

Universidade Federal do Rio Grande - FURG

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

**Estimativa do Balanço de Massa da
porção norte da Península Antártica pelo
uso de imagens do sensor ASTER**

Christian Florian Gobel

Orientador:

Dr. Jorge Arigony Neto

Banca examinadora:

Dr. Cláudio Wilson Mendes Júnior

Dr. Jefferson Cardia Simões

Dr. Maurício Magalhães Mata

Christian Florian Gobel

**Estimativa do Balanço de Massa da
porção norte da Península Antártica pelo
uso de imagens do sensor ASTER**

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

Rio Grande, agosto de 2012

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que de alguma forma e em algum momento passaram em minha vida e contribuíram com esta experiência. Das mais presentes e importantes, agradeço de coração à minha namorada e companheira, Maíra. Obrigado por compartilhar junto esta experiência e as próximas que virão. Igualmente importante, gostaria de agradecer a TODA minha família por todo o amor que temos uns com os outros. À minha mãe pela excelente educação e apoio em minhas decisões. A minha querida irmã, sempre em algum canto do mundo, mandando seus pensamentos positivos e amor. A minha Tia/Mãe por sua preocupação e manutenção física. Às minhas primas/irmãs, obrigado pelo carinho. Agradeço a Mara, por mostrar como podemos vencer obstáculos. Parabéns pelo filho. Obrigado, Lúcia, pelas ótimas vibrações.

Agradeço a TODA “equipe” que compõem o LaCrio. Obrigado por transformarem uma sala cheia de computadores em um AMBIENTE JOVEM E DESCONTRAÍDO. Obrigado a todos que por aqui passaram. Um abraço ao Cristiano e muito amor para sua família. Obrigado a Joyce pela ajuda manual, juntamente com todos que contribuíram com a eterna delimitação das bacias (“... de drenagem glacial, tem que deixar claro”). Gostaria de agradecer em especial aos companheiros de infindáveis horas extras de corujão, que tornaram possível a conclusão desta dissertação. Ao Adriano, Cláudio e Virgínia, muito obrigado pela companhia e amizade. Obrigado Marina pelo apoio, grande ajuda e amizade. Obrigado, Marina e Robledo, pelos cafés da manhã após noites de corujão.

Agradeço ao Jorge, por me receber bem no grupo e confiar em mim na execução deste trabalho. Obrigado por incentivar e não deixar desanimar na hora mais difícil. Parabéns pela sua postura como professor e pessoa.

Obrigado aos amigos que sempre estiveram por perto para ajudar, incentivar e relaxar nos momentos turbulentos. Obrigado Nicolas, Piauí, Rodrigo, Arnaldo, Colômbia, Hugo, Luti, Bahia, Benja, Lumi, ... e tantos outros que integram a família Cassineira.

Obrigado a linda família Liane, Tiago, Lucas e Gael, pelos momentos gostosos de visita à casa de vocês. Obrigado pela atenção: Tati, Dani e Carlo, Lupe e Tiago.

Por último, obrigado ao CNPq pelo dinheiro investido e ao Maurício Mata pela bolsa concedida em seu projeto POLARCANION. Obrigado também ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

RESUMO

Uma maior perda de massa pelas geleiras influencia diretamente a formação das massas de água ao redor da Península Antártica que irão compor a circulação global. Este trabalho objetiva contribuir para a estimativa do balanço de massa das geleiras da porção norte da Península Antártica (63-66,5°S; 56-66°W). As estimativas de contribuição de massa dessa região para o oceano no período de 2001 a 2010 foram de 38,64 Gt a⁻¹ para o lado leste da península e de 16,14 Gt a⁻¹ para o lado oeste, em um total de 54,79 Gt a⁻¹ para a porção da Península Antártica ao norte de 66,5°S. Este aporte representa uma contribuição de aproximadamente 0,15 mm a⁻¹ para elevação do nível médio dos mares. As maiores contribuições em aporte de água doce para o oceano são dos setores cujos eventos perturbadores da dinâmica glacial são mais recentes. Por exemplo, o setor da antiga plataforma de gelo Larsen B (65,5°S; 62°W) contribuiu com 16,52 Gt a⁻¹ durante o período entre 2002 e 2010. Além disso, o balanço de massa específico das geleiras foi estimado para 171 bacias de drenagem glacial da Península Antártica. Este parâmetro é um bom indicador do afastamento da geleira de seu equilíbrio, no caso de valores negativos. No estudo desenvolvido, este parâmetro variou entre -10 e 1 m a⁻¹. Os menores valores foram encontrados para a geleira Hektoria no setor da antiga plataforma de gelo Larsen B, com um balanço de massa específico de -10 m a⁻¹ para o período entre 2001 e 2010. A análise regional mostrou que o balanço de massa pode variar para cada geleira dentro dos setores, como observado no setor Graham com uma diferença entre os valores de cada uma de suas 4 áreas. Esta variação pode ocorrer em decorrência de aspectos específicos de cada bacia de drenagem glacial. Este trabalho demonstrou que as imagens ASTER podem ser utilizadas de forma satisfatória na investigação do comportamento dinâmico das geleiras na escala regional na Península Antártica. Este estudo abre caminho para que outros trabalhos investiguem a variação temporal do balanço de massa das geleiras, permitindo uma melhor compreensão entre os processos que integram a criosfera, o oceano e atmosfera.

ABSTRACT

A higher rate of glacier melting and mass loss will directly influence the formation of water masses along the Antarctic Peninsula that will compose the global circulation. This work's aim is to contribute to the estimation of glacier mass balance for the northern Antarctic Peninsula (63-66,5°S; 56-66°W). From 2001 to 2010, estimates of mass loss to the ocean were 38.64 Gt a⁻¹ for the East and 16.14 Gt a⁻¹ for the West side, in a total of 54.79 Gt a⁻¹ for the Antarctic Peninsula area north of 66.5°S. This input represents a contribution of 0.15 mm a⁻¹ in sea level rise. The largest contributions of freshwater to the ocean are from the sectors where disturbing events in glacial dynamics are more recent. For example, between 2002 and 2010 the Larsen B sector (65.5°S; 62°W), contributed with 16.52 Gt a⁻¹ of freshwater. The specific mass balance was also estimated for each of the 171 analyzed glacial drainage basins. In the case of negative values, this parameter is an indicator of how far the glacier is from equilibrium. This parameter varied from -10 to 1 m a⁻¹. The lowest value was found for the Hektoria glacier in the Larsen B sector, with a specific mass balance of -10 m a⁻¹ for the period between 2001 and 2010. A regional analysis shows that the mass balance can vary for each glacier within a sector, such as the differences observed among the four areas of the Graham sector. This variation occurs due to specific aspects of each drainage basin. This study demonstrated that ASTER image can be satisfactorily used for studying glacier dynamics at a regional scale for the Antarctic Peninsula. This study also opens pathways for other research to investigate the temporal variations of glacier mass balance, leading to a better understanding of the causes and effects of the processes that integrate the cryosphere, ocean and atmosphere.

SUMÁRIO

Lista De Figuras.....	VIII
Lista De Tabelas.....	XIV
Cap.1. - Introdução.....	16
1.1 Balanço de massa das geleiras.....	17
1.2 Justificativa.....	19
1.3 Objetivos.....	19
1.4 Área de estudo.....	20
Cap.2. - Material.....	22
2.1 Dados RASTER.....	22
2.1.1 Imagens ASTER.....	22
2.1.2 Modelo digital de elevação global - ASTER GDEM.....	27
2.2 Dados Vetoriais.....	29
2.2.1 Divisores de drenagem glacial.....	29
2.2.2 Áreas livres de gelo.....	29
Cap.3. - Métodos.....	30
3.1 Modelos digitais de elevação - MDE.....	32
3.2 Geração dos modelos digitais de elevação.....	33
3.3 Pós-processamento dos ASTER MDEs.....	38
3.4 Corregistro horizontal e vertical dos MDEs.....	38
3.4.1 Corregistro entre os MDEs.....	39
3.4.2 Nivelamento altimétrico do MDEs.....	42
3.5 Empilhamento e reamostragem dos MDEs.....	44
3.6 Cálculo das mudanças em elevação.....	44
3.6.1 Definição de intervalos de altitude.....	44
3.6.2 Exclusão de áreas de rocha.....	45
3.6.3 Exclusão de áreas de alta declividade do terreno.....	45
3.6.4 Filtragem de áreas de baixa correlação (3N e 3B).....	46
3.6.5 Exclusão de valores discrepantes.....	47
3.7 Cálculos do balanço de massa das geleiras.....	47
3.7.1 Fórmulas utilizadas.....	47
3.7.2 Estimativas e Intervalos de altitude considerados.....	49
Cap.4. - Resultados E Discussão.....	50
4.1 Setor Norte.....	53
4.1.1 Área N1.....	53
4.1.2 Área N2.....	57
4.1.3 Área N3.....	62

4.2 Setor Larsen A.....	68
4.2.1 Área LA1.....	68
4.2.2 Área LA2.....	73
4.3 Setor Larsen B.....	77
4.3.1 Área LB1.....	77
4.3.2 Área LB2.....	81
4.3.3 Área LB3.....	85
4.3.4 Área LB4.....	90
4.4 Setor Larsen C.....	93
4.5 Setor Península Trinity (PT).....	97
4.6 Setor Costa de Davis.....	101
4.6.1 Área DV1.....	101
4.6.2 Área DV2.....	105
4.7 Setor Costa de Danco.....	110
4.7.1 Área DN1.....	110
4.7.2 Área DN2.....	114
4.7.3 Área DN3.....	117
4.8 Setor Costa de Graham.....	122
4.8.1 Área G1.....	122
4.8.2 Área G2.....	127
4.8.3 Área G3 e Área G4.....	130
4.8.4 Área G4.....	135
4.9 Discussão geral.....	137
Cap.5. - Conclusões.....	141
Bibliografia.....	143

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: (a) Mapa da Península Antártica e localização de suas plataformas de gelo. (b) linhas de contorno da temperatura média anual interpolada em 2000, compilado por Morris e Vaughan (2003). A linha vermelha representa a isoterma de temperatura média anual de -9°C proposta pelos autores como o limite viável para as plataformas de gelo. Figuras retiradas de Cook *et al.* (2010).**22**
- Figura 2: Mapa de distribuição das imagens utilizadas para compor os pares de comparação entre MDEs. (i.) Imagens iniciais de cada par e (ii.) imagens finais de cada par. A intensidade de cada polígono representa o ano de aquisição de imagem.....**28**
- Figura 4: Fluxograma de processamento dos dados e cálculo das mudanças de elevação média. Polígonos em verde indicam dados raster. Polígono roseado indica dado vetorial. Elipses em roxo indicam etapas de processamento, sendo em roxo menos intenso subetapas para o cálculo de mudança de elevação.....**32**
- Figura 5: Representações simplificadas da geometria estereoscópica ao longo da trajetória de passagem do sensor ASTER. (Adaptado de Welch *et al.* (1998)).....**34**
- Figura 7: Comparação da mudança em elevação para as seis áreas de rocha com diferentes configurações do processamento.....**36**
- Figura 8: Comparação do valor médio de correlação em cada área de rocha selecionada, nas 5 diferentes imagens. O processamento 4 (laranja) apresentou maiores valores médios de correlação, na maioria das áreas.....**37**
- Figura 9: Perfil transversal da geleira Sjögren. A linha verde representa os valores originais do MDE gerados pelo AsterDTM, a linha azul representa os valores do MDE após a aplicação do filtro de mediana com janela 9x9 pixels.....**39**
- Figura 10: Tentativa de correção de imagem ASTER (à direita) com o mosaico LIMA (à esquerda). O nunatak não é facilmente identificável. Além disso, as duas imagens apresentam projeções diferentes (LIMA: estereográfica polar; ASTER: UTM). É difícil definir pontos de controle com uma boa precisão.....**41**
- Figura 11: Gráficos da esquerda mostram a comparação entre os valores de mudança média de elevação por intervalos de 50 m de altitude, calculados para MDEs corrigidos (em preto) e não corrigidos (em vermelho). Os gráficos da direita mostram os valores de desvio padrão para os valores médios calculados. Os valores obtidos pelos dois métodos apresentam resultados semelhantes.....**42**
- Figura 12: Valores de mudança em elevação média para as Geleiras Boydell (esquerda) e Sjögren (direita).....**44**
- Figura 13: Subcena da imagem banda3 ASTER para a Geleira Sjögren (esquerda) e Boydell (direita), apresentada na área N3. Linhas de contorno de elevação com base no GEM em intervalos de 50 metros. A distância entre as curvas de níveis vai reduzindo quanto mais perto da escarpa, com isso diminui-se a quantidade de pixels amostrados para cálculo das mudanças médias de elevação. IMAGEM: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001.....**44**
- Figura 14: Exemplo da dispersão dos valores de mudança em elevação para o intervalo de 850 a 900 m de altitude. Valores retirados da Geleira Sjögren, área N3. Valores em preto representam todos os pontos do intervalo, em azul pontos com até três desvios padrões da média, e em vermelho apenas pontos filtrados para correlação maior ou igual 85.....**46**
- Figura 15: Exemplo do procedimento usado para mascarar regiões de rochas e áreas com alta declividade. (a.) Limites das áreas de rocha (polígonos vermelhos) dados do ADD (04/2010). (b.) Declividade do terreno calculada a partir de MDE ASTER. Valores mais claros indicam valores mais altos. (c.) Área mascarada, correspondente a soma das áreas de rocha e áreas com declividade maior que 25° (polígonos azuis).....**47**
- Figura 16: Mapa de distribuição dos pares de comparação entre MDEs nos diversos setores analisados na Península Antártica. A intensidade do verde de cada polígono representa o intervalo temporal, em anos, entre as duas aquisições e o valor exato é mostrado sobre cada polígono.....**52**
- Figura 17: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 13/12/2008. Os números 1 a 26 correspondem as geleiras N1-B1 a N1-B26 mencionadas no texto.....**55**

- Figura 18: Diferença de elevação em N1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 13/12/2008 e 29/12/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **55**
- Figura 19: Mudança média anual em elevação para as geleiras N1-B4, N1-B5, N1-B7 e N1-B8 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **56**
- Figura 20: Representação das geleiras analisadas na área N2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 15/11/2005. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras N2-B1 a N2-B6 mencionadas no texto..... **59**
- Figura 21: Diferença de elevação em N2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/11/2005 e 15/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial..... **60**
- Figura 22: Mudança média anual em elevação para as geleiras N2-B1 a N2-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **61**
- Figura 23: Mudança média anual em elevação para a geleira N2-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **62**
- Figura 24: Representação das geleiras analisadas na área N3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001. Os números 1 a 8 correspondem as geleiras N3-B1 a N3-B8 mencionadas no texto..... **64**
- Figura 25: Diferença de elevação em N3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/11/2005 e 26/09/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **65**
- Figura 26: Mudança média anual em elevação para as geleiras N3-B4, N3-B5 e N3-B8 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **66**
- Figura 27: Representação das geleiras analisadas na área LA1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 02/10/2003. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LA1-B1 a LA1-B6 mencionadas no texto..... **69**
- Figura 28: Diferença de elevação em LA1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 18/11/2006 e 02/10/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **71**
- Figura 29: Mudança média anual em elevação para as geleiras LA1-B1, LA1-B4 e LA1-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **72**

- Figura 30: Representação das geleiras analisadas na área LA2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 02/02/2003. Os números 1 a 5 correspondem as geleiras LA2-B1 a LA2-B5 mencionadas no texto..... **74**
- Figura 31: Diferença de elevação em LA2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 02/02/2003 e 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **75**
- Figura 32: Mudança média anual em elevação para as geleiras LA2-B2, LA2-B4 e LA2-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **76**
- Figura 33: Representação das geleiras analisadas na área LB1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 mencionadas no texto..... **79**
- Figura 34: Diferença de elevação em LB1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **80**
- Figura 35: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **81**
- Figura 36: Representação das geleiras analisadas na área LB2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 22/11/2001. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 mencionadas no texto. O número 4 corresponde a geleira LB2-B4 mencionada no texto..... **83**
- Figura 37: Diferença de elevação em LB2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **84**
- Figura 38: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB2-B1 a LB2-B4 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **85**
- Figura 39: Representação das geleiras analisadas na área LB3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LB3-B1 a LB3-B6 mencionadas no texto..... **87**
- Figura 40: Diferença de elevação em LB3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/ e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **88**
- Figura 41: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB3-B1 a LB3-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **89**

- Figura 42: Mudança média anual em elevação para a geleira LB3-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**90**
- Figura 43: Representação das geleiras analisadas na área LB4. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002.Os números 1 e 2 correspondem as geleiras LB4-B1 e LB4-B2 mencionadas no texto.....**91**
- Figura 44: Diferença de elevação em LB4, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**92**
- Figura 45: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB4-B1 e LB4-B2 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**93**
- Figura 46: Representação das geleiras analisadas na área LC. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LC-B1 a LC-B6 mencionadas no texto.....**94**
- Figura 47: Diferença de elevação em LC, a partir de valores filtrados, entre imagens de 25/02/2009 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**95**
- Figura 48: Mudança média anual em elevação para as geleiras LC-B1 e LC-B3 a LC-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**96**
- Figura 49: Representação das geleiras analisadas na área PT. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 20/01/2006. Os números 1 a 7 correspondem as geleiras PT-B1 a PT-B7 mencionadas no texto.....**98**
- Figura 50: Diferença de elevação em PT, a partir de valores filtrados, entre imagens de 05/03/2002 e 20/02/2006. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.. **99**
- Figura 51: Mudança média anual em elevação para as geleiras PT-B1 a PT-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**100**
- Figura 52: Representação das geleiras analisadas na área DN1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001. Os números 1 a 4 correspondem as geleiras DV1-B1 a DV4-B6 mencionadas no texto.....**103**
- Figura 53: Diferença de elevação em DV1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 02/12/2008 e 26/09/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**104**

- Figura 54: Mudança média anual em elevação para as geleiras DV1-B2 a DV1-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**105**
- Figura 55: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 22/11/2001. Os números 1 a 11 correspondem as geleiras DV2-B1 a DV2-B11 mencionadas no texto.....**107**
- Figura 56: Diferença de elevação em DV2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/09/2004 e de 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**108**
- Figura 57: Mudança média anual em elevação para a geleiras DV2-B2 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**109**
- Figura 58: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 15/12/2010. Os números 1 a 33 correspondem as geleiras DN1-B1 a DN1-B33 mencionadas no texto.....**111**
- Figura 59: Diferença média de elevação em DN1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 7/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**112**
- Figura 60: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 24/11/2006. Os números 1 a 7 correspondem as geleiras DN2-B1 a DN2-B7 mencionadas no texto.....**115**
- Figura 61: Comparação entre MDE de imagens de 2003 (vermelho), 2006 (verde) e 2010 (azul). A maior diferença de elevação é entre 2003 e 2006.....**117**
- Figura 62: Diferença de elevação em DN2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 24/11/2006 e de 24/02/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**116**
- Figura 63: Mudança média anual em elevação para as geleiras DN2-B2 a DN2-B4 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**117**
- Figura 64: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 24/01/2003. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras DN3-B1 a DN3-B6 mencionadas no texto.....**119**
- Figura 65: Diferença de elevação em DN3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 8/01/2005 e de 24/01/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.....**120**
- Figura 66: Mudança média anual em elevação para as geleiras DN3-B1 a DN3-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).....**121**

- Figura 67: Representação das geleiras analisadas na área G1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 27/02/2009. Os números 1 a 19 correspondem as geleiras G1-B1 a G1-B19 mencionadas no texto..... **124**
- Figura 68: Diferença de elevação em G1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/02/2009 e de 19/09/2005. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial..... **125**
- Figura 69: Mudança média anual em elevação para as geleiras G1-B1 a G1-B2 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **127**
- Figura 70: Mudança média anual em elevação para a geleira G1-B19 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **128**
- Figura 71: Representação das geleiras analisadas na área G2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 27/02/2009. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras G2-B1 a G2-B3 mencionadas no texto..... **128**
- Figura 72: Diferença de elevação em G2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/02/2009 e de 24/01/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia. **129**
- Figura 73: Mudança média anual em elevação para as geleiras G2-B1 a G2-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **130**
- Figura 74: Representação das geleiras analisadas na área G3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 01/04/2001. Os números 1 a 20 correspondem as geleiras G3-B1 a G3-B6 mencionadas no texto..... **132**
- Figura 75: Diferença de elevação em G3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 01/02/2006 e de 04/01/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial..... **133**
- Figura 76: Mudança média anual em elevação para as geleiras G3-B11 a G3-B15 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **134**
- Figura 77: Mudança média anual em elevação para as geleiras G4-B21 a G4-B22 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)..... **136**
- Figura 78: Desvio padrão dos valores de mudança média em elevação para as geleiras G4-B21 a G4-B22 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). As barras cinzas representam o valor médio de correlação dos pixels nos dois MDEs, nos mesmos intervalos de altitude..... **137**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do Satélite TERRA. Fonte: http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra.htm	23
Tabela 2: Características do sensor ASTER.....	24
Tabela 3: Lista dos produtos ASTER disponíveis sob solicitação. Fonte: https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table).....	25
Tabela 4: Data das imagens e configurações de processamento utilizados no teste.....	34
Tabela 5: Configurações para processamento utilizadas no AsterDTM.....	37
Tabela 6: Variação em volume total de gelo na região N1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 29 de dezembro de 2002 e 13 de dezembro de 2008.....	57
Tabela 7: Variação em volume total de gelo na região N2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 15 de novembro de 2001 e 15 de novembro de 2005.....	62
Tabela 8: Variação em volume total de gelo na região N3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 26 setembro de 2001 e 15 novembro de 2005.....	66
Tabela 9: Variação em volume total de gelo na região LA1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 02 de outubro de 2003 e 18 de novembro 2006.....	72
Tabela 10: Variação em volume total de gelo na região LA2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 2001 e de 2 de fevereiro de 2003.....	76
Tabela 11: Variação em volume total de gelo na região LB1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.....	80
Tabela 12: Variação em volume total de gelo na região LB2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 22 de novembro de 2001 e de 15 dezembro de 2010.....	85
Tabela 13: Variação em volume total de gelo na região LB3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.....	89
Tabela 14: Variação em volume total de gelo na região LB4, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.....	92
Tabela 15: Variação em volume total de gelo na região LC, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 29 de dezembro de 2002 e 13 de dezembro de 2008.....	96
Tabela 16: Variação em volume total de gelo na região PT, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 05 de março de 2002 e 20 de janeiro de 2006.....	100
Tabela 17: Variação em volume total de gelo na região DV1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 26 de setembro de 2001 e de 02 dezembro de 2008.....	105
Tabela 18: Variação em volume total de gelo na região DV2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 22 de novembro de 2001 e em 27 de setembro de 2004.....	109
Tabela 19: Variação em volume total de gelo na região DN1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.....	113
Tabela 20: Variação em volume total de gelo na região DN2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 janeiro de 2003 e em 24 novembro de 2006.....	117
Tabela 21: Variação em volume total de gelo na região DN3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 de janeiro de 2003 e de 8 de janeiro de 2005.....	121
Tabela 22: Variação em volume total de gelo na região G1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 19 de setembro de 2005 e 27 de fevereiro de 2009.....	125
Tabela 23: Variação em volume total de gelo na região G2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 janeiro de 2003 e de 27 fevereiro de 2009.....	130
Tabela 24: Variação em volume total de gelo na região G3 balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 4 janeiro de 2001 e 1 de fevereiro de 2006.....	134

Tabela 25: Variação em volume total de gelo na região G3 balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 27 dezembro de 2001 e 19 setembro de 2005.....	136
Tabela 26: Valores totais das estimativas de perda de massa de cada setor analisado.....	138

Cap.1. - Introdução

O Oceano Austral é distinto dos demais por se comunicar, trocar e transportar propriedades físicas, como calor e energia, para os outros três grandes oceanos. Essa comunicação é realizada pela Corrente Circumpolar Antártica (CCA), que circunda todo o continente e atua como uma barreira física, isolando as águas costeiras e interiores do Oceano Austral (SUMMERHAYES, 2009). A CCA tem um importante papel dentro da circulação global, conhecida como grande Célula de Revolvimento Meridional (MOC), que regula o clima do planeta distribuindo o calor excedente dos trópicos para as altas latitudes (LUMPKIN; SPEER, 2007). A Água Circumpolar Profunda, componente da CCA, reúne as águas profundas vindas do norte e pode ser dividida de acordo com as duas fontes de origem: Água Circumpolar Profunda Superior de origem indo pacífica; e Água Circumpolar Profunda Inferior, que possui origem na Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) (MANTYLA; REID, 1983). Uma parcela da APAN vence a barreira física das correntes e penetra no giro ciclônico do Mar de Weddell e se mistura com as águas adjacentes, passando a ser chamada de Água Cálida Profunda (ACP) devido à sua temperatura relativamente quente (*i.e.*, 0 a 1°C). A ressurgência desta água na região de quebra de plataforma é uma das etapas da formação de águas densas (Água Antártica de Fundo - AABW), que ocorre principalmente no Mar de Weddell (FOSTER; CARMACK, 1976). Nesta região são encontradas duas variedades da AABW, a Água de Fundo do Mar de Weddell (WSBW), que se encontra em contato com o fundo oceânico, e a Água Profunda do Mar de Weddell (WSDW), menos densa do que a anterior. A WSBW normalmente está restrita dentro da bacia de Weddell devido ao fato de ser mais densa, enquanto a WSDW é exportada mais facilmente através das fendas profundas da Cordilheira Scotia do Sul. As águas formadas na região noroeste da plataforma submergem e uma porção é advectada para o Estreito de Bransfield (EB). Dentro da bacia do EB ocorre o encontro e mistura de diferentes massas d'água, profundas e de fundo, que são ejetadas em pulsos para oceano profundo ao largo, participando então da circulação global (DUARTE, 2006).

A Água Antártica de Fundo desempenha importante papel climático, sendo a componente profunda da MOC (LUMPKIN; SPEER, 2007). A formação das águas densas no setor Austral do globo, restrita ao sul da frente antártica, é afetada por uma série de fatores como formação de gelo marinho, temperatura da atmosfera, circulação local e aporte de água doce de origem continental.

Estudos demonstram que as águas no mar de Ross estão se tornando menos salinas, sendo uma das prováveis causas o aumento na taxa de derretimento e perda de massa das geleiras (JACOBS, 2004). Este aumento foi associado ao aquecimento da Água Cálida Profunda durante a década de 1990 (FAHRBACH *et al.*, 2004), a qual fornece mais calor para o derretimento do gelo marinho e dificulta condições para formação das águas densas. Semelhante ao Mar de Ross, Garcia e Mata (2005) reportaram uma diluição das águas de fundo da bacia central do Estreito de Bransfield. Do mesmo modo, acredita-se que um maior derretimento e aumento na perda de massa de gelo para a região do entorno da Península Antártica (PA) possa contribuir para a diminuição da densidade destas águas.

Estudos recentes demonstraram uma taxa de aumento da temperatura do ar na Península Antártica de $3,7 \pm 1,6$ °C por século (VAUGHAN; MARSHALL, 2003). A desintegração de grandes plataformas de gelo na Península Antártica ocorre devido a processos causados pelo aquecimento atmosférico e oceânico (BRAUN; HUMBERT; MOLL, 2008; RIGNOT, 2006). Em resposta a eventos de desintegração e fragmentação das plataformas de gelo, há uma redução do *buttressing*¹ induzindo uma aceleração dos fluxos das geleiras tributárias das plataformas afetadas (DE ANGELIS; SKVARCA, 2003; RIGNOT *et al.*, 2004; SCAMBOS, 2004). Devido à rápida resposta das geleiras a variações climáticas, principalmente na península Antártica, fica evidente a importância de monitorar este ambiente. Devido ao isolamento geográfico destas regiões, o sensoriamento remoto tem se tornado uma ferramenta valiosa para este propósito (BAMBER; PAYNE, 2004; BAMBER; RIVERA, 2007).

1.1 Balanço de massa das geleiras

Uma grande parte da água doce do planeta é armazenada na forma de gelo em geleiras, calotas e mantos de gelo, sendo 70% desta água armazenada no continente Antártico (AINLEY *et al.*, 2009). De modo geral, as geleiras podem ser divididas em duas áreas principais, área de acumulação e área de ablação. Área de acumulação é definida como a área em que os processos de acumulação de massa, neve ou gelo, superam a quantidade perdida pelos processos de ablação. Ablação compreende todos os processos pelos quais uma geleira perde massa, incluindo derretimento, evaporação, desprendimento, erosão eólica e avalanches (SIMÕES, 2004). Na área de ablação, o oposto ocorre, ou seja, a ablação é maior que a

1 sistema de ancoragem do gelo; estrutura de suporte que sustenta ou fornece uma fundação.

acumulação. A diferença entre o ganho e perda de massa é referida como o balanço de massa da geleira, e é indicativo do estado de equilíbrio de uma geleira. Quando negativo, a massa de gelo é perdida por estes ambientes e terá como destino final os oceanos, contribuindo para o aumento do nível médio dos mares (CHURCH *et al.*, 2001), além de possíveis impactos na dinâmica oceânica local e global.

Existem poucos trabalhos sobre balanço de massa regional na Península Antártica. Um deles foi realizado por Turner *et al.* (2002), porém avaliando apenas o balanço de massa superficial, ou seja, considerando apenas a precipitação e evaporação. Desta maneira, não consideraram variabilidade espacial e outros processos de perda de massa, como derretimento e fluxo das geleiras. Um método para estimar o balanço de massa líquido das geleiras é através da estimativa da variação na elevação do terreno, *i.e.* espessura do gelo, para toda uma geleira. Essa variação em elevação irá refletir a variação em volume. Através desta abordagem, parâmetros como a precipitação/evaporação, derretimentos, variação devido ao fluxo e processos de desprendimento de gelo (*calving*) já estão incluídos na estimativa de balanço de massa da geleira. Este método tem se tornado útil e viável nos últimos anos com o avanço de técnicas de sensoriamento remoto que permitem a aquisição de dados altimétricos ou ainda a elaboração de modelos digitais de elevação (MDE) (BAMBER; RIVERA, 2007). Na última década imagens estéreo de alta resolução tornaram-se disponíveis com grande cobertura global, através do sensor satelital Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) a bordo da plataforma TERRA. A exatidão altimétrica dos MDEs produzidos a partir deste sensor podem chegar a 15 m. Alguns trabalhos utilizaram MDEs deste sensor para investigar o balanço de massa de geleiras da Groenlândia (HOWAT *et al.*, 2008), dos Alpes (BERTHIER *et al.*, 2004) e algumas da Península Antártica (SHUMAN; BERTHIER; SCAMBOS, 2011). Com um enfoque nas áreas de recente desintegração de extensas plataformas de gelo, Shuman *et al.* (2011), estimaram o balanço de massa e perda de volumes para as regiões de antiga plataforma de gelo Larsen A e Larsen B.

O trabalho com abordagem mais completa foi realizado por Rignot *et al.* (2008), abrangendo todo continente antártico. Isto foi realizado integrando-se estimativas de fluxo das geleiras com dados de precipitação retirados do modelo climático atmosférico regional RACMO2/ANT². Porém, estes autores não possuíam dados da espessura da frente de gelo para a maioria das geleiras do oeste da Península Antártica, limitando a abrangência do estudo. Além disso, devido à grande variabilidade na resposta de cada geleira às mudanças ambientais, é necessária uma análise em nível regional das suas bacias de drenagem glacial, como é

2 <http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2005JD006495.shtml>

proposto no presente trabalho.

1.2 Justificativa

O trabalho visa estimar o balanço de massa das geleiras do norte da Península Antártica e o volume de água doce que é exportado para o oceano adjacente, contribuindo para um melhor entendimento da influência do gelo continental no oceano do entorno e consequentemente no clima global. Este trabalho se justifica uma vez que a efetiva contribuição da península com relação ao aporte de água doce para os oceanos ainda não é bem entendida ou estimada com boa precisão em caráter regional. Os objetivos deste projeto estão embasados dentro das metas estabelecidas pelo projeto Circulação Oceânica e Interações Criosfera-Oceano no entorno da Península Antártica: uma investigação das ligações entre processos costeiros e o oceano profundo (POLARCANION CNPq edital MCT/CNPq nº 23/2009), o qual visa estudar a interação Oceano/Criosfera no entorno da Península Antártica. Nesta região, acredita-se que um maior fluxo de água doce de origem continental possa influenciar nas características das águas densas, formadas predominantemente na região do entorno.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi estimar o balanço de massa das geleiras localizadas na porção norte da Península Antártica, com o uso de imagens do sensor ASTER. Para isso, foi necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- adaptar um método para a estimativa da mudança de volume das geleiras da Península Antártica pelo uso de imagens ASTER;
- estimar o balanço de massa e o balanço de massa específico para diferentes setores da porção norte da Península Antártica, durante o período 2001-2010; e
- estimar o aporte de água doce dos lados leste e oeste da Península Antártica para o oceano do entorno.

1.4 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho compreendeu a porção da Península

Antártica localizada ao norte de 66,5°S. A PA é a única parte do continente Antártico que se estende por cerca de 2000 km ao norte do manto de gelo principal, atingindo 63°S de latitude (figura 1a). A área a norte de 70°S representa menos de 1% de toda área de manto de gelo ancorado, mas recebe aproximadamente 10% da precipitação de neve. Um terço de sua área está próxima a costa e abaixo dos 200 m de elevação, onde temperaturas de verão são frequentemente acima de 0°C, sendo a única parte da Antártica continental a sofrer substancial derretimento no verão (TURNER *et al.*, 2009). Ademais, é uma região montanhosa estreita com uma largura média de 70 km e uma altitude média de 1.500 m, mas com picos que podem ultrapassar os 2500 m de altitude. Esta barreira montanhosa com orientação norte-sul tem uma grande influência sobre a circulação oceânica e atmosférica (AINLEY *et al.*, 2009), ao mesmo tempo em que o balanço de massa da região é influenciado de forma mais intensa pelas variações da temperatura oceânica e do ar (ROTT *et al.*, 2011). Desta maneira, as temperaturas do lado leste são cerca de 3 a 5 °C mais baixas que as do lado oeste, devido a menor atuação dos ventos de oeste, mais quentes e úmidos, barrados pelo platô da península e a maior influência de ventos continentais mais frios, que mantêm as temperaturas mais baixas (MORRIS; VAUGHAN, 2003). Morris e Vaughan (2003) propõe o limite da isoterma de temperatura média anual de -9°C como limite viável para as plataformas de gelo (figura 1b). Cook *et al.* (2010) corroboram esta ideia e ainda apontam para uma possível migração para sul desta isoterma, o que poderá futuramente desencadear a instabilidade de outras plataformas de gelo na região mais sudoeste da PA.

A área de estudo foi dividida em 8 setores, quatro do lado leste da PA (*i.e.*, setores Norte, Larsen A, Larsen B e Larsen C) e quatro do lado oeste (*i.e.*, setores Península Trinity, Costa de Davis, Costa de Danco e Costa de Graham). Esta divisão teve como objetivo tornar a apresentação dos resultados mais organizada. O critério de escolha foi baseado nos limites das plataformas de gelo para o lado leste, e para o lado oeste utilizou-se a nomenclatura da costa desta região. A figura 2, apresentada no próximo capítulo, ilustra a localização dos oito setores.

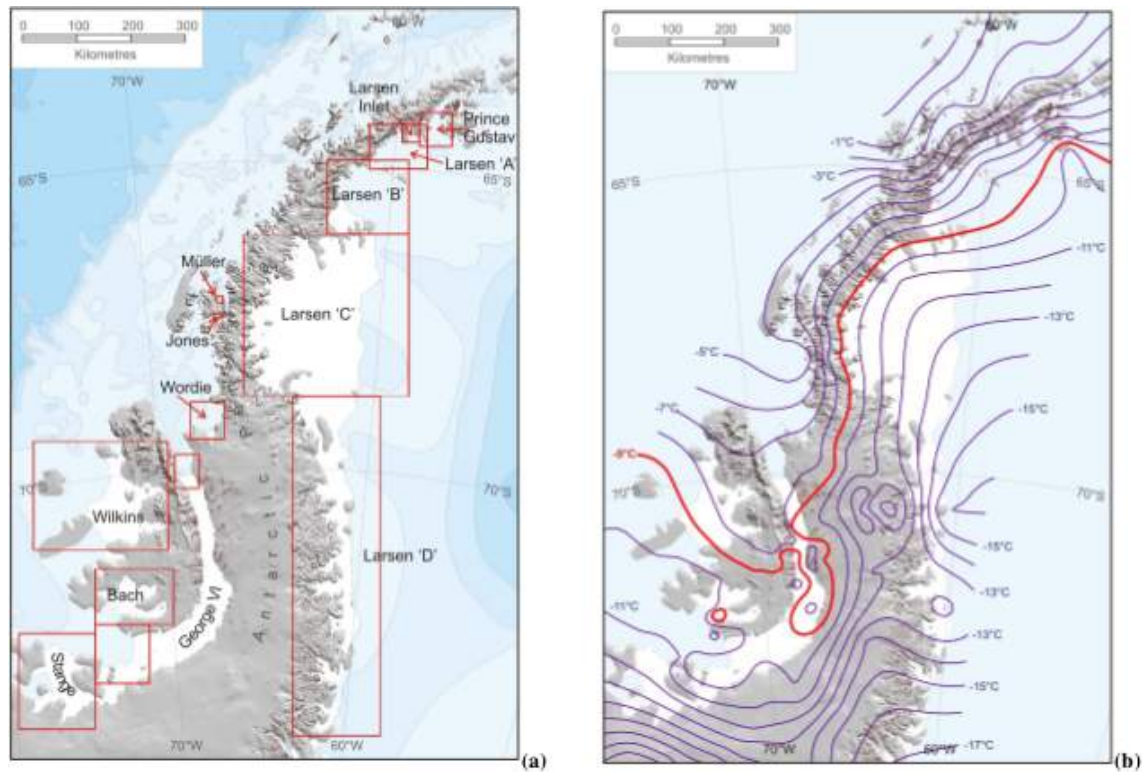


Figura 1: (a) Mapa da Península Antártica e localização de suas plataformas de gelo. (b) Linhas de contorno da temperatura média anual interpolada em 2000, compilado por Morris e Vaughan (2003). A linha vermelha representa a isoterma de temperatura média anual de -9°C proposta pelos autores como o limite viável para as plataformas de gelo. Figuras retiradas de Cook *et al.* (2010).

Cap.2. - Material

Neste capítulo serão apresentados ao leitor todos os dados utilizados na execução do presente trabalho. Para maior clareza da leitura, os dados serão apresentados em duas seções principais, uma abordando os dados raster e outra os dados vetoriais.

2.1 Dados RASTER

Foram utilizados dois conjuntos de dados raster neste trabalho, sendo o primeiro composto pelas imagens do sensor ASTER, utilizadas para obtenção dos dados de elevação, e o segundo composto pela segunda versão do Modelo Digital de Elevação Global ASTER (ASTER GDEM2), utilizado como referência para área e elevação. Estes dois conjuntos de dados são apresentados com mais detalhes a seguir.

2.1.1 Imagens ASTER

O sensor ASTER é um dos sensores a bordo da plataforma orbital TERRA, lançada em 18 de dezembro de 1999 com o objetivo de contribuir para a pesquisa atmosférica, terrestre e oceânica (tabela 1). Além do ASTER, a bordo da plataforma estão os seguintes sensores: MODIS, CERES, MISR e MOPITT. As características gerais deste satélite são apresentadas na tabela 1. Ressalta-se a sua configuração orbital que viabiliza aquisições com grande abrangência global, de 83°S a 83°N, além de boa resolução temporal (16 dias de revisita).

O sensor ASTER, único instrumento de alta resolução espacial a bordo da plataforma TERRA, foi construído em colaboração entre a NASA, o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão, e o Centro Japonês de Análise de dados de Sensoriamento Remoto da Terra (ERSDAC). Ele possui 14 bandas multi espectrais (tabela 2), que são divididas em 3 subsistemas, um visível e infravermelho próximo (VNIR), um infravermelho de ondas curtas (SWIR), e outro infravermelho termal (TIR). O VNIR é o subsistema que torna possível a obtenção de modelos digitais de elevação de uma cena imageada, devido ao seu conjunto independente de dois telescópios, um nadir e outro voltado para trás num ângulo de 27,6° (YAMAGUCHI;

Tabela 1: Características do Satélite TERRA.

Fonte: <http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra.htm>

Missão	Earth Observing System (EOS)
Instituições Responsáveis	NASA
País/Região	Estados Unidos, Japão e Canadá
Satélite	TERRA (EOS-AM1)
Lançamento	18/12/1999
Local de Lançamento	Vandenberg Air Force Base
Veículo Lançador	Atlas IIAS
Situação Atual	ativo
Órbita	Polar e heliossíncrona
Altitude	705 km
Inclinação	98,2°
Tempo de Duração da Órbita	98,1 min
Horário de Passagem	10:30 A.M.
Período de Revisita	16 dias
Tempo de Vida Projetado	6 a 7 anos
Instrumentos Sensores	ASTER , MODIS , MISR , CERES e MOPPIT

KAHLE; TSU, 1998). *Nadir* é um termo usado na astronomia que se refere ao ponto diametralmente oposto ao zênite, ou seja, o telescópio nadir é localizado diretamente abaixo do sensor e apontado para a superfície da terra num ângulo de 90° com a superfície imageada, supondo uma superfície plana. O plano focal deste primeiro telescópio contém três detectores de carga acoplada de silício (banda 1, 2 e 3N) enquanto o plano focal do telescópio traseiro apresenta apenas uma banda (3B). Os dois telescópios podem ainda ser rotacionados em 24° para ambos os lados, para proporcionar uma extensa capacidade de visada multi trajetória e revisita de cinco dias. Por conseguinte, também é possível o imageamento de pares estéreos em visada lateral, e multi data com uma melhor geometria estéreo e razões B/H=1 (base pela altura do triângulo). No entanto, a aquisição de imagens de mesma data e ao longo da trajetória é preferível para as razões científicas e operacionais (TOUTIN, 2008). Mais detalhes sobre estimativa de elevação a partir de um par estéreo de imagens de satélite serão fornecidos a seguir (seção 3.1).

