

UTILIZAÇÃO DO FILTRO LEE NA REDUÇÃO DO *SPECKLE* EM IMAGENS SAR USADAS NA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE GELEIRAS

Speckle Reduction using Lee Filter in SAR Images used to Determine Glacier Velocities

Luiz Felipe Velho¹
Jorge Arigony Neto²
Jefferson Cardia Simões³

¹**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS**
Campus Porto Alegre
Rua Ramiro Barcelos, 2777 – Bairro Santana
CEP: 90035-007 – Porto Alegre/RS
luiz.velho@poa.ifrs.edu.br

²**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - Laboratório de Monitoramento da Criosfera
Av. Itália, Km 8.
CEP: 96201-900 - Rio Grande/RS
jorgearigony@furg.br

³**Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS**
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera - Centro Polar e Climático
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Bairro Agronomia
CEP: 91501-970 - Porto Alegre/RS
jefferson.simoes@ufrgs.br

RESUMO

Speckle é um ruído multiplicativo e aleatório, característico de imagens de radar de abertura sintética (SAR). Devido a esse ruído, até mesmo áreas com feições marcantes em superfícies contínuas (e.g., fendas nas superfícies das geleiras) são caracterizadas em imagens SAR por grande variabilidade nos números digitais e pelo efeito "sal e pimenta", comum nesse tipo de imagens. Portanto, para que as imagens SAR possam ser utilizadas em algoritmos de correlação cruzada com o objetivo de extrair informações sobre a velocidade das geleiras, o *speckle* deve ser reduzido. Para solucionar este problema, quatro formas de utilização de um filtro adaptativo (i.e., filtro Lee) foram testadas no pré-processamento de imagens antes da extração de vetores de velocidade de geleiras. O filtro Lee foi utilizado de duas formas: (i) uma filtragem e (ii) filtragem sucessiva (i.e., dupla filtragem). Além disso, dois parâmetros foram utilizados para informar a variabilidade dos dados: o número de *looks* da cena e o desvio padrão da cena. A análise dos resultados foi realizada comparando os vetores de velocidade gerados pelas imagens originais e filtradas com dados publicados sobre a dinâmica das geleiras da parte setentrional da Península Antártica. Em termos de supressão do *speckle*, todos os métodos produziram resultados positivos. No entanto, a dupla filtragem não preservou as bordas das fendas, fundindo as feições. Dessa forma, produtos com dupla filtragem foram descartados da análise final. Em geral, as imagens com uma filtragem são as que apresentam os melhores resultados na extração de vetores de velocidade por algoritmos de correlação cruzada. Assim, a cadeia de pré-processamento incluindo uma só filtragem foi escolhida para a extração de parâmetros dinâmicos de geleiras. Quando comparados com dados já publicados, os vetores de velocidade resultantes da análise mostram um ligeiro aumento na velocidade das geleiras da área de estudo entre 2001 e 2005.

Palavras chaves: Dinâmica Glacial, Sensoriamento Remoto por Radar, *Feature Tracking*.

ABSTRACT

Speckle is a characteristic random noise from coherent imaging systems like synthetic aperture radar (SAR). Due to this noise, even areas with sharp features in continuous surfaces (e.g., crevasses on glaciers) will be characterized in SAR images by grainy texture and high variation in digital numbers. Therefore, the speckle must be reduced before SAR images can be used for measuring glacier velocities by cross-correlation algorithms. To solve this problem, four approaches based on adaptive filtering (i.e., Lee filter) were tested for data pre-processing prior to extracting the velocity fields from glaciers. The Lee filter was used in two ways: (i) one-pass and (ii) two-pass filtering. Furthermore, two parameters were used with the Lee filter to explain the data variability: number of looks and standard deviation of the scene. Results evaluation was carried out comparing the velocity vectors resulting from original and filtered images with published data on dynamics of the glaciers in the northern part of the Antarctic Peninsula. In terms of speckle suppression, all approaches yielded positive results. However, the two-pass filter does not preserve the crevasses edges and the resulting images are not considered for the final result comparison. In general, images processed with one-pass filter showed better results for extraction of velocity vectors with the cross-correlation algorithm than the original ones, and were accepted for an automatic processing chain to derive dynamic parameters of glaciers. Furthermore, resulting velocity vectors agree with published data and show a slight increase in velocity between 2001 and 2005.

Keywords: Glacier Dynamics, SAR Remote Sensing, Feature Tracking.

1. INTRODUÇÃO

Informações sobre o estado das geleiras nem sempre são possíveis de se obter. Por exemplo, o balanço de massa e a velocidade de fluxo são pouco conhecidos para vastas regiões do planeta cobertas por neve e gelo (SCAMBOS *et al.*, 1992; LUCCHITA *et al.*, 1993). Os custos logísticos e as peculiaridades do terreno, normalmente repleto de fendas, dificultam a obtenção desses dados de forma tradicional, baseada em levantamentos de campo (BINDSCHADLER *et al.*, 1996; BERTHIER *et al.*, 2005; MASSOM & LUBIN, 2006). Na busca dessas informações, imagens orbitais contribuem com dados espaciais capazes de quantificar tais parâmetros de forma rápida, precisa e com baixo custo (SCAMBOS *et al.*, 1992; BERTHIER *et al.*, 2005).

Algumas técnicas que utilizam observações provenientes de Sensoriamento Remoto são capazes de estimar o deslocamento das massas de gelo (i.e., direção e velocidade de fluxo) (BINDSCHADLER & SCAMBOS, 1991; SCAMBOS *et al.*, 1992; FERRIGNO *et al.*, 1993; LUCCHITA *et al.*, 1993; LUCCHITA *et al.*, 1995; WHILLANS & TSENG, 1995; BINDSCHADLER *et al.*, 1996; ROLSTAD *et al.*, 1997; ROSANOVA *et al.*, 1998; JOUGHIN, 2002; ROTT *et al.*, 2002; DE ANGELIS & SKVARCA, 2003; RIGNOT *et al.*, 2004; SCAMBOS *et al.*, 2004; BERTHIER *et al.*, 2005), sendo uma delas o *feature tracking* (MASSOM & LUBIN, 2006). A existência de fendas e outras feições superficiais nas geleiras permite o cálculo de padrões de deslocamento dessas massas de gelo ao longo do tempo, descrito pelo intervalo temporal existente entre as imagens orbitais (SCAMBOS *et al.*, 1992) pois, depois de abertas, as fendas seguirão com o fluxo de gelo, com velocidade idêntica a da própria geleira (MASSOM & LUBIN, 2006).

O monitoramento das massas de gelo é importante para a compreensão das conexões entre as

variações na temperatura média anual do planeta e o possível aumento do nível médio dos mares. De acordo com IPCC (2007), a temperatura média anual global aumentou nos últimos 50 anos, principalmente devido à emissão antrópica de gases estufa. Além disso, já é observada uma resposta das geleiras do planeta a esse aumento na temperatura atmosférica.

Não obstante, Skvarca *et al.* (1998) registram um aumento de cerca de 2°C na temperatura média do ar do norte da Península Antártica nos últimos 50 anos. Segundo esses autores, a temperatura atmosférica na estação argentina Marambio (64°14'S e 56°37'W), localizada na ilha Seymour, a leste da ilha James Ross, ultrapassou por duas vezes 0°C no verão, entre 1970 e 1998.

As imagens orbitais, em especial, colaboraram para a detecção da desintegração de plataformas de gelo e retração glacial na região, e foram essenciais no monitoramento do comportamento das geleiras tributárias das plataformas Larsen A e B, após a desintegração das mesmas (RACK *et al.*, 1999; ROTT *et al.*, 2002; DE ANGELIS & SKVARCA, 2003; SCAMBOS *et al.*, 2004). As pesquisas realizadas nesta região utilizaram em sua maioria imagens óticas ou técnicas de interferometria por radar na determinação das velocidades de fluxo das massas de gelo. Métodos baseados nos dados e técnicas mencionados anteriormente dependem das condições atmosféricas no caso das imagens óticas, e da aquisição de imagens em datas próximas para a utilização da interferometria para estudos de geleiras.

