

Revista Brasileira de Cartografia (2015) N^o 67/7: 1541-1555
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

ESTIMATIVA DAS VARIAÇÕES SAZONAIS NO FLUXO DA GELEIRA GREY, PATAGÔNIA, POR IMAGENS SAR

*Estimate of Seasonal Variations in Flow of Glacier Grey,
Patagonia, in SAR Images*

**Luís Felipe Mendonça^{1,2}, Jorge Arigony-Neto², Claudio Mendes Junior²,
Virginia Santos² & Ricardo Jaña³**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Departamento de Geociências, Av. Bento Gonçalves 9500 – 91501-970 – Porto Alegre, RS, Brasil
lfelipem@msn.com

²Universidade Federal de Rio Grande – FURG
Laboratório de Monitoramento da Criosfera - Instituto de Oceanografia
Av. Itália, km8 – 96201-900 – Rio Grande, RS, Brasil
Jorge.arigony@fugr.br geoclaudio@yahoo.com.br virginssaba@gmail.com

³Instituto Antártico Chileno – INACH
Departamento de Recursos Naturais e Glaciologia
Plaza Muñoz Gamero 1055 – Punta Arenas, Chile
rjana@inach.cl

Recebido em 16 de Janeiro, 2015/ Aceito em 07 de Agosto, 2015
Received on January 16, 2015/ Accepted on August 07, 2015

RESUMO

Este trabalho apresenta estimativas da velocidade de fluxo da geleira Grey, localizada no Campo de Gelo Patagônico Sul, para o período de outubro de 2011 e janeiro a abril de 2012. Obtidos através de um algoritmo baseado no cálculo de correlação cruzada entre pares de imagens SAR COSMO-SkyMed, os valores de velocidade foram posteriormente interpolados, de forma a gerar superfícies contínuas que ilustrem a direção e intensidade de fluxo da geleira. Os resultados foram comparados com dados meteorológicos, disponibilizados pelo Serviço Meteorológico Argentino, para interpretar o padrão sazonal na velocidade de deslocamento. Outubro e abril registraram valores médios de velocidade de fluxo de $1,2 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$ e $1,1 \pm 0,5 \text{ md}^{-1}$, respectivamente. Durante o período de verão, os meses de janeiro, fevereiro e março apresentaram valores de velocidade de fluxo de $1,5 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$; $1,3 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$ e $1,4 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$ variando diretamente com a temperatura média mensal. Com um coeficiente de correlação estimado em 0,96; os resultados indicam que os valores mensais do fluxo da geleira Grey possuem uma relação positiva com a temperatura do ar na superfície. A técnica desenvolvida, a partir do algoritmo *correlCorresp* aplicada em ambiente MATLAB, permitiu uma análise aprimorada das variações na velocidade superficial de geleiras nas mais distintas escalas temporal e espacial.

Palavras chaves: Glaciologia, Patagônia, Imagens SAR, Correlação Cruzada, Velocidade de Fluxo.

ABSTRACT

This study aims to estimate the flow velocities of Grey Glacier, located in Southern Patagonian Ice Field, between October 2011 and May 2012. Obtained by an algorithm based on cross-correlation calculation between pairs of COSMO-SkyMed SAR images, the velocity values were then interpolated to generate continuous surfaces and which show the direction of flow intensity Glacier. The results were compared with meteorological data, provided by the Meteorological Service of Argentina, to interpret the seasonal pattern in velocity. October-April registered values of flow velocity of $1,2 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$ and $1,1 \pm 0,5 \text{ md}^{-1}$; respectively. During the summer, the months of January, February and March had values of flow velocity of $1,5 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$; $1,3 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$ and $1,4 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$ varying directly with the monthly average temperature. With a correlation coefficient at 0,96; the results indicate that the monthly flow of glacier Grey have a positively related with the air temperature at the surface. The technique developed, from the algorithm applied *correlCorresp* using MATLAB, allowed an enhanced analysis of the variations in surface velocity of glaciers in the most distinct temporal and spatial scales.

Keywords: Glaciology, Patagonia, SAR Images, Cross-correlation, Flow Velocity.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de estudos sobre as variações das geleiras andinas se faz importante especialmente para as áreas povoadas no centro-sul do Chile, seja para a estimativa dos recursos hídricos, estudos de mudança climática ou pesquisa glaciológica básica (CASASSA, 2002). A ocorrência de alterações climáticas e suas consequências para os habitantes do planeta Terra torna o monitoramento das geleiras em uma escala global cada vez mais importante. A redução no volume das geleiras continentais é registrada desde a década de setenta (HAEBERLI *et al.*, 1999), porém, devido à dificuldade de acesso e os elevados custos logísticos, apenas 1% das geleiras temperadas existentes no mundo foram monitoradas por estudos *in loco*. Neste sentido, o incremento de tecnologias de imageamento por sensores a bordo de satélites, contribui para a aquisição de dados ambientais contínuos e em diferentes escalas.

A pouca informação referente aos Campos de Gelo Patagônico fez com que, até o final da década de noventa, pouco se soubesse a respeito desta região. No entanto, nos últimos anos houve um crescente interesse da comunidade científica em desenvolver estudos nesta área, ampliando, significativamente, o conhecimento sobre estas geleiras (RIVERA, 2004).

A cordilheira dos Andes compõe um relevo bastante recortado dentro dos territórios chileno e argentino, isto faz com que surjam os chamados climas transandinos continentais, influenciados diretamente por esta cadeia de montanhas (ANIYA, 2007). Os Campos de Gelo Patagônico são fortemente influenciados por padrões de circulação atmosférica de média latitude e

frentes vindas da Antártica (RASMUSSEN, 2007). Ventos predominantes do oceano Pacífico, combinados com o terreno íngreme andino geram uma elevada precipitação na frente ocidental do Campo de Gelo Patagônico (RIVERA & CASASSA, 2004). Assim, o balanço de massa no oeste é dominado pela acumulação de neve no inverno, enquanto o lado leste sofre significativa ablação no verão austral. O processo de ablação consiste na perda de neve, gelo ou água por derretimento ou evaporação, sendo este o principal fator de perda de massa dos glaciares. Tanto a porção ocidental quanto a oriental possuem significativa variabilidade interanual de acumulação e ablação (RIVERA *et al.*, 2007). Segundo Aniya *et al.* (2007), a maior parte das geleiras do Campo de Gelo Patagônico Sul tem recuado rapidamente, com altas taxas de perda de massa durante as últimas décadas. Definida na glaciologia como a porção terminal ou o ponto mais baixo do glaciar, a língua das geleiras serve como limitador geográfico do avanço e recuo de um glaciar.

A técnica de estimar a velocidade de fluxo de geleiras é tida como pioneira na aplicação glaciológica do sensoriamento remoto (PELLIKKA & REES, 2009). Das diversas metodologias aplicadas para compreender a dinâmica de uma geleira, a análise de fluxo superficial parece ser, ainda hoje, a mais utilizada. A determinação deste parâmetro pode ser feita através de dados remotos e a identificação das feições superficiais é aplicada a uma série temporal de imagens.

Apesar da reconhecida importância, o estudo contínuo dos ambientes glaciais, em especial os polares, não é uma atividade simples.

O número de estudos sobre estes ambientes cresceu junto com a ampliação do número de sensores remotos, que possibilitaram a aquisição de séries sequenciais dados de extensas áreas do planeta. A técnica de estimar a velocidade de glaciares por meio do rastreamento de feições já é amplamente aplicada com resultados eficazes, obtidos por: Mattar *et al.* (1998); Michel & Rignot (1999); Downdeswell *et al.* (1999); Mohr & Reeh (2002) Rignot & Kanagaratnam (2006); Luckman *et al.* (2007); Quincey *et al.* (2009); Santos (2012). O fator limitante desta técnica está, geralmente, associado à ausência ou dificuldade na identificação de feições de referência na superfície de algumas geleiras, que são responsáveis pelo cálculo do fluxo em séries temporais de imagens (LUBIN, 2006; SANTOS, 2012). A obtenção dos vetores de velocidade superficial em imagens multitemporais é baseada na bem sucedida técnica de identificação do deslocamento de feições por correlação cruzada. Inicialmente aplicada por Scambos *et al.* (1992), a técnica de extração de vetores por correlação cruzada em pares de imagens tem estimado velocidades superficiais em geleiras de todo o planeta. Aplicada tanto a dados ópticos (SCAMBOS *et al.*, 1992; SKVARCA *et al.*, 2004; BERTIER *et al.*, 2005; STEARNS & HAMILTON, 2005; WANGENSTEEN, *et al.*, 2006; BARBOSA, 2012), quanto a dados de radar (FLORICIOIU *et al.*, 2008; GILES *et al.*, 2009; HUANG *et al.*, 2009; VELHO, 2009; CIAPPA *et al.*, 2010; EINEDER *et al.*, 2011; SANTOS, 2012). Amplamente aplicado no estudo de ambientes glaciais, o Radar de Abertura Sintética ou SAR (*Synthetic Aperture Radar*) compõe diversas plataformas remotas imageadoras, como: ALOS-PALSAR, COSMO-SkyMed, Envisat ASAR, ERS-1/2, JERS-1 RADARSAT-1/2, TerraSAR-X, etc.

