

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISA EM SENSORIAMENTO REMOTO E  
METEOROLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

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

**LUIZ FELIPE VELHO**

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Jorge Arigony Neto

CO-ORIENTADOR:

Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dra. Rosemary Vieira

Prof. Dr. Glauber Acunha Gonçalves

Prof. Dr. Vitor Francisco de Araújo Haertel

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

Porto Alegre

2009

**LUIZ FELIPE VELHO**

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

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito para obtenção do  
Título de Mestre em Sensoriamento  
Remoto pelo Programa de Pós-  
Graduação em Sensoriamento  
Remoto da Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul.

**ORIENTADOR:**

Prof. Dr. Jorge Arigony Neto

**CO-ORIENTADOR:**

Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões

Porto Alegre

2009

*Dedico esta dissertação  
aos meus pais, Rosa e Oscar,  
e à minha irmã, Rochele,  
por tudo que sou  
e pelo que significam pra mim.*

## *Agradecimentos*

---

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jorge Arigony Neto, pela dedicação a este trabalho. Obrigado pelas sugestões e comentários, pelas perguntas feitas a cada grifo no texto, por dar aquele apoio moral nos momentos mais críticos. Espero poder contar sempre com teu apoio, com teu conhecimento e com tua amizade.

Ao Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões e a sua esposa, Sra. Ingrid Simões, pelo respeito com que tratam os integrantes do Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas (NUPAC). Agradeço pelo apoio, pelas oportunidades, pelas conversas, pela infraestrutura do laboratório e pela atenção a mim dada no final deste trabalho.

Aos colegas de NUPAC e nossos momentos: *coffee with love*, *reuniões de cúpula* e *festinhas Nupaqueanas*. Patrícia, Kátia, Camila, Rafael, Fernando: a cada um de vocês o meu obrigado! Rose, valeu os cafezinhos e *happys* na Pe. Chagas, o acampamento, as baixarias 70's, a pizza sem gás... À Ingrid Linck, grande amiga que fiz no NUPAC, e aos seus ouvidos, que escutaram reclamações, resmungos e gargalhadas durante todo o mestrado.

Ao Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, aos colegas, professores da pós-graduação, em particular ao Prof. Dr. Vitor Haertel, e amigos que fiz. Em especial, agradeço à Andréa Cury Marques, que, assim como a Ingrid, também conta com ouvidos ótimos!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado concedida.

Aos meus pais, Rosa e Oscar, por todo apoio, compreensão e estímulo, e a minha irmã, Rochele. Podem ter certeza de que vocês foram fundamentais na realização deste trabalho.

Aos meus amigos, que durante um tempo só receberam negativas e ausências minhas para as junções e comemorações. Pessoal da infância (Daiene, Dedé e companhia), da faculdade (Ramiro, Renata, Valtur, Raupp e assemelhados), povo da Geografia, da UFRGS, da vida.

A todos que torceram pela realização desta dissertação. E aos que se interessarem por este trabalho.

## 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, o *speckle* deve ser reduzido para que as imagens SAR possam ser utilizadas em algoritmos de correlação cruzada com o objetivo de extrair informações sobre a velocidade das geleiras. Para solucionar este problema, quatro formas de utilização de um filtro adaptativo (*i.e.*, filtro Lee) foram testadas para o 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 apresentam melhores resultados na extração de vetores de velocidade por algoritmos de correlação cruzada que as imagens originais. 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-Chave: dinâmica glacial, Sensoriamento Remoto por radar, Península Antártica.

## 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 velocity by image cross-correlations 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 to explain the data variability: number of looks and standard deviation of the scene. Results evaluation was carrying out comparing the velocity vectors resulting from original and filtered images with published data on the 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, Antarctic Peninsula.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfil transversal (1) e lateral (2) de duas componentes do deslizamento das geleiras _____	18
Figura 2.2 – Perfil lateral de uma geleira de vale _____	20
Figura 2.3 – Ilustração dos fluxos de extensão e compressão, causados pela aceleração e desaceleração _____	21
Figura 2.4 – Ilustração das tensões normais ( $\sigma_x$ e $\sigma_y$ ) e de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) gerando as tensões ( $\sigma_1$ e $\sigma_2$ ) _____	22
Figura 2.5 – Deslizamento por pressão de fusão e recongelamento _____	24
Figura 2.6 – Hidrologia da água em geleiras _____	26
Figura 2.7 – Ilustração tridimensional da drenagem supraglacial, englacial e subglacial _____	26
Figura 2.8 – Contribuição do deslizamento basal no deslocamento total da geleira _____	27
Figura 3.1 – Ilustração apresentando os principais elementos da geometria de aquisição de dados por radares de abertura sintética (SAR) _____	30
Figura 3.2 – Esquema apresentando as aberturas sintéticas em uma antena de radar _____	30
Figura 3.3 – Diferenças entre o plano de formação da imagem ( <i>slant-range</i> ) e o plano da superfície ( <i>ground-range</i> ) _____	31
Figura 3.4 – Localização das cenas _____	33
Figura 3.5 – Cenas ASAR utilizadas neste trabalho _____	35
Figura 3.6 – Fluxograma apresentando as filtragens utilizando parâmetros diferentes _____	41
Figura 3.7 – Visualização da área de estudo deste trabalho _____	42
Figura 3.8 – Análise do realce linear aplicado nos cortes _____	43
Figura 3.9 – Ilustração do pico de correlação entre as imagens _____	46
Figura 3.10 – Ilustração da superfície gerada pelos valores de correlação entre as janelas de referência e de busca _____	47
Figura 4.1 – Esquema apresentando as diferentes filtragens e os resultados obtidos a partir da imagem original _____	50
Figura 4.2 – Esquema apresentando o efeito dos filtros nas fendas das geleiras _____	51
Figura 4.3 – Visualização de todos os vetores gerados para a imagem original _____	57

Figura 4.4 – Visualização de todos os vetores gerados para as imagens Lee	57
Figura 4.5 – Vetores com <i>correlation strength</i> superior a 5, gerados a partir das imagens originais	58
Figura 4.6 – Vetores com <i>correlation strength</i> superior a 5, gerados a partir das imagens filtradas	59
Figura 4.7 – Imagem índice	60
Figura 4.8 – Comparativo entre vetores gerados por imagens originais e com uma filtragem Lee na geleira Dinsmoor	61
Figura 4.9 – Comparativo entre o desempenho das imagens originais (a) e das imagens Lee (b)	62
Figura 4.10 – Comparativo entre vetores gerados em fendas bem marcadas	63
Figura 4.11 – Comparativo entre os vetores com <i>threshold</i> 7, detectados na geleira Dinsmoor	63
Figura 4.12 – Visão geral da geleira Dinsmoor	64
Figura 4.13 – Padrão de fendas largas	65
Figura 4.14 – Área onde ocorrem fendas em seqüência	66
Figura 4.15 – Vetores gerados pelas imagens originais com limiar igual a 7	67
Figura 4.16 – Vetores gerados pelas imagens com uma filtragem e limiar igual a 7	67
Figura 4.17 – Máscara sobre as regiões que contém fendas aparentes	68
Figura 4.18 – Comparativo entre os vetores gerados pelas imagens originais e filtradas nas regiões de fendas	69
Figura 4.19 – Detalhe do canto superior da figura 4.18	70
Figura 4.20 – Comparativo entre os vetores gerados pelas imagens originais e pelas imagens Lee para fendas largas	71
Figura 4.21 – Detalhe da região das geleiras Dinsmoor, Bombardier e Edgeworth	73
Figura 4.22 – Vetores de deslocamento a serem comparados com dados glaciológicos publicados	76
Figura 4.23 – Vetores classificados por sua velocidade	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características das imagens Envisat ASAR_IMP_1P _____	32
Tabela 3.2 – Identificação das imagens utilizadas no presente trabalho _____	34
Tabela 3.3 – Parâmetros inseridos no filtro Lee em cada uma das filtragens realizadas _____	41
Tabela 3.4 – Exemplo do arquivo de saída do IMCORR, com dados calculados pelo algoritmo _____	46
Tabela 4.1 – Denominação das filtragens _____	52
Tabela 4.2 – Número de detecções obtidas pelo algoritmo de correlação cruzada em cada nível de processamento da imagem _____	53
Tabela 4.3 – Estatísticas gerais da imagem 2004 original e após as filtragens _____	54
Tabela 4.4 – Análise dos erros obtidos nos componentes X e Y dos vetores do <i>software</i> IMCORR, para cada nível de processamento das imagens _____	54
Tabela 4.5 – Número de deslocamentos detectados com erro superior a 1 pixel _____	55
Tabela 4.6 – Distâncias das áreas de concentração nas geleiras D-B-E à frente das geleiras em outubro de 2004 _____	75
Tabela 4.7 – Médias dos módulos dos vetores para cada região de concentração de deslocamentos detectados _____	75
Tabela 4.8 – Valores das velocidades das áreas em metros por dia _____	77

## SUMÁRIO

Capa	
Folha de Rosto	ii
Dedicatória	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Sumário	x
Capítulo 1: INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.2 Justificativa	14
Capítulo 2: DINÂMICA DAS GELEIRAS	16
2.1 Fluxo	17
2.1.1 Deformações Internas	19
2.1.1.1 Fendas	19
2.1.2 Deslizamento Basal	23
2.1.2.1 Lubrificação	25
2.1.3 Deformação de sedimentos subglaciais	28

Capítulo 3: MATERIAIS E MÉTODOS _____	29
3.1 Imagens SAR _____	29
3.1.1 Aquisição de imagem SAR _____	29
3.1.2. Imagens Envisat – ASAR Image Mode Precision _____	31
3.1.3. Pré-processamento e co-registro das imagens _____	33
3.2. Filtragem do Speckle _____	36
3.2.1 Filtro Lee _____	37
3.2.1.1 Parâmetros inseridos no filtro Lee _____	39
3.2.1.2. Filtragem das imagens _____	39
3.2.1.2.1. Seleção das áreas de análise _____	41
3.3. Extração de Parâmetros Dinâmicos das Geleiras _____	42
3.3.1. Algoritmo de Correlação Cruzada _____	43
Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	49
4.1. Análise visual das filtragens _____	49
4.2. Análise quantitativa dos deslocamentos obtidos _____	52
4.3. Análise da distribuição dos vetores e qualidade das informações _____	56
4.4. Análise glaciológica e veracidade dos dados _____	72
Capítulo 5: CONSIDERAÇÕES FINAIS _____	79
Referências Bibliográficas _____	82

## *Capítulo 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 & LIUBIN, 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 imagens orbitais são capazes de estimar o deslocamento das massas de gelo (*i.e.*, direção e velocidade de fluxo), sendo uma delas o *feature tracking* (MASSOM & LIUBIN, 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). Após abertas, as fendas seguirão com o fluxo, com comportamento de velocidade e deslocamento idênticos aos da geleira (MASSOM & LIUBIN, 2006).

O monitoramento das massas de gelo do planeta é de grande importância para a compreensão das conexões entre a variação da temperatura média do ar 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 (IPCC, 2007).

Não obstante, Scambos *et al.* (2004) e 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 Skvarca *et al.* (1998) essa temperatura na estação argentina Marambio (64°14'S e 56°37'W), localizada na ilha Seymour, a leste da ilha James Ross, entre 1970 e 1998, por duas vezes ultrapassou 0°C no verão.

Esse aumento na temperatura do ar coincide com a desintegração de plataformas de gelo e retração de geleiras na região. As imagens orbitais, em especial, colaboraram para a detecção da desintegração de plataformas de gelo e retração glacial, 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). Contudo, os estudos realizados nesta região utilizaram em sua maioria imagens óticas (RACK *et al.*, 1999; DE ANGELIS & SKVARCA, 2003) ou técnicas de interferometria por radar (ROTT *et al.*, 2002) na determinação das velocidades de fluxo das massas de gelo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a aplicação de um filtro adaptativo (*i.e.*, filtro Lee) para redução do *speckle* em imagens SAR a serem utilizadas na determinação da velocidade de fluxo de geleiras da Península Antártica, a partir da técnica de deslocamento de feições (*i.e.*, *feature tracking*).

Para que o objetivo principal seja alcançado, a análise comparativa entre imagens com e sem filtragem deve ser realizada, além da discussão dos resultados conforme as características glaciológicas da região estudada, avaliando a verossimilhança dos dados obtidos de forma remota e manipulados a partir de técnicas de processamento de imagens.

## 1.2 Justificativa

Desde o lançamento da missão Landsat, em 1972, informações a respeito da dinâmica glacial são extraídas periodicamente de dados obtidos por sensores orbitais. Além disso, os parâmetros orbitais do momento do imageamento e algumas feições imutáveis no intervalo de tempo entre as aquisições de imagens (*e.g.*, nunataks) facilitam o co-registro entre as imagens e a comparação dos deslocamentos relativos descritos por feições presentes na superfície das massas de gelo (MASSOM & LIUBIN, 2006).

As imagens óticas são largamente utilizadas para análises de dinâmica de geleiras. Além das imagens das plataformas Landsat (sensores MSS e TM), as imagens SPOT também foram grande fonte de informações da criosfera durante as décadas de 1980 e 1990. A partir de 1991, imagens de radares de abertura sintética (SAR), principalmente da plataforma ERS-1, passaram a contribuir com dados para pesquisas glaciológicas que utilizavam a técnica *feature tracking*. Já no final da década de 1990 e início dos anos 2000, a mescla de dados de diferentes sensores, sendo eles óticos ou de microondas, foi um importante salto nessa técnica (MASSOM & LIUBIN, 2006), uma vez que as imagens SAR são obtidas sob quaisquer condições climáticas e de iluminação solar.

Porém, o efeito multiplicativo e randômico do ruído *speckle* afeta os dados obtidos por radares de abertura sintética. Assim, para a identificação de feições homólogas em imagens de diferentes datas, é necessário o pré-processamento destes dados com a utilização de filtros que eliminem o ruído (*i.e.*, *speckle*), mas mantenham as bordas das feições, transformando a alta variabilidade existente nas imagens brutas em cenas com alvos melhor caracterizados, tanto visualmente quanto estatisticamente.

Feições presentes na superfície das geleiras como, por exemplo, fendas (seção 2.1.1.1) podem ser utilizadas para extrair informações sobre a direção e velocidade de fluxo dessas massas de gelo a partir de imagens orbitais. A técnica *feature tracking* (*i.e.*, detecção do deslocamento de feições, em tradução livre) determina a velocidade da superfície das geleiras pela detecção da mudança de posição de feições que se mantêm com a mesma forma no tempo e no espaço (*e.g.*, fendas) em imagens co-registradas e processadas em algoritmo de correlação cruzada (MASSOM & LIUBIN, 2006).

Para a utilização dessa técnica, as fendas devem manter as mesmas características em ambas as imagens. Porém, as imagens SAR têm seus alvos afetados randomicamente pelo *speckle*, fazendo com que as mesmas feições, ainda que mantenham a forma, sejam descaracterizadas estatisticamente e, por conseguinte, dificultem a detecção do deslocamento. Assim, minimizando o efeito do *speckle*, é possível melhorar a eficiência de algoritmos de *feature tracking* baseados na correlação cruzada.

## *Capítulo 2*

### **DINÂMICA DAS GELEIRAS**

---

Geleiras são massas de neve e gelo com diferentes graus de compactação, que se deslocam por ação da gravidade (HALL & MARTINEC, 1985). A primeira etapa na formação de uma geleira é a precipitação de neve (PATERSON, 1994) que durante o inverno deve ser em quantidade suficiente para que, mesmo após o derretimento do verão, continue acumulando (HAMBREY & ALEAN, 2004). Este processo será repetido por anos (HAMBREY & ALEAN, 2004) e, para que a geleira seja formada, um longo e complexo processo de metamorfismo da neve acumulada com conseqüente transformação em firn e posteriormente em gelo se desenvolverá (PATERSON, 1994).

Segundo Hall & Martinec (1985), neve é um agregado, permeável e poroso, de cristais de gelo. Esses agregados estão cheios de ar em seu interior (*i.e.*, cerca de 97% de seu volume), dando à neve uma densidade de  $100 \text{ kg m}^{-3}$  (BENNETT & GLASSER, 1996). Isto é válido para a neve fresca, ou seja, para os flocos que não sofreram compactação nem metamorfismo (HALL & MARTINEC, 1985). Resistindo aos efeitos do verão (*i.e.*, derretimento), a neve acumulada será transformada em firn (HALL & MARTINEC, 1985; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996). Esta transformação envolverá compactação do material, expulsão do ar e aumento das ligações entre os cristais de gelo (BENNETT & GLASSER, 1996), gerando estruturas policristalinas. Persistindo as condições para a compactação da neve ou firn, as passagens de ar existentes entre os cristais de gelo começarão a ser fechadas e o ar que não for expulso da estrutura formará bolhas (PATERSON, 1994). A compressão aumentará e o firn se transformará em gelo. O gelo de geleira possui densidade entre  $830$  e  $900 \text{ kg m}^{-3}$  (PATERSON, 1994). Esta diferença entre a densidade da neve e do gelo mostra a compactação que o material sofre. O tempo para a transformação da neve em gelo dependerá da temperatura, sendo o processo mais rápido em regiões temperadas (PATERSON, 1994; HAMBREY & ALEAN, 2004).

## 2.1 Fluxo

Uma massa de gelo policristalino será o resultado do processo de metamorfismo da neve. Este gelo sofrerá deformações internas causadas pela resposta dos cristais à gravidade (BENNETT & GLASSER, 1996), podendo fluir no caso de algumas condições discutidas abaixo serem preenchidas. O gelo policristalino possui fluxo particular, não seguindo o comportamento de materiais Newtonianos (*i.e.*, aqueles que possuem uma única viscosidade a uma determinada temperatura, independente da força de cisalhamento), nem de materiais idealmente plásticos (HAMBREY, 1994). Com a ação da gravidade sobre a massa de gelo, surge a tensão tangencial (ou de cisalhamento,  $\tau$ ), que relacionará o peso da massa de gelo e a declividade do terreno. Ou seja, a tensão de cisalhamento é o produto da densidade do gelo ( $\rho$ ), da gravidade ( $g$ ), da espessura da massa de gelo ( $h$ ) e da declividade do terreno ( $\alpha$ ), como mostra a equação 1 (BENNETT & GLASSER, 1996):

$$\tau = \rho g h \sin \alpha \quad (1)$$

O comportamento do fluxo do gelo policristalino é dado pela Lei de Glen, a qual apresenta o fluxo como resultado da interação da tensão de cisalhamento com duas constantes,  $A$  e  $n$ , como apresenta a equação 2 (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; HAMBREY & ALEAN, 2004):

$$\dot{\epsilon} = A \tau^n \quad (2)$$

Segundo Paterson (1994) e Hambrey (1994), a constante  $n$  foi obtida em laboratório e diferentes experimentos apresentaram resultados que variam de 1,5 a 4,2, sendo 3 (*i.e.*, a média dos experimentos) o valor utilizado para estudos glaciológicos. É importante ressaltar que o valor de  $n$  para o gelo policristalino mostra a particularidade no fluxo deste material, considerando que materiais viscosos possuem  $n = 1$  (HAMBREY, 1994).  $A$  é dependente da temperatura, do tamanho e da orientação dos

cristais de gelo, das impurezas e outros possíveis fatores como, por exemplo, a pressão, a densidade, e a quantidade de água (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994). Assim, pode-se concluir que o valor de  $A$  varia de acordo com a geleira em estudo.

A tensão de cisalhamento, como dito acima, surge da ação da gravidade sobre a massa de gelo e da existência de declividade no terreno, pois em superfície totalmente plana, não há tensão e, conseqüentemente, não existirá fluxo. Havendo declividade, ou seja, havendo tensão tangencial, o gelo poderá fluir de três formas: (i) por deformação interna, (ii) por deslizamento basal ou (iii) por deformação de sedimentos subglaciais (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996). Deformação interna ocorre em todas as massas de gelo, já o deslizamento basal ocorre somente nas geleiras cuja interface gelo-rocha estão no ponto de fusão ou sob pressão, como pode ser visto na figura 2.1, enquanto a deformação de sedimentos subglaciais é importante apenas em algumas circunstâncias, como no caso de sedimentos saturados com água e sob uma pressão próxima à exercida pelo gelo (PATERSON, 1994). O resultado deste conjunto de componentes de deslocamento dará o padrão de distribuição da velocidade na geleira (HAMBREY, 1994).

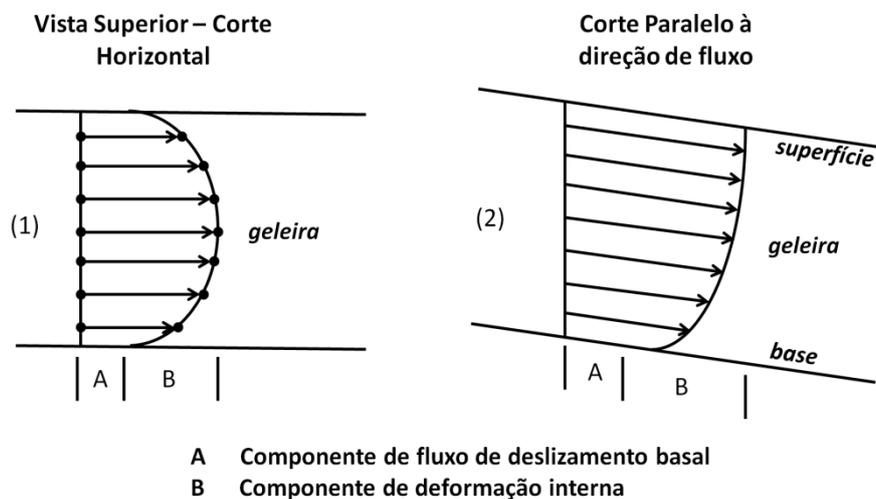


Figura 2.1 – Perfil transversal (1) e lateral (2) de duas componentes de deslocamento das geleiras. Na vista superior pode-se notar o efeito causado pelo atrito existente entre as paredes laterais da geleira com o gelo e, na vista lateral, o atrito entre a base e o gelo. Por esses efeitos, há a geração de uma força não uniforme para os pontos localizados sobre uma mesma seção (transversal ou vertical) da geleira. Adaptado de Hambrey (1994).

### **2.1.1 Deformação Interna**

Além do discutido acima, outros componentes estão presentes na variação longitudinal da velocidade em uma geleira, gerando duas possibilidades de fluxo: (i) fluxo de extensão e (ii) fluxo de compressão (HAMBREY, 1994).

A diferença entre os fluxos (de extensão ou de compressão) é dada pela tensão normal, se positiva ou negativa. Essa tensão será afetada pelo desequilíbrio entre a acumulação e a ablação. Além disso, a declividade do terreno terá grande importância na determinação do fluxo. À montante de grandes declividades, a gravidade aliada à massa de gelo fará com que haja um estiramento no gelo, caracterizando o fluxo de extensão (PATERSON, 1994). Contudo, à jusante, uma compressão ocorrerá, pois a declividade diminuirá e o fluxo será desacelerado. Não obstante, em ondulações existentes na base da geleira ocorrerá a mesma situação citada anteriormente, como pode ser visto na figura 2.2.

Quando, em um vale, as paredes laterais da geleira convergem à jusante, uma compressão longitudinal ocorre, sendo compensada por uma extensão no fluxo. De forma análoga, a ampliação de um vale causa um fluxo de compressão (PATERSON, 1994).

#### ***2.1.1.1 Fendas***

Fendas são fraturas no gelo, causadas por tensões internas nos primeiros 40 a 60 m de profundidade, onde o gelo tem comportamento elástico (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994). Elas são geradas com a mesma direção da tensão máxima existente, a menos que o gelo não seja homogêneo, ou seja, quando a estrutura dos cristais não forem iguais (HAMBREY, 1994). A mescla entre gelo e outros materiais, como no caso das geleiras de rocha, também fará com que as tensões, por si só, não sejam determinantes na direção da abertura das fendas.

O padrão dessas fraturas, como dito na seção anterior, está diretamente ligado ao tipo de fluxo (BENNETT & GLASSER, 1996), ou seja, da direção da tensão principal (PATERSON, 1994). A figura 2.3 mostra, em um esquema simples, as áreas de aceleração e desaceleração do fluxo das geleiras e as fendas características de cada área. É essa aceleração ou desaceleração que dará a intensidade no rompimento do gelo, com sentido e direção da componente de maior módulo. A intensidade desta força será capaz de abrir fendas, em geleiras antárticas, com até 100 km de comprimento e com largura suficiente para caber veículos de neve (HAMBREY, 1994).