2. IMAGENS SAR

As imagens utilizadas neste trabalho consistem em duas cenas ASAR do Envisat (produto ASAR_IMP_1P) com polarização HH e geradas por 4 *looks*. A localização geográfica da região imageada é ilustrada na figura 1. Dados sobre as imagens utilizadas

neste trabalho estão sintetizados na tabela 1. Na primeira coluna da tabela pode-se encontrar a nomenclatura utilizada neste trabalho como referência para cada imagem a partir deste ponto do texto, visando uma melhor compreensão temporal dos procedimentos e resultados.

TABELA 1 - IDENTIFICAÇÃO DAS IMAGENS UTILIZADAS NESTE TRABALHO.

Nome	Aquisição	Track	Frame	Órbita
2004	15/10/2004	152	440	Descendente
2005	17/06/2005	152	424	Descendente

Para a utilização de imagens em algoritmos de correlação cruzada, nessa pesquisa buscando estimativas para a velocidade de fluxo das geleiras, as mesmas devem estar registradas a uma origem comum. Dessa forma, as duas imagens foram registradas de acordo com o sistema de coordenadas linha x coluna da imagem 2004. Esta etapa foi realizada com o *software* BEST 4.2.0. O erro médio quadrático (RMS) do co-registro foi de 0,4 pixel (5 metros), valor esse aceitável para os objetivos do trabalho, dado que os deslocamentos totais das fendas (para todo o intervalo temporal entre os imageamentos) será bastante superior ao RMS obtido. Assim, o erro no co-registro não interferirá nos resultados desta pesquisa.

3. FILTRAGEM DO SPECKLE

Por serem sistemas coerentes, sensores SAR enviam pulsos de radiação em fase. Dessa forma, o tamanho do pulso (que varia entre 8 e 210 m), o tempo de deslocamento e a diferença de fase entre a ida do feixe ao alvo e sua volta, em conjunto, serão processados pelo sistema SAR (HENDERSON & LEWIS, 1998). Esses feixes poderão interferir, de acordo com sua direção de reflexão, em outros feixes, causando interferência aditiva ou destrutiva. Isso gera um padrão visual granular, onde aleatoriamente têm-se pixels de maior ou menor intensidade que o conjunto de pixels ao seu redor. A esse efeito dá-se o nome de *speckle* (LILLESAND *et al.*, 2004). Em outras palavras, a resolução do sensor é insuficiente para resolver espalhamentos individuais (MASSOM & LUBIN, 2006). Em imagens SAR, esse efeito é um ruído multiplicativo nos dados (DONG *et al.*, 2001), sendo proporcional à intensidade do sinal recebido. Como consequência desse efeito, serão afetadas a análise visual da região imageada, a extração de feições, a classificação e as medidas baseadas na intensidade do sinal do radar (KIM *et al.*, 2007).

Um filtro para a supressão do *speckle*, segundo Dong *et al.* (2001), deve considerar a manutenção da média da intensidade recebida, a redução da variância e a preservação das bordas e da textura. Com o intuito de minimizar o efeito *speckle* nas imagens SAR, filtros foram desenvolvidos nas últimas décadas, sendo os mais utilizados o Frost, o Kuan e o Lee (LOPES *et al.*, 1990;

SHI & FUNG, 1994; DONG *et al.*, 2001; KIM *et al.*, 2007). Esses são classificados como filtros adaptativos, e têm como objetivo suprimir o ruído para suavizar as regiões homogêneas e manter a textura nas áreas de alta frequência (SHI & FUNG, 1994), ou seja, a variabilidade espacial é preservada (LOPES *et al.*, 1990). Para o estudo de dinâmica de geleiras por imagens orbitais, a manutenção da variabilidade espacial é fundamental, pois a correlação cruzada será máxima no caso dos pixels possuírem mesmo valor em imagens de diferentes datas (SCAMBOS *et al.*, 1992). Contudo, o ruído existente nas imagens pode afetar o desempenho do algoritmo, pois o *speckle* é aleatório e dependente do espalhamento causado pela superfície. Havendo alteração na região imageada no intervalo temporal descrito pelas imagens de diferentes épocas (*e.g.*, alvos existentes, relevo, rugosidade, entre outros), padrões diferentes do ruído serão encontrados.

O filtro Lee, em especial, é caracterizado pela equação 1:

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} + k_{ij} (z_{ij} - \bar{x}_{ij}) \quad (1)$$

onde \hat{x}_{ij} é o novo valor para o pixel, \bar{x}_{ij} é a média dos valores dos pixels da cena, k é o coeficiente adaptativo do filtro Lee e z_{ij} é o valor do pixel na imagem bruta. k é expresso por (2):

$$k = \frac{\text{var}(x)}{\bar{x}_{ij} \sigma^2 + \text{var}(x)} \quad (2)$$

A equação 2 contém as estatísticas locais e globais. Enquanto a média e a variância da cena (\bar{x}_{ij} e σ^2 , respectivamente) representam os parâmetros globais, os locais estão representados por $\text{var}(x)$, que terá a influência da variância e da média dos pixels contidos na janela de convolução, como mostra a equação 3

$$\text{var}(x) = \left(\frac{\text{var}(z) + \bar{x}^2}{\sigma_v^2 + 1} \right) - \bar{x}^2 \quad (3)$$

onde $\text{var}(z)$ é a variância da janela móvel e \bar{x} é a média da janela móvel. O termo σ_v^2 é descrito pela equação 4:

$$\sigma_v^2 = \frac{\text{var}(z')}{\bar{z}^2} \quad (4)$$

ou seja, é idêntico ao quadrado do coeficiente de variação, sendo $\text{var}(z')$ e \bar{z}^2 a variância e a média de uma região da imagem. Contudo, o *speckle* pode ser matematicamente modelado como um ruído multiplicativo de média igual a 1 (ERDAS, 1999). Assim, apenas o desvio padrão será necessário para alimentar o filtro Lee.

Apesar de ser utilizado apenas o valor do desvio padrão, há que se considerar que esse parâmetro

pode ser estimado a partir de diferentes amostras de pixels. Desta forma, pode-se realizar a filtragem utilizando diferentes formas de determinação de σ_v^2 . Baraldi & Parmiggiani (1995) utilizam, para imagens de intensidade geradas a partir de imageamento *multilook*, um desvio padrão igual a $1/L$, onde L é o número de *looks* utilizados na geração da imagem. No entanto, Kim *et al.* (2007) consideram valores para σ_v^2 iguais ao desvio padrão de uma área homogênea na

imagem. Isso se deve à tentativa de, em uma área com mesma resposta à radiação, encontrar-se facilmente o valor do ruído, já que a *speckle* é aleatório e os pixels não atingidos por este ruído conterão o valor real da interação do feixe com o alvo. Todavia, nem sempre é possível encontrar uma região homogênea em uma imagem, fazendo com que o parâmetro normalmente utilizado no filtro seja o desvio padrão da cena inteira.