O princípio do rastreamento de feições superficiais homólogas (Figura 1) é, aparentemente, simples. O método baseia-se na relação linear existente entre duas imagens e na premissa de que as mudanças na velocidade superficial da geleira seguem a mesma relação. A velocidade horizontal da geleira é obtida através da multiplicação do deslocamento dos pixels controlados pelo tamanho do pixel (*i.e.*, resolução da imagem) dividido pelo tempo de separação entre as imagens (AHN & HOWAT, 2011). À medida que a janela de referência se

desloca pixel a pixel, dentro da janela de busca, o coeficiente de correlação entre a janela de referência e o subconjunto de sobreposição da janela de busca é calculado pela Equação 1.

$$\rho = \sigma_{RB} / (\sigma_R \cdot \sigma_B) \quad \text{Eq.(1)}$$

onde:

$$\sigma_R = [\sum \sum (g_R(i,j) - g_R')^2]^{1/2} \quad \text{Eq.(1.1)}$$

$$\sigma_B = [\sum \sum (g_B(i,j) - g_B')^2]^{1/2} \quad \text{Eq.(1.2)}$$

$$\sigma_{RB} = [\sum \sum ((g_R(i,j) - g_R') \cdot (g_B(i,j) - g_B'))] / (nm-1) \quad \text{Eq.(1.3)}$$

(R) e (B) indicam, respectivamente, as janelas de referência e busca, $[g(i, j)]$ é o valor de pixel na posição (i, j) da imagem, (GR) e (GB) são as médias de valores da janela de referência e de busca, sendo (n) e (m) os tamanhos da janela de referência. O coeficiente de correlação máximo entre janelas deverá ter o valor 1, quando o valor do pixel na imagem de referência for igual ao valor do pixel na imagem de busca (SCAMBOS *et al.*, 1992). A medida gerada a partir da distância entre as posições ocupadas pela feição rastreada, considerando o período entre os dois registros, resulta na estimativa da velocidade de fluxo desta. No caso de geleiras as feições superficiais, como as fendas e ranhuras, acompanham o fluxo e servem como principais marcadores da dinâmica deste ambiente.

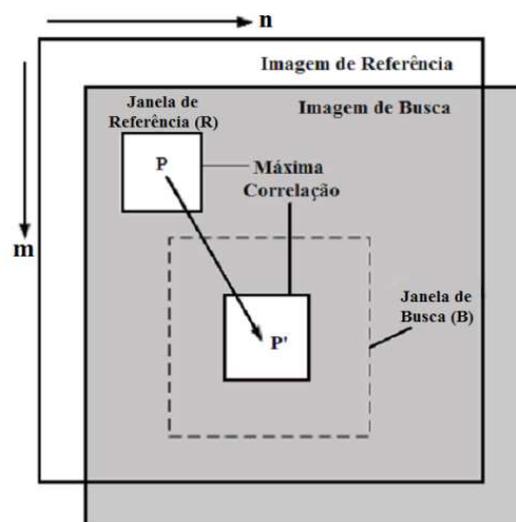


Fig. 1 - Elementos do cálculo da correlação cruzada entre duas imagens. Janela de referência com a feição (P) e a sua respectiva posição na janela de busca (P').

No ano de 2004, Rivera & Casassa calcularam a partir de uma base cartográfica do Instituto Geográfico Militar Chileno os valores de comprimento, área total, área de gelo, orientação e posições frontais máximas e mínimas da geleira Grey. Estes autores encontraram valores aproximados de 275 km² para área total, elevações máximas de 2.344 m e mínimas de 100 m, respectivamente. Os dados serviram de base para a estimativa e cálculo das dimensões gerais da Geleira Grey, assim como limites superiores e inferiores de atuação da geleira.

O presente trabalho tem como objetivo determinar as variações sazonais no fluxo de deslocamento da geleira Grey, durante os meses de outubro de 2011 e janeiro a abril de 2012, a partir do método de correlação cruzada em imagens de radar do sensor COSMO-SkyMed.

2. ÁREA DE ESTUDO

Localizado no extremo sul da América do Sul próximo a divisa territorial do Chile e Argentina, o Campo de Gelo Patagônico constitui na maior massa de gelo continental do hemisfério sul, excetuando-se, o continente Antártico. Composto por 118 geleiras temperadas (ANIYA *et al.*, 1996; RIVERA *et al.*, 2007) ele é composto de duas grandes regiões: Campo de Gelo Patagônico Norte e o Campo de Gelo Patagônico Sul, com áreas estimadas em 4.200 km² e 13.000 km², respectivamente. Situada ao sul no lado oriental do Campo de Gelo Sul, nas coordenadas de 73° 16'O e 50° 55'S (Figura 2), encontra-se a geleira Grey, com uma área total estimada 275,6 km² e comprimento total de 29 km (RIVERA, 2004). A geleira desagua em três lobos distintos do grande lago glacial que recebe o mesmo nome da geleira, Grey, com profundidade máxima de 500 m. Situada dentro do parque nacional chileno Torres Del Paine, a geleira Grey insere-se em uma região caracterizada por um clima “de gelo por efeito da altitude”, afetada por fortes ventos, que interferem de forma negativa no povoamento desta região (METEOCHILE, 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram obtidas sete imagens SAR COSMO-SkyMed referentes aos meses de outubro e

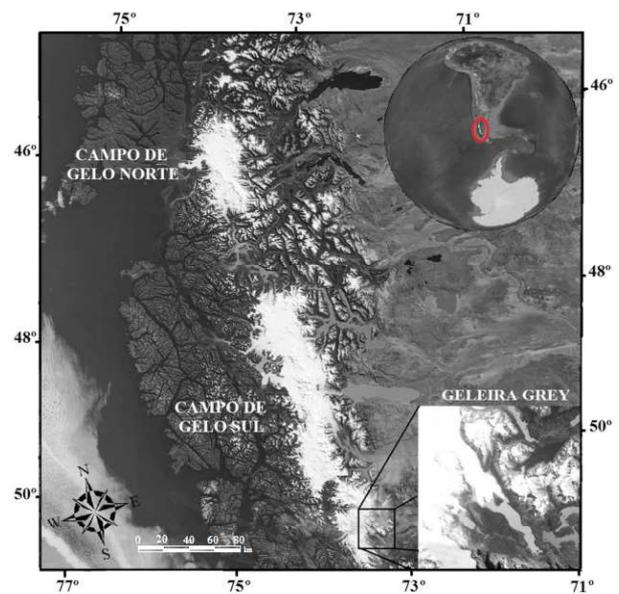


Fig. 2 – Localização dos Campos de Gelo Patagônicos Sul e Norte, com destaque da geleira Grey. Fonte: Imagem adquirida pelo sensor Medium Resolution Imaging Spectrometer do Envisat (MERIS) da Agência Espacial Europeia (ESA), em 15 de março de 2007.

novembro de 2011, janeiro, fevereiro, março, abril e maio de 2012. Optou-se por utilizar as imagens do tipo Stripmap HIMAGE devido a sua alta resolução espacial (<5m) e uma área imageada capaz de cobrir toda a geleira Grey. As imagens foram adquiridas com nível de processamento “LEVEL 1B”, polarização VV e uma projeção de alcance do terreno (*ground-range*). A Tabela 1 descreve as principais características das imagens SAR Stripmap – HIMAGE, no nível de processamento LEVEL 1B.

Tabela 1: Características do sensor COSMO-SKYMED no modo de imageamento Stripmap HIMAGE - LEVEL 1B. Fonte: ASI (2007).