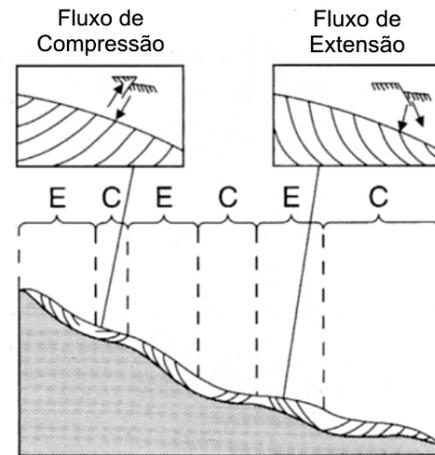


Figura 2.2 – Perfil lateral de uma geleira de vale. As letras E e C indicam respectivamente as seções de fluxo de extensão e compressão. Adaptado de Bennett & Glasser (1996).

Para compreender melhor o sistema de forças aplicadas à massa de gelo, Paterson (1994) propõe um sistema cartesiano, onde  $x$  coincide com a direção do fluxo central da geleira,  $y$  é perpendicular a  $x$  e está no mesmo plano da superfície da geleira e  $z$  é ortogonal a  $x$  e  $y$  e normal à superfície. Como tensões normais têm-se  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ , que vão descrever respectivamente as forças de aceleração, de desaceleração e da gravidade. E como tensões de cisalhamento  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$  e  $\tau_{yz}$ , indicando a influência das paredes laterais do vale na geleira. Contudo, as tensões de cisalhamento ocorrerão apenas na superfície  $xy$ , sendo  $\tau_{xz}$  e  $\tau_{yz}$  iguais a zero.

A relação entre estas forças é dada pela equação 3:

$$\sigma^2 - (\sigma_x + \sigma_y)\sigma + (\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2) = 0 \quad (3)$$

onde

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_2 \sin^2 \theta \quad (4)$$

sendo  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  as tensões principais, relacionadas aos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente, e rotacionados a um ângulo  $\theta$ , da direção do fluxo central da geleira. Na figura 2.4 é

possível compreender a influência das forças na formação dos padrões apresentados na figura 2.3.

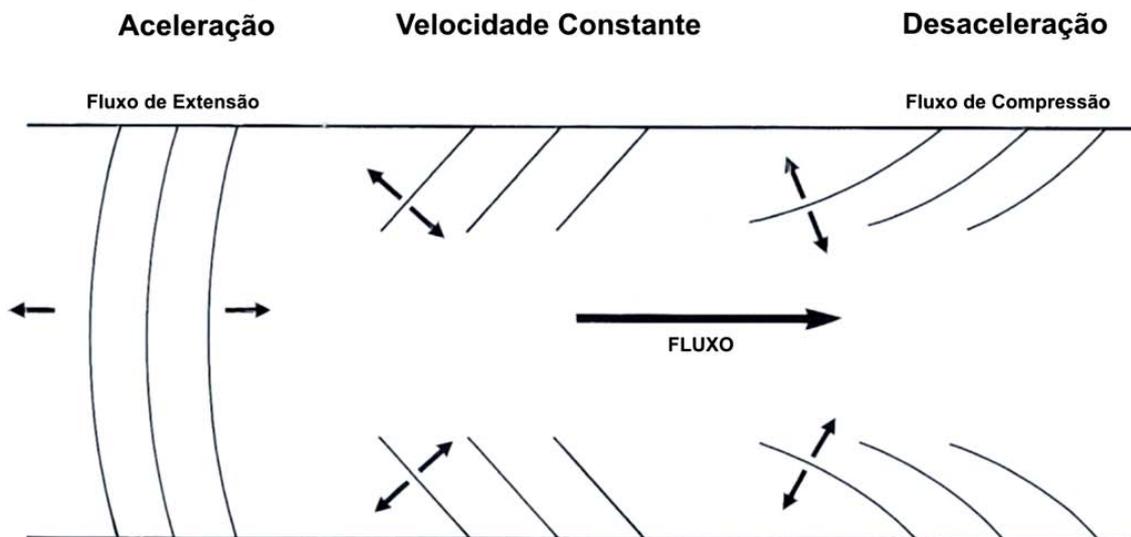


Figura 2.3 – Ilustração dos fluxos de extensão e compressão, causados pela aceleração e desaceleração. As setas pequenas indicam os padrões característicos de rompimento da geleira. Adaptado de Hambrey (1994).

Na figura 2.4a, a velocidade é constante, não existindo tensões normais, apenas a tensão de cisalhamento. Desta forma, a tendência de giro dos eixos é de 45° em sentido horário. A tensão  $\tau_{xy}$  tende a zero em direção ao centro da geleira, sendo determinante apenas nas proximidades das laterais. Como a velocidade é constante, não há força no centro e, por conseguinte, não haverá formação de fendas nesse local. As tensões de rompimento são geradas em  $\sigma_1$  e resultarão em fraturas perpendiculares a esta tensão. No caso de fluxo de extensão, ilustrado na figura 2.4b, a aceleração gera tensões normais saindo da massa de gelo. A tensão de cisalhamento é nula no centro da geleira, onde será dominante a tensão  $\sigma_x$  ocorrendo paralelamente ao fluxo da geleira, gerando fraturas alinhadas com a direção y. Nas bordas haverá a influência de  $\tau_{xy}$ . Contudo, a aceleração da geleira fará com que a rotação do eixo das tensões principais seja menor que 45°. Já o fluxo de compressão contará com  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  entrando na geleira, como pode ser visto na figura 2.4c. A tensão de cisalhamento tende a zero na direção do centro da geleira, sendo responsável pelas fendas apenas nas bordas da geleira, onde causará uma rotação no eixo das tensões principais superior a 45°.

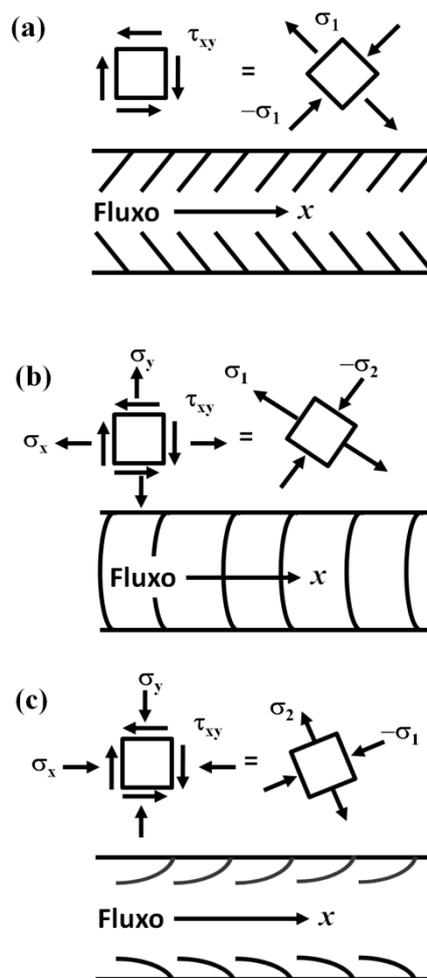


Figura 2.4 – Ilustração das tensões normais ( $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ ) e de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) gerando as tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ). A rotação dos eixos das tensões principais, em relação aos eixos  $x$  e  $y$  originais, dependerá do tipo de fluxo existente, se de velocidade constante (a), de aceleração (b) ou de desaceleração (c). Os diagramas de forças (cubos com vetores das tensões normais e de cisalhamento) são referentes às bordas da geleira, sendo o centro da geleira uma região com ausência de tensões. Adaptado de Paterson (1994).

Estruturas em grande escala nas geleiras, como é o caso das fendas, depois de serem geradas, seguem com o fluxo da geleira, podendo ser usadas como feição para observação de deslocamento da massa de gelo, seja por formulações matemáticas (*e.g.*, modelagem das tensões causadoras das fendas) (PATERSON, 1994), ou por observações provenientes de Sensoriamento Remoto (BINDSCHADLER & SCAMBOS, 1991; SCAMBOS *et al.*, 1992; FERRIGNO *et al.*, 1993; LUCCHITTA *et*

*al.*, 1993; LUCCHITTA *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).

### **2.1.2 Deslizamento Basal**

Apesar de todas as geleiras, quentes ou frias, serem afetadas pela deformação interna, nem todas possuem deslizamento basal (HAMBREY, 1994). O deslizamento basal ocorre entre a geleira e sua base (BENN & EVANS, 1998), e é observado apenas onde o gelo basal está em ponto de fusão sob pressão (PATERSON, 1994). As geleiras de vale, por exemplo, com maior deslocamento, têm no deslizamento basal o maior componente de suas velocidades (HAMBREY, 1994). E este aumento se deve, nas geleiras temperadas, pela percolação de água da chuva e de derretimento superficial, que atuam lubrificando a base das geleiras (HAMBREY, 1994). Essa teoria é confirmada pelo aumento da velocidade das geleiras no período do verão (PATERSON, 1994).

Há inúmeros fatores que contribuem com o deslizamento basal (BENN & EVANS, 1998). Contudo, os processos basais estão longe de ter seus mecanismos completamente conhecidos (HAMBREY, 1994). Apesar disso, três processos existentes na base das geleiras já foram reconhecidos: (i) intensificação do deslizamento basal, (ii) pressão de fusão e recongelamento e (iii) deslizamento sobre lâmina d'água (HAMBREY, 1994).

A intensificação do deslizamento basal é um mecanismo de deslizamento na vizinhança de um obstáculo (BENN & EVANS, 1998). A superfície sob a geleira não é plana, contendo irregularidades (BENNETT & GLASSER, 1996). Ao encontrar um obstáculo, a pressão aumenta na direção contrária à do fluxo, aumentando a deformação do gelo nesta região e fazendo com que o fluxo do gelo seja maior ao redor do obstáculo (BENNETT & GLASSER, 1996). Este processo determinará qual a direção em que os sedimentos serão transportados pela geleira, pois o gelo fluirá ao redor do obstáculo

(HAMBREY, 1994), e será mais intenso quanto maiores forem os sedimentos (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998).

Ao encontrar blocos ou matacões na base, o gelo sofrerá uma pressão no sentido contrário ao do fluxo (HAMBREY, 1994; BENN & EVANS, 1998), assim como no caso da intensificação do deslizamento. Ao deslizar por uma superfície bastante rugosa, há um derretimento na face à montante e um recongelamento na face à jusante (BENN & EVANS, 1998), levando em consideração a direção do fluxo. Isso ocorre pela resistência que o obstáculo exerce sobre o movimento da geleira, causando um aumento de pressão e uma diminuição do ponto de fusão (PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998). Com base lubrificada, a geleira fluirá mais rapidamente, levando parte do gelo derretido na direção do fluxo (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998). Essa água, ao chegar ao lado de menor pressão, congelará novamente, pois com o alívio de pressão, maior será o ponto de fusão (PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998). Todo este processo caracteriza o deslizamento por pressão de fusão e recongelamento (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998), também descrito por Paterson (1994) e Benn & Evans (1998) como Teoria de Deslizamento de Weertman. Esta dinâmica pode ser melhor compreendida pela figura 2.5, e é possível para obstáculos menores que 1 m, pois quanto mais longos forem os blocos, menor será o poder de passagem do fluxo de calor (PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998).

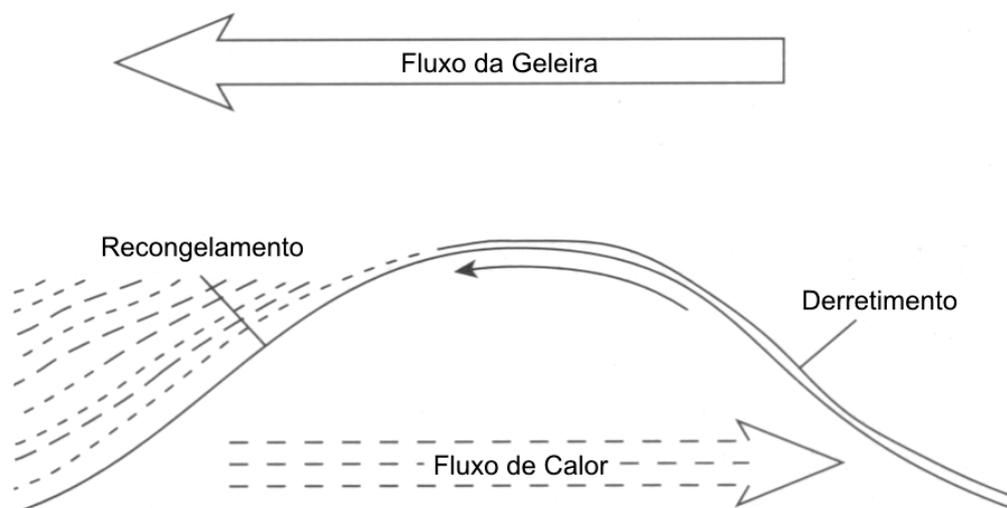


Figura 2.5 – Deslizamento por pressão de fusão e recongelamento. Adaptado de Benn & Evans (1998).

Para compreender melhor o deslizamento sobre lâmina d'água é necessário compreender os mecanismos de lubrificação da base das geleiras, a ser tratada na próxima seção.

### **2.1.2.1 Lubrificação**

O movimento das geleiras depende da pressão e da distribuição de água na base, assim como outros mecanismos de fluxo, como o deslizamento basal (BENN & EVANS, 1998). A água líquida contribui com a erosão glacial, transporte de sedimentos e deposição, sendo agente direto ou associado ao gelo (BENN & EVANS, 1998), contribuindo para a diminuição da rugosidade da superfície basal, o que resulta no aumento da velocidade de deslizamento (PATERSON, 1994). Esta água é proveniente principalmente do derretimento de gelo e/ou neve, e da precipitação líquida (*i.e.*, chuva) (BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998). Além dessas formas de surgimento de água líquida na geleira, a água que penetra nas geleiras, por canais ou fendas, pode também resultar do orvalho, no caso de geleiras quentes, de deformações ou deslizamentos, de calor geotermal, e da pressão no gelo causado por sedimentos (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998), como já visto na seção 2.1.2. A superfície de água líquida sobre as geleiras varia de acordo com a época do ano, dependendo do balanço energético local (HAMBREY, 1994; BENN & EVANS, 1998). Contudo, a quantidade de água existente na base da geleira tende a ser mais estável que a quantidade presente na superfície da geleira (BENN & EVANS, 1998). O armazenamento e a drenagem nas geleiras, bem como suas interações, podem ser compreendidas através do fluxograma da figura 2.6.

O armazenamento da água, em uma geleira, poderá ocorrer na forma líquida ou sólida. Neve e gelo são as formas sólidas. E, apesar de parecer apenas uma massa de gelo, a geleira pode possuir, em sua estrutura, lâminas d'água, lagos e canais, onde água líquida poderá estar armazenada. Podendo também estar presente na base e em cavidades causadas por erosão. Já a drenagem pode ocorrer em três níveis: supraglacial, englacial e subglacial, ou seja, sobre, dentro ou na base da geleira, respectivamente. Na

figura 2.7 é possível visualizar os canais e estruturas responsáveis pela drenagem da água líquida para a área proglacial ou frente da geleira.

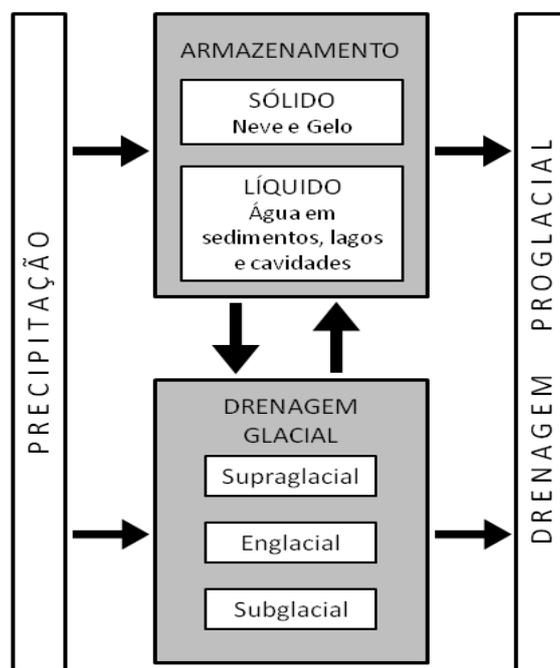


Figura 2.6 – Hidrologia da água em geleiras. Baseado em Benn & Evans (1998).

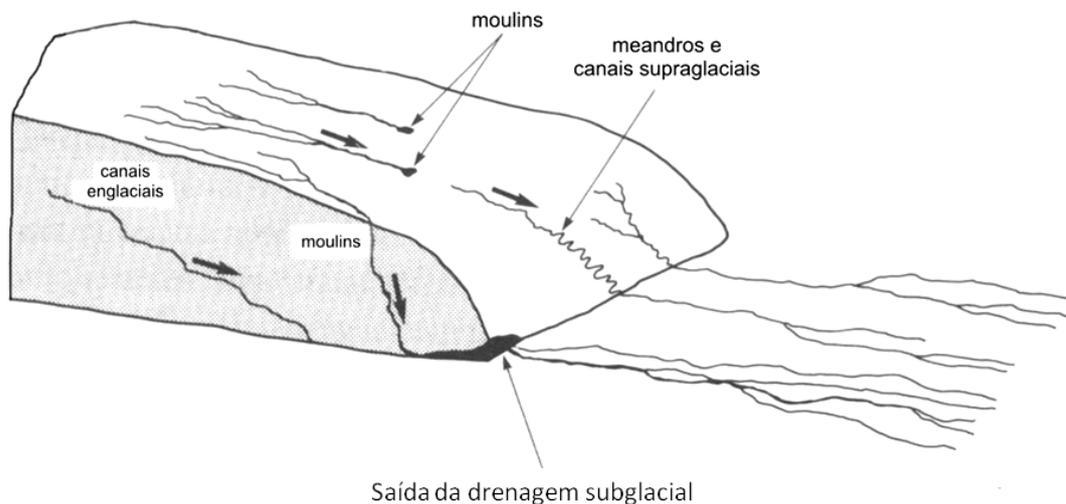


Figura 2.7 – Ilustração tridimensional da drenagem supraglacial, englacial e subglacial. Adaptado de Hambrey (1994).

Para que a lâmina d'água se forme na base da geleira e intensifique o deslizamento, a água líquida deve ser formada na própria base ou atravessar a massa de

gelo até chegar à base (BENN & EVANS, 1998). Segundo Paterson (1994), grande parte de água líquida proveniente da superfície da geleira chega à base tanto de geleiras quentes, como de geleiras frias. Como visto acima, a pressão no gelo e o calor geotermal também são mecanismos de derretimento de gelo. Além disso, esses mecanismos ocorrem nos primeiros metros da geleira, contribuindo com água líquida para drenagem subglacial. As deformações internas derretem o gelo compreendido entre a base e a superfície da geleira (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998). A água desse tipo de derretimento pode ser armazenada em lagos englaciais, ou seja, em estrutura inserida na massa de gelo, entre lâminas de gelo, ou pode escoar por canais englaciais e fendas até chegar à base (BENN & EVANS, 1998). Há, também, o derretimento da neve e do gelo superficiais. Neste caso, a água que está inicialmente na drenagem supraglacial, permeia a geleira através de canais verticais, denominados *moulins*, ou de fendas, até chegar à drenagem subglacial (BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998).

Paterson (1994) argumenta que a velocidade de deslizamento está diretamente ligada à quantidade de água existente na base da geleira. Na figura 2.8 é apresentada uma geleira e as componentes de seu fluxo. O deslocamento da linha ab para a posição cd é determinado pelo deslizamento basal, o qual é maior em geleiras com uma lâmina d'água em sua base.

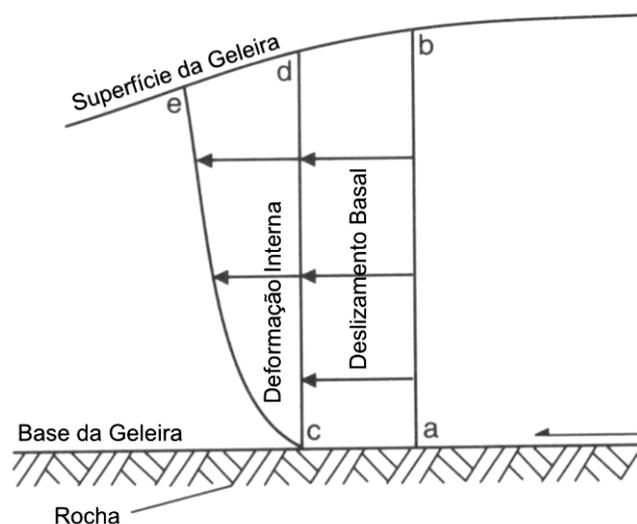


Figura 2.8 – Contribuição do deslizamento basal no deslocamento total da geleira. Adaptado de Bennet & Glasser (1996).

### 2.1.3 Deformação de sedimentos subglaciais

Ao fluir sobre sedimentos que não estão congelados, o peso da massa de gelo causará deformações na superfície (BENNETT & GLASSER, 1996). De forma geral, imagina-se que a geleira desloca-se sempre sobre rochas, o que é contraposto pelos depósitos glaciais (*i.e.*, *till*) aparentes após a retração das geleiras (PATERSON, 1994). Paterson (1994) apresenta estudos que mostram que grande parte da movimentação de geleiras na Antártica e Groenlândia não são determinadas pelas tensões de cisalhamento, e sim pela movimentação dos sedimentos subglaciais, visto que outros mecanismos não explicam as velocidades observadas para essas geleiras (BENN & EVANS, 1998).

As deformações do subsolo glacial são provocadas pela água proveniente dos *moulins*, umedecendo a base e penetrando pelo sedimento (BENN & EVANS, 1998). A aleatoriedade na quantidade de água que chega à base altera a pressão nos poros dos sedimentos, modificando constantemente as feições geradas em questão de horas.

## Capítulo 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

#### 3.1 Imagens SAR

A utilização de dados adquiridos por sensores de microondas apresenta bons resultados em estudos de variações nas diferentes zonas superficiais de neve e gelo. Cada tipo de superfície (*e.g.*, neve seca, neve úmida, gelo exposto, zona de percolação, entre outros) responde de forma diferente aos comprimentos de onda utilizados no imageamento por radares de abertura sintética (SAR). A influência da quantidade de água líquida, da densidade do gelo, da granulação, da estratigrafia e da rugosidade da superfície incidirá nos valores de retroespalhamento registrados pelo sensor (ARIGONY-NETO, 2007). Assim, como resultado, tem-se intervalos distintos para cada zona, facilitando a classificação dessas regiões.

Além disso, para estudos glaciológicos na Antártica, as imagens SAR são valiosas ferramentas de análise. Na Península Antártica, em particular, a aquisição de imagens de Sensoriamento Remoto nos comprimentos de onda referentes ao visível e infravermelho é dificultada pela constante cobertura de nuvens (HIRANO *et al.*, 2003; JAÑA, 2006). Dessa forma, radares de abertura sintética surgem como grande alternativa para obtenção de dados dessa região, com qualquer condição atmosférica (LILLESAND *et al.*, 2004). E os dados adquiridos pela plataforma Envisat, em especial de seu sensor ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), contemplam todas as características necessárias citadas anteriormente.

##### 3.1.1 Aquisição de imagem SAR

A visada de sensores SAR é lateral (figura 3.1), causando efeitos de perspectiva em terrenos rugosos ou com construções, como *foreshortening*, *layover* e sombra (HENDERSON & LEWIS, 1998; LILLESAND *et al.*, 2004). A particularidade desse sistema está na

utilização de uma pequena antena com várias aberturas para obter imagens com resolução espacial constante na direção do azimute do imageamento, como mostra a figura 3.1. Esta antena é emissora e receptora do sinal de microondas.

As aberturas sintéticas (figura 3.2) serão responsáveis pela aquisição dos *looks*. Um *look* é um pedaço da cena tomado por um par de aberturas sintéticas, sendo a cena final composta pela média da incoerência. A obtenção da incoerência é dada pela possibilidade de registrar o retorno incoerente de um feixe coerente emitido. Assim, utilizando a técnica dos *looks*, é possível calcular uma média para o padrão de interferência daquela superfície e, desta forma, corrigi-la. Isto melhora, além da interferência proveniente da interação dos feixes de microondas com os alvos, o *speckle* (ver seção 3.2), a resolução espacial (HENDERSON & LEWIS, 1998). O comprimento da antena e a quantidade de aberturas são determinantes na resolução espacial do sensor no sentido do azimute. No sentido do imageamento (*i.e.*, direção transversal), a resolução espacial estará diretamente ligada ao pulso enviado pelo sensor (HENDERSON & LEWIS, 1998; LILLESAND *et al.*, 2004).