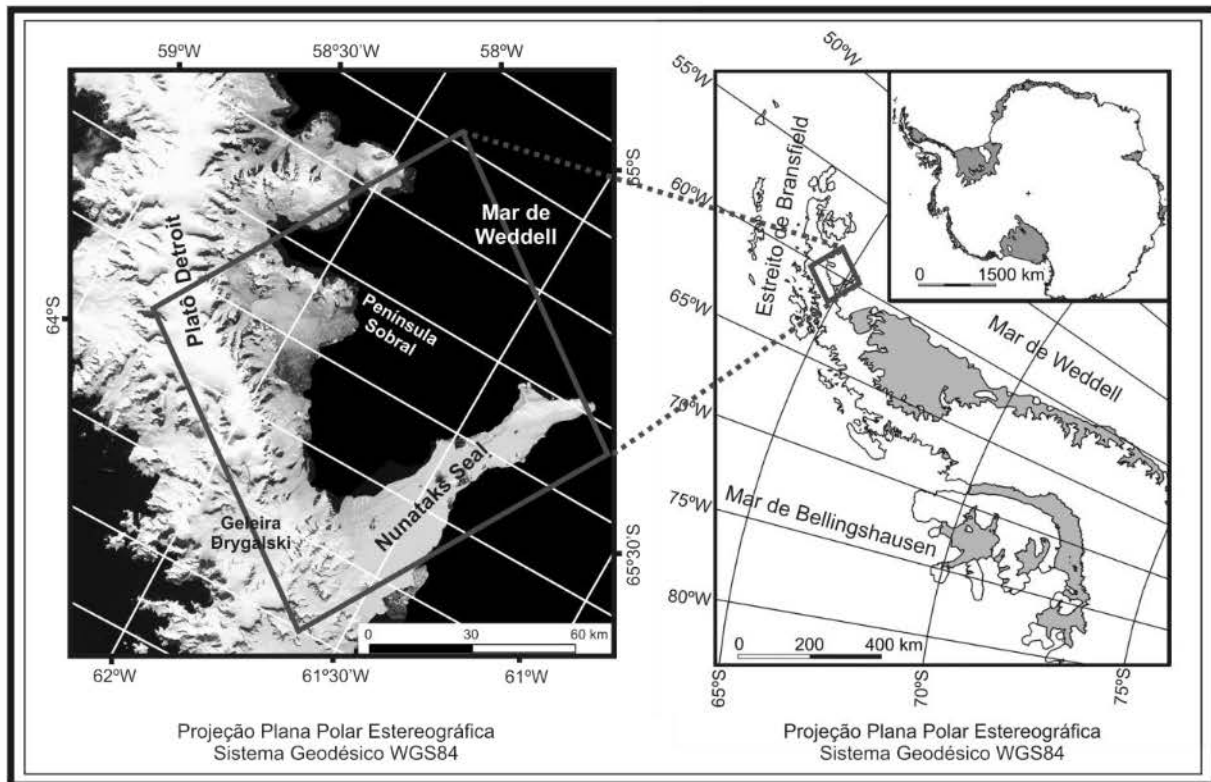


Fig. 1 – Localização das cenas. No detalhe à direita, o quadro situado na porção norte da Península Antártica é ampliado na janela à esquerda. O quadro sólido apresenta a área compreendida pelo imageamento das duas cenas utilizadas no estudo.

Como há duas formas de se determinar o valor de σ_v^2 , um pelo desvio padrão da imagem e outro pelo número de *looks* da imagem, ambas foram aplicadas às imagens. Como o filtro Lee tende a suavizar a imagem e a homogeneizar os padrões contidos na cena, optou-se por realizar uma segunda filtragem nas imagens, também seguindo as duas formas de determinação de σ_v^2 . A utilização de filtragem sucessiva é dada pela necessidade de definição de padrões visuais da imagem (*i.e.*, fendas e linhas de fluxo das geleiras) para que o algoritmo de correlação cruzada consiga identificar, com melhor precisão, o deslocamento aparente dessas feições. Em todas as filtrações, o tamanho da janela utilizado foi o 3 X 3. Janelas maiores suavizam demasiadamente a imagem, pois mais pixels contribuem na estimativa do novo valor do pixel central. Como as fendas possuem forma alongada, em sua dimensão mais estreita poucos pixels formam este padrão. Se muitos pixels não pertencentes ao padrão forem incluídos na estimativa de seu novo valor, o delineamento da feição

estará comprometido. Dessa forma, duas filtrações sucessivas com janela pequena tornam os padrões mais homogêneos, ao contrário de uma só filtragem com janela maior.

Uma vez que a imagem é filtrada com desvio padrão dado pelo número de *looks*, na segunda filtragem ela também será filtrada com esse mesmo parâmetro, como mostra o fluxograma da figura 2. Por conseguinte, uma imagem filtrada com σ_v^2 igual ao σ da imagem, a segunda filtragem terá a mesma determinação de parâmetro.

As imagens, por serem de épocas diferentes, possuem desvio padrão peculiar aos respectivos imageamentos.

As filtrações foram realizadas no *software* ERDAS 9.2, utilizando as imagens de retroespalhamento com os números digitais em decibéis. A escala em decibéis é contínua (*i.e.*, em todas as cenas os valores oscilam entre -30 e 10 dB) e não possui uma boa separabilidade entre os valores dos pixels que

compõem uma feição. Como o algoritmo de correlação cruzada utiliza parâmetros estatísticos para identificar feições homólogas, se os números digitais possuírem valores muito próximos, os padrões podem ser confundidos, ao passo que se os valores forem muito discrepantes, a confusão também ocorrerá, pois a variabilidade será muito alta. Assim, uma escala mais adequada à sensibilização do algoritmo deve ser pensada.

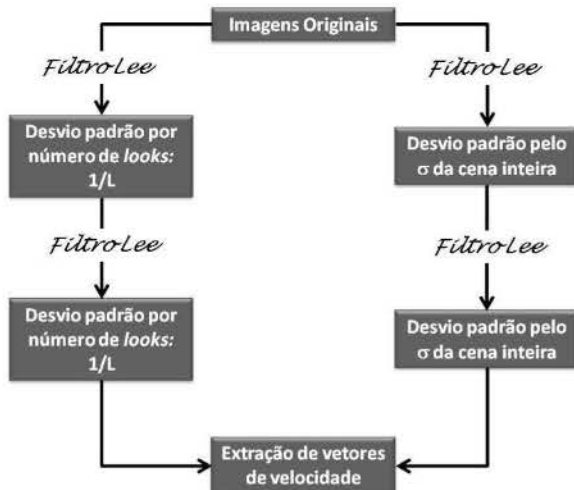


Fig. 2 – Fluxograma apresentando as filtragens utilizando parâmetros diferentes. O lado esquerdo apresenta duas filtragens sucessivas utilizando o valor 1/L na entrada do filtro Lee. À direita, as filtragens foram realizadas com parâmetro igual ao desvio padrão da cena inteira.

Para realizar a mudança na escala dos valores de número digital, uma transformação linear foi aplicada às imagens, utilizando os máximos e mínimos de cada escala para alterar os valores. Como resultado, foram obtidas imagens em 8 bits (números digitais entre 0 e 255). Após a transformação para 8 bits, um realce linear foi aplicado. O objetivo de utilizar o realce linear foi o de causar uma separabilidade maior entre os níveis de cinza, buscando caracterizar as fendas por pixels de valores distintos, gerando parâmetros estatísticos diferenciados para cada padrão analisado. A comparação entre as imagens sem e com realce linear é apresentada na figura 3.

4. ALGORITMO DE CORRELAÇÃO CRUZADA

Algoritmos de correlação cruzada são utilizados há mais de 15 anos na detecção de variações temporais no posicionamento de alvos em imagens de satélite. Inicialmente utilizados na localização automática de pontos homólogos para o co-registro de imagens, esses algoritmos apresentaram excelentes resultados no cálculo de deslocamentos de feições em imagens subsequentes (BINDSCHADLER & SCAMBOS, 1991).