Nível de Processamento da imagem	LEV 1B
Banda do Sensor	X
Frequência Central de Imageamento	9,6 GHz
Área imageada (km ²)	~40km x ~40km
Ângulo de incidência (Graus)	~20° / ~60°
Polarização	Seleccionável entre HH ou HV ou VH ou VV
Número equivalente de visadas	~3
Resolução do Terreno (m)	≤5
Resolução do azimute	≤5

3.1 Pré-processamento

A primeira etapa do pré-processamento das imagens foi desenvolvida com auxílio do software *Next ESA SAR Toolbox* (NEST), disponibilizado gratuitamente pela *European Space Agency* (ESA). As imagens sofreram uma transformação radiométrica de 16 para 8 bits, a fim de alterar os valores de intensidade das imagens para 256 níveis de cinza. Por abrangirem cenas muito maiores que a área da geleira Grey, as imagens foram reduzidas a uma dimensão de 7.000 pixels de largura por 10.000 pixels de comprimento. Posteriormente, realizou-se o registro de todas as imagens a partir de uma origem comum, por meio do método de corregristo automático de imagens. O corregristo é realizado com objetivo de correlacionar pontos de controle na primeira imagem com as demais. Este trabalho efetivou-se com a banda de intensidade das imagens, através da ferramenta “*Automatic Corregstration*” com sistema de reamostragem de “vizinho mais próximo” ou *nearest neighbour*. Foram utilizados 200 pontos de controle em uma janela de busca de 64 pixels, sob fator de interpolação linha/coluna igual a 2 e limite de erro máximo de pixel igual a 0,5 pixel.

A aplicação de uma máscara, criada a partir de um arquivo vetorial digitalizado manualmente sobre a área da geleira, tem como objetivo eliminar as feições que não pertençam à geleira Grey. Suprimindo as regiões que não devem participar do cálculo de velocidade. Este procedimento reduz o tempo de análise dos pixels pelo software de correlação e maximiza a identificação de deslocamento dos pixels. Foram utilizadas subáreas (*i.e.*, cenas menores na área da geleira) para extração das velocidades de fluxo, com objetivo de calibrar o algoritmo de correlação cruzada e aprimorar a extração dos vetores de deslocamento. Separadas em cinco subáreas ao longo da superfície da geleira Grey (Figura 3), estes recortes estão localizados próximo ao centro da geleira nas porções superior, média e nas três ramificações inferiores na língua da geleira. Cada subárea possui a dimensão de 400x400 pixels.

3.2 Extração dos dados de velocidade

Os valores de deslocamento são obtidos através de um algoritmo de cálculo da correlação

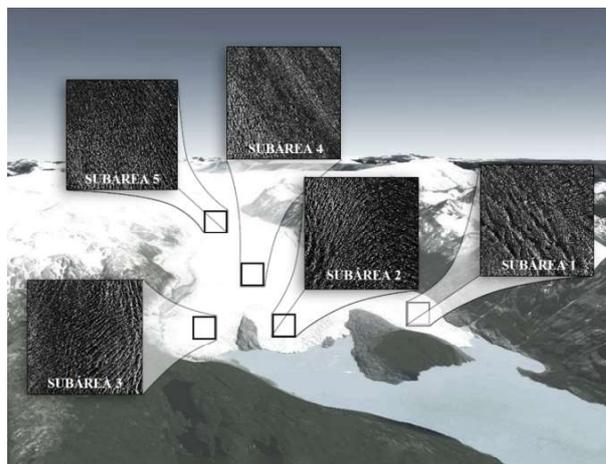


Fig. 3 – Subáreas escolhidas para a calibração do modelo gerador das velocidades de fluxo. A subárea 5 compreende a porção superior da geleira, a subárea 4 a porção intermediária e as subáreas 3, 2 e 1 formam as ramificações da porção inferior. Figura gerada sobre uma imagem base do software Google Earth.

cruzada responsável pela geração dos vetores (Figura 4). Utilizado com sucesso por Santos (2012) para o estudo da dinâmica das geleiras de maré da Península Antártica, este algoritmo foi adaptado para obtenção dos campos de velocidades da geleira Grey de maneira automática, a partir da série temporal de imagens. A extração dos vetores de fluxo foi realizada através do rastreamento de feições semelhantes em pares de imagens corregristadas.

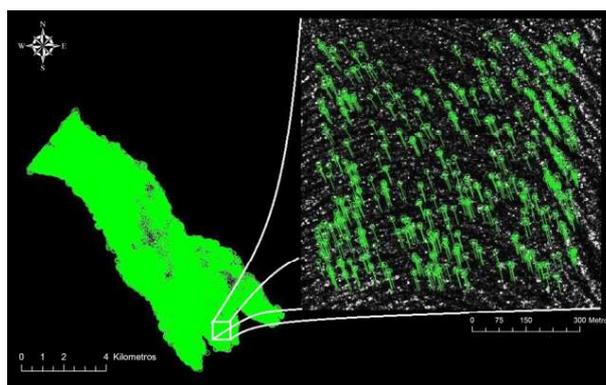


Fig. 4 – Vetores de deslocamento relativo gerados pela rotina “corelCorresp” para toda a geleira Grey.

O algoritmo é desenvolvido dentro do ambiente MATLAB 2010 e consiste em uma função matemática que executa de forma autônoma os comandos de extração dos vetores

é denominada “correlCorresp” (YOUNG, 2010). A rotina identifica a posição de um conjunto inicial de feições na imagem 1 que, por padrão, são encontrados em uma imagem 2 utilizando os máximos locais de variância em níveis de cinza. A variação é calculada sobre regiões previamente dimensionadas em número de pixels e cada feição de um pacote da imagem 1 é comparada a uma região análoga na imagem 2. Esta região de busca é determinada pela posição característica, de tal modo que o deslocamento horizontal entre os pacotes de pixels situem-se entre uma distância n_{\min} e n_{\max} , assim como o deslocamento vertical deve estar entre m_{\min} e m_{\max} . A comparação é efetuada utilizando a correlação cruzada normalizada, com uma troca de aumento da velocidade de precisão. Uma máscara de convolução que aproxima o pacote de pixels da imagem 1 (girado 180 graus) é usada. O resultado da convolução é dividida pelo desvio-padrão da região de pesquisa da imagem 2. Opcionalmente é possível inverter os papéis de busca da imagem 1 e 2, correlacionando um pacote da imagem 2, centrada na posição de partida presumida, com uma região apropriada de imagem 1. O resultado esperado é que a posição da feição na imagem 1 seja a média da sua posição original com a melhor posição correspondente encontrada após a realização do jogo inversa. Os parâmetros que não são definidos pelo usuário são calibrados pelos valores padrão (YOUNG, 2010). Os parâmetros internos utilizados na rotina estão descritos abaixo na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de comando da ferramenta “correlCorresp” utilizados

Comando	Parâmetro definido
featurePatchSize	Tamanho da janela de referência
relThresh	Parâmetro de exatidão da correlação
SearchPatchSize	Área a ser analisada nas imagens 1 e 2
searchBox	Tamanho da janela móvel
convTol	Tolerância para a máscara de aproximação
doCheck	Verificação da correspondência inversa
matchTol	Tolerância para verificação inversa
printProgress	Controle do processamento de dados

O comando “*featurePatchSize*” define o tamanho em pixel das janelas de referência, que foi estimado em 5 x 5 pixels. O tamanho da janela de busca foi obtido a partir da manipulação do

parâmetro “*SearchPatchSize*”, que determinou a área analisada na imagem 1 correlacionada com a imagem 2. Este tamanho das janelas implica na precisão do deslocamento medido, estipulado em 85 x 85 pixels. O comando “*relThresh*” consiste no parâmetro de exatidão da correlação entre as imagens e é calculado a partir da variância local dos parâmetros em relação à máxima variância local. O módulo “*doCheck*” realiza a conferência inversa das correspondências a partir da posição final em relação a inicial. Este comando é opcional, porém elimina um bom número de vetores espúrios. Os trabalhos realizados com correlação cruzada de imagens são baseados na hipótese de que as velocidades da geleira muda gradualmente em larga escala espacial. Sendo assim, não é razoável que uma janela individual tenha uma velocidade muito elevada ou muito reduzida comparada as áreas adjacentes. Janelas com velocidades anormais, que diferem marcadamente do entorno, são considerados ruídos ou erros na extração dos vetores (HUANG, 2009).

