

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

Estudo da dinâmica de geleiras de maré do Nordeste da Península Antártica através de imagens SAR de alta resolução

Virginia Luiz Cerqueira Santos

Orientador:

Dr. Jorge Arigony Neto

Banca examinadora:

Dra. Rosemary Vieira

Dr. Glauber Gonçalves

Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior

Virginia Luiz Cerqueira Santos

Estudo da dinâmica de geleiras de maré do Nordeste da Península Antártica através de imagens SAR de alta resolução

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito para obtenção do Título de Mestre em Oceanografia Física, Química e Geológica pelo Programa de Pós Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica da Universidade Federal do Rio Grande.

Orientador:

Dr. Jorge Arigony Neto

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao sol que derrete a neve, que derrete as plataformas de gelo, que acelera as geleiras, que aumenta a lubrificação basal das geleiras, que acelera mais as geleiras...que me trouxe até aqui.

Agradeço muito a muita gente. Esse, sinceramente, é um trabalho que não teria terminado sem o apoio de várias pessoas.

Agradeço aqui no alto, para não demorar mais, a todos os membros da banca pela compreensão e pelas contribuições que virão.

Agradeço separadamente ao meu orientador, prof. Jorge Arigony por me ensinar, por me incentivar, por me entender e por acreditar na minha capacidade.

Aos meus amigos, Christian e Adriano, que participaram muito de toda minha experiência de fazer um mestrado. Foram muito mais que jovens descontraídos, obrigadão aos dois.

Obrigada Mami, Cat e Guto. Família, família...sempre é o maior apoio.

Obrigada ao pessoal todo do Lacrio, é sempre bom saber que você trabalha com pessoas boas e dispostas a trocar conhecimento, qualquer que seja o conhecimento.

Obrigada a todos os amigões que dividiram os bons momentos de Cassino e principalmente aqueles que compartilharam os momentos que não foram só alegria.

Agradeço muito aos amigos que compreenderam que o fim (longo e duradouro) do meu mestrado não foi a parte mais fácil da minha vida...hehehe...

Amigasisters do meu coração: Má, Amálinha, Gabeee, Paula, Mariele, Aline, Thaís, Ginger, Loli, Pri Laura, Mari, Benja muito obrigada pela companhia, ajudinhas, surfzinhos, alimentos, festinhas, conversonas, longe ou perto vocês são o máximo.

E certamente, eu devo ter esquecido de registrar aqui alguém muito importante...garanto que não é ingratidão, é só prazo esgotado. Especialmente para esses casos vou colocar mais um: obrigada!

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, em curta escala temporal, a dinâmica de algumas geleiras de maré da Península Antártica. Velocidades de fluxo superficial das geleiras Drygalski, Hektoria, Green, Evans, Punchbowl, Jorum, Crane, Mapple e Melville foram estimadas através do calculo de correlação cruzada entre pares de imagens de do sensor TerraSAR-X. Os dados de velocidade das geleiras foram relacionados aos dados de temperatura do ar medidos por uma estação meteorológica automática localizada na plataforma de gelo Larsen C, a cobertura de gelo marinho na região e às variações na posição das frentes das geleiras. Os resultados demonstram uma boa relação entre as variáveis ambientais analisadas e as velocidades de fluxo. A geleira Drygalski apresentou a maior velocidade de fluxo, 6,41 m d⁻¹, calculada sobre região frontal com imagens do mês de janeiro de 2008. As variações de velocidade registradas na Drygalski entre novembro de 2007 e fevereiro de 2008 indicam a complexidade que existe nas conexões atmosfera-criosfera-oceano, na região nordeste da Península Antártica. A maior variação de velocidade de fluxo foi encontrada para as geleiras Hektoria e Green. Para essas geleiras, foi possível verificar um forte sinal sazonal, pois velocidades estimadas para o período do fim do verão austral 2007/2008 estavam mais de 10% acima das velocidades calculadas ao fim do inverno de 2008. Este sinal também ficou evidente na posição da frente dessas geleiras, que avançou cerca de um quilometro entre abril e outubro de 2008.

ABSTRACT

This work's main goal was to evaluate, in a short time scale, the dynamics of some tidewater glaciers of the Antarctic Peninsula. Superficial flow velocities of Drygalski, Hektoria, Green, Evans, Punchbowl, Jorum, Crane, Mapple and Melville glaciers were estimated through cross correlation between pairs of TerraSAR-X images. Glacier velocity data were related to air temperature data (measured by Larsen Automatic Weather Station), to information on sea ice coverage at the region, and to the position of the glacier front. Results demonstrated a good relationship between the analyzed environmental data and flow velocities. The Drygalski glacier presented the highest velocity, of 6.41 md⁻¹, calculated over the frontal region in January 2008. Velocity variations registered at Drygalski from November 2007 to February 2008 indicate the complexity of air-glacier-ocean connections. The largest velocity variation was found for the Hektoria and Green glaciers where it was possible to verify a strong seasonal signal; velocities calculated for the end of summer 2008 were over 10% higher than the ones calculated for the end of winter 2008. This signal was also evident at the glacial front, which advanced approximately one kilometer between April and October 2008.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	7
Lista de tabelas	12
Capítulo 1 - Introdução	13
1.1 Objetivos	15
1.2 Área de estudo	16
Capítulo 2 - Monitoramento de geleiras	20
2.1 Dinâmica das geleiras de maré	20
2.2 Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento glacial	24
Capítulo 3 - Material e Métodos	26
3.1 Imagens SAR	26
3.2 Imagens TerraSAR	30
3.3 Dados complementares	35
3.4 Pré-processamento das imagens	35
3.5 Algoritmo de correlação cruzada	37
3.6 Pós-processamento	40
Capítulo 4 - Resultados e Discussão	43
4.1 Geleira Drygalski	43
4.2 Geleiras Hektoria, Green, Evans e Punchbowl	57
4.3 Geleiras Jorum, Crane, Mapple e Melville	69
Capítulo 5 - Conclusões	
Referências Bibliográficas	

Lista de Figuras

- Figura 1. Mapa da Antártica, ilustrando a localização da Península Antártica. Adaptado de Turner et al., (2009).
- Figura 2. Área de estudo deste trabalho, representada através de cena de 6 de março de 2008 do sensor ASAR do satélite Envisat.No quadro acima as letras A, B e C indicam a localização das plataformas de gelo Larsen A, B, C, respectivamente. Na imagem central, as linhas coloridas indicam a posição da linha de frente da plataforma ou geleira no ano descrito. As letras pretas destacam a posição das geleiras alvos deste estudo, D-Drygalski,H-Hektoria, G-Green, E-Evans, J-Jorum, C-Crane, e Mv-Melville. Adaptado de Rott *et al.*, 2011. ___________18
- Figura 3. Esquema dos componentes do balanço de massa de uma geleira. Adaptado de UNESCO, 2011. ________20
- Figura 4. Duração média anual de derretimento durante os verões austrais de 1978 a 2004. Fonte: LIU; WANG; JEZEK, 2006. ______21
- Figura 5. Extensão e concentração do gelo marinho no continente antártico.a) setembro de 2008. b) fevereiro de 2009. Fonte: NSIDC, 2012.
 23
- Figura 6. Esquema representando a transparência da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda. Faixas escuras são opacas, impedem a transmissão da onda, as faixas claras são transparentes, não atenuam o sinal. Os radares ativos operam em comprimentos de onda na faixa dos centímetros Fonte: Rees (2001). ______ 27
- Figura 7. Características do imageamento de radares de visada lateral. Fonte: NRCAM/CCSR (2007). _____27
- Figura 8. Distorções das imagens adquiridas com visada lateral. (a) Distorção na direção de alcance; (b) encurtamento da encosta; e (c) sombra. Fonte: Rees (2001). _____ 28
- Figura 9. a) Imagem TerraSAR-X ilustrando um efeito de distorção do relevo e; b) o speckle.
 29
- Figura 10. Modos de imageamento do Terrasar-X. Fonte: Infoterra (2009). ______ 31
- Figura 11. Localização da área de estudo na porção nordeste da Península Antártica, com destaque para a posição das cenas TerraSAR-X utilizadas neste trabalho. Base cartográfica: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA; BINDSCHADLER et al., 2008).
- Figura 12. Cenas TerraSAR-X utilizadas neste trabalho. Em destaque, os retângulos coloridos representam os limites das sub-cenas geradas para extração dos vetores de deslocamento das geleiras.Geleiras analisadas: Dry-Dryagalski, Hek-Hektoria, G- Green, Ev-Evans, PU- punchbowl, J-Jorum, C-Crane, Ma- Mapple e Me-Melville. _______37
- Figura 13. Elementos do cálculo da correlação cruzada entre 2 imagens: a) janela de referência na imagem 1; b) janela de busca na imagem 2; c) ponto central da janela de busca coincidente com o ponto central da janela de referência; d) deslocamento (R) na região de máxima correlação.

- Figura 15. Exemplo de campo de velocidade gerado a partir das velocidades calculadas para a Geleira Drygalski, valores não filtrados, apresentados sobre a imagem TSX de 21 de novembro 2007. ______ 42
- Figura 16. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 10 e 21 de novembro de 2007, sobre a imagem TerraSAR-X de 10 de novembro de 2007 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,54 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.
- Figura 17. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 02 e 13 de dezembro de 2007, sobre a imagem TerraSAR-X de 13 de dezembro de 2007 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados na imagem maiores que 6,63 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha. ______ 47
- Figura 18.Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 04 e 15 de janeiro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 15 de janeiro de 2008 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,66 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha. ______ 48
- Figura 19. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 06 e 17 de fevereiro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 17 de fevereiro de 2008 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,43 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha. ______ 49
- Figura 20. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e Transversal (C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais da geleira Drygalski, fr-frente, ct-centro, tp-topo. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR de 10 de novembro de 2008.
- Figura 21. Perfis longitudinais (a) e transversais (b) de velocidade superficial da geleira Drygalski para os 4 períodos analisados. ______51
- Figura 22. Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o calculo da velocidade de fluxo superficial da geleira Drygalski. Os períodos abrangem a variação de temperatura do final da primavera de 2007 e de todo o verão de 2008.
- Figura 23. Variações na posição da frente da geleira Drygalski entre novembro de 2007 e fevereiro de 2008. No fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 10 de novembro de 2007.______54
- Figura 24. Série de imagens MODIS, da região noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do cálculo de velocidade de fluxo da geleira. A seta vermelha aponta para a geleira Drygalski.

- Figura 25. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Hektoria (H), Green (G), Evans (E) e Punchbowl (P) durante o período entre 23 de março e 03 de abril de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,29 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.
- Figura 26. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Hektoria (H), Green (G), Evans (E) e Punchbowl (P) durante o período entre 18 e 29 de outubro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,01 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.
- Figura 27. Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o calculo da velocidade de fluxo superficial da geleira Hektoria, Green, Evans e Punchbowl. O período de março esta relacionado com os efeitos das altas temperaturas de verão, enquanto o segundo período, de outubro de 2008 se conecta com os efeitos do inverno, temporada extensa com temperaturas mais baixas.
- Figura 28. Localização dos perfis longitudinais da geleira Hektoria (A-B), da geleira Green (E-F), do perfil transversal na zona frontal das duas geleiras(C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais das geleiras Hektoria e Green. Hfr-frente Hektoria, Hct-centro Hektoria, Htp-topo Hektoria, Gct-centro Green, Gfr-frente Green. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem Terrasar de 23 de março de 2008.
- Figura 29 Perfis longitudinais de velocidade superficial das geleiras Hektoria (a) e Green (b) nos 2 períodos analisados.
- Figura 30. Perfil transversal de velocidade superficial das geleiras Hektoria e Green, próximo a linha de frente onde os fluxos destas duas geleiras encontram-se unidos, para os 2 períodos analisados. ______63
- Figura 31. Variações na posição da frente das geleiras Hektoria-Green, entre março e outubro de 2008. Ao fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 23 de março de2008. ______64
- Figura 32. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) sobre a geleira Evans. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008.
 66
- Figura 33. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Evans para
 os 2 períodos analisados. ______66
- Figura 34. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) da geleira Punchbowl. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008. _______67
- Figura 35. Perfis longitudinal (a) e transversa l(b) de velocidade superficial da geleira Punchbowl para os 2 períodos analisados. ______68

- Figura 36. Série de imagens MODIS da região e noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do calculo de velocidade de fluxo das geleiras Hektoria, Green, Evans e Punchbowl. A seta vermelha aponta para a montante das geleiras Hektoria e Green. ______68
- Figura 37. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Jorum-J, Crane-C, Maple-Ma e Melville-Me, entre o período entre 13 de outubro de 2008 e 24 de outubro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 13 de outubro de2008. As áreas azuis encontradas em toda extensão das geleiras Mapple e Mellvile e nas áreas marginais da Crane e Jorum representam a superfície com velocidades menores que 0,6 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 4,83 m d⁻¹, valor máximo encontrado na frente da geleira Crane, são referentes a vetores encontrados na região marinha_______70
- Figura 38. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Jorum-J, Crane-C, Maple-Ma e Melville-Me, entre o período entre 24 de outubro de 2008 e 04 de novembro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de2008. As áreas azuis encontradas em toda extensão das geleiras Mapple e Mellvile e nas áreas marginais da Crane e Jorum representam a superfície com velocidades menores que 0,6 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 4,81 m d⁻¹, valor máximo encontrado na frente da geleira Crane, são referentes a vetores encontrados na região marinha.
- Figura 39. Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o calculo da velocidade de fluxo superficial das geleiras Jorum, Crane, mapple e Melville. Os dois períodos avaliados são sequenciais, sem intervalos, representam a época em que as temperaturas começam a aumentar no final da primavera e há pouca variação de temperatura entre si.
- Figura 40. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) da geleira Jorum. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008. ______73
- Figura 41. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Jorum para os 2 períodos analisados. ______74
- Figura 42. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais da geleira Crane, fr-frente, ct-centro, tp-topo, trb-tributário. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008.
- Figura 43. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Crane para os 2 períodos analisados. ______75
- Figura 44. Variações na posição da frente da geleira Crane entre outubro e novembro de 2008. No fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 24 de outubro de2008. ______76
- Figura 45. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e Transversal (C-D) da geleira Mapple e dos perfis longitudinal (E-F) e transversal (G-H) da geleira Melville. As linhas verdes correspondem a posição da frente das geleiras, delimitadas sobre a imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008.______77