As imagens ASTER são disponibilizadas como produtos com diferentes níveis de processamento. O centro japonês ERSDAC é responsável por calibrar e fornecer os dados do nível 1A. O nível 1A é o dado reconstruído do instrumento que

Tabela 2: Características do sensor ASTER

Subsistema	nº da banda	comprimento espectral (μm)	resolução espacial (m)	resolução radiométrica	Área Imagemada (km)
VNIR	1	0,52-0,60	15	8-bits	60x60
	2	0,63-0,69			
	3N	0,76-0,86			
	3B	0,76-0,86			
SWIR	4	1,600-1,700	30	8-bits	60x60
	5	2,145-2,185			
	6	2,185-2,225			
	7	2,235-2,285			
	8	2,295-2,365			
	9	2,360-2,430			
TIR	10	8,125-8,475	90	12-bits	60x60
	11	8,475-8,825			
	12	8,925-9,275			
	13	10,25-10,95			
	14	10,95-11,65mm			

é referenciado temporalmente e anotado com informações auxiliares de parâmetros da órbita do satélite, coeficientes radiométricos e geométricos, incluindo parâmetros de posicionamento. Há também o produto nível 1B que é gerado aplicando-se os coeficientes radiométricos e geométricos e é fornecido também com as informações auxiliares anotadas (FUJISADA, 1998). O padrão nível 2 é produzido Estados Unidos e no Japão usando, a princípio, algoritmos idênticos desenvolvidos pela Equipe Científica do programa ASTER (YAMAGUCHI; KAHLE; TSU, 1998). Os produtos nível 1 são as únicas fontes para a geração de produtos de nível superior, como modelos digitais de elevação (MDE) e imagens ortorretificadas. YAMAGUCHI *et al.* (1998) apresenta uma descrição completa do sensor e seus subsistemas, e ainda sumariza os produtos fornecidos pelos subsistemas ASTER. Abaixo é apresentada uma tabela atualizada com os produtos atualmente fornecidos sob solicitação (tabela 3).

Pode-se notar na tabela 3 que a NASA disponibiliza um produto ASTER com a imagem ortorretificada e seu MDE (ASTE14DMO). Em 2006 seu centro de distribuição e armazenamento de dados *Land Process Distributed Active Archive Center* (LP DAAC) implementou um novo software bastante eficiente na geração de bons MDEs. Estes MDEs são relativos e sem uso de pontos de controle do terreno, sendo utilizados os dados das efemérides orbitais e de altitude do instrumento para georreferenciar o MDE. Algumas limitações do método incluem regiões de nuvens e sombras de nuvens, quando são geradas informações sem nenhuma relação com a representação da superfície (*outliers*). Alguns aspectos justificam o fato deste

Tabela 3: Lista dos produtos ASTER disponíveis sob solicitação. (fonte: https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table).

Abreviatura	Nível	Produto ASTER	Resolução (m)
ASTGTM	3	Modelo Digital de Elevação Global ASTER	30
AST_L1A	1A	Dado do Instrumento Reconstruído Não-Processado	15, 30, 90
AST_L1AE	1A	Dado do Instrumento Reconstruído Não-Processado - Expedido	15, 30, 90
AST_L1BE	1B	Radiância Registrada no Sensor - Expedido	15, 30, 90
AST_L1B	1B	Radiância Registrada no Sensor	15, 30, 90
AST_05	2	Emissividade em Superfície	90
AST_07	2	Reflectância em Superfície - VNIR e SWIR	15, 30
AST_07XT	2	Reflectância em Superfície - VNIR e <i>Crosstalk Corrected</i> SWIR	15, 30
AST_08	2	Temperatura Cinética em Superfície	90
AST_09	2	Radiância em Superfície - VNIR e SWIR	15, 30
AST_09XT	2	Radiância em Superfície - VNIR e <i>Crosstalk Corrected</i> SWIR	15, 30
AST_09T	2	Radiância em Superfície - TIR	90
AST14DEM	3	Modelo Digital de Elevação	30
AST14OTH	3	Radiância Registrada no Sensor - Ortorretificada	15, 30, 90
AST14DMO	3	Modelo Digital de Elevação e Radiância Registrada no Sensor - Ortorretificada	15, 30, 90

produto não ser utilizado no trabalho, economizando tempo de processamento. Este produto é fornecido sem os valores de correlação entre os pixels das bandas 3N e 3B, que é um indicativo da exatidão da elevação estimada para determinado pixel explicado adiante (seção 3.1). Ainda, o produto apresenta uma resolução de 30 metros, enquanto através do software utilizado neste trabalho, foi possível obter MDEs com 15 metros de resolução. Uma maior resolução é preferível, uma vez que aumenta a quantidade de pixels amostrados, consequentemente diminuindo o erro das estimativas. Segundo diversos trabalhos (ABRAMS, 2000; ABRAMS *et al.*, 2002; LP-DAAC, 2012; WATANABE, 2005), o programa AsterDTM utilizado aqui gera MDEs que apresentam erro quadrático médio menor do que o produto fornecido pelo LP DAAC (RMSE em x, y e z de aproximadamente 20 m, 15 m e 25 m contra aproximadamente 90 m, 30 m e 30 m). Ainda que outras referências apontem para

uma exatidão melhor do produto LP DAAC (FUJISADA *et al.*, 2005), a geração dos MDEs a partir de imagens nível 1B através de software comercial é mais flexível e permite algumas configurações pelo usuário.

A aquisição dos produtos ASTER pode ser feita através de pesquisa e solicitação destas pelo sistema da Divisão de Sensoriamento Remoto do Japão, [GDS-IMS](#)³, para solicitação de compras para não afiliados à NASA e/ou pelo sistema da NASA, o [Reverb](#)⁴, para acesso aos afiliados por meio de projetos. O Laboratório de Monitoramento da Criosfera possui acesso à solicitação de imagens ASTER através da filiação do Dr. Jorge Arigony-Neto como coordenador do Centro Regional da Península Antártica dentro do Projeto [Global Land Ice Measurements from Space](#) (GLIMS⁵). O GLIMS é um projeto designado a monitorar as geleiras do planeta, primariamente fazendo-se o uso de imagens do ASTER. Para este trabalho foi realizada uma busca dentre todas as imagens ASTER disponíveis através da antiga plataforma de busca *Warehouse Inventory Search Tool* (WIST), atualmente substituída pela plataforma Reverb, adquiridas desde que o sensor iniciou a operação em 2001 até metade do ano de 2011. Para restringir a análise à porção norte da PA o limite de 65°S foi estabelecido. Foram localizadas e adquiridas mais de 230 imagens ASTER, solicitadas no nível de processamento L1B. Uma rotina foi implementada no software Matlab® com o objetivo de buscar e organizar as imagens por regiões e ainda gerar uma imagem de pré-visualização. Com esta imagem de pré-visualização foi possível filtrar imagens com muita cobertura de nuvens por meio de uma análise visual. Dentre estas imagens, a rotina ainda identificou casos de arquivos em que a imagem para a banda 3N ou 3B não estava disponível devido a alguma falha no momento de aquisição da imagem pelo subsistema VNIR. Como resultados, foram selecionadas 121 imagens possíveis de serem utilizadas. Com estas imagens obteve-se 21 pares para comparação de MDEs em diferentes datas. Buscou-se obter pares de imagens com um intervalo mínimo de dois anos entre as aquisições para geração dos MDEs e posterior análise de variações na elevação da superfície. Estes pares foram separados nos seguintes setores: Norte, Larsen A, Larsen B e Larsen C, para o lado leste da PA; Península Trinity, Costa de Davis, Costa de Danco e Costa de Graham, para o lado oeste da PA. A figura 2 mostra a data de aquisição e área de cobertura das imagens iniciais e finais de cada par.

3 <http://ims.aster.ersdac.jspacesystems.or.jp/ims/html/MainMenu/MainMenu.html>

4 <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>

5 <http://www.glims.org/>

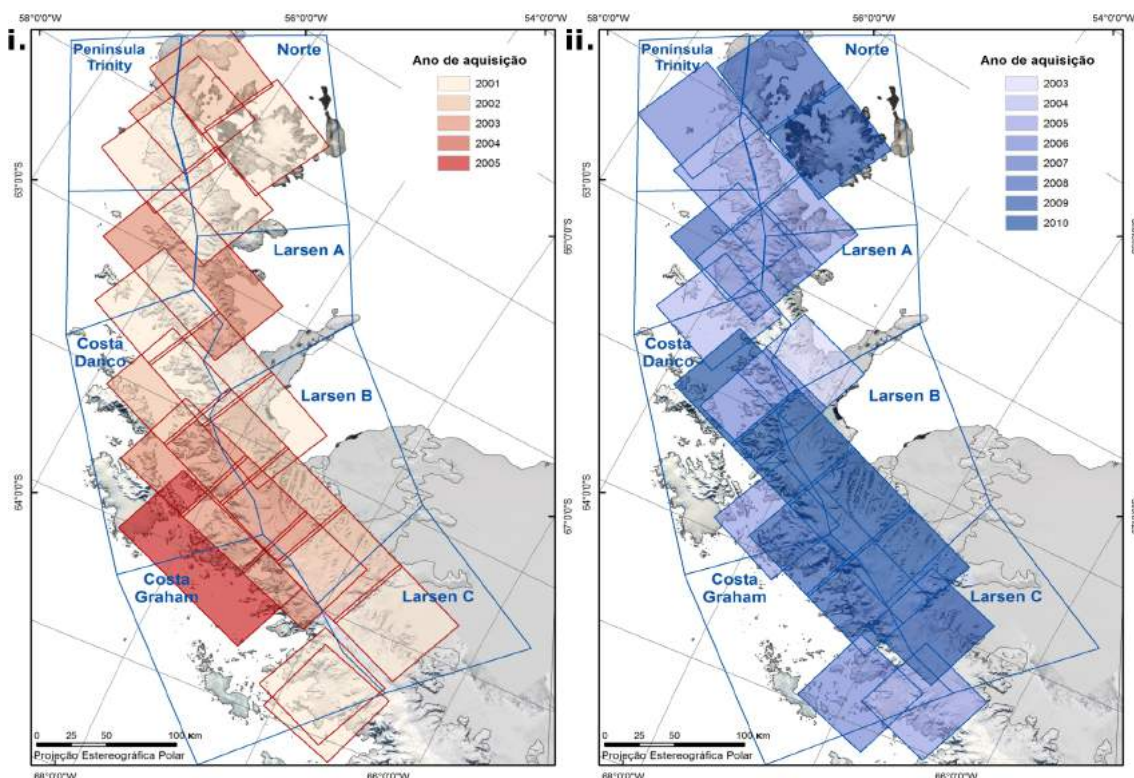


Figura 2: Mapa de distribuição das imagens utilizadas para compor os pares de comparação entre MDEs. (i.) Imagens iniciais de cada par e (ii.) imagens finais de cada par. A intensidade de cada polígono representa o ano de aquisição de imagem.

2.1.2 Modelo digital de elevação global - ASTER GDEM

O Modelo Digital de Elevação Global ASTER (ASTER GDEM⁶) é um produto disponibilizado gratuitamente pela NASA e o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI). Com 1 arco-seno de resolução espacial (ou 23 metros para região de estudo), o GDEM é o resultado do processamento de um total de 1,5 milhões de cenas imageadas pelo sensor ASTER e cobertura de 83°S a 83°N, incluindo 250 mil novas cenas integradas na segunda versão do modelo. Possui uma exatidão vertical de 12,6 m (TACHIKAWA *et al.*, 2011). Os dados do GDEM foram obtidos através da plataforma *Global Data Explorer*⁷, mantida pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Estes dados foram utilizados para definir os intervalos de altitude (50 metros) nas geleiras, utilizados para as análises de mudanças de elevação.

Além da utilização de imagens adicionais, a segunda versão do ASTER GDEM apresenta algumas outras modificações adicionais com relação à primeira, como por exemplo: menor tamanho de janela para correlação (5x5 ao invés de 9x9) das imagens da banda 3N e 3B, ajuste no *offset* dos valores de

6 Para mais informações: http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4_1.html

7 *Global Data Explorer* <http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>

elevação, detecção de corpos d'água e novos dados observados, o que resultou em um preenchimento de áreas sem dados ou com artefatos no modelo (ASTER-GDEM-VALIDATION-TEAM, 2011; TACHIKAWA *et al.*, 2011). Apesar disso, ainda é possível observar ruídos em produtos derivados, como curvas de nível (figura 3), devido à presença de dados espúrios no modelo. Estes erros se devem geralmente à presença de nuvens nos MDEs e menor número de MDEs agrupados para geração do GDEM final (AREFI; REINARTZ, 2009). Desta maneira, para eliminar estes valores discrepantes do GDEM e obter curvas de nível mais suaves, dois tipos de filtros passa baixa, de média e de mediana, foram testados. Dentre os dois tipos, o filtro de mediana conservou melhor a posição original das curvas de nível derivadas dos valores de elevação do GDEM, uma vez que suaviza apenas os valores mais extremos (como picos), removendo feições menores que o tamanho da janela do filtro (figura 3). Uma janela de 13x13 pixels mostrou ser suficiente para suavização e uma aplicação dupla foi necessária para que os ruídos fossem eliminados.

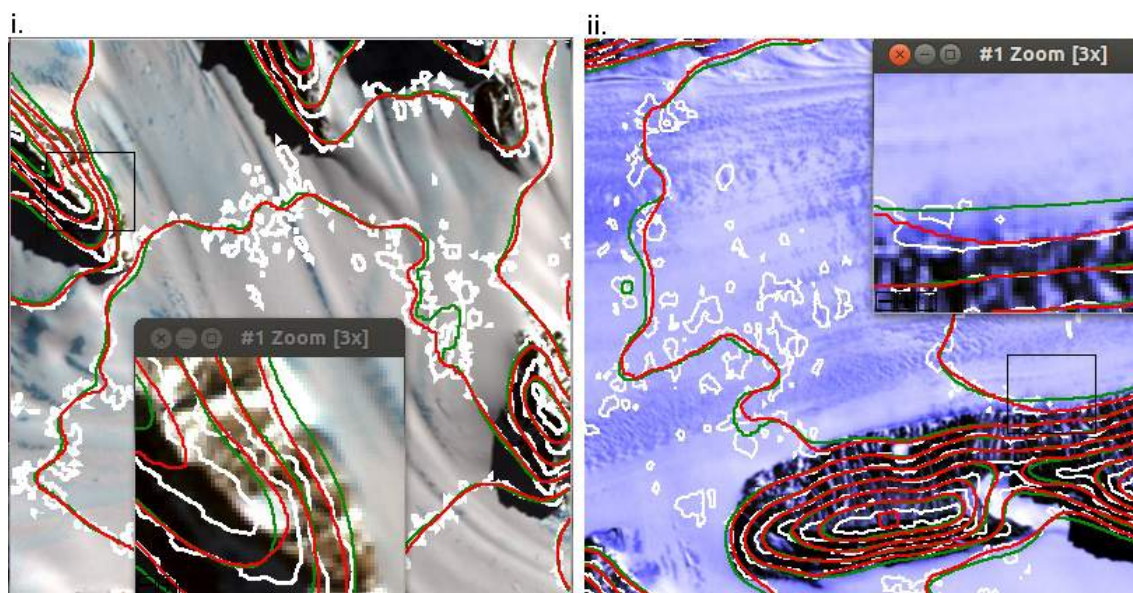


Figura 3: Curvas de nível geradas com o ASTER GDEM2 original (linhas brancas), após duplo filtro de mediana com janela 13x13 (linhas vermelhas), e após duplo filtro de média com janela 13x13 (verde). Na janela de zoom de ambas as figuras, é possível notar o deslocamento da linha gerado após filtragem por média. As três curvas de níveis representam os mesmos intervalos de altitude.

i.) Detalhe na geleira Sjoegren - área N3. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001; ii.) Detalhe geleira Crane - área LB3. Imagem: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002.

2.2 Dados Vetoriais

2.2.1 Divisores de drenagem glacial

Para a quantificação do balanço de massa para cada geleira da área de estudo foi necessário utilizar os divisores de drenagem glacial, digitalizados no contexto do projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS). A delimitação das bacias de drenagem glacial da PA foi desenvolvida pelo grupo do Laboratório de Monitoramento da Criosfera, utilizando um método semiautomático (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

2.2.2 Áreas livres de gelo

Para realizar a comparação entre os modelos digitais de elevação apenas sobre as áreas cobertas por gelo, é importante a exclusão de áreas de rocha. Geralmente, estas regiões são mal representadas pelos modelos devido à sua alta declividade e, algumas vezes, alta reflectância quando coberta por neve (saturando o sensor na banda 3N). Para este fim, utilizou-se o plano de informações referente aos limites das áreas de rocha, disponibilizado no Banco de Dados Digitais da Antártica (ADD) mantido pelo Serviço Antártico Britânico (BAS).

Cap.3. - Métodos

Neste capítulo, serão descritas todas as etapas relevantes do processamento das imagens ASTER, até a obtenção dos valores de mudanças de elevação e cálculo do balanço de massa para as geleiras estudadas. A figura 4 é um fluxograma resumindo as etapas. As etapas de processamento representadas em vermelho mais intenso são explicadas nos tópicos deste capítulo (seção 3.2 a 3.6). Os processamentos em vermelho menos intenso são subtópicos da seção 3.6, que envolve as etapas para o cálculo das mudanças e elevação média.

Na seção 3.4 são discutidos alguns esforços realizados durante a execução deste trabalho para a calibração dos modelos digitais de elevação.

3.1 Modelos digitais de elevação - MDE

O princípio do método de extração dos MDEs é o efeito paralaxe, que é a distância horizontal de um objeto observado a partir de dois pontos de observação diferentes. Este é o mesmo princípio utilizado por nosso cérebro ao processar as duas imagens obtidas por nossos olhos, e é capaz de extrair informações de profundidade, distância, posição e tamanho, nos dando uma visão em três dimensões. Cada imagem ASTER adquirida contém um par estereoscópico formado pelas bandas 3N e 3B, como citado anteriormente. Essas duas bandas imageiam uma mesma cena a partir de dois ângulos distintos (figura 5). Com base neste princípio, os programas para extração automática de MDE, buscam localizar a mesma feição entre as duas imagens e calcular o quanto esta se deslocou entre uma imagem e outra, sendo maior o deslocamento quanto maior a elevação. O programa utilizado para a geração dos MDE foi o módulo AsterDTM para o software ENVI®. Este módulo foi desenvolvido pela SulSoft, distribuidora exclusiva do software no Brasil. O AsterDTM converte as duas bandas em um par de imagens quase epipolar (*i.e.*, pixels observados no nadir), com um deslocamento de feições na direção de voo do satélite proporcional à elevação de cada feição. O método de correlação cruzada é utilizado para avaliar este deslocamento e transformá-lo em elevação. Este método possui limitação onde a correlação entre as duas bandas é ambígua (*e.g.*, extensas áreas de água, areia, e neve fresca) ou não acessível (*e.g.*, cobertura de nuvem e sombras associadas). As nuvens são um grande problema

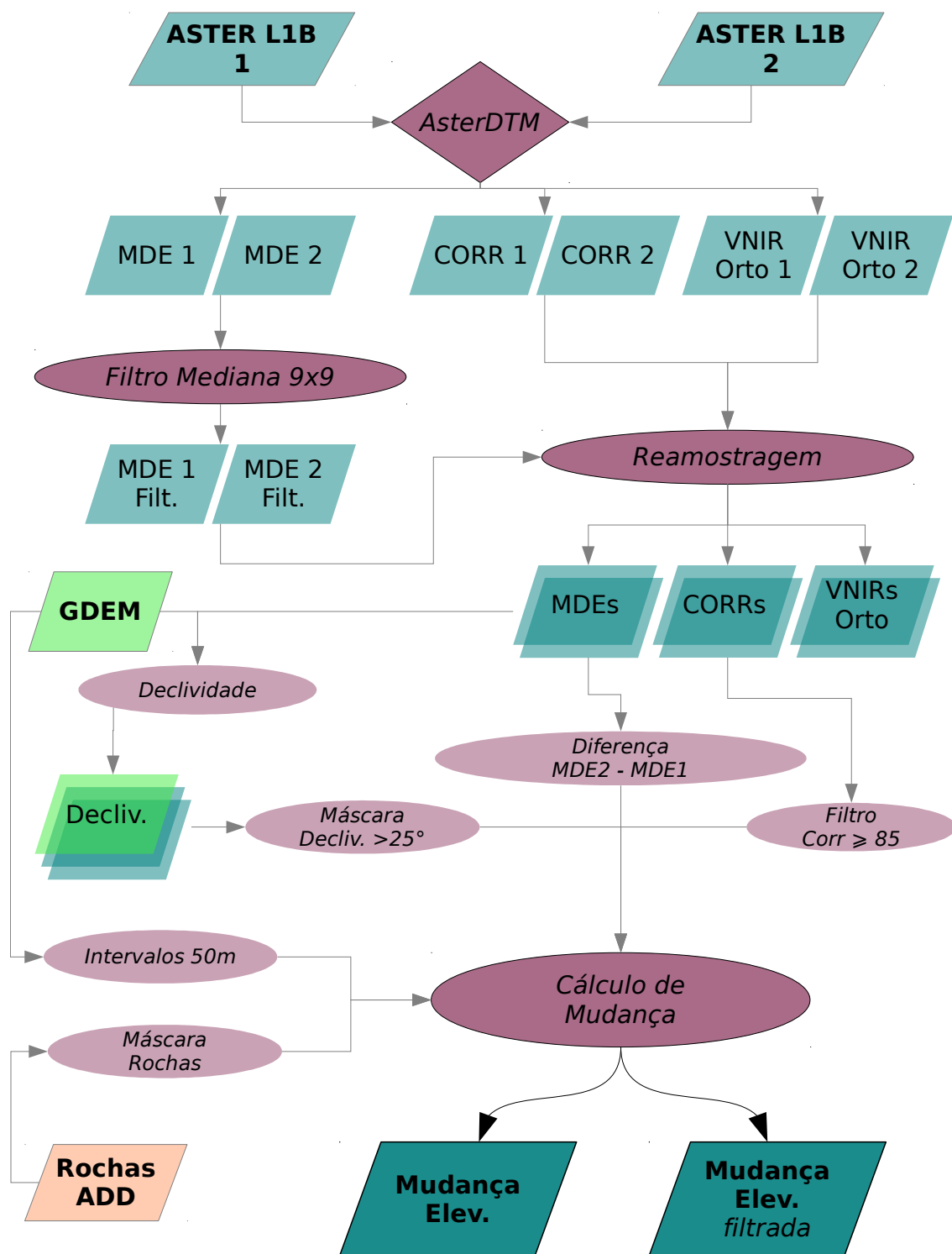


Figura 4: Fluxograma de processamento dos dados e cálculo das mudanças de elevação média. Polígonos em verde indicam dados raster. Polígono roseado indica dado vetorial. Elipses em roxo indicam etapas de processamento, sendo em roxo menos intenso subetapas para o cálculo de mudança de elevação.

pois podem ocorrer em ambas imagens, mas em locais diferentes devido ao tempo de aquisição entre as imagens 3N e 3B. Pode não haver nenhuma nuvem ou sombra na imagem 3N, mas sim na 3B, diminuindo a correlação entre as imagens e gerando

uma área de baixa confiabilidade dos valores do MDE. O AsterDTM busca completar estas lacunas a partir de bons valores do entorno. É possível acessar a qualidade dos valores de elevação calculados, avaliando-se o mapa de confiabilidade, que é a matriz com os valores de correlação cruzada normalizada para cada pixel (referida a partir daqui como CORR) (ASTERDTM-ENVI, 2012a).

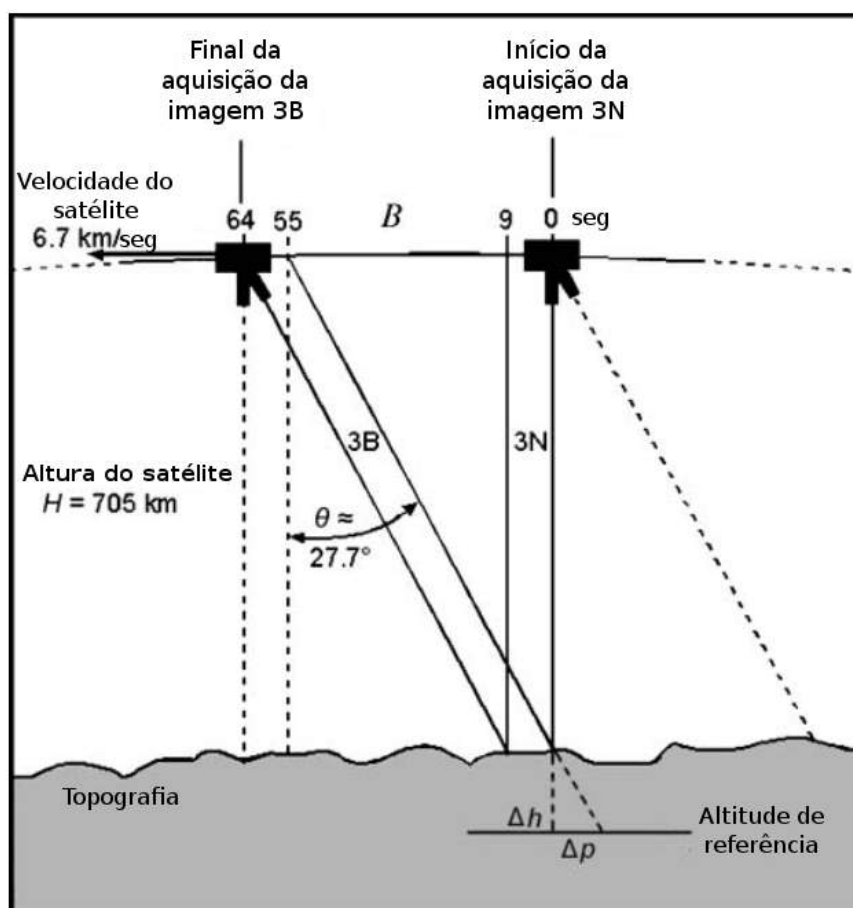


Figura 5: Representações simplificadas da geometria estereoscópica ao longo da trajetória de passagem do sensor ASTER. (Adaptado de Welch et al. (1998))

O programa AsterDTM proporciona algumas configurações de processamento tais como: resolução de saída do modelo; método de correlação; tamanho da matriz de busca; e saída orientada para norte. O programa ainda permite um processamento em série para um conjunto de imagens. Após a geração de cada MDE, o mesmo é utilizado pelo programa para ortorretificar a imagem.

3.2 Geração dos modelos digitais de elevação

Para definir as características utilizadas na geração dos modelos, um teste foi realizado comparando o MDE gerado para 5 imagens com 6 configurações

de processamento distintas (tabela 4).

Tabela 4: Data das imagens e configurações de processamento utilizados no teste.

Imagens	Nome do processamento	Método de correlação	Tamanho da janela de busca
AST 26 set 2001 AST 22 out 2004 AST 15 nov 2005 AST 28 out 2006 AST 18 nov 2006	Proc. 1	1D	9x9 pixels
	Proc. 2	2D	9x9
	Proc. 3	1D	5x5
	Proc. 4	2D	5x5
	Proc. 5	1D	13x13
	Proc. 6	2D	13x13

Para comparação dos resultados, foram selecionadas 6 áreas de rocha, onde não era esperado haver variações em elevação (figura 6), e calculou-se o valor de elevação média para cada uma das áreas. Um outro parâmetro comparado foi o valor médio de correlação dos pixels dentro de cada uma das 6 áreas de rocha.

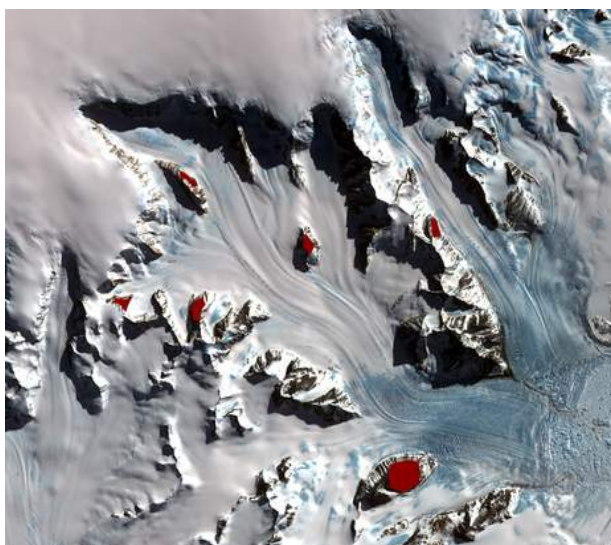


Figura 6: Áreas selecionadas para comparação entre diferentes configurações de processamento.

O primeiro gráfico mostra a elevação média de cada área e como esta elevação varia entre os MDE calculados para cada uma das imagens (figura 7). Os processamentos que apresentaram menos variações foram os processamentos 2, 3 e 4 (azul claro, verde e laranja, respectivamente na figura 7). A linha tracejada preta é o resultado de outro teste em que foi utilizada uma janela menor (3x3) e empregando pontos de controle do terreno (GCP), que será discutido adiante (seção 3.4). O segundo gráfico (figura 8) mostra para cada imagem utilizada os valores médios de correlação dos pixels em cada área. É fácil notar que o processamento 4 (laranja) apresentou maiores valores médios de correlação, na maioria das áreas. Isso significa que, individualmente, os valores de correlação de cada pixel são predominantemente maiores, resultando em um MDE com melhor representação da superfície.

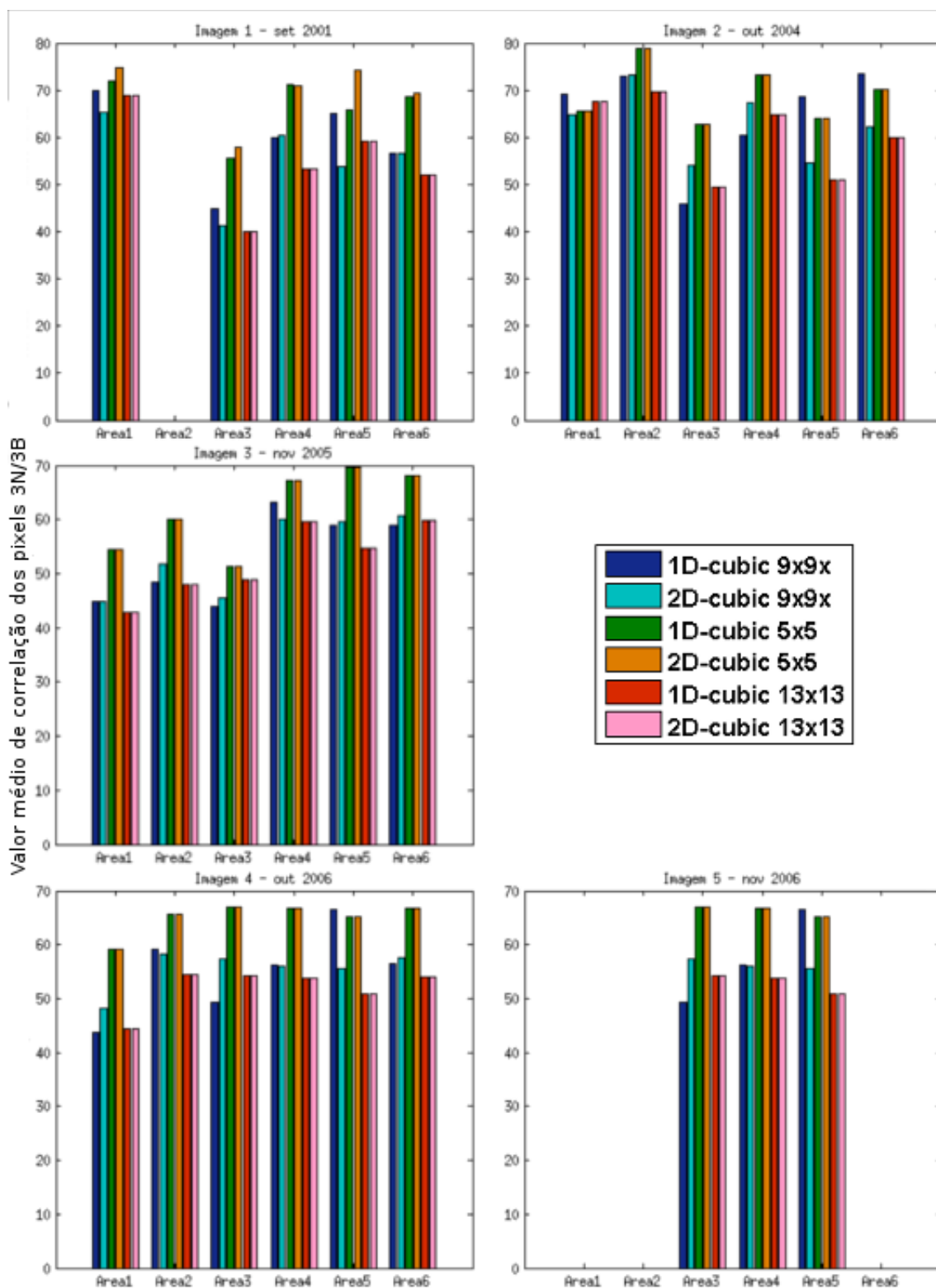


Figura 8: Comparação do valor médio de correlação em cada área de rocha selecionada, nas 5 diferentes imagens. O processamento 4 (laranja) apresentou maiores valores médios de correlação, na maioria das áreas.

Estes testes mostraram portanto que um menor tamanho de janela de busca no processamento do MDE fornece um melhor resultado. Além disso, o

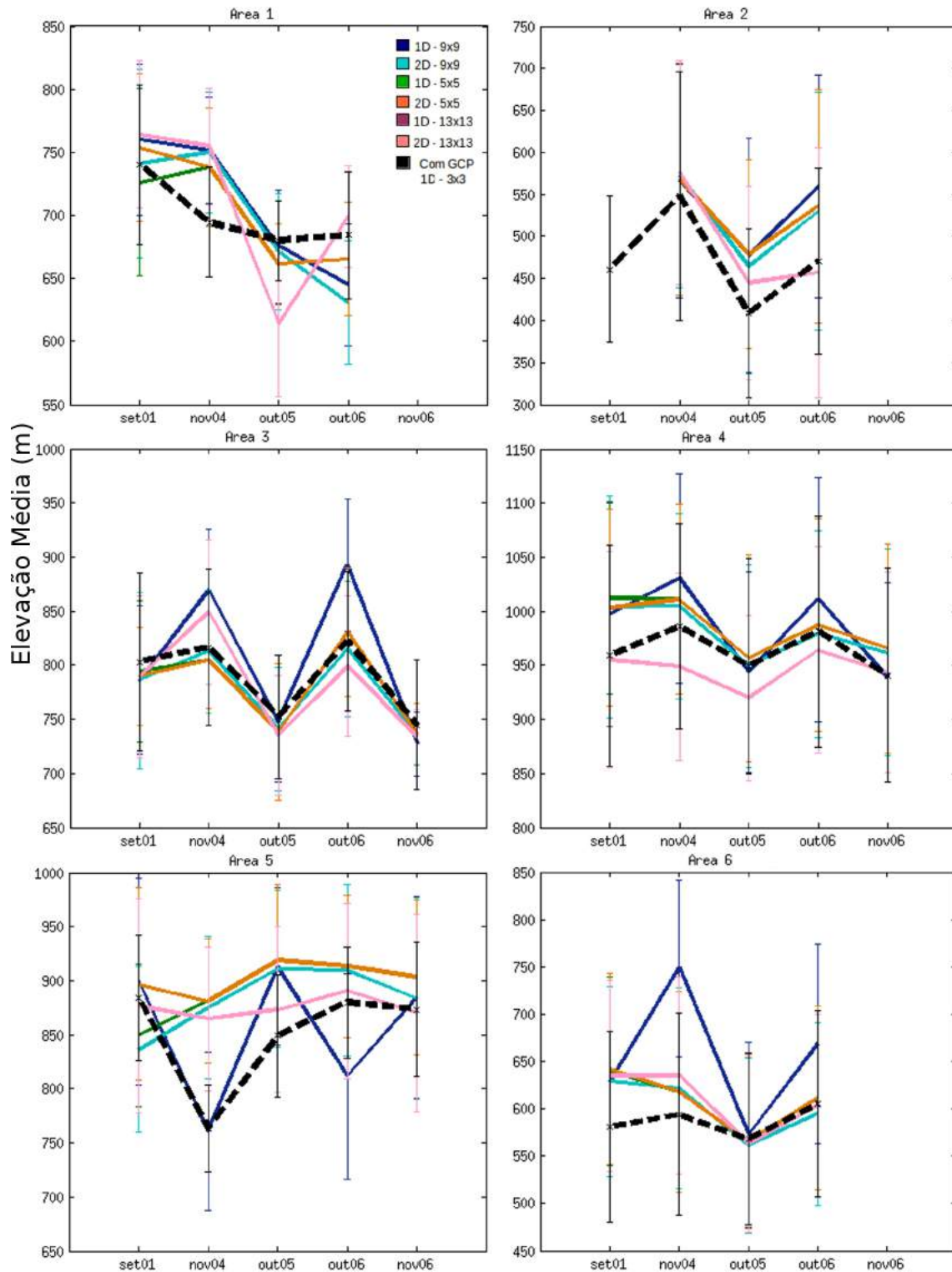


Figura 7: Comparação da mudança em elevação para as seis áreas de rocha com diferentes configurações do processamento.

método de busca com interpolação cúbica 2D assegura uma melhoria de até 5% na correlação (SULSOFT, 2004). Jaña (2006) obteve melhores resultados utilizando o menor tamanho de janela de correlação possível pelo AsterDTM (3x3). Portanto optou-se utilizar este menor tamanho de janela. Ainda segundo o autor, a opção de

“análise de correlação estendida” não apresenta melhoria apesar da maior demanda de processamento. Com esta opção, o programa realiza uma segunda análise nos pixels em que a correlação foi menor que 70, ampliando o intervalo da estimativa de elevação para aquele pixel incluindo áreas mais íngremes do terreno. Ainda assim, optou-se por utilizar esta configuração que, segundo o manual do usuário do AsterDTM, garante uma melhor representação de terrenos acentuados (SULSOFT, 2004). Ao final adotou-se as configurações para processamento resumidas na tabela 5.

Tabela 5: Configurações para processamento utilizadas no AsterDTM.

Parâmetro	Configuração Utilizada
Resolução de saída	15 metros
Método de correlação	Evolução cúbica 2D
Tamanho da janela de correlação	3x3
MDE orientado para norte	Sim
Análise de correlação estendida	Sim

Durante a geração dos MDEs com o software AsterDTM é possível, ainda, fornecer pontos de controle no terreno (GCPs) para a calibração absoluta de posição e altitude. Porém, GCPs não foram utilizados no trabalho devido à ausência e/ou escassez de tais dados para a região de estudo. Mas o software AsterDTM, em sua etapa de pós-processamento, realiza uma calibração em x, y e z a partir das efemérides orbitais do satélite contidos nos metadados de cada imagem. No manual do AsterDTM é relatado uma precisão de 50 metros, aproximadamente 3 pixels, para o registro no plano horizontal (x e y) (SULSOFT, 2004). Este tópico será retomado adiante na seção 3.4.

3.3 Pós-processamento dos ASTER MDEs

Apesar de representarem bem as características do terreno, os MDE apresentam-se poluídos por ruídos de alta frequência. Esses valores anômalos podem ser atribuídos à falsas correlações e/ou erros estocásticos do processo de correlação. Sendo a aplicação de filtros uma das abordagens recomendadas para eliminar estes valores espúrios e discrepantes (HENGL; GRUBER; SHRESTHA, 2004). Um filtro de mediana com tamanho de janela 9x9 pixels foi aplicado nos MDEs

gerados no trabalho. O tamanho de janela foi escolhido com base no trabalho de JAÑA (2006), onde foram testados diferentes tamanhos de janela, avaliando a eliminação dos dados espúrios e a preservação das características do terreno. A figura 9 é uma secção aleatória que cruza o vale da Geleira Sjögren e exemplifica o processo.

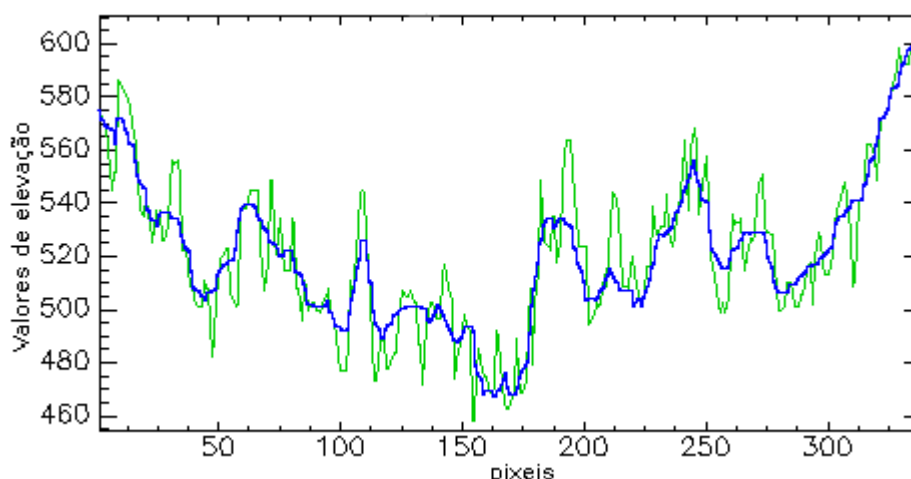


Figura 9: Perfil transversal da geleira Sjögren. A linha verde representa os valores originais do MDE gerados pelo AsterDTM, a linha azul representa os valores do MDE após a aplicação do filtro de mediana com janela 9x9 pixels.