A necessidade de automatização dos processos de obtenção de informações sobre a velocidade e

direção do fluxo das geleiras motivou diversos grupos de trabalho a utilizar e desenvolver algoritmos que melhor identifiquem essas informações em séries temporais de imagens. Neste contexto, diversos autores avaliaram a correlação cruzada nos domínios espacial (LUCCHITA et al., 1995; WHILLANS & TSENG, 1995; BINDSCHADLER et al., 1996; ROSANOVA et al., 1998) e de frequências (ROLSTAD et al., 1997; JOUGHIN, 2002), tanto para a obtenção de informações sobre a dinâmica das geleiras, ou apenas para o ajuste do deslocamento pré-identificado por técnicas de mínimos quadrados (LUCCHITA et al., 1993; FERRIGNO et al., 1993).

A correlação cruzada baseia-se na relação linear existente entre duas imagens. Havendo essa relação linear, ou seja, estando as imagens previamente co-registradas, o coeficiente de correlação entre duas janelas das imagens pode ser descrito pela covariância normalizada (SCAMBOS et al., 1992), pois a covariância de uma variável aleatória bidimensional exprime a correlação entre as duas componentes (GEMAEL, 1994). A equação 5, que apresenta a covariância normalizada (r), indica a simetria entre duas variáveis (SPIEGEL, 1974).

$$r = \frac{\sum xy}{\left[\sum x^2\right]^{1/2} \left[\sum y^2\right]^{1/2}} \quad (5)$$

onde x e y representam duas variáveis aleatórias. $\sum xy$ é o somatório do produto das variáveis, $\sum x^2$ é o somatório do quadrado das observações da variável x e $\sum y^2$ é o somatório do quadrado das observações da variável y .

Essa equação pode ser ou aplicada ao processamento de imagens. Imaginando as imagens como espaços, sendo r o espaço de referência e s o espaço de busca, pode-se admitir que μ_k seja a média da janela no espaço k (podendo referir-se tanto a r como a s) e que $r_{(l,s)}$ e $s_{(l,s)}$ serão os valores de cada pixel, com coordenadas (l,s) em seu respectivo espaço. Sendo $CI_{(L,S)}$ o índice de correlação entre as duas janelas (nos espaços de referência e busca) com pixel central em (L,S) , tem-se a equação 6 (SCAMBOS et al., 1992; ROLSTAD et al., 1997):

$$CI_{(L,S)} = \frac{\sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)(s_{(l,s)} - \mu_s)}{\left[\sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)^2\right]^{1/2} \left[\sum_{l,s} (s_{(l,s)} - \mu_s)^2\right]^{1/2}} \quad (6)$$

O CI será máximo, ou seja, igual a 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 equação 6 está implementada no *software* IMCORR (NSIDC, 2008). O IMCORR é uma ferramenta para cálculo de deslocamento de feições superficiais utilizada em diversas pesquisas

glaciológicas (COPLAND *et al.*, 2003; DOWDESWELL & BENHAM, 2003; JOUGHIN *et al.*, 2004).

Esse algoritmo gera, para cada janela na imagem de referência, uma janela na imagem de busca. Um *matching* de histogramas é realizado a partir da normalização dos números digitais das imagens, utilizando co-variância cruzada, fazendo com que os valores de intensidade tenham média zero e desvio padrão 1. Isso é necessário para eliminar as diferenças existentes na iluminação das cenas. A partir disso, os dados da janela de referência são comparados com os da janela de busca, e é calculada a correlação cruzada. Essa comparação é feita pixel a pixel, tomando como referência o pixel central das janelas (SCAMBOS *et al.*, 1992). Ao encontrar um pico de correlação entre referência e busca, o algoritmo calcula, no nível de subpixel, a distância entre a localização do pixel no espaço r e o pixel homólogo no espaço s . Assim, os vetores de deslocamento são gerados. A figura 4 representa graficamente o pico de correlação entre as imagens. A janela de busca é sempre maior que a janela de referência, pois como há um deslocamento das feições (e é este deslocamento que se espera medir) a área a ser buscada deverá ser maior que a de referência. Em (a) e em (b) uma mesma área é representada, do tamanho da área de busca. Assim, uma janela de referência (ilustrada em (a)) passa pixel a pixel na região analisada e uma superfície gerada pelos valores de correlação cruzada representa a variação destes valores em toda região de busca. O pico, nesta superfície, está posicionado sobre o ponto P^2 . Dessa forma, pode-se concluir que a feição P teve seu homólogo encontrado na posição P^2 e a distância d é o deslocamento desta feição no intervalo temporal existente entre a tomada das duas imagens.

Os parâmetros a serem inseridos no algoritmo são separados em obrigatórios e opcionais. O número de

linhas e colunas, o nome das imagens e o nome do arquivo de saída são obrigatórios. Ao utilizar apenas esses parâmetros, o algoritmo processa as imagens com janelas de tamanho 32 X 32 pixels, para referência, e 64 X 64 pixels, para busca. Além disso, as janelas não se deslocam pixel a pixel, mas a cada 25 pixels. O tamanho das janelas (de busca e de referência), o espaçamento no deslocamento das janelas e a determinação de um ponto não coincidente com o primeiro pixel da imagem para iniciar o processamento são parâmetros opcionais. É importante ressaltar que o algoritmo utiliza janelas múltiplas de 16, sendo a menor janela a de tamanho 16 e a maior de 128 (NSIDC, 2008). A determinação dos parâmetros opcionais é fundamental para um ajuste maior da sensibilidade do algoritmo.

A área de estudo deste trabalho contempla uma região que possui fluxos com altas velocidades. Sabe-se, por trabalhos científicos desenvolvidos na mesma região por outros autores, que a velocidade dessas geleiras já chegou a 6 m por dia. Dessa forma, para o cálculo de deslocamentos num intervalo de tempo descrito por 245 dias, espera-se um deslocamento preliminar total de 1470 metros, ou seja, de 49 pixels. Assim, para que esse deslocamento seja contemplado pela janela de referência, é necessário utilizar a de tamanho 64 X 64 pixels. Como as janelas de referência devem ser menores que as janelas de busca, utilizou-se o tamanho 128X128 para as janelas de busca.

Janelas passando pixel a pixel geram arquivos de saída com grande tamanho, exigindo uma capacidade de armazenamento considerável para estes dados, uma vez que para cada pixel, uma linha de dados é gerada. Além disso, deslocamento pixel a pixel contém muita informação redundante, aumentando o tempo de análise dos resultados. Assim, optou-se pela obtenção de vetores a cada 10 pixels.

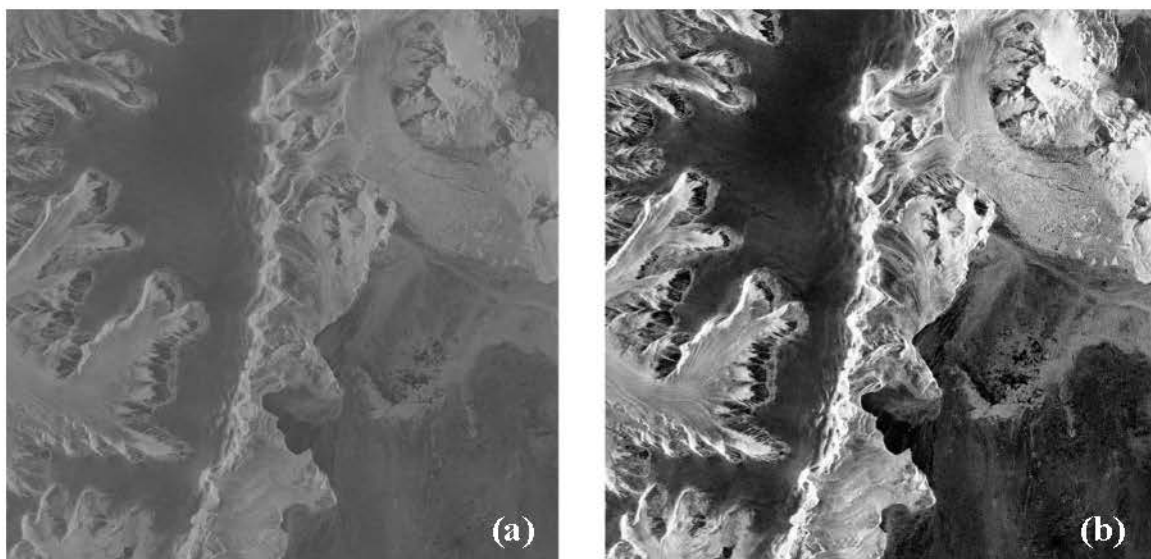


Fig. 3 – Análise do realce linear aplicado nas imagens. Em (a) tem-se a imagem sem realce e, em (b), com realce linear. Note que a imagem realçada expressa melhor a diferença entre os alvos da cena.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise visual das filtragens