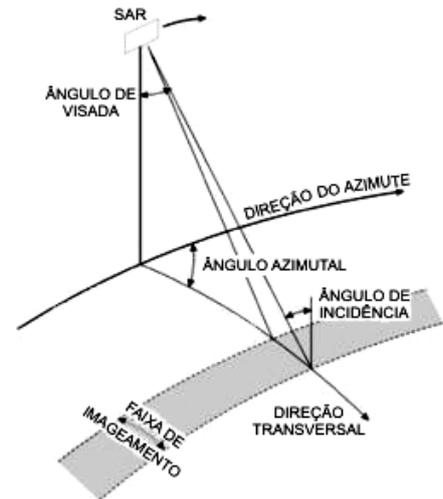


Figura 3.1 – Ilustração apresentando os principais elementos da geometria de aquisição de dados por radares de abertura sintética (SAR). A direção de imageamento, o ângulo de visada, a faixa de imageamento, entre outros, são graficamente apresentados. Adaptado de Henderson & Lewis (1998).

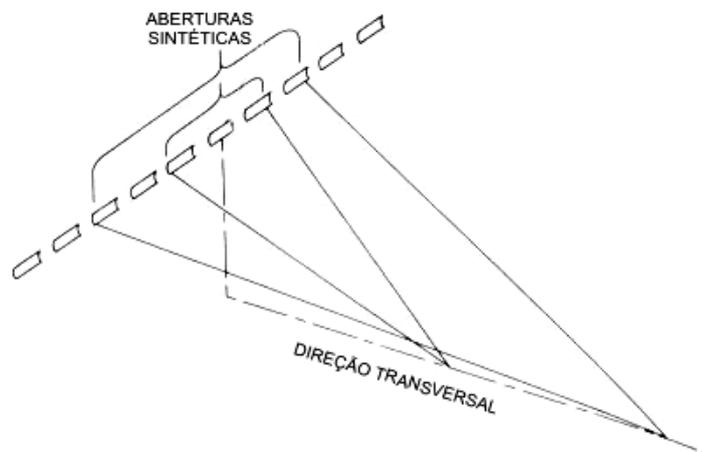


Figura 3.2 – Esquema apresentando as aberturas sintéticas em uma antena de radar. A emissão e a recepção dos sinais se dá utilizando pares de aberturas, simetricamente distantes do centro, onde o efeito Doppler será zero. Adaptado de Lillesand *et al.* (2004).

A visada lateral também provocará uma alteração nas dimensões dos alvos, pois o que será analisado na imagem, cuja perspectiva está apresentada na figura 3.3 e representada pelo *slant-range*, não será idêntico ao encontrado na superfície, *ground-range* (HENDERSON & LEWIS, 1998; LILLESAND *et al.*, 2004). Apesar de possuírem esse efeito de perspectiva, devido à visada lateral, as imagens de radares ativos, como é o caso dos sensores SAR, não são afetadas por outros efeitos perspectivos, como a inclinação solar. Por serem formadas pela radiação emitida pelo próprio sensor, as imagens SAR podem ser utilizadas em análises multitemporais, sem restrição de datas de mesma incidência de radiação para comparação de formas. Neste trabalho, os padrões superficiais das geleiras devem ser o mais idêntico possível em imagens de diferentes datas. No caso da utilização de sensores óticos, somente imagens de um mesmo período do ano poderiam ser comparadas entre si, pois a inclinação solar alteraria o padrão de iluminação e sombras das formas (ROLSTAD, 1997), dificultando a identificação automática.

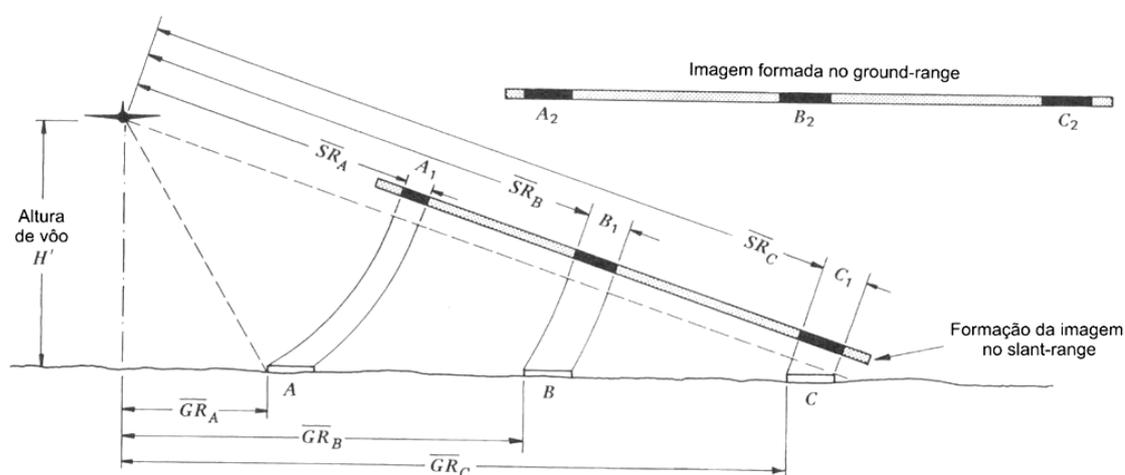


Figura 3.3 – Diferenças entre o plano de formação da imagem (*slant-range*) e o plano da superfície (*ground-range*). As mesmas distâncias na superfície, A, B e C, são representadas na imagem por segmentos de diferentes tamanhos. Quanto mais distantes da plataforma, maior é a diferença entre a distância real e a distância na imagem. Adaptado de Lillesand *et al.* (2004).

### 3.1.2. Imagens Envisat – ASAR Image Mode Precision

Lançado em março de 2002, pela Agência Espacial Européia, o satélite Envisat obtém informações da atmosfera, dos oceanos, da terra e do gelo. Este satélite foi desenvolvido para dar seqüência ao imageamento já realizado pela missão ERS e apoiar as pesquisas envolvendo mudanças climáticas (EUROPA, 2009).

O Envisat é uma plataforma orbital que possui 10 sensores diferentes, entre radiômetros, radar de abertura sintética, radar altímetro, espectrômetros e sistema de posicionamento (EUROPA, 2009b). Muitos dos sensores a bordo do Envisat são idênticos aos sensores da missão ERS, visando complementar os dados adquiridos pelos satélites ERS-1 e ERS-2, formando um importante acervo de informações de observação da Terra para estudos ambientais (EUROPA, 2009).

Um dos sensores do Envisat é o ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), um radar de abertura sintética que opera na banda C e imageia todo o globo. O sensor ASAR foi desenvolvido para dar continuidade ao imageamento realizado pelo sensor AMI da missão ERS (EUROPA, 2009b). Além disso, as imagens PRI (*Precision Image*), geradas pelos dados obtidos pelo sensor AMI, possuem produtos semelhantes aos gerados pelos dados do ASAR, denominados *ASAR Image Mode Precision Image* (ASAR\_IMP\_1P).

As imagens ASAR\_IMP\_1P são imagens *multi-look* e em *ground range*, geradas a partir de imageamento em 7 possíveis larguras de faixa e em duas possíveis polarizações: HH ou VV. Neste nível de processamento, as imagens são calibradas e corrigidas pelo padrão da antena. Porém, não há remoção das distorções causadas pelo relevo nem correção de efeitos radiométricos causados pelo terreno (EUROPA, 2009c). Para gerar as imagens ASAR\_IMP\_1P, pelo menos 3 *looks* são utilizados, visando a necessidade de calibração das imagens caso seja necessário (MEADOWS & WRIGHT, 2009). Além disso, imagens *multi-look* são ideais para a minimização dos efeitos do *speckle*, como visto na seção anterior. Reconstruída a imagem, o sistema automático de controle de qualidade analisa o deslocamento, ou possíveis faltas de correspondência na manipulação dos produtos pelos usuários (EUROPA, 2009c). A tabela 3.1 apresenta as principais características dos produtos Envisat ASAR PRI.

Tabela 3.1 - Características das imagens Envisat ASAR\_IMP\_1P.

<b>Tamanho do pixel</b>	12,5 m na direção do azimute e 12,5 m na direção <i>across-track</i> (resolução efetiva de 30 m)
<b>Área da cena</b>	De 56 a 100 km no <i>across-track</i> e 100 km na direção do azimute
<b>Número de <i>looks</i></b>	No mínimo 3

As imagens utilizadas neste trabalho consistem de duas cenas ASAR\_IMP\_1P com polarização HH e geradas por 4 *looks*. A localização geográfica da região imageada é ilustrada na figura 3.4.

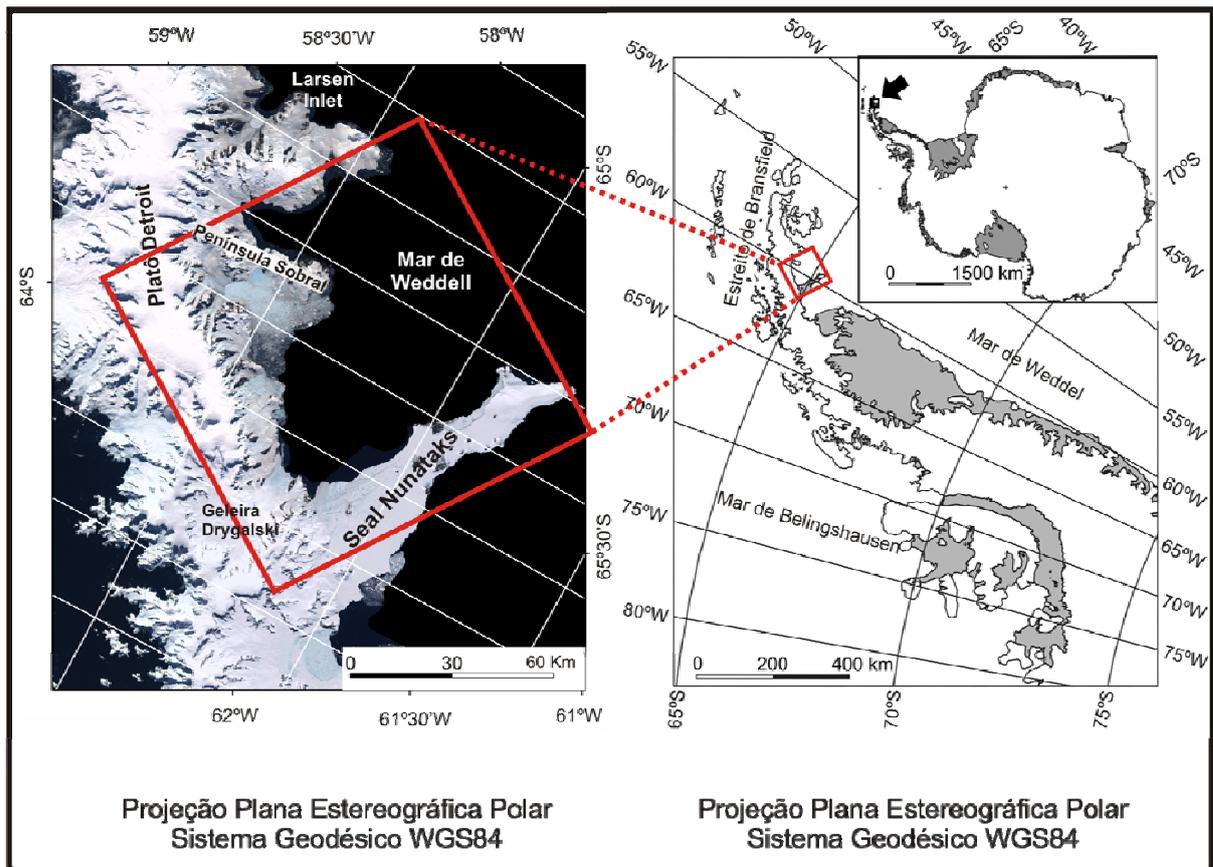


Figura 3.4 – Localização das cenas. No detalhe à direita, o quadro situado na porção norte da Península Antártica é ampliado na janela à esquerda. O quadro sólido apresenta a área compreendida pelo imageamento de ambas as cenas.

### 3.1.3. Pré-processamento e co-registro das imagens

As imagens ASAR\_IMP\_1P utilizadas neste trabalho (tabela 3.2) foram calibradas com a utilização do *software* BEST 4.2.0 da ESA. O BEST é um conjunto de ferramentas desenvolvidas para facilitar o uso das imagens SAR provenientes de sensores dessa agência (EUROPA, 2006).

As imagens 2004 e 2005 são apresentadas na figura 3.5, juntamente com a indicação das principais feições da região.

Ainda brutas, as imagens passaram pela extração de parâmetros de imageamento. Estes parâmetros descrevem toda a aquisição, transmissão e armazenamento dos dados. Além disso, azimute, semi-eixos maior e menor do elipsóide de referência, entre outros, são obtidos

nesta etapa. A partir destes parâmetros, a informação de cada pixel é corrigida. Contudo, a geometria da imagem é mantida, não sendo alterada sua resolução espacial.

Para a utilização de imagens em algoritmos de correlação cruzada, buscando estimativas para a velocidade de fluxo das geleiras, as mesmas devem estar registradas a uma origem comum. Dessa forma, todas as imagens foram registradas de acordo com o sistema de coordenadas linha x coluna da imagem 2004 (detalhada na tabela 3.2). Esta etapa também foi realizada com o BEST 4.2.0.

O co-registro no BEST é realizado em duas etapas. Primeiramente, os parâmetros de órbita são utilizados para um registro inicial das imagens. Num segundo momento, um refinamento deste pré-registro é feito a partir de um algoritmo de correlação cruzada. Pontos de controle são buscados automaticamente na imagem de referência por janelas de convolução, com tamanho definido pelo usuário. Após a determinação dos pontos de controle, a correlação cruzada determina as diferenças posicionais entre os pontos na imagem base e na imagem a ser registrada (EUROPA, 2006).

Tabela 3.2 - Identificação das imagens utilizadas nesta dissertação. Na primeira coluna pode-se encontrar a nomenclatura utilizada neste trabalho como referência para cada imagem a partir deste ponto do texto, para facilitar a compreensão temporal dos procedimentos e resultados.

Nomenclatura	Plataforma	Sensor	Data de Aquisição	Track	Frame	Órbita
2004	Envisat	ASAR	15/10/2004	152	440	Descendente
2005	Envisat	ASAR	17/06/2005	152	424	Descendente

Em estudos da dinâmica do ambiente antártico, onde se faz necessário o uso de imagens multitemporais, o registro pela correlação cruzada é de extrema necessidade. Levando-se em consideração que áreas livres de neve e gelo são poucas e que nem sempre as imagens contam com rochas expostas para identificação de pontos de controle, o algoritmo é capaz de identificar ondulações e outras feições homólogas existentes nas imagens (BINSCHADLER & SCAMBOS, 1991; SCAMBOS *et al.*, 1992; LUCCHITA *et al.*, 1995; BINDSCHADLER *et al.*, 1996). O erro médio quadrático (RMS) do co-registro foi de 0,4 pixel. Valor esse aceitável para os objetivos do trabalho. Dessa forma, foram aprovados os resultados e as imagens registradas foram utilizadas nas demais etapas do trabalho.

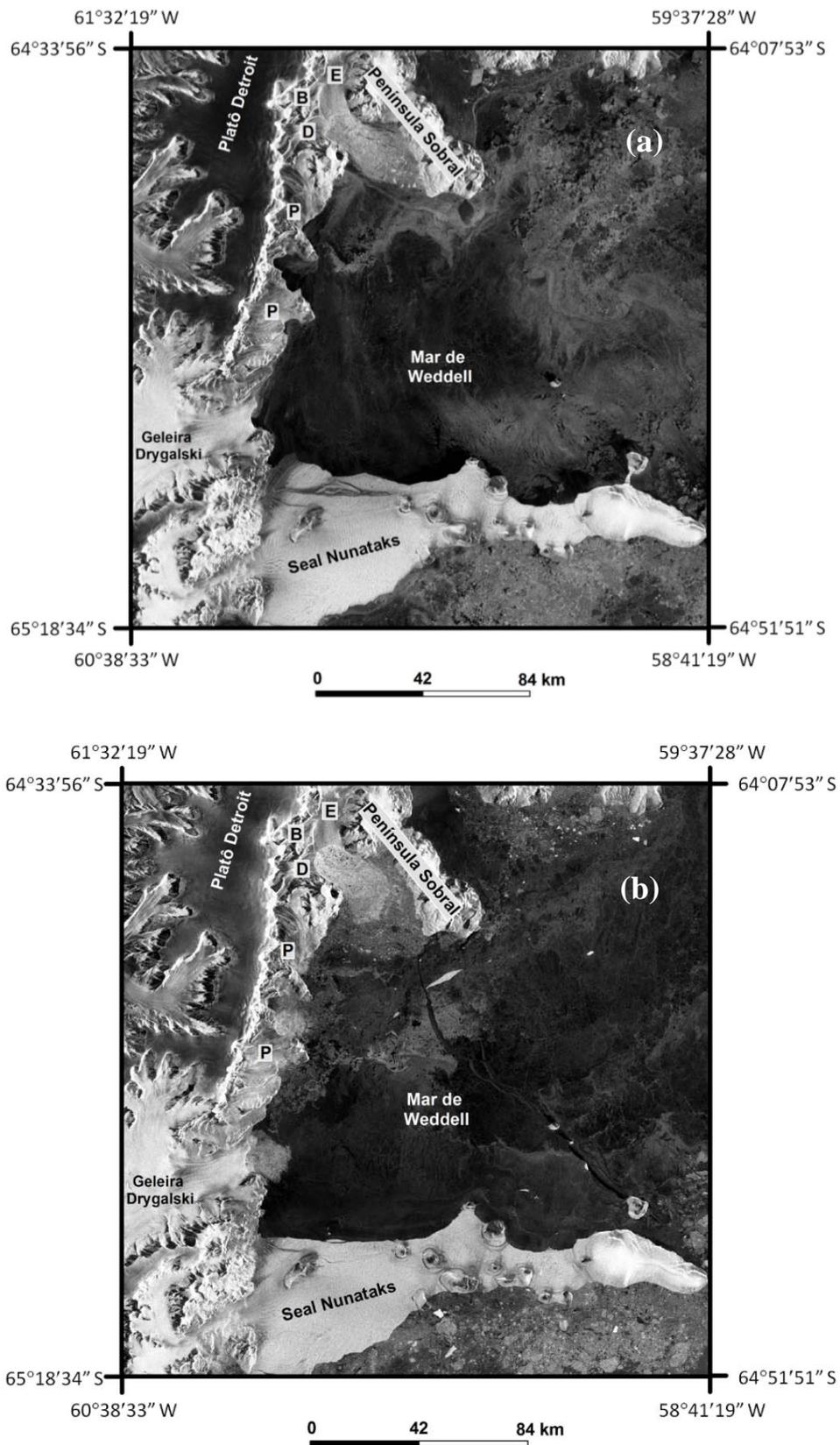


Figura 3.5 - Cenas ASAR utilizadas neste trabalho. Em (a) é apresentada a imagem 2004 e, em (b), a 2005. As principais feições da região estão indicadas. A letra D indica a geleira Dinsmoor, assim como B indica a geleira Bombardier e E a Edgeworth. Os locais com P são remanescentes da plataforma Larsen A.

### 3.2. 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). Estes feixes poderão interferir, de acordo com sua direção de reflexão, em outros feixes, causando interferência construtiva 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 (LILLESAND *et al.*, 2004). Em outras palavras, a resolução do sensor é insuficiente para resolver espalhamentos individuais (MASSOM & LUBIN, 2006). A este efeito dá-se o nome de *speckle* (LILLESAND *et al.*, 2004). Em imagens SAR, este efeito é um ruído multiplicativo nos dados (DONG *et al.*, 2001), sendo proporcional à intensidade do sinal recebido. Como consequência desse efeito serão afetadas, tanto a análise visual da região imageada, como a extração de feições, a classificação e as medidas baseadas na intensidade do sinal do radar (KIM *et al.*, 2007).

A construção de 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. E isso não é possível utilizando-se filtros passa-baixa, uma vez que esses filtros alteram a textura e as bordas, eliminando o ruído e as informações de alta frequência (SHI & FUNG, 1994), já que esses filtros enfatizam as baixas frequências em detrimento das altas frequências (LILLESAND *et al.*, 2004). 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 filtros são classificados como filtros adaptativos, e tem 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 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, em imagens de diferentes datas, possuem mesmo valor (maiores detalhes na seção 3.3). Contudo, o ruído existente nas imagens pode afetar o desempenho do algoritmo, pois o *speckle* é aleatório, 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.

Considerando o *speckle* um efeito multiplicativo na imagem, tem-se:

$$I(t) = R(t) \cdot u(t) \quad (5)$$

onde I é a intensidade do sinal recebido pelo sensor, R é o valor radiométrico verdadeiro (*i.e.*, referente à refletividade do terreno) e u é o efeito multiplicativo do *speckle* e estatisticamente independente de R, cujos média e desvio padrão serão iguais a 1, e t é o par de coordenadas do pixel (SHI & FUNG, 1994).

### 3.2.1 Filtro Lee

O filtro Lee foi construído com o intuito de eliminar ruídos multiplicativos randômicos, ruídos aditivos ou a combinação dos dois (LEE, 1980). Para tanto, a elegância matemática foi substituída pelos bons resultados obtidos a partir da inclusão de estatísticas locais na identificação e eliminação do ruído e melhora do contraste (LEE, 1980). Assim, estimação Bayesiana, filtro de Kalman e análise do domínio de frequências deram espaço à convolução, minimizando o custo computacional (LEE, 1980). A idéia central desse filtro é considerar que a média e o desvio padrão de um pixel estará em um intervalo dado pela média e pelo desvio padrão de todos os pixels (LEE, 1980). O modelo multiplicativo do ruído é aproximado por um modelo linear e, posteriormente, o mínimo erro médio quadrático é aplicado ao modelo linear (SHI & FUNG, 1994).

Seguindo o modelo multiplicativo, apresentado na equação 5, pode-se dizer que um pixel afetado por *speckle* tem a seguinte expressão:

$$z_{ij} = x_{ij} \cdot u_{ij} \quad (6)$$

onde  $z_{ij}$  é o valor do pixel,  $x_{ij}$  é o valor da refletividade do alvo,  $u_{ij}$  é o ruído e ij indicam a posição (linha x coluna) do pixel. Contudo, há uma grande dificuldade em separar o ruído e a resposta do alvo. Uma alternativa para estimar a parcela de cada componente no valor do

pixel é utilizar o filtro de Kalman-Bucy para estimar o valor esperado para a componente ruído. A esperança do ruído é dada pela média do ruído. Todavia, pode-se ainda relacionar o valor do *speckle* em diferentes pixels com um intervalo dado pela variância dos pixels. Ou seja, a esperança do produto das diferenças entre o valor real do ruído e sua média será dada pelo produto da variância da imagem e do delta de Kronecker ( $\delta$ ) para duas posições (LEE, 1980). No entanto, as não-linearidades do modelo necessitariam de integrações numéricas (LEE, 1980), aumentando o gasto computacional.

Como solução, Lee (1980) propôs a determinação dos novos valores para os pixels a partir de uma combinação linear dos componentes do valor do pixel da imagem original (*i.e.*, refletividade do alvo e ruído). A partir de coeficientes não-randômicos (A, B e C), é possível minimizar o erro médio quadrático entre o valor real e o valor esperado. A equação 7 apresenta esta relação entre componentes e variáveis:

$$z'_{ij} = Ax_{ij} + Bu_{ij} + C \quad (7)$$

A equação 7 é manipulada, coeficientes são isolados e esperanças solucionadas e, por último, o filtro de Kalman é aplicado, chegando-se à equação 8, que caracteriza o filtro Lee.