3.4 Corregimento horizontal e vertical dos MDEs

Os MDEs são chamados relativos quando gerados sem a inserção e pontos de controle horizontais e verticais, o que significa que possuem valores de elevação relativos a algum nível arbitrado. Já os MDEs absolutos possuem fidelidade a um sistema de coordenadas e altitudes representadas a partir de uma referência altimétrica. O AsterDTM, em sua fase de pós-processamento, realiza uma calibração e georreferenciamento com base nas informações das efemérides orbitais do satélite Terra. Com isso, é conferida uma exatidão planimétrica (*i.e.*, em x e y) de 50 metros, e uma precisão para valores de elevação relativos melhor que 20 metros (intervalo de confiança de 90%) (ASTERDTM-ENVI, 2012b; FUJISADA *et al.*, 2005; TOUTIN, 2008). A exatidão dos MDEs ASTER depende dos pontos de controle do terreno, geometria estereoscópica (razão B/H), e da correlação entre as Bandas ASTER 3N e 3B. Se não houver pontos de controle disponíveis, somente um MDE relativo é obtido, e sua exatidão dependerá apenas dos outros dois parâmetros (TOUTIN, 2008). Ainda segundo este autor, para não induzir erros no MDE absoluto, estes dados de controle devem ser duas vezes mais exato do que o MDE final esperado. Com relação ao processo de correlação entre o par de imagens estereoscópicas, o sensor ASTER apresenta grande vantagem em termos de uma

menor variação radiométrica, pois a aquisição ocorre ao longo da trajetória e de forma quase simultânea; a diferença de tempo entre aquisições das bandas 3N e 3B é de apenas 55 segundos. O que é confirmado pela taxa de sucesso da correlação entre as imagens do par estereoscópico ASTER, chegando a um valor acima de 90% (HIRANO; WELCH; LANG, 2003). Para a estimativa de paralaxe através de um processo de correlação automático, Welch *et al.* (1998) obteve 0,5 pixel (*i.e.*, inferior a 15 m) de erro em áreas com feições bem definidas e 1 pixel em áreas mais homogêneas, conferindo um erro nos valores de elevação para um MDE relativo entre ± 12 e ± 25 m.

O programa AsterDTM apresenta a opção para inserção de GCPs. Estes pontos devem conter informação nas três dimensões, porém o programa permite também a inserção de pontos de controle horizontais (sem informação altimétrica) e pontos de controle verticais (sem informação horizontal). O primeiro visa aumentar o georreferenciamento planimétrico e o segundo aproximar o MDE relativo de um MDE absoluto.

3.4.1 Corregistro entre os MDEs

Duas abordagens foram testadas para minimizar os erros planimétricos entre os MDEs. Em uma primeira tentativa, testou-se a utilização do Mosaico de Imagens Landsat da Antártica (LIMA) como imagem base de referência para o registro no plano horizontal, x e y. Apesar do LIMA apresentar uma resolução espacial de 15 m, esta resolução é obtida através do método de transformada IHS para a fusão da banda pancromática de maior resolução, 15 m, com bandas multiespectrais de 30 m de resolução, e portanto não apresenta uma boa resolução visual para este objetivo. Especialmente quando comparada à qualidade da imagem ASTER (Figura 10), há dificuldade no processo de escolha dos pontos de controle com boa precisão. Além disso, em algumas áreas analisadas não é possível definir pontos de controle devido à ausência de áreas livres de neve, normalmente utilizadas para definição de pontos de controle. Por esses motivos esta abordagem foi desconsiderada.

Em uma segunda tentativa, testou-se um corregistro entre os dois MDEs. Para isso, os modelos foram agrupados com as suas respectivas imagens VNIR ortorretificadas, para a realização de um corregistro imagem a imagem. Este procedimento foi efetuado de forma manual, com a seleção de 10 pontos de controle, com transformação geométrica pelo método polinomial de ordem um e com um erro médio quadrático menor que 1 pixel. Este procedimento demanda tempo e um grande trabalho manual e visual e, como dito anteriormente, o

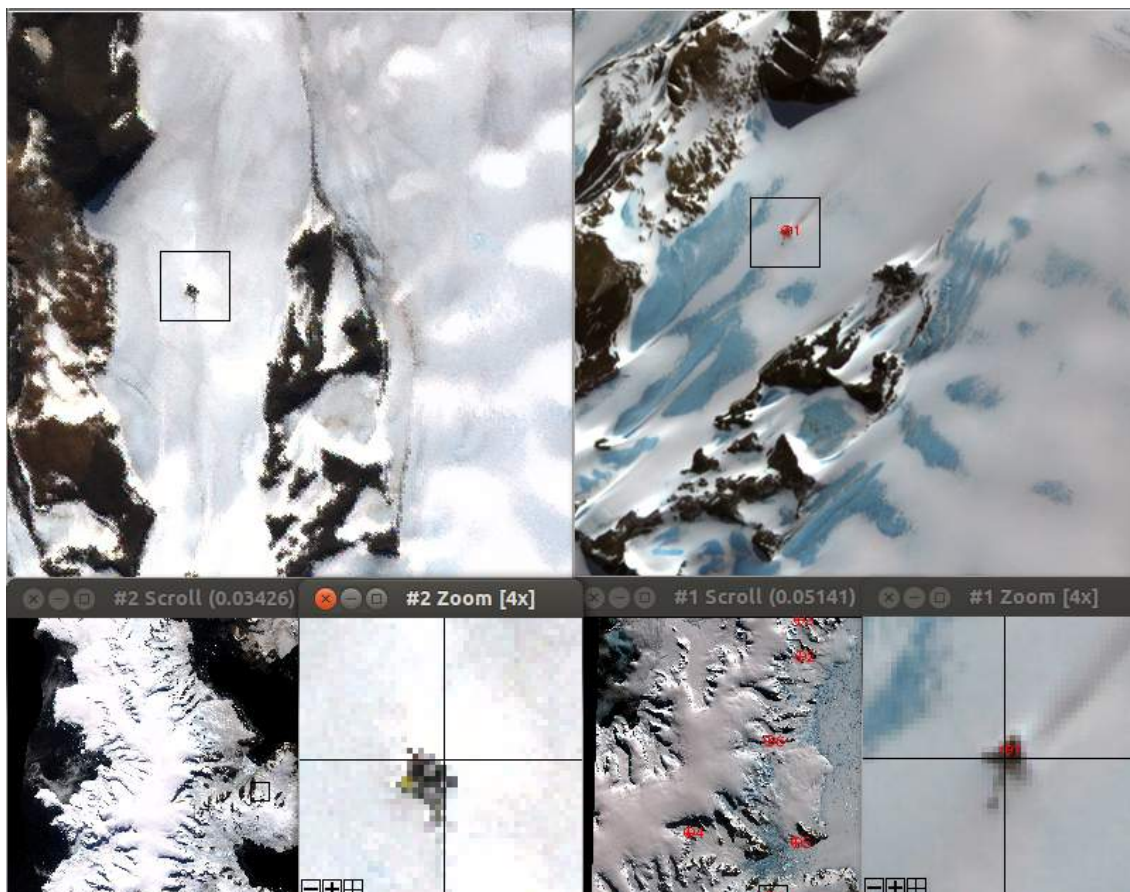


Figura 10: Tentativa de corregistro de imagem ASTER (à direita) com o mosaico LIMA (à esquerda). O nunatak não é facilmente identificável. Além disso, as duas imagens apresentam projeções diferente (LIMA: estereográfica polar; ASTER: UTM). É difícil definir pontos de controle com uma boa precisão.

software já realiza uma correção planimétrica.

Para a avaliação da eficácia desta última abordagem descrita acima, os resultados obtidos foram comparados com os MDEs georreferenciados apenas com a informação de posicionamento calculada a partir das efemérides do satélite Terra (saída padrão do AsterDTM). A comparação entre as imagens corregistradas imagem a imagem e não corregistradas foi realizada para os pares das áreas N3 (seção 4.1.3), DV2 (seção 4.6.2), e LB3 (seção 4.3.3). Para exemplificar, são apresentados os gráficos (figura 11) da área DV2, com a comparação feita entre os valores de mudança média de elevação (gráficos da esquerda) e desvio padrão das médias (gráficos da direita) calculados por intervalos de 50 metros de altitude. Os resultados obtidos pelos dois procedimentos não apresentam grande diferença. Com base nisto, conclui-se que não é necessário um corregistro.

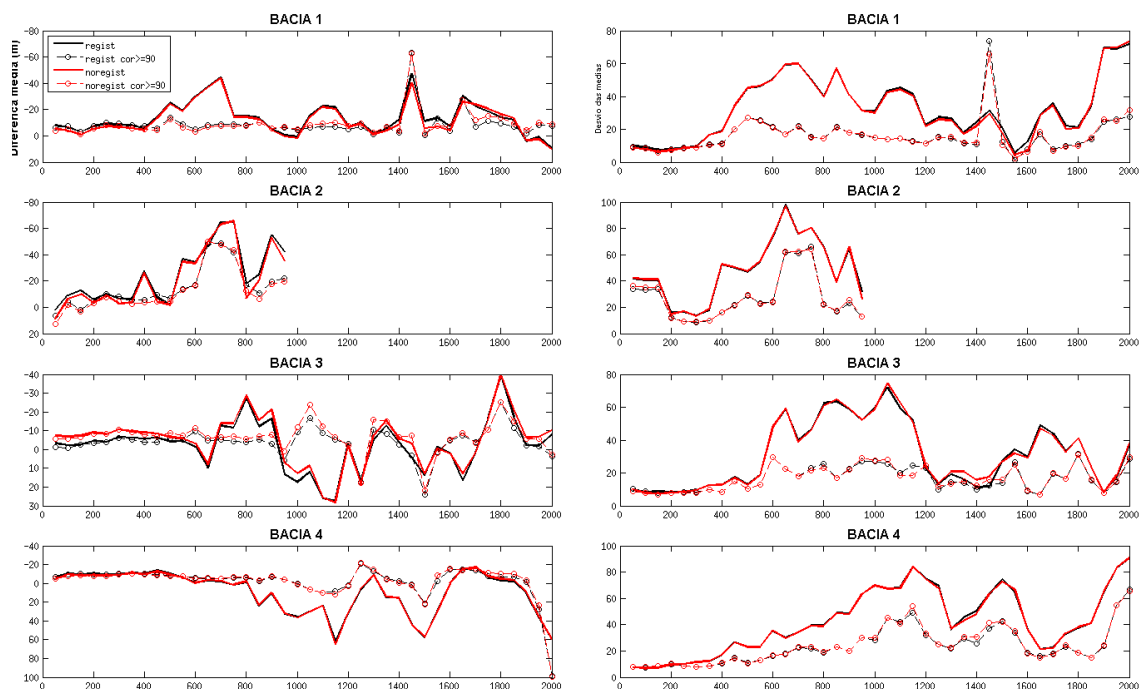


Figura 11: Gráficos da esquerda mostram a comparação entre os valores de mudança média de elevação por intervalos de 50 m de altitude, calculados para MDEs corregistrados (em preto) e não corregistrados (em vermelho). Os gráficos da direita mostram os valores de desvio padrão para os valores médios calculados. Os valores obtidos pelos dois métodos apresentam resultados semelhantes.

É importante ressaltar no procedimento para o corregistro imagem a imagem, que as imagens utilizadas são aquelas já ortorretificadas com base em seu MDE gerado. A ortorretificação consiste em uma correção do terreno em função da elevação do mesmo, ou seja, a correção (*i.e.* deslocamento) de determinado pixel será maior sobre áreas mais elevadas como picos de montanha. O corregistro entre duas imagens exige a definição de pontos de controle. Por exemplo, feições facilmente identificáveis nas duas imagens. A maior parte da região imageada é composta por áreas de neve e gelo com algumas montanhas e/ou rochas que se destacam no gelo, sendo estas feições geralmente escolhidas como GCPs. Por serem regiões com alta declividade, dificilmente são bem e/ou igualmente representadas nos modelos, tendo assim uma maior probabilidade de haver um deslocamento errôneo entre os dois pontos. De maneira geral, quando se compara visualmente duas imagens não corregistradas, é aparente uma conformidade entre feições como o contorno de montanhas e limite das geleiras, sendo notado um deslocamento máximo de 3 pixels. Porém quando se foca nos cumes das montanhas, um deslocamento maior que 3 pixels pode ser percebido. Vale ressaltar que o erro em *z* devido ao erro planimétrico será menos representativo quando calculadas as diferenças médias de elevação por intervalos de altitude.

3.4.2 Nivelamento altimétrico do MDEs

Para a obtenção de um par mais passível de comparação, adotou-se uma metodologia baseada em Berthier *et al.* (2004), que consiste na diferença de elevação entre os dois modelos em pontos de rocha, sem cobertura de neve. Nestas áreas espera-se uma diferença de elevação nula, sendo que uma diferença não nula representará um deslocamento (*offset*) em *z* entre os modelos. Espera-se que os valores dos pixels selecionados apresentem uma distribuição quase normal, sendo a média desta distribuição representativa do *offset* a ser empregado. Na literatura é demonstrada uma correlação quase linear entre a precisão do MDE e a declividade do terreno, podendo chegar a 15 metros em áreas menos inclinadas (TOUTIN, 2002). Por isso, antes de estimar este valor, os pixels selecionados foram filtrados para que apenas os com alta correlação fossem utilizados. Após a aplicação desta metodologia para três pares a serem comparados, observou-se que, independente das datas das imagens, um desvio positivo da imagem mais antiga em relação à mais recente era consistentemente obtido. Isto é, a imagem mais antiga encontrava-se em torno de 10 a 20 metros acima da mais recente. Uma possível explicação seria que, ao fazer a seleção sobre áreas de rocha, alguns pontos incluídos poderiam ainda estar representando a mudança de elevação no entorno da rocha; desta maneira, as diferenças sempre indicarão um modelo mais antigo como mais elevado. Além disso, a seleção de áreas de rocha de forma manual é muito imprecisa e a seleção consecutiva de uma mesma área pode resultar em valores diferentes. Berthier (2004), ao utilizar esta abordagem para a Geleira Mer de Glace com imagens de 1994, 2000 e 2003, possuía um *n* amostral considerável e uma extensa área sem cobertura de neve, facilitando a seleção da área e comparação. Para a Península Antártica, é inviável a seleção de áreas de rocha para algumas imagens. Ao analisar os gráficos com a diferença de elevação para intervalos de 50 metros de altitude para as Geleiras Boydell e Sjoegren com um *offset* de -11,3 m aplicado ao modelo mais antigo (figura 12), observa-se que a partir dos 650 m de altitude os valores são positivos, com uma diferença positiva de 12 metros a aproximadamente 900 m de altitude, valor próximo ao *offset* aplicado. Deste modo é mais condizente inferir que estes valores resultam da aplicação do *offset*. Mudanças positivas na elevação não estão de acordo com outros trabalhos (PRITCHARD; LUTHCKE; FLEMING, 2010); também não há concordância com o fato das duas geleiras apresentarem grande retração, da ordem de alguns quilômetros. É importante ainda observar que nos intervalos de altitude a partir de 900/950 metros as linhas de contorno se tornam muito próximas, incluindo também regiões de rocha e/ou muito íngremes (baixa precisão). Isto ocorreu especialmente pela presença de uma escarpa acentuada com mudança abrupta da altitude de 1000

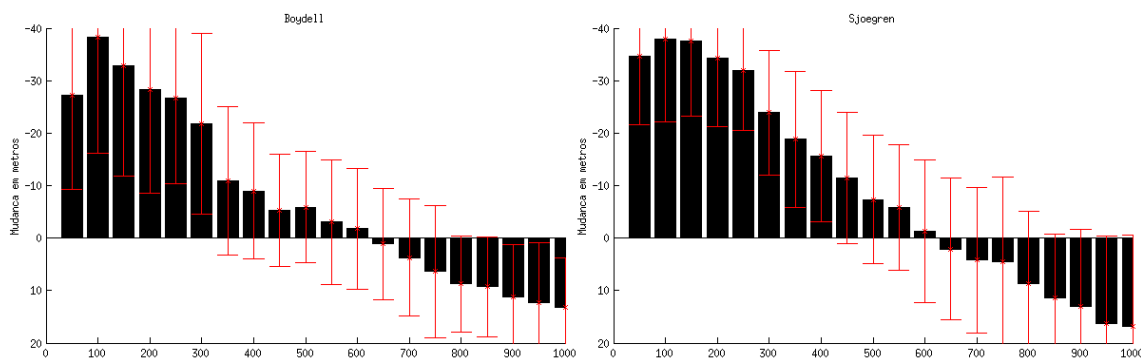


Figura 12: Valores de mudança em elevação média para as Geleiras Boydell (esquerda) e Sjöegren (direita).

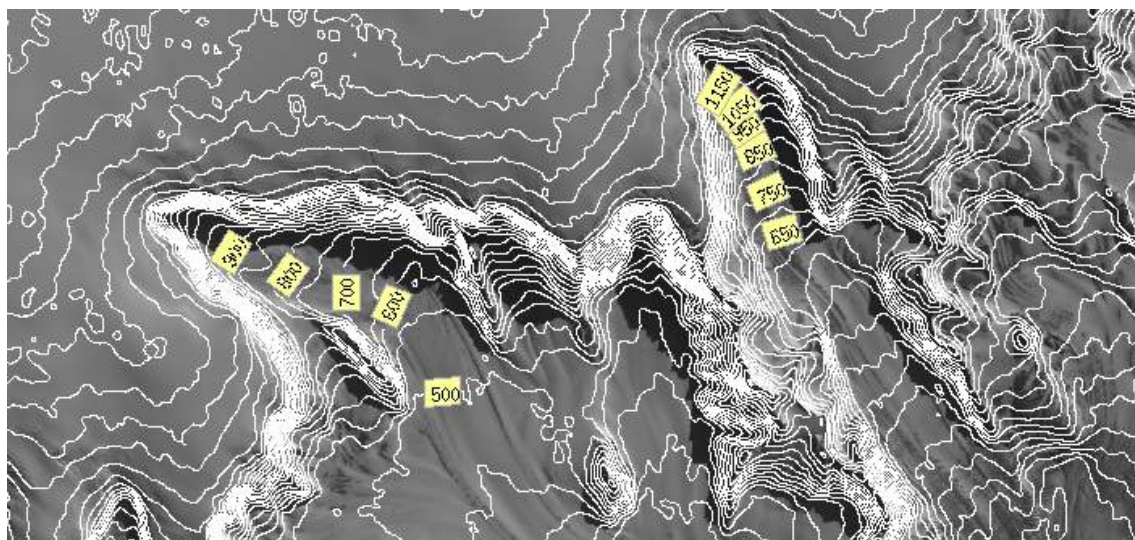


Figura 13: Subcena da imagem banda3 ASTER para a Geleira Sjöegren (esquerda) e Boydell (direita), apresentada na área N3. Linhas de contorno de elevação com base no GEM em intervalos de 50 metros. A distância entre as curvas de níveis vai reduzindo quanto mais perto da escarpa, com isso diminui-se a quantidade de pixels amostrados para cálculo das mudanças médias de elevação. IMAGEM: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001.

para 1400 (Boydell) e 1500 (Sjöegren) metros de altitude (figura 13).

3.5 Empilhamento e reamostragem dos MDEs

Para a comparação entre dois dados gerados a partir de duas imagens distintas, é necessário agrupar um dos dados para a mesma grade de pixels com os mesmos pontos geográficos do outro dado. Para isso um dos dados tem o valor de seus pixels, bem como a localização dos mesmos, reamostrados.

Para os dados do MDE a reamostragem utilizada foi a interpolação bilinear (PELLIKA; REES, 2009), preferível ao invés do método por vizinho mais próximo, já que é feita uma correção da elevação em função da distância da reamostragem. Para as matrizes de correlação dos pixels, foi utilizada a reamostragem por vizinho mais próximo, pois neste caso é interessante preservar o

valor de correlação para os valores de elevação estimados.

3.6 Cálculo das mudanças em elevação

Para o cálculo da mudança em elevação na superfície das geleiras, o MDE mais antigo foi subtraído do mais recente. Deste modo, valores negativos representam áreas de perda de massa (ablação) e valores positivos representam áreas de ganho (acúmulo). Para se obter os valores médios de mudanças de elevação, as seguintes etapas foram necessárias e serão comentadas a seguir: definição de intervalos de altitude para cálculo das mudanças médias de elevação; eliminação das áreas de rocha; exclusão das áreas de rocha; exclusão das áreas de alta declividade do terreno; filtragem de áreas de baixa correlação entre as bandas 3N e 3B utilizadas para gerar o MDE; e exclusão dos valores discrepantes.

3.6.1 Definição de intervalos de altitude

Para uma estimativa em nível regional dentro de cada geleira, a diferença de elevação foi calculada em intervalos de 50 metros de altitude. A elevação é um dos parâmetros que afetam o balanço de massa, sendo sugerida a divisão em intervalos de elevação para que os cálculos das médias sejam mais acurados (DYURGEROV; MEIER; ARMSTRONG, 2002). Segundo Berthier (2004), podemos reduzir a incerteza do método ao assumir que todos os pontos a uma certa altitude experienciam uma mesma mudança em elevação. Para cada intervalo de 50 metros, o histograma dos valores de mudança em elevação apresentará uma distribuição quase normal, permitindo o cálculo da mudança média de espessura pela média de todos os valores menores que 3 desvios padrões. Um exemplo da dispersão dos dados é mostrado na figura 14. Sendo a dispersão do histograma devido à um sinal Gaussiano, a incerteza do método (erro) deve ser dividida pela raiz quadrada do número de pixels de cada intervalo. Para a separação dos dados de elevação em intervalos determinados de elevação, utilizou-se o GDEM filtrado, descrito na seção (2.1.2).

3.6.2 Exclusão de áreas de rocha

As rochas foram eliminadas com a utilização do plano de informação com os limites destas áreas. Notou-se porém que os dados subestimam as regiões de rocha sendo necessária mais uma etapa, descrita a seguir.

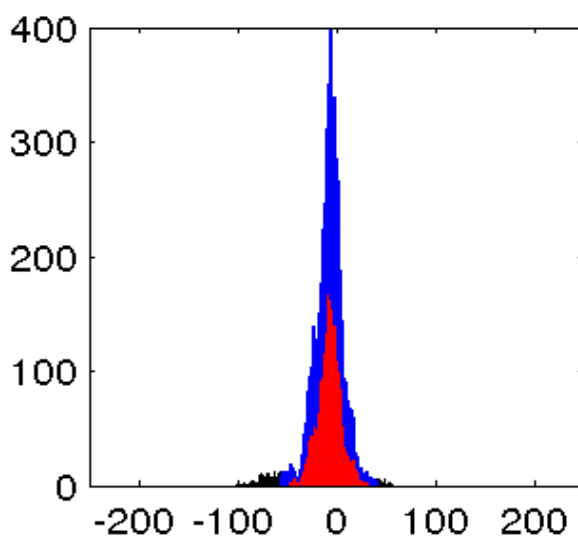


Figura 14: Exemplo da dispersão dos valores de mudança em elevação para o intervalo de 850 a 900 m de altitude. Valores retirados da Geleira Sjögren, área N3. Valores em preto representam todos os pontos do intervalo, em azul pontos com até três desvios padrões da média, e em vermelho apenas pontos filtrados para correlação maior ou igual 85.

3.6.3 Exclusão de áreas de alta declividade do terreno

A declividade foi calculada para cada MDE utilizado e também para o GDEM. Para isso, utilizou-se uma matriz de 3x3 pixels com os valores de elevação. Por este ser um tamanho de janela relativamente pequeno, muitas feições no vale da geleira são percebidas como declives, devido a pequenas variações de elevação em pixels de menor correlação. Para suavização dos mapas de declividade, foi aplicado um filtro de mediana 13x13 sobre estes dados. Utilizou-se um limiar de 25° para aplicação da máscara de declividade. É interessante ressaltar que esta abordagem elimina também regiões de falésias, as bordas das áreas cobertas por nuvens, e valores do MDE com menor certeza. A Figura 15 exemplifica o procedimento para mascarar as áreas de rocha e os locais com alta declividade.

3.6.4 Filtragem de áreas de baixa correlação (3N e 3B)

Áreas de baixa correlação correspondem a valores de elevação menos exatos estimados pelo AsterDTM. Para eliminar estas regiões, utilizou-se as matrizes de correlação de cada MDE para filtrar e eliminar os pixels com valores menores que 85 de correlação entre as bandas 3N e 3B. O valor 85 foi escolhido baseado no trabalho de Cuartero *et al.* (2005), onde os autores mostram a relação entre o valor limite filtrado e o erro final. Esses autores ressaltam ainda que, um valor baixo de correlação não é prova definitiva de uma baixa qualidade mas é um sinal de aviso válido e tem significância estatística. Apesar de reduzir os pixels utilizados para

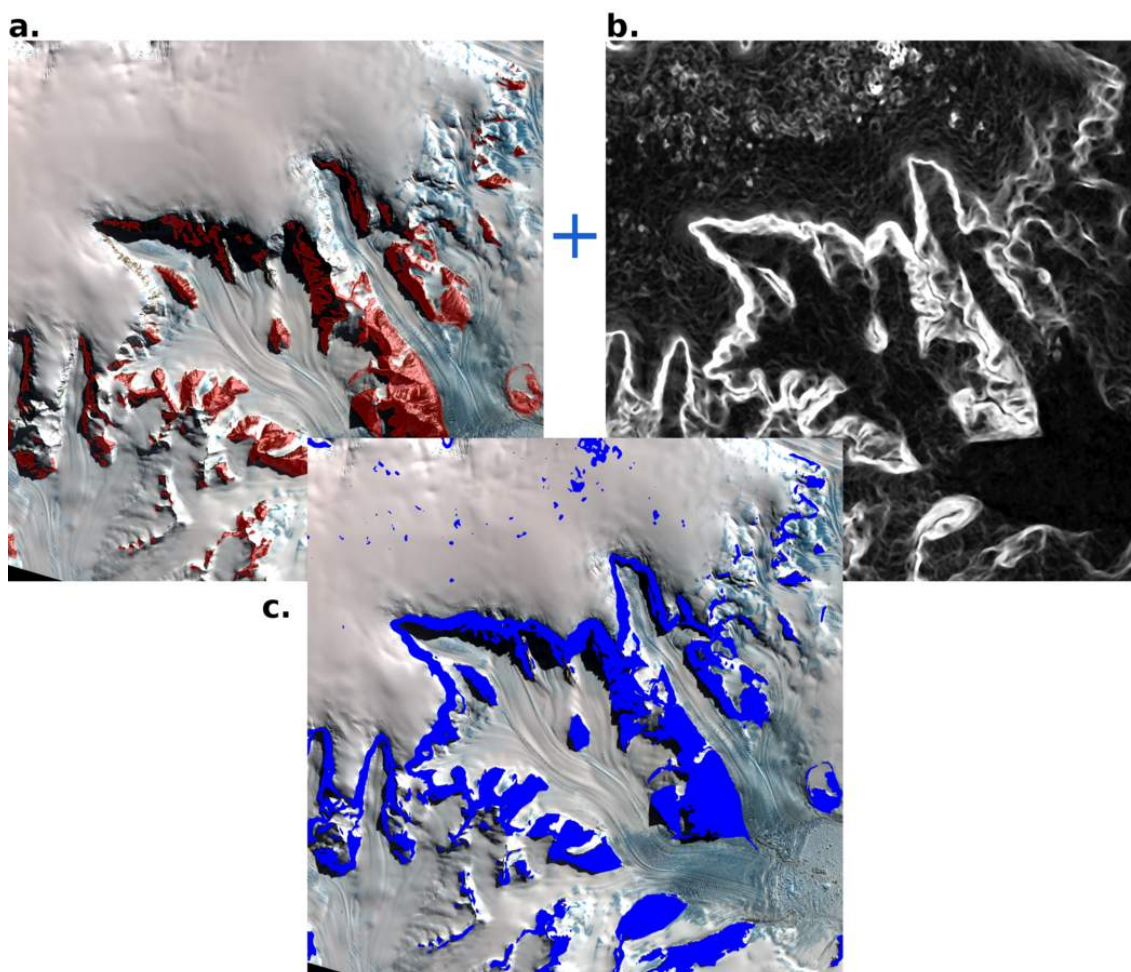


Figura 15: Exemplo do procedimento usado para mascarar regiões de rochas e áreas com alta declividade. (a.) Limites das áreas de rocha (polígonos vermelhos) dados do ADD (04/2010). (b.) Declividade do terreno calculada a partir de MDE ASTER. Valores mais claros indicam valores mais altos. (c.) Área mascarada, correspondente a soma das áreas de rocha e áreas com declividade maior que 25° (polígonos azuis).

cálculo em cada intervalo, isto reduziu também o desvio padrão, uma vez que os valores fornecidos pelo MDE são mais acurados.

3.6.5 Exclusão de valores discrepantes

Uma última etapa foi realizada para a eliminação de valores de mudança de elevação discrepantes que ainda não foram eliminados em etapas anteriores. Estes valores ocorrem devido à presença de nuvem, estimando altos valores de elevação; e/ou áreas da geleira com baixo contraste, que causam falsas correlações estimando valores discrepantes de elevação. Em áreas com presença de nuvem a diferença de elevação entre os dois MDEs a serem comparados resultará em valores muito maiores do que o esperado para as mudanças do terreno de uma geleira. Desta maneira, para eliminar a necessidade de uma etapa de edição manual dos MDE gerados, definiu-se um limite para os valores de mudança de elevação

aceitável. Como limite inferior, foram excluídos valores menores do que -30 m multiplicado pelo intervalo temporal. E para o limite superior, valores maiores do que 15 m multiplicado pelo intervalo temporal foram excluídos. A escolha destes limites representa os valores máximos de mudança de elevação esperado em um ano, o limite inferior baseado nas maiores mudanças negativas em elevação encontrado por Shuman *et al.* (2011), logo após a desintegração da Plataforma de Gelo Larsen B. O limite superior foi baseado em uma sobre estimativa da taxa de precipitação de neve anual (WINGHAM *et al.*, 2006). Para os casos em que um maior intervalo temporal entre as imagens utilizadas não foi possível, com intervalo temporal inferior a 3 anos, utilizou-se os limites de -100 a 50 m para os valores discrepantes.

3.7 Cálculos do balanço de massa das geleiras

3.7.1 Fórmulas utilizadas

Para cada uma das 171 geleiras da área de estudo, foram calculados valores de balanço de massa total (B_n), com a respectiva estimativa de erro, quantidade de massa perdida, e B_n específico ($\overline{B_n}$). Estes valores estão resumidos em uma tabela e apresentados nos resultados de cada área analisada.

O balanço de massa em um ponto da geleira foi calculado pela fórmula:

$$b_n = \rho_0 \Delta h + (\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1) \quad (1)$$

onde b_n é o balanço de massa em um ponto, ρ_0 é a densidade do gelo (usualmente considerada $0,9 \text{ g cm}^{-3}$), e Δh é a mudança de elevação da superfície. O primeiro termo da equação é aplicado para determinar ablação e balanço de gelo sólido (DYURGEROV; MEIER; ARMSTRONG, 2002; HAGEN; REEH, 2004). O segundo termo é aplicado para material poroso (neve e *firn*) com mudança de densidade com o tempo. Para aplicação deste trabalho, este segundo termo não é levado em consideração, uma vez que este dado não é tangível. A multiplicação da diferença em altura pela densidade tem como produto o balanço de massa referido em unidade de metros equivalente água (m e.a.), que representa a altura de coluna d'água sobre um m^2 de área, ou seja, é o volume de água obtido derretendo-se a neve ou gelo. Porém alguns trabalhos referem-se ao balanço de massa apenas pela variação em altura, adotado neste trabalho também (HOWAT; SUPPLEMENTAL, 2008; SHUMAN; BERTHIER; SCAMBOS, 2011). Quando apresentado na forma de

equivalente água, este será especificado.

Os valores de mudança de elevação média, calculado em intervalos de 50 m de altitude conforme descrito acima, foram utilizados para calcular o Bn total (Eq. 2) e o Bn específico (Eq. 3) de cada geleira:

$$Bn = \sum (b_{n1} S_1 + b_{n2} S_2 + \dots + b_{nj} S_j) \quad (2)$$

$$\overline{B_n} = (1/S) \sum (b_{n1} s_1 + b_{n2} s_2 + \dots + b_{nj} s_j) \quad (3)$$

onde Bn e $\overline{B_n}$ é o balanço de massa e balanço de massa específico, b_{n1} , b_{n2} e b_{nj} são o balanço de massa médio dentro de um intervalo de elevação (j) com área s_j ; S é a área de toda a geleira. O balanço de massa específico representa o quanto uma geleira afinou ou espessou se a perda ou ganho de massa for distribuído por toda a superfície da geleira. Desta maneira torna-se possível a comparação entre diferentes geleiras em diferentes anos (HOCK, 2010).

Os erros para os valores de Bn apresentados, foram baseados na fórmula descrita em Dyugorov *et al.* (2002):

$$\sigma b_s = [s_1^2 \sigma b_1^2 + s_2^2 \sigma b_2^2 + \dots + s_j^2 \sigma b_j^2]^{(1/2)} \quad (4)$$

onde σb_j e σs_j são os erros na determinação do balanço de massa e área da superfície (não aplicável neste estudo).

Os valores de área utilizados nos cálculos são baseados no GDEM, sendo excluídas as áreas de rocha delimitada pelo vetor da ADD.

3.7.2 Estimativas e Intervalos de altitude considerados

Para os cálculos apresentados acima, foram utilizados os valores de mudança média de elevação estimados a partir dos pixels com correlação maior ou igual a 85%. Foi observado que para algumas geleiras as mudanças médias de elevação estimadas com todos os pixels apresentaram mudanças abruptas dos valores. Ao mesmo tempo, que os valores estimados a partir dos pixels filtrados por correlação mantiveram um valor coerente. Ao consultar os histogramas destas geleiras, foi observado um ruído na dispersão dos valores para os pixels não filtrados. Já os pixels filtrados apresentaram uma dispersão mais próxima de um sinal gaussiano.

Limitou-se as estimativas de balanço de massa e perda de massa às

regiões de vale das geleiras, ou seja, desde sua frente até a parede da cabeceira da geleira. Nestas áreas as estimativas são mais coerentes e confiáveis. Essas regiões apresentaram maior derretimento em relação precipitação e um maior movimento de fluxo, o que ocasiona uma maior quantidade feições e fraturas. Estas aumentam a taxa de sucesso no processo de correlação entre o par 3N e 3B das imagens ASTER, pois são pontos facilmente identificáveis nas duas imagens. Em contrapartida, as regiões mais altas tendem a apresentar um maior desvio padrão e falsas correlações que levam a valor de elevação não coerente com o terreno, pois apresentam uma maior precipitação e neve, com praticamente nenhuma feição facilmente identificável. Shuman *et al.* (2011) também limitaram a análise comparativa entre os MDE utilizados às áreas em que as elevações eram confiáveis (*i.e.* antes do platô).

Estas áreas foram identificadas primeiramente por uma análise visual das imagens com sobreposição das curvas de níveis do GDEM. Em seguida, é identificado uma queda no número de pixels nos histogramas do intervalo de altitude coincidente ao início da escarpa que precede o platô. Além disso, nos gráficos com os valores de desvio padrão e valores de correlação médio, é possível observar um aumento do desvio padrão e/ou decréscimo na correlação média destes intervalos. Os intervalos de altitude não considerados podem ser consultados no documento em anexo, onde o correspondente histograma é apresentado hachurado.

Cap.4. - Resultados e Discussão

Neste capítulo, serão apresentadas as estimativas de variações em altitude, volume, balanço de massa anual e balanço de massa específico para 171 bacias de drenagem glacial da porção da Península Antártica localizada ao norte de 66° 30' S, com cobertura de 24.044 km². Os resultados foram divididos em oito setores, quatro do lado leste e quatro do lado oeste da PA, como descrito anteriormente. Os setores com mais de um par de MDEs analisados foram separados em áreas com numeração crescente, de norte para sul. Por exemplo, para o Setor Larsen B, os pares analisados são apresentado por áreas LB1, LB2, etc. A figura 16 mostra os setores investigados e o intervalo temporal entre os pares de imagens ASTER utilizados para as estimativas mencionadas acima.

Para cada par foi gerada uma figura com a topografia do GDEM representada nos limites das bacias de drenagem compreendidos pelo par de MDEs. Ao fundo é possível observar a imagem VNIR para o limite de intersecção entre as duas imagens ASTER utilizadas. Os valores de elevação nos limites dos vetores de rocha do ADD foram mascarados para o GDEM e não foram contabilizados como área glacial para os cálculos de balanço de massa total e específico. Cada bacia de drenagem representada em um par recebeu uma numeração para identificação.

Os valores de mudança média anual de elevação (m.m.a.e.), para faixas de 50 m de altitude, são apresentados em gráficos elaborados para cada bacia de drenagem analisada. As porcentagens de área dos pixels utilizados, correspondem ao pixels após a exclusão das áreas de rochas, de alta declividade e dos valores discrepantes, descritas na seção 3.6.

Além disso, foram elaborados gráficos com o desvio padrão das mudanças de elevação média e histograma de dispersão para cada intervalo de elevação. Devido à grande quantidade de figuras necessárias para representar todos estes gráficos, neste documento serão apresentadas apenas as figuras com os resultados das variações médias em elevação para cada setor. Entretanto, todas as figuras geradas e utilizadas na análise estão compiladas em um documento em anexo para a consulta do leitor.

Por último, para cada par foi elaborada uma figura ilustrando a variação espacial das mudanças na superfície das geleiras entre o período amostrado pelas imagens ASTER.

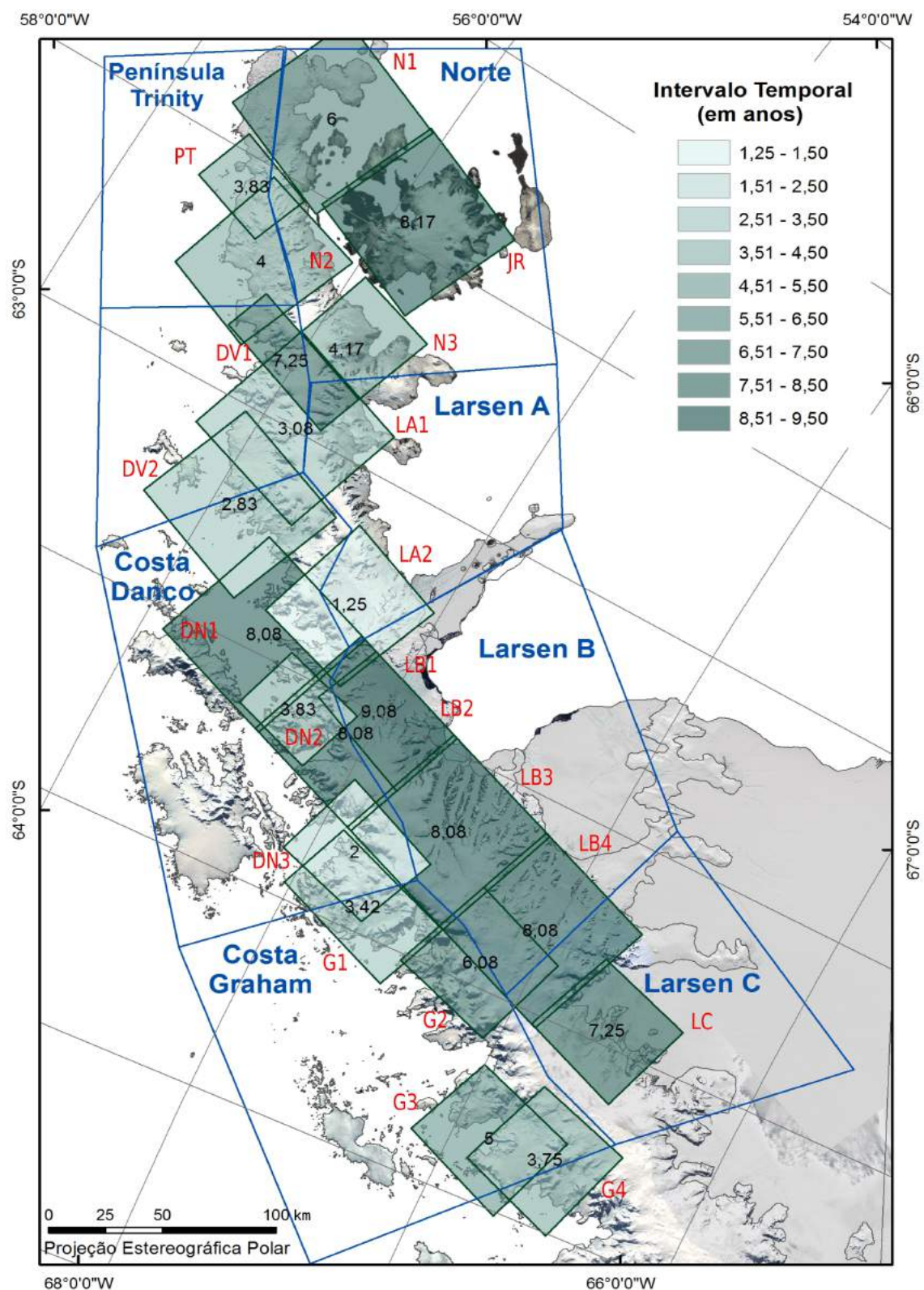


Figura 16: Mapa de distribuição dos pares de comparação entre MDEs nos diversos setores analisados na Península Antártica. A intensidade do verde de cada polígono representa o intervalo temporal, em anos, entre as duas aquisições e o valor exato é mostrado sobre cada polígono.

