO E e STRELIN J. 1992. Variations of Upsala Glacier in southern Patagonia since the late Holocene to the present. In: NARUSE R e ANIYA M (Eds.), *Glaciological Researches in Patagonia*, 1990, p. 61–85.
- MUSER D. 1995. Der Gletscherrückzug auf King George Island, Süd-Shetland-Inseln zwischen 1956–1992. Freiburg: Universität Freiburg, 82 p. Zulassungsarbeit zum Staatsexamen, inédito.
- SIEVERS J e BENNAT H. 1989. Reference systems of maps and geographic information systems of Antarctic. *Antarct Sci* 1: 351–362.
- SIMÕES JC e BREMER UF. 1994. Morfologia e dinâmica da calota de gelo da ilha Rei Jorge, Antártica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38. Balneário Camboriú, Brasil, 1994. Boletim Resumos Expandidos, v 1, 1994, Balneário Camboriú, p. 354–355.
- SIMÕES JC e BREMER UF. 1995. Investigations of King George Island ice cover using ERS-1/SAR and SPOT imagery. *Rev SELPER* 11: 56–60.
- SIMÕES JC, BREMER UF, AQUINO FA e FERRON FA. 1999. Morphology and variations of glacial drainage basins in the King George Island, ice field, Antarctica. *Ann Glaciol* 29: 220–24.
- SKVARCA P. 1993a. Fast recession of the northern Larsen Ice Shelf monitored by space images. *Ann Glaciol* 17: 317–321.
- SKVARCA P. 1993b. Utilización de imágenes SAR/ERS-1 para detección de cambios y rasgos superficiales en barreras de hielo. *Rev SELPER* 9: 89–93.
- SPOT IMAGE. 1989. Catálogo de los productos SPOT y de los servicios. Toulouse: CNES/SPOT, 54 p.
- WUNDERLE S e SAURER H. 1995. Snow properties of the Antarctic Peninsula derived from ERS-1 SAR images. In: Annual Conference of the Remote Sensing Society, 21., Southampton. Proceedings..., Southampton: University of Southampton, p. 1232–1237.
- WUNDERLE S, GOßMANN H e SAURER H. 1994. Snowcover development as a component of the local geosystem on Potter Peninsula, King George Island, Antarctica. In: ERS-1 SYMPOSIUM SPACE AT THE SERVICE OF OUR ENVIRONMENT, 2., Hamburg. Proceedings..., Hamburg, 1993, v 2, p. 987–991. (ESA SP-361).
- YOUNG EC. 1991. Critical ecosystems and nature conservation in Antarctica. In: HARRIS CM e STONEHOUSE B (Eds.), *Antarctic and global climatic change*. London: Belhaven, p. 117–46.