- Figura 46. Perfis de velocidade superficial longitudinal (a) e transversal (b) da geleira Mapple e longitudinal (c) e transversal (d) da geleira Crane para os 2 períodos analisados. ______78
- Figura 47. Série de imagens MODIS da região e noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do calculo de velocidade de fluxo das geleiras Jorum, Crane, Mapple e Melville. A seta vermelha aponta para a geleira Crane. _____ 79

Lista de tabelas

Tabela 1 Faixas do espectro de microondas em que operam os sistemas SAR. Fonte: Novo,2006.	30
Tabela 2. Características da missão TerraSAR-X.	31
Tabela 3. Características dos modos de imageamento do TerraSAR-X. Fonte: INFOTERRA, 2009.	32
Tabela 4. Lista de imagens utilizadas neste trabalho.	33
Tabela 5. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em três locais distintos da geleira Drygalsk	i.52
Tabela 6. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em locais distintos das geleiras Hektoria e	
Green.	65
Tabela 7. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em locais distintos da geleira Crane	76

Capítulo 1 - Introdução

Os mantos de gelo polares são afetados de maneira complexa pelas mudanças climáticas e os mecanismos de resposta dessas massas de gelo às variações no clima começam a ser desvendados (BAMBER; ALLEY; JOUGHIN, 2007). Paralelamente, as consequências de tais mudanças têm chamado atenção: alterações nas zonas superficiais de neve e gelo, na velocidade do fluxo das geleiras, na retração de geleiras, além do desprendimento de enormes icebergs. Entretanto, alguns estudos demonstram que o gelo antártico tem apresentado, em escala de milênios e escalas menores de tempo, um estado próximo ao equilíbrio com relação à entrada de massa nos seus sistemas glaciais (*i.e.*, principalmente pela acumulação de neve) e saída por desprendimento de partes frontais das geleiras, derretimento superficial e basal e por sublimação (SHEPHERD; WINGHAM, 2007). Essa divergente impressão de equilíbrio e, ao mesmo tempo, de instabilidade só reforça a consciência de que ainda se sabe pouco sobre os processos que estão ocorrendo na criosfera e como o resto do planeta será afetado por eles.

O manto de gelo antártico concentra 90% do gelo presente no planeta, correspondente a 70% da água doce da terra (PRITCHARD; BINGHAM, 2007). Como destacado por Alley (2002), os mantos de gelo da Antártica e da Groelândia, além de armazenar a maior parte do volume de água doce do planeta, ainda desempenham um papel fundamental na manutenção do sistema climático, influenciando parte da circulação oceânica e atmosférica e determinando o nível médio dos mares.

Variações de dezenas de metros no nível do mar, em relação ao nível atual, ocorreram no passado e o controle é atribuído às variações na temperatura terrestre, causando os períodos glaciais e interglaciais, o aumento e diminuição da cobertura de gelo, recuo e subida do mar na costa, respectivamente. Taxas de aumento do nível do mar de pelo menos uma ordem de magnitude maior do que a atual, de [v1] Comentário: Explicar-rodapé ZSNG

aproximadamente 1,8 mm ano⁻¹, foram estimadas para um período pretérito de rápida deglaciação (RIGNOT; THOMAS, 2002). Considerando forças dessa magnitude, que afetam toda a extensão terrestre e seus biomas, é imprescindível que se concentrem estudos nas regiões polares, na tentativa de entender melhor a dinâmica global das geleiras.

O sensoriamento remoto aparece como ferramenta ideal para o estudo das regiões polares. Nestas áreas, a obtenção de informações através da exploração em campo apresenta várias limitações, que vão do alto custo e complexidade do transporte às condições climáticas extremas que não permitem as investigações durante todo o ano. Sensores remotos orbitais superam estas dificuldades de aquisição de dados, são capazes de cobrir extensas áreas em pouco tempo a um custo bem menor. O uso de sensores que operam na faixa das microondas do espectro eletromagnético (*i.e.*, RADAR) é ainda mais eficiente para detecção dos parâmetros dinâmicos de geleiras, não dependendo de luz solar e da cobertura de nuvens para obter o sinal contendo a resposta ambiental (PRITCHARD; BINGHAM, 2007; GAO; LIU, 2001).

Considerando todos estes fatores, percebe-se que trabalhos desenvolvidos para completar a lacuna do conhecimento da situação e dos mecanismos da dinâmica das geleiras são de extrema importância. O presente estudo representa uma dessas peças em que o foco será a determinação de variações sazonais nas velocidades de fluxo de geleiras de maré localizadas na Península Antártica, utilizando imagens obtidas pelos satélites da missão TerraSAR-X equipados com modernos sensores Radar de Abertura Sintética (SAR) com alta resolução espaço temporal.

A escolha da Península Antártica como região de estudo justifica-se por ser este o local onde foram observadas as maiores mudanças climáticas e glaciológicas nos últimos anos, com altas taxas de aumento da temperatura do ar e do oceano (BRAUN; HUMBERT, 2009; HULBE, 2008). A fragmentação e desintegração de várias plataformas de gelo e a retração de inúmeras frentes de geleiras na Península Antártica demonstram a instabilidade da cobertura de gelo dessa região em resposta às condições atmosféricas e oceanográficas. Essa instabilidade é verificada em boa parte

do ciclo glacial. As geleiras de maré representam bem o elo entre os componentes do oceano e da criosfera (VIELI, 2001), são as conexões do fluxo de gelo que atingem o mar, seja pela liberação de água de degelo ou pelo desprendimento de blocos de gelo. Os componentes marinhos influenciam bastante as condições das geleiras de maré e das plataformas de gelo (COOK *et al.*, 2005; BINDSCHADLER, 2006). Desta forma, ao centrar o estudo na análise das velocidades de geleiras de maré da Península Antártica, será possível buscar uma relação entre as variações de velocidade do fluxo do gelo e parâmetros ambientais avaliados no mesmo período, tentando assim compreender parte da interferência do oceano adjacente e da morfologia da geleira na dinâmica dessa interface gelo-mar.

1.1 Objetivos

O objetivo central deste trabalho é analisar a dinâmica de fluxo de geleiras de maré localizadas na porção nordeste da Península Antártica. Para isso, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- Adaptar um método de correlação cruzada para maximizar a identificação do deslocamento de feições superficiais de geleiras, com a utilização de imagens do satélite TerraSAR-X;
- Estimar a velocidade superficial do fluxo das geleiras Drygalski, Hektoria, Green, Jorum, Punchbowl, Crane, Mapple e Mellville, entre novembro de 2007 e novembro de 2008; e
- Avaliar qualitativamente a relação entre variações na velocidade de fluxo das geleiras estudadas e variáveis ambientais como temperatura do ar e presença de gelo marinho.

1.2 Área de estudo

A Península Antártica é a estreita porção mais ao norte do continente Antártico, com uma largura média de 70 km, se estendendo por cerca de 2000 km, até a latitude de 70° Sul. A localização da Península é apresentada na figura 1. A região é composta por um platô central de aproximadamente 2000 m de elevação, bastante erodido nas bordas, onde se instala um complexo sistema de geleiras que o drenam, a oeste para o mar Bellingshausen, e a leste para o mar de Weddell. Pritchard e Vaughan (2007) estimaram, com base no ano de 2005, uma taxa de contribuição das descargas dessas geleiras para o nível do mar de aproximadamente 0,16 ± 0,06 mm por ano.



Figura 1. Mapa da Antártica, ilustrando a localização da Península Antártica. Adaptado de Turner *et al.,* (2009).

O clima da região diverge do extremo frio e seco presente no restante do continente. Na Península Antártica estão registradas as maiores temperaturas e as

maiores taxas de precipitação da Antártica. Estudos apontam uma acentuada variação nessas condições. Turner *et al.* (2005) analisaram séries de temperaturas do ar na superfície, medidas por estações meteorológicas localizadas na Península Antártica e verificaram taxas de incremento muito superiores às encontradas no resto do planeta, 0,56 °C por década nos últimos 50 anos. Turner (1997) também destacou o aumento da ocorrência de eventos de precipitação durante o inverno austral. A cadeia de montanha da Península Antártica constitui uma barreira a boa parte dos processos de circulação oceânica e atmosférica que ocorre ao redor do continente. Desta maneira, características do oeste da Península distinguem-se dos ocorrentes no lado leste. As temperaturas na porção leste da Península são cerca de 3 a 5 °C mais baixas que as do lado oeste, esta diferença deve-se principalmente a menor atuação dos ventos de oeste, mais quentes e úmidos, barrados pelo platô e a maior influência de ventos continentais mais frios, que mantêm temperaturas mais baixas, deslocando-se sobre plataformas e gelo marinho do mar de Weddell (MORRIS; VAUGHAN, 2004).

A área de estudo abrange mais especificamente a região das geleiras de maré do nordeste da Península Antártica. As imagens utilizadas neste trabalho capturam informações sobre geleiras antigas tributárias das plataformas de gelo Larsen A e Larsen B (Figura 2). Os principais fluxos analisados são os das geleiras: Drygalski, Hektoria, Green, Jorum, Punchbowl, Crane, Mapple e Mellville. A figura 2 apresenta a localização das geleiras analisadas. Esta região atraiu a atenção de muitos pesquisadores em decorrência dos eventos de desintegração de plataformas de gelo que lá ocorreram nas duas últimas décadas. Os eventos de grande perda ocorreram em 1995 e 2002, com a desintegração das plataformas de gelo Larsen A e Larsen B, respectivamente. Contudo, esses não foram eventos isolados. Cook e Vaughan (2010) apresentam um compilado de informações referente às mudanças ocorridas nas plataformas de gelo antárticas. Os dados de variação na área dessas plataformas, registrados desde a década de 60, indicam que as perdas são contínuas, ocorrendo pré e pós as grandes desintegrações e resultando em áreas remanescentes de aproximadamente 10% e 20%, da área originalmente demarcada para Larsen A e Larsen B, respectivamente.

A plataforma Larsen B foi a primeira a possuir uma boa base de informações de um período antecedente à grande retração, e isso torna a área o cenário perfeito para avaliar os mecanismos causais envolvidos (*e.g.*, RACK *et al.*, 1999; SCAMBOS; HULBE; FAHNESTOCK, 2003; SKVARCA; DE ANGELIS; ZAKRAJSEK, 2004; SANDHÄGER; RACK; JANSEN, 2005; VIELI *et al.*, 2007) e as consequências regionais (*e.g.*, ROTT *et al.*, 2002; DE ANGELIS; SKVARCA, 2003; SCAMBOS *et al.*, 2004; ROTT *et al.*, 2011; SHUMAN; BERTHIER; SCAMBOS, 2011).



Figura 2. Área de estudo deste trabalho, representada através de cena de 6 de março de 2008 do sensor ASAR do satélite Envisat.No quadro acima as letras A, B e C indicam a localização das plataformas de gelo Larsen A, B, C, respectivamente. Na imagem central, as linhas coloridas indicam a posição da linha de frente da plataforma ou geleira no ano descrito. As letras pretas destacam a posição das geleiras alvos deste estudo, D-Drygalski,H-Hektoria, G-Green, E-Evans, J-Jorum, C-Crane, e Mv-Melville. Adaptado de Rott *et al.*, 2011.

Após os grandes eventos de desprendimento das plataformas de gelo Larsen A e Larsen B, as geleiras da região reagiram com destacada alteração em sua dinâmica. Foram estimadas taxas de aceleração dos fluxos das geleiras que alimentavam a plataforma, com valores de 2 a 8 vezes maiores que os prévios ao desprendimento (RIGNOT *et al.,* 2004, SCAMBOS *et al.,* 2004).

O conhecimento adquirido sobre os eventos ocorridos nas plataformas Larsen A e B e suas geleiras tributárias formam a base para os modelos de dinâmica glacial para as plataformas adjacentes, por exemplo, para a plataforma de gelo Larsen C (Figura 2), com o objetivo de entender como esta poderá responder as mudanças climáticas e qual a contribuição de uma futura desintegração para o aumento do nível do mar, através de um potencial aumento da velocidade de fluxo dos seus tributários.

Capítulo 2 - Monitoramento de geleiras

2.1 Dinâmica das geleiras de maré

Geleira, de acordo com a definição apresentada por Simões (2004), é uma massa de neve e gelo que se move de um ponto mais alto para outro mais baixo por contínua fluência. Esse movimento da geleira obedece a três principais processos mecânicos: deformação interna do gelo; deslizamento sobre a base; e cisalhamento com o substrato. As geleiras estão distribuídas por todos os continentes, e são formadas pela precipitação de neve numa taxa de acumulação que permita a formação de camadas. A existência de uma geleira em um determinado local é garantida se a entrada de neve no sistema for igual ou supere as perdas de gelo, neve ou água de derretimento. O esquema apresentado na figura 3 define os principais processos de ganho e perda de massa de uma geleira, ou seja, as variáveis do balanço de massa.