As 2 imagens ASAR, após filtradas duas vezes, com coeficientes adequados a cada forma de determinação de desvio padrão inserido no filtro Lee (*i.e.*, como mostra o fluxograma da figura 2), geraram outras 8 imagens, totalizando 10 cenas (2 adquiridas e 8 derivadas de processamento) em duas diferentes datas (*i.e.*, 5 pares de imagens). Os pares de imagens ASAR foram então processados no IMCORR com o intuito de observar o efeito da homogeneização de feições na determinação dos deslocamentos das geleiras.

Na figura 5, um zoom das imagens ilustra bem a homogeneização das fendas e as diferenças e semelhanças existentes entre as imagens filtradas. É importante ressaltar a grande diferença existente entre a imagem original e as imagens filtradas. Os padrões ficam mais homogêneos e melhor delineados. As imagens que sofreram duas filtragens apresentam uma leve fusão das feições, minimizando a separação dos padrões.

As filtragens causam uma leve homogeneização dos padrões, visando eliminar a variabilidade proveniente do *speckle* e fazer com que o algoritmo de correlação cruzada seja capaz de identificar de forma efetiva os deslocamentos das feições homólogas. Na figura 5 percebe-se que, apesar da sutileza conseguida na cena após a primeira filtragem, as fendas ficaram mais delineadas, caracterizando bem a forma. No entanto, é visível a perda de informações na segunda filtragem. Nota-se, também, a diminuição nos níveis de cinza para representar a mesma porção da superfície, formando uma imagem com menor variabilidade nas informações. Além disso, os valores dos pixels das diferentes fendas passam a se aproximar, causando confusões no cálculo das correlações, pois todas as feições serão estatisticamente parecidas.

5.2 Análise quantitativa dos deslocamentos obtidos

Após a análise visual dos resultados da filtragem, foi interpretada preliminarmente a resposta do algoritmo às filtragens quanto aos números de deslocamentos detectados e erros associados aos deslocamentos determinados. Para facilitar a identificação dos tipos de filtragem, será utilizada a denominação apresentada na tabela 2.

Inicialmente, os números de detecções foram comparados. Essa análise foi realizada para verificar a influência das filtragens na identificação das feições pelo algoritmo. Para tanto, foram excluídas as informações nulas geradas (*i.e.*, vetores com deslocamento igual a zero) e as que o algoritmo informa que são impróprias, ou seja, quando o erro encontrado para a observação é superior ao módulo do vetor. Os resultados podem ser visualizados na tabela 3, onde é

possível observar o aumento no número de detecções de deslocamento entre a imagem original e as imagens com apenas uma filtragem. No entanto, para as imagens com duas filtragens sucessivas houve uma grande queda no número de deslocamentos calculados. Com janela de busca com tamanho de 128 x 128 pixels, movendo-se a cada 10 pixels, o número total de observações realizadas pelo algoritmo é de 175.561. Desta forma, pode-se calcular o percentual de êxitos do algoritmo para cada tipo de imagem. Os percentuais estão também dispostos na tabela 3.

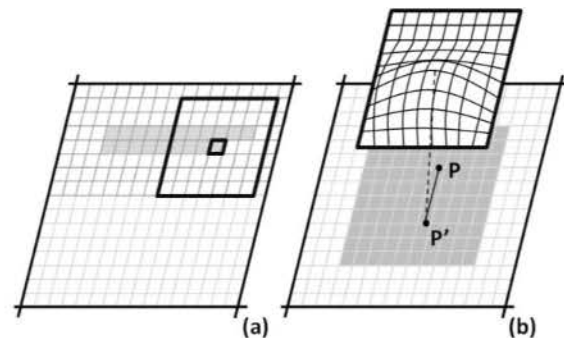


Fig. 4 – Ilustração do pico de correlação entre imagens. Em (a) é apresentada a imagem de referência e, em (b), a imagem de busca. Adaptado de De Lange *et al.* (2007).

A tabela 3 mostra o bom desempenho das imagens com apenas uma filtragem frente às imagens com filtragens sucessivas e, até mesmo, às imagens originais. Para um mesmo número de observações (*i.e.*, 175.561), as imagens com apenas uma filtragem detectaram 17,92 % mais deslocamentos que as imagens originais e 45,49 % mais que as imagens com dupla filtragem. Este comportamento corrobora a análise visual realizada na seção anterior, onde as imagens com uma filtragem apresentaram semelhante homogeneização nas feições e delimitação das bordas. Isso resultou no aumento da identificação das feições homólogas pelo algoritmo, demonstrado pelo aumento nos deslocamentos encontrados. Em contrapartida, as imagens com dupla filtragem apresentam feições fundidas, resultado da excessiva suavização das feições (figura 5). Além disso, nesse caso nota-se uma baixa variabilidade nos valores de número digital para representar as diferentes fendas. Com isso, parâmetros estatísticos muito próximos são encontrados para padrões diferentes, aumentando o erro do algoritmo na estimativa do deslocamento.

Ainda, segundo a tabela 3, as imagens com mesmo nível de processamento, ou seja, as duas imagens com uma só filtragem e as duas com filtragem dupla, responderam igualmente ao algoritmo. Analisando as estatísticas gerais da imagem, é possível constatar que, apesar dos valores dos parâmetros utilizados no filtro Lee serem diferentes, as filtragens Lee-sigma e Lee-look causam o mesmo efeito nos

pixels ainda na escala de decibéis. A tabela 4 apresenta a média e o desvio padrão para as imagens. As imagens, ainda em decibéis, são idênticas, gerando imagens em 8 bits também iguais. Assim, é melhor, para imagens ASAR, utilizar o número de *looks* da imagem, minimizando o tempo e o custo computacional para o cálculo do desvio padrão da cena.

TABELA 2 - DENOMINAÇÃO DAS FILTRAGENS.

Processamento realizado na imagem	Nome utilizado
Imagem de retroespalhamento	Original
Filtro Lee com parâmetro estimado pelo número de <i>looks</i>	Lee-Look
Filtro Lee com parâmetro estimado pelo desvio padrão da imagem	Lee-sigma
Duas filtragens Lee sucessivas com parâmetro estimado pelo número de <i>looks</i>	LeeLee-look
Duas filtragens Lee sucessivas com parâmetro estimado pelo desvio padrão da imagem	LeeLee-sigma

TABELA 3 – NÚMERO DE DETECÇÕES OBTIDAS PELO ALGORITMO DE CORRELAÇÃO CRUZADA EM CADA NÍVEL DE PROCESSAMENTO DA IMAGEM.

Processamento realizado	Número de deslocamentos	Percentual de êxito
Retroespalhamento	82.916	47,23%
Lee-look	114.385	65,15%
Lee-sigma	114.385	65,15%
LeeLee-look	34.515	19,66%
LeeLee-sigma	34.515	19,66%

A tabela 5 repete, em outra variável, o mesmo desempenho que as imagens obtiveram nas análises anteriores. Mais uma vez, as imagens com apenas uma filtragem superam as demais. Enquanto as imagens com uma filtragem apresentaram 0,3% de erro, as imagens com dupla filtragem apresentam erros de 19,6%.