4.1 Setor Norte

Este setor foi dividido em três áreas (*i.e.*, N1, N2 e N3) e compreendeu um total de 2316 km² de área coberta por gelo, totalizando 40 bacias de drenagem glacial. De maneira geral as geleiras deste setor, com exceção das geleiras da área N1, apresentam uma escarpa acentuada separando a porção mais baixa da geleira, (vale) da parte mais alta (platô) (figuras 17, 20 e 24). Esta separação ocorre por volta dos 900-1100 metros de altitude e corresponde a locais de redução do número de pixels analisados em cada intervalo de 50 metros de altitude. Também pode-se notar que o desvio padrão dos valores de mudança média de elevação aumenta nestas áreas de transição, pelo fato de haver uma menor quantidade de pixels e/ou áreas com maior declividade e portanto, com menor exatidão na geração do MDE.

4.1.1 Área N1

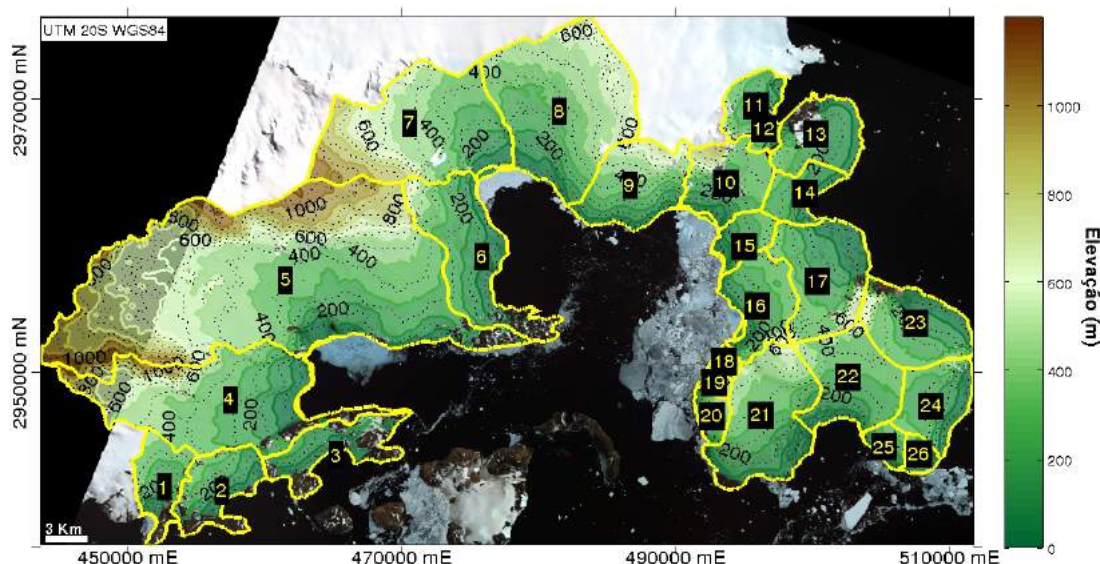


Figura 17: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 13/12/2008. Os números 1 a 26 correspondem as geleiras N1-B1 a N1-B26 mencionadas no texto.

A área N1 abrangeu aproximadamente 50% da área analisada no setor Norte e inclui 26 bacias de drenagem glacial, referenciadas como N1-B1 a N1-B26. A maioria destas geleiras possui uma área inferior a 50 km² e altitudes menores que 1000 metros (figura 17). As imagens ASTER utilizadas para a análise desta área foram adquiridas em 29 de dezembro de 2002 e 13 de dezembro de 2008. É o par com o maior intervalo temporal entre os pares de MDEs analisados do setor Norte, quase 6 anos.

A figura 18 apresenta os valores da diferença de elevação entre os

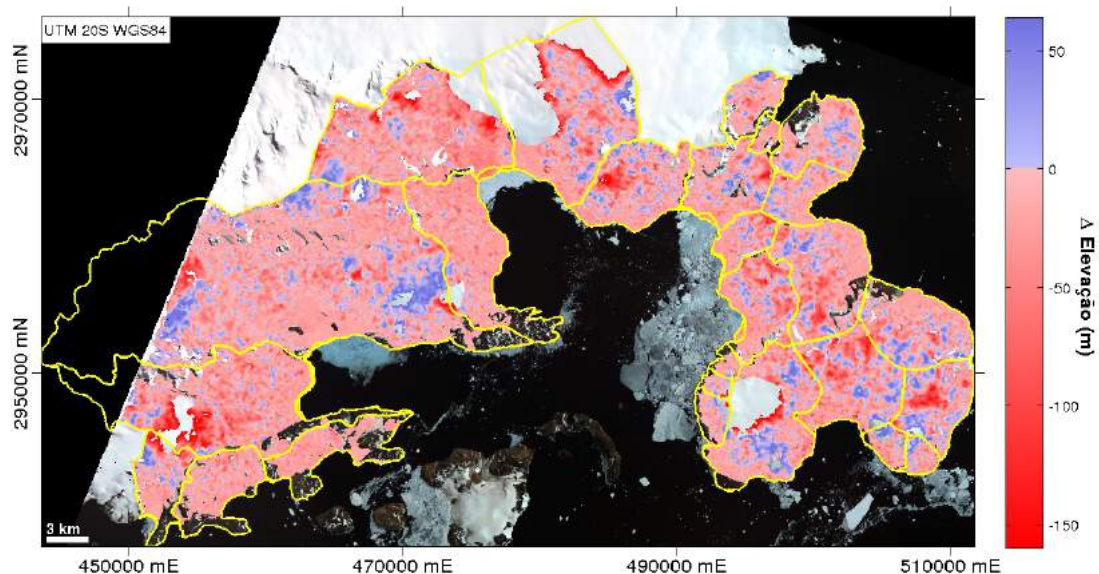


Figura 18: Diferença de elevação em N1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 13/12/2008 e 29/12/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

MDEs, em metros, antes dos cálculos de mudança média de elevação em intervalos de altitude. Além das áreas com rochas, nota-se algumas outras regiões excluídas, correspondentes às regiões com valores discrepantes devido à baixa correlação entre as bandas 3N e 3B do ASTER e/ou à presença de nuvens.

As figuras com os gráficos da mudança média anual de elevação por intervalos de altitude (em anexo) mostram mudança em elevação em todas as bacias da área. A figura 19 ilustra os gráficos com as mudanças médias anuais para as geleiras N1-B4, N1-B5, N1-B7 e N1-B8, as maiores geleiras desta área, com o mais claro sinal de mudança em elevação. As geleiras N1-B4, N1-B5 e N1-B8 apresentam mudanças médias anual de elevação quase constantes nas áreas mais baixas, com um aumento rápido destes valores nas regiões mais altas. As maiores mudanças médias de elevação são encontradas para a geleira N1-B7 até os 300 m de altitude, onde ocorre um aumento nos valores.

Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 91% da área total, ou 21% se forem considerados apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. Os valores estimados para cada geleira são apresentados na tabela 6. Para uma área total de 1072 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $19,08 \pm 11,26$ Gt para o período de 29 de dezembro de 2002 a 13 de dezembro de 2008. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -365 e -3 106 m³ a-1, com um balanço de massa específico entre -4,6 e -1,29 m a-1. Os valores de Bn específico mostram que todas as geleiras deste setor estão em um balanço negativo, ou seja, ainda estão respondendo às mudanças pretéritas em seu estado

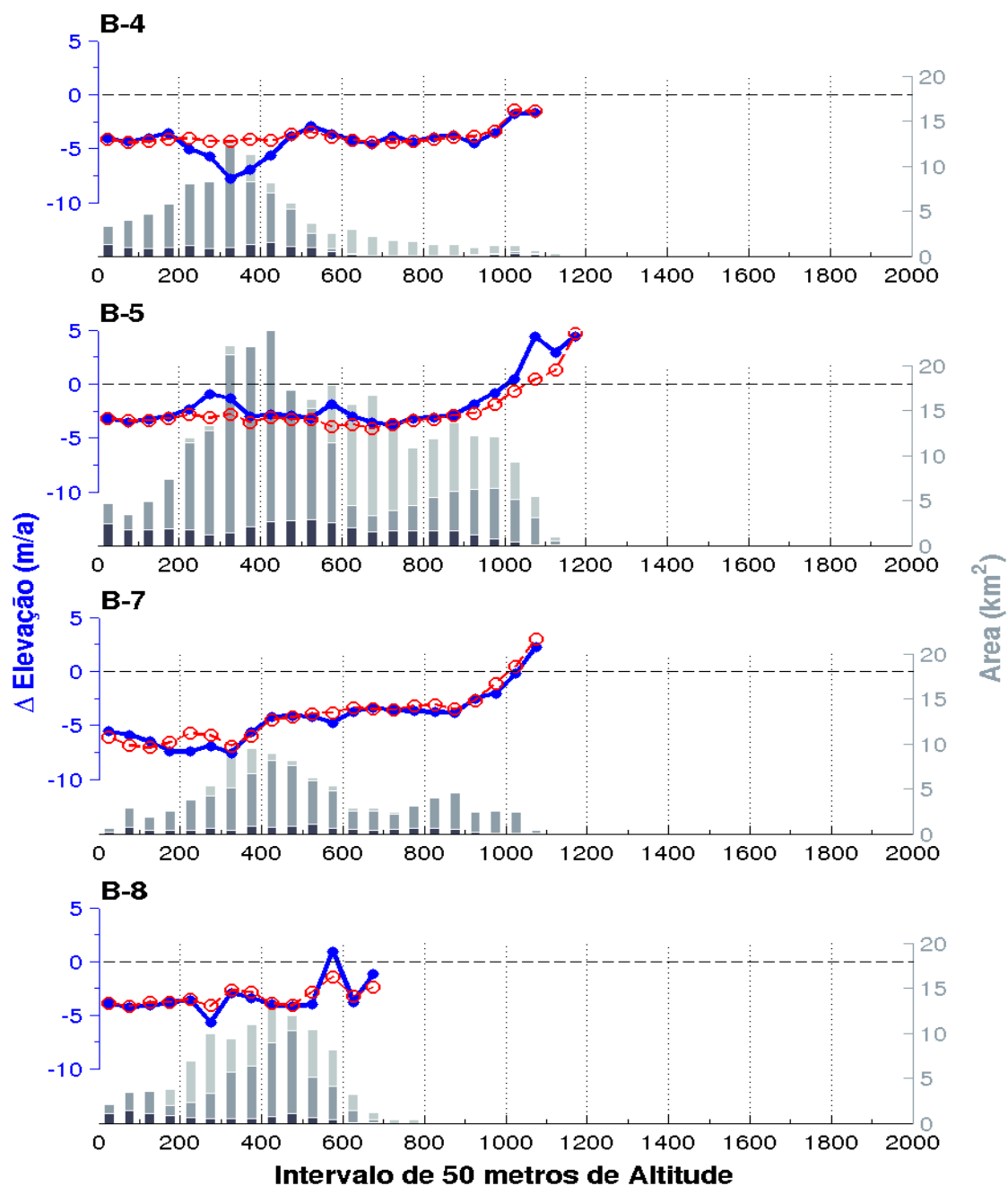


Figura 19: Mudança média anual em elevação para as geleiras N1-B4, N1-B5, N1-B7 e N1-B8 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

de equilíbrio. Uma destas mudanças pode ser atribuída às temperaturas mais elevadas encontradas principalmente para o norte da PA (MORRIS; VAUGHAN, 2003). O menor valor de Bn específico é da geleira N1-B22, -4,64 m a-1, comparável ao da geleira N1-B7, de área muito maior.

Tabela 6: Variação em volume total de gelo na região N1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 29 de dezembro de 2002 e 13 de dezembro de 2008.

Bacias 26	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)		
	Total	Desvio pa- drão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1	-0,28 ± 0,18		-52,24	2,19	-3,00 ± 0,43		17,4	91%	22%
B2	-0,41 ± 0,17		-76,35	1,61	-3,64 ± 0,15		21,0	98%	35%
B3	-0,29 ± 0,10		-53,47	1,25	-3,48 ± 0,19		15,4	99%	39%
B4	-1,75 ± 0,80		-325,48	5,20	-3,46 ± 0,58		94,2	75%	13%
B5	-4,67 ± 2,45		-869,83	9,52	-3,01 ± 0,50		289,0	66%	12%
B6	-0,98 ± 0,40		-182,73	2,80	-3,83 ± 0,55		47,7	94%	27%
B7	-2,18 ± 1,02		-405,79	5,91	-4,42 ± 1,37		91,8	79%	11%
B8	-1,69 ± 1,43		-315,12	8,48	-3,18 ± 0,79		99,2	58%	9%
B9	-0,56 ± 0,44		-103,47	2,93	-2,70 ± 0,69		38,4	92%	24%
B10	-0,47 ± 0,28		-86,74	2,26	-3,04 ± 0,60		28,5	85%	24%
B11	-0,18 ± 0,12		-33,17	1,73	-2,48 ± 0,31		13,4	91%	20%
B12	-0,05 ± 0,02		-8,58	0,45	-2,60 ± 1,24		3,3	69%	42%
B13	-0,35 ± 0,16		-64,44	2,94	-2,73 ± 0,37		23,6	98%	14%
B14	-0,26 ± 0,17		-48,49	2,38	-3,04 ± 0,46		15,9	99%	20%
B15	-0,23 ± 0,14		-43,14	1,95	-3,42 ± 0,68		12,6	98%	24%
B16	-0,57 ± 0,31		-106,12	2,74	-3,61 ± 0,69		29,4	95%	24%
B17	-0,82 ± 0,43		-152,18	4,29	-3,32 ± 0,41		45,8	94%	15%
B18	-0,05 ± 0,02		-8,43	0,73	-3,04 ± 0,72		2,8	84%	45%
B19	-0,02 ± 0,02		-4,15	0,64	-1,29 ± 0,78		3,2	56%	27%
B20	-0,07 ± 0,04		-12,91	0,68	-1,85 ± 0,88		7,0	59%	31%
B21	-0,96 ± 0,79		-178,49	6,44	-3,21 ± 0,68		55,6	76%	16%
B22	-1,04 ± 0,87		-193,62	12,56	-4,64 ± 0,93		41,8	96%	11%
B23	-0,58 ± 0,40		-108,82	4,16	-3,00 ± 0,52		36,2	94%	16%
B24	-0,48 ± 0,42		-89,48	5,26	-3,36 ± 0,67		26,6	94%	12%
B25	-0,09 ± 0,04		-16,95	0,73	-2,54 ± 1,85		6,7	57%	25%
B26	-0,09 ± 0,05		-16,78	0,75	-3,12 ± 1,03		5,4	75%	28%
TOTAL	-19,08 ± 11,26		-3557	90,6			1072	84%	23%

Pelo espaçamento das curvas de nível na figura 17, percebe-se que a região apresenta diversos domos e muitas das geleiras apresentam morfologia de geleiras terminadas em piemontes. Ferrigno *et al.* (2006) avaliaram mudanças da linha de costa nesta região entre o período de 1946 a 2000, onde das oito frentes de geleira analisadas apenas duas apresentaram uma retração significativa, com recuo médio de 75 m a⁻¹. Estas duas frentes de geleira são representadas neste trabalho pelas geleiras N1-B4 e N1-B5, e pelas geleiras N1-B7 e N1-B8. Para o

intervalo entre as datas de aquisições das imagens ASTER utilizadas, foram identificadas mudanças nas frentes das geleiras N1-B1, N1-B4, N1-B5, N1-B7 N1-B10, N1-B15 e N1-B16, em um total de 3,81 km² de retração. A geleira N1-B7 foi a que apresentou a maior variação na frente de geleira, e é também a que apresenta, juntamente com a geleira N1-B22 o maior valor de Bn específico.

4.1.2 Área N2

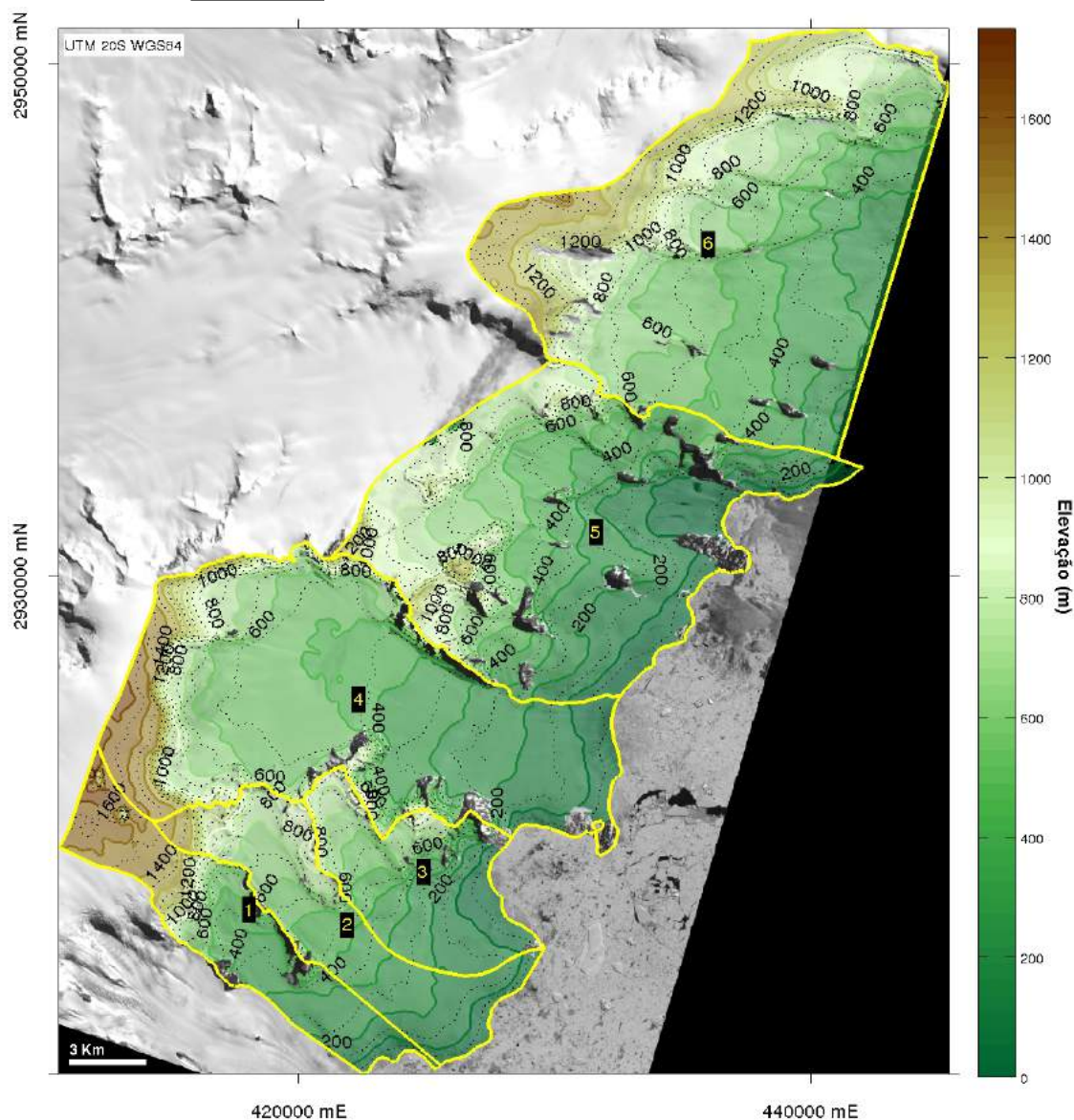


Figura 20: Representação das geleiras analisadas na área N2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 15/11/2005. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras N2-B1 a N2-B6 mencionadas no texto.

A área N2 inclui seis bacias de drenagem glacial, referidas como N2-B1 a N2-B6, localizadas no Canal Prince Gustav (figura 20), um pouco mais ao sul da área N1. As imagens utilizadas para a análise desta área foram adquiridas em 15 de novembro de 2001 e 15 de novembro de 2005, com período de 4 anos entre

aquisições. Apenas as bacias 4 e 5 representam geleiras com nomes, Geleira Victory e Geleira Russel, ambas geleiras de descarga. A bacia 6 foi apenas parcialmente compreendida pelo par de imagens e representa uma parte do Piemonte de Gelo Cugnot. Este piemonte tem sua massa de gelo drenada em parte para uma pequena frente de gelo, localizada na parte superior da figura 20, após o limite de cobertura das imagens. Outra parte de sua massa tem o fluxo drenado pela bacia N1-B4, da área N1.

A figura 21 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs da área N2, em metros, antes dos cálculos de mudança média em elevação por intervalos de altitude.

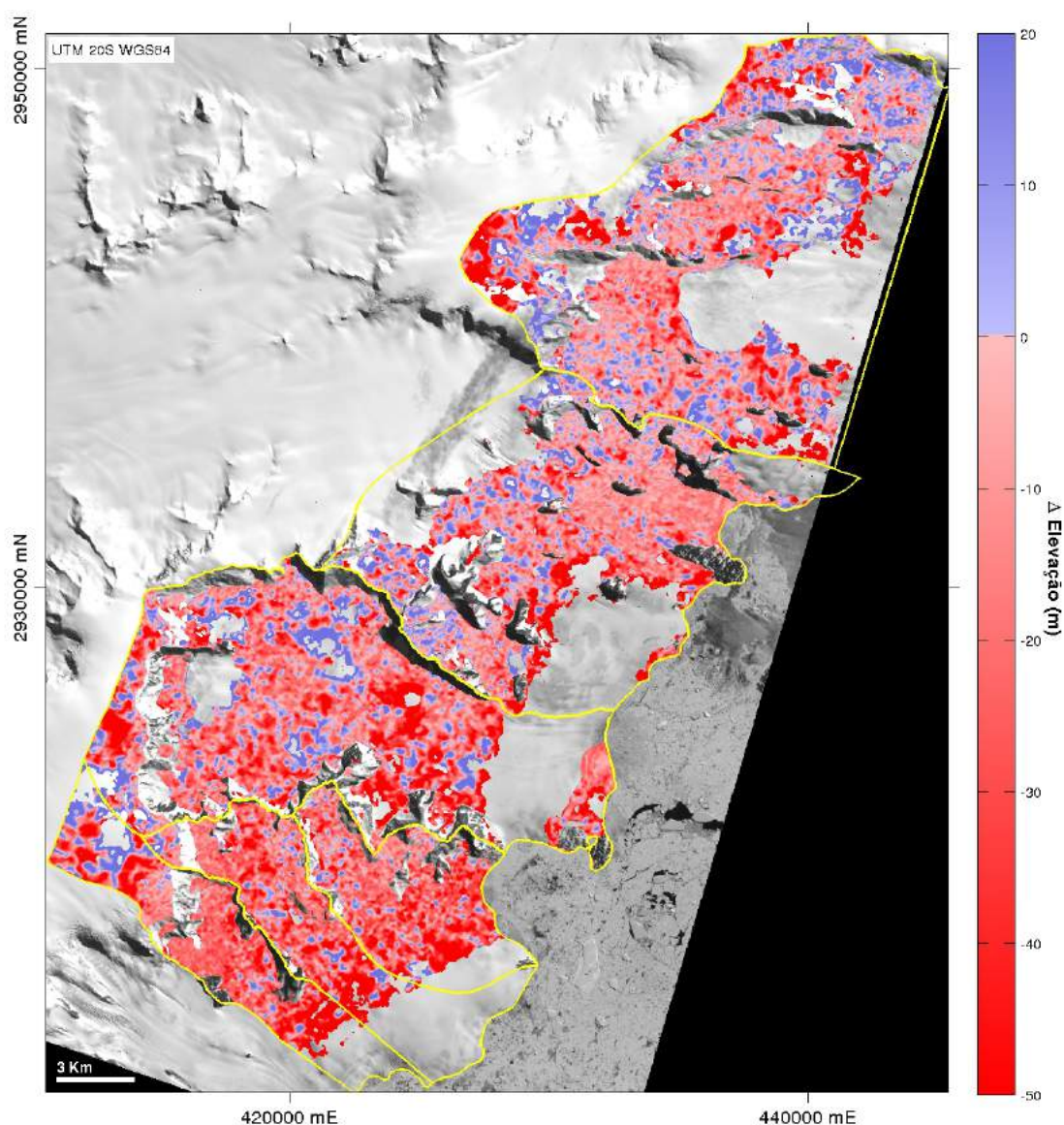


Figura 21: Diferença de elevação em N2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/11/2005 e 15/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

Pode-se notar a ausência de dados em algumas regiões devido à grande presença de nuvens na imagem de 2001. Mesmo após a etapa de exclusão de valores extremos restavam valores altos de mudança de elevação, presentes principalmente nas geleiras N2-B1, N2-B2 e N2-B3 e próximo aos pixels excluídos. Mesmo com a presença destes valores, foi possível estimar valores de mudança média anual de elevação para as seis geleiras, ilustrado pelos gráficos das figuras 22 e 23.

Nos primeiros intervalos de altitude das geleiras N2-B1 e N2-B2, a influência dos valores extremos é evidente. Em alguns casos estes valores influenciaram a estimativa de mudança média de elevação de determinados intervalos de altitude, como ocorre em 175 e 325 m de altitude para a Geleira Victory (N2-B4). É possível notar que os gráficos das geleiras N2-B1 a N2-B3 apresentam-se deslocados para valores mais negativos quando comparados aos gráficos das geleiras N2-B4 e N2-B6. Estes últimos apresentam valores coerentes e semelhantes ao padrão encontrados para área N1. A confiabilidade das estimativas de mudança de elevação para esta área é evidenciada pelos gráficos das geleiras N2-B4 a N2-B6, que apresentam valores crescentes com o aumento da altitude até se aproximarem de 0 para região de início do platô. Os valores de mudança média em elevação desconsiderados para as estimativas de mudança em volume e balanço de massa podem ser consultados no material em anexo.

Para uma área total de 580 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $5,8 \pm 5,35$ Gt para o período de 15 de novembro de 2001 a 15 de novembro de 2005. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -448 e -122 10⁶ m³ a⁻¹, sendo estimado um balanço de massa específico entre -5,51 e -1,65 m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 59% da área total, e 18% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área encontram-se na tabela 7.

As geleiras N2-B1 a N2-B3 apresentaram os maiores valores de Bn específico. Acredita-se que estes valores estejam sobre-estimados devido à influência de nuvens, como notado acima. As três geleiras apresentam área inferior a 50 km² e consequentemente terão menor contribuição no aporte de massa para o oceano.

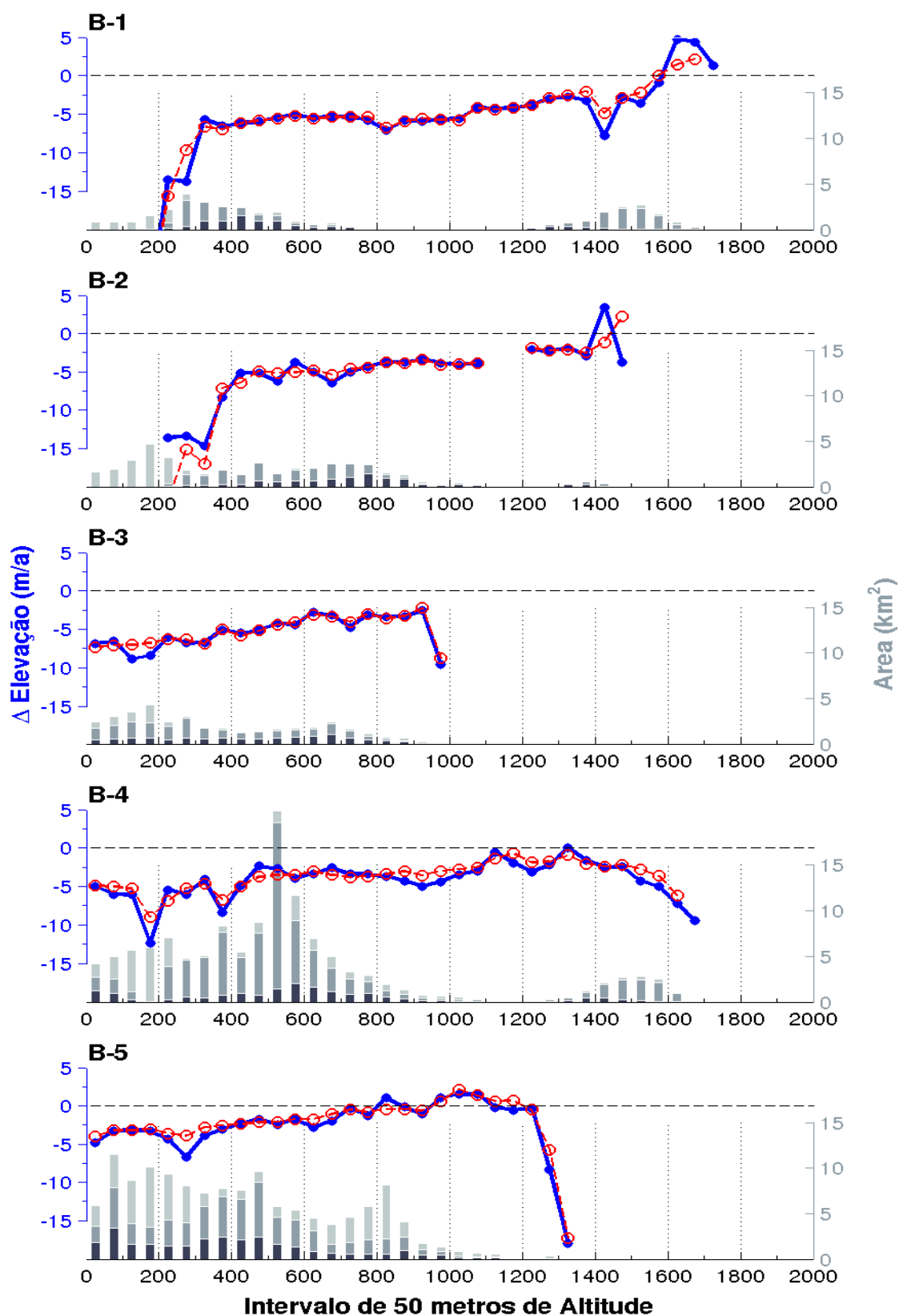


Figura 22: Mudança média anual em elevação para as geleiras N2-B1 a N2-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas)

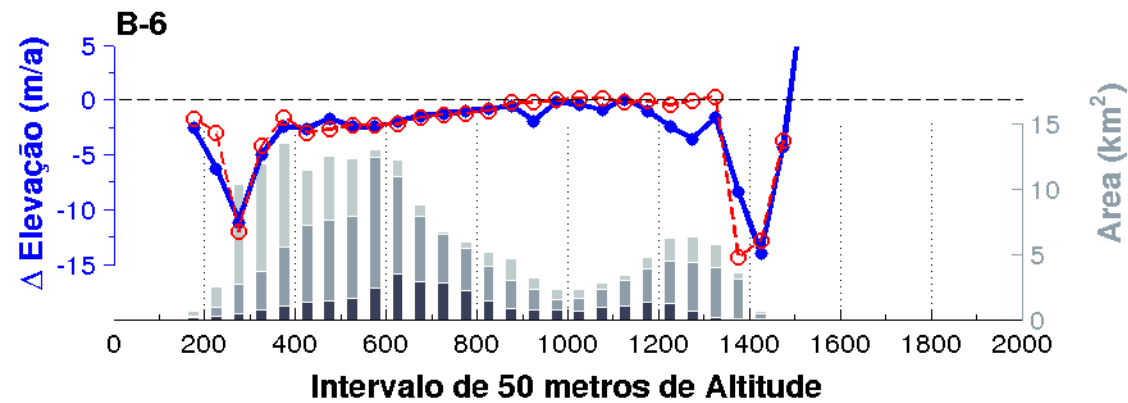


Figura 23: Mudança média anual em elevação para a geleira N2-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 7: Variação em volume total de gelo na região N2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 15 de novembro de 2001 e 15 de novembro de 2005.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias			
	6	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1		-0,61	±0,23	-169,30	7,19	-4,18 ±2,13		40,5	44%	17%
B2		-0,71	±0,57	-196,37	10,24	-4,48 ±0,81		43,8	54%	18%
B3		-0,75	±0,38	-208,86	3,85	-5,51 ±1,54		37,9	77%	26%
B4		-1,79	±1,36	-497,80	26,19	-3,52 ±0,98		141,6	60%	9%
B5		-1,07	±1,19	-290,03	8,81	-2,13 ±1,32		135,9	59%	18%
B6		-1,08	±1,85	-297,51	13,37	-1,65 ±1,07		180,4	63%	16%
TOTAL		-6,01	±5,58	-1659,87	69,63			580,0	59%	18%

Um menor valor de Bn específico da N2-B6 são compensados pela sua maior área, sendo a contribuição em massa para o oceano equivalente ao da Geleira Russel (N2-B5), aproximadamente 1 Gt. A Geleira Victory (N2-B4) apresenta um valor maior de Bn específico comparado as duas últimas geleiras. Isso pode ser justificado pela diferença hipsométrica destas geleiras: a Geleira Victory apresenta uma conformação em que seu fluxo é drenado para uma pequena área na porção de menor elevação.

Para as estimativas apresentadas na tabela 7, os valores dos intervalos em 175 e 325 m de altitude da Geleira Victory (N2-B4), foi realizado preenchimento por interpolação linear com base no valor anterior e posterior ao intervalo. Para os intervalos iniciais não-confiáveis da bacia N2-B6, foi utilizado o valor de mudança média de elevação do intervalo a 475 m de altitude.

4.1.3 Área N3

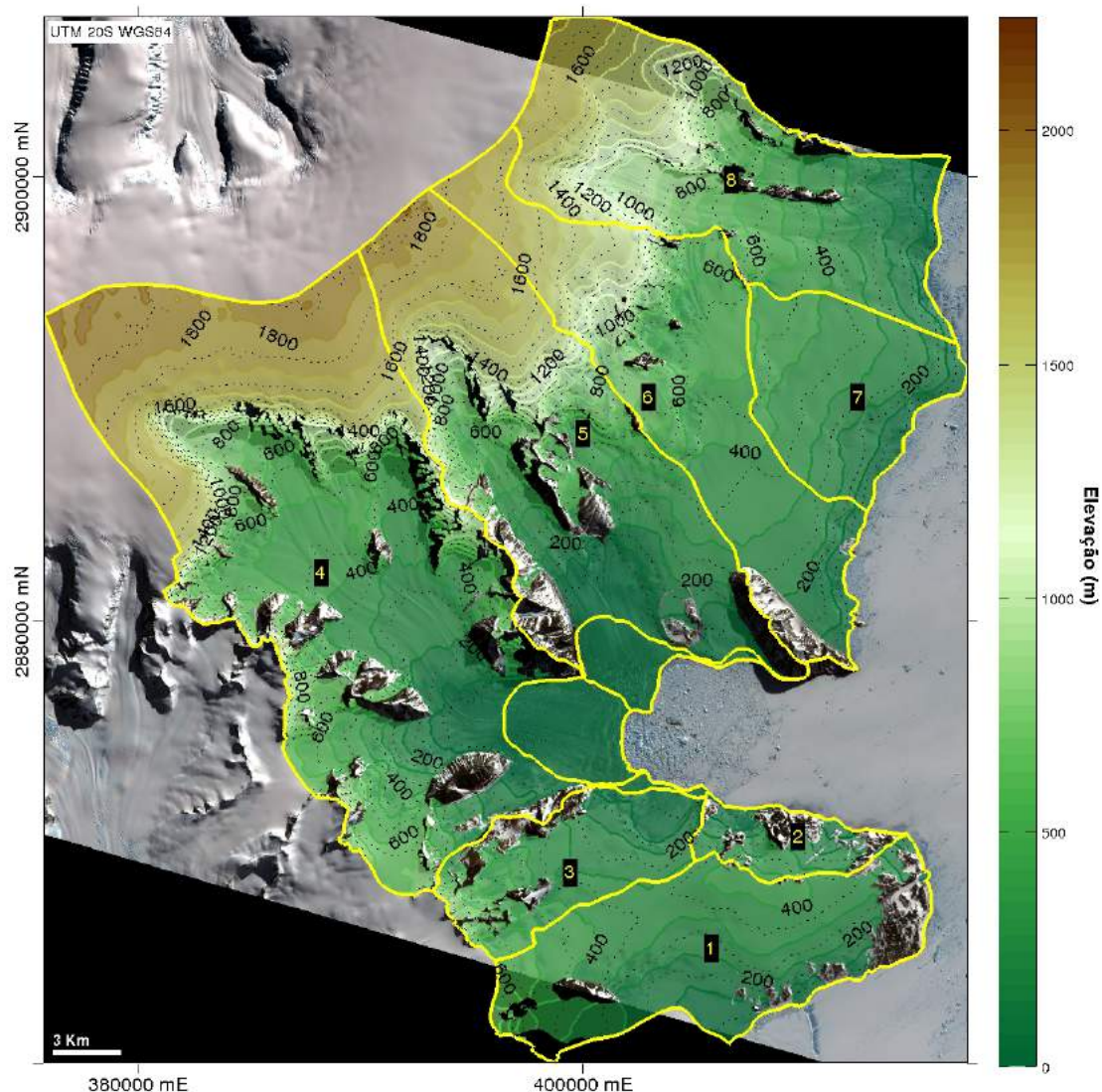


Figura 24: Representação das geleiras analisadas na área N3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001. Os números 1 a 8 correspondem as geleiras N3-B1 a N3-B8 mencionadas no texto.

A terceira área compreende oito geleiras, referidas como N2-B1 a N2-B8. As geleiras N2-B2 a N2-B7 apresentam 100% de sua extensão representada pelos MDEs, enquanto as geleiras N2-B1 e N2-B8 tiveram uma parte da região mais alta não compreendidas pelo MDEs da área N3 (figura 24). As imagens utilizadas para a análise desta área foram adquiridas em 26 setembro de 2001 e 15 novembro de 2005, com um intervalo temporal de 4,17 anos. Dentre as geleiras representadas são nomeadas as geleiras Sjögren (N2-B4), Boydell (N2-B5) e Diplock (N2-B8). Destas destacam-se as Geleiras Sjögren e Boydell, por apresentarem estudos realizados sobre sua dinâmica, variação da frente de geleira, e estimativas de velocidade de fluxo (PRITCHARD *et al.*, 2009; SILVA, 2012).

A figura 25 apresenta a variação espacial da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de mudança de elevação média por intervalos de altitude. Nota-se os valores negativos de mudança em elevação principalmente nas áreas de vale das geleiras. Os valores positivos se restringem as regiões altas do platô e algumas porções cobertas com neve fresca nas geleiras N2-B1 e N3-B6.

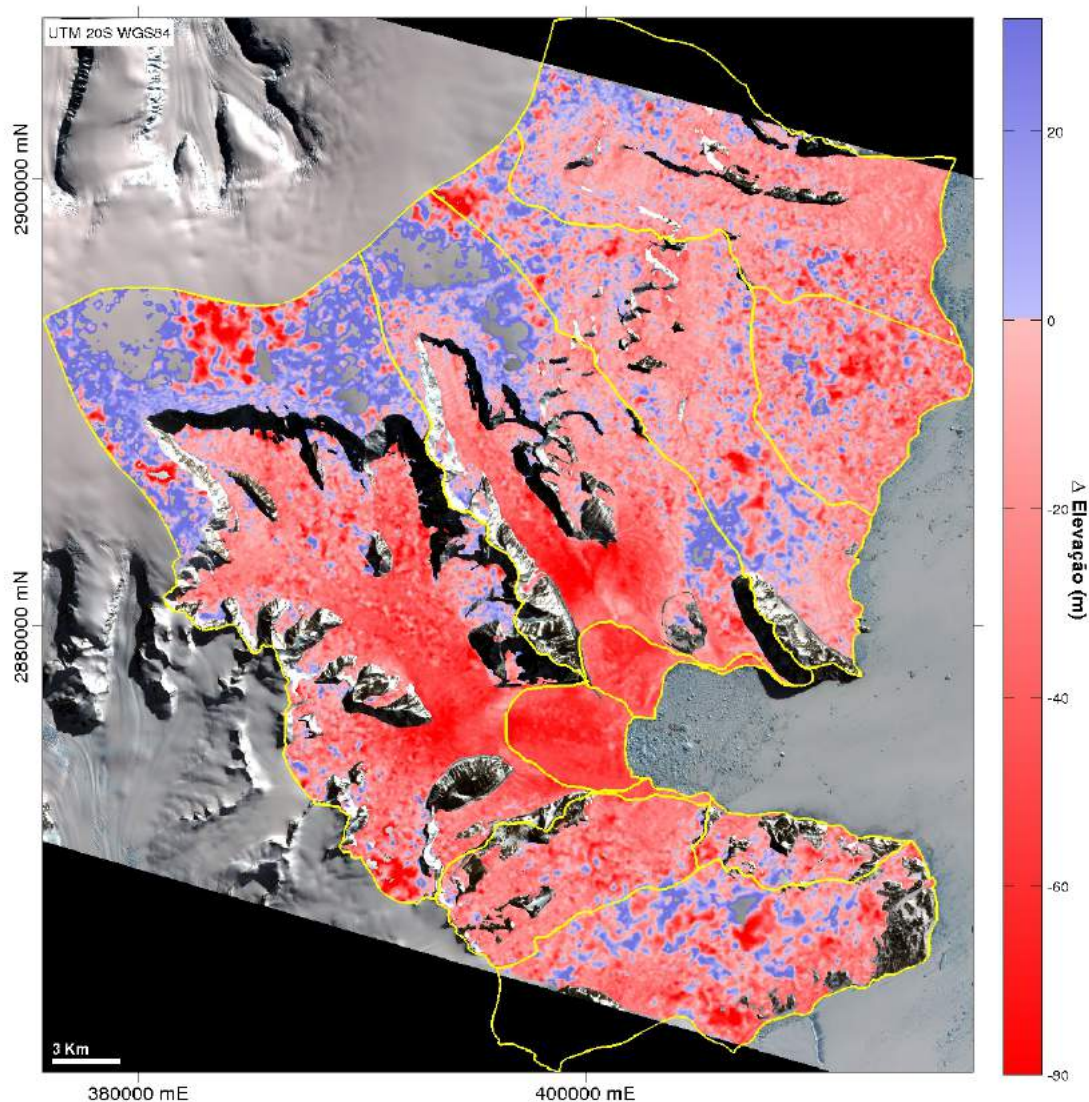


Figura 25: Diferença de elevação em N3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/11/2005 e 26/09/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

As estimativas de mudanças médias de elevação mostram mudança negativa para todas as geleiras, apresentando valores positivos apenas sobre o platô das geleiras Sjögren, Boydell e Diplock, mostrado na figura 26.