Figura 3. Esquema dos componentes do balanço de massa de uma geleira. Adaptado de Cogley et al., 2011.

As geleiras localizadas na Península Antártica, diferentemente do restante do continente Antártico, apresentam um período com notável ocorrência de ablação (LIU; WANG; JEZEK, 2006.), ilustrado na figura 4. Isso ocorre por essa ser a região antártica com maior exposição à influência marinha e também às temperaturas mais elevadas trazidas pela sucessão de frentes de oeste que atingem a região. Além das perdas de massa por derretimento, nessa região ocorrem também perdas por liberação de icebergs (MACAYEAL *et al.*, 2003).



Figura 4. Duração média anual de derretimento durante os verões austrais de 1978 a 2004. Fonte: LIU; WANG; JEZEK, 2006.

As geleiras que deságuam no mar são classificadas como geleiras de maré. Essas massas de gelo são ancoradas no substrato, podendo sua linha de frente coincidir neste ponto ou formar uma pequena extensão flutuante, em contato direto com as propriedades do ambiente marinho adjacente (VIELI; JANIA; KOLONDRA, 2002). Os sinais desta interação podem ser detectados muito além do limiar onde ocorre. Estudos descrevem os efeitos em ambas as direções, os sinais de processos marinhos são identificados geleira acima e a entrada de massa da geleira é responsável por alterar propriedades no mar. O efeito da maré nos fluxos de geleiras que alimentam plataformas de gelo ou chegam direto no mar são reportados por Legresy *et al.* (2004), Gudmundsson (2006), Nick *et al.* (2009) e Walter *et al.* (2012). Esses estudos destacam que a interação da maré com o fluxo da geleira ocorre de maneira complexa, sendo dependente da morfologia e lubrificação da base da geleira e dos processos que controlam o desprendimento de blocos de gelo. Nas geleiras de maré da Península Antártica, o desprendimento de blocos de gelo é o principal mecanismo de ablação, transferindo de forma rápida massas de gelo para o oceano (MACAYEL, 2003).

Algumas forçantes são sugeridas como determinantes para o mecanismo de desprendimento de blocos de gelos e velocidade de fluxo das geleiras de maré. Nick *et al.* (2009), ao modelar a dinâmica de uma geleira de maré da Groenlândia, verificaram a forte influência das condições da frente da geleira na velocidade do fluxo e na variação da espessura da massa de gelo que flui. Taxas maiores de desprendimento, causadas por alguma instabilidade na parte frontal, fazem com que o fluxo acelere, e uma diminuição na espessura ocorra, podendo gerar uma rápida expansão de uma frente flutuante, frágil, que na sequência tenderá a facilitar a perda de blocos e, desta forma, causar uma retração. O afinamento e a aceleração vão se propagando da frente em direção a montante. Nesse processo, a relação com a posição da linha de encalhe é o outro fator importante. Uma declividade negativa da frente com relação ao embasamento aumenta a superfície de contato da água do mar, mais quente, favorecendo o derretimento e afinamento da frente, permitindo que a retração ocorra buscando um novo equilíbrio mais recuado no contato de fundo.

Os mecanismos no outro sentido, ou seja, da montante para a frente também podem ser bastante efetivos. Zwally *et al.* (2002) descrevem o modo como a aceleração de geleiras está relacionada com o derretimento superficial e consequente aumento da lubrificação basal. Neste caso, a redução na espessura tende a atuar inicialmente nas áreas mais distantes da frente da geleira, carregando a massa mais rapidamente da montante para baixo. Além destes fatores, as variações nas taxas de

precipitação, suprimento de massa da geleira, regulam a dinâmica dessas massas de gelo.

Os indícios de desestabilização das geleiras do leste da Península Antártica, extributárias de extensas plataformas de gelo, são creditados em parte a eventos como esses descritos acima (*i.e.*, derretimento superficial e desestabilização da frente), passaram de tributárias das plataformas a geleiras de maré.

Outro fator de extrema relevância no entendimento da dinâmica das geleiras de maré é a cobertura de gelo marinho na região de descarga. A presença do gelo marinho atua como barreira à circulação marinha superficial. A liberação e a movimentação dos blocos de gelo da frente da geleira é restringida, os blocos ficam retidos, rodeados pela camada de gelo marinho, e a taxa desprendimento de blocos de gelo é reduzida (AMUNDSON, 2010) . A porção oeste do mar de Weddel, onde terminam as geleiras estudadas, é a região que apresenta a maior extensão de gelo marinho durante todo o ano e as maiores concentrações de gelo plurianual do oceano austral (WORBY *et al.*, 2008). Como pode ser visto na figura 5, mesmo no período do ano de menor extensão (verão austral), o oeste do mar de Weddel está coberto de gelo marinho.



Figura 5. Extensão e concentração do gelo marinho no continente antártico.a) setembro de 2008. b) fevereiro de 2009. Fonte: NASA, 2012.

2.2 Sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento glacial

Observar os sistemas glaciais tornou-se uma ação indispensável. O reconhecimento da criosfera (*i.e.*, neve, gelo, solos congelados e gelo marinho) como parte integrante do sistema climático global gerou a necessidade de entender as variações em sua extensão e os processos que nela ocorrem. Os sistemas glaciais respondem às mudanças climáticas de modo ainda não tão claro e os mecanismos de conexão com os oceanos e com a atmosfera tem que ser melhor investigados a fim de alcançar modelos climáticos mais precisos. Previsões de como e com qual intensidade os principais mantos de gelo da Terra respondem às variações dos parâmetros ambientais é a chave para estimativa de mudança do nível médio dos mares e alteração na circulação e formação de massas de águas oceânicas.

Apesar da reconhecida importância, o estudo contínuo dos ambientes glaciais, em especial os polares, não é uma atividade simples. Devido à distância com relação às regiões habitadas e às condições ambientais hostis, o monitoramento dessas regiões foi bastante limitado e somente obteve avanços mais representativos a partir da década de 70, quando os sensores orbitais emergiram, obtendo dados seqüenciais de extensas áreas do globo terrestre.

Recentemente, muito baseados na evolução do sensoriamento remoto, programas de monitoramento de geleiras surgiram. Dois programas que ganharam bastante destaque foram o *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) e o *Global Land Ice Mesurements from Space* (GLIMS). Em conjunto com iniciativas governamentais e científicas mais dispersas, esses programas buscam formar um banco de informações de longo tempo e de abrangência espacial máxima das áreas sob influência glacial. A partir de estudos coordenados, busca-se entender os processos da criosfera e obter os melhores modelos da relação gelo-clima (PELLIKKA; REES, 2010).

Estabelecer este conhecimento é possível através da investigação de algumas variáveis dos componentes da criosfera. Os parâmetros mais explorados são: área, albedo, velocidade, volume e o balanço de massa. A primeira aplicação glaciológica do sensoriamento remoto foi determinar a velocidade de uma geleira (PELLIKKA; REES,

2010). A velocidade de uma geleira e sua variação ao longo do tempo é uma característica que expressa diretamente a dinâmica glacial local e responde diretamente às mudanças climáticas.

Os métodos utilizados na determinação da velocidade de fluxo superficial de geleiras são basicamente os seguintes: obtenção, em momentos distintos, das posições georreferenciadas de estacas instaladas na superfície da geleira; e rastreamento de feições identificáveis em imagens sequenciais através do cálculo de correlação cruzada entre as imagens ou através de um processamento chamado interferometria, que utiliza a informação de fase de duas imagens de radar da mesma área (GAO; LIU, 2001).

Dentre as metodologias remotas mencionadas, a interferometria é a que estima com maior precisão a velocidade de fluxo das geleiras, pois com essa técnica deslocamentos podem ser mapeados com a precisão até de centímetros (PELLIKKA; REES, 2010). A desvantagem deste método é a necessidade de um curto período entre a aquisição do par de imagens, para que não ocorra uma decorrelação da fase, e só é possível obter o módulo do deslocamento, sem direção do movimento. A estimativa da velocidade a partir do rastreamento de feições, tais como fendas nas geleiras, é uma técnica amplamente aplicada por mais de duas décadas (SCAMBOS *et al.*, 2002), e apresenta bons resultados, podendo ser executada com imagens ópticas ou imagens de radar. O prejuízo desta técnica está relacionado a falta de feições superficiais marcantes em algumas geleiras, já que a ausência de feições identificáveis impossibilita o rastreamento do fluxo (LUBIN; MASSON, 2006).

Capítulo 3 - Material e Métodos

Neste capítulo, inicialmente são apresentadas as características do imageamento por sensores radar de abertura sintética (*SAR*) e as vantagens e limitações da utilização destes produtos no estudo da dinâmica de geleiras de maré. Na sequência, são apresentados os detalhes da missão TerraSAR-X, das imagens utilizadas neste estudo e a descrição da metodologia empregada aos dados para obtenção da estimativa de velocidade de fluxo de geleiras selecionadas na região nordeste da Península Antártica.

3.1 Imagens SAR

O conceito de imageamento por Radar baseia-se na técnica de discriminação de alvos com o uso de sensores ativos, ou seja, emitem a radiação eletromagnética que será medida após esta interagir com o alvo e retornar à antena receptora do sensor. O surgimento da técnica deve-se a aplicação militar na detecção de distância de alvos e aproximação de inimigos. Contudo, a evolução dos equipamentos e do processamento de sinal revelou uma valiosa aplicação para as imagens de radar, o monitoramento ambiental.

As vantagens sobre os sensores ópticos estão relacionadas com o fato do sistema ser ativo, sem a dependência da luz solar e suas variações, tais como inclinação sazonal e variações diárias. Os radares imageadores também se destacam por operar na faixa das microondas, que sofre reduzida interferência das condições atmosféricas, podendo adquirir imagens independente da cobertura de nuvens. A figura 6 esquematiza a transparência da atmosfera a determinadas faixas de comprimento de ondas do espectro eletromagnético. Estas características tornam o emprego dos sensores radar essenciais nos estudos de monitoramento das regiões polares, que por um extenso período do ano tem iluminação solar restrita e, frequentemente, encontram-se sob cobertura de nuvens.



Figura 6. Esquema representando a transparência da atmosfera terrestre em função do comprimento de onda. Faixas escuras são opacas, impedem a transmissão da onda, as faixas claras são transparentes, não atenuam o sinal. Os radares ativos operam em comprimentos de onda na faixa dos centímetros Fonte: Rees (2001).

É denominado Radar de Abertura Sintética (SAR) a plataforma imageadora que simula eletronicamente uma antena maior a fim de obter uma melhor resolução azimutal (JENSEN, 2009). Este artifício requer a emissão de um número maior de pulsos de radiação durante a aquisição de uma cena e utiliza o princípio do efeito Doppler no processamento dos pulsos que retornam à antena.

A aquisição de dados pelo sensor SAR é feita com uma visada lateral. Os pulsos iluminam faixas do terreno formando ângulos ortogonais com a direção de voo da aeronave, formando a direção de alcance. Devido a esta forma de obter as informações, alguns efeitos geométricos são inerentes aos produtos gerados. A figura 7 ilustra a geometria do imageamento por radar de visada lateral.



Figura 7. Características do imageamento de radares de visada lateral. Fonte: NRCAM/CCSR (2007).

Na direção de alcance a geometria é baseada na distância real entre o radar e cada uma das feições contidas na cena de radar. Dessa forma, a região imageada no alcance próximo fica com a representação comprimida. Este efeito é facilmente corrigido, entretanto outras distorções requerem informações auxiliares, como um modelo digital de elevação preciso para eliminar ou reduzir efeitos de encurtamento de encosta (*foreshortening*) ou de sobreposição (*layover*). No caso das sombras não há como obter um sinal de retorno. Um esquema ilustrando estas distorções é mostrado na figura 8.



Figura 8. Distorções das imagens adquiridas com visada lateral. (a) Distorção na direção de alcance; (b) encurtamento da encosta; e (c) sombra e sobreposição. Fonte: Rees (2001).

Ao fazer estudos dos ambientes terrestres a partir de imagens de radar alguns outros parâmetros do imageamento por esses tipos de sensores necessitam ser bem compreendidos, para uma interpretação eficiente da cena. Simplificadamente, a resolução espacial depende do tamanho da antena, do comprimento da onda e da quantidade de pulsos emitidos na aquisição da cena. Segundo Soares (2011), a resolução espacial aparente de uma imagem SAR não filtrada equivale a aproximadamente 1/8 da resolução de uma imagem ótica. Em parte a relativa perda de resolução é decorrente da presença de um ruído intrínseco às imagens de radar, o speckle, padrão granulado, claro e escuro (Figura 9), resultante das interferências aleatórias que acometem as microondas coerentes (JENSEN, 2009).



Figura 9.a) Imagem TerraSAR-X ilustrando um efeito de distorção do relevo e; b) o speckle.

A informação de intensidade da radiação retroespalhada, armazenada em cada pixel da imagem, está relacionada com a interação da onda emitida com o alvo e responde mais diretamente a constante dielétrica e rugosidade da superfície e ao ângulo de incidência. A neve e o gelo em geral emitem um sinal de retroespalhamento alto, criando áreas mais claras nas imagens. Menores comprimentos de microondas captam muitas das feições encontradas na superfície das geleiras, já os maiores comprimentos de onda conseguem fornecer informações subsuperficiais (PELLIKKA; REES, 2010). A tabela 1 destaca as principais bandas de radar, os comprimentos de onda e a frequência equivalente a cada banda. Uma propriedade que é claramente identificável por imagem de radar nos ambientes glaciais é a quantidade de água no pacote de neve, sendo possível distinguir diferentes zonas na superfície das geleiras, associadas a presença, ou não de derretimento ou outras feições causadas pelo derretimento na porção superficial do pacote de neve (*e.g.*, lentes e outras estruturas de gelo)(ARIGONY-NETO,2006, RAU *et al.*,2000).