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} + \bar{k}_{ij} (z_{ij} - \bar{x}_{ij}) \quad (8)$$

onde k é o coeficiente adaptativo do filtro Lee. k é expresso por:

$$k = \frac{\text{var}(x)}{\bar{x}_{ij}\sigma^2 + \text{var}(x)} \quad (9)$$

As estatísticas locais podem ser bem vistas na equação 9, onde  $\text{var}(x)$  terá a influência da variância e da média dos pixels contidos na janela de convolução, como mostra a equação 10:

$$\text{var}(x) = \left( \frac{\text{var}(z) + \bar{x}^2}{\sigma_v^2 + 1} \right) - \bar{x}^2 \quad (10)$$

onde

$\text{var}(z)$  é a variância da janela móvel

$\bar{x}$  é a média da janela móvel

$\sigma_v^2 = \frac{\text{var}(z')}{\bar{z}'^2}$ , ou seja, é idêntico ao quadrado do coeficiente de variação (*i.e.*,  $C_v = \frac{\sigma}{\mu}$ ),

sendo  $\text{var}(z')$  e  $\bar{z}'^2$  a variância e a média de uma região da imagem

### 3.2.1.1 Parâmetros inseridos no filtro Lee

A expressão descrita por  $\sigma_v^2$  é idêntica ao quadrado do coeficiente de variação. 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  $\sigma_v^2$ . 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  $\sigma_v^2$  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 o *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.

### 3.2.1.2. Filtragem das imagens

Como há duas formas de se determinar o valor de  $\sigma_v^2$ , 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  $\sigma_v^2$ . A utilização de filtragem sucessiva é dada pela necessidade de definição de padrões visuais da imagem (*i.e.*, fendas e linhas de fluxo) 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 3.6. Por conseguinte, uma imagem filtrada com  $\sigma_v^2$  igual ao  $\sigma$  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. Assim, na tabela 3.3 são apresentados os valores dos desvios padrão das imagens que foram filtradas pela primeira vez e pelas que foram filtradas pela segunda vez.

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 alta. Assim, uma escala mais adequada à sensibilização do algoritmo deve ser pensada.

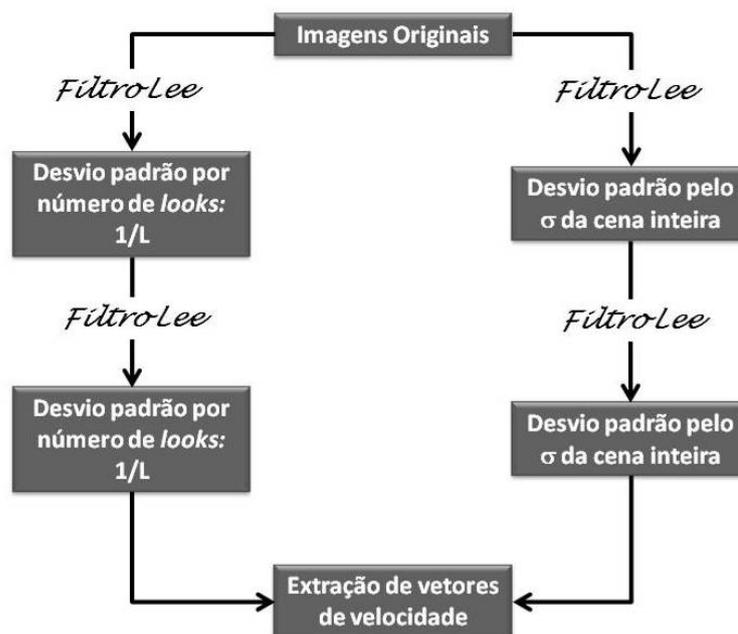


Figura 3.6 – Fluxograma apresentando as filtrações utilizando parâmetros diferentes. O lado esquerdo apresenta duas filtrações sucessivas utilizando o valor  $1/L$  na entrada do filtro Lee. À direita, as filtrações foram realizadas com parâmetro igual ao desvio padrão da cena inteira.

Tabela 3.3 – Parâmetros inseridos no filtro Lee em cada uma das filtrações realizadas.

Imagem	Parâmetro inserido no filtro Lee			
	Por número de looks		Por $\sigma$ da cena	
	1ª Filtragem	2ª Filtragem	1ª Filtragem	2ª Filtragem
2004	0,25	0,25	0,034666	0,136608
2005	0,25	0,25	0,323719	1,517555

### 3.2.1.2.1. Seleção das áreas de análise

Este procedimento foi necessário porque as imagens contêm uma extensa área de mar, desnecessária para a análise do fluxo de geleiras. Assim, apenas a região contendo feições interessantes à proposta deste trabalho foi utilizada. Como resultado, recortes com dimensão de 4315 X 4315 pixels foram obtidos. A figura 3.7 apresenta a região de interesse.

É importante ressaltar que os cortes foram realizados nas imagens após serem aplicados os filtros. Isso se deve à formulação do filtro Lee, que considera um desvio padrão que apresente a variabilidade global dos pixels. Ou seja, é necessário informar uma medida de

dispersão referente a todos ou a maioria dos pixels. Como todos os pixels da cena caracterizarão o ruído existente na imagem, a utilização da cena inteira se faz necessário.

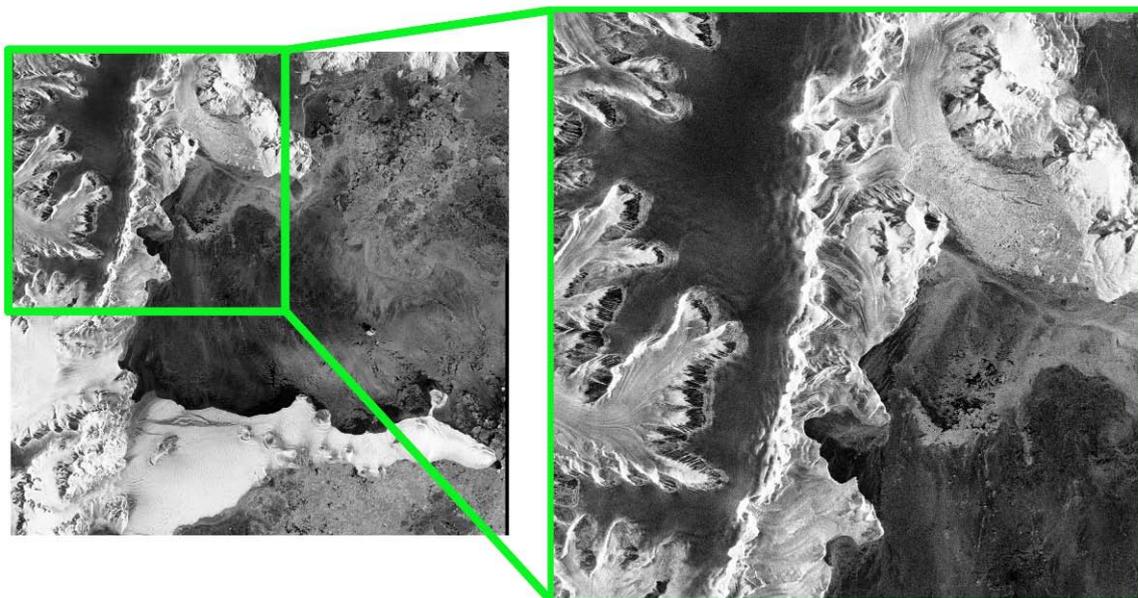


Figura 3.7 – Visualização da área de estudo deste trabalho. À esquerda é apresentada a cena inteira e, à direita, o detalhe da região selecionada para estudo. Fonte: imagem Envisat ASAR IMP adquirida em 15/10/2004. © ESA.

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, as imagens foram cortadas (seção 3.2.1) e 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 o corte sem e com realce linear é apresentada na figura 3.8.

### **3.3. Extração de Parâmetros Dinâmicos das Geleiras**

A extração de vetores de deslocamento das imagens é realizada a partir do processamento das imagens em algoritmos de correlação cruzada.

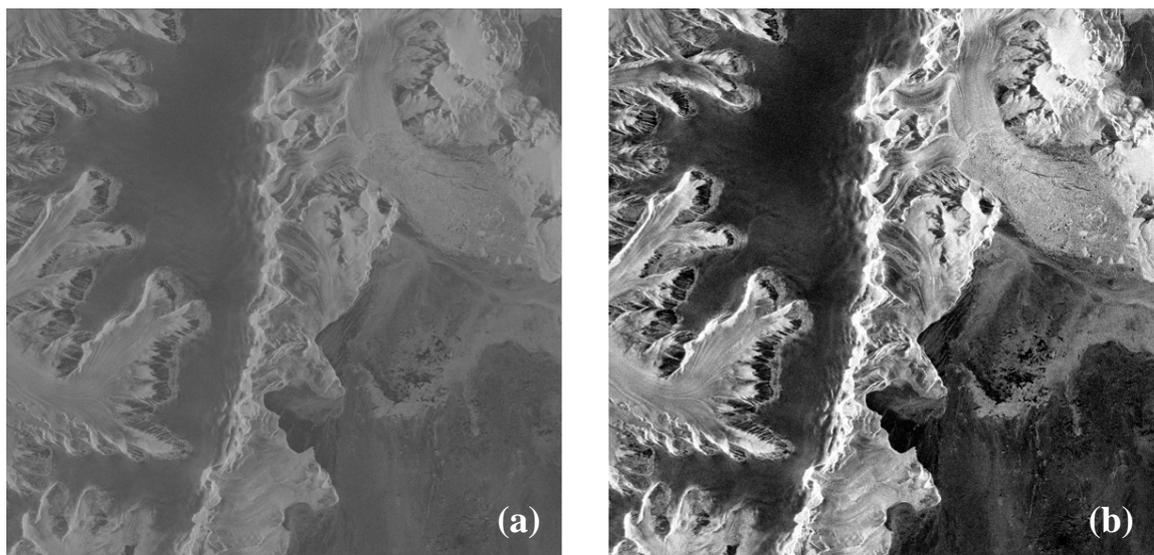


Figura 3.8 – Análise do realce linear aplicado nos cortes. Em (a) tem-se a imagem sem realce e, em (b), com realce linear. Note que a imagem realçada expressa melhor a diferença entre os alvos da cena.

### 3.3.1. 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 subseqüentes (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 estas 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 (LUCCHITTA et al., 1993; FERRIGNO et al., 1993).

A correlação cruzada baseia-se na relação linear existente entre duas imagens. Havendo esta 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 15, que apresenta a covariância normalizada, indica a simetria entre duas variáveis (SPIEGEL, 1974).

$$r = \frac{\sum xy}{\left[ \sum x^2 \right]^{1/2} \left[ \sum y^2 \right]^{1/2}} \quad (15)$$

Esta mesma equação pode ser desenvolvida em elementos de imagens. Imaginando as imagens como espaços, sendo r o espaço de referência e s o espaço de busca, pode-se admitir que  $\mu_k$  será 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 16 (SCAMBOS et al., 1992; ROLSTAD et al., 1997):

$$CI_{(L,S)} = \frac{\sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)(s_{(l,s)} - \mu_s)}{\left[ \sum_{l,s} (r_{(l,s)} - \mu_r)^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{l,s} (s_{(l,s)} - \mu_s)^2 \right]^{1/2}} \quad (16)$$

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 16 está implementada no *software* IMCORR, desenvolvido por Scambos et al. (1992) (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).

Este 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 se faz necessário para que as diferenças existentes na iluminação das cenas sejam eliminadas. A partir disso, os dados da janela de referência são comparadas com os da janela de busca, e é calculada a correlação

cruzada. Esta 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, de forma 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 3.9 representa graficamente o pico de correlação entre as 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 estes 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 (NSIDC, 2008). 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. Uma janela grande, adequada à identificação de qualquer feição contida na imagem, passando pixel a pixel, seria a melhor alternativa. A área de estudo deste trabalho contempla uma região que possui fluxos com altas velocidades. Dessa forma, os deslocamentos das feições necessitam de janelas maiores para busca. Então, no processamento realizado no IMCORR foram utilizadas janelas com as seguintes dimensões: 64 X 64 pixels (referência) e 128 X 128 pixels (busca).

Janelas passando pixel a pixel geram arquivos de saída com grande volume, exigindo uma capacidade de armazenamento considerável para estes dados. Além disso, deslocamento pixel a pixel contém muita informação redundante, aumentando o tempo de análise dos resultados. Testes realizados nas imagens apresentaram bons resultados para espaçamento igual a 10.

O arquivo de saída do IMCORR apresenta o módulo do vetor de deslocamento, os erros associados ao cálculo de deslocamento nos eixos  $x$  e  $y$  e um parâmetro de qualidade da observação dado pelo *correlation strength*, como mostra a tabela 3.4.

Na figura 3.9b, é ilustrada uma superfície tridimensional, representada pela malha que está sobre a região de busca. Esta superfície representa valores de correlação encontrados pelo IMCORR (NSIDC, 2008). Ou seja, os parâmetros estatísticos da janela de referência são comparados pixel a pixel na janela de busca, visando localizar o ponto que possui maior

correlação com o pixel central da janela de referência. A figura 3.10 apresenta uma melhor visualização da superfície citada.

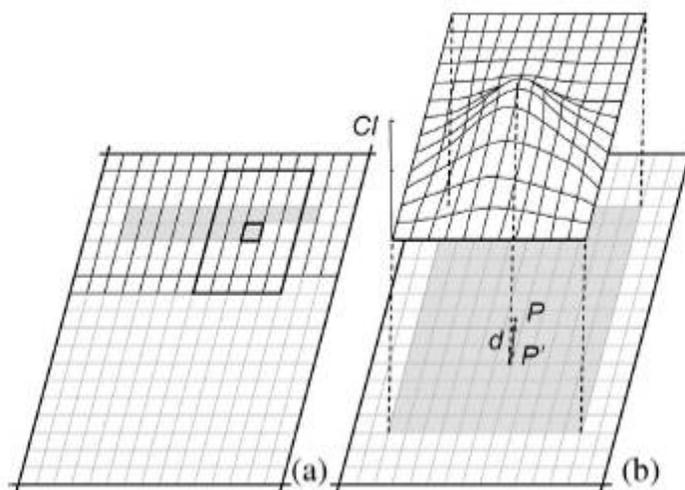


Figura 3.9 – Ilustração do pico de correlação entre as imagens. Em (a) é apresentada a imagem de referência e, em (b), a imagem de busca. A janela de busca é sempre maior que a janela de referência, pois como há um deslocamento das feições (e é este deslocamento que se espera medir) a área a ser buscada 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  $P'$ . Dessa forma, pode-se concluir que a feição  $P$  teve seu homólogo encontrado na posição  $P'$  e a distância  $d$  é o deslocamento desta feição no intervalo temporal existente entre a tomada das duas imagens. Adaptado de De Lange *et al.* (2007).

Tabela 3.4 – Exemplo do arquivo de saída do IMCORR, com dados calculados pelo algoritmo. Os valores contidos na tabela correspondem ao trecho inicial dos resultados das imagens de retroespalhamento. As colunas da tabela possuem cabeçalho numerado. O arquivo de saída conta com as coordenadas X (coluna 1) e Y (2) do pixel central das janelas de referência e busca. Além disso, o módulo do vetor (3), *correlation strength* (4), *flag* (5), o deslocamento da feição em X (6) e em Y (7) e os erros associados à determinação dos deslocamentos em X (8) e em Y (9) também são informados no arquivo. A tabela é meramente ilustrativa, pois o algoritmo gera um arquivo texto como saída.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
64	64	26.623	3.044	1	-19.106	18.54	0.103	0.155
64	74	26.222	4.264	1	-18.763	18.318	0.069	0.087
64	84	0	0	3	0	0	0	0
64	94	25.913	6.646	1	-18.142	18.503	0.068	0.12
64	104	25.82	6.781	1	-18.082	18.431	0.073	0.141
64	114	0	0	3	0	0	0	0

Baseado na superfície gerada, o algoritmo extrai o valor do maior pico de correlação, do segundo maior pico de correlação e os valores de correlação dos pixels da janela. Combinando essas informações, o algoritmo calcula o *correlation strength* (NSIDC, 2008), que servirá como parâmetro de qualidade para o cálculo do deslocamento, uma vez que utiliza outros valores de correlação entre pixels para avaliar a semelhança estatística entre as duas imagens. O relacionamento de outros valores da superfície de correlações, além do valor de pico máximo, fará com que o *correlation strength* (CS) gere um valor que possa expressar a boa determinação do deslocamento, pois utilizará média, desvio padrão e outros valores para informar quanto o pico máximo, que faz parte de um conjunto de valores, realmente é o valor de correlação máxima, separável dos demais e capaz de gerar um valor de deslocamento, sendo definido por:

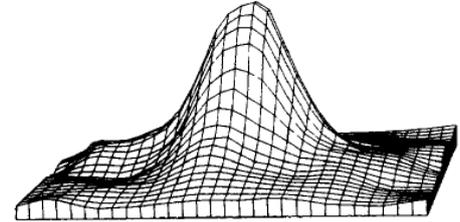


Figura 3.10 – Ilustração da superfície gerada pelos valores de correlação entre as janelas de referência e de busca. É possível notar que além do maior pico de correlação, outras ondulações são encontradas na superfície, indicando que há mais semelhanças entre as janelas de busca e referência. Adaptado de Scambos *et al.* (1992).

$$CS = \frac{PicoCS - \mu_{janela}}{\sigma_{janela}} + \frac{PicoCS - PicoIII}{\sigma_{janela}} + 0,2 * (N - 1) \quad (17)$$

onde PicoCS é o pico de correlação da superfície,  $\mu_{janela}$  é a média dos valores da janela, PicoIII é o maior valor de correlação distante até três pixels do PicoCS e N é o número de altos valores de correlação após 3 pixels de distância do PicoCS. Quanto maiores as janelas utilizadas, maior será o valor do *correlation strength* (NSIDC, 2008). Baixos valores deste parâmetro podem ocorrer pela inexistência de semelhança entre as janelas ou pela predominância de tensões de cisalhamento nos campos de fendas (BINDSCHADLER, 2003).

O parâmetro *flag* (tabela 3.4) contém um número entre 1 e 5, e indica se o vetor foi bem determinado ou não. Se houve êxito na determinação do deslocamento, o *flag* terá valor 1. Os demais valores (de 2 a 5) indicam erro da determinação, sendo cada número utilizado para um tipo de falha específico (NSIDC, 2008): *Flag 2* indica que o pico de correlação foi encontrado a 2 pixels da borda da janela, não permitindo boa determinação da posição deste ponto de máximo, já o 3 informa que picos secundários possuem tamanho próximo ou igual ao máximo, o 4 caracteriza as correlações com picos com baixos valores, e

o 5 indica os deslocamentos que excedem os valores possíveis para os vetores, considerando que o deslocamento final não poderá exceder o tamanho da janela.

## *Capítulo 4*

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

---

#### **4.1. 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 3.7), geraram outras 8 imagens, totalizando 10 cenas adquiridas 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.

Com o objetivo de ilustrar as mudanças nos valores dos números digitais e nos padrões das feições, a figura 4.1 apresenta o corte na imagem ASAR obtida em 2004 (*i.e.*, compreendendo a região detalhada na figura 3.6), com as diferentes filtragens descritas na seção 3.2.1.2. Por apresentar uma visualização de toda a área selecionada para análise, não é possível observar grandes informações a respeito das diferenças visuais entre as imagens da figura 4.1. Contudo, na figura 4.2, um zoom das imagens ilustra bem a homogeneização das fendas e as diferenças e semelhanças existentes entre as imagens filtradas.

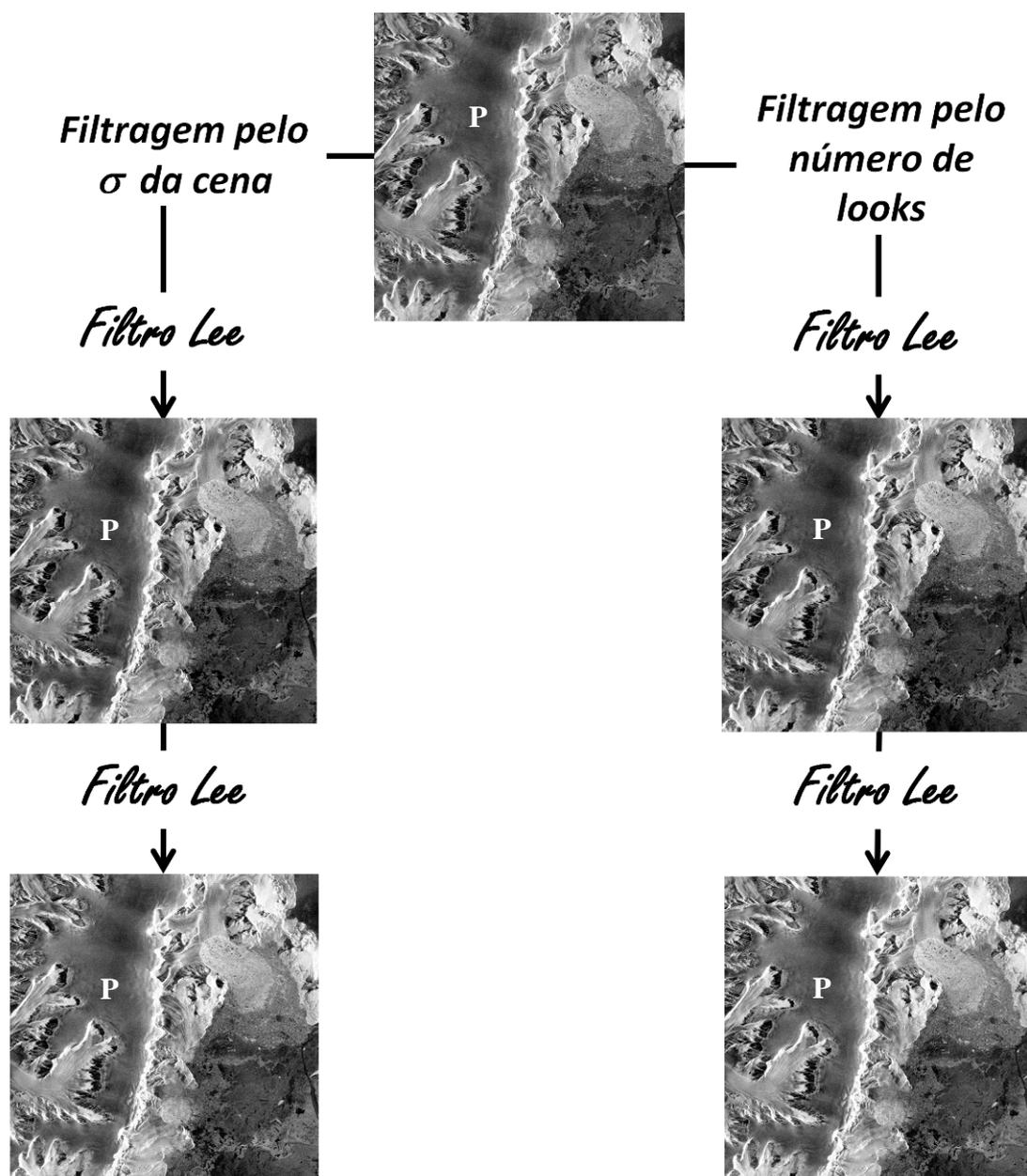


Figura 4.1 – Esquema apresentando as diferentes filtragens e os resultados obtidos a partir da imagem original. O fluxograma mostra as filtragens realizadas e o parâmetro inserido no filtro. No topo, é visualizada a imagem original convertida para 8 bits. As imagens com mesmo número de filtragens são semelhantes entre si, ou seja, as imagens com uma filtragem possuem similaridade nos efeitos provocados pelo filtro. Da mesma forma ocorre com as imagens com filtragens sucessivas. Entre a imagem original e as imagens com uma filtragem é possível notar uma melhora no contraste das feições, principalmente na região superior direita das imagens, onde os fragmentos de gelo que se desprenderam das geleiras daquela região ficam mais delineados após a filtragem. As imagens com dupla filtragem suavizam o padrão claro/escuro existente no platô (P). Além disso, o uso sucessivo do filtro fez com que as encostas e as plataformas ficassem ainda mais claras, causando possíveis perdas de informação nestas áreas.