Para uma área total de 932 km², obteve-se uma estimativa de perda de

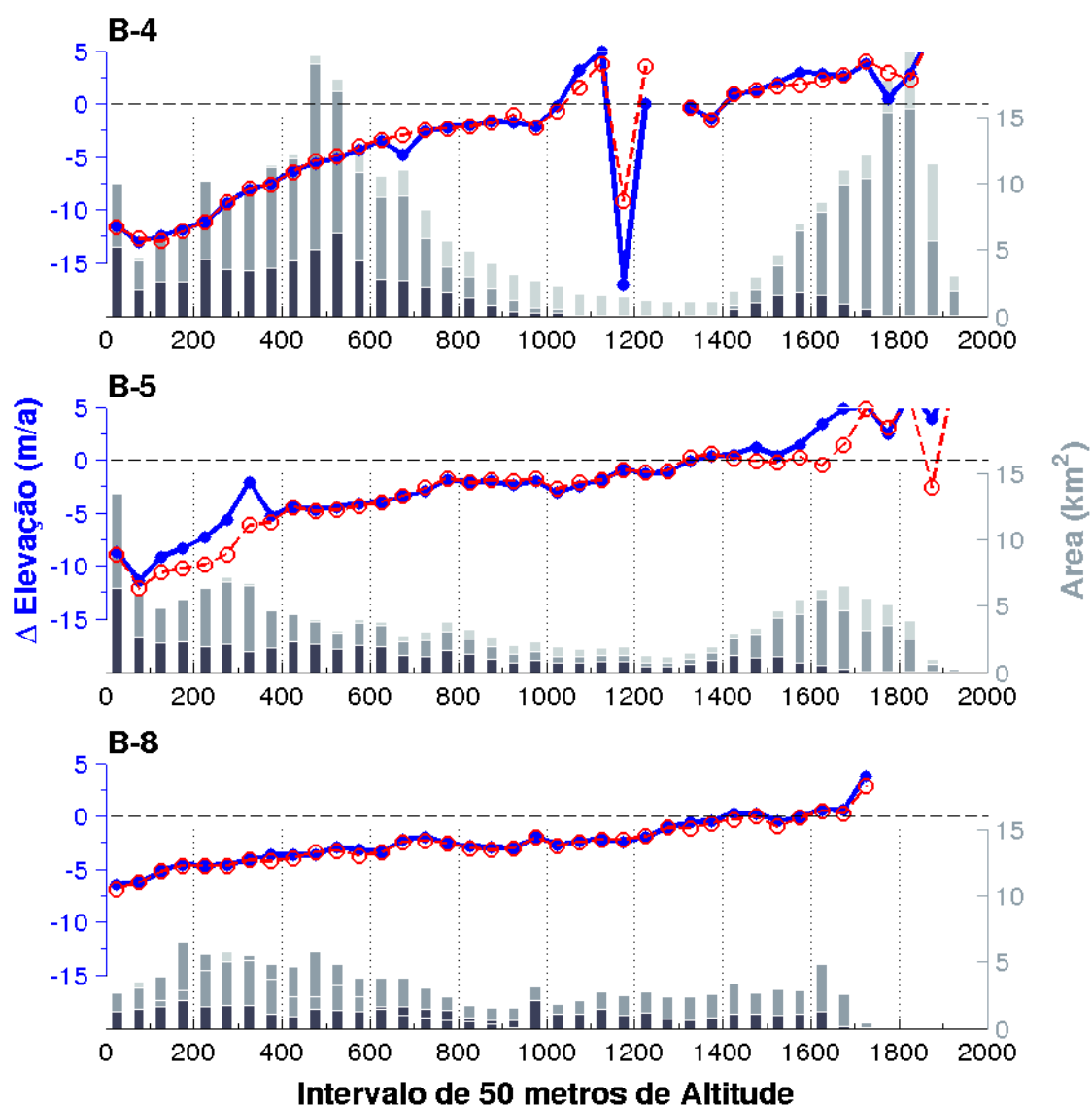


Figura 26: Mudança média anual em elevação para as geleiras N3-B4, N3-B5 e N3-B8 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

massa de $12,39 \pm 6,43$ Gt para o período de 26 setembro de 2001 a 15 novembro de 2005. Para o mesmo período, estimou-se um balanço de massa entre -1012 e $-49 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$, sendo estimado um balanço de massa específico entre $-4,61$ e $-2,61 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 90% da área total, e 24% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na Tabela 8.

As geleiras das áreas N3 foram as que apresentaram os menores valores para Bn específico do setor Norte. As maiores contribuições em massa para os oceanos foram das geleiras Sjögren (N3-B4) e Boydell (N3-B5), 50% do valor total.

Tabela 8: Variação em volume total de gelo na região N3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 26 setembro de 2001 e 15 novembro de 2005.

Bacias	Perda de massa (Gt)			Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias		
	8	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km^2)	%MDE	%MDE_f
B1		-1,45	$\pm 1,04$	-390,30	8,27	-4,09	$\pm 1,40$	95,52	85%	12%
B2		-0,18	$\pm 0,16$	-49,31	2,08	-3,41	$\pm 1,17$	14,44	131%	34%
B3		-0,95	$\pm 0,43$	-254,30	3,87	-5,63	$\pm 0,58$	45,16	115%	33%
B4		-4,05	$\pm 2,18$	-1087,05	7,10	-3,74	$\pm 4,10$	290,87	57%	20%
B5		-2,19	$\pm 1,47$	-588,08	4,92	-3,87	$\pm 3,58$	152,09	68%	28%
B6		-1,02	$\pm 0,98$	-272,81	9,07	-2,15	$\pm 1,05$	126,69	76%	22%
B7		-0,95	$\pm 0,72$	-255,40	8,67	-4,03	$\pm 1,03$	63,43	98%	13%
B8		-1,40	$\pm 0,91$	-375,16	5,45	-2,62	$\pm 1,63$	143,37	69%	25%
TOTAL		-12,19	$\pm 7,89$	-3272,4	49,4			931,6	87%	23%

As geleiras N3-B3 a N3-B5 apresentaram grande perda de gelo em sua frente no período de 1995-1999, com consequente duplicação da sua velocidade de fluxo (DE ANGELIS; SKVARCA, 2003). Pritchard *et al.* (2010), afirmam forte sinal de perda em elevação devido aos processos de desintegração das frentes da geleira que foram propagados até altas altitudes. Os valores de mudanças médias anuais de elevação encontradas por estes autores estão de acordo com os apresentados no gráfico N3-B4 da figura 26. Os autores apresentam um valor de $-7,5 \text{ m a}^{-1}$ a aproximadamente 400 m de altitude (Fig.3^a), sobre um perfil de passagem do sensor altímetro ICESat. Apesar da incerteza quanto à exatidão das estimativas de mudança de elevação para as regiões do platô, há indicação de um sinal de mudança positiva nestas regiões.

As geleiras Sjögren e Boydell apresentaram contínuo recuo de sua frente no trabalho de Ferrigno *et al.* (2006). Neste trabalho, uma perda de $36,97 \text{ km}^2$ foi constada para o mesmo período desta área, incluindo perda de frente da bacia N2-B3. A Geleira Diplock (B8), que também apresenta características de geleira de descarga, não apresentou variação de frente de geleira. As Geleiras N2-B1, N2-B2 e N2-B7 apresentaram características de Geleiras de Piemonte e também um alto sinal de Bn específico. Os valores de desvio padrão variaram em torno de 15 m, permanecendo na faixa de precisão vertical do AsterDTM. Para a Geleira Boydell (N2-B5) foram observados altos valores de desvio padrão nos intervalos até os 200 m de altitude, possivelmente explicado pela dispersão dos pontos neste intervalo, que pode ser observada nos histogramas. Apesar disso, estas estimativas não foram desconsideradas pois apresentam alto valor médio de correlação dos pixels.

A causa para esta dispersão heterogênea é provavelmente a presença de dois canais de descarga glacial distintas. Isto torna-se claro na imagem em que os valores de mudança em elevação dos pixels são representados, antes da extração de médias por intervalos (Figura 25). Essa distinção de duas frentes e portanto, dois regimes de fluxo de geleira, seria o motivo de valores estimados com maior variância.

4.2 Setor Larsen A

Este setor envolve a região de antiga Plataforma de Gelo Larsen A, a qual sofreu grande desintegração em 1995 e hoje conta apenas com 10% de sua antiga área (COOK; VAUGHAN, 2010). Os resultados são apresentados para duas áreas, uma ao norte (LA1) e outra mais ao sul (LA2). No total este setor cobriu aproximadamente 2400 km² incluindo 11 bacias de drenagem glacial, duas delas desconsideradas na área LA2.

4.2.1 Área LA1

A área LA1 compreende a porção mais ao norte da antiga Larsen A, denominada também Costa de Nordenskjöld. Este par compreendeu três bacias de drenagem glacial com área superior a 100 km² e outras três menores de até 50 km², referidas como LA1-B1 a LA1-B6 (figura 27). As imagens utilizadas para a análise desta área foram adquiridas em 02 de outubro de 2003 e 18 de novembro 2006, com intervalo de 3,08 anos entre as aquisições. As três bacias menores localizam-se na Península Sobral e não compreendem nenhuma geleira nomeada. Esta península divide a costa formando uma enseada ao norte, Enseada Larsen, onde ocorre a descarga das geleiras das bacias 5 e 6. A bacia LA1-B5 compreende as Geleiras Albone e Pyke (da esquerda para a direita, respectivamente, na Figura 27). A bacia LA1-B6 compreende as Geleiras Polaris e Eliason. A oeste, a bacia LA1-B1 compreende as geleiras Dinsmoor, Bombardier e Edgeworth, de oeste para leste respectivamente.

A figura 28 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros, anteriormente aos cálculos de m.m.a.e. média em intervalos de altitude. Os valores mais negativos de mudança de elevação foram observados para a Geleira Edgeworth.

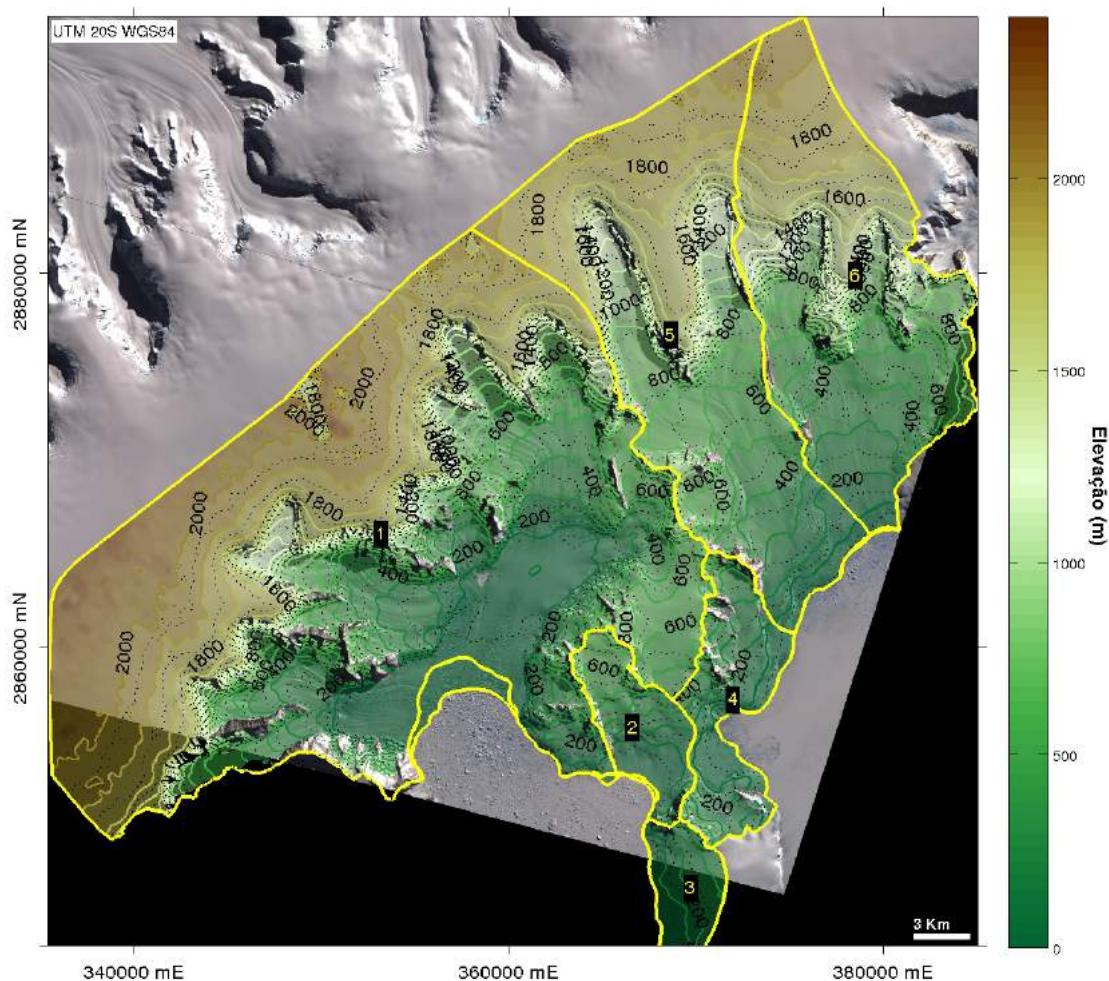


Figura 27: Representação das geleiras analisadas na área LA1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 02/10/2003. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LA1-B1 a LA1-B6 mencionadas no texto.

A figura 29 ilustra os gráficos para mudança média anual das quatro maiores geleiras da área LA1 (*i.e.* LA1-B1, LA1-B4, LA1-B5 e LA1-B6). Os gráficos das duas menores geleiras também apresentam valores negativos para as mudanças em elevação, e podem ser conferidos em material anexo. A figura 29 demonstra altos valores de perda em elevação, que decrescem com o ganho de elevação. Próximo ao platô, os valores chegam próximos de zero. Como início do platô foram consideradas as altitudes de 1400 m para a bacia 1 e 1600 m para as bacias LA1-B5 e LA1-B6. Os valores mais positivos nos dois primeiros intervalos de altitude na bacia LA1-B1 antecedem valores mais negativos, sugerindo uma retração da linha de encaixe para as três geleiras que compõem esta bacia. Uma vez não ancorado, o gelo desta porção irá responder de maneira hidrostática, aumentando a elevação. Este mesmo processo foi percebido por Shuman *et al.* (2011).

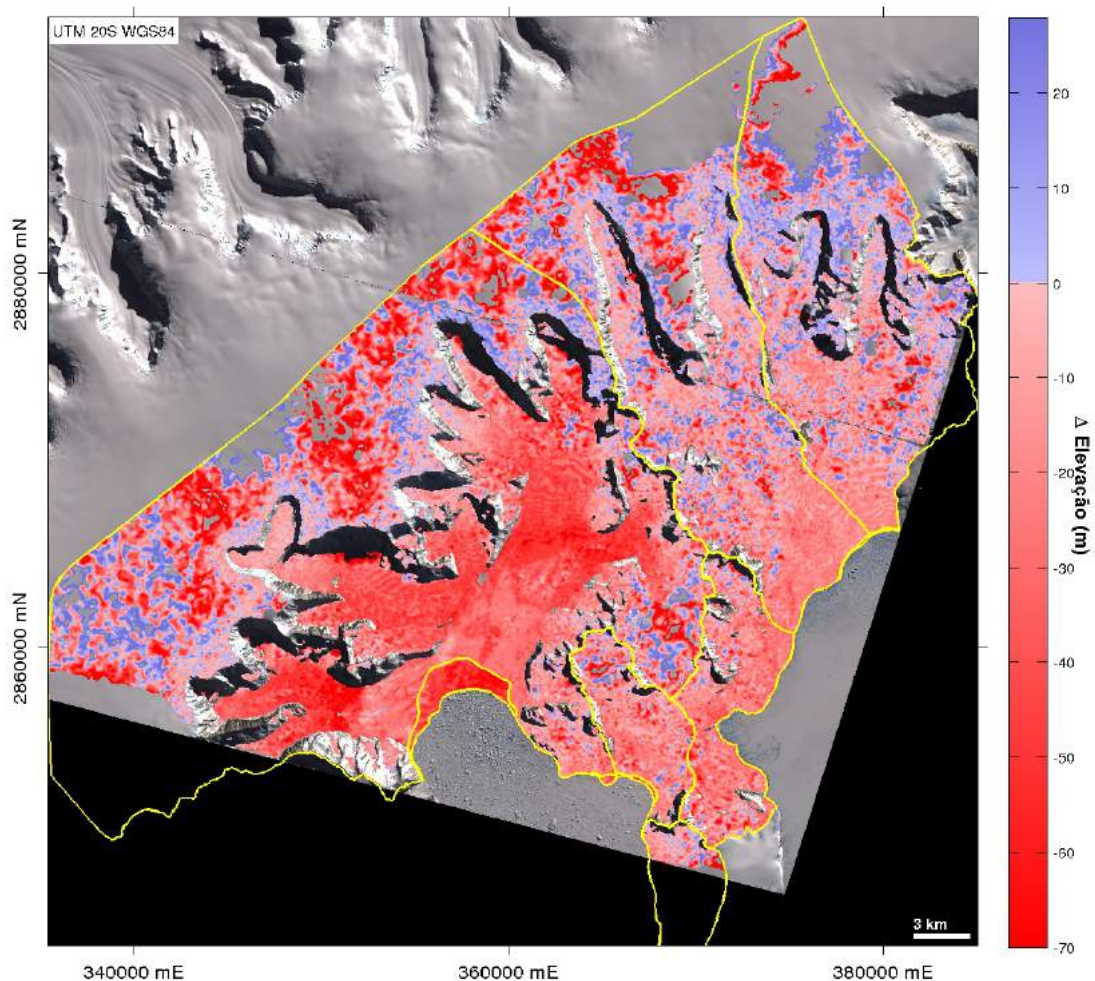


Figura 28: Diferença de elevação em LA1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 18/11/2006 e 02/10/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

Para uma área total de 1080 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $11,2 \pm 7,4$ Gt para o período de 02 de outubro de 2003 e 18 de novembro 2006. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -2655 e $-59 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹, sendo estimado um balanço de massa específico entre $-6,86$ e $-1,34$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 64% da área total, e 27% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na Tabela 9.

Das três bacias que incluem geleiras de descarga (bacias LA1-B1, LA1-B5 e LA1-B6), a bacia LA1-B1 apresenta menor valor de Bn específico e também a maior perda de massa. As geleiras LA1-B2 a LA1-B4 apresentam hipsometria diferente das demais geleiras e apresentam altos valores de Bn específico. Isto ocorre da mesma maneira nas geleiras N3-B1 e N3-B7, porém o motivo não é claro. Uma hipótese seria a ausência de uma grande área, como o platô nas demais

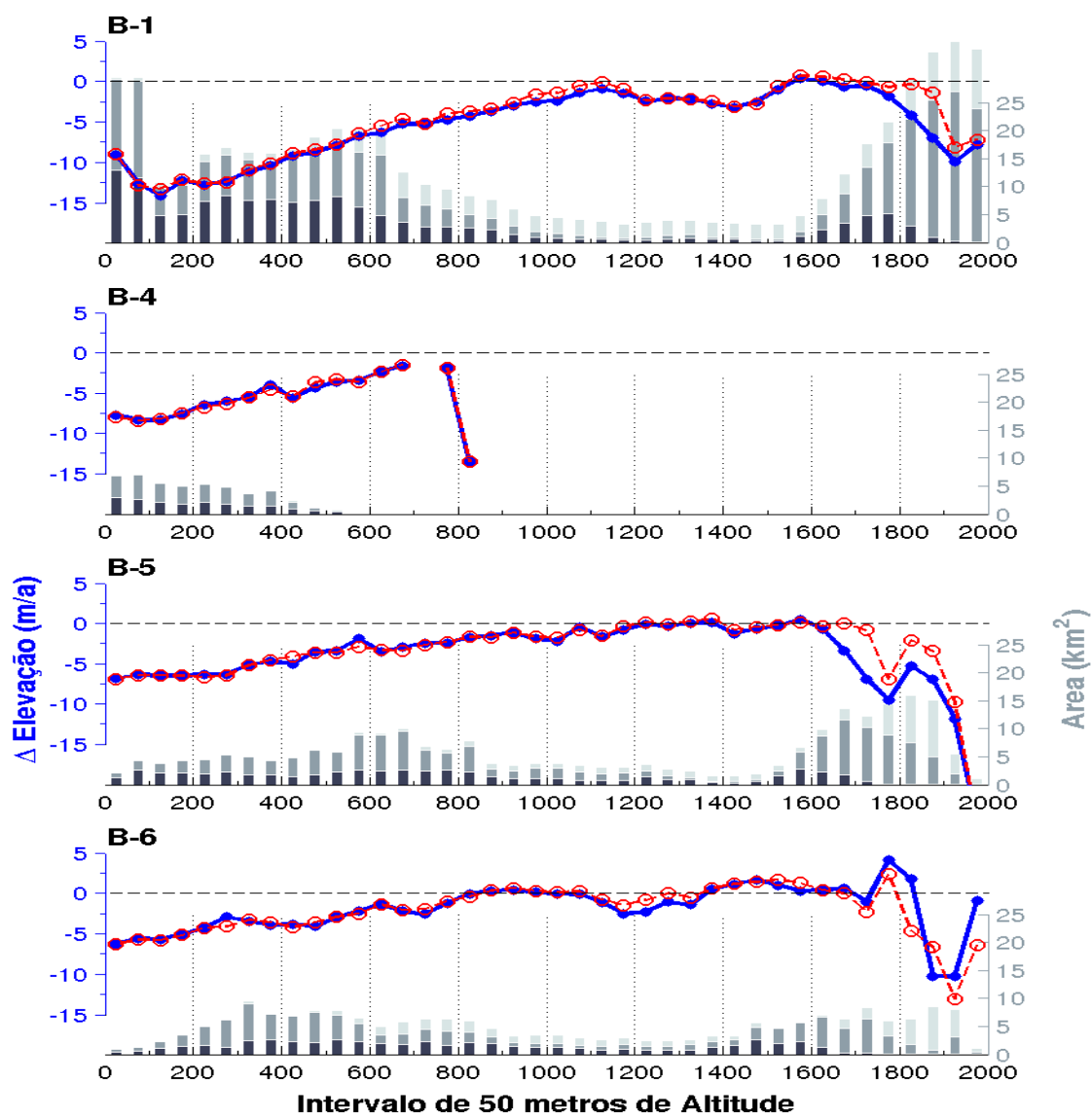


Figura 29: Mudança média anual em elevação para as geleiras LAS1-B1, LA1-B4 e LA1-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

geleiras, que supre em parte a massa perdida pelas regiões mais baixas.

O motivo do alto valor de B_n para a geleira LA1-B1 está novamente relacionado aos processos de desintegração da Plataforma de Gelo Larsen A e retração da frente de gelo. A Plataforma de Gelo Larsen A permaneceu estável até os anos 80s, quando começou a retrair-se (COOK; VAUGHAN, 2010). As mudanças na linha de costa demonstram que a desintegração ocorreu primeiro na Enseada Larsen (1989) e cerca de seis anos depois no restante da costa (1995) (FERRIGNO *et al.*, 2006). Este pode ser um dos motivos pelo qual o B_n específico para as bacias com descarga na Enseada Larsen são até três vezes menores do que para a bacia

Tabela 9: Variação em volume total de gelo na região LA1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 02 de outubro de 2003 e 18 de novembro 2006.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)			
	6	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B1		-7,48	±3,88	-2655,28	12,58	-4,91	±4,85	540,32	49%	22%
B2		-0,51	±0,35	-180,77	3,55	-5,55	±1,33	32,56	92%	40%
B3		-0,17	±0,19	-59,60	5,09	-2,79	±1,26	21,36	28%	13%
B4		-0,94	±0,43	-333,16	4,28	-6,86	±1,43	48,55	100%	37%
B5		-1,24	±1,35	-436,34	8,17	-1,84	±2,39	237,29	56%	22%
B6		-0,85	±1,18	-268,26	8,20	-1,34	±2,13	200,08	61%	25%
TOTAL		-11,19	±7,39	-3933,4	41,9			1080,2	64%	27%

LA1-B1. Pelo fato da desintegração ter ocorrido há um tempo maior nesta enseada, estas geleiras vêm respondendo há mais tempo a esta perturbação em seu equilíbrio; com o tempo o sinal de perda de massa decresce, à medida que a geleira se aproxima de um novo estado de equilíbrio. Outro motivo para a a bacia LA1-B1 apresentar um maior valor de Bn específico poderia estar relacionado a eventos de *surge*⁸ que ocorreram antes de 2000 (DE ANGELIS; SKVARCA, 2003). Estes autores ainda encontraram velocidade de fluxo na Geleira Edgeworth de mesma ordem encontrada para Sjögren, 2,4 m dia⁻¹.

4.2.2 Área LA2

A segunda área compreende o sul da antiga plataforma de gelo Larsen A. As imagens utilizadas para a análise desta área foram adquiridas em 22 de novembro de 2001 e de 2 de fevereiro de 2003, intervalo de 1,25 anos. Esta área é representada predominantemente pela Geleira Drygalski (LA2-B2) (figura 30). As bacias LA2-B3, LA2-B4 e LA2-B5 têm sua descarga para a plataforma de gelo que liga o Cabo Fairweather e a Ilha Tobertson, remanescente entre antiga Larsen A e Larsen B. Estas foram parcialmente compreendidas pelas imagens devido ao limite dos MDEs, sendo as bacias LA2-B1 e LA2-B3 desconsideradas devido à baixa confiabilidade e poucos valores estimados.

A figura 31 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. média em intervalos de altitude. Visualmente, nota-se uma maior quantidade de valores de mudança de elevação negativos. Porém, valores positivos também ocorrem na imagem. Como o

8 "Aceleração abrupta do fluxo de uma geleira, acompanhado pelo avanço rápido e brusco (alguns quilômetros) do término." (SIMÕES, 2004).

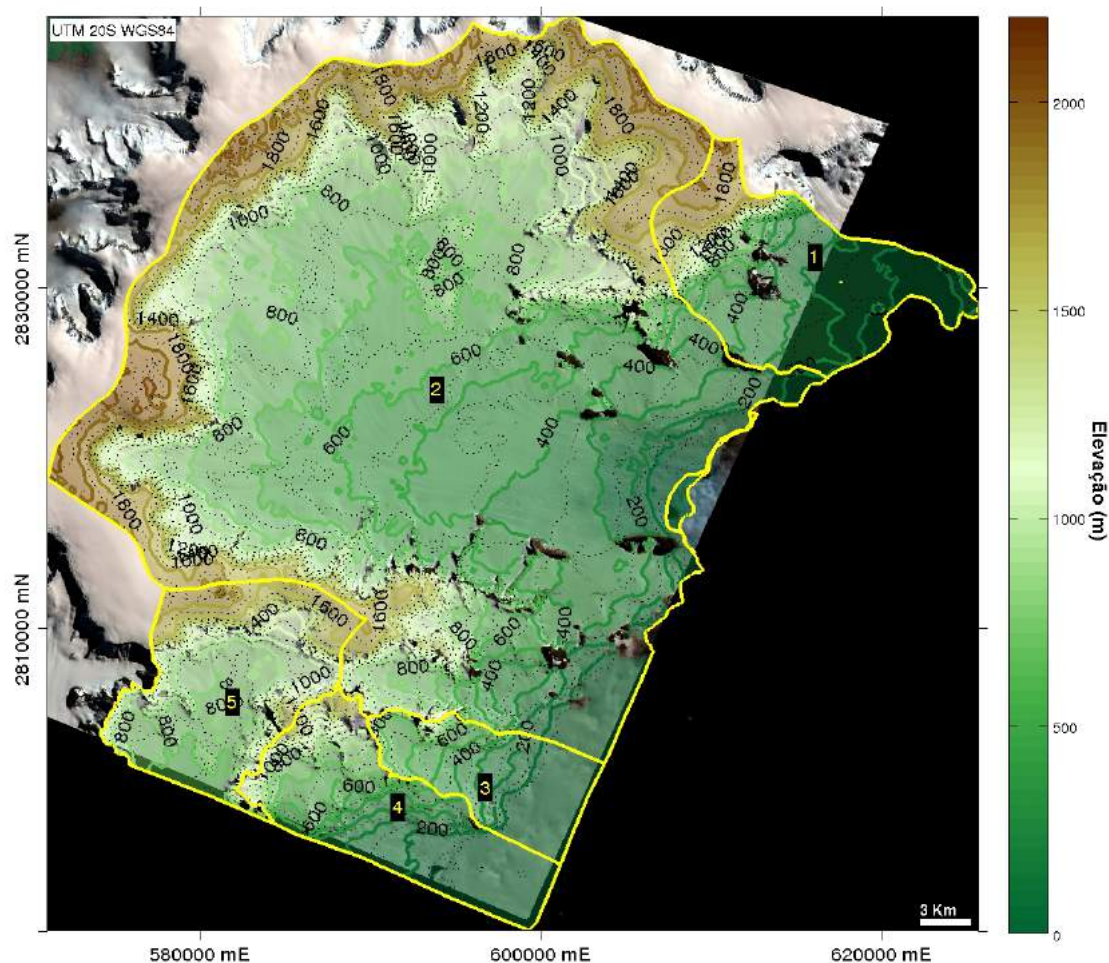


Figura 30: Representação das geleiras analisadas na área LA2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 02/02/2003. Os números 1 a 5 correspondem as geleiras LA2-B1 a LA2-B5 mencionadas no texto.

intervalo temporal entre os dois modelos analisados é curto, em locais em que as mudanças anuais em elevação são baixas estes valores ficam próximo da acurácia do método, atribuindo um maior desvio padrão. Ainda assim, optou-se pela análise deste par, por ser o único que abrangeste 100% a geleira Drygalski. Mesmo que a presença de nuvens próximo à costa na imagem de 2003 tenha inviabilizando alguns valores de m.m.a.e., uma sobre-estimativa (valores mais positivos) pode ser esperada caso haja alguma influência destes pixels após exclusão dos valores discrepantes.

A figura 32 ilustra os gráficos das mudanças médias anuais de elevação para as geleiras LA2-B2, LA2-B4 e LA2-B5. Apesar do curto intervalo temporal entre os MDE analisados, os valores de mudanças de elevação para as Geleiras Drygalski apresentaram-se condizentes aos encontrados por Shuman *et al.* (2011). Os altos valores nos primeiros intervalos de altitude é devido à presença de nuvem na imagem de 2003.

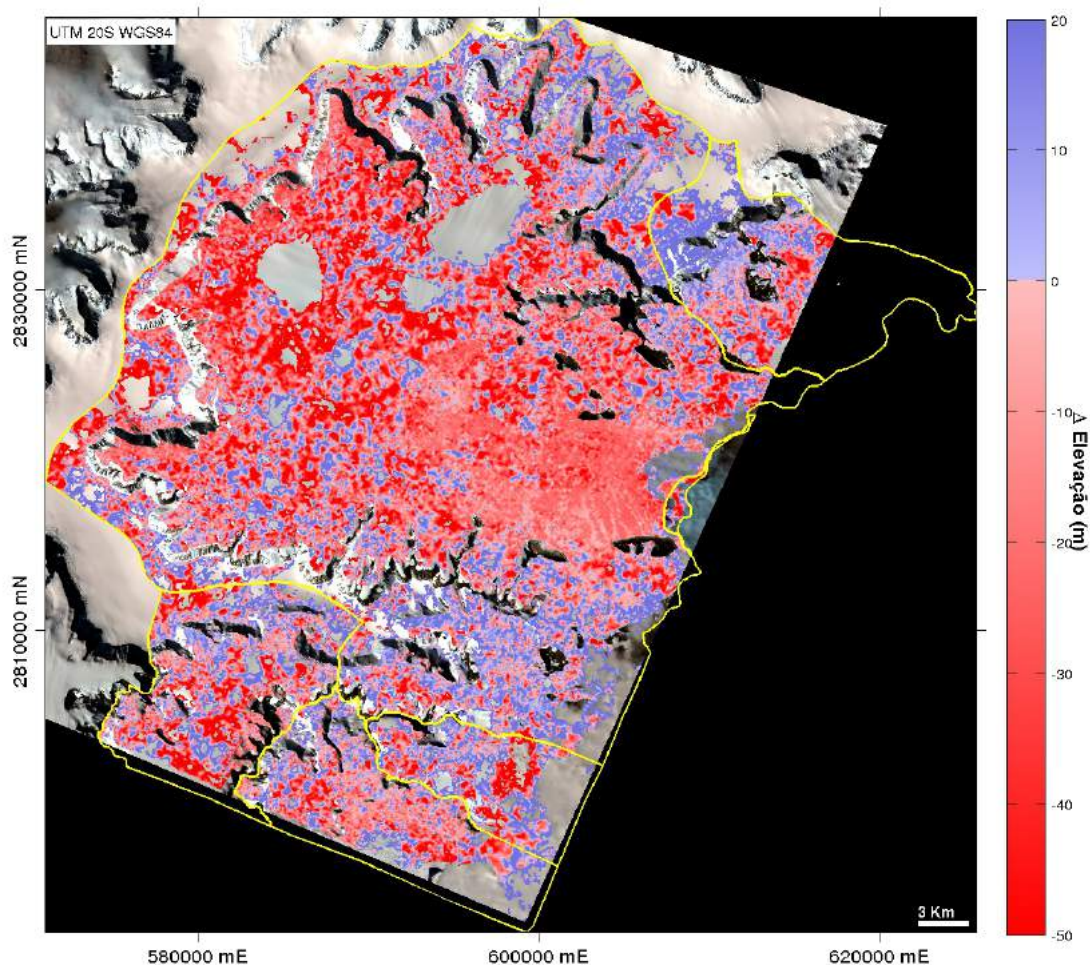


Figura 31: Diferença de elevação em LA2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 02/02/2003 e 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

Para uma área total de 1314 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $10,52 \pm 15,79$ Gt para o período de 22 de novembro de 2001 e de 2 de fevereiro de 2003. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -9725 e $-435 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹, sendo estimado um balanço de massa específico entre $-7,88$ e $-3,73$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 58% da área total, e 16% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% em ambos MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentada na tabela 10.

Shuman *et al.* (2011) estimaram uma perda de volume de 15,4 km³ (equivalente a 13,9 Gt) para a Geleira Drygalski. Comparando estes valores em massa/ano, 7,4 Gt a⁻¹ para este trabalho e 2,8 Gt a⁻¹ há indício de que uma maior perda de massa ocorreu nos primeiros anos de 2000. As linhas de elevação sobre uma seção entre 600 e 700 metros de altitude na Figura 3 deste mesmo trabalho corroboram esta hipótese. Pode-se observar que as diferenças de elevação a partir

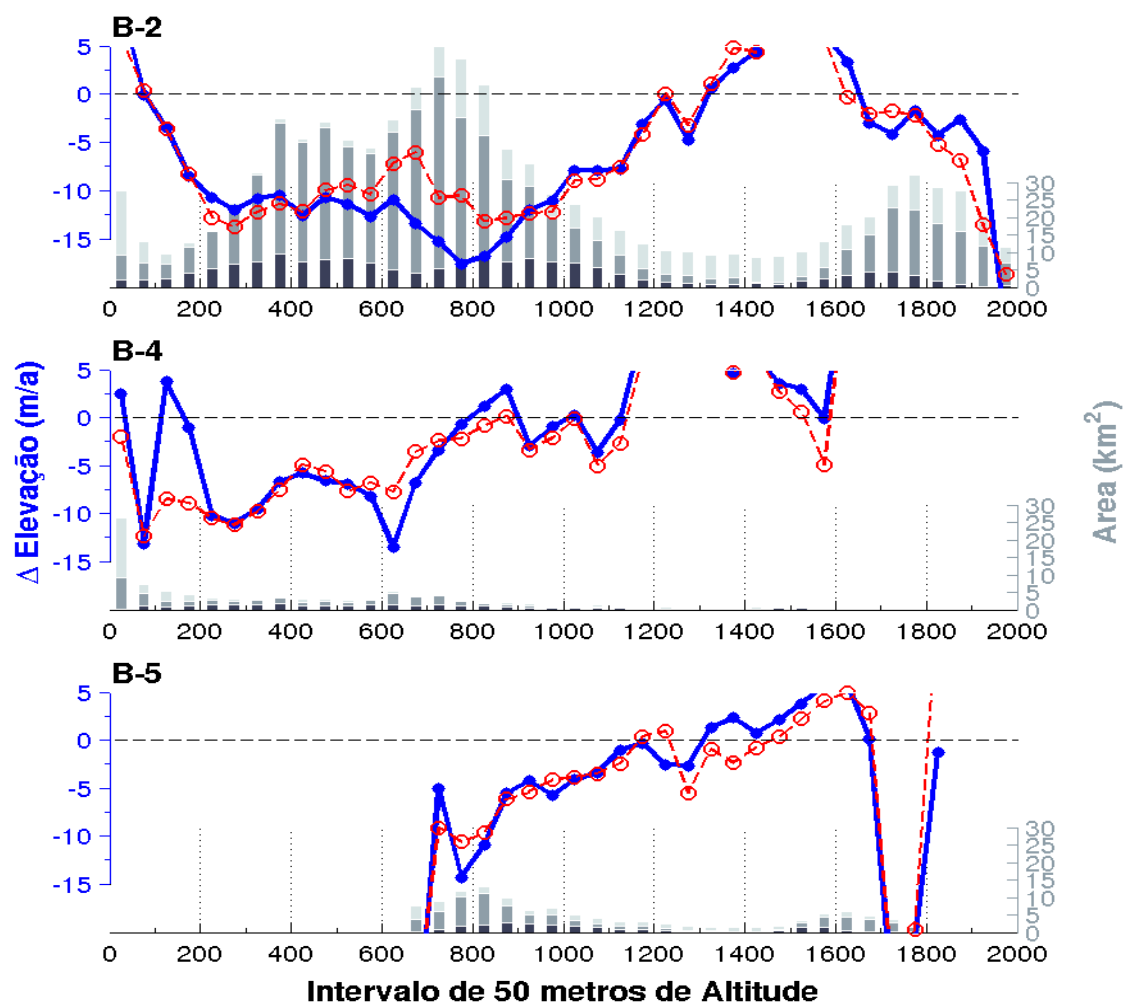


Figura 32: Mudança média anual em elevação para as geleiras LA2-B2, LA2-B4 e LA2-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 10: Variação em volume total de gelo na região LA2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 2001 e de 2 de fevereiro de 2003.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)		
	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B2	-9,34	$\pm 13,22$	-8629,62	86,13	-7,88 $\pm 3,70$		1094,56	66%	13%
B4	-0,71	$\pm 1,52$	-660,22	64,77	-6,41 $\pm 2,54$		102,99	56%	20%
B5	-0,47	$\pm 1,05$	-435,18	27,63	-3,73 $\pm 2,17$		116,53	53%	15%
TOTAL	-10,52	$\pm 15,79$	-9725,0	178,5			1314,1	58%	16%

de 2004 são menores quando comparadas com a maior diferença entre 2001 a 2004, aproximadamente 18 metros de diferença. Este valor de diferença de altitude é condizente com os valores médios de mudança média anual de elevação

encontrados nesta geleira no presente trabalho, por volta de -12 m a^{-1} nas regiões de baixa altitude.

As bacias LA2-B4 e LA2-B5 também apresentam um alto sinal de Bn específico, sendo o da bacia LA2-B4 quase tão alto quanto o da Drygalski. Porém, ambas não tiveram a totalidade de sua área analisadas. Para a bacia LA2-B5 obteve-se dados a partir dos 650 m de altitude, porém foram considerados apenas a partir dos 950 m. O valor deste intervalo foi então utilizado para as estimativas das áreas mais baixas.