Banda	Freqüência (GHz)	Comprimento de onda (cm)
Р	0,4 -1,0	30-75
L	1,0 -2,0	15-30
С	2,0 -4,0	7,5- 15
S	4,0 -8,0	3,7 -7,5
х	8,0-12,0	2,5 - 3,7

Tabela 1 Faixas do espectro de microondas em que operam os sistemas SAR. Fonte: Novo,2006.

3.2 Imagens TerraSAR

O TerraSAR-X (TSX) é um satélite de observação terrestre de uso comercial e científico equipado com um sensor SAR. Foi lançado em junho de 2007 e pertence a parceria público privada entre o Centro Aeroespacial Alemão (DLR) e a empresa EADS Astrium GmbH. Em junho de 2010, foi colocado em órbita o satélite gêmeo TanDEM-X (TDX), que compõe a formação com o objetivo de gerar o melhor modelo digital de elevação para todo o planeta. O par de satélites compartilha essencialmente os mesmos parâmetros de órbita e do sistema que estão discriminados na tabela 2.

Além do sensor SAR, as plataformas são equipadas com um sistema de posicionamento global (GPS) de alta precisão e um terminal de comunicação a laser usado para envio dos dados. O sensor SAR desta missão opera na banda X, com frequência de 9,65 GHz, e foi desenvolvido para adquirir os dados da cena em três distintos modos de imageamento: StripMap, SpotLight e ScanSAR, representados na figura10.

Tabela 2. Características da missão TerraSAR-X.

Altura da órbita no equador	514 km
Órbitas por dia	15 2/11
Período de revisita	11 dias
Inclinação	97,44graus
Horário de passagem no equador	18h +/- 15minutos
(Órbita Ascendente)	
Dimensão do satélite(altura X diametro)	5 m X 2.4 m
Dimensão da antena(altura X largura)	4,8 m X 0,7 m
Peso aproximado	1300 Kg
Consumo de energia	700-800 watts
Orbita	Polar, Hélio-sincrônica
Frequência do radar	9.65GHz banda X (comprimento
Amplitude da frequência	150MHz/300Mhz



Figura 10. Modos de imageamento do Terrasar-X. Fonte: Infoterra (2009).

O modo de imageamento e outros diversos parâmetros da aquisição da cena podem ser ajustados de acordo com o produto requerido. A melhor resolução espacial alcançada é de 1 metro no modo de aquisição *HiResolution SpotLight*, que equivale a cena de menor cobertura no terreno, 5 x 10 km. A tabela 3 apresenta as principais características dos diferentes modos de imageamento do TerraSAR-X.

Modo de Imageamento	Extensão da cena (km)	Resolução na direção de alcance (m)	Resolução em Azimute (m)	Polarização	Ângulo de Incidência
High-Resolution SpotLight (HS)	10 x 5	1.2	2.2	VV ou HH Dupla HH & VV	20° a 55°
High-Resolution SpotLight 300 MHz(HS300)	7-10 x 5	0.6	1.1	VV ou HH	20° a 55°
SpotLight (SL)	10 x 10	1.2 1.2	1.7 3.4	VV ou HH Dupla HH & VV	20° a 55°
StripMap (SM)	30 x 50 15 x 50	1.2 1.2	3.3 6.6	VV ou HH Dupla e cruzada HH & VV,HH & HV, ou VV e VH)	20° a 45°
ScanSAR (SC)	100 x 150	n/a	18.5	VV ou HH	20° a 45°

Tabela 3. Características dos modos de imageamento do TerraSAR-X. Fonte: INFOTERRA, 2009.

Na tabela 4 é apresentada a lista com as imagens TSX utilizadas neste trabalho. Estas imagens foram adquiridas no modo StripMap com extensão de 30 por 50 km, polarização simples horizontal (HH), e resolução espacial aproximada de 3,3 m fornecidas pelo DLR no nível de processamento L1B *Single Look Slant Range Complex* (SSC), em geometria *slant range*, sem projeção cartográfica associada. Essas imagens foram obtidas através do projeto *Multi-temporal TERRASAR-X Imagery in Support of Climate Sensitivity Studies of Sub-Polar and Polar Glaciers* (TERRA-POLAR), aprovado pelo DLR na ocasião do primeiro anúncio de oportunidades para uso científico de dados do TerraSAR-X.

Satelite	Data	Faixa de imageamento	Polarização	Direção de visada	Direção da órbita
TSX1	10/11/2007	010	нн	Direita	Ascendente
TSX1	21/11/2007	010	НН	Direita	Ascendente
TSX1	02/12/2007	010	нн	Direita	Ascendente
TSX1	13/12/2007	010	НН	Direita	Ascendente
TSX1	04/01/2008	010	нн	Direita	Ascendente
TSX1	15/01/2008	010	нн	Direita	Ascendente
TSX1	17/02/2008	010	НН	Direita	Ascendente
TSX1	28/02/2008	010	нн	Direita	Ascendente
TSX1	23/03/2008	005	нн	Direita	Descendente
TSX1	03/04/2008	005	нн	Direita	Descendente
TSX1	18/10/2008	005	НН	Direita	Descendente
TSX1	29/10/2008	005	нн	Direita	Descendente
TSX1	13/10/2008	009	HH	Direita	Descendente
TSX1	24/10/2008	009	нн	Direita	Descendente
TSX1	04/11/2008	009	HH	Direita	Descendente

Tabela 4. Lista de imagens utilizadas neste trabalho.

As imagens cobrem geleiras de maré do Nordeste da Península Antártica, mais especificamente a região das geleiras tributárias das extintas porções das plataformas de gelo Larsen A e Larsen B. A localização exata das cenas adquiridas é apresentada na figura 11, com indicação da posição de cada faixa de imageamento.



Figura 1113. Localização da área de estudo na porção nordeste da Península Antártica, com destaque para a posição das cenas TerraSAR-X utilizadas neste trabalho. Base cartográfica: *Landsat Image Mosaic of Antarctica* (LIMA; BINDSCHADLER *et al.*, 2008).

3.3 Dados complementares

Dados complementares foram utilizados para analisar qualitativamente fatores que afetam a dinâmica das geleiras de maré no nordeste da Península Antártica. As informações de velocidade de fluxo foram cruzadas, por interpretação visual com as informações de gelo marinho, temperatura do ar, feições superficiais da geleira.

Os dados ambientais que foram relacionados são provenientes de outras fontes de sensoriamento remoto. Para analisar a relação da dinâmica das geleiras de maré com o gelo marinho presente na região noroeste do mar de Weddell, foi utilizado um conjunto de imagens selecionadas do sensor óptico MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). São imagens do canal visível (2), com resolução espacial de 250 metros, pré-processadas e disponibilizadas no banco de dados do *National Snow and Ice Data Center*-NSIDC (SCAMBOS; BOHLANDER; RAUP, 1996).

Dados de temperatura do ar, médias diárias, da estação meteorológica automática mais próxima, a estação Plataforma Larsen, localizada na posição 66,97° S, 60,55° W, foram apresentados para relacionar as condições climáticas à dinâmica geral das geleira. Estes dados medidos de temperatura são disponibilizados pelo Serviço Antártico Britânico (BAS, 2011).

3.4 Pré-processamento das imagens

Para que se possam extrair dados de velocidade superficial das geleiras, o primeiro procedimento foi a seleção dos pares sequenciais nos quais foram realizados os cálculos da correlação cruzada, a fim rastrear o movimento das fendas e outras feições superficiais. As imagens tem que estar registradas a uma origem espacial comum, de tal forma que as células de resolução para uma mesma área possam ser digitalmente ou visualmente superpostas. O co-registro das imagens TerraSAR-X foi realizado no *software* Nest ESA SAR Toolbox (NEST) versão 4B-1.1. O NEST é um conjunto de ferramentas da Agencia Espacial Européia (ESA) para processamento de

dados das principais missões SAR (ESA, 2011). O registro das imagens foi feito por pares e não para todas as imagens das sequências de mesma cena, pois o grande tamanho dos arquivos, aproximadamente 2 gigabytes cada cena, tornava o processamento inviável. O NEST realiza o co-registro das cenas através de uma função automática que busca correlacionar pontos de controle da primeira imagem com pontos na segunda imagem. Este trabalho foi feito com a banda de intensidade das imagens, usou-se os valores padrão do programa para definição de numero de pontos de controle identificados, janela de busca e limite de erro máximo de um pixel. O método de reamostragem utilizado foi o do vizinho mais próximo. As imagens no formato SSC podem ainda contar com um refinamento no co-registro, utilizando as informações de fase. Usando esse módulo de refinamento de co-registro, os valores de erro médio quadrático (RMS) atingiram o máximo de 0,5 pixel.

Depois de registradas, as imagens foram associadas a uma projeção cartográfica. As correções geométricas foram feitas tendo como referência um elipsoide, definido pelo datum WGS 84. Este procedimento também foi executado em uma função semi-automática do NEST, a projeção selecionada foi a Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 20S.

Para otimizar a extração dos vetores de deslocamento dos pares de imagens foram feitos recortes nas cenas, tendo como critério de determinação dos limites destas sub-cenas o maior número de bacias de drenagem glacial inteiras em um limite máximo de, aproximadamente, 10.000 por 10.000 pixels, dimensão estipulada através de testes de tempo de processamento. Antes de serem submetidas ao algoritmo de correlação cruzada para extração dos vetores de deslocamento, as imagens foram transformadas de 16 para 8 bits, convertendo os valores de intensidade da imagem para 256 níveis de cinza, e salvas em formato geotiff. A figura 12 apresenta os limites das sub-cenas criadas em relação a cada cena inteira.


Figura 12. Cenas TerraSAR-X utilizadas neste trabalho. Em destaque, os retângulos coloridos representam os limites das sub-cenas geradas para extração dos vetores de deslocamento das geleiras.Geleiras analisadas: Dry-Dryagalski, Hek-Hektoria, G- Green,Ev-Evans, PU- punchbowl, J-Jorum, C-Crane,Ma- Mapple e Me-Melville.

3.5 Algoritmo de correlação cruzada

O princípio do rastreamento de feições superficiais em pares de imagens subseqüentes é, aparentemente, simples. Uma feição identificada em uma imagem poderá ser identificada na imagem seguinte, apresentando um deslocamento com relação à posição inicial. Medir a distância entre as posições ocupadas por esta feição, considerando o período entre os dois registros, resulta numa boa representação da velocidade daquele fluxo. No caso das geleiras, as fendas e outras feições superficiais acompanham o fluxo e podem ser marcadores da dinâmica deste ambiente.

A evolução dos sensores orbitais, fornecendo dados de alta resolução espaçotemporal, gera a necessidade de aprimorar as técnicas existentes no monitoramento da dinâmica glacial, com o propósito de obter informações mais precisas sobre estes processos.

O algoritmo utilizado neste trabalho baseia-se na bem sucedida técnica da correlação cruzada normalizada na identificação de deslocamento de feições entre imagens. Por mais de duas décadas, as velocidades das geleiras de todo o planeta têm sido estimadas através dessa metodologia, aplicada tanto a dados ópticos (SCAMBOS

et al., 1992, BERTIER *et al.*, 2005), como a dados de radar (GILES; MASSOM; WARNER,2009, VELHO, 2009; CIAPPA; PIETRANERA; BATTAZZA, 2010, EINEDER *et al.*, 2011). Nesta aplicação optou-se por adaptar um algoritmo desenvolvido em ambiente Matlab 2009. O Matlab é um software robusto de processamento numérico da Mathworks que oferece ferramentas de visualização, processamento e análise de imagens. A função que executa os comandos é nomeada *correlcorresp* escrita por Young (2010) e disponível no fórum eletrônico da Mathworks.

Para executar o algoritmo correlcorresp é necessário importar as imagens no formato geotiff para dentro do ambiente Matlab, os dados são lidos como 3 matrizes, uma de latitude outra de longitude e uma com os valores de intensidade do pixel. O processamento é aplicado somente na matriz de valores dos níveis de cinza. Esses dados são transformados para o formato "double", convertendo os valores de intensidade para uma escala de 0 (pixel mais escuro) a 1 (pixel mais claro da imagem). As imagens sequenciais são indicadas no comando e o algoritmo inicia identificando as feições na primeira imagem. Essas feições são determinadas a partir de máximos de variância local, calculados nas janelas de referência. As posições das feições encontradas na primeira imagem são armazenadas como posição inicial. Para cada feição, uma janela da imagem 1 de tamanho pré-estabelecido (i.e., janela de busca), centrada na posição da feição (i.e., janela de referência com máxima variância) é extraída e comparada com uma região da imagem 2. A comparação na imagem é realizada com uma janela móvel, nos limites definidos de Xmin-Xmax, Ymin-Ymax. Picos de máxima correlação são identificados e assim registrados os deslocamentos das feições. O algoritmo possui um módulo que realiza uma conferência das correspondências a partir das posições finais dos deslocamentos identificados. A confirmação de um deslocamento no sentido inverso é requisito opcional para registrar o vetor no arquivo de saída, com este procedimento adicional é eliminado um bom número de vetores espúrios. A figura 13 ilustra de forma simplificada o procedimento executado pelo algoritmo.