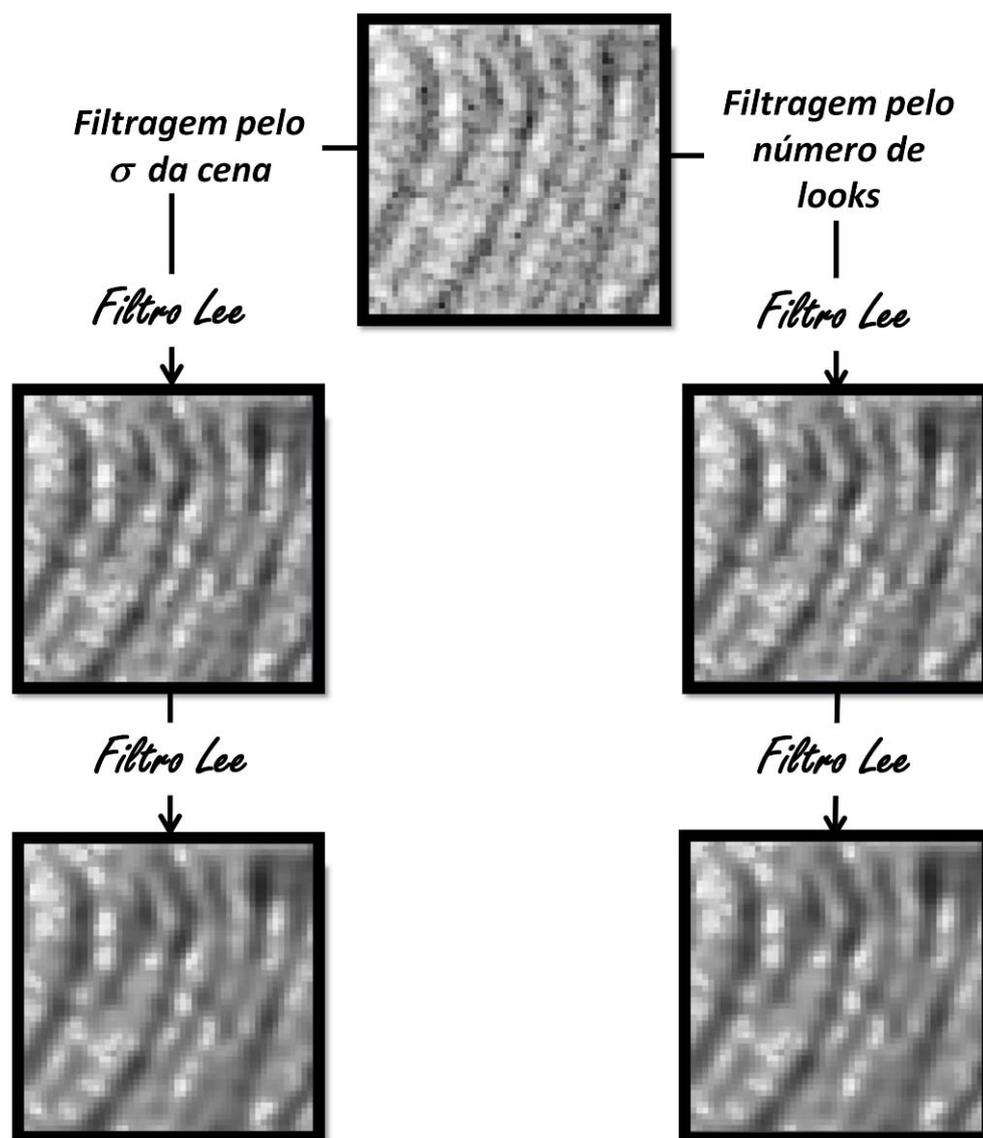


Figura 4.2 – Esquema apresentando o efeito dos filtros nas fendas. É importante ressaltar a grande diferença existente entre a imagem original e as imagens filtradas. Os padrões ficam mais homogêneos e melhor delineados. As imagens que sofreram duas filtrações apresentam uma leve fusão das feições, minimizando a separação dos padrões.

As filtrações 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 4.1 é possível notar que a supressão do ruído foi leve, pois não alterou abruptamente o aspecto visual da cena. E na figura 4.2 percebe-se que, apesar da sutileza conseguida na cena, após a primeira filtração, as fendas ficaram mais delineadas, caracterizando bem a forma. No entanto, é visível a perda de informações na segunda filtração. 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.

## 4.2. Análise quantitativa dos deslocamentos obtidos

Após a análise visual dos resultados da filtragem, foi realizada uma análise preliminar para interpretar a resposta do algoritmo às filtragens quanto ao número de deslocamentos detectados e erros associados aos deslocamentos determinados. Para facilitar a identificação dos tipos de filtragem, será utilizada a denominação apresentada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Denominação das filtragens.

<b>Processamento realizado na imagem</b>	<b>Nome utilizado</b>
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

Inicialmente, os números de detecções foram comparados. Esta 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 4.2, 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 4.2.

Tabela 4.2 – Número de detecções obtidas pelo algoritmo de correlação cruzada em cada nível de processamento da imagem. A terceira coluna apresenta o percentual de êxito no cálculo de deslocamentos para cada nível de processamento das imagens.

<b>Processamento realizado</b>	<b>Número de deslocamentos</b>	<b>Percentual de êxito</b>
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 4.2 mostra o bom desempenho das imagens com apenas uma filtragem frente às imagens com filtrações 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 na 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 4.2). Além disso, nesse caso nota-se uma baixa variabilidade nos valores de número digital para representar as diferentes feições. Com isso, parâmetros estatísticos muito próximos são encontrados para padrões diferentes, aumentando o erro do algoritmo na estimativa do deslocamento.

Ainda, segundo a tabela 4.2, 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 imagens Lee-sigma e Lee-look causam o mesmo efeito nos pixels ainda na escala de decibéis. A tabela 4.3 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 custo computacional para o cálculo do desvio padrão da cena.

Tabela 4.3 - Estatísticas gerais da imagem 2004 original e após as filtragens.

<b>Imagem</b>	<b>Média (dB)</b>	<b>Desvio Padrão (dB)</b>
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

O resultado da comparação entre as detecções em cada tipo de imagem não pode ser levada em consideração sem uma análise dos erros em cada nível de processamento. Assim, foi feita análise da média e do desvio padrão dos erros em X e em Y, resultantes do software IMCORR, para verificar se o aumento no número de cálculos de deslocamento vem acompanhado de uma minimização dos erros. A tabela 4.4 apresenta os valores da média e do desvio padrão para cada tipo de imagem.

Tabela 4.4 – Análise dos erros obtidos nas componentes X e Y dos vetores resultantes do software IMCORR, para cada nível de processamento das imagens.

<b>Processamento na imagem</b>	<b>Erro em X (pixels)</b>		<b>Erro em Y (pixels)</b>	
	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Retroespalhamento	0,868952	34,66164	0,859850	43,66797
Lee-look	0,231962	12,00583	0,338682	26,04805
Lee-sigma	0,231962	12,00583	0,338682	26,04805
LeeLee-look	773,4226	6471,315	16,67028	101,6498
LeeLee-sigma	773,4226	6471,315	16,67028	101,6498

Os dados da tabela 4.4 mostram que o menor valor para as médias dos erros, tanto em X quanto em Y, é o das imagens com uma filtragem. Além de possuir a menor média de erros, essas imagens têm também a menor dispersão dos erros. Na mesma tabela, pode-se visualizar o péssimo resultado para os erros nas imagens com dupla filtragem. Assim, os erros associados aos vetores desse último caso, além de possuírem baixo êxito no número de deslocamentos, ratificam que imagens com filtragens sucessivas não são adequadas à utilização em algoritmos de correlação cruzada.

Apesar das médias dos erros serem baixas no caso da imagem original e daquelas com uma filtragem, os desvios padrão foram altos, o que mostra a alta variabilidade dos dados. Esta dispersão pode ser explicada pelo aumento do erro em função da pouca semelhança dos pixels das janelas de referência e de busca. É

importante lembrar que o valor final do deslocamento é dado pela interpolação da distância entre a feição na imagem de referência e o ponto de máxima correlação na janela de busca. Dessa forma, mesmo que o valor de correlação seja satisfatório, a estimativa da posição interpolada pode conter erros em sua determinação. Esse erro caracteriza a identificação de conjuntos de pixels estatisticamente homólogos, ou seja, conjuntos de pixels que possuem números digitais similares, mas que não constituem uma feição.

Com isso, 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 4.5 contém o número de deslocamentos válidos com erro superior a 1 pixel.

Tabela 4.5 – Número de deslocamentos detectados com erro superior a 1 pixel.

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

A tabela 4.5 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. E, novamente, as imagens com dupla filtragem apresentam altos erros envolvidos nas determinações dos deslocamentos.

Unindo as informações das tabelas 4.2, 4.4 e 4.5, 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 deste capítulo 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.

### 4.3. Análise da distribuição dos vetores e qualidade das informações

Nesta seção, como dito anteriormente, serão comparados os resultados das imagens originais e das imagens Lee, dado que as demais imagens não geraram informações que contemplam o objetivo deste trabalho.

Para a realização dessa análise, os arquivos gerados pelo IMCORR foram importados para a planilha eletrônica EXCEL 97, onde foram transformados em planilhas dBaseIV e, posteriormente, visualizados no *software* ArcView 3.2. Plotados como feição pontual, os vetores de deslocamento foram criados utilizando o *script* FlowVect, elaborado por McVay (2009). Neste *script*, os vetores são traçados a partir de seu módulo e seu azimute, facilitando a geração e a visualização destes dados.

O primeiro *shape* gerado pelo FlowVect utilizou todas as informações obtidas na análise da seção anterior, ou seja, todos os deslocamentos efetivos e com erro menor que 1 pixel. Assim, foram geradas as imagens que podem ser visualizadas nas figuras 4.3 e 4.4.

Esta primeira análise visual comprova a análise quantitativa dos dados. As imagens Lee conseguem gerar mais vetores que as imagens originais. No entanto, esta primeira análise visual não responde a principal questão deste trabalho, se as feições superficiais (*e.g.*, fendas) são facilmente reconhecidas pelo algoritmo de correlação cruzada após a filtragem.

Com o objetivo de selecionar os deslocamentos calculados a partir de uma boa semelhança estatística, um limiar (*threshold*) foi aplicado ao parâmetro de saída *correlation strength* (CS). Esse parâmetro foi utilizado por ser determinado pelos picos secundários de correlação, detectados na superfície de correlações. As variáveis envolvidas no cálculo do *correlation strength* são explicadas na seção 3.3.1.

O intervalo dos valores de CS resultante das análises realizadas varia entre 2 e 19,712. Para valores abaixo de 2, o IMCORR não calcula deslocamentos, pois se considera que, neste caso, não há semelhança suficiente entre os pixels homólogos. Por outro lado, quanto maior o valor do CS, maior será a confiabilidade na detecção da semelhança estatística do dado.

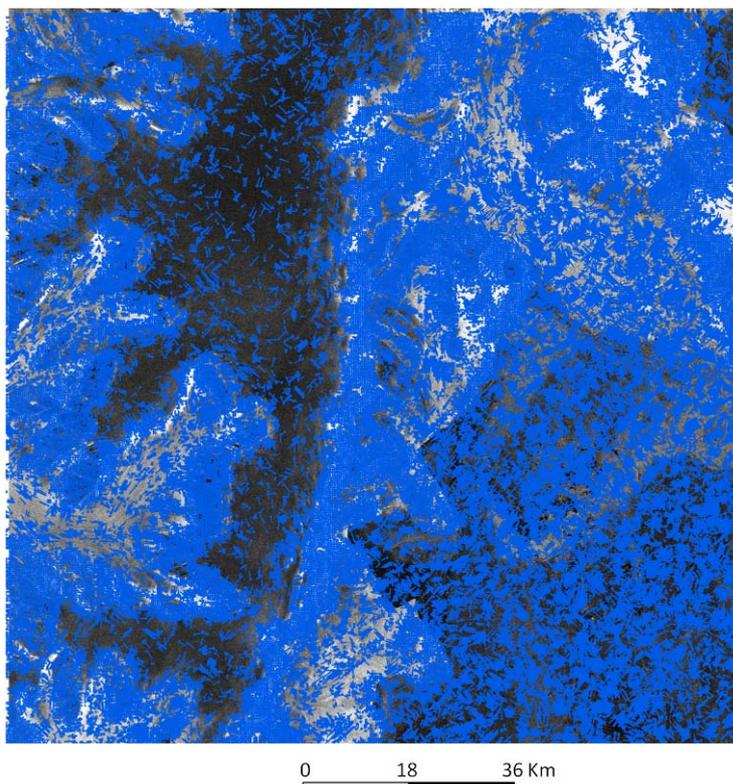


Figura 4.3 - Visualização de todos os vetores gerados para a imagem original. É possível notar que os deslocamentos são calculados para inúmeros pixels, dado que o algoritmo compara semelhanças estatísticas.

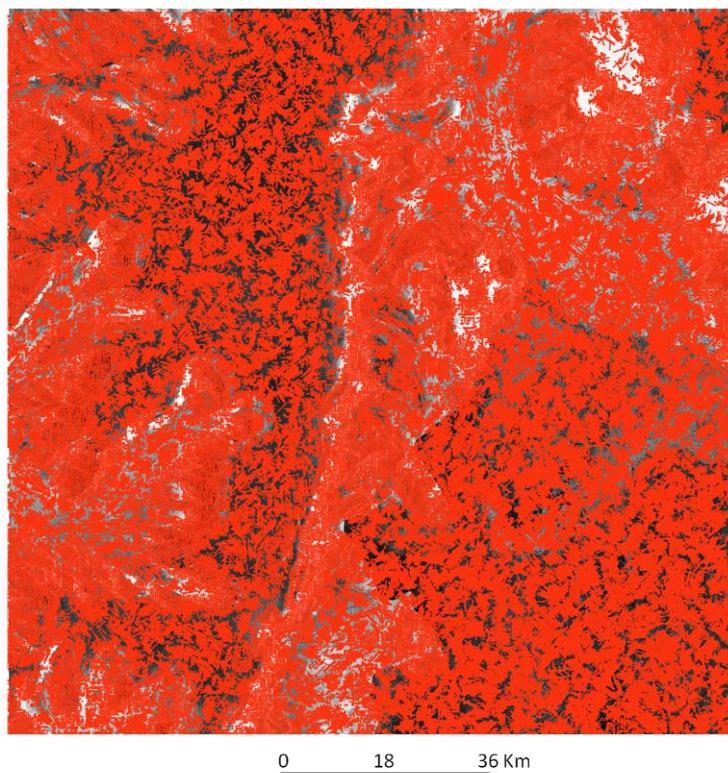


Figura 4.4 - Visualização de todos os vetores gerados para as imagens Lee.

Alguns valores do parâmetro foram testados como limiar para tentar obter vetores de deslocamento provenientes apenas das áreas de fendas nas geleiras. Sendo 2 o menor valor encontrado nas imagens, a primeira análise foi feita utilizando os vetores com parâmetro superior a 5. Esse valor foi escolhido a partir da média dos valores de *correlation strength* de todos os deslocamentos encontrados. A média do CS para os vetores das imagens originais é 4,9 e das imagens Lee, 4,5. Assim, empiricamente foi utilizado o limiar igual a 5, tentando, dessa forma, eliminar todos os vetores com CS inferior à média das observações. Além disso, o desvio padrão do CS para as imagens originais é igual a 2,08, enquanto o das imagens Lee é igual a 1,85. Buscando vetores com valores precisos de CS, foi testado também o limiar 7 (*i.e.* o valor 5 baseado na média somado ao valor 2 baseado no desvio padrão). As figuras 4.5 e 4.6 mostram os resultados da utilização do limiar 5.

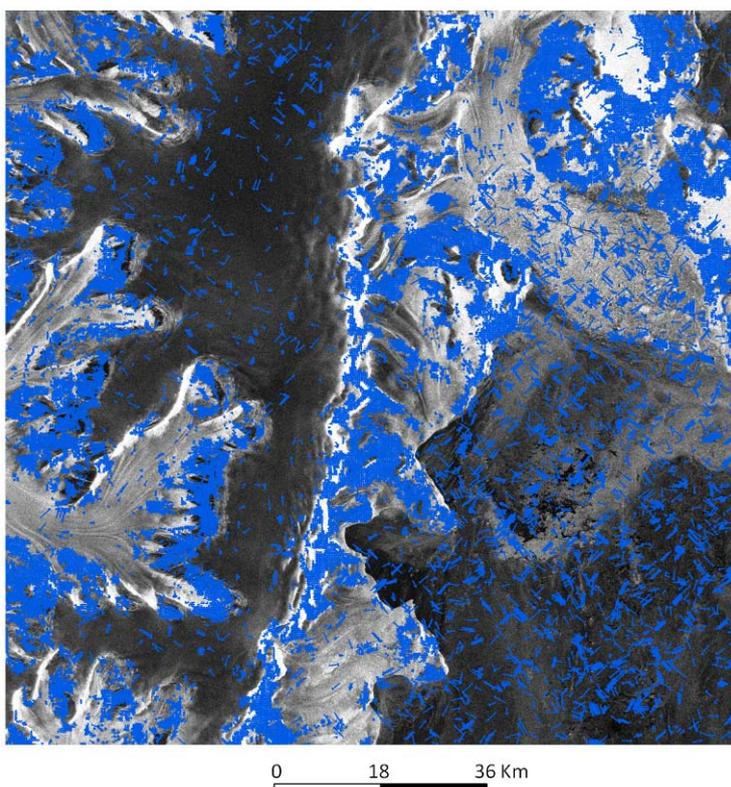


Figura 4.5 - Vetores com *correlation strength* superior a 5, gerados a partir das imagens originais.

A partir da comparação das figuras 4.5 e 4.6, é possível observar que imagens com uma filtragem possuem mais vetores com *correlation strength* superior a 5 do que as originais. Isso mostra que, além de gerar mais vetores, as imagens Lee proporcionam boas superfícies de correlação, com valores representativos para os picos secundários,

capazes de gerar bons valores para o *correlation strength*. A utilização de um limiar em um dos parâmetros de saída do IMCORR facilita a interpretação dos dados.

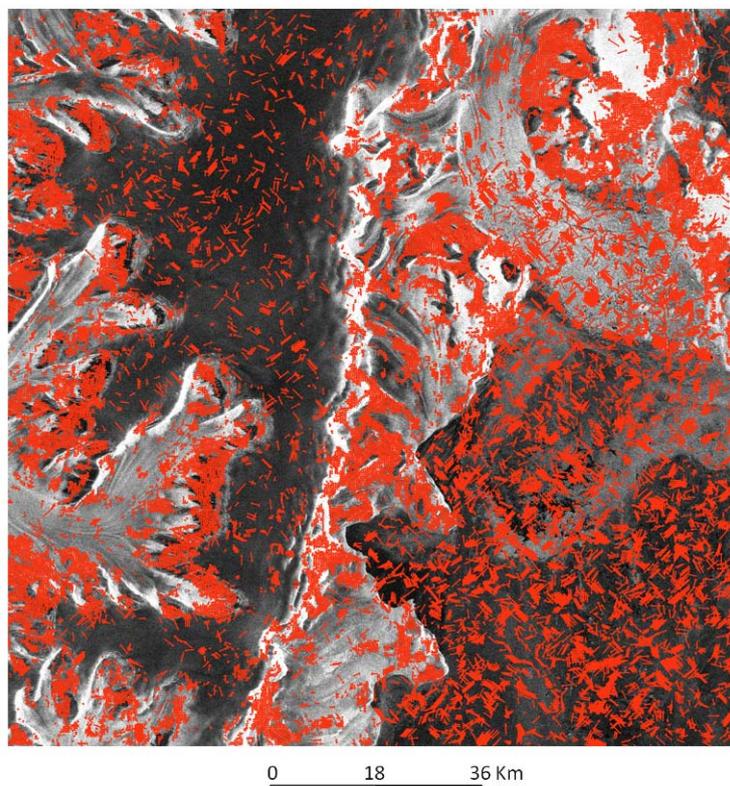


Figura 4.6 - Vetores com *correlation strength* superior a 5, gerados a partir das imagens filtradas.

A correlação cruzada será máxima quando os valores dos números digitais (do pixel central da janela de referência e do pixel homólogo na janela de busca) forem o mais próximo possível. No entanto, da equação 17 pode-se compreender que se os picos secundários tiverem módulo próximo ao pico de correlação ou se num raio de 3 pixels a partir do pico de correlação houver valores próximos ao pico de correlação, o CS será baixo. Assim, entende-se que se os valores dos números digitais forem próximos e outros pixels dentro da janela de busca também tenham valores próximos, o CS será baixo, identificando a dificuldade do algoritmo em determinar qual é o pixel buscado.

A região das imagens que corresponde ao mar teve o número de vetores diminuído, bem como a região do platô da Península Antártica. O mar não mantém as mesmas feições entre a obtenção das imagens. Contudo, há inúmeras placas de gelo e icebergs que podem causar valores de números digitais parecidos em regiões semelhantes, dando ao algoritmo subsídios para encontrar correlação entre as janelas de busca e referência. Entretanto, tanto o mar quanto o platô são superfícies com valores de

números digitais muito próximos, com poucas feições na sua morfologia. Assim, pela semelhança entre os valores dos pixels os deslocamentos são calculados. Porém, como os demais pixels da janela de busca também possuem valores próximos, o CS será baixo.

Analisando a subcena inteira, é difícil compreender como os vetores se comportam nas regiões de ocorrência de feições indicadoras de fluxo nas superfícies das geleiras (*e.g.*, campos de fendas). Dessa forma, análises foram realizadas nas áreas onde essas feições ocorrem. A figura 4.7 é uma imagem índice onde as áreas marcadas são detalhadas nas figuras 4.8 – 4.10, mostrando a diferença entre os vetores gerados a partir de imagens originais e imagens Lee.

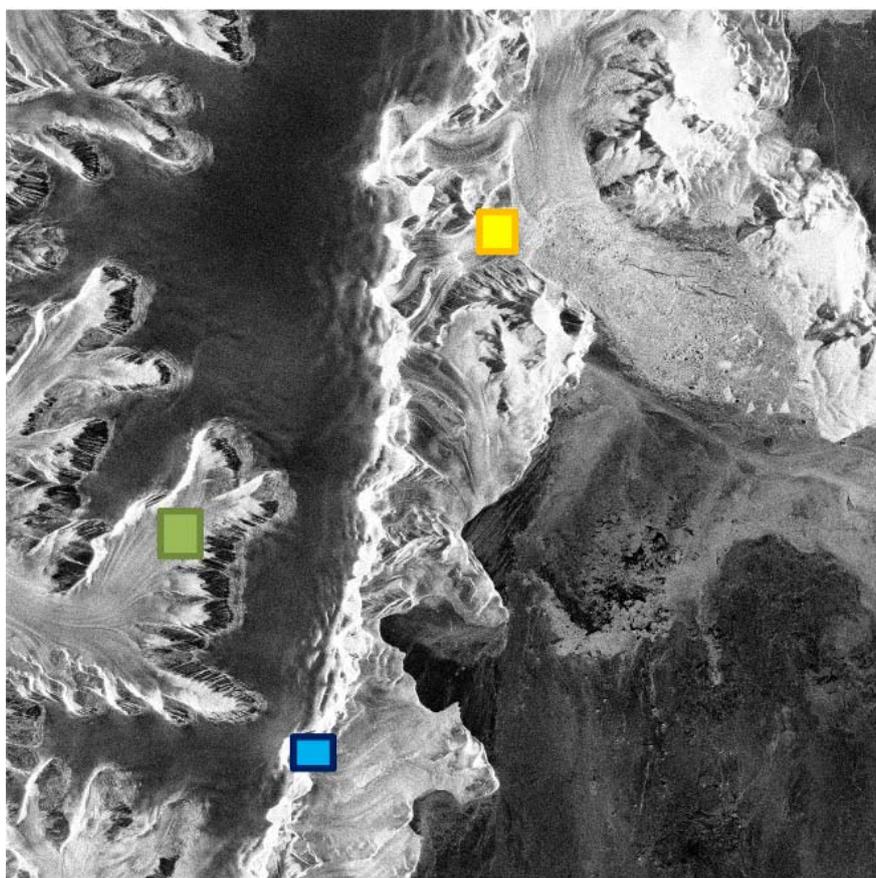


Figura 4.7 – Imagem índice. O área do quadro amarelo é detalhado na figura 4.8, o verde na figura 4.9 e o azul na 4.10.

A figura 4.8 apresenta um campo de fendas que teve grande deslocamento (*i.e.*,  $2,6 \text{ m d}^{-1}$  em média) no período de estudo. Ao comparar os vetores gerados pelas imagens com níveis de processamento diferentes, é visível o aumento na detecção de deslocamentos pelo IMCORR quando utilizadas as imagens Lee. Contudo, ao utilizar o

limiar de valor 5 nos vetores, as imagens com uma filtragem contam com menos vetores restantes que as imagens originais. Em valores, para a região central do campo de fendas apresentado na figura 4.8, das imagens originais restam 74 vetores e, das imagens Lee, 62. Além disso, a figura 4.8 apresenta vetores de deslocamento detectados na direção contrária à direção de fluxo da geleira (*i.e.* identificado pela letra A na figura 4.8), o que indica um problema causado pela utilização de semelhanças estatísticas na estimativa dos deslocamentos. Como citado anteriormente, vetores podem ser gerados mesmo para feições que não são correspondentes, desde que estas possuam valores de números digitais semelhantes.