Os resultados vetoriais gerados pelo algoritmo não são considerados ilustrativos devido a ausência de valores de intensidade do deslocamento. Assim, para uma melhor representação e análise dos resultados, os dados foram exportados na forma de tabelas para o software ArcGIS. O programa possui uma serie de ferramentas para a interpolação de dados que depois de testadas, os melhores resultados foram obtidos através do interpolador de difusão com barreiras. O interpolador por difusão utiliza a solução fundamental da equação do calor para descrever como as partículas difundem-se ao longo do tempo em um meio homogêneo. A difusão de calor anisotrópica é amplamente utilizada na reconstrução e suavização de imagens (PERONA & MALIK, 1987; GUICHARD & MOREL, 2001; WITTMAN, 2005). Aplicado por Belahmidi & Guichard (2004) para análise de ruído em imagens, nesta técnica os valores de pixels se comportem como valores de temperatura e difundam-se sobre toda a imagem. Este processo de difusão é guiado por vectores unitários, os quais são orientados pelo vector gradiente normal. O método de difusão por barreiras descreve um fluxo suavizado em torno de barreiras ou pixels de referências, que na sua ausência são interpolados pelo método de Kernel. Esta ferramenta produz previsões

sobre grades automaticamente selecionadas, enquanto todos os outros modelos de análise geostatística utilizam triângulos com tamanhos variáveis (ESRI, 2010). A partir dos resultados demonstrados pela Figura 5 é possível observar que o interpolador é capaz de representar espacialmente os valores de deslocamento.

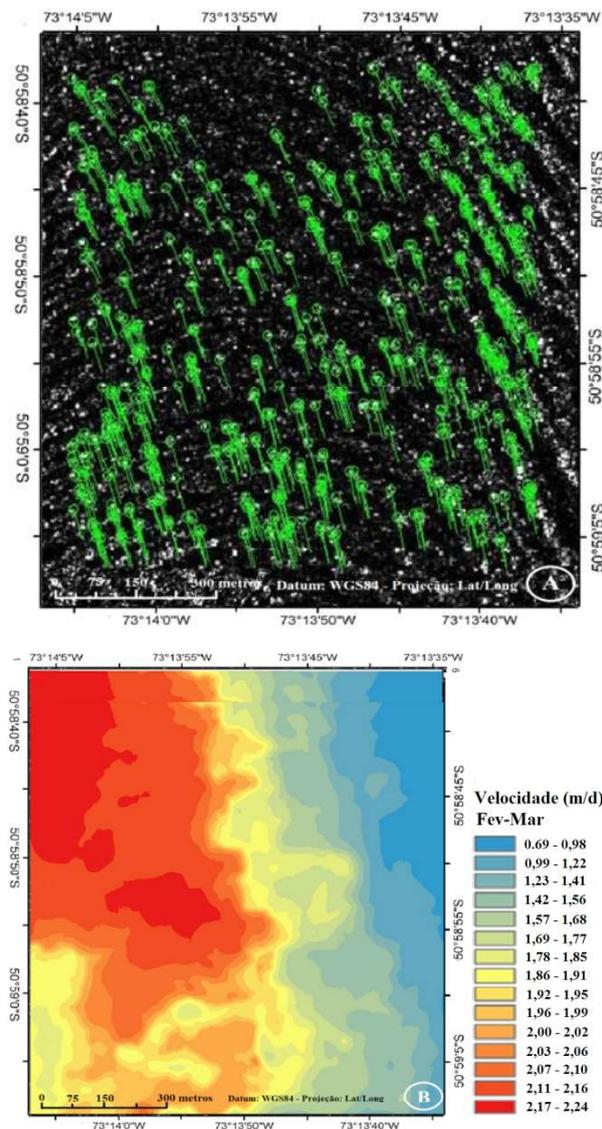


Fig. 5 – Interpolação dos dados referentes à subárea 2, de Fevereiro de 2012. (A) Vetores brutos gerados a partir da rotina “correlCorresp” no software MATLAB. (B) Arquivo raster gerado pela interpolação dos dados vetoriais com o método “Diffusion Interpolation With Barriers”, apresentando os valores de velocidade em metros/dia (md^{-1}).

3.3 Dados meteorológicos

A fim de analisar a influência meteorológica sobre a dinâmica de fluxo da geleira Grey, foram

obtidos valores médios diários de temperatura ($^{\circ}C$), umidade do ar (%) e precipitação (mm) para os meses de outubro de 2011, janeiro, fevereiro, março e abril de 2012. Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Serviço Meteorológico Nacional da Argentina por meio de uma estação *Davis Weather Monitor II*. Localizada na cidade de Rio Turbio - Argentina à cerca de 80 km da geleira Grey a uma altitude de 316m acima do nível do mar. Considerada a estação mais próxima à geleira, está possui uma altitude equivalente a base do glaciar e foi considerada a melhor plataforma para a aquisição dos dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram ordenados em períodos mensais referentes às datas de aquisição dos pares de imagens, a fim de criar uma série temporal da dinâmica de fluxo da geleira. A utilização de subáreas de análise foi fundamental para a comparação das velocidades de fluxo entre as áreas superiores, intermediárias e inferiores da geleira.

Os valores mensais de velocidade de fluxo foram calculados para toda a área da geleira e correspondem a um valor médio de toda a área do glaciar. Por se tratar de um grande número de vetores a comparação dos valores mensais de avanço varia pouco e o desvio padrão indica grandes variações em torno de cada média. O pequeno número amostral de imagens impede uma análise estatística mais elaborada e as médias mensais da velocidade de fluxo acompanham diretamente a variação de temperatura superficial, conforme o esperado (Figura 11). Os dados de precipitação, umidade relativa e temperatura do ar são de suma importância para análise de derretimento do um glaciar. Uma vez que, para temperaturas superiores a $0^{\circ}C$ a probabilidade de precipitação sob a forma de neve diminui drasticamente com o aumento da umidade relativa, pois a transmissão de calor latente para os cristais de neve os transforma em chuva. Logo, o aumento das temperaturas médias causa uma menor precipitação de neve e um consequente aumento na ablação e aceleração dos valores de velocidade superficial.

O mês de outubro apresentou a menor variação de velocidade entre as margens e o centro da geleira. Este é o início do período de ablação e devido à baixa taxa de derretimento a lubrificação da base do glaciar impede que as

velocidades no centro da geleira sejam maiores. O pequeno volume de água basal tem um efeito intenso sobre a dinâmica das geleiras, interferindo diretamente nos sistemas de drenagem subglacial (FOWLER, 2003). As maiores velocidades de fluxo no mês de outubro estão localizadas abaixo da região intermediária da geleira, com valores de deslocamento entre 1,1 e 2,7 md^{-1} . Michel & Rignot (1999) utilizaram imagens de radar do sensor SIR-C, de outubro de 1994, para estimar valores de velocidade de fluxo para porção terminal da geleira Moreno no Campo de Gelo Patagônico Sul. Através do método de correlação de fase os autores utilizaram uma seção transversal na porção terminal da geleira para estimar velocidades de fluxo próximas a 1,0 md^{-1} . Naruse *et al.* (1992) realizaram, durante o mês de outubro de 1985, 11 estações para coleta de dados de velocidade ao longo de todo o dorso da geleira Soler no Campo de Gelo Patagônico Norte. Seus resultados mostram valores de 0,2 md^{-1} na região superior da geleira, chegando a velocidades de até 1,6 md^{-1} na porção terminal do glaciar. A Figura 6 descreve um leve aumento de velocidade na porção ocidental da língua da geleira Grey causado pela alta declividade nesta região, com uma ramificação do fluxo e velocidades entre 0,7 e 2,0 md^{-1} . O centro da língua recebe um aporte direto do fluxo central da geleira, com valores estimados em 3,0 md^{-1} reduzidos até 0,7 md^{-1} na proximidade dos corpos rochosos que dividem a língua do glaciar. O fluxo na parte oriental da língua é influenciado pelo grande promontório rochoso localizado na base da geleira, causando uma desaceleração nesta região. As velocidades registradas nesta área são de 0,4 md^{-1} nas margens, chegando a um máximo de 1,5 md^{-1} na porção central. Skvarca *et al.* (2003) estimou valores de velocidade muito maiores para a língua da geleira Upsala, chegando a um fluxo de 5,14 md^{-1} durante o mês de outubro de 2001.