Além disso, uma análise dos valores dos erros também deve ser realizada. Nesta nova análise, os erros superiores a 1 pixel são eliminados. Como a estimativa por correlação cruzada é dada pixel a pixel, qualquer erro superior a 1 indica que a determinação do deslocamento foi realizada com erro superior à resolução dos dados utilizados para o cálculo. A tabela 5 contém o número de deslocamentos válidos com erro superior a 1 pixel.

Unindo as informações das tabelas 3 e 5, pode-se afirmar que as imagens com uma filtragem, independentemente de como foi determinado o parâmetro do filtro, são as que produzem os melhores resultados do algoritmo, dentre as testadas neste trabalho. Como os resultados das Lee-look e Lee-sigma

são idênticos, as próximas seções avaliarão as imagens com uma filtragem e serão chamadas de Lee. Já as imagens com dupla filtragem são descartadas das demais análises, pois dos 34.515 vetores de deslocamento obtidos com estas imagens, 34.438 são descartáveis, por conterem erros superiores a 1 pixel. Assim, somente 77 vetores seriam visualizados, número inadequado para a interpretação dos fluxos das geleiras.

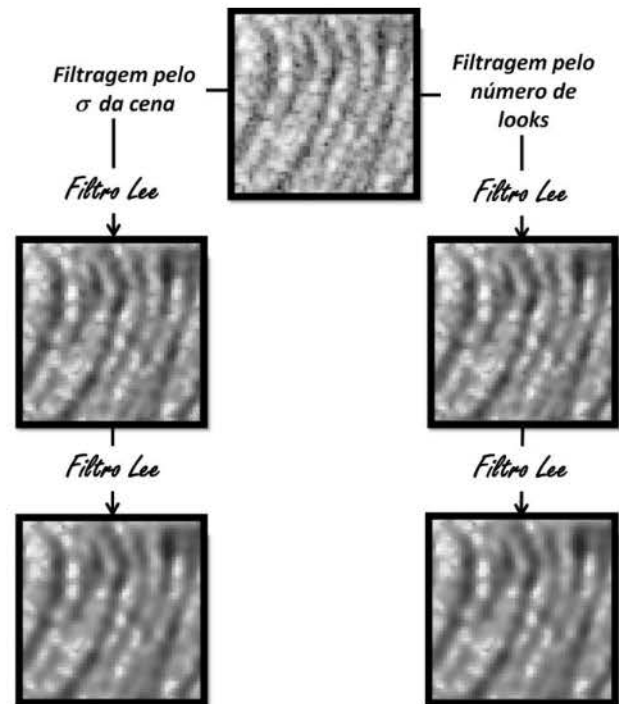


Fig. 5 – Esquema apresentando o efeito dos filtros nas fendas.

A diferença na quantidade de vetores pode ser visualizada na figura 6, onde um mesmo campo de fendas é apresentado com vetores gerados a partir das imagens originais e das imagens Lee-look.

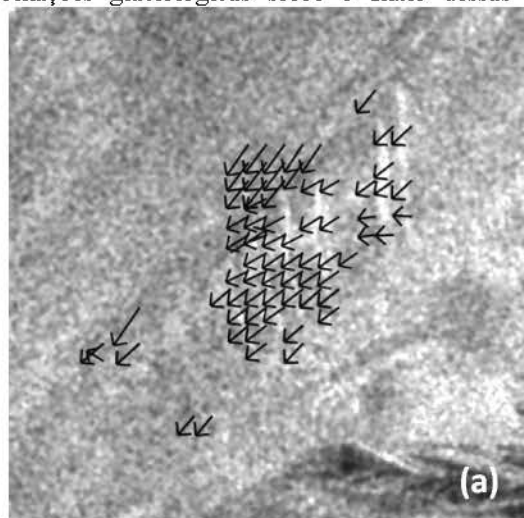
TABELA 4 - ESTATÍSTICAS GERAIS DA IMAGEM 2004 ORIGINAL E APÓS AS FILTRAGENS.

Imagem	Média (dB)	Desvio Padrão (dB)
Original	-10,501305	6,115195
Lee-look	-10,481426	5,806908
Lee-sigma	-10,481426	5,806908
LeeLee-look	-10,468679	5,730033
LeeLee-sigma	-10,468679	5,730033

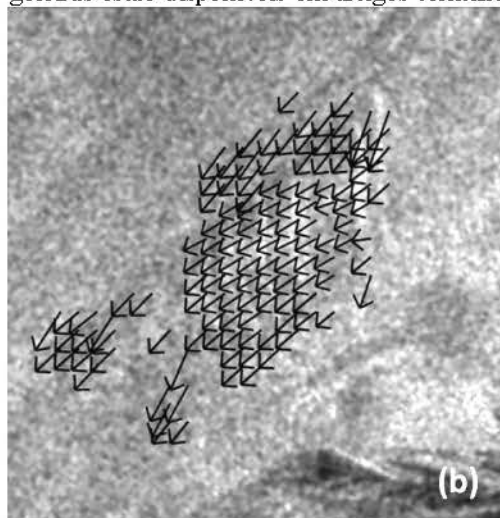
5.3 Análise glaciológica e veracidade dos dados

Para avaliar a veracidade das informações extraídas pelo algoritmo de correlação cruzada, as geleiras Dinsmoor, Bombardier e Edgeworth (D-B-E) foram escolhidas (aproximadamente 64°23'S e 59°57'W). A escolha dessa área foi baseada no fato de

que informações glaciológicas sobre o fluxo dessas



geleiras estão disponíveis em artigos científicos. A área



0 0.9 1.8 2.7 3.6 km

Fig. 6 - Comparativo entre o número de vetores gerados a partir das imagens originais (a) e das imagens Lee-look (b). Em (b) é possível notar uma maior cobertura de vetores sobre o campo de fendas, mostrando que as imagens Lee-look melhoram o desempenho do algoritmo de correlação cruzada na identificação de deslocamentos.

contendo as três geleiras, mencionada em trabalhos anteriores como região D-B-E (ROTT *et al.*, 2002; DE ANGELIS & SKVARCA, 2003), está detalhada na figura 7.

TABELA 5 – NÚMERO DE DESLOCAMENTOS DETECTADOS COM ERRO SUPERIOR A 1 PIXEL.

Processamento na imagem	Número de deslocamentos com erro superior a 1 pixel
Retroespalhamento	1520
Lee-look	607
Lee-sigma	607
LeeLee-look	34438
LeeLee-sigma	34438

Assim como as demais geleiras da porção leste da Península Antártica contidas nas imagens processadas neste trabalho, as geleiras D-B-E possuíam seu término na antiga plataforma de gelo Larsen A, a qual desintegrou em 1995, alterando a dinâmica de suas geleiras tributárias (ROTT *et al.*, 2002; DE ANGELIS & SKVARCA, 2003; FERRIGNO *et al.*, 2006). Após a desintegração da Larsen A foram detectados um avanço, entre 2000 e 2001, seguido de uma retração, entre 2001 e 2002, da frente das geleiras D-B-E (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003). Isso evidencia a ocorrência de um evento de pulso (*surge*) (RIGNOT *et al.*, 2004; FERRIGNO *et al.*, 2006), detectado pelo aumento da velocidade entre 1995 e 1999 (ROTT *et al.* 2002), pelo também aumento da frente das geleiras (DE ANGELIS

& SKVARCA, 2003) e pela considerável perda de massa (RACK & ROTT, 2006). Pulso é a aceleração abrupta do fluxo de uma geleira, acompanhado pelo avanço rápido e brusco (alguns quilômetros) da frente da geleira (SIMOES, 2004).