Figura 13. Elementos do cálculo da correlação cruzada entre 2 imagens: a) janela de referência na imagem 1; b) janela de busca na imagem 2; c) ponto central da janela de busca coincidente com o ponto central da janela de referência; d) deslocamento (R) na região de máxima correlação.

A identificação mais eficiente das feições móveis nas imagens está relacionada à seleção de parâmetros na equação. Os tamanhos das janelas implicam na precisão do deslocamento medido. A janela de referência tem que ter o tamanho suficiente para capturar feições com alta variância, por exemplo, as bordas de uma fenda na geleira. Por outro lado, janelas grandes demais não terão uma boa definição de uma só feição. Ruídos aleatórios ou pequenas alterações na forma da feição poderão adulterar demais o sinal. Os valores máximos de deslocamento esperados também devem ser conhecidos, para evitar que a área usada na comparação não seja menor que um possível deslocamento. Além do tamanho das janelas de busca e referência, é possível definir um limite para o valor de máxima variância local e ajustar um parâmetro que regula a exatidão da correlação.

As características de cada imagem e dos processos registrados nelas possuem sinais bem específicos, sendo assim, os parâmetros mencionados acima são bastante variáveis para cada estudo. Nesta aplicação os valores dos parâmetros que resultaram em uma boa representação do campo de velocidade foram: janelas de busca de 91x91 pixels, janelas de referência de 7x7 pixels, parâmetro de exatidão da correlação de 0,7.

O arquivo de saída apresenta os vetores na forma de tabela com quatro campos preenchidos: o valor de posição inicial de u (vetor no eixo x), o valor de posição inicial em v (vetor no eixo y) e os valores da posição final das respectivas componentes. Esses valores têm como referência os índices de posição da matriz (linhas e colunas).

3.6 Pós-processamento

Para melhor representação e análise dos resultados, os vetores foram exportados em tabelas do software Excel, contendo as posições iniciais dos vetores já associados às coordenadas na projeção da imagem (UTM/WGS84), os valores de velocidade calculados em metros por dia e o ângulo do vetor de deslocamento com relação ao norte da imagem (*i.e.*, norte da quadricula).

Os vetores resultantes tiveram que ser filtrados antes de serem apresentados cartograficamente. As tabelas criadas no Matlab e salvas no formato do Excel foram importadas no software Arcgis 10 (ESRI, 2010) e utilizadas para gerar um arquivo shapefile dos vetores de velocidade de fluxo. Nesta etapa, já podendo ser analisados em sua distribuição sobre a geleira, os dados foram filtrados. Valores de velocidade maiores que três desvios padrão acrescidos da média dos vetores de cada geleira foram eliminados. Também foram excluídos, a partir de máscara delimitada manualmente, todos os vetores que foram calculados em áreas de rochas e escarpas, na tentativa de eliminar vetores que não representavam uma feição superficial indicadora de fluxo das geleiras, e sim refletiam algum efeito geométrico ou radiométrico nas imagens (Figura 14).



Figura 14. a) Recorte da Imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008 sobre a area das geleiras Hektoria e Green.b) Vetores de deslocamento resultantes da correlação cruzada entre o par de imagens e áreas de escarpas que foram mascaradas.

O grande número de vetores gerados para cada par de imagens TSX exigiu um tratamento para melhor análise e comparabilidade dos resultados. O arquivo com os vetores filtrados foi utilizado para a geração de um arquivo raster com a variação espacial do campo de velocidade sobre a área da geleira coberta pela subcena TSX. A escolha por este formato de representação, um campo contínuo de valores, foi definida por expor claramente a variável analisada, o enorme número de vetores gerados tornaria a representação deles sobre uma base cartográfica, uma imagem bastante poluída com muitas informações sobrepostas. A interpolação espacial aplicada foi a denominada Difusion with Barriers, que apresentou os melhores resultados na visualização dos dados. O método interpolador escolhido baseia-se na equação de difusão de calor e permite impor uma barreira a propagação dos valores criados, é recomendado na interpolação de dados com uma direção preferencial de variação (ESRI, 2012). Esse tratamento gerou uma superfície que representou bem a variação de velocidade nas distintas zonas da geleira e excluiu da representação as áreas previamente mascaradas. Um exemplo do produto gerado nesta etapa é apresentado na figura 15. Desse campo de velocidade foram extraídos dois perfis de velocidade superficial, um transversal ao fluxo de descarga e outro paralelo a direção de fluência, o mais próximo possível da linha central de fluxo, iniciando na porção do campo de velocidade mais distante da frente e terminado no ponto coincidente com a

linha de frente. Valores representantes da velocidade da geleira foram calculados separadamente em alguns pontos (recortes de 1 km²) ao longo do fluxo e serão apresentados, pontualmente, o número de vetores gerados, média dos valores de velocidade e o desvio padrão desses valores.



Figura 15. Exemplo de campo de velocidade gerado a partir das velocidades calculadas para a Geleira Drygalski, valores não filtrados, apresentados sobre a imagem TSX de 21 de novembro 2007.

[v2] Comentário: Legenda maior na figura, refazer figura com coord geo

Capítulo 4 - Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os campos de velocidade calculados para as principais geleiras das áreas imageadas. As estimativas da velocidade de fluxo das geleiras foram realizadas através da técnica de correlação cruzada, aplicada nas subcenas anteriormente descritas, resultando em vetores indicando o deslocamento superficial. Os vetores de deslocamento foram interpolados a fim de apresentar espacialmente um campo de velocidade representativo das variações superficiais no fluxo de cada geleira.

Os resultados estão separados por geleiras, na ordem das faixas de imageamento, desde a geleira Drygalski situada mais ao norte, até a geleira Melville ao sul, próxima ao limite norte da plataforma de gelo Larsen C. A análise da dinâmica das geleiras foi realizada a partir da extração de dois perfis de velocidade, um longitudinal e outro transversal ao fluxo. Os valores de velocidade ao longo desses segmentos foram apresentados em gráficos para comparação da variação temporal da velocidade durante o período de estudo. As massas de gelo com maior contribuição de descarga para o oceano dentre as avaliadas (*i.e.*, geleiras Drygalski, Hektoria-Green e Crane), também foram analisadas com relação a variação da posição das suas frentes de gelo. Para estas geleiras, também são apresentadas as estatísticas dos vetores calculados em áreas ao longo do perfil longitudinal, valores esses que são utilizados nas análises de comparação com os parâmetros ambientais.

4.1 Geleira Drygalski

A Geleira Drygalski, principal tributária da antiga plataforma de gelo Larsen A, apresenta uma área de drenagem de 1.050 km². Com a desintegração da plataforma de gelo Larsen A, em 1995, Drygalski tornou -se uma geleira de maré, com continuada

retração frontal. Entre 1995 e 2000, sua frente retraiu 5 km (ROTT *et al.*, 2002), porém sem um padrão claro de retração (DE ANGELIS; SKVARCA, 2003). Assim como outras geleiras próximas, que também alimentavam as antigas plataformas Larsen A e B, essa geleira continua a apresentar um desequilíbrio na sua dinâmica de fluxo. Por exemplo, a velocidade de fluxo na região frontal apresenta atualmente valores superiores a 5,5 m d⁻¹, longe dos 2,4 m d⁻¹ estimados para o mesmo local antes de 1995 (RACK *et al.*, 1999, EINEDER *et al.*, 2011).

A velocidade do fluxo superficial da geleira Drygalski foi estimada mensalmente entre novembro de 2007 e fevereiro de 2008. Os períodos sobre os quais são feitos as estimativas é o tempo de revisita do satélite TerraSAR-X, 11 dias. A figura 16 apresenta o campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski no período entre 10 e 21 de novembro de 2007. Os valores encontrados nessa estimativa de velocidade da geleira Drygalski são muito próximos dos valores de velocidade estimados por Eineder *et al.* (2011) para mesma região.

Como resultado da análise deste primeiro par de imagens, foram gerados 189.872 vetores de deslocamento na superfície da geleira Drygalski. Após o uso das máscaras para exclusão das regiões escarpadas e com rochas e da filtragem dos valores maiores que a média acrescida de 3 desvios-padrão, o número de vetores válidos foi de 176.791. A maior parte dos vetores que apresentavam altos valores de velocidade foram calculados na região do mar, próxima a frente da geleira (Figura 16). Esta região não foi mascarada devido ao interesse na dinâmica da interface gelo-mar, na variação da posição da frente e na transferência de massa. A frente da geleira apresenta valores de velocidade máximos próximo de 6,54 m d⁻¹ decaindo até valores estimados de menos de 0,1 m d⁻¹ nas partes mais distantes do término da geleira.

[v3] Comentário: Que valores? Poderia estar na revisão bibliográfica.



Figura 16. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 10 e 21 de novembro de 2007, sobre a imagem TerraSAR-X de 10 de novembro de 2007 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que são referentes a vetores encontrados na região marinha.

Existe uma considerável redução no número de vetores calculados nos pares de imagens de dezembro, janeiro e fevereiro com relação ao cálculo realizado com as imagens de novembro de 2007. Porém, o padrão e módulo das velocidades se mantém condizentes com a realidade ao longo da extensão da geleira. Só as regiões da geleira com grande concentração de fendas bem marcadas garantiram a extração de vetores durante todo o período avaliado. As áreas com destacada concentração de fendas localizam-se na parte terminal da geleira e no centro do fluxo, onde ocorre uma mudança na direção da massa de gelo que vem da porção norte.

O segundo par de imagens, entre 02 de dezembro e 13 de dezembro de 2007, gerou um total de 97.037 vetores que após filtragem se reduziram a 69.736 vetores para a análise do fluxo. O campo gerado por estes vetores é apresentado na figura 17. Mesmo após a filtragem alguns vetores espúrios ainda se mantiveram, como pode ser visto na região central da geleira, área de cor vermelha discordando do valor esperado para o fluxo naquele local.

No terceiro período avaliado, janeiro de 2008, obteve-se 82.968 vetores préfiltragem, que após este procedimento resumiram-se a 13.968 vetores. O relativamente alto número de vetores filtrados consistiam em vetores gerados nas áreas de encosta, onde elementos de grande contraste apareceram na imagem. O campo de velocidade gerado pra este período, ilustrado na figura 18, sofreu maior interferência do interpolador, por apresentar menos dados de entrada, e se apresenta mais disforme.

No último período avaliado, fevereiro de 2008, as imagens começam a voltar para as tonalidades encontradas nas imagens de novembro (Figura 19), o que se reflete em um número de vetores calculados maior do que o do mês anterior, a quantidade pré-filtragem foi de 109.176 vetores que resultaram em 28.354 dados filtrados.



Figura 17. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 02 e 13 de dezembro de 2007, sobre a imagem TerraSAR-X de 13 de dezembro de 2007 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados na imagem maiores que 6,63 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.



Figura 18.Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 04 e 15 de janeiro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 15 de janeiro de 2008 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,66 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.



Figura 19. Campo de velocidade superficial calculado para a geleira Drygalski durante o período entre 06 e 17 de fevereiro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 17 de fevereiro de 2008 da geleira Drygalski. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,43 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.

A figura 20 localiza os perfis de velocidade de fluxo extraídos dos campos de velocidade representados nas figuras 16, 17, 18 e 19 para comparação da variação temporal da velocidade ao longo da linha central de fluxo e transversal ao fluxo, próximo a frente da geleira.



Figura 20. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e Transversal (C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais da geleira Drygalski, fr-frente, ct-centro, tp-topo. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem Terrasar de 10 de novembro de 2008.

Os gráficos da figura 21 apresentam a falta de padrão na variação temporal de velocidade de fluxo da geleira Drygalski, nesta escala analisada. Pode-se perceber o fato anteriormente descrito, da variação do número de vetores calculados na representação dos fenômenos. O perfil transversal de janeiro de 2008 (linha verde) é mais suave em resposta ao reduzido número de vetores do que em resposta a uma atenuação lateral do fluxo. A variação da dinâmica geral em relação às zonas da geleira fica bem representada tanto na extensão ao longo da linha de fluxo quanto no perfil

transversal. No perfil longitudinal, há uma abrupta mudança dos valores de velocidade da frente da geleira com relação às áreas mais altas, distantes mais de 10 km da frente da geleira (Figura 21a) e o perfil transversal (Figura 21b) mostra a gradação do fluxo das margens para o centro, valores baixos de velocidade são encontrados nas margens, demonstrando a redução causada por atrito da massa de gelo com as paredes, centro que fica livre desta tensão flui mais rapidamente.



Figura 21. Perfis longitudinais (a) e transversais (b) de velocidade superficial da geleira Drygalski para os 4 períodos analisados.

A tabela 5 apresenta os valores médios e desvio padrão da velocidade de fluxo em três áreas da geleira Drygalski. A localização destas sub-áreas está representada na figura 19. Os valores de velocidade média obtidos serão os utilizados nas comparações com as variáveis ambientais.

Mês da análise	Localização na geleira	Número de vetores	Média da velocidade de fluxo (m d ⁻¹)	Desvio- padrão
Nov/07	frente	2097	6,02	0,13
	centro	1100	1,38	0,13
	topo	893	0,65	0,78
Dez/07	frente	133	5,99	0,31
	centro	580	1,07	0,16
	topo	621	0,24	0,08
Jan/08	frente	10	6,41	0,2
	centro	9	1,23	0,1
	topo	19	0,76	1,2
Fev/08	frente	385	6,28	0,25
	centro	75	1,21	0,08
	topo	9	0,55	0,07

Tabela 5. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em três locais distintos da geleira Drygalski.