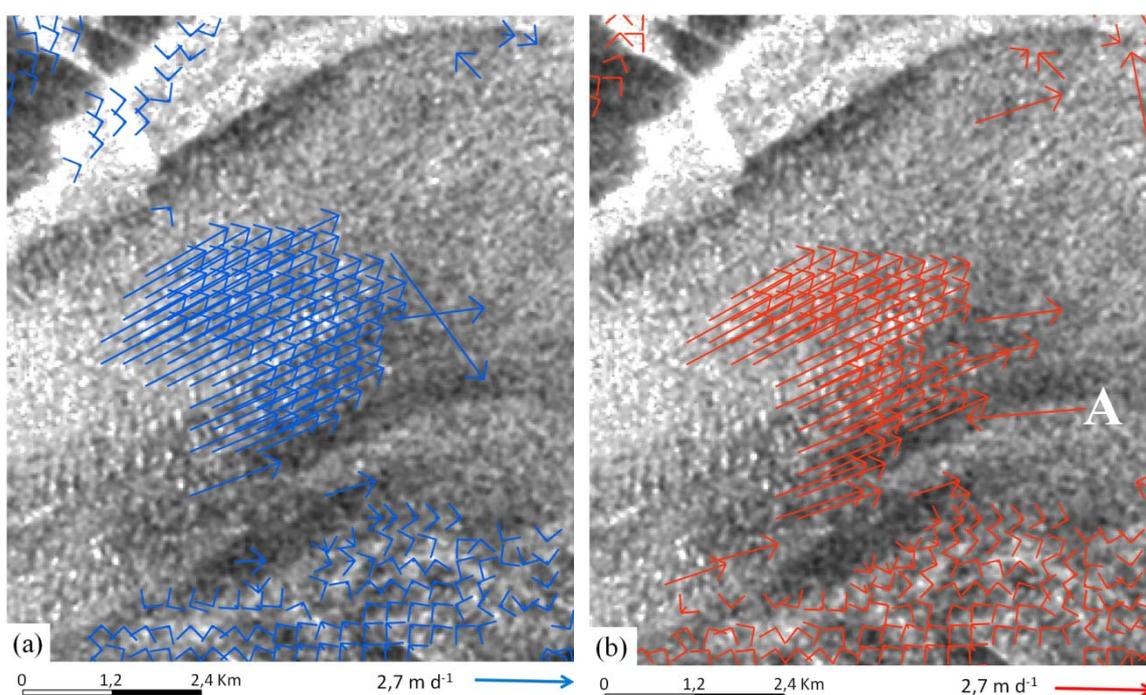


Figura 4.8 - Comparativo entre vetores gerados por imagens originais e por imagens com uma filtragem Lee na geleira Dinsmoor. Os vetores em azul (a) foram calculados pelas imagens originais e os vetores vermelhos (b) pelas imagens Lee. É possível notar uma leve diferença entre a distribuição espacial dos vetores obtidos pelos dois tipos de imagem. Enquanto os vetores azuis (obtidos pelas imagens originais) estão concentrados na parte central do fluxo, os vetores vermelhos (gerados pelas imagens Lee) estão mais espalhados. Além disso, na encosta da geleira (que está na parte superior da figura) há uma diminuição na detecção de deslocamentos nas imagens com uma filtragem. A letra A está sobre um vetor em sentido contrário ao fluxo natural da geleira.

A análise visual dos resultados de outros campos de fendas (figuras 4.9 e 4.10) indicou a superioridade das imagens com uma filtragem sobre as imagens originais. No entanto, desta vez o limiar no *correlation strength* não eliminou em grande número os vetores gerados pelas imagens com uma filtragem, fazendo com que estes vetores

restantes ainda fossem mais numerosos que os gerados pelas imagens originais. Nas duas figuras é possível visualizar um número maior de vetores de deslocamentos calculados quando são utilizadas as imagens Lee. Porém, nessas figuras também observamos vetores gerados com direção de fluxo contrários à direção de fluxo da geleira.

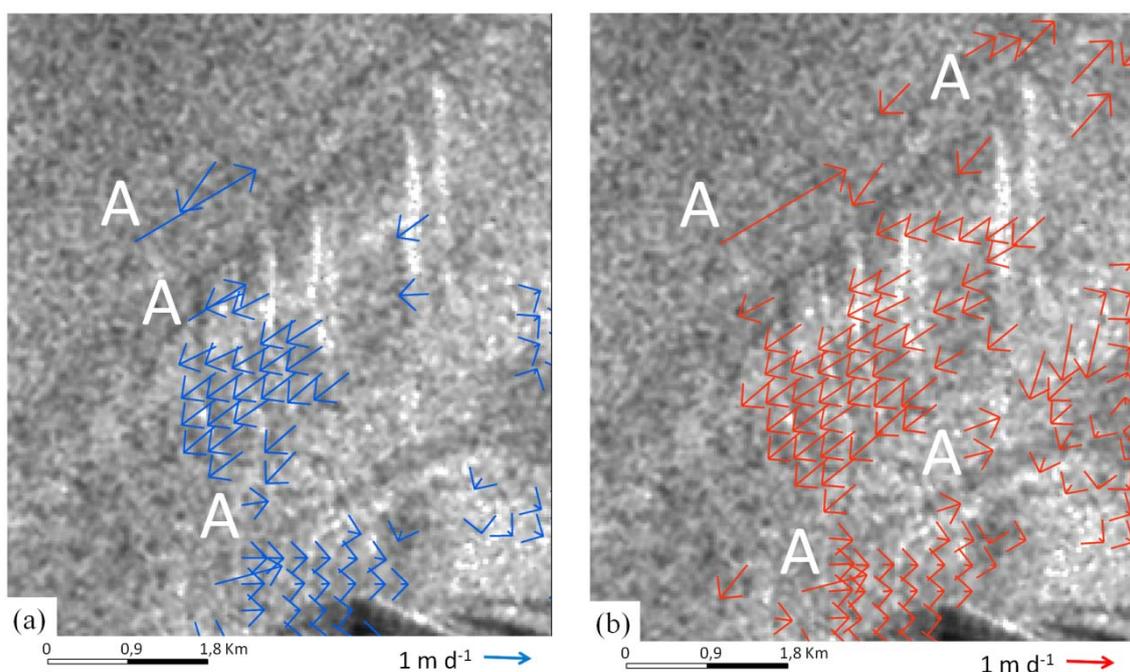


Figura 4.9 - Comparativo entre o desempenho das imagens originais (a) e das imagens Lee (b). Os vetores vermelhos aparecem em maior número e contemplam todas as fendas da área, ao contrário dos azuis. As letras A indicam a incidência de vetores contrários ao fluxo natural da geleira.

Além do número maior de vetores gerados pelas imagens Lee, é possível visualizar que as imagens com uma filtragem mantêm, neste caso, a distribuição dos vetores obtidos pelas imagens originais. Contudo, as imagens Lee causam um aumento no número de vetores nos locais onde as imagens originais já mostravam deslocamento.

Na tentativa de minimizar a ocorrência de vetores de deslocamento aleatórios (*i.e.*, vetores cujas direções diferem das direções de fluxo das geleiras), um valor mais alto para limiar no *correlation strength* foi testado, e o valor 7 foi escolhido por reduzir a ocorrência desses vetores aleatórios, mantendo os vetores de deslocamento localizados nos campos de fendas (figuras 4.11 a 4.13).

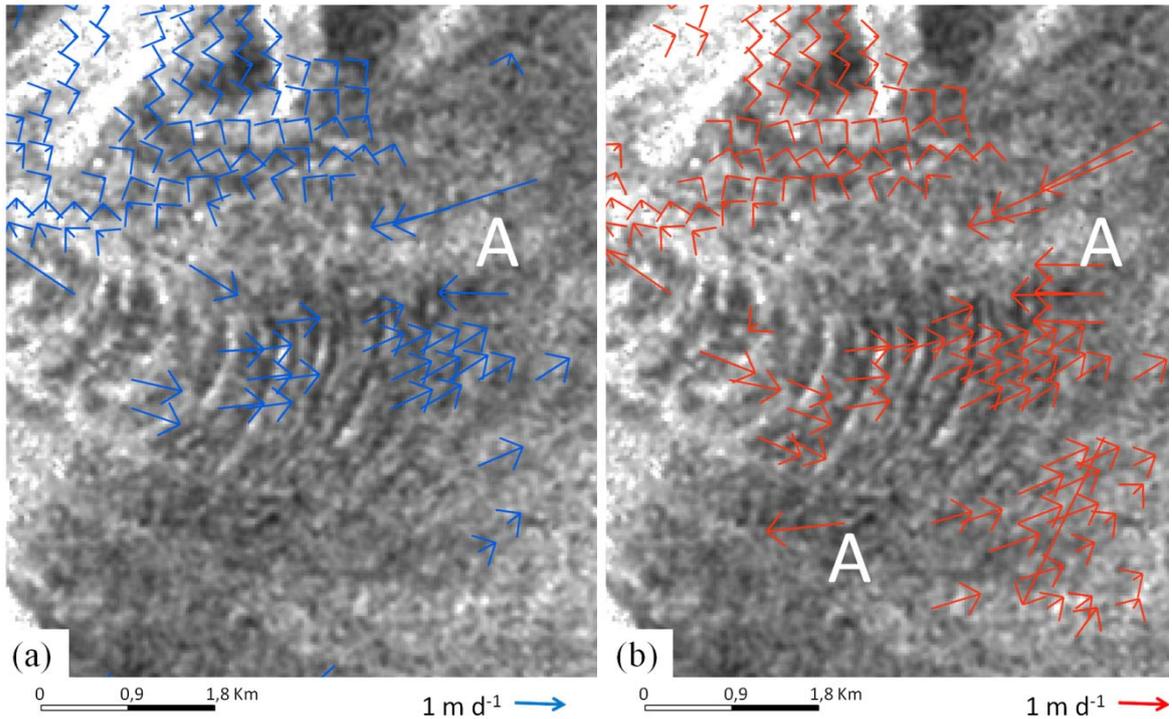


Figura 4.10 - Comparativo entre vetores gerados em fendas bem marcadas. As letras A indicam a incidência de vetores contrários ao fluxo natural da geleira.

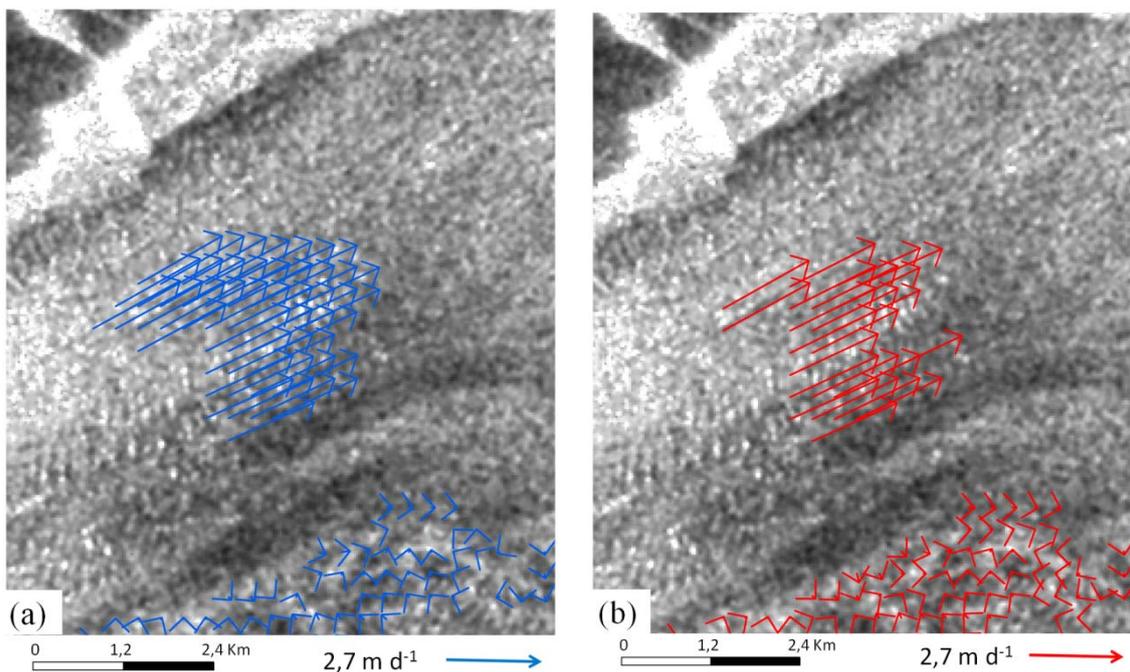


Figura 4.11 - Comparativo entre os vetores com *threshold 7*, detectados na geleira Dinsmoor. Note a diminuição no número de vetores gerados pelas imagens filtradas.

Analisando a figura 4.11, é possível perceber o padrão visual das fendas, as quais são geradas por fluxo de extensão, que fratura o gelo perpendicularmente ao fluxo (BENNET & GLASSER, 1996), como pode ser visto na figura 2.3. Este fluxo de

extensão ocorre pelo fraturamento da frente da geleira. A geleira Dinsmoor (figura 4.12) tem seu término no mar. E a interação das águas com a massa de gelo gera fraturas na região frontal da geleira (MEIER & POST, 1987; HUGHES, 2002; BENN *et al.*, 2007). A zona fraturada caracterizará um fluxo de extensão, pois alterará os mecanismos de deslizamento basal, de eventos de surge e da estabilidade de correntes de gelo (MEIER & POST, 1987). O fluxo das regiões fraturadas aumenta mais rápido que o fluxo da geleira, causando a diminuição da espessura e a retração da frente da massa de gelo (MEIER & POST, 1987; BENN *et al.*, 2007)

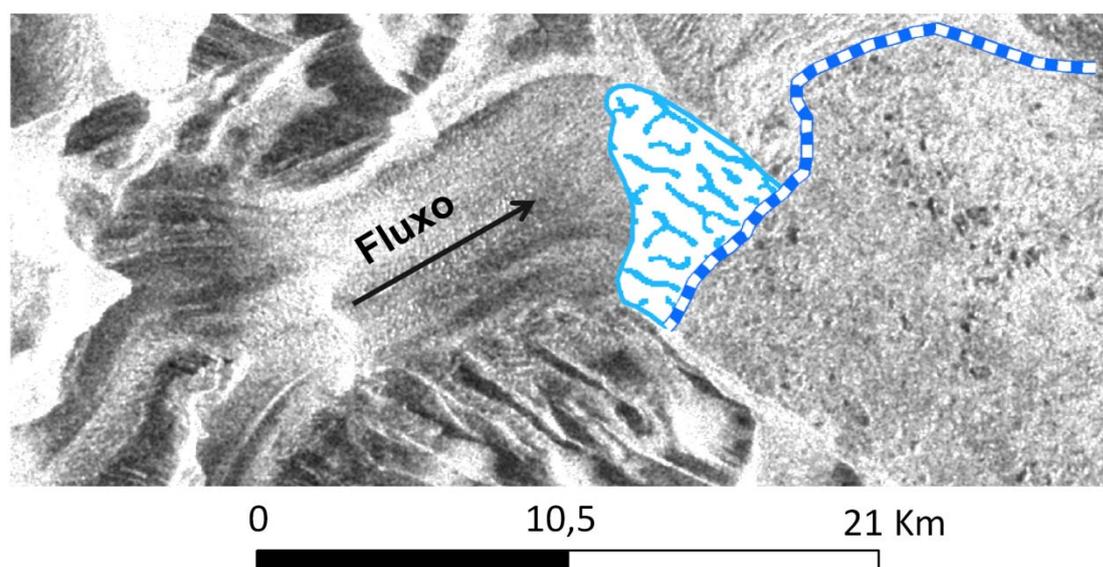


Figura 4.12 - Visão geral da Geleira Dinsmoor. Na área hachurada tem-se uma zona com grante quantidade de fraturas, causadas pela interação do oceano com a massa de gelo (MEIER & POST, 1987; HUGHES, 2002; BENN *et al.*, 2007). Nestas regiões fraturadas registra-se deslocamentos maiores, causando um fluxo de extensão. Este fluxo de extensão na geleira Dinsmoor gerou o campo de fendas da figura 4.11. A linha pontilhada representa a frente das geleiras D-B-E.

Os resultados obtidos com as imagens Lee indicam, a permanência de um número menor de vetores na região da figura 4.11, detalhada na 4.12, quando aplicado o *threshold 7*. Nas imagens sem filtragem, a variabilidade dos números digitais é maior, pois além do padrão claro e escuro causado pela fenda e sua sombra, há o *speckle* misturado nas informações. A eliminação do ruído causa uma homogeneização nos padrões, alterando os valores dos números digitais dos pixels de acordo com estatísticas locais e globais. Contudo, a eliminação do *speckle*, juntamente com a grande quantidade de pequenos padrões, gera valores menores para o *correlation strength*. Bindschadler

(2003) mostra que o CS diminui em regiões de fluxo de compressão e que este comportamento está associado à força de cisalhamento.

Independente das imagens utilizadas pode-se notar a eliminação dos vetores em sentido contrário ao do fluxo natural. Isto mostra a baixa correlação encontrada nestes deslocamentos aleatórios. Todavia, nem todas as fendas são como as da figura 4.11. Na figura 4.13 outro padrão de fendas é apresentado, juntamente com os vetores restantes após a eliminação de todos os vetores com *correlation strength* menor que 7.

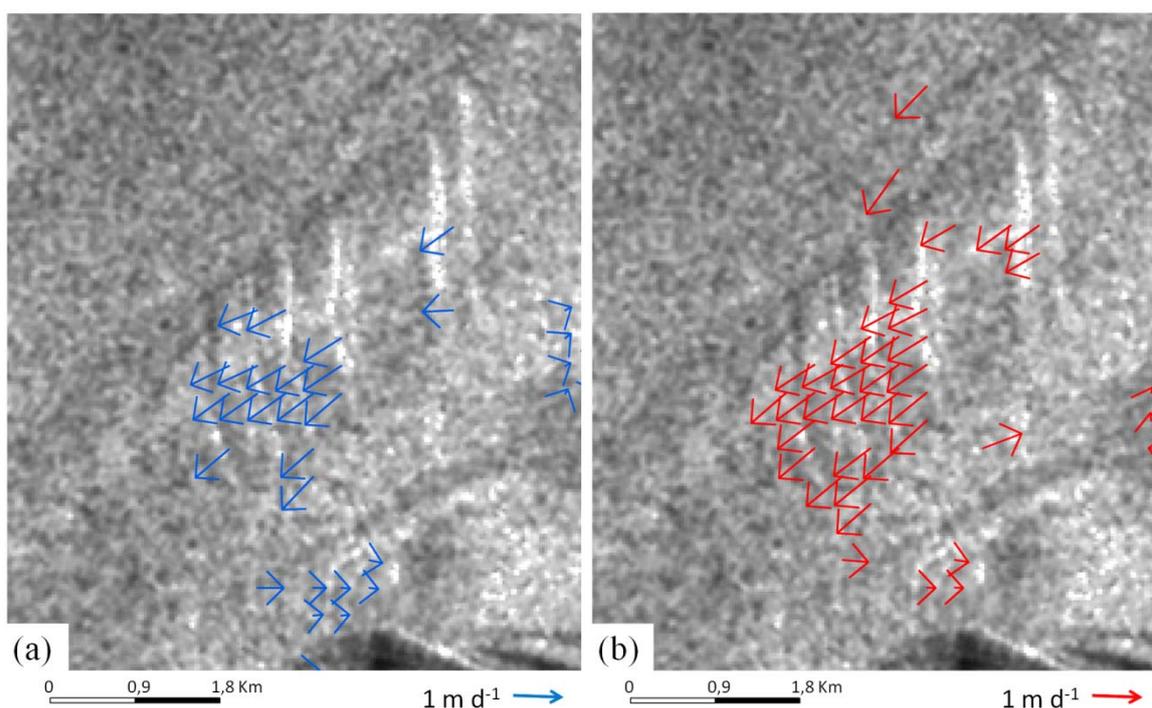


Figura 4.13 - Padrão de fendas largas. Os vetores gerados pelas imagens filtradas permanecem em maior número quando comparados com os vetores permanentes gerados pelas imagens sem filtragem. A região representada nesta figura é a mesma da ilustrada na figura 4.9.

Ao contrário de áreas como a ilustrada na figura 4.11 (*i.e.*, com fendas múltiplas e pequenas), áreas das geleiras com fendas largas e profundas, geradas pelo aumento da tensão normal sobre os cristais de gelo (figura 2.4) como resultado da aceleração das geleiras (figura 2.3), respondem melhor ao algoritmo quando processadas após uma filtragem. Mais uma vez, é possível notar a diminuição de vetores aleatórios e a permanência, em maior número, dos vetores gerados a partir de imagens Lee. Isto comprova que a homogeneização das fendas, após a filtragem do *speckle*, define melhor a forma e, assim, determina os vetores de deslocamento com maior semelhança

estatística. O mesmo comportamento do algoritmo para regiões com fendas largas é apresentado para áreas com fendas em seqüência, como as apresentadas na figura 4.14.

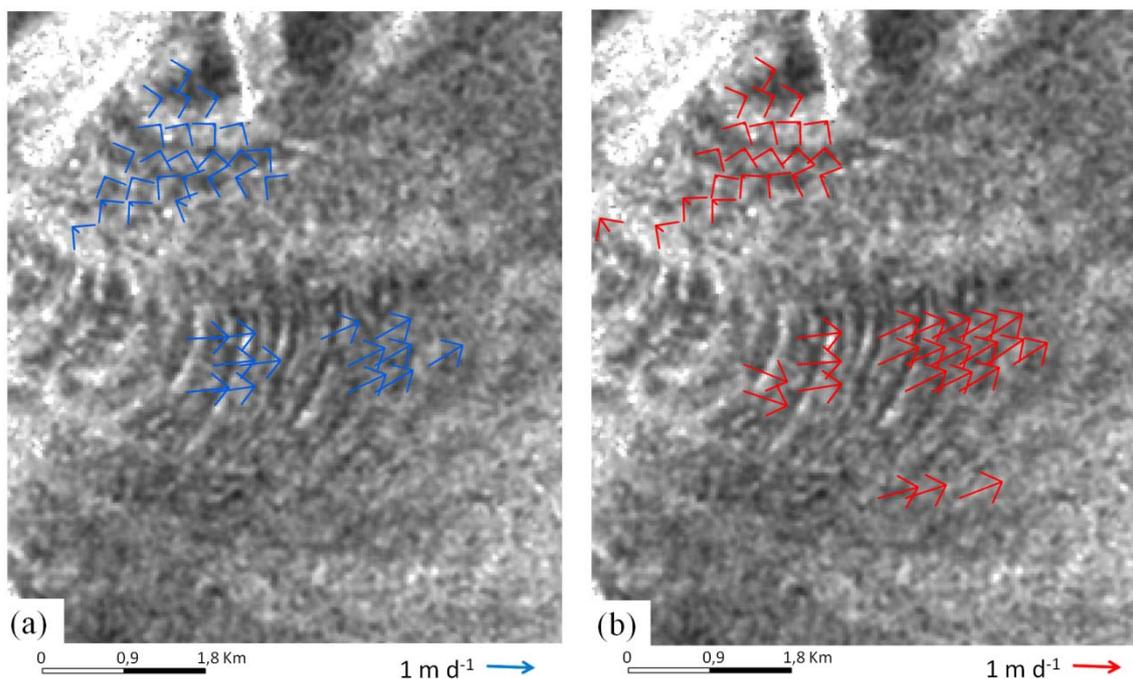


Figura 4.14 – Área onde ocorrem fendas em seqüência. As setas vermelhas (b) mostram a obtenção de um número maior de vetores com as imagens Lee, mesmo com um limiar mais alto no *correlation strength*.

Apesar da mudança no limiar do *correlation strength* eliminar alguns tipos de vetores aleatórios, aqueles que ficam sobre as laterais das geleiras (*i.e.*, encostas) se mantêm. Isso ocorre porque as encostas não sofreram alterações no intervalo temporal entre os imageamentos, ou seja, em 8 meses. Assim, as feições existentes nestas áreas são as mesmas, mudando apenas a resposta espectral, pois a neve acumulada pode ter derretido ou os sedimentos que estavam mais secos ficaram úmidos pela água do degelo. Assim, os valores dos números digitais serão levemente alterados, dando ao algoritmo de correlação cruzada subsídios para que seja detectado um pequeno deslocamento. Além disso, o erro associado ao co-registro também pode causar a detecção de deslocamento para mesmas feições, pois elas podem estar realmente deslocadas.