Para cálculo das estimativas de Bn e perda de volume das bacias LA2-B2 e LA2-B4, foi utilizado o valor de mudança de elevação em 225 e 125 m de altitude respectivamente para os intervalos iniciais desconsiderados. Foram consideradas ainda as estimativas até os 1300 m, antes da região do platô, limite de altitude considerado também por Shuman *et al.* (2011).

O pequeno polígono na frente da Geleira Drygalski (figura 31) representa área de perda entre o período analisado e corresponde a uma área de $4,26 \text{ km}^2$ de frente de geleira.

4.3 Setor Larsen B

Este setor aborda as geleiras com descarga para região da antiga Plataforma de Gelo Larsen B (Área LB1, Área LB2 e Área LB3), e para a porção remanescente denominada Plataforma de Gelo da Enseada SCAR (Área LB4). LB1 e LB2 abordam uma área semelhante, apresentadas separadamente para diferenciar os pares de MDEs utilizados para cada uma delas. O par de MDEs da LB1 foi escolhido com o objetivo de abranger uma maior área da Geleira Hektoría (B1). O segundo foi escolhido por abranger a Geleira Jorum. Além da diferença em área coberta os dois pares analisado diferem-se em período analisado. Em ambas utilizou-se MDEs com data final de 2010 e data final de 2002 e 2001 para a área LB1 e LB2, respectivamente.

4.3.1 Área LB1

As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010, com intervalo de 8,08 anos entre elas. Nesta estão incluídas as Geleiras: Hektoría (LB1-B1), Green (LB1-B2) e Evans (LB1-B3) (figura 33). A figura 34 apresenta espacialmente os valores da diferença

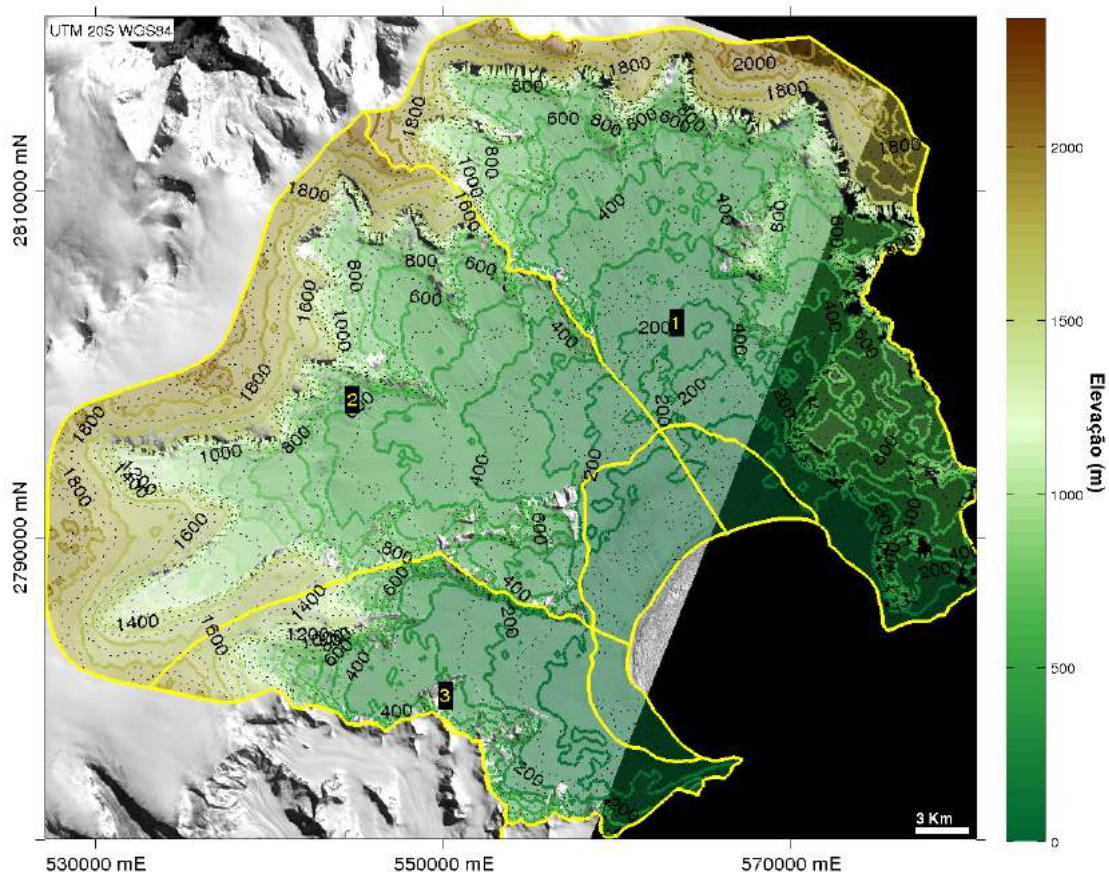


Figura 33: Representação das geleiras analisadas na área LB1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 mencionadas no texto.

de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de mudanças médias anuais de elevação por intervalos de altitude. Os valores mais intensos são encontrados para as Geleiras Hektoria e Green.

A figura 35 ilustra os gráficos das mudanças médias anuais de elevação para as três geleiras analisadas. Todas as geleiras apresentaram uma alta perda de elevação nos intervalos mais baixos de altitude. Para as três, a perda de elevação ocorre para todo o vale da geleira até atingir o início da região de escarpa (menores áreas), onde se aproxima de 0 m a⁻¹. Os maiores valores são encontrado nos primeiros 300 m de altitude para as geleiras Hektoria e Green, chegando à m.m.a.e. média da ordem de 20 m a⁻¹.

Para uma área total analisada de 1383,5 km², obteve-se uma estimativa de perda de massa de $58,04 \pm 20,67$ Gt para o período de 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -4883 e -1135 10⁶ m³ a⁻¹, sendo estimado um balanço de massa específico entre $-8,47$ e $-3,24$ m a⁻¹. Os pixes dos MDEs utilizados cobriram 55% da área total, e 10% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos

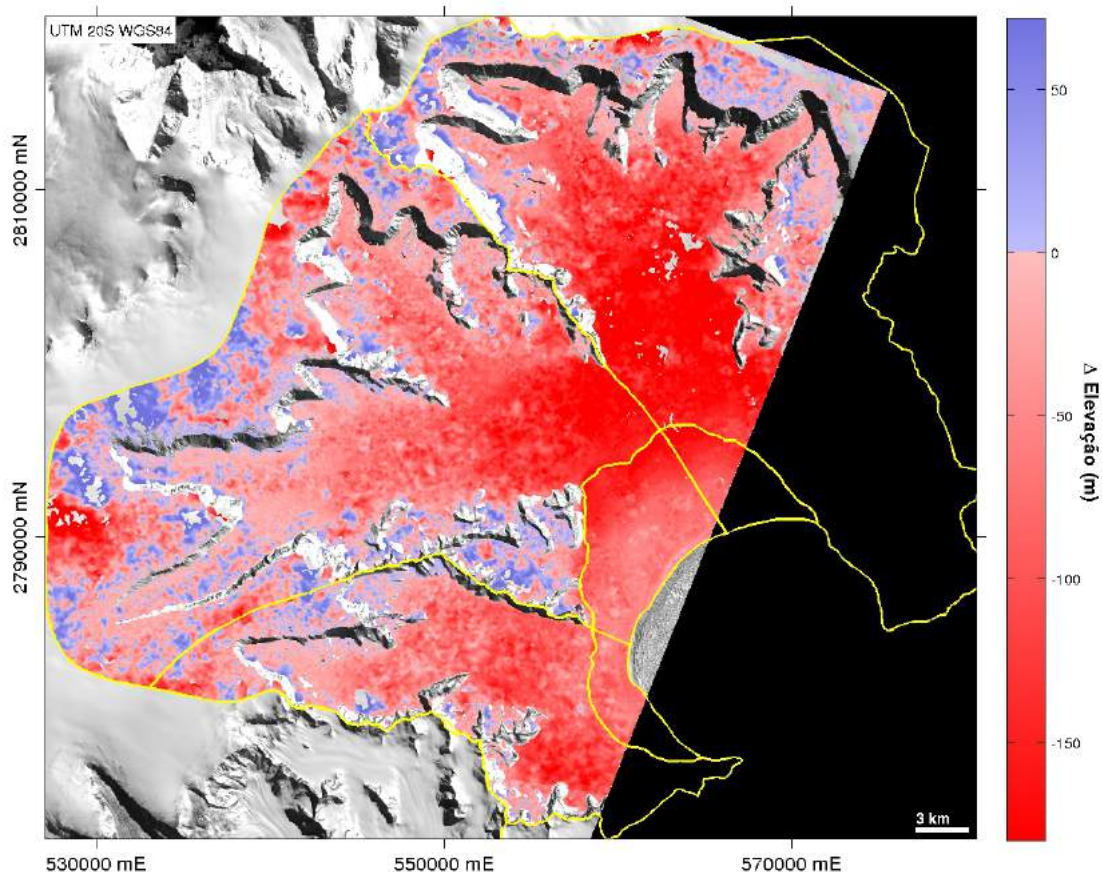


Figura 34: Diferença de elevação em LB1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na Tabela 11. O polígono na frente das três geleiras (figura 34) representa área de retração das frentes entre o período analisado e corresponde a uma área de 103,30 km².

Para as estimativas de perda de massa e Bn considerou-se o limite de 1250-1300 m de altitude como limite do vale das geleiras. Shuman *et al.* (2011) também consideraram estimativas de mudança em elevação até os 1300m de altitude, devido à falta de confiabilidade dos valores acima deste intervalo. A Geleira Hektoria apresentou o maior Bn e Bn específico. Somente ela contribuiu com mais de 50% da perda de massa estimada para esta área durante o período de análise. Um motivo provável seria a sua frente de geleira mais exposta ao ambiente marinho. Vale ressaltar que sua extensão não foi completamente compreendida na análise, mas apesar disso foi possível obter estimativas de mudança de elevação representativas de cada intervalo de altitude. A Geleira Green, apesar de aparentar uma ampla frente de geleira, tem seu principal fluxo afunilado por dois pontais rochosos, sendo o da esquerda o divisor entre esta e a Geleira Hektoria. Shuman *et al.* (2011) encontraram uma perda de volume para Geleira Hektoria+Green de 21,7

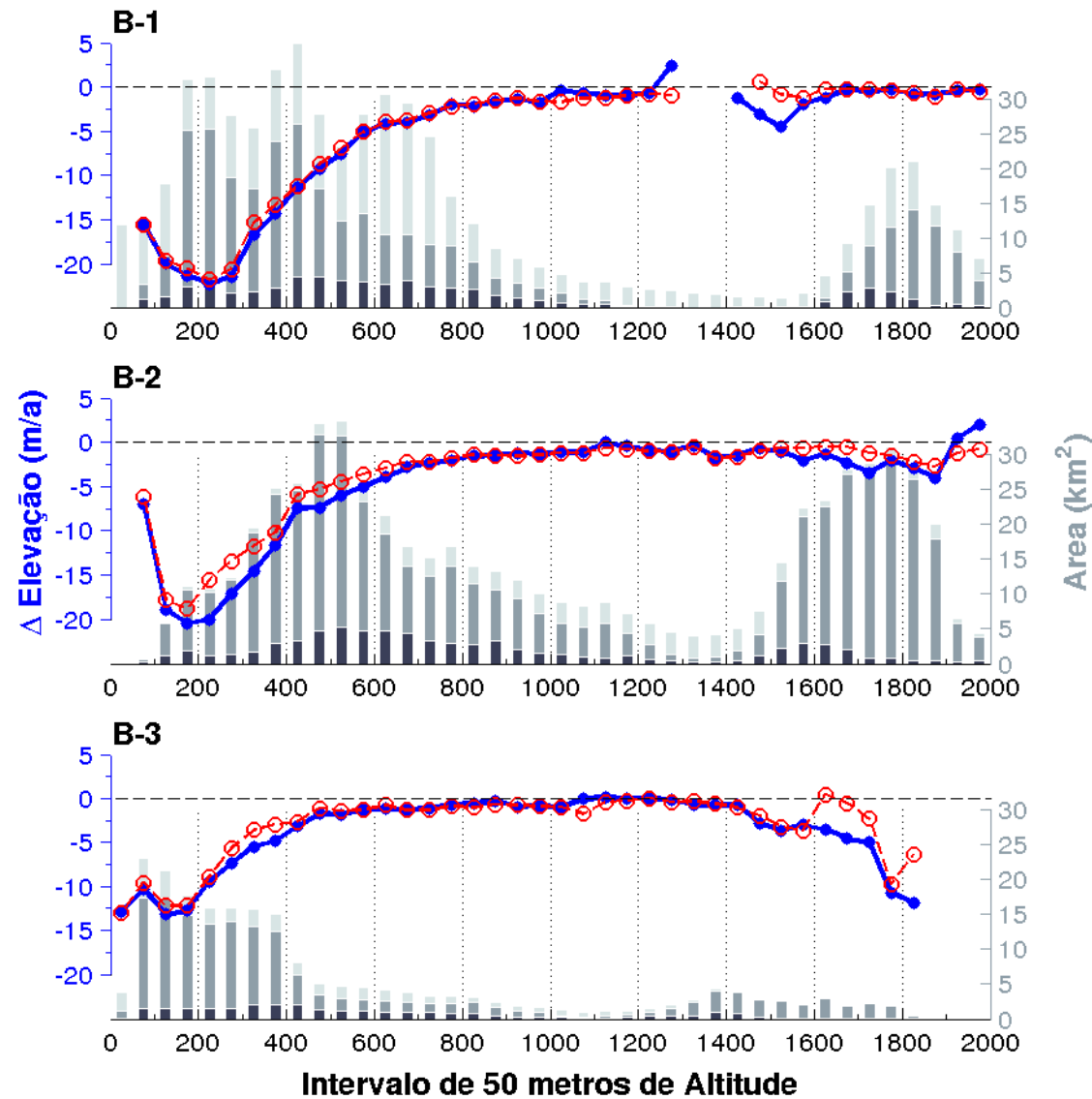


Figura 35: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 11: Variação em volume total de gelo na região LB1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)		
	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
LB1-B1	-35,64	±10,64	-4883,68	12,09	-8,47	±7,52	576,63	44%	9%
LB1-B2	-14,11	±10,03	-1932,67	9,52	-3,24	±5,23	595,63	54%	10%
LB1-B3	-8,29	±3,55	-1135,93	7,50	-5,38	±4,50	211,26	67%	11%
TOTAL	-58,04	±24,22	-7952,3	29,1			1383,5	55%	10%

e para a Evans de $8,9 \text{ km}^3$ para o período de 2001 a 2006. Estes valores em Gt a^{-1} equivalem a 3,9 e 1,6, respectivamente. Neste trabalho a estimativa em Gt a^{-1} foram de 6,06 e 1,04. Vale ressaltar que a área considerada por estes autores diferem das utilizadas nos cálculos do presente trabalho. Estas diferenças sugerem que o sinal de mudança em elevação das Geleiras Hektor e Green continuaram a aumentar após os anos 2006. Ainda, os autores consideraram o ano de 2001, precedente à desintegração da plataforma de gelo Larsen B, um ano com pouca mudança em elevação uma vez que as geleiras encontravam-se ancoradas.

4.3.2 Área LB2

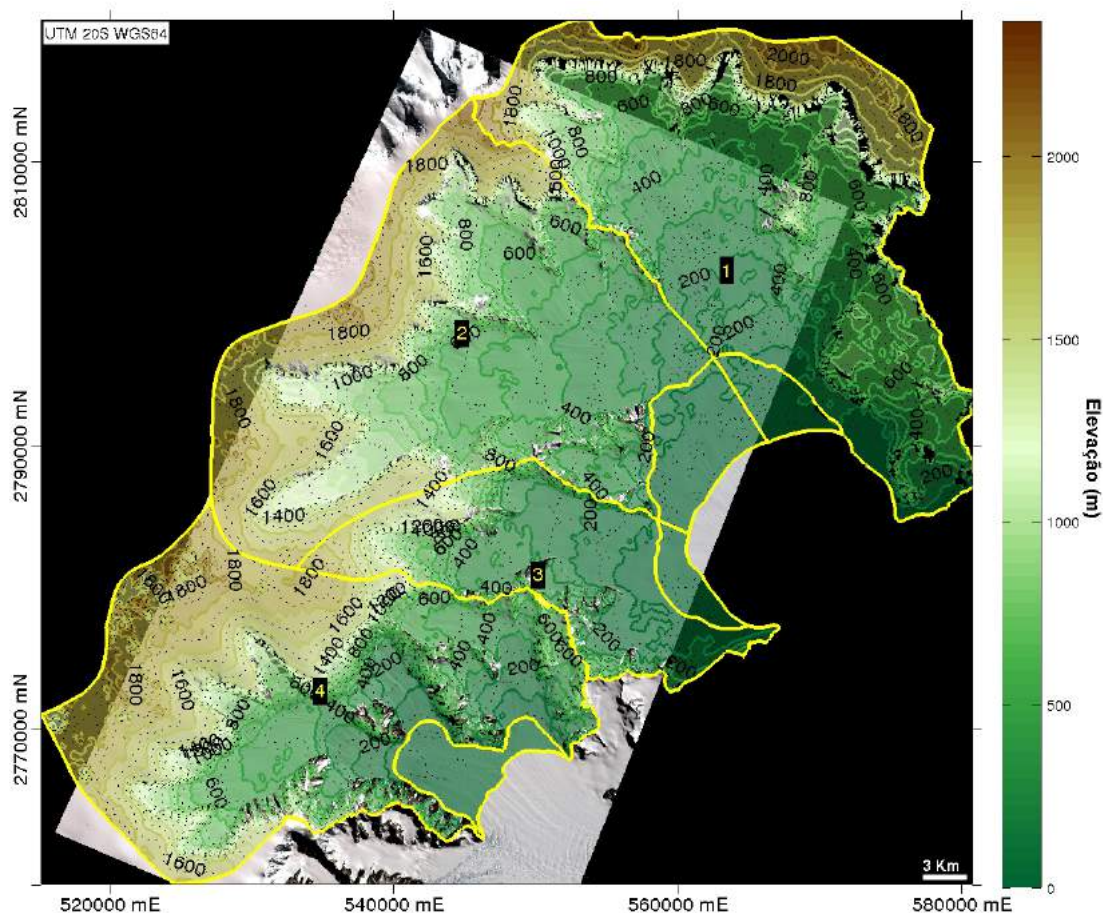


Figura 36: Representação das geleiras analisadas na área LB2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 22/11/2001. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras LB1-B1 a LB1-B3 mencionadas no texto. O número 4 corresponde a geleira LB2-B4 mencionada no texto.

As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 22 de novembro de 2001 e de 15 dezembro de 2010, com intervalo de 9,08 anos entre as aquisições. O MDE de 2010 foi obtido por um mosaico de duas cenas subsequentes de mesma data para que a Geleira Jorum (LB2-B4) fosse compreendida Figura 36. As três primeiras geleiras são as mesmas apresentadas na

área anterior e portanto referidas de mesma maneira, LB1-B1 a LB1-B3.

A figura 34 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. média em intervalos de altitude.

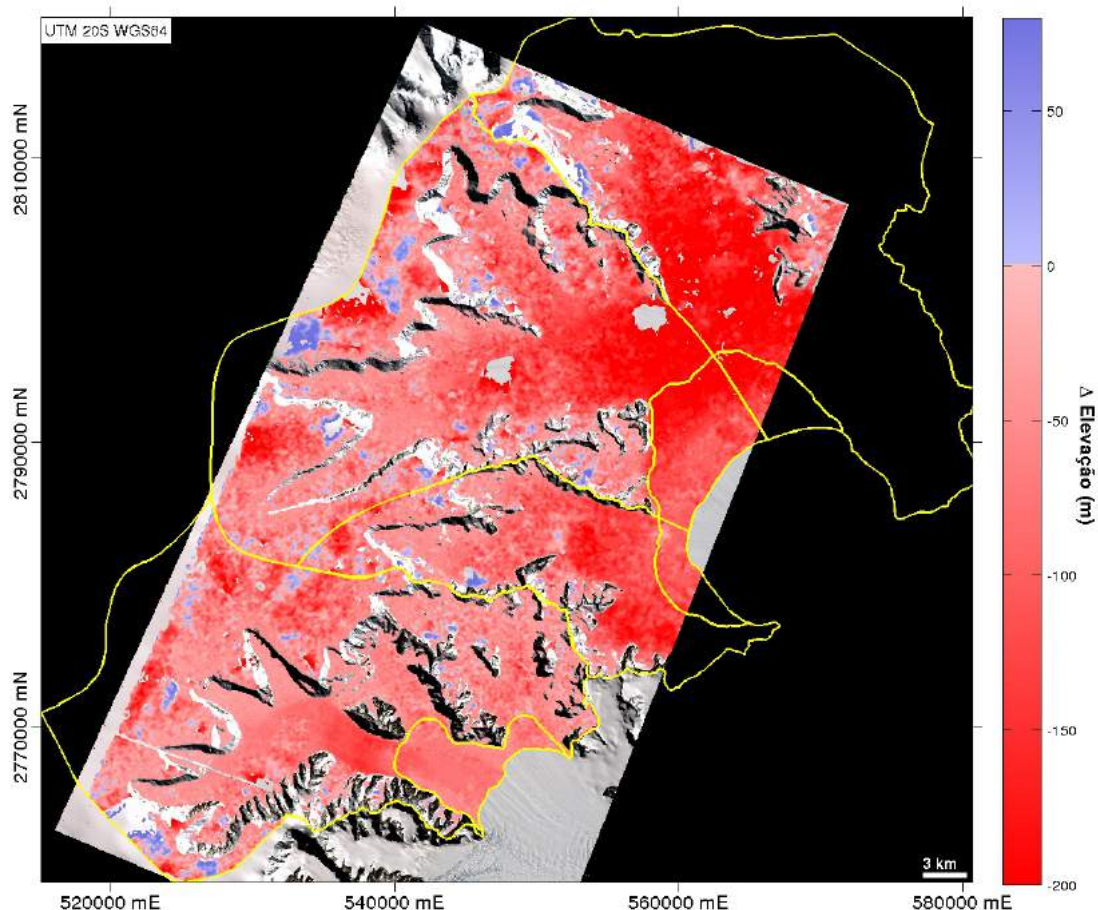


Figura 37: Diferença de elevação em LB2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

A figura 38 mostra os gráficos de m.m.a.e. média por ano para as quatro geleiras analisadas. Para uma área total de 1383,5 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $98,77 \pm 30,17$ Gt para o período de 22 de novembro de 2001 a . Estimou-se para o mesmo período um balanço de massa entre -5821 e $-2930 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$, com balanço de massa específico entre $-10,10$ e $-2,93 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 48% da área total, e 10% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área é apresentada na tabela 12. O polígono na frente das geleiras LB1-B1 a LB1-B3s (figura 37) corresponde ao mesmo apresentado na área anterior. A diferença da frente de geleira também foi determinada para a Geleira Jorum (LB2_B4) com base na imagem ASTER de 7 de

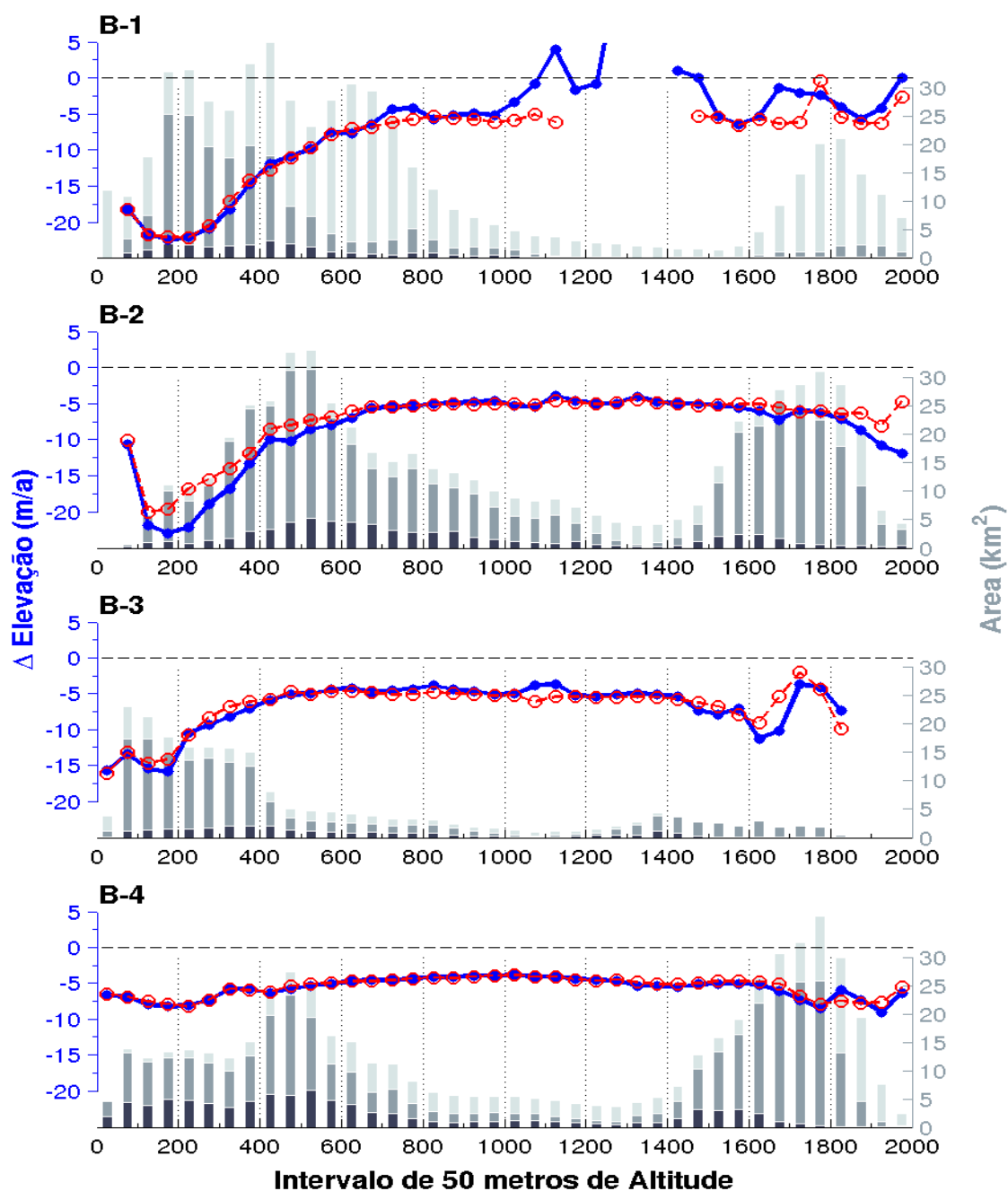


Figura 38: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB2-B1 a LB2-B4 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

novembro de 2002 e apresentou uma diferença em área de 39,33 km².

Os gráficos dos desvios padrões mostram padrões semelhante aos da área LB1 e comparativamente menores valores médios de correlação, que pode ser devido ao menor contraste da imagem de 2001. Um rápido aumento do desvio padrão que ocorre nos primeiros 400 m de altitude na Geleira Jorum (LB2-B4) se

Tabela 12: Variação em volume total de gelo na região LB2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 22 de novembro de 2001 e de 15 dezembro de 2010.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)			
	4	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
LB1-B1		-47,52	±11,79	-5821,92	15,30	-10,095	±6,84	576,72	31%	4%
LB1-B2		-24,60	±9,88	-3013,95	8,81	-5,060	±5,13	595,63	53%	9%
LB1-B3		-13,86	±3,57	-1698,13	7,01	-8,041	±4,12	211,19	67%	11%
LB2-B4		-12,79	±4,93	-1567,33	4,88	-2,930	±2,84	534,91	40%	14%
TOTAL		-98,77	±30,17	-12101,3	36,0			1918,4	48%	10%

deve ao mesmo motivo da Geleira Green. Esta apresenta três frentes de geleiras, com um sinal de mudança em elevação distinto que é evidenciado nos histogramas. Os gráficos da m.m.a.e. demonstram concordância com as análises da área LB1, porém com valores ainda menores para as três geleiras em comum (figura 38). A primeira imagem desta área precedeu a desintegração da plataforma de gelo Larsen B e, com apenas um ano de diferença para a imagem inicial do par utilizado na área LB1, o resultado é uma diferença de perda de volume de 27,94 Gt (58,04 e 98,77 Gt; tabelas 11 e 12, respectivamente). Estas estimativas estão de acordo com os valores apresentados por Rott *et al.* (2010), que estimaram uma descarga (em Gt a^{-1}) duas vezes maior para as geleiras da antiga Plataforma de Gelo Larsen B em 2008 do que em 1995/1999. A geleira Hektoria teve uma menor área amostrada pelos MDEs utilizados nesta área (44 e 31%; tabelas 11 e 12, respectivamente), porém os valores estimados são representativos de cada intervalo de altitude e multiplicados pela respectiva área. Pelo fato dos MDEs na área LB2 compreenderem uma área predominantemente localizada na região de maiores mudanças, pode haver uma super-estimativa dos valores de Bn e perda de massa calculadas.

4.3.3 Área LB3

As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010, com um intervalo de 8,08 anos. Nesta área foram compreendidas as geleiras Crane (LB3-B2), Mapple (LB3-B3), Melville (LB3-B4), Pequod (LB3-B5) e Starbuck (LB3-B6) (figura 39). A bacia 1 é composta por uma pequena geleira sem nome com área inferior a 50 km^2 . Das seis geleiras analisadas neste setor, a Geleira Starbuck é a única que tem sua descarga para a Plataforma de Gelo SCAR.

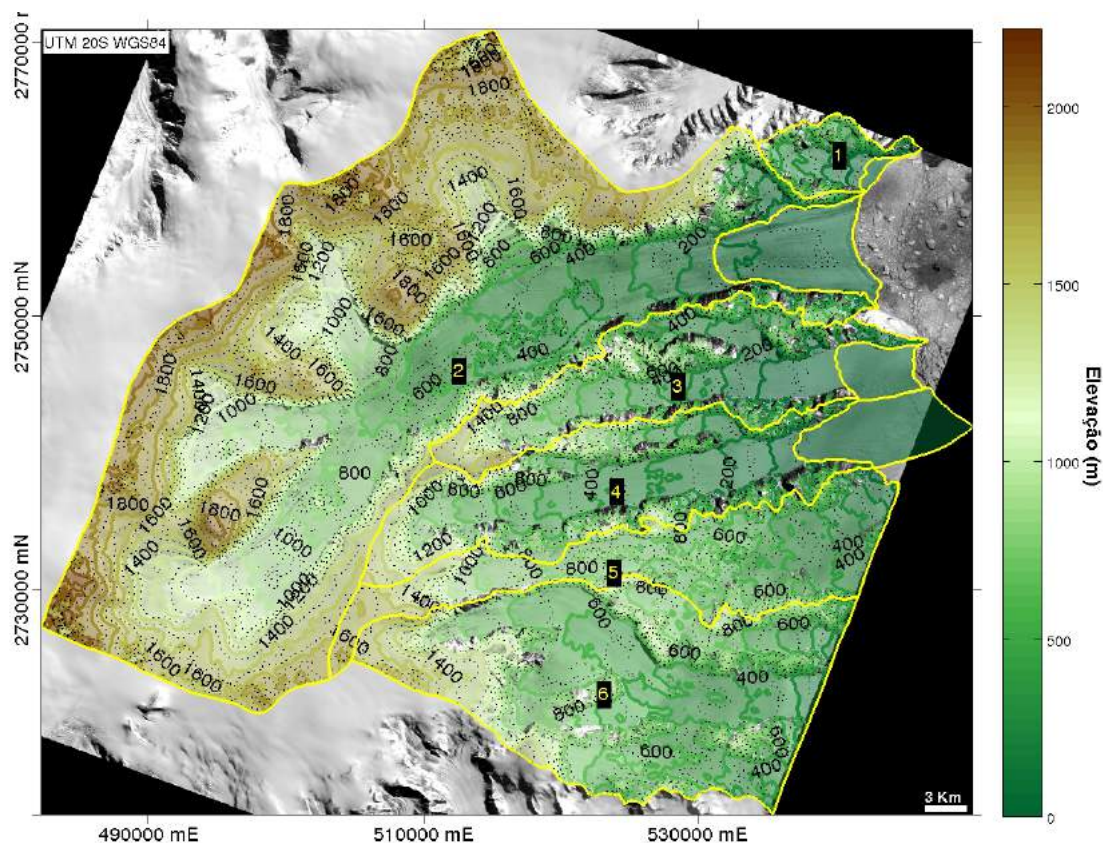


Figura 39: Representação das geleiras analisadas na área LB3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LB3-B1 a LB3-B6 mencionadas no texto.

A figura 40 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Nota-se os valores mais intensos no vale principal da Geleira Crane, onde as mudanças em elevação chegam a 150 m. Valores negativos são percebidos até as regiões mais altas da Geleira Crane. Houve interferência de nuvem em algumas regiões da Geleira Crane, Pequod e Starbuck, que podem ser percebida pela falta de dados na figura 40.

As figuras 41 e 42 mostram os gráficos de m.m.a.e. para as seis geleiras analisadas. A geleira Crane (LB3-B2) apresentou os menores valores, com um sinal de perda de elevação propagado até as regiões mais altas. As geleiras Mapple (LB3-B3), Melville (LB3-B4) e Pequod (LB3-B5) apresentaram mudanças menos intensas na região mais baixa das geleiras, com valores entre -5 e -2,5 mm e entre -1 e 0 m a⁻¹ nas regiões mais altas. A geleira LB3-B1 e Starbuck (LB3-B6) apresentaram um sinal um pouco negativo e constante ao longo do intervalo de altitude.

Para uma área total analisada de 2048,2 km², obteve-se uma estimativa de perda de massa de $36,29 \pm 23,47$ Gt para o período avaliado de 7 de novembro de 2002 a 15 de dezembro de 2010. Para o mesmo período estimou-se um balanço

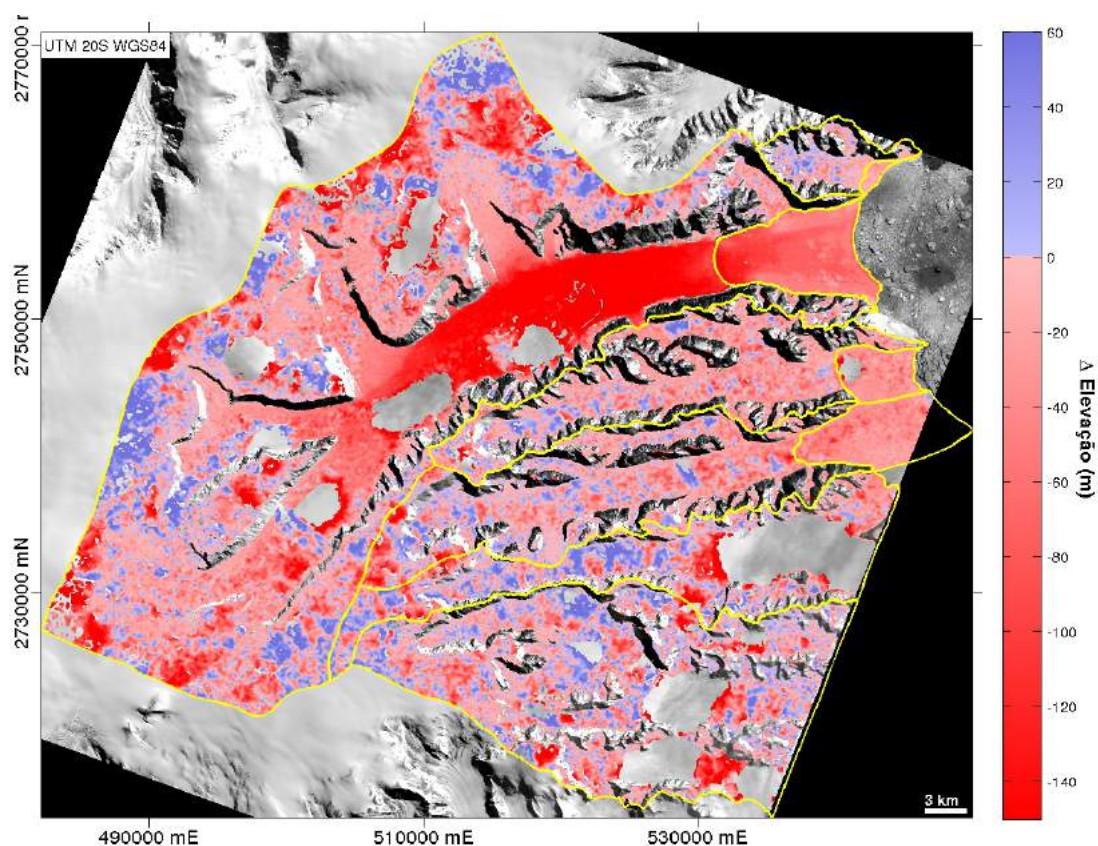


Figura 40: Diferença de elevação em LB3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/ e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

de massa entre -3853 e $-15 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ e um balanço de massa específico entre $-3,51$ e $-0,48 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 57% da área total, e 14% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs.

A geleira Crane apresentou a maior contribuição em massa para o oceano, entre as geleiras desta área. Shuman *et al.* (2011) encontraram um valor de $2,37 \text{ Gt a}^{-1}$ para o período entre 2001 e 2006. Neste estudo o valor encontrado correspondeu a $3,51 \text{ Gt a}^{-1}$. Este aumento da taxa de fluxo de massa para o oceano foi mostrado por Rott *et al.* (2011), onde os autores encontraram uma diferença na taxa anual de $1,77 \text{ Gt a}^{-1}$ entre 1995/1999 e 2008. A grande mudança em elevação na Geleira Crane é explicada pela intensa retração de sua frente somado a influência da batimetria da região (SHUMAN; BERTHIER; SCAMBOS, 2011). A presença de um lago subglacial pode ter acelerado a retração, intensificando o fluxo de massa para o oceano. Os polígonos na frente das geleiras LB3-B1, Crane (LB3-B2), Mapple (LB3-B3) e Melville (LB3-B4) correspondem às áreas de retração das frentes das geleiras para o período analisado (figura 37). A maior perda em área da Geleira Crane foi $56,64 \text{ km}^2$, em um total de $125,66 \text{ km}^2$.

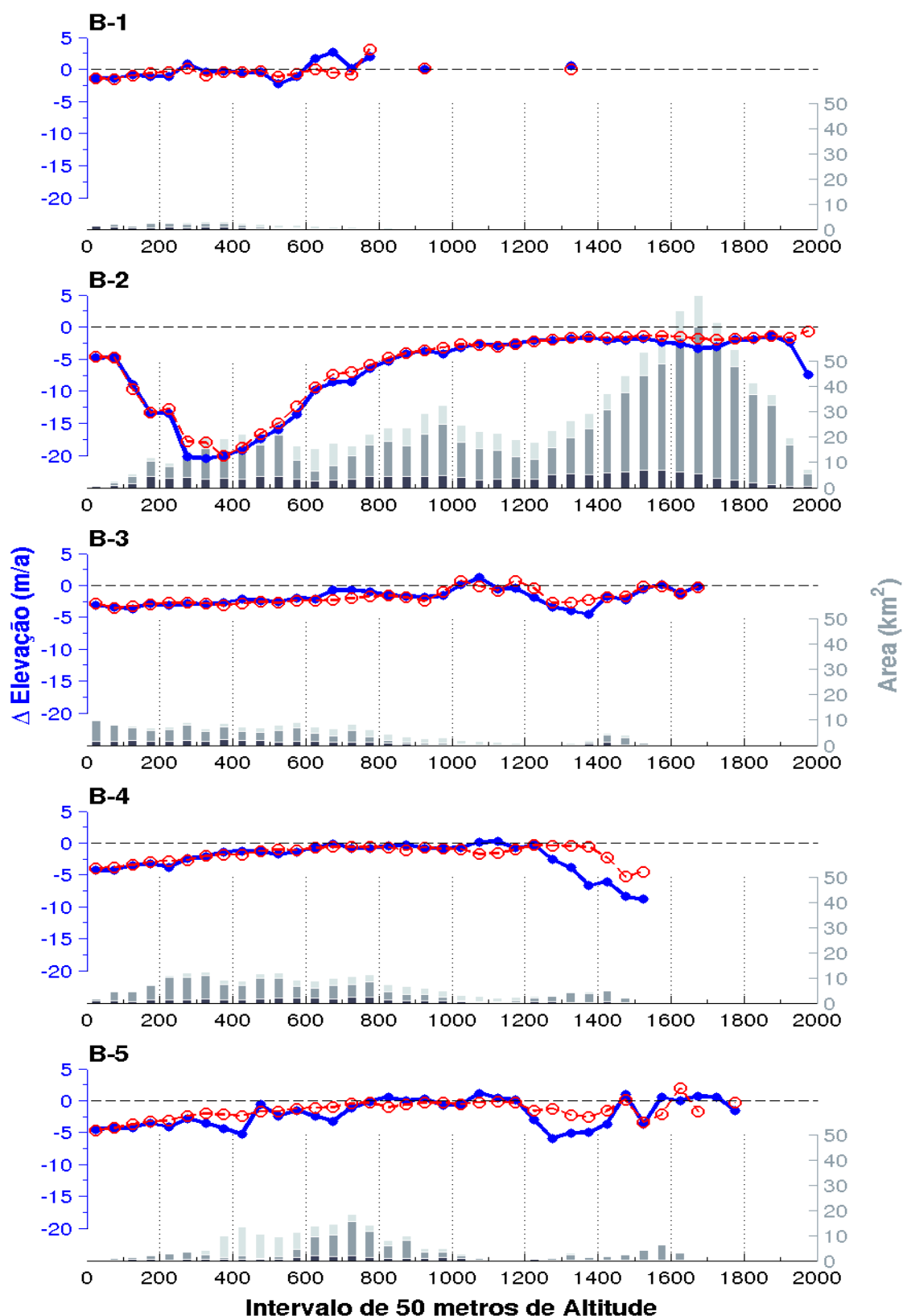


Figura 41: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB3-B1 a LB3-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

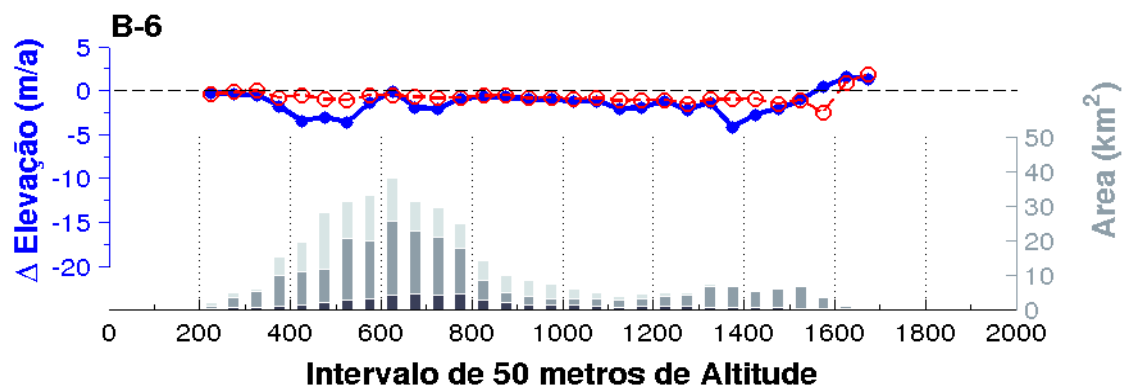


Figura 42: Mudança média anual em elevação para a geleira LB3-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 13: Variação em volume total de gelo na região LB3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)			
	6	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B1		-0,12	±0,23	-15,29	1,45	-0,478 ±0,53		32,02	60%	21%
B2		-28,12	±12,34	-3853,09	9,17	-3,512 ±7,51		1097,01	32%	8%
B3		-2,59	±1,55	-355,11	4,01	-2,235 ±0,59		158,87	68%	17%
B4		-2,01	±2,05	-275,07	5,24	-1,364 ±0,94		201,71	70%	14%
B5		-1,53	±2,18	-209,06	6,96	-1,103 ±0,82		189,57	51%	9%
B6		-1,92	±5,11	-263,66	8,92	-0,715 ±0,26		368,98	58%	11%
TOTAL		-36,29	±23,47	-4971,3	35,75			2048,2	57%	14%

Apesar deste grande volume, ao calcularmos o balanço de massa específico ($\bar{B}_n$) que leva em consideração a área total da geleira como denominador, temos um valor maior do que para a Geleira Hektoria.