A variação da temperatura do ar superficial na estação meteorológica automática da Plataforma Larsen, no período do estudo, está representada na figura 22. Em uma breve análise foi possível notar a conexão da variação da temperatura com as velocidades estimadas. Nos períodos em que fica estabelecido um patamar de temperaturas mais altas, decorrentes do verão austral, as velocidades das geleiras tendem a ser maiores, como pôde ser visto nos valores de velocidades apresentadas para janeiro e fevereiro na tabela 5.



Figura 22. Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o cálculo da velocidade de fluxo superficial da geleira Drygalski. Os períodos abrangem a variação de temperatura do final da primavera de 2007 e de todo o verão de 2008.

Ao relacionar a posição da frente da geleira Drygalski, digitalizada sobre as imagens corregistradas (Figura 23), com as velocidades médias calculadas ao longo do período de estudo, o efeito maior que é possível identificar nesta escala espaçotemporal é uma posição mais avançada da frente da geleira durante dezembro de 2007, coincidindo com o período em que foi encontrado o menor valor de velocidade para a frente da geleira, 5,99 m d⁻¹, contrastando com a posição mais recuada na última imagem, 17 de fevereiro de 2008, detectada após o período de maior aceleração. Em uma análise superficial, este comportamento pode refletir o mecanismo de ajuste rápido de dinâmica de uma geleira de maré descrito por Nick et al. (2009). Um fluxo desacelerado permite que a frente da geleira avance, o que pode ser sustentado ainda por um período de inicio de aceleração. Na sequência, o fluxo mais acelerado e o derretimento, causado por temperaturas mais altas do ar ou do mar, tendem a enfraquecer a frente da geleira, podendo ocorrer um afinamento da massa de gelo que resultará em uma retração mais acentuada posterior a esta aceleração. A máxima distância encontrada entre as posições da frente da geleira é de aproximadamente 600 m, exatamente na porção central da frente de gelo.



Figura 23. Variações na posição da frente da geleira Drygalski entre novembro de 2007 e fevereiro de 2008. No fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 10 de novembro de 2007.

[v4] Comentário: Legenda das datas ERRADAS (12 por 01 e 02)

A partir da análise da série de imagens MODIS da região das plataformas Larsen A e B (Figura 24), pode-se notar que houve uma grande variação na extensão de gelo marinho no período entre outubro de 2007 e fevereiro de 2008. Durante os meses de outubro, novembro e dezembro de 2007, a camada de gelo marinho na baía frontal a geleira Drygalski aparenta estar estável e consistente. Esse período corresponde as duas primeiras estimativas da velocidade de fluxo da Drygalski, que apresentam os menores valores de velocidade e coincidem com os períodos de temperaturas mais baixas. O aumento da velocidade da geleira Drygalski, verificado nos terceiro e quarto pares de imagens analisadas, coincide com os períodos em que a camada de gelo marinho se desestabilizou e deixou, na maior parte do tempo, o mar adjacente livre de cobertura. Além disso, esse período coincide com a ocorrência das mais altas temperaturas do ar (Figura 22). Esses resultados indicam que a dinâmica da velocidade do fluxo da geleira Drygalski está relacionada a dinâmica da temperatura do ar e do gelo marinho na frente da geleiras, pois observa-se alguns indícios da relação causaefeito na dinâmica de uma geleira de maré. Temperaturas mais altas causam aceleração do fluxo e também causam a diminuição do gelo marinho que é uma barreira ao aumento do fluxo.



Figura 24. Série de imagens MODIS, da região noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do cálculo de velocidade de fluxo da geleira . A seta vermelha aponta para a geleira Drygalski.

O que também fica nítido neste estudo é a diferença nos sinais de retroespalhamento das imagens utilizadas. As regiões da geleira com contraste bem definido, áreas claras e escuras, nas imagens de novembro de 2007, tornam-se áreas escuras nas imagens do fim de dezembro de 2007 e nas de janeiro de 2008, prejudicando a identificação de feições superficiais que são os rastreadores do fluxo. Essa variação na tonalidade das imagens deve-se a outra propriedade ambiental, a quantidade de água na camada superficial da geleira, que é forte indício do derretimento superficial que ocorre nesta região durante o verão austral (LIU; WANG; JEZEK, 2006).

4.2 Geleiras Hektoria, Green, Evans e Punchbowl

As geleiras Hektoria, Green, Evans e Punchbowl são apresentadas a seguir focando as análise mais profundas nas geleiras de maior volume, a Hektoria e a Green. Os períodos em que as velocidades foram analisadas são do ano de 2008, velocidades estimadas para março/abril e para de outubro.

O campo de velocidades apresentado na figura 25 é referente as velocidades estimadas entre 23 de março e 3 de abril de 2008. O campo foi gerado a partir da interpolação de 175.961 vetores, com valores mínimos próximos de zero e valores máximos por volta de 6 m d⁻¹. Os valores altos são encontrados na parte terminal da geleira Hektoria, que desde a desintegração da plataforma Larsen B apresenta comportamentos de desequilíbrio, com retração da frente de gelo, diminuição da espessura e aceleração (HULBE *et al.*, 2008; ROTT , 2011). Os valores de velocidade gerados para a geleira Hektoria por este trabalho é bastante similar em intensidade e variação da velocidade ao longo da geleira aos dados apresentados por Riedl, Rott e Rack (2004).

Na figura 26 está apresentado o campo de velocidade estimado para outubro de 2008. Em relação ao campo de velocidade ilustrado na figura 24, o padrão de distribuição das velocidades na superfície da geleira é semelhante ao do par anterior. As quatro cenas utilizadas apresentavam um bom contraste nas bordas das feições superficiais, sendo assim, muitos vetores foram gerados. Neste segundo par foram 239.788 vetores pós filtragem, permitindo uma boa representação da velocidade sobre a geleira



Figura 25. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Hektoria (H), Green (G), Evans (E) e Punchbowl (P) durante o período entre 23 de março e 03 de abril de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,29 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.



Figura 26. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Hektoria (H), Green (G), Evans (E) e Punchbowl (P) durante o período entre 18 e 29 de outubro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008. As áreas azuis que cobrem a maior extensão da imagem representam a superfície com velocidades menores que 1 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 6,01 m d⁻¹ são referentes a vetores encontrados na região marinha.

Os dados obtidos pelo sensor de temperatura posicionado na plataforma Larsen C, mostram para o ano de 2008 (Figura 27) alguns picos de temperatura mais altos do que o esperados para o fim do outono e começo de inverno na região. Entretanto este sinal não sobrepôs o efeito da sazonalidade da temperatura no fluxo das geleiras avaliadas. Os períodos nos quais foram calculados os fluxos apresentam claro sinal de resposta da estação que o antecede, o primeiro período avaliado vem na sequência do verão com sua extensa temporada de temperaturas mais elevadas e o oposto ocorre com o segundo momento avaliado, precedido pelo inverno com uma tendência de os valores de temperaturas mais baixos do ano.



Figura 27 Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o calculo da velocidade de fluxo superficial da geleira Hektoria, Green, Evans e Punchbowl. O período de março esta relacionado com os efeitos das altas temperaturas de verão, enquanto o segundo período, de outubro de 2008 se conecta com os efeitos do inverno, temporada extensa com temperaturas mais baixas.

A relação entre temperatura do ar e velocidade de fluxo das geleiras fica clara quando analisamos os perfis de velocidade extraídos das geleiras Hektoria e Green (Figuras 29 e 30). A localização destes perfis pode ser vista na figura 28. Avaliando os perfis longitudinais dos dois fluxos e o transversal, que une as duas desembocaduras destas geleiras, vemos um sinal forte nos três segmentos, velocidades mais elevadas em março com relação às de outubro de 2008. Em diversos pontos do perfil longitudinal da Hektoria, valores de 0,5 m d⁻¹ mais altos foram estimados para o período de março. No perfil longitudinal da Green, a diferença de velocidade entre os períodos é menor, mas tende a mostrar a mesma forçante. O terceiro perfil, o transversal, reforça o que foi verificado nos perfis longitudinais, velocidade mais alta em março. E esta diferença é realmente mais acentuada para o lado da geleira Hektoria (Figura 30).



Figura 28. Localização dos perfis longitudinais da geleira Hektoria (A-B), da geleira Green (E-F), do perfil transversal na zona frontal das duas geleiras(C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais das geleiras Hektoria e Green. Hfr-frente Hektoria, Hct-centro Hektoria, Htp-topo Hektoria, Gct-centro Green, Gfr-frente Green. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem Terrasar de 23 de março de 2008.



Figura 29 Perfis longitudinais de velocidade superficial das geleiras Hektoria (a) e Green (b) nos 2 períodos analisados.



Figura 30. Perfil transversal de velocidade superficial das geleiras Hektoria e Green, próximo a linha de frente onde os fluxos destas duas geleiras encontram-se unidos, para os 2 períodos analisados.

Rott *et al.* (2011), verificaram o mesmo sinal sazonal discutido aqui, a partir da mesma fonte de dados, velocidades extraídas por correlação cruzada de imagens Terrasar. Eles obtiveram um valor de variação da velocidade da frente da geleira, de aproximadamente 10% do valor fluxo, o que corresponde a mais de 0,5 m d⁻¹. Esta variação ocorreu entre velocidades estimadas para os meses de abril e novembro, em uma geleira um pouco mais ao sul, a Crane. Essa resposta dinâmica das geleiras às variações sazonais também fica evidente na morfologia da frente da geleira. Na figura 31 estão expostas as posições da frente da geleira Hektoria, nas quatro datas de imagens utilizadas para o cálculo da velocidade. Uma posição muito mais recuada da frente ocorre em março, quando as velocidades são maiores. É provável que esta retração de área seja resposta ao fluxo mais acelerado que deve ter sido crescente

durante o verão precedente. Seguindo esta lógica, de que as temperaturas mais altas do verão aceleram o fluxo e permitem que a massa de gelo frontal esteja frágil e mais propícia a fragmentar, a posição avançada da frente da geleira no mês de outubro é compreensível. A massa de gelo, mais consistente e menos acelerada adquire resistência aos mecanismos de desprendimento de blocos de gelo e conseguem avançar um pouco. As posições das frentes dos dois períodos distam aproximadamente 1 km na parte central na frente da geleira Hektoria. Em um contexto temporal mais extenso, as geleiras Hektoria e Green vêm sofrendo uma retração considerável desde a perda da plataforma Larsen B em 2002. Um estudo detalhado das posições de frente destas e de outras geleiras da região é apresentada por Sandner (2010), que destaca um recuo de 5 km da frente das geleiras Hektoria e Green no ano de 2007, e também evidencia um recuo mais pronunciado na frente da Hektoria de 2007 para 2008.



Figura 31. Variações na posição da frente das geleiras Hektoria-Green, entre março e outubro de 2008. Ao fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 23 de março de2008.

Os dados da tabela 6 se somam as outras evidências já apresentadas da forte relação da época do ano com as velocidades das geleiras. Avaliando a propagação do sinal sazonal nas diferentes zonas da Hektoria e da geleira Green, o que se percebe é uma resposta mais fraca na geleira Green, mais nítida na região central.

Mês da análise	Localização na geleira	Número de vetores	Média da velocidade de fluxo (m d ⁻¹)	Desvio-padrão
Mar/08	Hektoria - frente	1816	5,77	0,12
	Hektoria -centro	636	2,61	0,16
	Hektoria -topo	576	1,18	0,16
	Green - frente	1744	5,23	0,51
	Green - centro	692	2,02	0,11
Out/08	Hektoria - frente	3014	5,22	0,2
	Hektoria - centro	1116	2,09	0,16
	Hektoria - topo	699	0,95	0,2
	Green - frente	1113	4,32	0,44
	Green - centro	2107	2,10	0,08

Tabela 6. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em locais distintos das geleiras Hektoria eGreen.

São apresentados também os perfis de velocidade de duas geleiras menores que estão próximas, a Evans (Figura 33) e a Punchbowl (Figura 35), posicionados como mostra as figuras 32 e 34, respectivamente. A geleira Evans mostra comportamento bastante relacionado com as geleiras Hektoria e Green. Deságua no mesmo embaiamento e até 2007 as três geleiras formavam um fluxo único na região frontal (SANDNER, 2010).



Figura 32. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) sobre a geleira Evans. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 23 de março de 2008.

Como é possível verificar na figura 33, os perfis de velocidade traçados sobre a geleira Evans (Figura 32) também sinalizam a influência da variação sazonal na dinâmica da massa de gelo. Nesta geleira a velocidade máxima atingida na frente chega a valores de cerca de 2 m d⁻¹.



Figura 33. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Evans para os 2 períodos analisados.

Os perfis de velocidade da geleira Punchbowl (Figura 35) não apresentaram representação de fluxo tão definida quanto os outros três da mesma cena. É um fluxo bem reduzido quando comparado aos outros quatro anteriormente descritos. Não apresenta uma boa cobertura de feições superficiais e por isso a identificação de vetores de deslocamento não resultam nas melhores estimativas de velocidade de fluxo (Figuras 24 e 25). Apresenta a mesma gradação na distribuição das velocidades na superfície da geleira, velocidades mais altas no centro e frente da geleira que vão decaindo à medida que se aproxima das paredes da geleira e que se distância da frente.



Figura 34. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) da geleira Punchbowl. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerrasSAR-X de 23 de março de 2008.



Figura 35. Perfis longitudinal (a) e transversa l(b) de velocidade superficial da geleira Punchbowl para os 2 períodos analisados.