O aumento na temperatura ambiente causa um conseqüente acréscimo de água na base da geleira, reduzindo a rugosidade da superfície basal e resultando em uma maior velocidade de deslizamento (PATERSON, 1994). O aquecimento atmosférico acelera processo de derretimento do gelo e causa um conseqüente acréscimo no aporte de água, que pode percolar entre as fendas, moulins e outros canais de

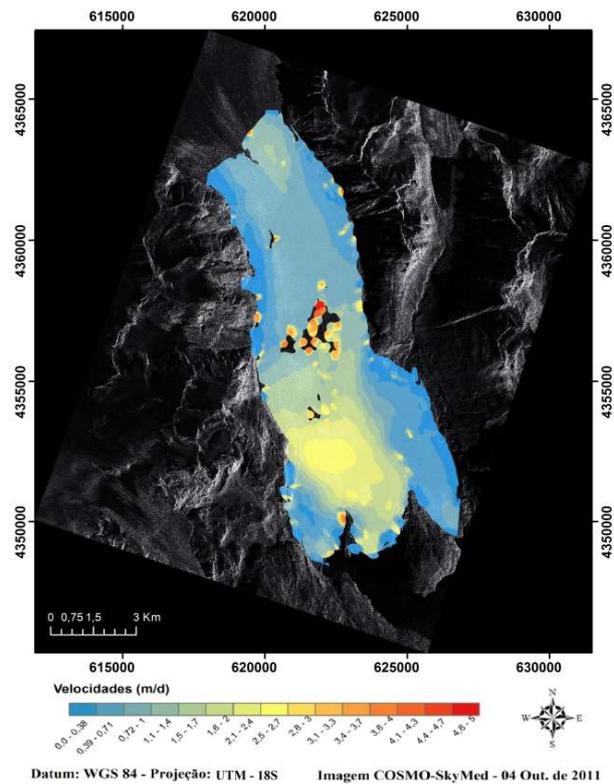


Fig. 6 - Mapa da velocidade superficial de fluxo calculado para a geleira Grey referente ao mês de outubro de 2012. As áreas de coloração azul representam as menores velocidades (0 à 1,0 md^{-1}), tons verdes, amarelos e laranja representam as velocidades intermediárias (1,1 à 4,0 md^{-1}) e as áreas de coloração vermelha descrevem as maiores velocidades obtidas (4,1 à 5,0 md^{-1}).

drenagem glacial, lubrificando assim o contato gelo-rocha (ZWALLY *et al.*, 2002). Isto ocorre principalmente no centro da geleira, onde é formado um gradiente transversal com altas velocidades no dorso da geleira que reduzem à medida que nos aproximamos das bordas. Por se tratarem de meses com altas temperaturas e ablação, todas as regiões, exceto a porção oriental da língua, mostraram altas velocidades de fluxo durante os meses de verão austral.

Janeiro, diferentemente de outubro, mostrou um padrão no fluxo marcante e bem definido, com altas velocidades na região central, reduzindo à medida que nos aproximamos das margens da geleira (Figura 7). A região intermediária da geleira manteve o perfil de fluxo da porção superior, com uma leve redução na velocidade devido à compressão lateral exercida pela curva que o vale impõe sobre o glaciar. Esta redução na velocidade causada pela parede do

vale gera um subsequente fluxo de extensão, que irá aumentar a velocidade na porção centro-terminal para valores de velocidade entre 2,5 e 3,0 md^{-1} , próximo às ramificações da língua. O lado ocidental da língua manteve o padrão bifurcado, com um fluxo de extensão, gerado pela declividade, em direção à direita (*i.e.*, esquerda da figura) e outro em direção ao lago Grey, com velocidades entre 0,7 e 2,0 md^{-1} . Situado entre os dois promontórios rochosos, a região central da língua tem seu fluxo intensificado e bem definido, com velocidades que chegam a 3,3 md^{-1} . O lado oriental da língua, devido a baixa declividade, apresenta valores de velocidade praticamente nulos próximo as paredes rochosas, chegando a um máximo de 1,0 md^{-1} em algumas regiões esparsas. Para o mesmo mês do ano de 2008 Floricioiu *et al.* (2008) estimaram, por meio de imagens TerraSAR-X, velocidades de fluxo para as geleiras Moreno, Ameghino e Upsala. A geleira Moreno apresentou um máximo de 2,0 md^{-1} em seu centro, o glaciar Ameghino registrou uma velocidade de 1,0 md^{-1} na sua porção terminal, enquanto que Upsala teve valores frontais máximos de 5,6 md^{-1} e laterais máximos de 4,9 md^{-1} . Os altos valores de velocidade da geleira Upsala são descritos pelo autor como efeito da baixa fricção junto ao fundo da geleira, comum durante os meses de verão.

Com uma velocidade média mensal menor que o mês de janeiro, fevereiro manteve os fluxos intensos no dorso da geleira, reduzindo em direção as margens. Ao analisarmos a Figura 8 podemos identificar dois picos de máxima velocidade de fluxo, um deles localizado na porção superior da geleira que registrou valores de até 3,3 md^{-1} na região central. O outro ponto de máxima velocidade está localizado na língua central da geleira Grey, com valores mínimos de 1,5 md^{-1} a máximos de 5,0 md^{-1} próximo às águas do lago Grey. A área central da geleira registrou valores de velocidades entre 0,4 e 2,0 md^{-1} , marcada pela forte estratificação transversal da velocidade. A região terminal ocidental mudou o perfil duplo de fluxo para um perfil simples canalizado em direção ao lago Grey, com velocidades de 1,1 a 1,7 md^{-1} . O lado oriental da língua continuou registrando os menores valores de velocidade, com um fluxo central máximo de 1,4 md^{-1} causado pela convergência da geleira com a parede lateral do vale.

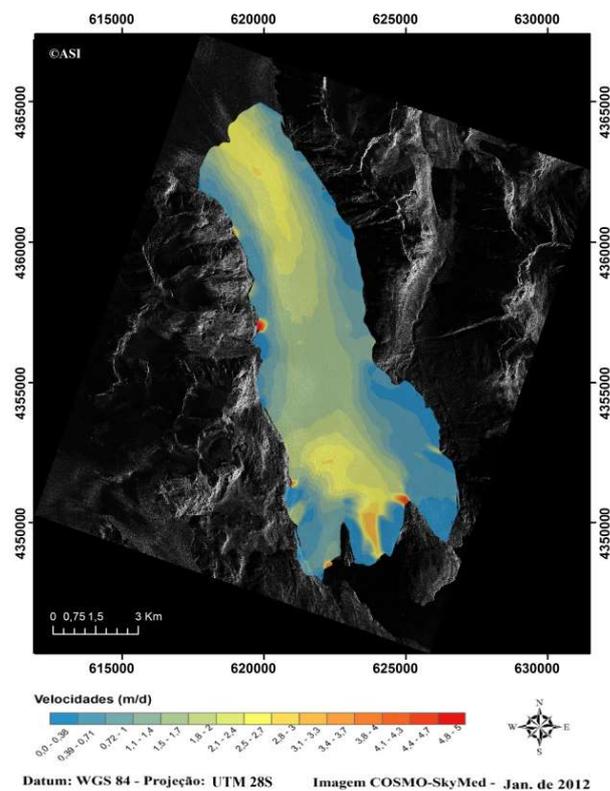


Fig. 7 - Mapa da velocidade superficial de fluxo calculado para a geleira Grey referente ao mês de janeiro de 2012. Os valores de velocidade são descritos em metros por dia (m/d).

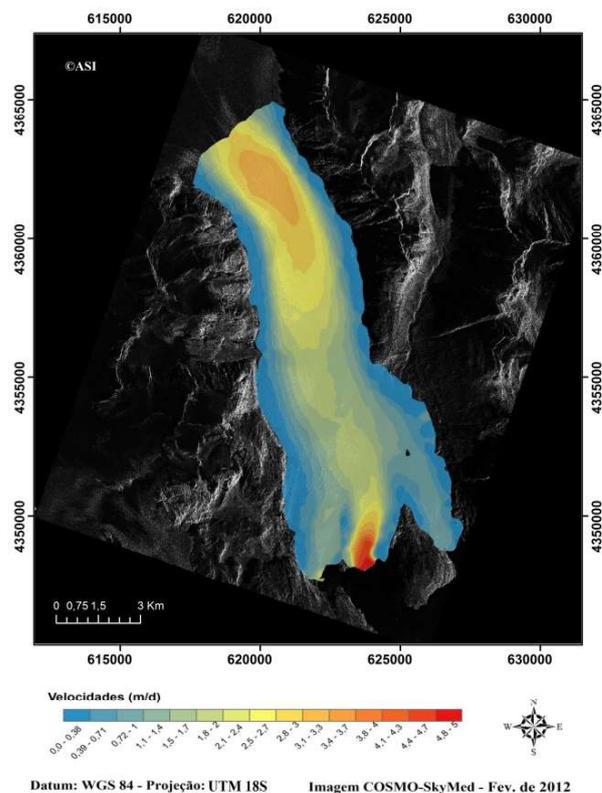


Fig. 8 - Mapa da velocidade superficial de fluxo calculado para a geleira Grey referente aos meses de fevereiro de 2012. Os valores de velocidade são descritos em metros por dia (m/d).