As figuras 4.15 e 4.16 mostram respectivamente todos os vetores com *correlation strength* inferior a 7 para as imagens originais e Lee.

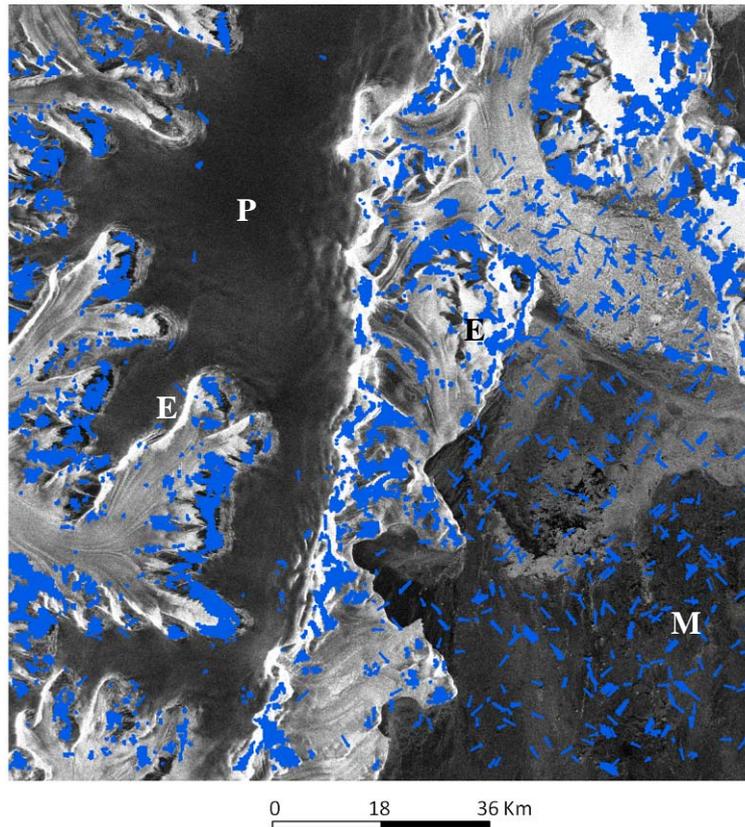


Figura 4.15 – Vetores gerados pelas imagens originais com limiar igual a 7. Bons valores de CS ocorrem no mar (M), platô (P) e encostas (E).

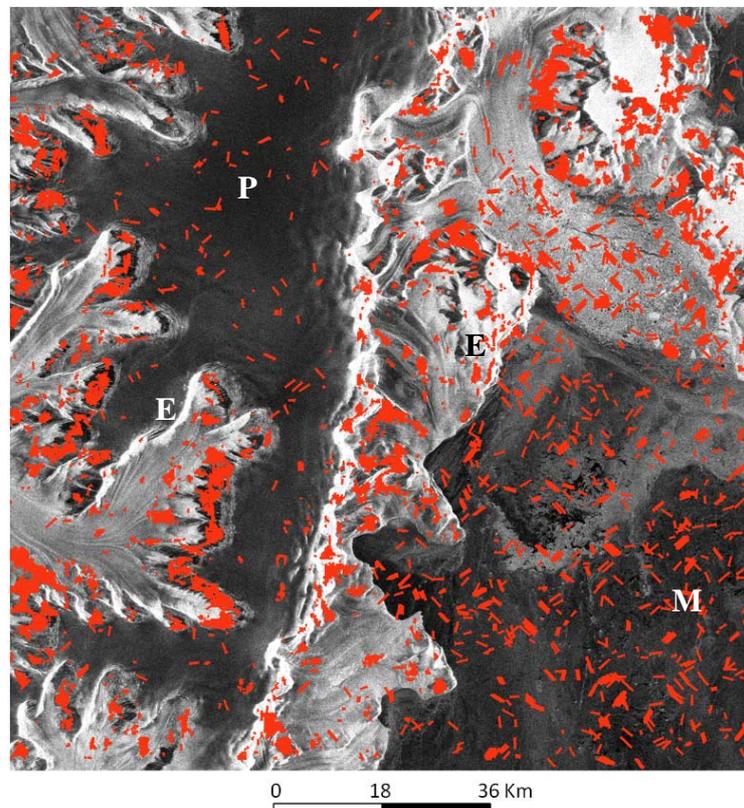


Figura 4.16 - Vetores gerados pelas imagens com uma filtragem e limiar igual a 7. Note a ocorrência de vetores com bons valores de *correlation strength* no mar (M), no platô (P) e nas encostas (E).

Apesar de ser um parâmetro para avaliar a confiabilidade, o *correlation strength* não elimina os vetores que não foram gerados por fendas. Alguns vetores detectados no mar, no platô e nas encostas, possuem *correlation strength* superior a 10. Se forem eliminados todos os valores menores que 10, muitos vetores calculados pelos deslocamentos das fendas serão eliminados, minimizando a quantidade de dados para avaliação. Além disso, um dos objetivos deste trabalho é comparar a sensibilidade do algoritmo à homogeneização da superfície das geleiras, independentemente do *correlation strength*.

Com o objetivo de analisar apenas os vetores obtidos pelas fendas, máscaras foram vetorizadas nas regiões de ocorrência de fendas (Figura 4.17) e os vetores gerados pelas imagens originais e pelas imagens Lee nessas regiões foram comparados.

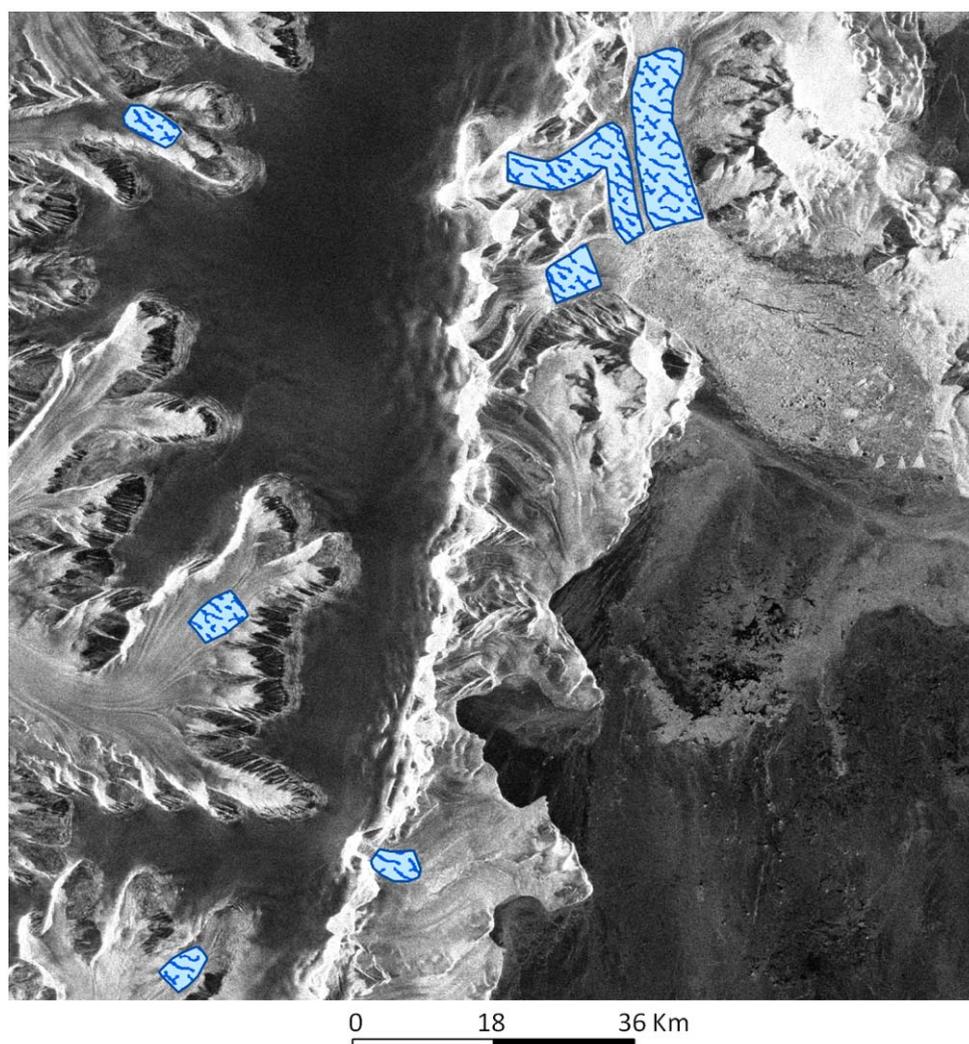


Figura 4.17 - Máscara sobre as regiões que contém fendas aparentes. As áreas em azul representam os locais onde há fendas aparentes.

As análises anteriores mostraram que o *correlation strength*, que é calculado por semelhanças entre os pixels, não atesta, pelo seu valor, que o deslocamento gerado foi dado por informações provenientes de fendas ou outras feições na superfície das geleiras que realmente se deslocaram durante o período entre as datas de obtenção das imagens. Assim, os vetores contidos nas regiões das máscaras foram avaliados e comparados, independentemente de seu *correlation strength*. Estes vetores também seguem as análises realizadas na seção anterior. Ou seja, todos possuem erro menor ou igual a 1. Numa visão geral da distribuição dos vetores, a figura 4.18 apresenta uma contribuição um pouco maior dos vetores gerados pelas imagens filtradas.

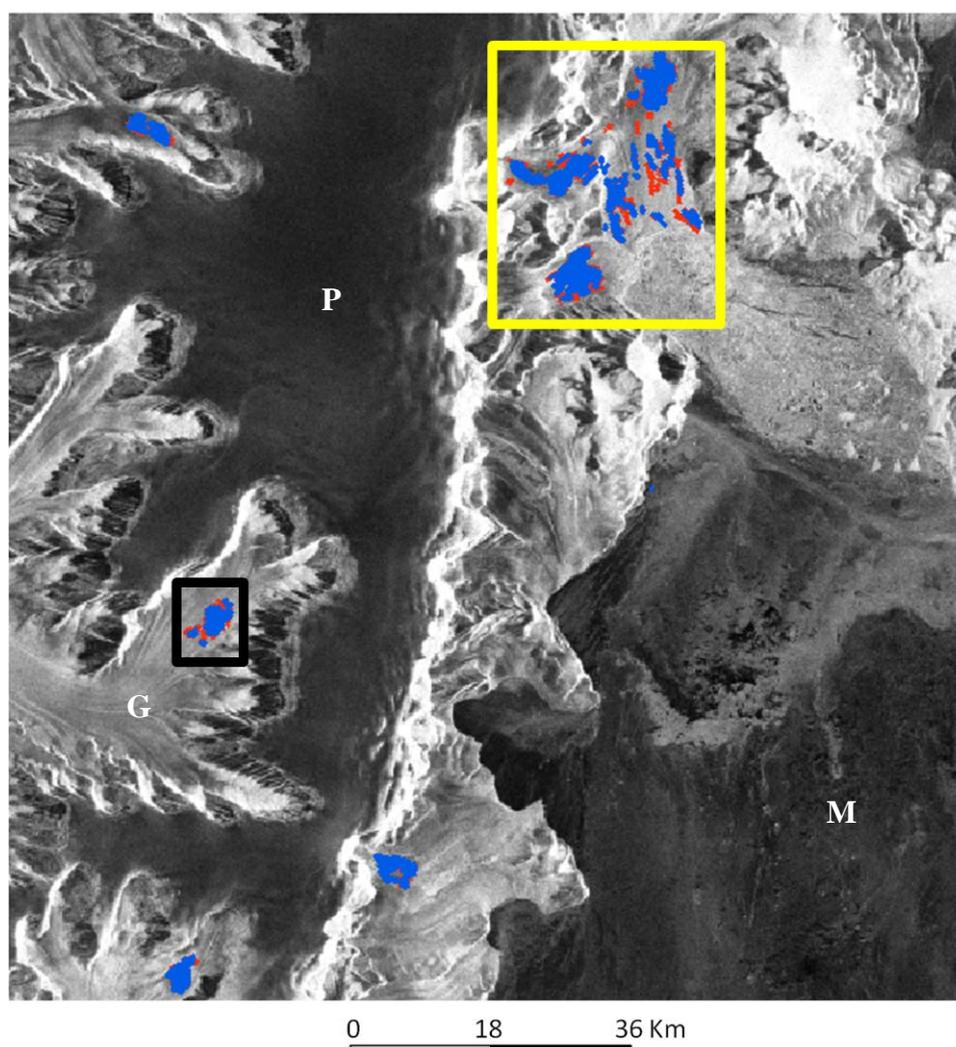


Figura 4.18 - Comparativo entre os vetores gerados pelas imagens originais e filtradas nas regiões de fendas. Os vetores azuis foram gerados pelas imagens sem filtragem e, os vermelhos, pelas imagens Lee. O quadro amarelo é apresentado em detalhe na figura 4.19 e o quadro preto na figura 4.20. Há a indicação da localização do platô (P), geleira (G) e mar (M).

Em todas as áreas de sobreposição da máscara, os vetores gerados pelas imagens Lee superaram o número de vetores gerados pelas imagens originais. Isso mostra que as imagens filtradas tornam as feições mais adequadas para o processamento no algoritmo de correlação cruzada e, conseqüentemente, geraram mais dados de deslocamento. Esse aumento encontrado no número de vetores de deslocamento, não encontrados pelas imagens originais, auxilia na análise do fluxo da geleira. Um exemplo disso é a porção superior direita da figura 4.18. Na visualização geral, já é possível notar que os vetores vermelhos aparecem em regiões onde os vetores azuis não estão presentes. Esse comportamento identificado comprova o aumento da eficiência do IMCORR em porções das geleiras onde dados sem filtragem não produziam resultados. É possível, então, afirmar que as imagens filtradas não só aumentam o número de detecções de deslocamento como também aumentam as áreas de detecção de deslocamento por fendas antes imperceptíveis pelo algoritmo de correlação cruzada. Para avaliar melhor esta comparação, a figura 4.19 mostra um detalhe do quadro amarelo da figura 4.18, onde há uma concentração de vetores.

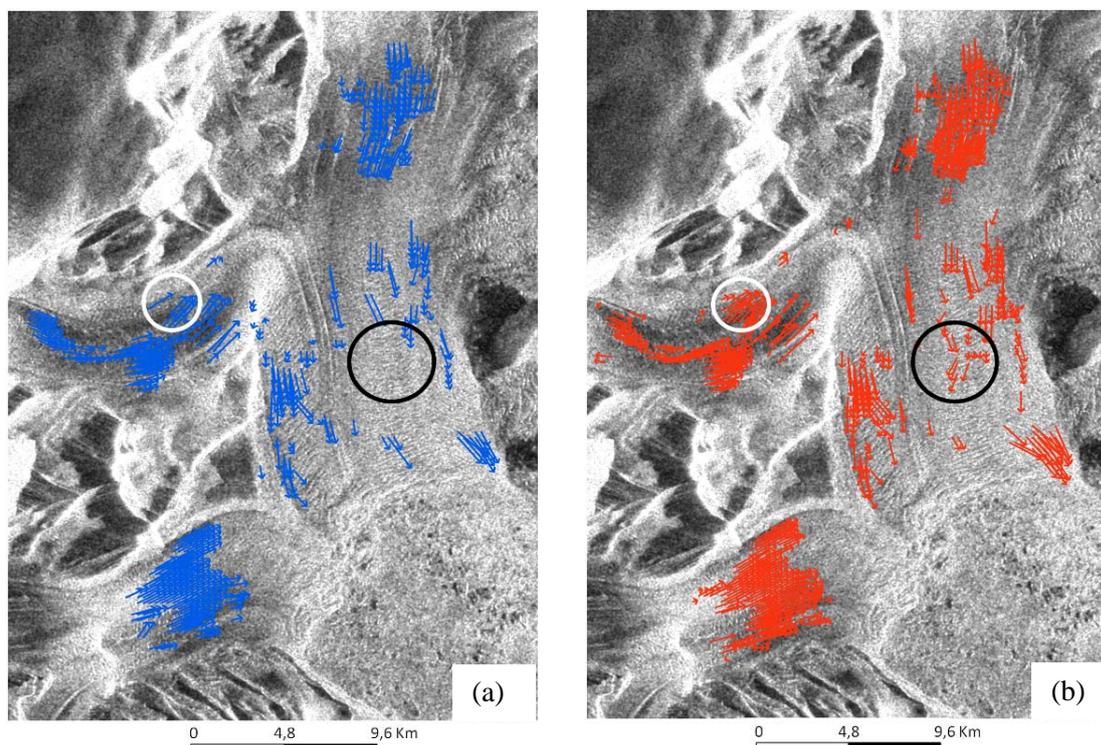


Figura 4.19 - Detalhe do canto superior da figura 4.18. É possível notar que os vetores gerados pelas imagens Lee (b) têm uma cobertura das fendas mais densa que os vetores gerados pelas imagens originais (a). Os círculos mostram áreas onde as imagens Lee geraram deslocamentos e as imagens originais não.

Analisando a figura 4.19 pode-se afirmar que a eliminação do *speckle* faz com que as fendas fiquem bem delineadas e, assim, o deslocamento de todo seu contorno é percebido pelo algoritmo. Este comportamento das imagens filtradas é bem ilustrado pela área do círculo branco. Enquanto um só vetor foi detectado pelas imagens originais, diversos foram calculados pelas imagens Lee. Além disso, na área do círculo preto é visível a distribuição, apenas, de vetores vermelhos, mostrando que as imagens filtradas aumentam as áreas de fendas com deslocamentos detectados.

Pode-se dizer que, além das detecções obtidas pelas imagens sem filtragem, as imagens Lee ampliam as informações sobre o fluxo da geleira, contribuindo com mais informações para pesquisas glaciológicas. Com comportamento parecido com o visualizado na figura 4.19, a figura 4.20 também apresenta o cálculo de deslocamentos pelas imagens Lee em regiões onde as imagens originais não calcularam deslocamentos.

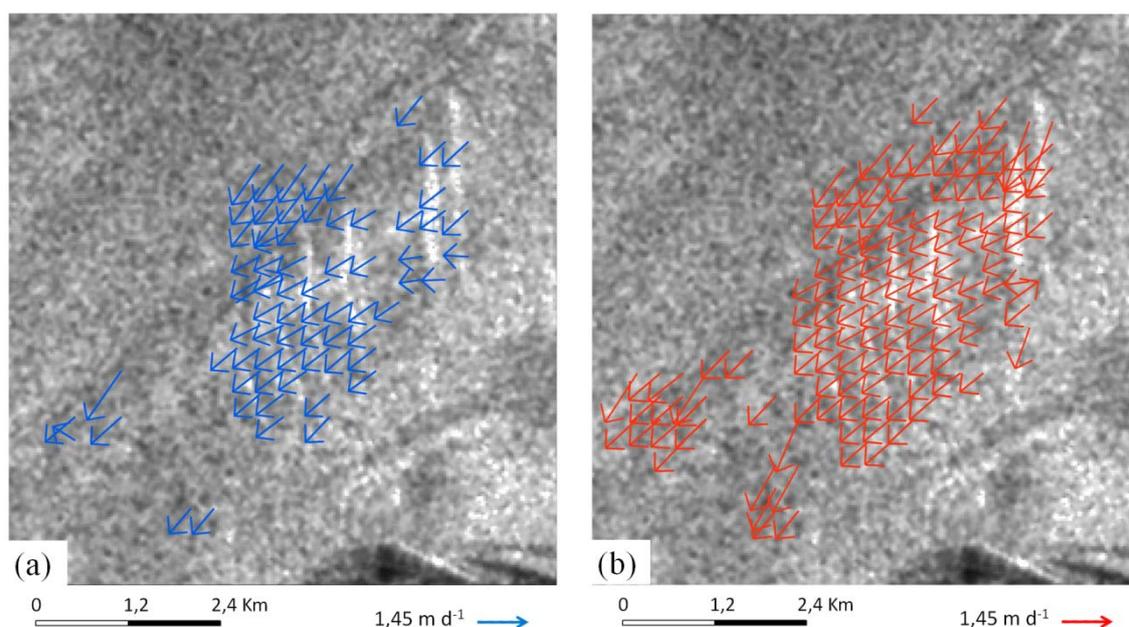


Figura 4.20 - Comparativo entre os vetores gerados pelas imagens originais e pelas imagens Lee para fendas largas. A quantidade de vetores vermelhos (calculados pelas imagens Lee) é superior à de vetores azuis (gerados pelas imagens originais). Assim como na figura anterior, há regiões em que há somente vetores vermelhos, mostrando mais uma vez que as imagens Lee aumentam as áreas de fendas com deslocamentos detectados.

A análise dos vetores contidos nas máscaras da figura 4.17, avaliados nas figuras 4.18 – 4.20, aprovou novamente a utilização das imagens com uma filtragem em algoritmos de correlação cruzada. Assim, pode-se realizar uma nova análise, baseada na estimativa de fluxo das geleiras, gerada pelas imagens Lee, e comparando com dados obtidos por outras pesquisas. Isto se faz necessário para atestar a veracidade das

informações geradas pelo algoritmo de correlação cruzada. Até o presente momento foram avaliados a melhora na quantidade de deslocamentos detectados, o *correlation strength*, como parâmetro para definir uma separabilidade entre os dados a partir da alta ou baixa semelhança entre as feições homólogas, e a resposta do IMCORR às regiões com fendas aparentes após a filtragem. Todas estas análises foram focadas na alteração dos números digitais associada a resultados de deslocamento e seus erros. No entanto, não há afirmações sobre a veracidade das informações encontradas, se elas realmente estão de acordo com o comportamento das geleiras da área de estudo. Assim, na próxima seção será avaliada a compatibilidade dos resultados com a realidade das geleiras.

#### 4.4. 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, figura 3.5) foram escolhidas. A escolha dessa área foi baseada no fato de que informações glaciológicas sobre o fluxo destas geleiras estão disponíveis em artigos científicos. A área 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 4.21.

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, na frente das geleiras D-B-E (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003). Isso evidencia a ocorrência de um evento de surge<sup>1</sup> (RIGNOT *et al.*, 2004; FERRIGNO *et al.*, 2006), detectado pelo aumento da velocidade entre 1995 e 1999 (ROTT *et al.* 2002), da frente das geleiras

---

<sup>1</sup> Aceleração abrupta do fluxo de uma *geleira*, acompanhado pelo avanço rápido e brusco (alguns quilômetros) do término (SIMOES, 2004)

(DE ANGELIS & SKVARCA, 2003) e pela considerável perda de massa (RACK & ROTT, 2006).

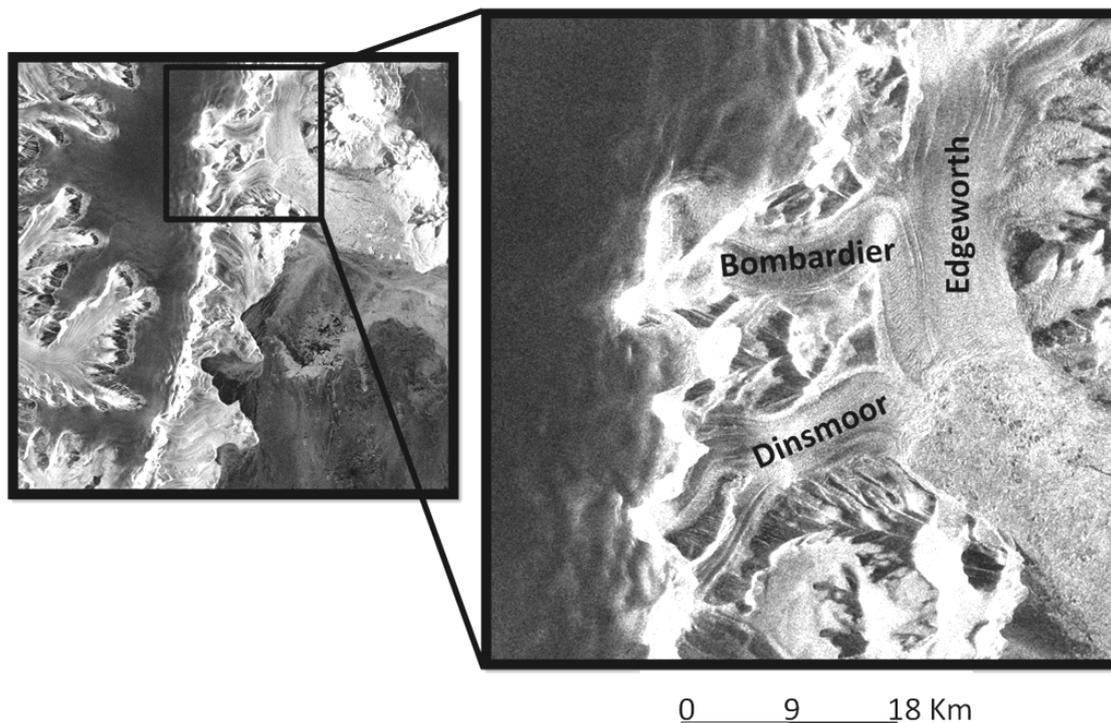


Figura 4.21 - Detalhe da região das geleiras Dinsmoor, Bombardier e Edgeworth. As três geleiras foram escolhidas para análise glaciológica dos resultados da dissertação, pois existem sobre suas condições dinâmicas artigos científicos publicados.