Analisando o período entre março e outubro de 2008, a relação da cobertura de gelo marinho na região com as velocidades das geleiras não está direta. Existiam poucas imagens MODIS sem cobertura de nuvens perto do período analisado no primeiro semestre, somente as três apresentadas na parte superior da figura 36. Pelo o que é possível inferir das imagens, o gelo marinho esteve presente, aparentemente fino, nos dois períodos. Desta maneira, pode-se afirmar que a variação sazonal na temperatura esteve mais relacionada com as variações de velocidade destas geleiras do que a presença do gelo marinho.



Figura 36. Série de imagens MODIS da região e noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do calculo de velocidade de fluxo das geleiras Hektoria, Green, Evans e Punchbowl. A seta vermelha aponta para a montante das geleiras Hektoria e Green.

4.3 Geleiras Jorum, Crane, Mapple e Melville

A última região analisada localiza-se mais ao sul da região da plataforma Larsen B, e incluiu as geleiras Jorum, Crane, Mapple e Melville. Esses ambientes foram analisados em outubro e novembro de 2008, foram dois períodos sequenciais, sem intervalos entre as estimativas de velocidade. Apresentaram as variações na dinâmica das geleiras de menor período.

O campo de velocidades apresentado na figura 37 foi calculado a partir de 84.660 vetores já filtrados. Esta foi a região em que um maior número de vetores foi eliminado devido ao fato de boa parte da imagem consistir em zonas de escarpas. Após a máscara de rochas e escarpas e a filtragem dos valores muito altos, foram usados aproximadamente 30% dos vetores calculados. Ganha destaque o comportamento diferente, das velocidades das geleiras Jorum e Crane, mais ao norte com a mesma tendência dos fluxos anteriormente descritos, ou seja, um decrescente perfil longitudinal de velocidade da frente em direção a montante e o comportamento das duas geleiras mais ao sul, Mapple e Melville, com uma variação pouco perceptível na mesma extensão.



Figura 37. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Jorum-J, Crane-C, Maple-Ma e Melville-Me, entre o período entre 13 de outubro de 2008 e 24 de outubro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 13 de outubro de2008. As áreas azuis encontradas em toda extensão das geleiras Mapple e Mellvile e nas áreas marginais da Crane e Jorum representam a superfície com velocidades menores que 0,6 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 4,83 m d⁻¹,valor máximo encontrado na frente da geleira Crane, são referentes a vetores encontrados na região marinha

O campo apresentado na figura 38, correspondente às velocidades estimadas para o fim do mês de outubro e início do mês de novembro de 2008. Visualmente é difícil identificar uma variação entre o campo da figura 36 e o da figura 37. Esta segunda representação foi calculada a partir de 78.128 vetores.

O panorama da dinâmica das geleiras é também relacionado com o evento de desintegração da plataforma Larsen B. De acordo com Rott et al. (2011) as velocidades pré desintegração da plataforma, são a metade do valor estimado pra 2008, nas geleiras Jorum, Mapple e Melville e mais de três vezes menor para a geleira Crane.

A série anual de temperatura medida na estação meteorológica da plataforma Larsen é apresentada na figura 39 e é a mesma representação usada anteriormente para o ano de 2008, diferindo apenas no destaque sobre os períodos avaliados para essas geleiras. As variações de temperatura entre os dois períodos é bem suave, períodos tão próximos não apresentaram visualmente uma característica que definisse a influência da temperatura na variação de velocidade entre os dois períodos.



Figura 38. Campo de velocidade superficial calculado para as geleiras Jorum-J, Crane-C, Maple-Ma e Melville-Me, entre o período entre 24 de outubro de 2008 e 04 de novembro de 2008, sobre a imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de2008. As áreas azuis encontradas em toda extensão das geleiras Mapple e Mellvile e nas áreas marginais da Crane e Jorum representam a superfície com velocidades menores que 0,6 m d⁻¹. Os valores representados maiores que 4,81 m d⁻¹,valor máximo encontrado na frente da geleira Crane, são referentes a vetores encontrados na região marinha.


Figura 39. Gráfico série temporal da temperatura medida na estação meteorológica automática da plataforma Larsen, os retângulos azuis destacam os períodos correspondentes aos intervalos entre aquisições das imagens TerraSAR-X utilizadas para o calculo da velocidade de fluxo superficial das geleiras Jorum, Crane, mapple e Melville. Os dois períodos avaliados são sequenciais, sem intervalos, representam a época em que as temperaturas começam a aumentar no final da primavera e há pouca variação de temperatura entre si.

A figura 40 mostra a localização dos perfis de velocidade transversal e longitudinal extraídos do campo de velocidade da geleira Jorum. Os perfis com os valores de velocidade são apresentados na figura 41. A área estimada para geleira Jorum, por Rignot (2004), foi de 412 km². Rott *et al.*, em 2011, reporta para esta geleira a perda de 25 km² de área frontal entre 2005 e 2008.



Figura 40. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) da geleira Jorum. A linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008.



Figura 41. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Jorum para os 2 períodos analisados.

Na comparação dos perfis longitudinais de velocidade podemos identificar o padrão de velocidades maiores na frente da geleira em relação às partes a montante, mas a variação não é tão abrupta, é quase linear. Não houve uma distinção clara entre as velocidades nos diferentes períodos longitudinalmente. Nos perfis transversais parece haver uma pequena aceleração no mês de novembro, notável somente de um dos lados do perfil, o lado mais ao norte. As velocidades encontradas neste trabalho, cerca de 2,5 m d⁻¹ são próximas das calculadas por Rott *et al.* (2011) na parte frontal da Jorum, 2,36 m d⁻¹, a diferença entre os valores pode estar relacionada ao posicionamento exato de onde se extraiu o valor de velocidade.

A figura 42 mostra a localização dos perfis longitudinal e transversal analisados na geleira Crane. Localiza também onde foram calculados valores médios de velocidade diretamente do valor dos vetores de deslocamento.



Figura 42. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e transversal (C-D) e das áreas de cálculo (1km²) da velocidade de fluxo em diferentes locais da geleira Crane, fr-frente, ct-centro, tp-topo, trb-tributário. Linha verde corresponde a linha de frente marcada sobre imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008.

Os perfis de velocidade extraídos da geleira Crane não demonstraram uma variação temporal significante (Figura 43). Na espacialização das velocidades sobre os eixos da geleira o padrão permanece com velocidades altas na frente e no centro.



Figura 43. Perfis longitudinal (a) e transversal (b) de velocidade superficial da geleira Crane para os 2 períodos analisados.

Os valores médios de velocidade calculados na região próxima a frente, foram 5,34 e 5,39 m d⁻¹ e são próximos dos 5,15 m d⁻¹, atribuído por Rott *et al.* (2011) as velocidades frontais desse fluxo para o ano de 2008. Os valores pontuais de velocidade calculados nas pequenas áreas mostradas na figura 41 estão relacionados na tabela 7. Avaliando a variação das velocidades da geleira Crane com relação a posição onde foi feita a estimativa, é possível observar que as regiões mais distantes da frente, centro e topo, apresentaram uma aceleração. As velocidades aumentaram de 3,02 m d⁻¹ para 3,21 m d⁻¹, no centro e de 1,61 m d⁻¹ para 1,86 m d⁻¹, entre os períodos avaliados. O fato desse aumento não ter aparecido na frente da geleira pode indicar uma forçante de aceleração mais a montante, talvez relacionado a variação na precipitação ou na lubrificação basal.

Mês da análise	Localização na geleira	Número de vetores	Média da velocidade de fluxo (m d⁻¹)	Desvio- padrão
Out/08	frente	1750	5,34	0,28
	centro	300	3,02	0,20
	topo	72	1,61	0,07
	tributário	2168	1,82	0,41
Nov/08	frente	1333	5,39	0,37
	centro	258	3,21	0,2
	topo	53	1,86	0,07
	tributário	1829	1,79	0,39

Tabela 7. Média e desvio padrão da velocidade de fluxo em locais distintos da geleira Crane

Na figura 44 estão representadas as posições de linha de frente da geleira Crane. Uma impressionante variação da linha de frente ocorreu, foi possível reconhecer o processo de desprendimento de blocos de gelo atuando em um recuo rápido da linha de frente, aproximadamente 400 m em 11 dias na porção mais norte do fluxo. Nesta escala temporal não foi possível relacionar esse acontecimento com os fatores ambientais analisados nesse trabalho.



Figura 44. Variações na posição da frente da geleira Crane entre outubro e novembro de 2008. No fundo, imagem TerraSAR-X adquirida em 24 de outubro de2008.

A figura 45 mostra a localização dos perfis traçados sobre as geleiras Mapple e Melville para apresentação da variação da velocidade de fluxo superficial. Apesar de não terem sido detectados efeitos de perda de espessura depois da desintegração da Larsen B nestes dois fluxos estreitos (HULBE *et al.*, 2008), foram verificados incrementos de 1,8 m d⁻¹ a 2,8 m d⁻¹ na velocidade estimada antes e depois da perturbação de 2002 (ROTT *et al.*, 2011).



Figura 45. Localização dos perfis longitudinal (A-B) e Transversal (C-D) da geleira Mapple e dos perfis longitudinal (E-F) e transversal (G-H) da geleira Melville. As linhas verdes correspondem a posição da frente das geleiras, delimitadas sobre a imagem TerraSAR-X de 24 de outubro de 2008.

Os perfis longitudinais e transversais da geleira Mapple não apresentam uma informação confiável sobre a realidade dinâmica da geleira. Os valores bastante reduzidos podem ter sido distorcidos pela interpolação, ou erros possíveis de corregistro também podem explicar essa falta de padrão apresentados na figura 46a e 46b. Também deve ser considerados os limites de detecção dos deslocamentos por este método. Já os perfis longitudinais e transversais da geleira Melville (Figura 46c e 46d) representam melhor a variação da velocidade na superfície da geleira. O valor de 0,55 m d⁻¹ publicado por Rott et al., (2011), estimados para a zona frontal da geleira

Melville, se aproxima dos valores aqui representados (Figura 45c), que atingem um valor próximo de 0,6 m d⁻¹ na frente da geleira.



Figura 46. Perfis de velocidade superficial longitudinal (a) e transversal (b) da geleira Mapple e longitudinal (c) e transversal (d) da geleira Crane para os 2 períodos analisados.

A figura 47 mostra a série de imagens MODIS disponíveis para o curto período de tempo analisado. Entre meados de outubro e o começo de novembro, o gelo marinho esteve presente na região próxima a costa onde estão as geleiras que alimentavam a plataforma de gelo Larsen B. Nesse período, o gelo marinho apresentou alguma variação na espessura, observada através da transparência da camada, e na quantidade de rachaduras, mas neste caso nenhuma relação pôde ser estabelecida entre essa variável e as condições dinâmicas das geleiras.



Figura 47. Série de imagens MODIS da região e noroeste do mar de Weddell e norte da Península Antártica, correspondente ao período do calculo de velocidade de fluxo das geleiras Jorum, Crane, Mapple e Melville. A seta vermelha aponta para a geleira Crane.

79

Capítulo 5 - Conclusões

O algoritmo de correlação cruzada utilizado neste estudo possibilitou a estimativa da variação temporal nas velocidades de fluxo das geleiras Drygalski, Hektoria, Green, Evans, Punchbowl, Jorum, Crane, Mapple e Melville. Mesmo com a grande variação do sinal de retroespalhamento detectado pelo TerraSAR-X, principalmente no caso das imagens da geleira Drygalski, os vetores de deslocamento estimados pelo algoritmo foram capazes de identificar a variação da velocidade ao longo do período analisado, obtendo resultados que refletiram a dinâmica de fluxo esperadas para as geleiras da região de estudo.

As velocidades superficiais estimadas para as distintas geleiras revelaram a grande variabilidade que existe nos movimentos de massa dessa região. A faixa de valores de velocidades encontradas neste estudo, é condizente com o que é conhecido sobre a dinâmica das geleiras do nordeste da Península Antártica. A região frontal das geleiras de maré é mais frequentemente escolhida para representar o fluxo pois está associada à taxa de descarga de volume da geleira para o ambiente marinho. Desta forma, as velocidades encontradas para as geleira Drigalski são em média de 6,15 m d⁻¹, na Hektoria se aproximam do valor 5,5 m d⁻¹, na Green de 4,77 m d⁻¹ e na Crane de 5,37 m d⁻¹.

As geleiras de maré da porção nordeste da Península Antártica continuam respondendo às instabilidades geradas com a desintegração das plataformas de gelo Larsen A e Larsen B (COOK *et al.* 2010; ROTT, 2011). Entretanto, outros fatores regem a variação na dinâmica das geleiras de maré desta região quando escalas mensais de tempo são avaliadas. O presente estudo apresentou alguns elementos dessa dinâmica de curto período.

As frentes das geleiras Drygalski, Hektoria e Green responderam ao aumento de velocidade dos seus respectivos fluxos, de forma prevista por modelos de perdas de blocos de gelo. Aparentemente, a temperatura do ar é o fator ambiental, dentre os analisados, de maior influência na variação da velocidade de fluxo das geleiras. Com ocorrência de maior derretimento superficial, o aquecimento do ar desencadeia o aumento da lubrificação basal, a diminuição da extensão do gelo marinho e o aumento da temperatura superficial do mar. Todos estes fatores se somam e podem contribuir para a aceleração de geleiras de maré. Devido a falta de dados contínuos e mais específicos, tais como temperatura superficial do mar medida *in situ*, espessura exata das massas de gelo, condição de lubrificação da base da geleira e temperatura do ar em pontos mais próximos das geleiras analisadas, é difícil traçar um panorama mais preciso da dinâmica glacial, separando a influência de cada fator.