Rott *et al.* (2002) detectaram a aceleração no fluxo das geleiras D-B-E entre 1995 e 1999. Segundo eles, houve a diminuição da língua de gelo e o aumento da velocidade média de 1,5 m por dia, em 1995, para 6 m por dia, em 1999.

De Angelis & Skvarca (2003) afirmam que não ocorreu aceleração entre 2000 e 2001 na região das geleiras D-B-E, e que a velocidade naquele período foi de 2,4 m por dia. Os autores não associam o comportamento do fluxo dessas geleiras à desintegração da Larsen A. Atribuem ao comportamento das massas de gelo, à lubrificação e à deformação basal. No entanto, Rott *et al.* (2002) consideram a desintegração da plataforma uma das causas das altas velocidades então encontradas.

Para compreender melhor a influência da percolação d'água e da desintegração de plataforma no fluxo das geleiras, Rignot *et al.* (2004) e Scambos *et al.* (2004) monitoraram o comportamento das geleiras tributárias da plataforma Larsen B após sua desintegração, em 2002. Utilizando imagens do sensor ETM+, da plataforma Landsat 7, (SCAMBOS *et al.*, 2004) e do sensor AMI SAR, das plataformas ERS-1 e ERS-2, (RIGNOT *et al.*, 2004), os dois trabalhos apresentaram a desintegração da plataforma Larsen B como o principal fator no aumento na velocidade das geleiras. A Larsen B não desintegrou totalmente, restando um trecho da plataforma que ainda funciona

como atenuador natural do fluxo de duas grandes geleiras. Como evidência de que a principal causa no aumento da velocidade das geleiras seja a desintegração da plataforma de gelo, todas as geleiras que passaram a ter suas frentes não bloqueadas pela plataforma aceleraram logo após a desintegração da mesma e, nos anos seguintes, enquanto as duas geleiras que têm frente junto à área restante da Larsen B não apresentaram aumento de velocidade (RIGNOT *et al.*, 2004; SCAMBOS *et al.*, 2004). Dessa forma, pode-se concluir que a mudança dinâmica nas geleiras D-B-E foi ocasionada pela desintegração da Larsen A.

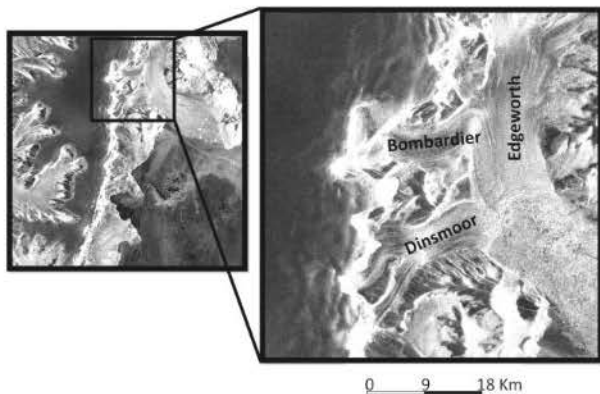


Fig. 7 - Detalhe da região das geleiras Dinsmoor, Bombardier e Edgeworth.

Nas áreas próximas da frente das geleiras D-B-E, De Angelis & Skvarca (2003) relataram velocidade de $2,4 \text{ m d}^{-1}$. Usando a metodologia deste trabalho (*ie.*, processamento de imagens e cálculo de deslocamento por algoritmo de correlação cruzada), para as mesmas áreas foram obtidas velocidades entre $2,5$ e $4,5 \text{ m d}^{-1}$. Isso mostra coerência entre as velocidades obtidas neste trabalho e os dados já publicados. As velocidades mais altas coincidem com os campos de fendas mais próximas da frente da geleira, principalmente das geleiras Dinsmoor e Edgeworth (Figura 8). Por outro lado, as velocidades nas áreas mais altas das geleiras Bombardier e Edgeworth apresentam velocidades inferiores a $2,5$ metros por dia.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As filtragens corresponderam às expectativas iniciais, pois ocorreu eliminação do *speckle* e homogeneização das feições, delineando bem as fendas sem alterar abruptamente a imagem (vide figura 5). Isso mostra que a opção pelo filtro Lee foi adequada. No entanto, a filtragem sucessiva tornou os valores de números digitais inadequados à proposta inicial deste trabalho. Houve uma suavização excessiva nos padrões, fazendo com que as imagens tivessem melhor aplicação em análises visuais do que em algoritmos de correlação cruzada. A janela utilizada na filtragem (3×3) também atingiu seu propósito, ou seja, a suavização causada por

este tamanho de janela fez com que as imagens com uma filtragem gerasse mais dados de deslocamento do que os obtidos com as imagens originais.

A análise quantitativa dos vetores de deslocamento foi realizada a partir da verificação da distribuição e qualidade dos mesmos, critérios esses que estão diretamente ligados ao aspecto visual das imagens. A partir dessa análise, foi possível constatar que imagens com dupla filtragem apresentam fusão de feições. Além disso, altos valores de erro nas determinações dos vetores de deslocamento foram encontrados para esse caso. Dessa forma, os dados de deslocamentos foram totalmente descartados.

Unindo os resultados das duas análises (visual e quantitativa), conclui-se que imagens de radar com uma só filtragem Lee respondem de forma adequada e efetiva à aplicação em cálculos de deslocamentos de feições. E, por não haver diferenças entre os resultados obtidos pelas imagens Lee-sigma ou Lee-look, recomenda-se a utilização do número de *looks* na determinação do parâmetro a ser inserido no filtro Lee, pois tal processo tem menor custo computacional no processamento das imagens (já que não há o cálculo do desvio padrão para cada cena). Dessa forma, em estudos de dinâmica das geleiras com inúmeras imagens, de diferentes épocas, o custo computacional e o tempo gasto com o cálculo do desvio padrão para as imagens poderão ser suprimidos, já que o aspecto visual e os números digitais, comparados pelas estatísticas globais das imagens Lee-look e Lee-sigma, obtidos a partir do desvio padrão da cena, são idênticos aos obtidos com $\sigma_v^2 = 1/L$.

Unindo as informações de Rott *et al.* (2002), De Angelis & Skvarca (2003) e as geradas neste trabalho, pode-se traçar um diagnóstico para as geleiras D-B-E desde a desintegração da plataforma Larsen A (1995) até junho de 2005. Após a desintegração, até 1999, um forte aumento na velocidade ocorreu nas geleiras, saltando de $1,5 \text{ m d}^{-1}$ para 6 m d^{-1} (ROTT *et al.*, 2002), seguida por um período de leve desaceleração e de perda de extensão da língua de gelo (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003), com redução da velocidade de 6 para $2,4 \text{ m d}$, e por um leve aumento na velocidade entre 2002 e 2005 para 3 m d^{-1} (conforme este trabalho) nos campos de fendas distantes até 4 km da frente das geleiras na direção da geleira Edgeworth, pontos esses com observações comuns nos três trabalhos. Conclui-se, dessa forma, que a desintegração da Larsen A causou um desequilíbrio no balanço de massa das geleiras, ocasionando um evento de pulso (*surge*). Após o aumento da velocidade e a perda de massa, as geleiras D-B-E voltaram ao equilíbrio. Contudo, o aumento do deslizamento basal como resposta ao derretimento na superfície das geleiras tem intensificado o fluxo, o que ratifica a hipótese de De Angelis & Skvarca (2003) sobre a influência do deslizamento basal no fluxo dessas geleiras.



Fig. 8 - Distribuição das velocidades nas geleiras D-B-E extraídas por *feature tracking* aplicado em imagens com *speckle* reduzido. Em branco estão os vetores com velocidade inferior a $2,4 \text{ m d}^{-1}$. Em preto, vetores com módulo superior a $2,5 \text{ m d}^{-1}$.