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. Essas velocidades foram obtidas para um ponto distante 2 km da frente das geleiras a partir de interferogramas gerados por imagens dos sensores AMI SAR das plataformas ERS-1 e ERS-2, além de informações sobre a topografia da península, obtidas por um modelo digital de elevação desenvolvido por Liu *et al.* (1999). A velocidade de 2,9 m.d<sup>-1</sup> foi detectada a 6 km da frente das geleiras. Os interferogramas utilizados para a extração da velocidade de fluxo dessas geleiras foram gerados com imagens obtidas num intervalo de 1 dia, o que resulta em pouca alteração da superfície, gerando uma boa correlação entre as imagens. Além disso, nas regiões em que a correlação não era satisfatória (*i.e.*, áreas com gelo muito fraturado, com fendas múltiplas em diversas direções), foi utilizado *speckle tracking* (ROTT *et al.*, 2002). A utilização do *speckle tracking* em regiões com grandes deslocamentos apresenta bons resultados, pois o intervalo de

tempo pode causar uma decorrelação entre as imagens, impossibilitando o cálculo das diferenças de fase necessárias à geração de interferogramas (LIU *et al.*, 2007).

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. A metodologia utilizada para medição da velocidade de fluxo das geleiras se baseou na análise de deslocamento de feições a partir de imagens de sensores diferentes (*i.e.*, imagens ETM+ e ASTER obtidas respectivamente em 2000 e 2001). Além disso, os autores relataram uma redução abrupta na extensão da língua de gelo, constatada posteriormente em mapeamento realizado com GPS em março de 2002. De Angelis & Skvarca (2003) não associam o comportamento do fluxo dessas geleiras à desintegração da Larsen A. Atribuem ao comportamento das massas de gelo a lubrificação e a 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 pelo 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 sua frente não bloqueadas pela plataforma aceleraram logo após a desintegração dela e nos anos seguintes, enquanto as duas geleiras que têm frente junto a 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 ocasionado pela desintegração da Larsen A.

Os dados obtidos pelo processamento das imagens ASAR, após serem separados pela máscara apresentada na figura 4.17, tiveram vetores com *correlation strength* inferior a 5 eliminados. Este *threshold* visa considerar apenas os vetores com maior similaridade entre feições homólogas, já que não será necessário localizar

deslocamentos gerados pelas fendas, apenas se busca avaliar vetores bem determinados. Para comparação com dados pré-existentes dos deslocamentos das geleiras D-B-E, todas as distâncias medidas a partir da frente dessas geleiras se referem à imagem de outubro de 2004. Para facilitar a discussão sobre as velocidades médias do fluxo glacial, as áreas com concentração de vetores de deslocamento foram associadas a siglas. Na geleira Edgeworth, apenas uma região possui concentração de vetores, tendo sido denominada E1. Na geleira Dinsmoor há duas áreas de concentração dos vetores, sendo D1 a mais próxima à frente da geleira e D2 a mais distante. De forma análoga à denominação das áreas da geleira Dinsmoor, as duas regiões com grande incidência de vetores na geleira Bombardier foram denominadas B1 e B2, sendo a primeira a mais próxima da frente da geleira. A figura 4.22 apresenta os vetores restantes para as geleiras D-B-E e a localização de cada conjunto de vetores. As distâncias de cada área estão dispostas na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Distâncias das áreas de concentração de vetores nas geleiras D-B-E à frente das geleiras em outubro de 2004. As medidas foram medidas na linha central de fluxo das geleiras.

Área	Distância (km)
D1	6,0
D2	17,0
B1	6,5
B2	21,0
E1	16,0

Os vetores de cada área foram selecionados e as médias dos módulos dos deslocamentos foram calculadas para vetores obtidos com as imagens originais e com imagens Lee. A tabela 4.7 apresenta os resultados das médias dos módulos dos vetores.

Tabela 4.7 - Médias dos módulos dos vetores para cada região de concentração de deslocamentos detectados.

Área	Média (pixels)	
	Original	Lee
D1	21,493	21,071
D2	10,725	10,783
B1	25,325	24,387
B2	19,785	17,683
E1	18,624	18,065

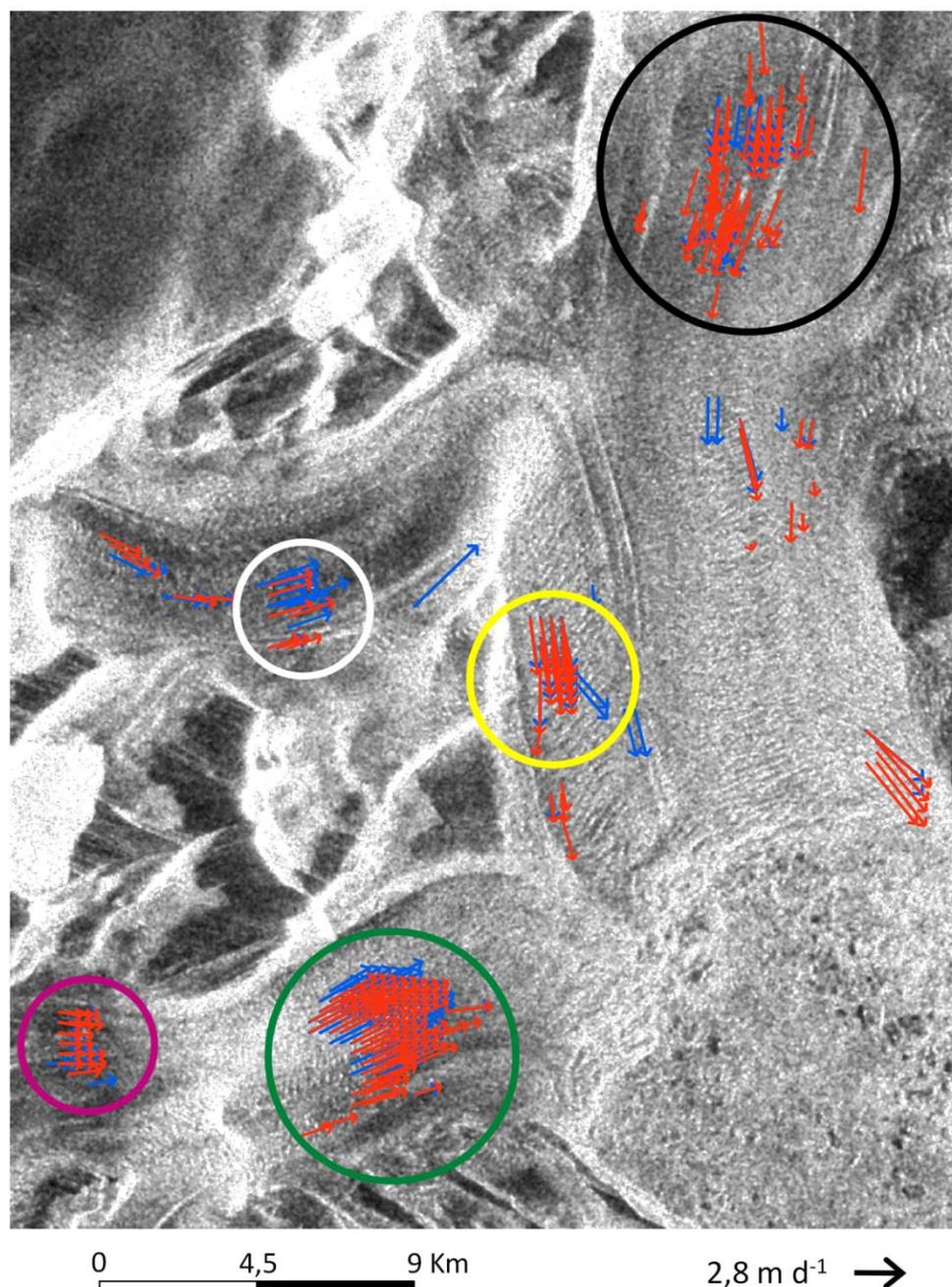


Figura 4.22 - Vetores de deslocamento a serem comparados com dados glaciológicos publicados. Assim como nas figuras anteriores, os vetores em azul foram gerados pelas imagens originais e os vetores em vermelho pelas imagens Lee. Os círculos sobre a imagem apresentam as áreas onde há maior concentração de vetores, causadas pela presença de fendas bem definidas. Para facilitar a identificação das áreas de concentração de vetores, os círculos serão associados a siglas. O círculo preto representa a região E1. Os círculos amarelo e branco mostram as áreas B1 e B2, respectivamente. Em verde, tem-se o círculo da região D1 e, em rosa, da região D2. As distâncias das áreas até a frente da geleira podem ser consultadas na tabela 4.6.

Exceto pela média da área B2, todas as demais apresentaram diferenças inferiores a 1 pixel entre os vetores calculados com as imagens originais e os calculados com imagens filtradas, o que mostra compatibilidade entre as informações geradas pelas

diferentes imagens. Assim, é possível afirmar que, apesar das diferenças na distribuição dos vetores, a filtragem gera valores próximos aos obtidos pelas imagens originais, não havendo perdas. Transformando os valores encontrados, em pixels, para o período inteiro (245 dias) em velocidades por dia, temos os valores da tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Valores das velocidades das áreas em metros por dia.

Área	Velocidade (m d <sup>-1</sup> )	
	Original	Lee
D1	2,6	2,6
D2	1,3	1,3
B1	3,1	3,0
B2	2,4	2,2
E1	2,3	2,2

Os valores encontrados para as áreas E1, D1 e B2 são próximos do valor encontrado por De Angelis & Skvarca (2003), ou seja, 2,4 m d<sup>-1</sup>. No entanto, esta velocidade foi medida a 4 km da linha de frente das geleiras em setembro de 2001, sobre a geleira Edgeworth. A medida mais próxima da obtida por De Angelis & Skvarca (2003) é a velocidade da área B1, situada na região de encontro das geleiras Edgeworth e Bombardier. O valor encontrado para a velocidade em B1 é de 3 m d<sup>-1</sup>, próximo dos 2,4 m d<sup>-1</sup> medidos no trabalho anteriormente citado. Outra área que possui distância próxima é a D1, com velocidade de 2,6 m d<sup>-1</sup>. A figura 4.23 apresenta os vetores das geleiras D-B-E em cores diferentes, apresentando valores iguais ou menores que o encontrado por De Angelis & Skvarca (2003) e valores maiores.

A figura 4.23 mostra velocidades até 2,4 m d<sup>-1</sup> localizadas nas regiões mais distantes das frentes das geleiras e, nas proximidades da frente, velocidades mais altas que as encontradas em 2003. Esse comportamento é compatível com as hipóteses lançadas por De Angelis & Skvarca (2003). Após a desintegração da Larsen A, ocorrida em 1995, houve forte aceleração no fluxo das geleiras D-B-E, saltando a velocidade de 1,5 m d<sup>-1</sup>, em 1995, para 6 m d<sup>-1</sup>, em 1999. A retenção da velocidade das geleiras, exercida pela Larsen A, mostrou seu efeito nos quatro anos seguintes a sua desintegração, detectada pela aceleração observada. Já entre 1999 e 2001 não foi constatada aceleração, mostrando que a supressão da barreira natural existente (*i.e.*, a desintegração da plataforma) causou uma mudança na dinâmica das geleiras tributárias (ROTT *et al.*, 2002), mas que este não seria o único fator (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003).

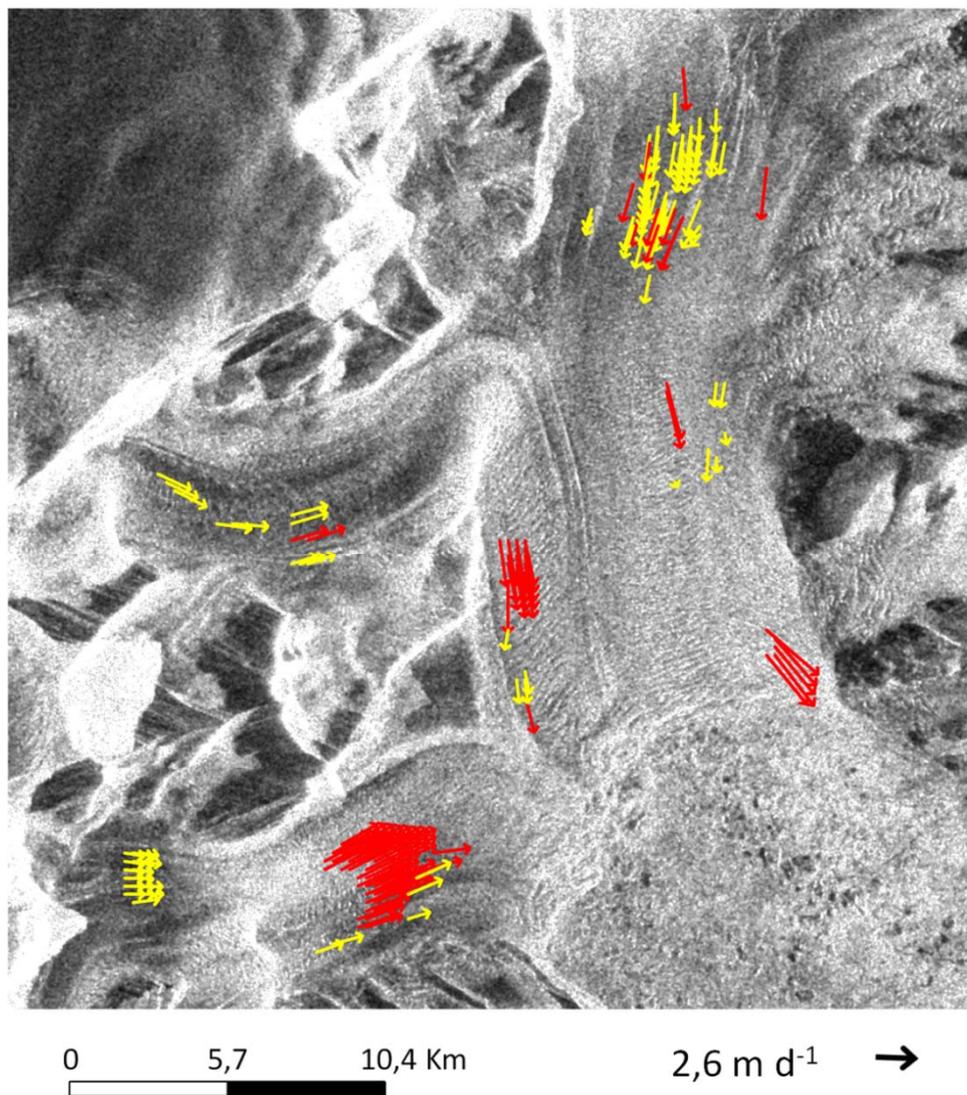


Figura 4.23 - Vetores classificados por sua velocidade. Os vetores amarelos se deslocam com velocidade até  $2,4 \text{ m d}^{-1}$ . Já os vetores que estão em vermelho, possuem velocidade entre  $2,5$  e  $4,5 \text{ m d}^{-1}$ .

O aumento da temperatura na região poderia ser um dos fatores do aumento da velocidade do gelo nas partes próximas da frente da geleira. Com temperaturas médias mais altas, um volume maior de neve será derretida, percolando por fendas, drenos de geleiras (*i.e.*, *moulins*) e canais englaciais, chegando à base e lubrificando a interface gelo-rocha, causando um aumento na velocidade das geleiras (HAMBREY, 1994; PATERSON, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 1998; HAMBREY & ALEAN, 2004). Além disso, deformações basais podem ocorrer, pois um aporte maior de água chegará aos sedimentos subglaciais, tornando ainda mais aleatórias essas deformações.

## Capítulo 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

As filtrações corresponderam às expectativas iniciais, pois ocorreu eliminação do *speckle* e sutil homogeneização das feições, delineando bem as fendas sem alterar abruptamente a imagem (vide figuras 4.1 e 4.2). Isso mostra que a opção pelo filtro Lee foi adequada. No entanto, a filtração 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 filtração (3 x 3) também atingiu seu propósito, ou seja, a suavização causada por este tamanho de janela fez com que as imagens com uma filtração 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 filtração 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 três análises (visual, de distribuição e de qualidade dos vetores), conclui-se que imagens de radar com uma só filtração 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 utilizando o número de *looks* há um 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  $\sigma_v^2 = 1/L$ .

A utilização do *correlation strength* como parâmetro de seleção entre os vetores gerados por fendas e os gerados por outras feições não surtiu bons resultados. Quando aplicado aos resultados da cena inteira, a utilização de limiares nos valores de *correlation strength* não consegue eliminar de forma eficaz os falsos vetores detectados pelo IMCORR, restando ainda vetores no mar ou nas encostas. Contudo, quando aplicado aos deslocamentos que foram calculados nas áreas de fendas das geleiras (*e.g.*, como nos vetores contidos nas máscaras da figura 4.17), este parâmetro apresentou bons resultados. Assim, a análise dos deslocamentos em uma cena inteira gera vetores em excesso e não há um parâmetro que seja capaz de eliminar as informações não pertinentes ao estudo da dinâmica das geleiras. Dessa forma, o cálculo e análise dos resultados são mais proveitosos quando realizados nas regiões das geleiras onde ocorrem feições bem marcantes (*e.g.*, campos de fendas), onde se sabe quais feições sensibilizaram o algoritmo de correlação cruzada e onde o *correlation strength* contribui na seleção dos vetores mais relevantes para o estudo.

Nas áreas próximas da frente das geleiras D-B-E, De Angelis & Skvarca (2003) relataram velocidade de 2,4 m d<sup>-1</sup>. Usando a metodologia desta dissertação (*i.e.*, 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 m d<sup>-1</sup>. O aumento da velocidade 2000 e 2001 (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003) e 2004 e 2005 (desta dissertação) varia entre 0,1 e 2,15 m d<sup>-1</sup>. Levando em consideração as informações publicadas por Rott *et al.* (1998) e IPCC (2007), imagina-se que, pela tendência de aumento da temperatura atmosférica média anual, as geleiras da região norte da Península Antártica estão sofrendo com o derretimento de sua superfície e percolação. Assim, explica-se o aumento de velocidade registrado entre as observações de De Angelis & Skvarca (2003) e as desta dissertação, reforçando as hipóteses desses autores, que associam o fluxo das geleiras D-B-E ao deslizamento basal.

Unindo as informações de Rott *et al.* (2002), De Angelis & Skvarca (2003) e as geradas nesta dissertação, 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  $6 \text{ m d}^{-1}$  (ROTT *et al.*, 2002), seguida por um período sem aceleração e de perda de extensão da língua de gelo (DE ANGELIS & SKVARCA, 2003) e um leve aumento na velocidade, em até  $2,15 \text{ m d}^{-1}$  (conforme esta dissertação). Conclui-se, dessa forma, que a desintegração da Larsen A causou um desequilíbrio no balanço de massa das geleiras, ocasionando um evento de surge, onde a massa de gelo na área de acumulação flui rapidamente para a área de ablação perto do mar. Após o aumento da velocidade e a perda de massa, as geleiras D-B-E voltaram ao equilíbrio. Contudo, o deslizamento basal como resposta ao aumento de 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.

## ***Referências Bibliográficas***

---

ARIGONY-NETO, J. **Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula: a centerline approach combining satellite and GIS data.** 2006. 159 f. Tese (Doutorado) - Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 2006.

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.

BENN, D.I., EVANS, D.J.A. **Glaciers and Glaciation.** Paris: Arnold, 1998, 734pp.

BENN, D. I.; WARREN, C. R.; MOTTRAM, R. H. Calving processes and the dynamics of calving glaciers. **Earth-Science Reviews**, v.82, p. 143-179, 2007

BENNETT, M. R.; GLASSER, N. F. **Glacial Geology: ice sheets and landforms.** Chichester: Wiley, 1996. 364p.

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

BINDSCHADLER, R. Tracking subpixel-scale sastrugi with advanced land imager. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1373-1377, 2003.

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.

EUROPA. European Spatial Agency. **BEST: Basic Envisat SAR Toolbox – User Manual version 4.0.5, 2006**. Disponível em: <<http://earth.esa.int/services/best/documentation>>. Acesso em: 18 jan. 2009.

EUROPA. European Spatial Agency. **ESA – Earthnet: History**. Disponível em: <<http://envisat.esa.int/category/index.cfm?fcategoryid=87>>. Acesso em: 26 jun. 2009.

EUROPA b. European Spatial Agency. **ESA Earthnet: Envisat Instrumets**. Disponível em: <<http://envisat.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=3762>>. Acesso em: 26 jun. 2009.

EUROPA c. European Space Agency. **ASAR Product Handbook**. Disponível em: <<http://envisat.esa.int/handbooks/asar/CNTR.htm>>. Acesso em: 28 jun. 2009.

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.

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.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. da UFPR, 1994. 319 p.

HALL, D. K.; MARTINEC, J. **Remote Sensing of Ice and Snow**. Cambridge: Chapman and Hall, 1985. 189 p.

HAMBREY, M. **Glacial Environments**. London: UCL Press, 1994. 296p.

HAMBREY, M.; ALEAN, J. **Glaciers**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 2ed. 376p.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar**. New York: John Wiley Sons, 1998. 3ed. 896p.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, vol. 57, p. 356-370, 2003.

HUGHES, T. Calving Bays. **Quaternary Science Reviews**, v.21, p. 267-282, 2002.

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 H.L. Miller (eds.)]. New York: Cambridge University Press, 996 p. 2007.

JANÁ, R. **Digital elevation models and delineation of antarctic glaciers using stereo capabilities of ASTER satellite images**. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, 2006.

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 adaptive speckle filter for ultrasound image. 2007. **9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications**, Sharjah, p. 1-4, 12-15 fev. 2007

LEE, J. S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, PAMI-2, n. 2, 1980.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and image interpretation**. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763p.

LIU, H.; ZHAO, Z.; JEZEK, K. C. Synergistic fusion of interferometric and speckle-tracking methods for deriving surface velocity from interferometric SAR data. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 4, n. 1, p. 102-106, 2007.

LOPES, A.; TOUZI, R.; NEZRY, E. Adaptive Speckle Filter and Scene Heterogeneity. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, n. 6, p. 992-1000, 1990

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.

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.

MASSOM, R.; LIUBIN, D. **Polar Remote Sensing Volume II: Ice Sheets**. Berlin: Springer-Praxis, 2006. 426p.

MCVAY, Kenneth R.. **Flow Vectors 1.0**. Disponível em: <<http://arcscrips.esri.com/details.asp?dbid=10953>>. Acesso em: 12 jun. 2009.

MEADOWS, P.; WRIGHT, P. **ASAR IMP Image Quality (VV Polarization)**. Disponível em <[http://enisat.esa.int/calval/proceedings/asar/asar\\_13.pdf](http://enisat.esa.int/calval/proceedings/asar/asar_13.pdf)>. Acesso em 17 jun. 2009.

MEIER, M. F.; POST, A. Fast tidewater glaciers. **Journal of Geophysical Research**, v.92, n.B9, p. 9051-9058, 1987.

NSIDC - NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **IMCORR Software**. Disponível em: <<http://nsidc.org/data/velmap/imcorr.html#BIB>>. Acesso em: 17 out. 2008.

PATERSON, W. S. B. **The Physics of Glaciers**. Oxford: Pergamon, 1994. 3ed. 480p.

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.

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.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 340p.

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 Osbornebreen, 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.; NAGLER, T.; SKVARCA, P. Climatically induced retreat and collapse of northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, v.27, p. 86-92, 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.; 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.

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.

SIMOES, 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.

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

SKOLNIK, M. **Radar Handbook**. New York: McGraw-Hill, 1990. 2 ed. 735p.

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.