A abordagem utilizada neste estudo permite a análise das variações na velocidade de fluxo das geleiras em diferentes escalas espaciais. Em uma escala regional foi possível identificar as geleiras com fluxos mais rápidos, as quais contribuem com maior quantidade de água doce para o ambiente marinho. Já na escala de cada geleira, foi possível gerar dados de variação da velocidade de fluxo na superfície das mesmas, além de médias em locais selecionados. Estes últimos valores são mais facilmente comparados com outros estudos realizados na região. Esta segunda escala de investigação, mais pontual apresenta vantagem quando o fator analisado é o tempo de processamento. Logo, é válido concluir que este metodologia mostrou-se eficaz para a estimativa da velocidade de fluxo das geleiras de maré da Península Antártica. Porém, é necessário conhecer as características do ambiente (e.g., estação de derretimento superficial, áreas de rochas, áreas de encosta, zonas de concentração de fendas) para extrair a melhor informação das imagens de radar de alta resolução. Vale ressaltar que para cada ambiente é necessário ajustar parâmetros do algoritmo como as janelas de detecção dos deslocamentos e o limite mínimo de correlação para estimar mais precisamente as velocidades superficiais das geleiras.

Além de fornecer os dados a partir dos quais é feito o cálculo das velocidades de fluxo das geleiras, as imagens geradas pelo satélite TerraSAR-X permitem o esclarecimento de algumas condições ambientais de reconhecida importância em relação a dinâmica de fluxos de gelo e energia que ocorrem na região (*e.g.*, cobertura de gelo marinho, posição da frente, derretimento superficial).

81

Referências Bibliográficas

- ALLEY, R. On Thickening Ice? Science, (January), 64-65,2002.
- AMUNDSON, J. M. Iceberg Calving Dynamics of Jakobshavn Isbrae, Greenland.Tese(Doutorado) Universidade de Alaska Fairbanks. 2010.
- ARIGONY-NETO, J. Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula a centerline approach combining satellite and GIS data. 136 f. Tese (Doutorado). Universidade Albert-Ludwigs, Freiburg, 2006.
- BAMBER, J. L., ALLEY, R. B., & JOUGHIN, I. Rapid response of modern day ice sheets to external forcing. Earth and Planetary Science Letters, 257(1-2), 1–13. 2007.
- BAS. Antarctic Meteorological Database at the British Antarctic Survey. Diponível em: < http://www.antarctica.ac.uk/met/metlog/>. Acesso em: 03 de novembro de 2011.
- BERTHIER, E., VADON, H., BARATOUX, D., ARNAUD, Y., VINCENT, C., FEIGL, K., REMY, F., et al. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery. Remote Sensing of Environment, v.95(1), 14–28, 2005.
- BINDSCHADLER, R.; VORNBERGER, P.; FLEMING, A; et al. The Landsat Image Mosaic of Antarctica. Remote Sensing of Environment, v. 112, n. 12, p.4214-4226, 2008.
- BRAUN, M., & HUMBERT, A. Recent Retreat of Wilkins Ice Shelf Reveals New Insights in Ice Shelf Breakup Mechanisms. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 6(2), 263–267. 2009.
- CIAPPA, A., PIETRANERA, L., & BATTAZZA, F. Perito Moreno Glacier (Argentina) flow estimation by COSMO SkyMed sequence of high-resolution SAR-X imagery. Remote Sensing of Environment,v. 114 n.9, 2088–2096, 2010.
- COGLEY, J.G., R. HOCK, L.A. RASMUSSEN, A.A. ARENDT, A. BAUDER, R.J. BRAITHWAITE, P. JANSSON, G. KASER, M. MÖLLER, L. NICHOLSON AND M. ZEMP, , *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS Contribution No. 2, UNESCO-IHP, Paris. 2011
- COOK, A J., FOX, A J., VAUGHAN, D. G., & FERRIGNO, J. G.. Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. **Science** (New York, N.Y.), 308(5721), 541– 4, 2005.
- COOK, A. J.; VAUGHAN, D. G. Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. **The Cryosphere**, v. 4, p. 77-98, 2010.
- DE ANGELIS, H., & SKVARCA, P. Glacier surge after ice shelf collapse. **Science** (New York, N.Y.), 299(5612), 1560–2, 2003.

- EINEDER, M., & Jaber, W. A. Glacier flow and topography measurements with TerraSar-X and TanDEM-X. . **IEEE Geoscience and Remote Sensing Proceedings**, 3835–3838, 2011.
- ESA .European Space Agency. Next ESA SAR Toolbox (NEST Versão 4B1.0) Disponível em: http://nest.array.ca/web/nest/release-4B>. Acesso em: 02 de setembro de 2011.
- GAO, J., & LIU, Y. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: a review. **Progress** in Physical Geography, 25(4), 520–540. 2001.
- GILES, A. B., MASSOM, R. A., & WARNER, R. C. A method for sub-pixel scale feature-tracking using Radarsat images applied to the Mertz Glacier Tongue, East Antarctica. **Remote** Sensing of Environment, 113(8), 1691–1699, 2009.
- GUDMUNDSSON, G. H. Fortnightly variations in the flow velocity of Rutford Ice Stream, West Antarctica. **Nature**, 444(7122), 1063–4, 2006.
- HULBE, C., SCAMBOS, T., YOUNGBERG, T., & LAMB, A. Patterns of glacier response to disintegration of the Larsen B ice shelf, Antarctic Peninsula. **Global and Planetary Change**, 63(1), 1–8, 2008.
- INFOTERRA. TerraSAR-X Services Image Product Guide (p. 28),2009.
- JENSEN, J. R.Sensoriamento Remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres.597p, 2009.
- LEGRÉSY, B., WENDT, A., TABACCO, I., RÉMY, F., & DIETRICH, R.). Influence of tides and tidal current on Mertz Glacier, Antarctica. Journal of Glaciology, 50(170), 427–435, 2004.
- LIU, H.; WANG, L.; JEZEK, K.C. Spatiotemporal variations of snowmelt in Antarctica derived from satellite scanning multichannel microwave radiometer and Special Sensor Microwave Imager data (1978–2004). Journal of Geophysical Research, Washington, v. 111, n. F01003, p. 1-20, 2006.
- LUBIN, D., MASSOM, R. Polar Remote Sensing Volume II: Ice Sheets. Berlin: Springer-Praxis. 426p , 2006.
- MACAYEAL, D. R.; SCAMBOS, T.; HULBE, C. L.; FAHNESTOCK, M. A.Catastrophic ice-shelf breakup by an ice-shelf-fragment-capsize mechanism.Journal of Glaciology, v. 49, n. 164, p. 22–36, 2003.
- MORRIS, ELIZABETH M.; VAUGHAN, DAVID G. Spatial and temporalvariation of surface t t temperature on the Antarctic Peninsula and the limit ofvariability of ice shelves. Antarctic Research Letters, v. 79, n. Antarctic ResearchSeries, p. 61-68, 2003.
- NASA. Antartic Sea Ice. Disponível em :< http://earthobservatory.nasa.gov/Features/SeaIce/page4.php>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2012.
- NICK, F. M., VIELI, A., HOWAT, I. M., & JOUGHIN, I. Large-scale changes in Greenland outlet glacier dynamics triggered at the terminus. Nature Geoscience, 2(2), 110–114, 2009.

PELLIKA, P.; REES, G. Remote sensing of glaciers: techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers. [S.I.]: **Taylor & Francis**, 2009.

- PRITCHARD, H. D., & VAUGHAN, D. G. Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula. Journal of Geophysical Research, 112(F3), 1–10, 2007.
- PRITCHARD, H., & BINGHAM, R. Exploration glaciology: radar and Antarctic ice. **Physics** Education, 442. 2007.
- 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.

RAU, F., BRAUN, M., FRIEDRICH, M., WEBER, F., GOßMANN, H. Radar glacier zones and their boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. **Proceedings of EARSeL-SIG**:317-327,2000.

- REES, W. G. Physical Principles of Remote Sensing. 2ed.Cambridge University Press, 2001.
- RIEDL, C., ROTT, H., & RACK, W. Recent variations of Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula, observed by Envisat (Vol. 2004, pp. 2–7), 2004.
- RIGNOT, E. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. **Geophysical Research Letters**, 31(18), 2–5, 2004.
- RIGNOT, E., & THOMAS, R. H. Mass balance of polar ice sheets. **Science** (New York, N.Y.), 297(5586), 1502–6, 2002.
- ROTT, H.; MULLER, F.; NAGLER, T.; FLORICIOIU, D. The imbalance of glaciers after disintegration of Larsen-B ice shelf, Antarctic Peninsula. **The Cryosphere**, v. 5, n. 1, p. 125-134, 1, 2011.
- ROTT, H., RACK, W., SKVARCA, P., & DE ANGELIS, H.. Northern Larsen Ice Shelf, Antarctica: further retreat after collapse. **Annals of Glaciology**, 34(1), 277–282, 2002.
- SANDHÄGER, H., RACK, W., & JANSEN, D. Model investigations of Larsen B Ice Shelf dynamics prior to the breakup. Forum for Research into Ice Shelf, 16(16), 2005.
- SANDNER, R. Ice retreat after disintegration of the northern Larsen Ices shelf. Dissertação (Mestrado). Universidade de Innsbruck. 2010.

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

- SCAMBOS, T., J. BOHLANDER, AND B. RAUP. 1996. Images of Antarctic ice shelves. [dates: 09/10/2007-10/11/2008] Boulder, Colorado, USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media. http://nsidc.org/data/iceshelves_images/.
- SCAMBOS, T., HULBE, C., & FAHNESTOCK, M. Climate-induced ice shelf disintegration in the Antarctic Peninsula. **Antarctic Research Series**, 76, 335–347, 2003.

- SHEPHERD, A., WINGHAM, D., PAYNE, T., & SKVARCA, P. Larsen ice shelf has progressively thinned. **Science**, v 302, 856–859, 2003.
- SHUMAN, C. A.; BERTHIER, E.; SCAMBOS, T. A. 2001–2009 elevation and mass losses in the Larsen A and B embayments, Antarctic Peninsula. Journal of Glaciology, v. 57, n. 204, p. 737-754, 2011.
- SIMÕES, J. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa** Antártica Brasileira, 154, 119–154,2004.
- SKVARCA, P., DE ANGELIS, H., & ZAKRAJSEK, A. F. Climatic conditions, mass balance and dynamics of Larsen B ice shelf, Antarctic Peninsula, prior to collapse. Annals of Glaciology, 39(1), 557–562, 2004.
- SOARES, J. V. Fundamentos de Sensoriamento Remoto por Radar. Desenvolvimento de material didático ou instrucional. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/dsr/vianei/radar/DOCs_PDFs/Livro_Radar.pdf>. Acesso em : 10 de março de 2011.
- TURNER, J., COLWELL, S., & HARANGOZO, S. Variability of precipitation over the coastal western Antarctic Peninsula from synoptic observations. Journal of Geophysical Research, 102(12), 1997.
- TURNER, J.; COLWELL, S. R.; MARSHAL, G. J.; LACHLAN-COPE, T. A.; CARLETON, A. M.; JONES, P. D.; LAGUN, V.; REID, P. A. & IAGOVKINA, S.; Antarctic climate change during the last 50 years. International Journal of Climatology, 25: 279:294, 2005.
- TURNER, J.; BINDSCHADLER,R.; CONVEY, P.; DI PRISCO G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D.; MAYEWSKI, P.; SUMMERHAYES, C. Antarctic climate change and the environment. Cambridge: SCAR. 526 p., 2009.
- VAUGHAN, D., & ARTHERN, R. Why is it hard to predict the future of ice sheets? **Science**, 315(March), 1503–1504, 2007.
- VELHO, L. F. Utilização do filtro lee na redução do speckle em imagens SAR usadas na determinação da velocidade de fluxo de Geleiras da Península Antártica. Dissertação (Mestrado). **Universidade Federal do Rio Grande do Sul,86p.,** 2009.
- VIELI, A., PAYNE, A. J., SHEPHERD, A., & DU, Z. Causes of pre-collapse changes of the Larsen B ice shelf: Numerical modelling and assimilation of satellite observations. Earth and Planetary Science Letters, 259(3-4), 297–306, 2007.
- VIELI, A. On the Dynamics of Tidewater Glaciers. Tese(Doutorado). Swiss Federal Institute Of Technology Zurich, 2001.
- VIELI, A., JANIA, J., & KOLONDRA, L. The retreat of a tidewater glacier: observations and model calculations on Hansbreen, Spitsbergen. Journal of Glaciology, 48(163), 592–600, 2002.
- WALTER, J. I., BOX, J. E., TULACZYK, S., BRODSKY, E. E., HOWAT, I. M., AHN, Y., & BROWN, A. Oceanic mechanical forcing of a marine-terminating Greenland glacier. Annals of Glaciology, 53(60), 181–192, 2012.

- WORBY, A. P., GEIGER, C. A., PAGET, M. J., VAN WOERT, M. L., ACKLEY, S. F., & DELIBERTY, T. L. Thickness distribution of Antarctic sea ice. Journal of Geophysical Research, 113(C5), 1–14, 2008.
- YOUNG, D.(2010). Image Correspondence by Cross-Correlation Demonstration. Disponível em: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fx_files /27269/3/content /html/correspDemo.html >. Acesso em: 26 de junho de 2011.
- ZWALLY H. J., W. ABDALATI, T. HERRING, K. LARSON, J. SABA ; K. STEFFEN; Surface meltinduced acceleration of Greenland ice-sheet flow. **Science** 297 (5579), 218-222. 2002.