Rott *et al.* (1998) utilizaram imagens SIR-C/X-SAR para estimar valores de velocidade de fluxo da geleira Moreno durante o mês de março 1997. Seus resultados mostram velocidades menores que $0,5 \text{ md}^{-1}$ nas margens, chegando a valores superiores a $2,0 \text{ md}^{-1}$ no núcleo da geleira. Nosso trabalho registrou no mês de março um fluxo central maior e mais intenso na porção superior da geleira (Figura 9), com velocidades entre $1,0$ e $3,3 \text{ md}^{-1}$ que reduzem gradativamente em direção as áreas laterais. É possível observar fluxos transversais oriundos de escoamentos laterais pelas paredes do vale. A região intermediária da geleira apresentou valores de avanço entre $0,4$ e $2,4 \text{ md}^{-1}$, enquanto o lado ocidental da língua registrou um aumento circunstancial na intensidade de fluxo em toda a sua área. Esta região estava caracterizada por menores valores de velocidade e neste mês foram registradas velocidades superiores a $3,0 \text{ md}^{-1}$. No mês de março, a porção central da língua ficou marcada como uma continuação do fluxo central de deslocamento da geleira, com velocidades de até $4,7 \text{ md}^{-1}$ próximo ao lago Grey. A ramificação oriental da língua manteve suas características com velocidades menores, entre $0,7$ e $1,0 \text{ md}^{-1}$, com destaque para os fluxos laterais gerados a partir das encostas rochosas. Willis *et al.* (2012) realizaram, com auxílio de imagens ASTER, uma estimativa de ablação das principais geleiras do Campo de Gelo Patagônico Norte. Dentre estas, a geleira San Rafael é a que mais se assemelha a morfodinâmica da geleira Grey. Foi estimado um fluxo de deslocamento para a geleira San Rafael, durante o mês de março de 2007, de aproximadamente $4,1 \text{ md}^{-1}$ no dorso do glaciar, reduzindo para valores menores que $2,7 \text{ md}^{-1}$ em suas margens.

Começo da estação fria na Patagônia, o mês de abril (Figura 10) apresentou um padrão de fluxo muito parecido ao mês de outubro. Com uma redução no fluxo central de velocidade, a porção superior da geleira Grey registrou valores de fluxo máximo de $1,7 \text{ md}^{-1}$, reduzindo a poucos centímetros por dia nas bordas. A região centro-terminal voltou a apresentar os maiores índices de velocidade de toda a geleira, com valores entre $1,8$ e $3,7 \text{ md}^{-1}$. Esta aceleração é oriunda do fluxo de compressão gerado pela curvatura na parede do vale, que posteriormente é compensada pelo fluxo de extensão e o consequente aumento na velocidade. Na região terminal, o lado ocidental da língua apresentou valores médios de $0,7$ à $1,4 \text{ md}^{-1}$

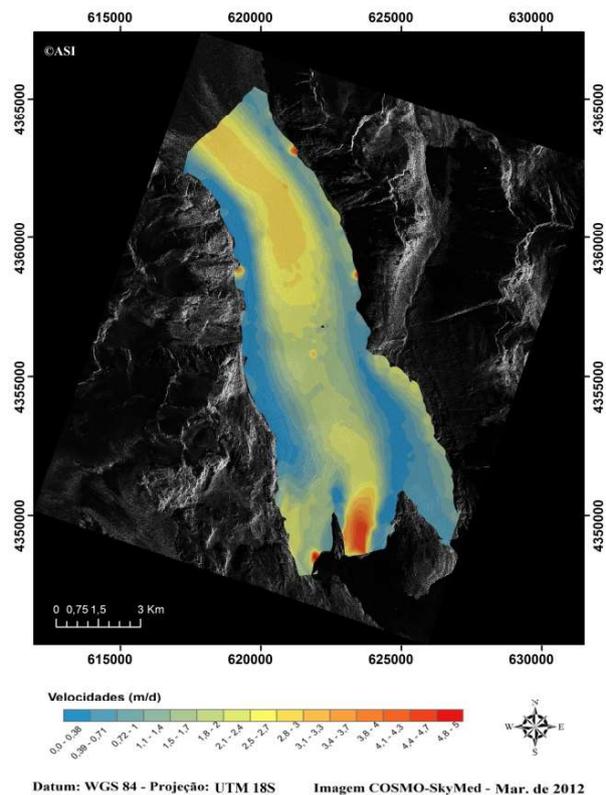


Fig. 9 - Mapa da velocidade superficial de fluxo calculado para a geleira Grey referente ao mês de março de 2012. Os valores de velocidade são descritos em metros por dia (m/d).

com uma bifurcação do fluxo nas direções do lago Grey e do lado direito da geleira. A porção centro da língua se mostrou ainda fortemente influenciada pelo fluxo central do corpo de gelo, com velocidades de $2,5 \text{ md}^{-1}$ à $0,5 \text{ md}^{-1}$ nas margens.

Durante o período analisado, o mês de outubro de 2011 apresentou um fluxo médio de velocidade para todo o glaciar de $1,2 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$, janeiro, fevereiro, março e abril de 2012 apresentaram respectivamente $1,5 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$; $1,3 \pm 0,6 \text{ md}^{-1}$; $1,4 \pm 0,7 \text{ md}^{-1}$; $1,1 \pm 0,5 \text{ md}^{-1}$. A variação mensal da média de velocidade da geleira, mesmo que pequena, acompanha a variação mensal da média de temperatura. O valor médio de velocidade do glaciar é estimado para toda a área da geleira, incluindo áreas de menor e maior deslocamento de massa. Logo, era esperado que as médias apresentassem uma pequena variação entre cada mês, com velocidades maiores nos meses de verão associadas a ablação e o consequente aumento na quantidade da água que flui através da geleira, lubrificando sua base.

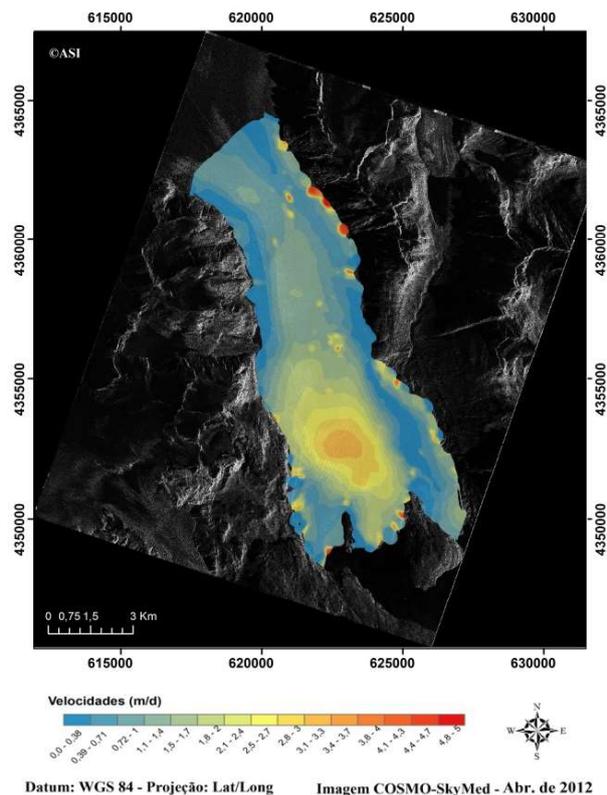


Fig. 10 - Mapa da velocidade superficial de fluxo calculado para a geleira Grey referente ao mês de e abril de 2012. Os valores de velocidade são descritos em metros por dia (m/d).

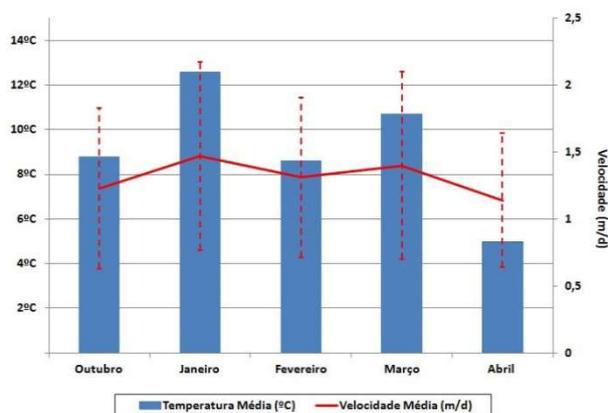


Fig. 11 – Gráfico de comparação entre os valores médios mensais de temperatura e velocidade estimados para a geleira Grey. Fonte: Serviço Meteorológico Argentino, 2012.