AGRADECIMENTOS

Este artigo resulta de pesquisas financiadas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através dos projetos 550041/2007-9 (coordenador Jefferson Cardia Simões) e 480701/2008-3 (coordenador Jorge Arigony Neto), constituindo também uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera para a obtenção de informações da dinâmica das massas de gelo, compreensão dos processos climáticos e meteorológicos que afetam a dinâmica da criosfera. Luiz Felipe Velho agradece ao CNPq pela bolsa de mestrado concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARALDI, A.; PARMIGGIANI, F. An alternative form of the Lee filter for speckle suppression in SAR images. **Graphical Models and Image Processing**, v. 57, n. 1 p. 75-78, 1995.

BERTHIER, E.; VADON, H.; BARATOUX, D.; ARNAUD, Y.; VINCENT, C.; FEIGL, K. L.; RÉMY, F.; LEGRÉSY, B. Surface motion of mountain glaciers

derived from satellite optical imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 95, p. 14-28, 2005.

BINDSCHADLER, R. A.; SCAMBOS, T. A. Satellite-image-derived velocity field of an Antarctic ice stream. **Science**, v. 252, p. 242-246, 1991.

BINDSCHADLER, R.; VORNBERGER, P.; BLANKENSHIP, D.; SCAMBOS, T.; JACOBEL, R. Surface velocity and mass balance of Ice Streams D and E, West Antarctica. **Journal of Glaciology**, v.42, n. 142, p. 461-475, 1996.

COPLAND, L.; SHARP, M. J.; DOWDESWELL, J. A. The distribution and flow characteristics of surge-type glaciers in the Canadian High Arctic. **Annals of Glaciology**, v. 36, p. 73-81, 2003.

DE ANGELIS, H.; SKVARCA, P. Glacier surge after ice shelf collapse. **Science**, v. 299, p. 1560-1561, 2003.

DE LANGE, R.; LUCKMAN, A.; MURRAY, T. Improvement of satellite radar feature tracking for ice velocity derivation by spatial frequency filtering. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 7, p. 2309-2318, 2007.

- DONG, Y.; MILNE, A. K.; FORSTER, B. C. Toward edge sharpening: A SAR speckle filtering algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 39, n. 4, p. 851-863, 2001.
- DOWDESWELL, J. A.; BENHAM, T. J. A surge of Perseibreen, Svalbard, examined using aerial photography and ASTER high-resolution satellite imagery. **Polar Research**, v. 22, n. 2, p. 373-383, 2003.
- ERDAS. **ERDAS Field Guide**. 5. ed. Atlanta: Erdas, Inc., 1999.
- FERRIGNO, J. G.; COOK, A. J.; FOLEY, K. M.; WILLIAMS JR, R. S.; SWITHINBANK, C.; FOX, A. J.; THOMSON, J. W.; SIEVERS, J. **Coastal-change and glaciological map of the Trinity Peninsula area and South Shetland Islands, Antarctica—1843–2001: U.S. Geological Survey Geologic Investigations Series Map I-2600-A, 1 map sheet**, 2006, 32-p. Disponível em <<http://pubs.usgs.gov/imap/2600/A/>>. Acesso em 15 jul. 2010.
- FERRIGNO, J. G.; LUCCHITTA, B. K.; MULLINS, K. F.; ALLISON, A. L.; ALLEN, R. J.; GOULD, W. G. Velocity measurements and changes in position of Thwaites Glacier/iceberg tongue from aerial photography, Landsat images and NOAA AVHRR data. **Annals of Glaciology**, v. 17, p. 239-244, 1993.
- GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. da UFPR, 1994. 319p.
- HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. New York: John Wiley Sons, 1998. 3ed. 896p.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Solomon, S., D.; Qin, M.; Manning, Z.; Chen, M.; Marquis, K. B.; Averyt, M.; Tignor and Miller, H. L. (eds.)]. New York: Cambridge University Press, 996 p. 2007.
- JOUGHIN, I. Ice-sheet velocity mapping: a combined interferometric and speckle-tracking approach. **Annals of Glaciology**, v. 34, p. 195-201, 2002.
- JOUGHIN, I.; ABDALATI, W.; FAHNESTOCK, M. Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. **Nature**, v. 432, p. 608-610, 2004.
- KIM, J. S.; LEE, H. D.; KIM, B. Coherence adaptative speckle filter for ultrasound image. 2007. **9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications**, Sharjah, p. 1-4, 12-15 fev. 2007.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763p.
- LOPES, A.; TOUZI, R.; NEZRY, E. Adaptative speckle filter and scene heterogeneity. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 992-1000, 1990.
- LUCCHITTA, B. K.; ROSANOVA, C. E.; MULLINS, K. F. Velocities of Pine Island Glacier, West Antarctica, from ERS-1 SAR Images. **Annals of Glaciology**, v. 21, p. 277-283, 1995.
- LUCCHITTA, B. K.; MULLINS, K. F.; ALLISON, A. L.; FERRIGNO, J. G. Antarctic glacier-tongue velocities from Landsat images: first results. **Annals of Glaciology**, v. 17, p. 356-366, 1993.
- MASSOM, R.; LUBIN, D. **Polar Remote Sensing Volume II: Ice Sheets**. Berlin: Springer-Praxis, 2006. 426p.
- NSIDC - NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **IMCORR Software**. Disponível em: <<http://nsidc.org/data/velmap/imcorr.html#BIB>>. Acesso em: 17 out. 2008.
- RACK, W.; ROTT, H. Further retreat of the northern Larsen Ice Shelf and collapse of Larsen B. **Forum For Research Into Ice Shelf Processes: FRISP Reports**, Bergen, p. 91-94. 26 jun. 2006.
- RACK, W.; ROTT, H.; SIEGEL, A.; SKVARCA, P. The motion field of northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula, derived from satellite imagery. **Annals of Glaciology**, v. 29, p. 261-266, 1999.
- RIGNOT, E.; CASASSA, G.; GOGINENI, P.; KRABILL, W.; RIVERA, A.; THOMAS, R. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B Ice Shelf. **Geophysical Research Letters**, v.31, L18401, 2004.
- ROLSTAD, C.; AMLIEN, J.; HAGEN, J. O.; LUNDÉN, B. Visible and near-infrared digital images for determination of ice velocities and surface elevation during a surge on Osbornbreen, a tidewater glacier in Svalbard. **Annals of Glaciology**, v.24, p. 255-261, 1997.
- ROSANOVA, C. E.; LUCCHITTA, B. K.; FERRIGNO, J. G. Velocities of Thwaites Glacier and smaller glaciers along the Marie Byrd Land coast, West Antarctica. **Annals of Glaciology**, v. 27, p. 47-53, 1998.
- ROTT, H.; RACK, W.; SKVARCA, P.; DE ANGELIS, H. Northern Larsen Ice Shelf, Antarctica: further retreat

after collapse. **Annals of Glaciology**, v. 34, p. 277-282, 2002.

SCAMBOS, T. A.; BOHLANDER, J. A.; SHUMAN, C. A.; SKVARCA, P. Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v.31, L18402, 2004.

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, p. 177-186, 1992.

SHI, Z.; FUNG, K. B. A Comparison of Digital Speckle Filters. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Pasadena, v.4, p. 2129-2133, 1994.

SIMÕES, J. C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 119-154. 2004.

SKVARCA, P.; RACK, W.; ROTT, H.; DONANGELO, T. I. Evidence of recent climatic warming on the eastern Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 29, p. 628-632, 1998

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Sao Paulo: McGraw-Hill, 1974. 580p.

WHILLANS, I. M.; TSENG, Y. Automatic tracking of crevasses on satellite images. **Cold Regions Science and Technology**, v. 23, p. 201-214, 1995.