A Geleira Starbuck (B6) apresenta um menor Bn específico em comparação as outras geleiras. Isto se deve provavelmente por seu fluxo ainda estar ancorado pela Plataforma de Gelo SCAR.

4.3.4 Área LB4

As imagens utilizadas para análise desta área são cenas subsequentes das utilizadas na área anterior e portanto possuem a mesma data e intervalo temporal entre as aquisições. Nesta área estão incluídas as geleiras Flask (LB4-B1) e Leppard (LB4-B2) (figura 43). Estas são as maiores geleiras com descarga para a Plataforma de Gelo SCAR.

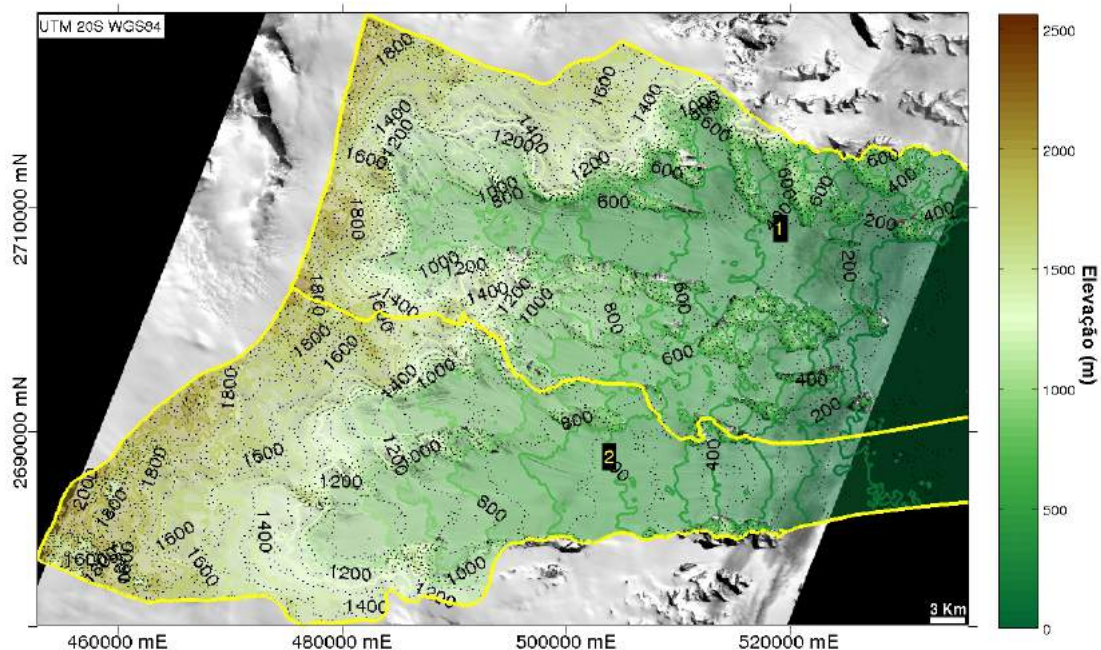


Figura 43: Representação das geleiras analisadas na área LB4. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 e 2 correspondem as geleiras LB4-B1 e LB4-B2 mencionadas no texto.

A figura 40 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Apesar de muitos pontos terem sido inviabilizado pela influência de nuvens, é possível notar os valores mais negativos nas frentes das duas geleiras.

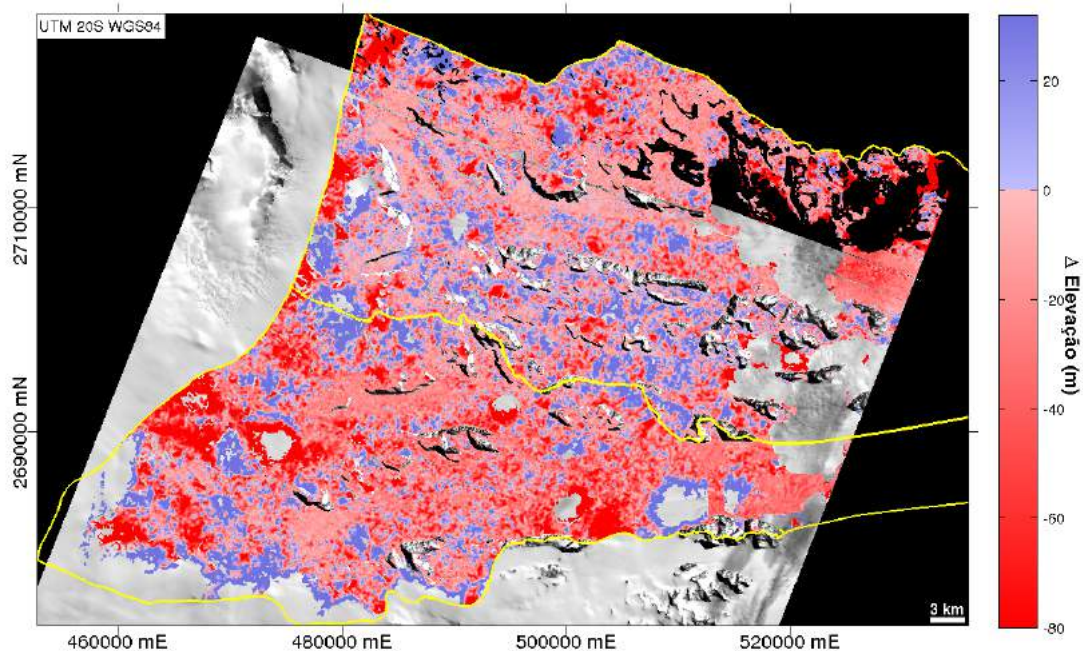


Figura 44: Diferença de elevação em LB4, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

A figura 45 mostra os gráficos de m.m.a.e. para as duas geleiras analisadas. Para uma área total de 2738,4 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $27,80 \pm 24,47$ Gt para o período avaliadode 7 de novembro de 2002 a 15 de dezembro de 2010. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -1910 e -1898 10^6 m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre $-1,53$ e $-1,27$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 44% da área total, e 8% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área é apresentada na tabela 14.

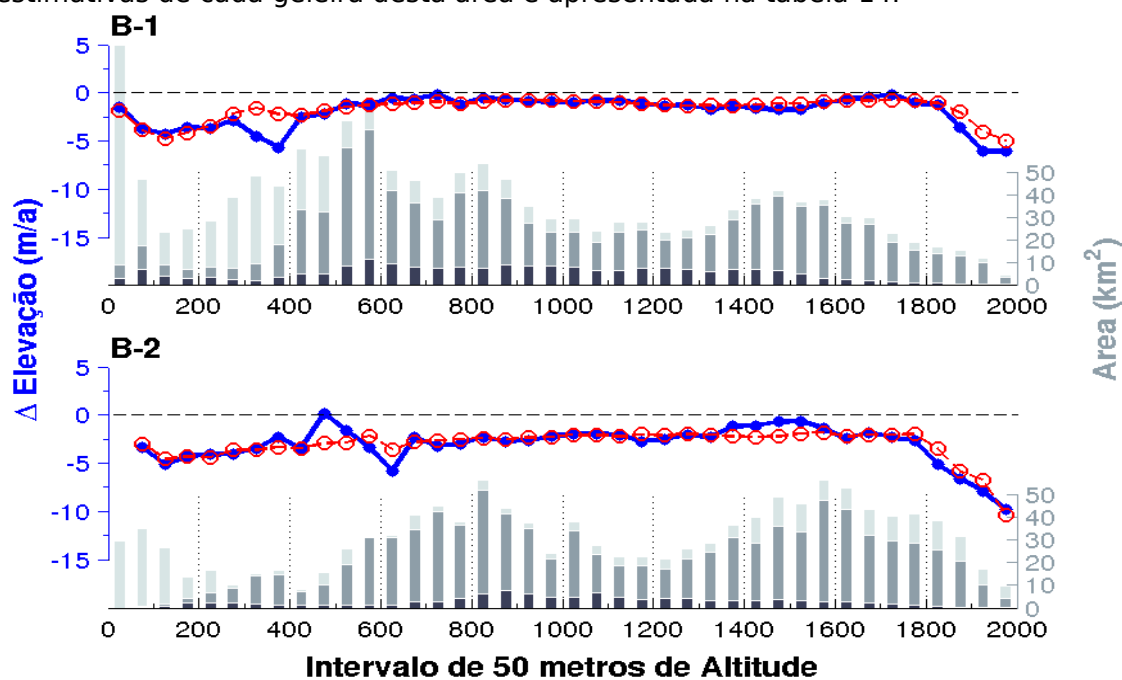


Figura 45: Mudança média anual em elevação para as geleiras LB4-B1 e LB4-B2 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 14: Variação em volume total de gelo na região LB4, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10^6 m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)		
	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B1	-13,86	±15,06	-1898,45	17,37	-1,274	±1,04	1489,73	45%	10%
B2	-13,94	±9,41	-1910,27	19,40	-1,530	±1,39	1248,65	42%	6%
TOTAL	-27,80	±24,47	-3808,7	36,77			2738,4	44%	8%

Os gráficos destas geleiras mostram um padrão semelhante às menores geleiras da área LB3, com valores próximos de -5 m a⁻¹ nas regiões mais baixas e crescentes com aumento da altitude. Ambas geleiras apresentaram grandes áreas para todos os intervalos de altitude, sendo os da Geleira Flask um pouco maiores.

Essa diferença da hipsometria compensa a pequena diferença nos valores de mudança de elevação. Com isso os valores de perda de massa e Bn específico são aproximadamente iguais (Tabela 14). Apesar de ainda ancoradas à plataforma de gelo, estas geleiras apresentam um balaço de massa específico equivalente às Geleiras Melville e Mapple da áreas LB3. Juntas contribuem com um aporte significativo de massa para a região, $27,8 \text{ Gt a}^{-1}$, aproximadamente a mesma quantidade aportado pela Crane, 28,12. Essas estimativas para estas geleiras não são apresentadas em outros trabalhos.

4.4 Setor Larsen C

Devido ao limite sul de 65°S para as buscas das imagens ASTER, apenas o início da região de Plataforma de Gelo Larsen C foi incluída e apenas um par de MDEs analisado. As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 7 de novembro de 2002 e 25 de fevereiro de 2009, com um intervalo de 6,3 anos. Foram compreendidas seis bacias de drenagem glacial, referidas por LC-B1 a LC-B6

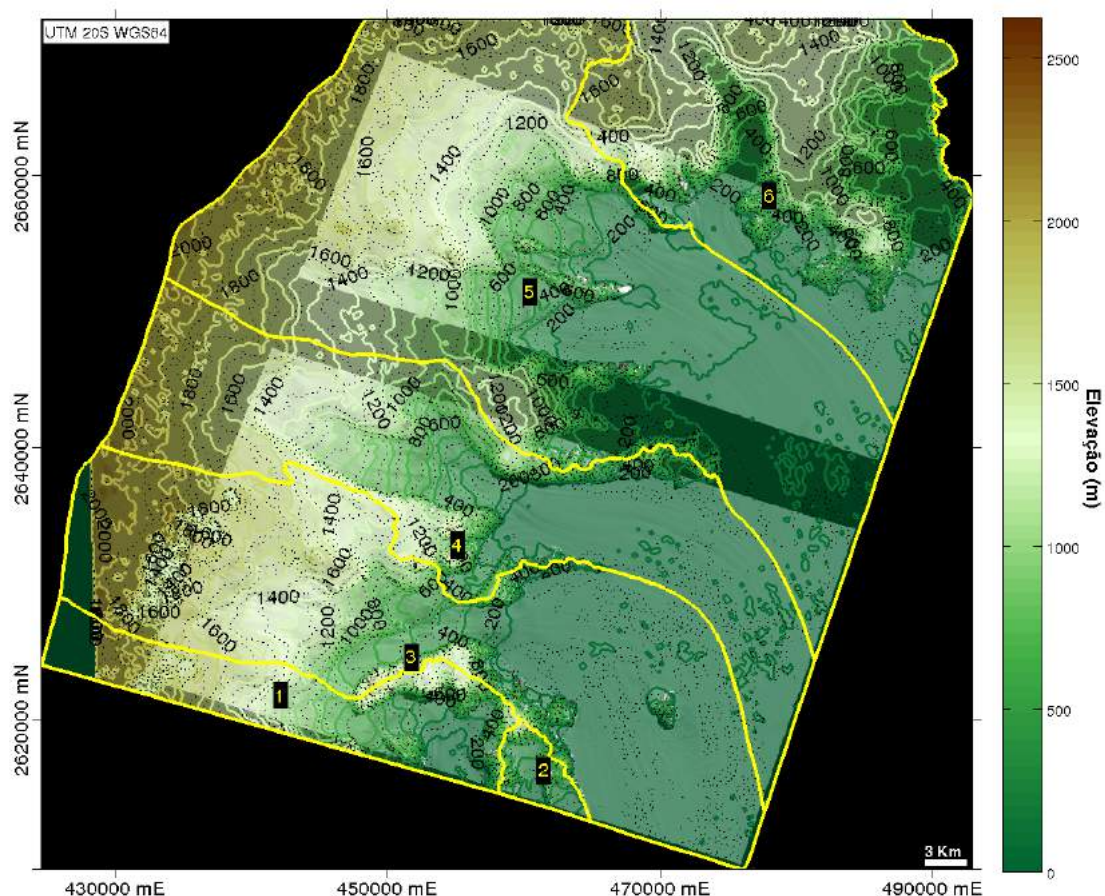


Figura 46: Representação das geleiras analisadas na área LC. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 07/11/2002. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras LC-B1 a LC-B6 mencionadas no texto.

(figura 46). Apenas as bacias LC-B3, LC-B4 e LC-B5 tiveram mais da metade de sua área representada. As outras três foram apenas parcialmente amostradas.

A figura 47 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros, antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. É possível verificar a variação dos valores de mudança em elevação em torno de -10 a 10 m sobre região de plataforma de gelo. Além de estarem sujeitas a flutuações, o principal motivo para esta imprecisão poderia ser a falta de contrastes e feições identificáveis no processo de correlação.

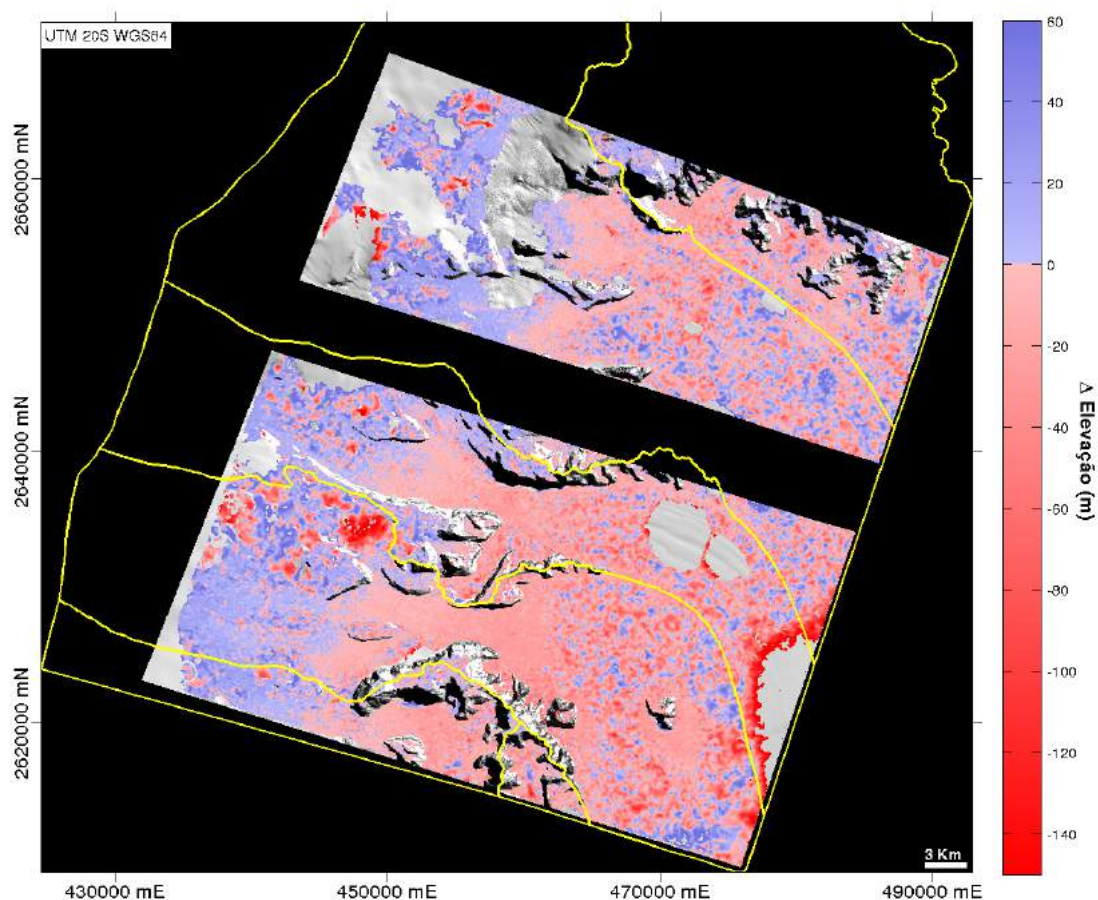


Figura 47: Diferença de elevação em LC, a partir de valores filtrados, entre imagens de 25/02/2009 e de 07/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

A figura 48 mostra os gráficos de m.m.a.e. para as bacias, com exceção da bacia LC-B2 que apresentou área muito pequena e mal amostrada. O gráfico para esta bacia pode ser consultado no anexo. De acordo com os gráficos estas geleiras apresentam uma área de perda em elevação nas regiões mais baixas, e áreas de ganho em elevação nas regiões mais altas. A ausência de uma escarpa com mudança brusca de elevação nestas geleiras torna este tipo de perfil mais evidente uma vez que o ganho de elevação é contínuo. Porém, foram consideradas

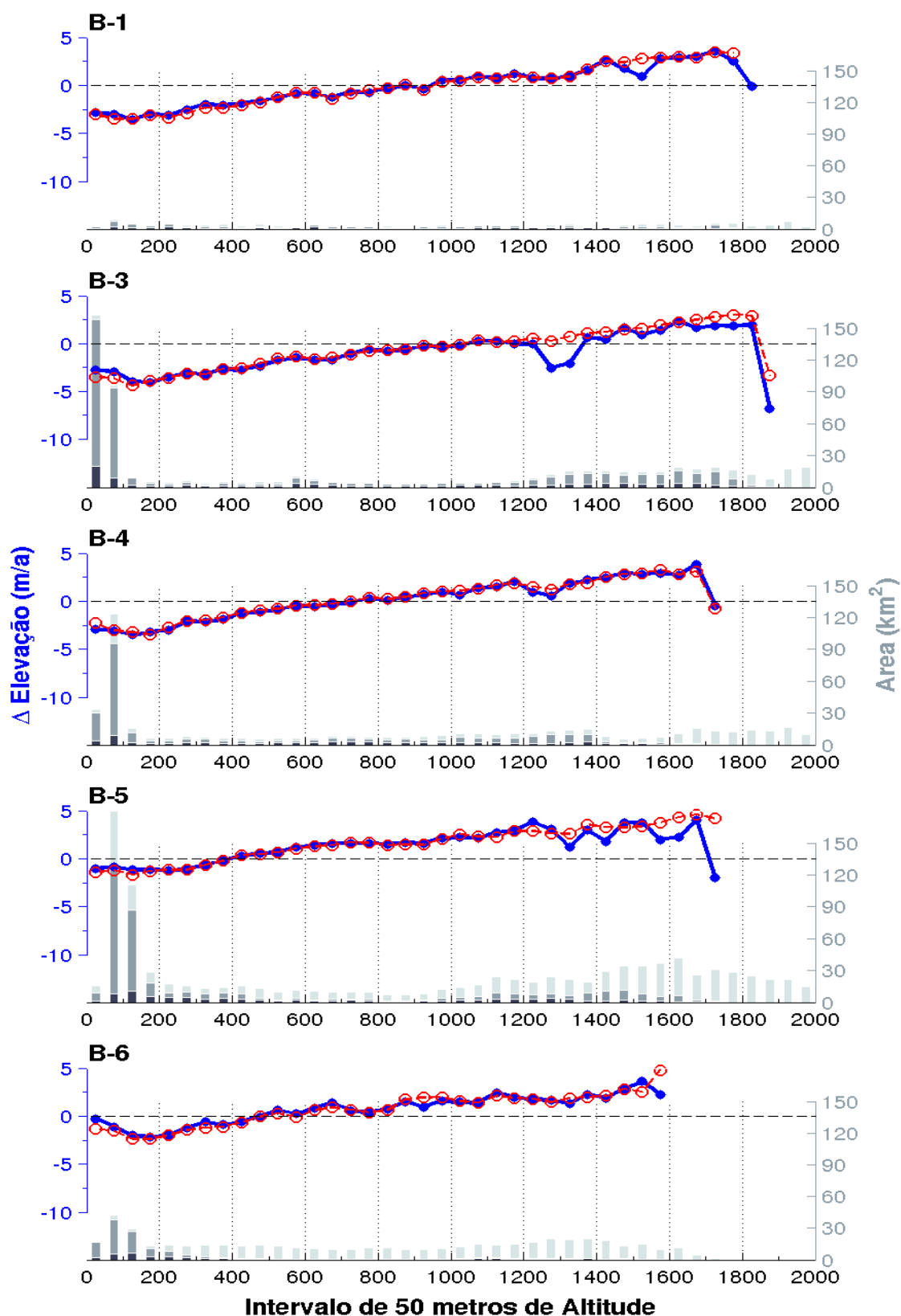


Figura 48: Mudança média anual em elevação para as geleiras LC-B1 e LC-B3 a LC-B6 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

as estimativas até aproximadamente 1300 m, pois a partir destes intervalo as estimativas são menos acuradas devido à ausência de contraste ou presença de nuvem em alguns casos.

Para uma área total de 2854,4 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $15,55 \pm 13,19$ Gt para o período de avaliado. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -1118 e -45 10⁶ m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre -1,78 e -0,06 m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 43% da área total, e 12% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela 15.

Tabela 15: Variação em volume total de gelo na região LC, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 29 de dezembro de 2002 e 13 de dezembro de 2008.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	6	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B1		-0,88	±0,61	-143,30	3,50	-0,911	±1,65	157,28	40%	16%
B2		-0,26	±0,24	-45,21	1,99	-1,775	±0,72	25,46	52%	20%
B3		-6,40	±3,22	-1118,99	10,03	-1,787	±1,67	626,13	56%	11%
B4		-3,49	±2,61	-527,57	10,16	-1,013	±1,83	520,73	49%	11%
B5		-2,93	±4,37	-58,87	17,37	-0,057	±1,64	1027,26	40%	7%
B6		-1,59	±2,15	-269,55	10,62	-0,542	±1,13	497,56	23%	5%
TOTAL		-15,55	±13,19	-2163,5	53,67			2854,4	43%	12%

As geleiras LC-B3, LC-B4 e LC-B5 foram melhor amostradas. As duas primeiras apresentaram um Bn específico negativo. Essas geleiras por estarem ancoradas pela presença da Plataforma de Gelo Larsen C, deveriam apresentar-se em um estado de equilíbrio, como encontrado para LC-B5. Rignot&Bamber (2008) constaram que as geleiras da plataforma de gelo Larsen C encontram-se próximo de um balanço. Os valores mais negativos para as primeiras geleiras podem ser explicados por ter se considerado uma maior área sobre a plataforma de gelo, além da linha de encalhe das geleiras (figura 47). Essas áreas, por não estarem ancoradas ao fundo rochoso, podem sofrer variações na elevação em função de outras forças, como maré e/ou derretimento basal da Plataforma de Gelo.

4.5 Setor Península Trinity (PT)

Este setor apresenta apenas um par de MDEs analisado. As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 05 de março de 2002 e 20 de janeiro de 2006, com um intervalo de 3,88 anos. Foram compreendidas sete geleiras neste setor, referenciadas por PT-B1 a PT-B7 (figura 49).

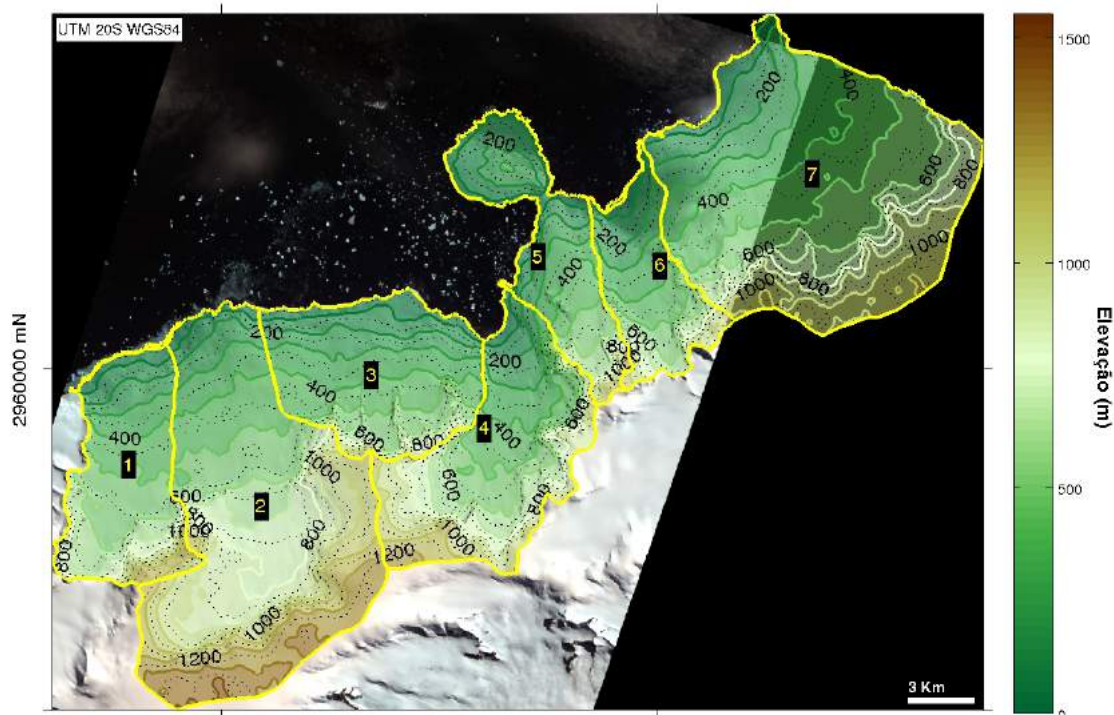


Figura 49: Representação das geleiras analisadas na área PT. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 20/01/2006. Os números 1 a 7 correspondem as geleiras PT-B1 a PT-B7 mencionadas no texto.

A figura 50 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. É visível um predomínio de valores negativos nas regiões mais baixas das geleiras. Nota-se também uma grande quantidade de valores mais intensos espalhados principalmente sobre as regiões mais altas das geleiras PT-B2, PT-B3 e PT-B4. Estas regiões são áreas cobertas com neve fresca e portanto de baixo contraste, gerando valores menos exatos.

A figura 51 ilustra os gráficos de m.m.a.e. para as geleiras PT-B1 a PT-B5. Os gráficos para as geleiras PT-B6 e PT-B7 podem ser consultados no material em anexo. De maneira geral os gráficos para estas geleiras parecem apresentar uma tendência de valores mais negativos com o aumento da altitude. Acredita-se que o motivo para esta tendência seja a presença de nuvem em ambas as imagens. A imagem que compõe o MDE final (2006) apresenta cobertura de nuvem sobre a

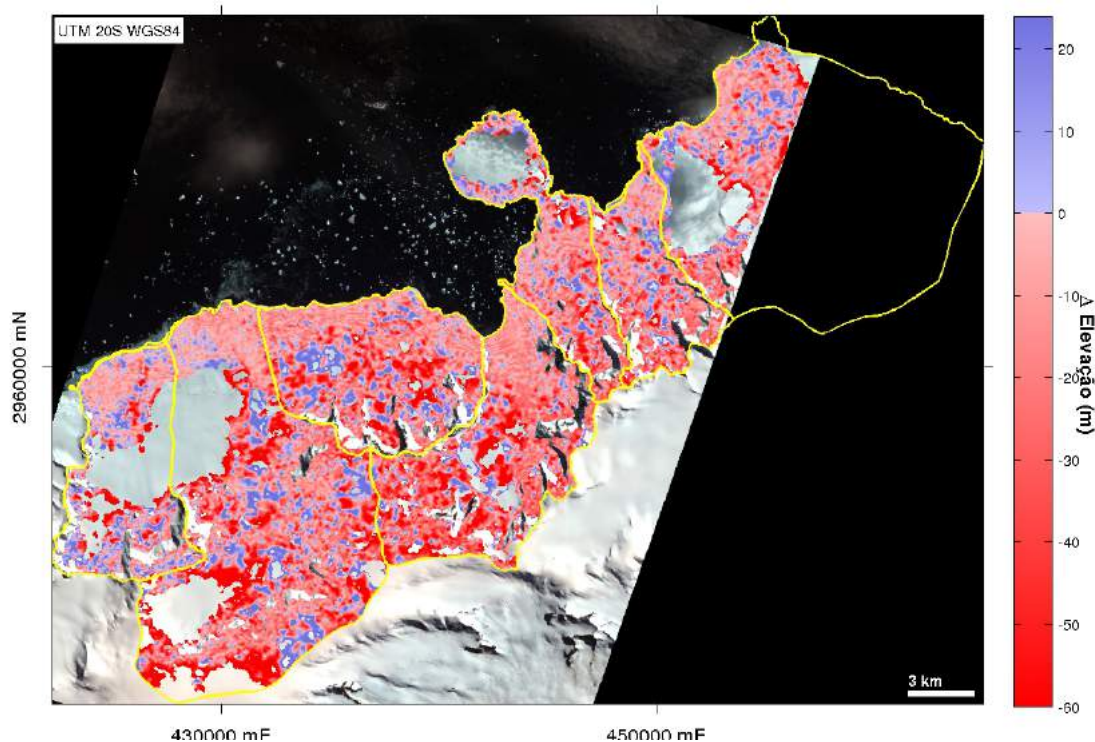


Figura 50: Diferença de elevação em PT, a partir de valores filtrados, entre imagens de 05/03/2002 e 20/02/2006. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

região oceânica. Já a imagem mais antiga, de 2002, apresenta cobertura de nuvem sobre o platô na porção norte da imagem. A presença de nuvem da imagem mais antiga levaria a um sobre-estimativa nas áreas mais altas das geleiras. Já a presença de nuvens sobre a região oceânica à frente das geleiras resulta em uma subestimativa das mudanças detectadas.

Para uma área total de 527,2 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $5,54 \pm 5,90$ Gt para o período de 05 de março de 2002 e 20 de janeiro de 2006. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -415 e $-42 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre $-4,71$ e $-0,86$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 62% da área total, e 20% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela Erro: Origem da referência não encontrada.

As bacias PT-B2, PT-B3 e PT-B4 apresentam um menor valor de Bn específico negativo. As bacias 2 e 7 possuem maiores áreas e portanto maior contribuição em volume para o oceano. O baixo Bn específico da bacia PT-B1 difere-se muito dos valores das demais bacias e provavelmente está subestimado.

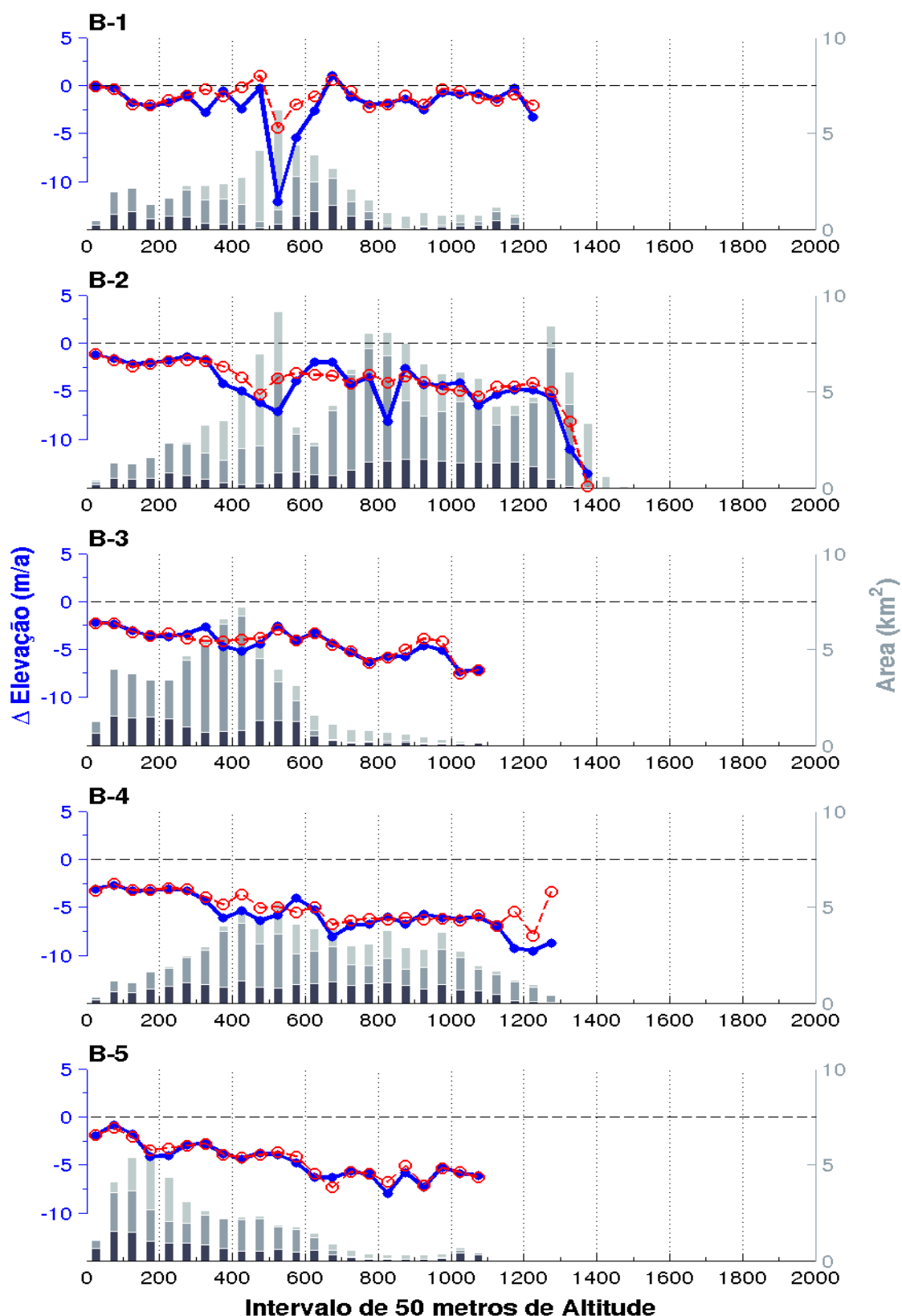


Figura 51: Mudança média anual em elevação para as geleiras PT-B1 a PT-B5 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 16: Variação em volume total de gelo na região PT, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 05 de março de 2002 e 20 de janeiro de 2006.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)			
	7	Médio	Desvio	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total	%MDE	%MDE_f
B1		-0,15	±0,45	-42,16	7,09	-0,86 ±0,73		49,05	50%	17%
B2		-1,45	±1,53	-415,34	10,26	-3,15 ±1,21		132,04	60%	15%
B3		-0,71	±0,79	-202,81	5,67	-3,46 ±0,65		58,67	85%	24%
B4		-1,15	±0,82	-328,55	5,09	-4,71 ±1,29		69,72	70%	25%
B5		-0,41	±0,52	-118,02	3,97	-2,81 ±1,11		41,94	68%	24%
B6		-0,32	±0,37	-90,70	2,99	-2,78 ±1,33		32,67	75%	29%
B7		-1,35	±1,42	-387,06	16,52	-2,71 ±1,69		143,07	24%	6%
TOTAL		-5,54	±5,90	-1584,6	51,57			527,2	62%	20%

A perda de massa para este setor é baixo comparado com o setor Norte, como por exemplo a área N1, de mesma latitude. Os altos desvios padrão das estimativas devem-se à qualidade das duas imagens utilizadas, que apresentaram grande cobertura de nuvem.

4.6 Setor Costa de Davis

Para este setor foram analisadas duas áreas da Costa de Danco. Os resultados são apresentados para uma área ao norte (DN1) e outra mais ao sul (DN2), região de transição da Costa Davis para Costa de Danco. No total este setor cobriu aproximadamente 2138 km^2 incluindo 15 bacias de drenagem glacial.

4.6.1 Área DV1

As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 26 de setembro de 2001 e de 02 dezembro de 2008, com intervalo temporal de 7,25 anos. Quatro bacias integram este par e são representadas pelas geleiras Whitecloud (DV1-B1), McNeile com uma tributária (DV1-B2), e outras duas sem nomes (DV1-B3 e DV1-B4) (figura 52). Ambas as imagens apresentavam cobertura de nuvem, sendo que a presença de nuvem na imagem de 2001 estava sobre a bacia 4. Esta foi então desconsiderada. A imagem de 2008 apresentou grande cobertura de nuvem do lado esquerdo se estendendo até próximo da geleira Whitecloud (DV1-B1).