Os dados de velocidade gerados para a geleira Grey são referentes às estações de primavera verão e início do outono. Isso representa uma variação temporal curta, sem dados suficientes para que possamos compreender o ciclo anual de fluxo deste glaciar. A fim de compreender melhor a dinâmica de

fluxo da geleira Grey, 5 subáreas foram criadas para estudarmos individualmente as regiões superior, média e inferior deste glaciar. Os valores médios de velocidade são descritos na Figura 12 e estão sujeitos aos processos locais de extensão e compressão. Dependendo ainda das características físicas do gelo, declividade do terreno, espessura da massa de gelo e variáveis climatológicas.

A subárea 5 apresentou altas médias de velocidade em todos os meses analisados, a força gravitacional age sobre a massa de gelo criando uma aceleração com o surgimento de um fluxo por extensão nesta região. A redução na velocidade média da subárea 4 com relação a subárea anterior, é causada pela alteração de curso da geleira pelo vale e a consequente desaceleração por atrito e compressão desta com as margens. Rott *et al.* (1998) registraram em seu trabalho uma redução similar na velocidade de fluxo da geleira Moreno, gerada pelo vale ao qual a geleira se encontra. Os dados médios registrados para as 3 subáreas pertencentes a região terminal da geleira, não apresentam um padrão sazonal definido, mostrando um comportamento particular com maior ou menor fluxo de escoamento de acordo com as condições morfológicas locais e o respectivo padrão de movimentação da geleira. Ao analisarmos os dados de velocidade gerados para as distintas regiões da geleira Grey é possível observar que os dados seguem, em geral, o mesmo padrão de variação sazonal da velocidade média estimada para toda a geleira.

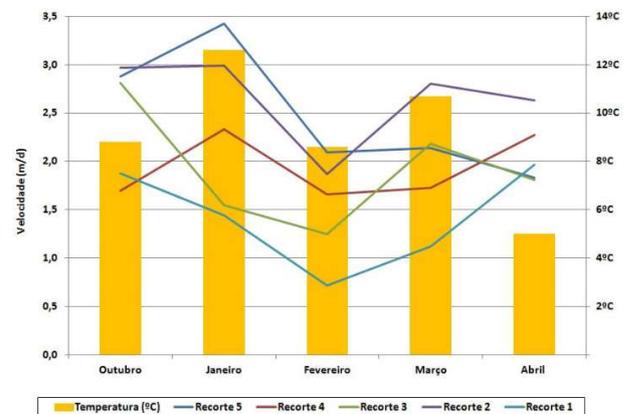


Fig. 12 - Gráfico de comparação entre valores médios mensais de velocidade de fluxo estimados para as 5 subáreas e as médias mensais de temperatura.

Uma geleira de montanha tem como importante fator de aceleração o deslizamento basal, que é fortemente influenciada pela percolação de água da chuva e derretimento superficial do gelo. Durante o período analisado o mês de outubro registrou uma temperatura média de 8,8° C e um acumulado de 22,3 mm em 19 dias de precipitação (SMN, 2013). Os meses de verão são caracterizados por temperaturas elevadas e baixos valores de precipitação. Janeiro registrou uma temperatura média de 12,6 °C e um acumulado de chuva abaixo de 13 mm (SMN, 2013), enquanto que fevereiro, auge do verão no hemisfério sul, apresentou uma média mensal abaixo do esperado de 8,6°C e um acumulado de chuva de 34,2 mm em 22 dias (SMN, 2013). Mês de transição entre as estações de verão e primavera, março registrou uma temperatura média mensal de 10,7° C e um acumulado de precipitação de 73,1 mm em 20 dias (SMN, 2013). É possível observar que as altas temperaturas do verão austral são geralmente acompanhadas de chuvas, que intensificam o processo de derretimento. O mês de abril apresenta características de uma estação fria, com o início de um período de recongelamento e redução na dinâmica central do fluxo da geleira. Durante o ano de 2012, abril registrou uma temperatura média mensal de 5,2°C com umidade relativa do ar média de 71,2% e precipitação acumulada de 69,8 mm em 19 dias (SMN, 2013). A queda na temperatura e o aumento da precipitação explicam a rápida mudança no padrão geral de fluxo da geleira entre os meses de março e o abril. Caracterizando um perfil de deslocamento bastante similar ao mês de outubro, que também compreende um período de transição, porém entre as estações de inverno e verão.

5. CONCLUSÃO

A utilização do algoritmo de correlação cruzada “*correlCorresp*” proposto para que os objetivos do trabalho fossem alcançados, mostrou-se muito eficaz na estimativa das velocidades e direções do fluxo superficial na geleira Grey. Com a descrição de um perfil de deslocamento muito próximo ao observado por outros autores em geleiras do Campo de gelo Patagônico. Valores de velocidade com erro padrão médio de 0,05 e precisão de 0,1m

mostram que os dados gerados pelo algoritmo parecem ser muito próximos aos valores reais de fluxo. As velocidades superficiais estimadas para as distintas regiões da geleira Grey revelam um padrão sazonal marcante, com mudanças principalmente na posição central do fluxo do corpo da geleira.

Mesmo com o pequeno período amostral os resultados evidenciam que os valores médios de velocidade são maiores nos meses quentes em relação aos meses de transição de estações como outubro e abril. Durante o período analisado, aparentemente, a temperatura do ar foi o fator ambiental com maior influência na variação da velocidade de fluxo da geleira. Janeiro, fevereiro e março apresentaram as temperaturas médias de 12,6 °C, 8,6 °C e 10,7 °C, respectivamente, com valores médios de velocidade superficial de 1,5 md⁻¹; 1,3 md⁻¹; 1,4 md⁻¹. O intenso deslocamento na região central da geleira, descrito na bibliografia, causado pelo aumento na drenagem glacial e a conseqüente lubrificação da base nesta região, somada a baixa precipitação de neve característica deste período do ano, fortalecem a ideia de que a metodologia empregada é válida e eficaz para estimativa da velocidade superficial de fluxo em geleiras de vale como a Grey. Com destaque para a disponibilidade do método em ser adaptado e calibrado de acordo com as características de imagem remoto analisada.

A pequena série amostral impede que façamos um comparativo maior sobre o quadro de mudanças climáticas do planeta e seu impacto sobre os ambientes glaciares de montanha. Porém, acreditamos que o presente trabalho constitui nos primeiros passos dados em direção a análises ainda maiores, podendo a aplicação desta técnica servir de base para outros inúmeros estudos nas mais diversas áreas da glaciologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, Y. & HOWAT, I. M. Efficient, automated glacier surface velocity measurements from repeat images using multiimage/multi-chip (MIMC) feature tracking, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49(8), 2011, p. 2838-2846.

ANIYA, M.; SATO, H.; NARUSE, R.; SKVARCA, P; CASASSA, G. The use of satellite and airborne imagery to inventory outlet

- glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America, **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 62, 1996, p. 1361-1369.
- ANIYA, M.; ENOMOTO, H.; AOKI, T.; MATSUMOTO, T.; SKVARCA, P.; BARCAZA, G.; SUZUKI, R.; SAWAGAKI, T.; SATO, N.; ISENKO, E.; IWASAKI, S.; SALA, H.; FUKUDA, A.; SATOW, K.; NARUSE, R. Glaciological and geomorphological studies at Glaciar Exploradores, Hielo Patagónico Norte, and Glaciar Perito Moreno, Hielo Patagónico Sur, South America, during 2003–2005 (GRPP03-05). **Bulletin of Glaciology Research**, v. 24, 2007, p. 95–107, 2007.
- ASI - Agenzia Spaziale Italiana. COSMO-SkyMed SAR, Products Handbook. ASI-CSM-ENG-RS-092-A, 2007, p. 11-12.
- BARBOSA, A. S. **Variações na velocidade de fluxo das geleiras de maré da Península Antártica entre os períodos de 19988-91 e 2000-03**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- BELAHMIDI, A. & GUICHARD, F. A partial differential equation approach to image zoom. **Proceedings of International Conference on Image Processing**, 2004, p. 649-652.
- BERTHIER, E., VADON, H., BARATOUX, D., ARNAUD, Y., VINCENT, C., FEIGL, K., REMY, F. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 95(1), 2005, p. 14–28.
- CASASSA, G.; RIVERA, A.; ANIYA M.; NARUSE, R.. Current knowledge of the Southern Patagonia Icefield. In CASASA, G.; SEPÚLVEDA, F. and SINCLAIR, R. (Eds.) *The Patagonian Ice fields. A unique natural laboratory for environmental and climate change studies*. **Kluwer Academic/Plenum Publishers**, 2002, p. 67-83.
- CIAPPA, A.; PIETRANERA, L.; BATTAZZA, F. Perito Moreno Glacier (Argentina) flow estimation by COSMO SkyMed sequence of high-resolution SAR-X imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 9, 2010, p. 2088–2096.
- DOWDESWELL, J. A.; UNWIN, B.; NUTTAL, A. M.; WINGHAM, D. J. Velocity structure, flow instability and mass flux on a large Arctic ice cap from satellite radar interferometry. **Earth Planet Science Letters**, v. 167 (3–4), 1999, p. 131–140.
- EINER, M. & JABER, W. A. Glacier flow and topography measurements with TerraSar-X and TanDEM-X. **IEEE IGARSS Vancouver 2011**, 2011, p. 3835–3838.
- ESRI - Environmental Systems Research Institute. Software ArcGIS Professional GIS for the desktop, Versão 10, 2010.
- FOWLER, A. C. Rheology of subglacial till. **Journal of Glaciology**, v. 48 (163), 2003, p. 631-632.
- FLORICIOIU, D.; EINER, M.; ROTT, H.; YAGYE-MATINEZ, N.; NAGLER, T. Surface velocity and variations of outlet glaciers of the Patagonia Icefields by means of TerraSAR-X. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, v. 2, 2008, p. 1028-1031.
- GILES, A. B.; MASSOM, R. A.; WARNER, R. C. A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica. **Remote Sensing of Environment**, v. 113 (8), 2009, p. 1691–1699.
- GUICHARD, F. & MOREL, J. M. **Image Analysis and PDE's**. IPAM GBM Tutorial, March, 2001, p. 11-24.
- HAEBERLI, W.; FRAUENFELDER, R.; HOELZE, M.; MAISCH, M. On rates and acceleration trends of global glacier mass changes. **Geografiska Annaler**, v. 81A(4), 1999, p. 585-591.
- HUANG, M. F.; CHAN, C. M.; KWOK, K. C. S.; HITCHCOCK, P. A. Cross correlation of modal responses of tall buildings in wind-induced lateral-torsional motion. **Journal of Engineering Mechanics**, ASCE, v. 135 (8), 2009, p. 802-812.
- LUBIN, D. & MASSOM, R. **Polar Remote Sensing Volume II: Ice Sheets**. Berlin: Springer-Praxis, 2006, p. 426.
- LUCKMAN, A.; QUINCEY, D.; BEVANS, S. The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates

- of Himalayan glaciers. **Remote Sensing of Environment**, v. 111(2-3), 2007, p. 172-181.
- MATTAR, K.; VACHON, P.; GEUDTNER, D.; GRAY, A.; CUMMING, I.; BRUGMAN, M. Validation of alpine glacier velocity measurements using ERS tandem-mission SAR data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, 1998, p. 974-984.
- METEOCHILE, Dirección Meteorológica Chilena. **Atlas Climatológico Sinótico para a região sul do Chile**. Homepage oficial da Dirección Meteorológica Chilena. Disponível em <http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_sinoptica_Sur.pdf>. Acesso: 07 de dezembro de 2012.
- MICHEL, R. & RIGNOT, E. Flow of Moreno Glaciar, Argentina, from repeat-pass Shuttle Imaging Radar images: Comparison of the phase correlation method with radar interferometry. **Journal of Glaciology**, v. 45 149, 1999, p. 93-100.
- MOHR, J. J. & REEH, N. Glacier surface velocity measurements from radar interferometry and the principle of mass conservation. Proceedings of **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Toronto, Canada. Institute of Electrical and Electronic Engineers, Piscataway, NJ, v. 2, 2002, p. 1054-1056.
- NARUSE, R. H.; FUKAMI; ANIYA M. Short-term variations in flow velocity of Glacier Soler, Patagonia, Chile, **Journal of Glaciology**, v. 38(128), 1992, p. 152-156.
- PATERSON, W. S. B. *The Physics of Glaciers*. Oxford: Pergamon, v. 3, 1994, p. 480.
- PELLIKKA, P. & REES, G. **Remote sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers**, CRC Press, Taylor & Francis Group, A Balkema Book, Leiden, v. 2010, 2009, p. 330.
- PERONA, P. & MALIK, J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion. **Proceedings of IEEE Workshop on Computer Vision**, 1987, p. 16-22.
- QUINCEY, D. J.; LUCKMAN, A.; BENN, D. Quantification of Everest region glacier velocities between 1992 and 2002, using satellite radar interferometry and feature tracking. **Journal of Glaciology**, v. 55, 2009, p. 596-606.
- RASMUSSEN, L.A.; CONWAY, H. and RAYMOND, C.F. Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. **Global Planet Change**, v. 59, 2007, p. 203-216.
- RIGNOT, E. & KANAGARATNAM, P. Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet. **Science**, v. 311, 2006, p. 986-990.
- RIVERA, A. Mass balance investigation at glacier Chico, Southern Patagonia Icefield, Chile. PhD thesis, University of Bristol, 2004.
- RIVERA, A. & CASASSA, G. Ice elevation, areal and frontal changes of glaciers from Torres del Paine National Park, Southern Patagonia Icefield. **Arctic, Antarctic and Alpine Research**, v. 36(4), 2004, p. 379-389.
- RIVERA, A.; BENHAM, T.; CASASSA, G.; BAMBER, J.; DOWDESWELL, J. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. **Global and Planetary Change**, v. 59, 2007, p. 126-137.
- ROTT, H.; STUEFER, M.; SIEGEL, M.; SKVARZA, P.; ECKSTALLER, A. Mass fluxes and dynamics of Moreno Glacier, Southern Patagonia Icefield, **Geophysical Research Letters**, v. 25, 1998, p. 1407-1410.
- SANTOS, V. C. **Estudo da dinâmica de geleiras de maré da Península Antártica através de imagens SAR de alta Resolução**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2012, p. 24.
- SMN, Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. Biblioteca Nacional de Datos de Meteorología. **Datos de la estación meteorológica automática de rio Turbio, provincia de Santa Cruz**. Disponível em: <<http://www.smn.gov.ar/>>. Acesso em 01 de mar. 2013.
- SCAMBOS, T. A.; DUTKIEWICZ M. J.; WILSON, J. C.; BINDSCHADLER, R. A. Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data. **Remote Sensing of Environment**, v.42, 1992, p. 177-186.
- SKVARCA, P.; RAUP, B.; DE ANGELIS, H. Recent behaviour of Glaciar Upsala, a fast-

- flowing calving glacier in Lago Argentino, southern Patagonia. **Annals of Glaciology**, v. 36, 2003, p. 184–188.
- SKVARCA, P.; DE ANGELIS, H.; ZAKRAJSEK, A. F. Climatic conditions, mass balance and dynamics of Larsen B ice shelf, Antarctic Peninsula, prior to collapse. **Annals of Glaciology**, v. 39(1), 2004, p. 557–562.
- STEARNS, L. A. & HAMILTON, G. S. A new velocity map for Byrd Glacier, East Antarctica, from sequential ASTER satellite imagery. **Annals of Glaciology**, v. 41, 2005, p. 71-76.
- VELHO, L.F. **Utilização do Filtro Lee na redução do speckle em imagens usadas na determinação da velocidade de fluxo de geleiras da península Antártica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- WANGENSTEEN B.; TONSBERG, O. M.; KAAB, A.; EIKEN, T.; HAGEN, J. O. Surface elevation change and high resolution surface velocities for advancing outlets of Jostedalbreen. **Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography**, v. 88, 2006, p. 55–74.
- WILLIS, M. J.; MELKONIAN, A. K.; PRITCHARD, M. E.; RAMAGE, J. M. Ice loss rates at the Northern Patagonian Icefield derived using a decade of satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, 2012, p 184-198.
- WITTMAN, T. **Mathematical Techniques for Image Interpolation**. Department of Mathematics, University of Minnesota, 2005.
- YOUNG, D. Image Correspondence by Cross-Correlation Demonstration, 2010. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/forums/27269/3/content/html/correspDemo.html>>. Acesso em: 15 de abril de 2012.
- ZWALLY, H. J.; ABDALATI, W.; HERRING, T.; LARSON, K.; SABA, J.; STEFFEN, K. Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow. **Science**, v. 297, 2002, p.218-22.