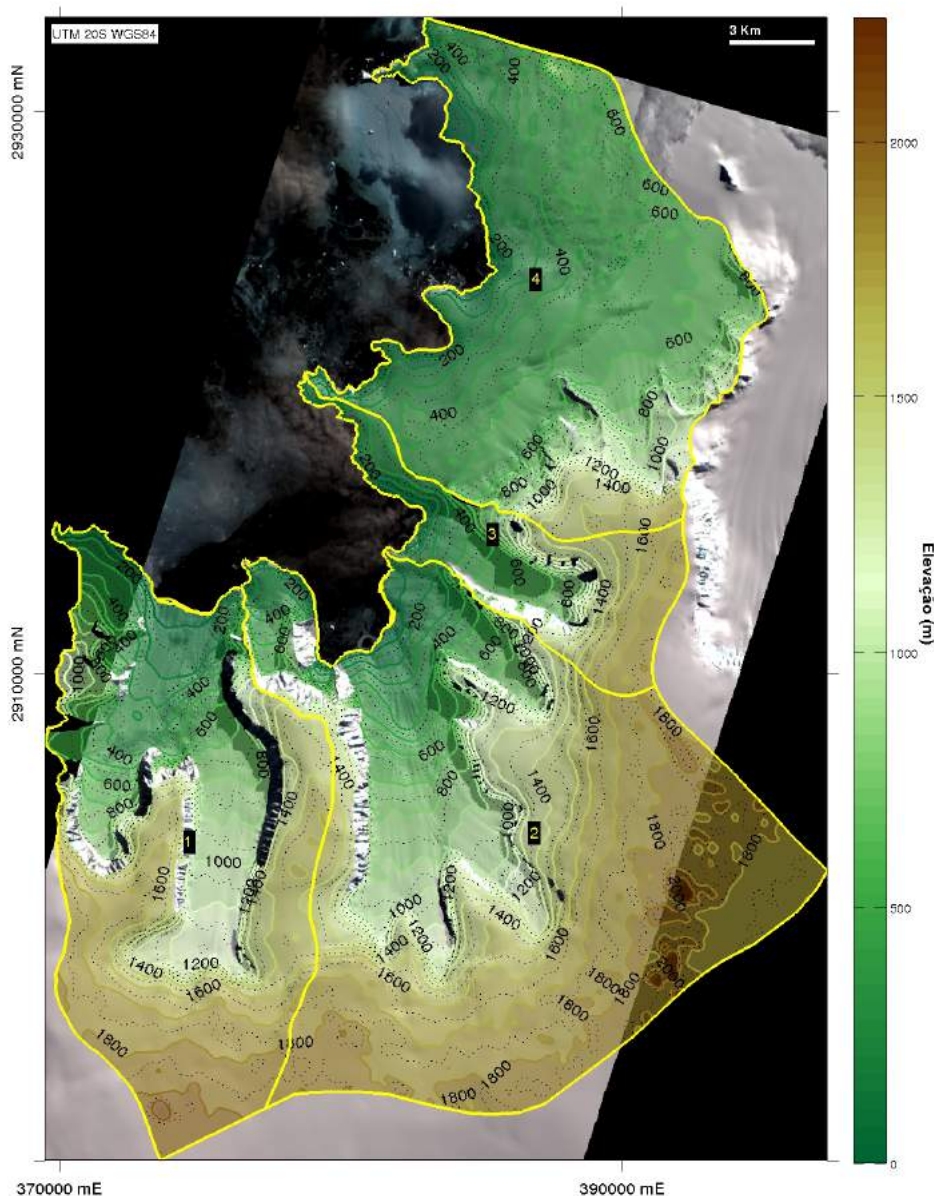


Figura 52: Representação das geleiras analisadas na área DN1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 26/09/2001. Os números 1 a 4 correspondem as geleiras DV1-B1 a DV4-B6 mencionadas no texto.

A figura 53 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Apesar dos valores extremos nas regiões mais altas das geleiras, os vales das três geleiras apresentaram coerência na intensidade e concordância entre si.

A figura 54 ilustra os gráficos para m.m.a.e. para as três geleiras analisadas. As geleiras Whitecloud (DV1-B1) e McNeile (DV1-B2) apresentaram valores maiores nas porções baixas, pouco característico de geleiras. Isso indica que devido à presença de nuvem na imagem de 2008 os valores de elevação possam estar sobre-estimados.

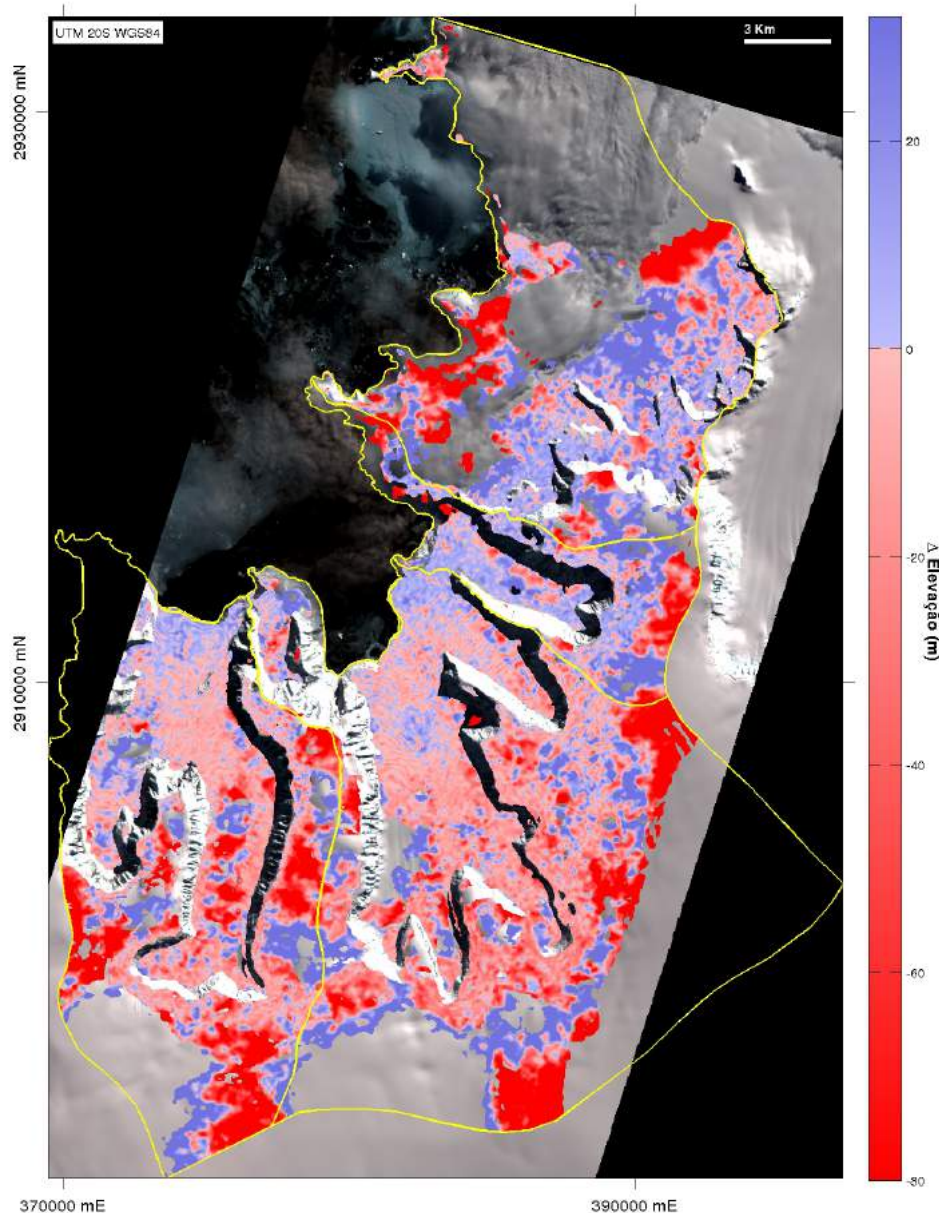


Figura 53: Diferença de elevação em DV1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 02/12/2008 e 26/09/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

Para uma área total de 421,9 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $0,82 \pm 1,16$ Gt para o período de 26 de setembro de 2001 e de 02 dezembro de 2008. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre $-64,36$ e $0,64 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ e um balanço de massa específico entre $-0,328$ e $0,016 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 27,2% da área total, e 9% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área é apresentada na tabela 17.

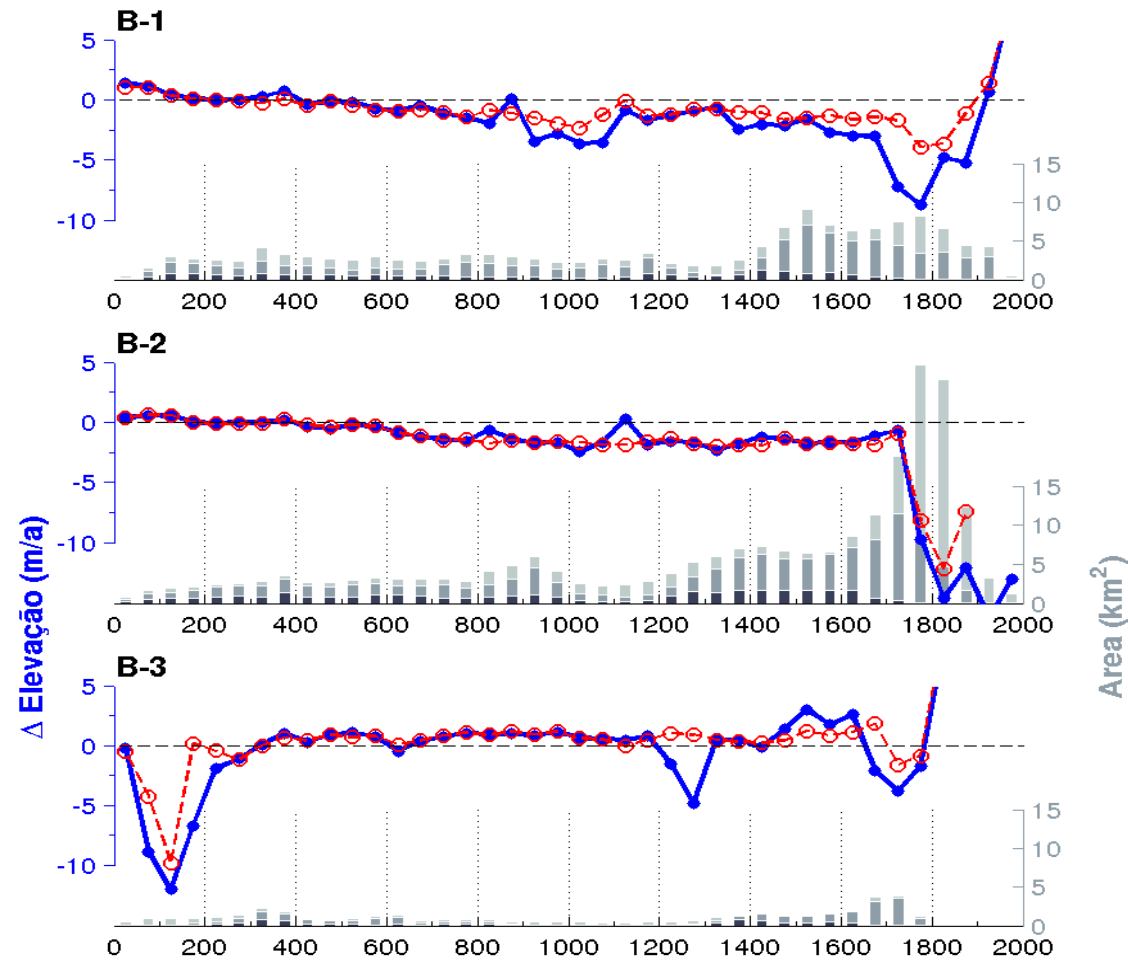


Figura 54: Mudança média anual em elevação para as geleiras DV1-B2 a DV1-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 17: Variação em volume total de gelo na região DV1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 26 de setembro de 2001 e de 02 dezembro de 2008.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)		
3	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1	-0,33	-0,331908	-47,47	3,23	-0,328 ±0,82		144,72	30,6%	9,3%
B2	-0,44	-0,43815	-64,36	2,90	-0,274 ±1,02		235,28	21,4%	7,6%
B3	-0,05	-0,047162	0,65	2,98	0,016 ±0,88		41,90	29,5%	10,0%
TOTAL	-0,82	±1,16	-111,17	9,11			421,89	27,2%	9,0%

O valor de perda de massa desta área foi bastante baixo, sendo o desvio padrão da estimativa maior do que o valor total. O balanço de massa positivo para a geleira 3 é incomum, uma vez que estão sendo considerados apenas os vales das geleiras, desconsiderando as regiões mais altas.

4.6.2 Área DV2

Esta área compreende o Cabo Sterneck, o qual divide a Costa de Davis da Costa de Danco. As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 22 de novembro de 2001 e em 27 de setembro de 2004, com intervalo de 2,83 anos. Devido à presença de nuvens, as melhores estimativas são das geleiras DV2-B1, DV2-B2, DV2-B10 e DV2-B11. Estas são representadas pelas geleiras Cayley, principal, e Lilienthal (DV2-B1), Geleira Mouillard (DV2-B2), Geleiras Wright Ice Piemonte (DV2-B10), Geleira Temple (DV2-B11) (figura 55).

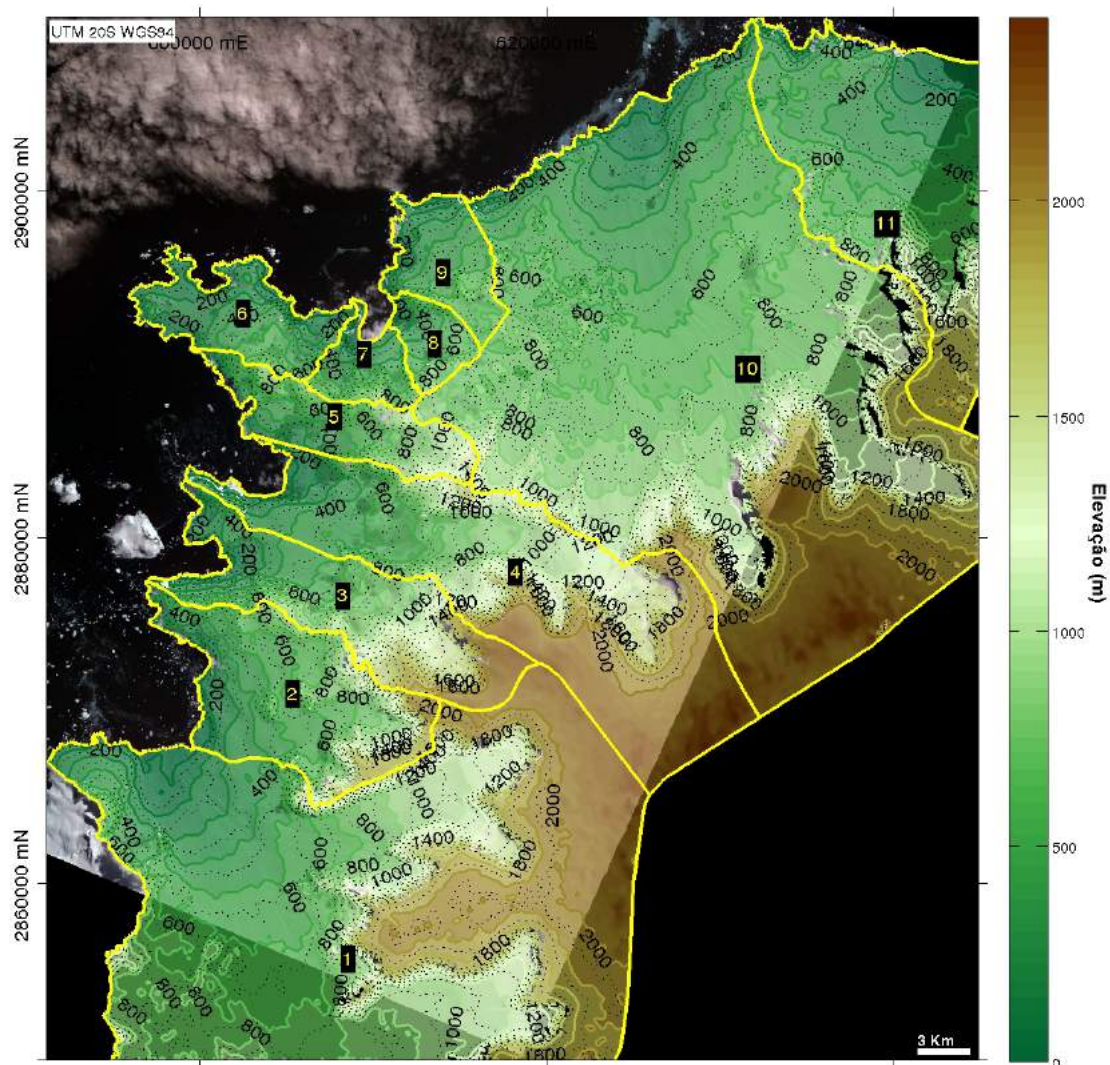


Figura 55: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 22/11/2001. Os números 1 a 11 correspondem as geleiras DV2-B1 a DV2-B11 mencionadas no texto.

A figura 56 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Apesar do baixo intervalo temporal, as mudanças de elevação detectadas mostram

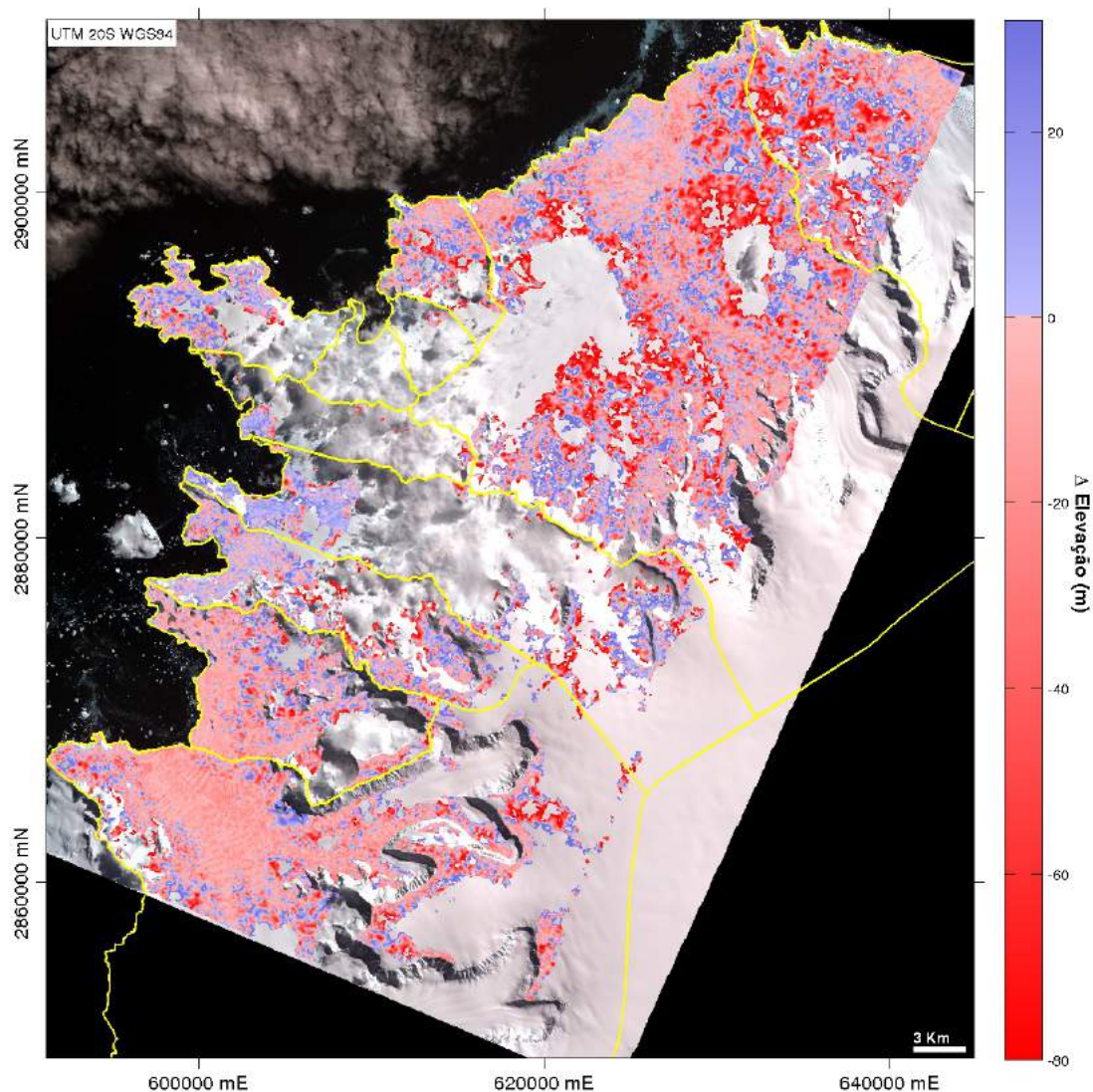


Figura 56: Diferença de elevação em DV2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/09/2004 e de 22/11/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

claramente uma redução em elevação no vale principal das geleiras DV2-B1, DV2-B2, DV2-B10 e DV2-B11.

A figura 57 mostra os gráficos para m.m.a.e. para as geleiras DV2-B1, DV2-B2, DV2-B10 e DV2-B11. Os valores de m.m.a.e. para as quatro geleiras foram em torno de 2-2,5 m/a, sendo ligeiramente mais positivos para as geleiras DV2-B10 e DV2-B11. Os valores com maiores variações nas regiões mais altas estão dentro do intervalo não considerado devido à baixa confiabilidade destas regiões.

Para uma área total de 1717,7 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $6,06 \pm 11,95$ Gt para o período avaliado. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre $-954,65$ e $57,43 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹ e um

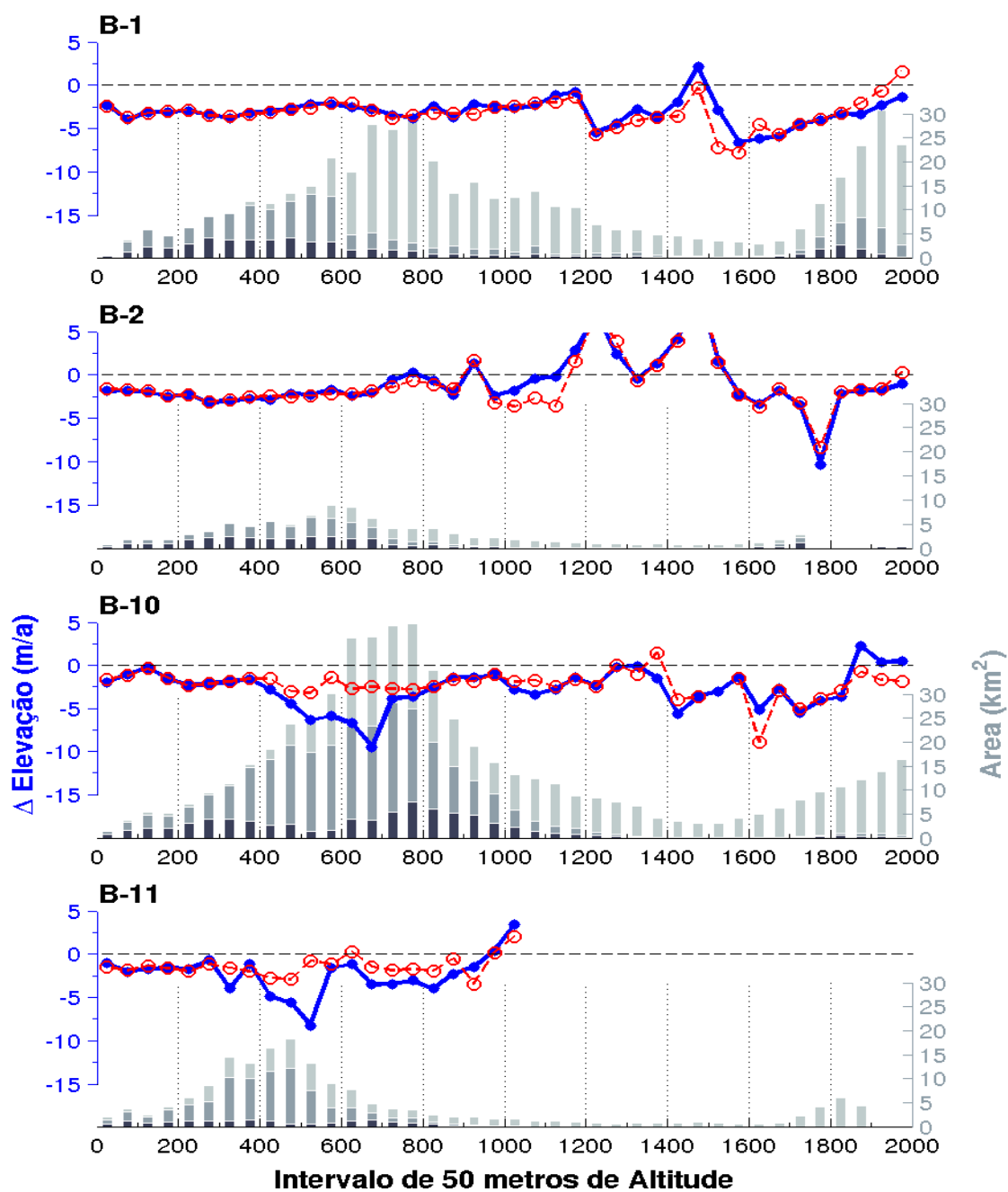


Figura 57: Mudança média anual em elevação para a geleiras DV2-B2 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

balanço de massa específico entre $-1,97$ e $0,59 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 36% da área total, e 13% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela 18.

Tabela 18: Variação em volume total de gelo na região DV2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 22 de novembro de 2001 e em 27 de setembro de 2004

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn ($10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$)		Bn específico (m a^{-1})		Área das bacias (km^2)			
	9	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km^2)	%MDE	%MDE_f
B1		-2,42	$\pm 3,04$	-943,46	29,85	-1,97	$\pm 1,16$	478,84	26%	9%
B2		-0,43	$\pm 0,79$	-163,75	7,22	-1,57	$\pm 0,95$	104,03	59%	27%
B3		-0,02	$\pm 0,13$	1,61	4,28	0,02	$\pm 0,62$	87,90	26%	14%
B4		0,00	$\pm 0,00$	57,43	3,96	0,36	$\pm 2,49$	158,12	9%	3%
B5		0,00	$\pm 0,00$	19,41	3,78	0,40	$\pm 1,74$	48,44	7%	3%
B6		0,00	$\pm 0,02$	27,76	5,17	0,59	$\pm 0,76$	46,80	42%	19%
B9		-0,13	$\pm 0,27$	-49,97	5,26	-1,40	$\pm 1,75$	35,63	56%	18%
B10		-2,45	$\pm 5,78$	-954,65	26,55	-1,62	$\pm 0,90$	590,12	49%	12%
B11		-0,61	$\pm 1,93$	-237,04	19,54	-1,41	$\pm 0,91$	167,85	52%	10%
TOTAL		-6,06	$\pm 11,95$	-2242,67	105,60			1717,72	36%	13%

As geleiras DV2-B1, DV2-B2, DV2-B9, DV2-B10 e DV2-B11 apresentam valores próximos e em torno de $-1,5 \text{ m a}^{-1}$, indicando que estas geleiras estão em um balanço negativo e contribuindo com massa de gelo para o oceano. A maior contribuição é da Geleira Wright Ice Piemonte (DV2-B10), que apresenta um Bn total de $-954 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$. Esta é a única geleira desta área que apresenta flutuação média superior a 75 m/a em para o período de 1946 a 2000 (FERRIGNO *et al.*, 2006). Apesar da última mudança da linha de costa ter ocorrido em 1990, esta é a geleira com sinal de Bn específico mais intenso. Esta geleira apresenta alto valor de desvio na estimativa de perda de massa. Por ser uma geleira de piemonte apresenta em ambos os lados regiões de baixo contraste devido ao campo de neves, gerando áreas mal representadas pelos MDE (Figura 56).

A segunda maior contribuição em perda de massa é da Geleira Cayley (DV2-B1). Os MDEs utilizados neste par não compreenderam toda área desta geleira, sendo que uma mudança de elevação nos demais tributários desta bacia não foi representada. Sendo assim as estimativas de Bn e perda de massa podem estar subestimadas.

Apesar da grande área compreendida nesta análise, 1717 km^2 , sua contribuição em Gt é baixa ($2,12 \text{ Gt a}^{-1}$) quando comparada a outras áreas do lado leste da península, como por exemplo a área LA1, de área inferior (1080 km^2) mas com estimativa de $3,63 \text{ Gt a}^{-1}$.

4.7 Setor Costa de Danco

Este setor foi dividido em três áreas. Todos os pares analisados nestas três áreas apresentaram alguma presença de nuvem. As duas primeiras áreas situam-se mais ao centro da Costa de Danco, com descarga voltada para o Estreito de Gerlache. A última área situa-se no limite sul desta costa.

4.7.1 Área DN1

Esta área compreendeu 33 geleiras com descarga para o Estreito de Gerlache (figura 58). As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010, intervalo e 8,08 anos. A maior parte destas geleiras alcançam 100 km² de área. Este foi o par com as melhores qualidade de imagem para o lado oeste da PA, com quase nenhuma nuvem e um bom contraste. Um reflexo disso são os elevados valores médios de correlação para quase todas as geleiras.

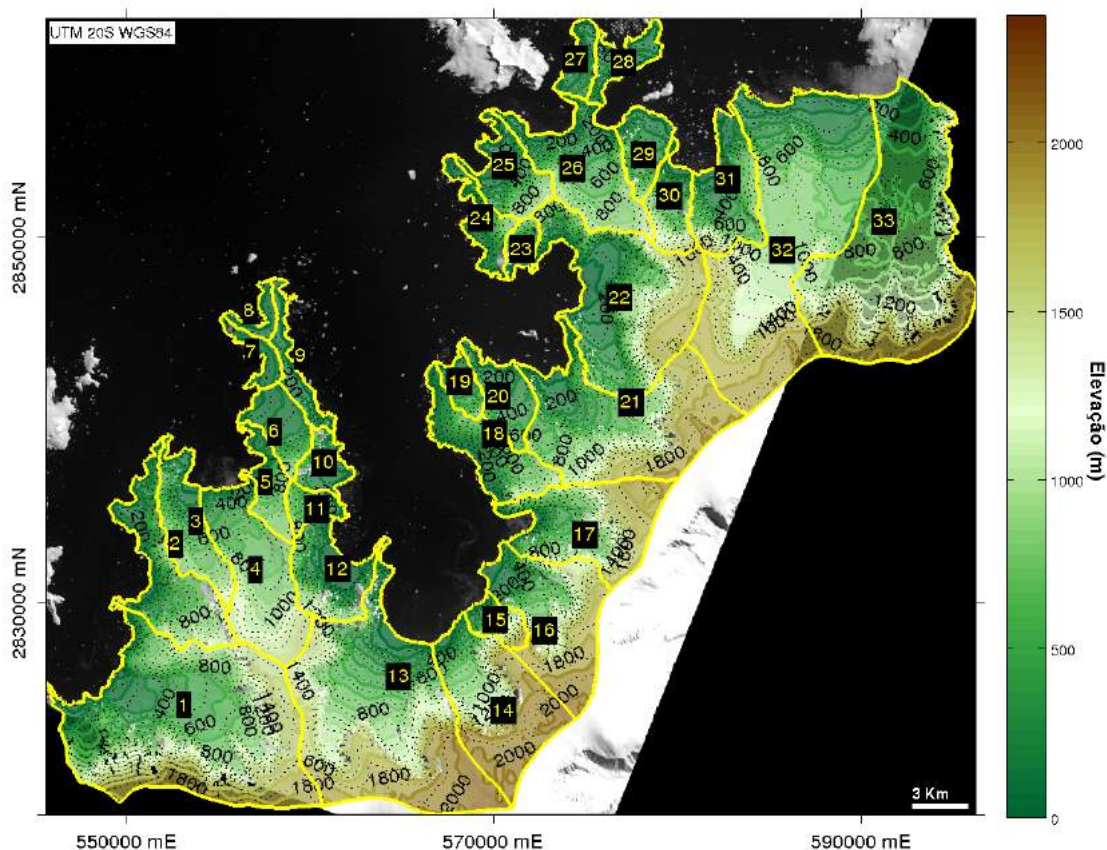


Figura 58: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição escala de cinza banda3 de imagem ASTER adquirida em 15/12/2010. Os números 1 a 33 correspondem as geleiras DN1-B1 a DN1-B33 mencionadas no texto.

Os gráficos para as 33 bacias apresentam valores variando de -1 a -2,5 m a^{-1} nas regiões mais baixas das geleiras e de maneira semelhante entre elas. Os gráficos para as 33 geleiras são apresentados no material em anexo. A figura 59 resume os valores calculados para a mudança média de elevação distribuído espacialmente pelas bacias de drenagem glacial. Os valores calculados foram aplicados para todos os pixels correspondentes ao intervalo. As estimativas de perda de massa e balanço de massa calculadas a partir destes valores são apresentadas na tabela 19.

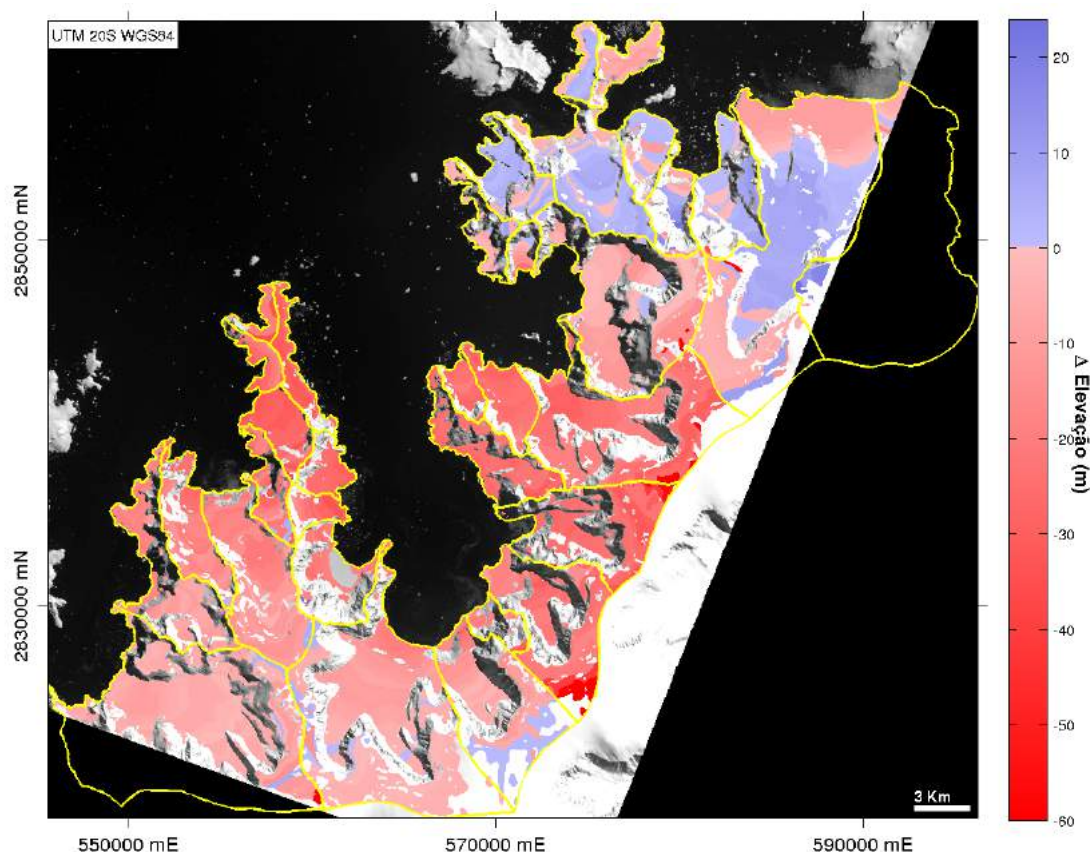


Figura 59: Diferença média de elevação em DN1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 15/12/2010 e de 7/11/2002. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

Para uma área total de 837,1 km^2 analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $4,92 \pm 2,62$ Gt para o período de 7 de novembro de 2002 e em 15 de dezembro de 2010. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre $-78,75$ e $8,56 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ e um balanço de massa específico entre $-3,32$ e $0,42 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 54% da área total, e 13% considerando apenas os pixels com correlação acima de 28% nos dois MDEs.

Todas as geleiras apresentaram baixo aporte de volume para o oceano, com um total de quase 5 Gt em 8 anos. Este aporte é ainda menor que a

Tabela 19: Variação em volume total de gelo na região DN1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 7 de novembro de 2002 e 15 de dezembro de 2010

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	33	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1		-0,30	±0,46	-40,64	2,12	-0,43 ±0,33		94,13	37%	19%
B2		-0,22	±0,14	-29,78	1,01	-1,25 ±0,61		23,85	57%	37%
B3		-0,26	±0,12	-35,59	1,06	-2,10 ±0,57		16,98	71%	31%
B4		-0,29	±0,21	-40,28	1,18	-1,24 ±0,98		32,46	51%	23%
B5		-0,14	±0,07	-19,83	1,18	-2,32 ±0,57		8,56	70%	34%
B6		-0,23	±0,09	-31,91	0,72	-3,09 ±0,53		10,32	81%	36%
B7		-0,09	±0,05	-12,90	0,43	-2,89 ±0,50		4,46	92%	55%
B8		-0,07	±0,04	-9,31	0,40	-2,85 ±0,77		3,26	85%	47%
B9		-0,18	±0,08	-24,38	0,66	-3,32 ±0,39		7,35	80%	36%
B10		-0,11	±0,04	-14,54	0,46	-2,32 ±0,93		6,27	64%	33%
B11		-0,09	±0,03	-12,07	0,56	-2,24 ±1,15		5,40	59%	20%
B12		-0,15	±0,06	-19,97	1,16	-1,46 ±1,07		13,67	34%	13%
B13		-0,32	±0,26	-43,44	1,82	-0,57 ±0,74		75,88	39%	16%
B14		-0,12	±0,07	-16,30	0,98	-0,52 ±1,05		31,64	27%	12%
B15		-0,03	±0,01	-4,17	0,38	-0,72 ±1,56		5,76	19%	9%
B16		-0,23	±0,07	-31,47	1,17	-0,95 ±1,69		33,05	24%	10%
B17		-0,32	±0,08	-43,58	1,41	-1,38 ±1,64		31,62	20%	11%
B18		-0,40	±0,11	-55,01	1,01	-2,89 ±0,29		19,04	59%	40%
B19		-0,10	±0,02	-13,55	0,45	-2,59 ±0,49		5,24	74%	41%
B20		-0,23	±0,08	-31,79	0,79	-2,74 ±0,38		11,62	84%	36%
B21		-0,57	±0,19	-78,75	1,29	-1,42 ±1,35		55,50	36%	19%
B22		-0,19	±0,25	-25,86	1,87	-0,49 ±0,59		53,00	40%	19%
B23		-0,02	±0,01	-2,46	0,35	-0,67 ±1,03		3,70	46%	33%
B24		-0,02	±0,04	-2,38	0,59	-0,31 ±0,41		7,58	43%	30%
B25		-0,01	±0,01	3,59	0,81	0,26 ±0,35		13,91	67%	44%
B26		-0,01	±0,03	2,76	1,09	0,10 ±0,43		27,53	40%	20%
B27		0,00	±0,02	0,80	0,41	0,15 ±0,29		5,44	95%	66%
B28		-0,04	±0,06	-5,22	0,59	-0,69 ±0,26		7,53	77%	42%
B29		-0,01	±0,04	-1,02	0,82	-0,11 ±0,47		9,46	69%	29%
B30		-0,01	±0,02	-1,38	0,74	-0,14 ±0,80		10,11	21%	9%
B31		0,00	±0,01	8,56	0,99	0,42 ±0,52		20,18	56%	33%
B32		-0,14	±0,15	2,94	3,01	0,03 ±0,80		97,26	52%	15%
B33		-0,01	±0,01	12,10	2,51	0,14 ±1,51		85,36	3%	1%
TOTAL		-4,92	±2,62	-616,8	34,01	-0,74		837,1	54%	28%

contribuição estimada para áreas DV2. A Geleira Nobile (DN1-B21) foi a que apresentou maior perda de volume. Ao analisar estes valores na tabela em conjunto com a figura 59, pode-se perceber um aumento da intensidade de Bn específico a partir da bacia DN1-B1 até a bacia DN1-B9. Em seguida há um decréscimo até a bacia DN1-B16, seguido novamente por um aumento e posterior decréscimo. Isto torna-se ainda mais claro na Figura 59, em que as geleiras com descarga para as regiões mais confinadas das enseadas apresentam uma menor mudança negativa. Este é o caso das Geleiras Leonard (DN1-BB1 -0,43 m e.a./a), Geleira Renard (DN1-B13 e DN1-B14, -0,57 e -0,52 m e.a./a), e também a Geleira Wellman (DN1-B22 -0,49 m e.a./a). As geleiras mais próximas aos dois pontais ao sul, maior a intensidade de mudança negativa, como no caso das Geleiras Bayly (DN1-B4 -1,24 m a⁻¹, ligeiramente mais intenso), Geleira Krebs (B16 -0,96 m e.a./a), e Geleira Nobile (B21 -1428 m e.a./a). Já a partir do terceiro pontal, mais ao norte, as geleiras apresentam baixo valor ou até valores positivos, como é o caso das bacias DN1-B30 e DN1-B31 (áreas muito pequenas mas com sinal positivo), e a geleira Blériot (DN1-BB32).

4.7.2 Área DN2

Esta área também encontra-se inserida no Estreito de Gerlache, e é composta por imagens adquiridas em 24 janeiro de 2003 e em 24 novembro de 2006, intervalo temporal de 3,83 anos. Apesar de abranger sete bacias (DN2-B1 a DN2-B7), as bacias DN2-B6 e DN2-B7 foram mal amostradas devido à presença de nuvem na imagem de 2006, tendo apenas seus primeiros intervalos considerados (figura 60). A bacia DN2-B1 compreende uma pequena área da Geleira Leonard (DN1-B1) abordada na área DN1, mas apenas 9,84 dos 94 km² totais da área.

A figura 61 ilustra espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Observa-se que os valores estimados para a Geleira Leonard (DN2-B1) representam apenas uma pequena geleira tributária a oeste do fluxo principal. A Geleira Woodbury (DN2-BB5) apresentou valores apenas para o lado leste da bacia, onde um vale de geleira é identificável.

A figura 62 mostra os gráficos de m.m.a.e. para as geleiras DN2-B1 a DN2-B4. Os quatro gráficos parecem apresentar valores sobre-estimados para as mudanças médias de elevação. Isto é corroborado pelo fato dos valores decrescerem com o aumento da altitude. As duas imagens apresentaram cobertura de nuvem, principalmente a imagem mais antiga, com grande cobertura de nuvem próximo às geleiras.

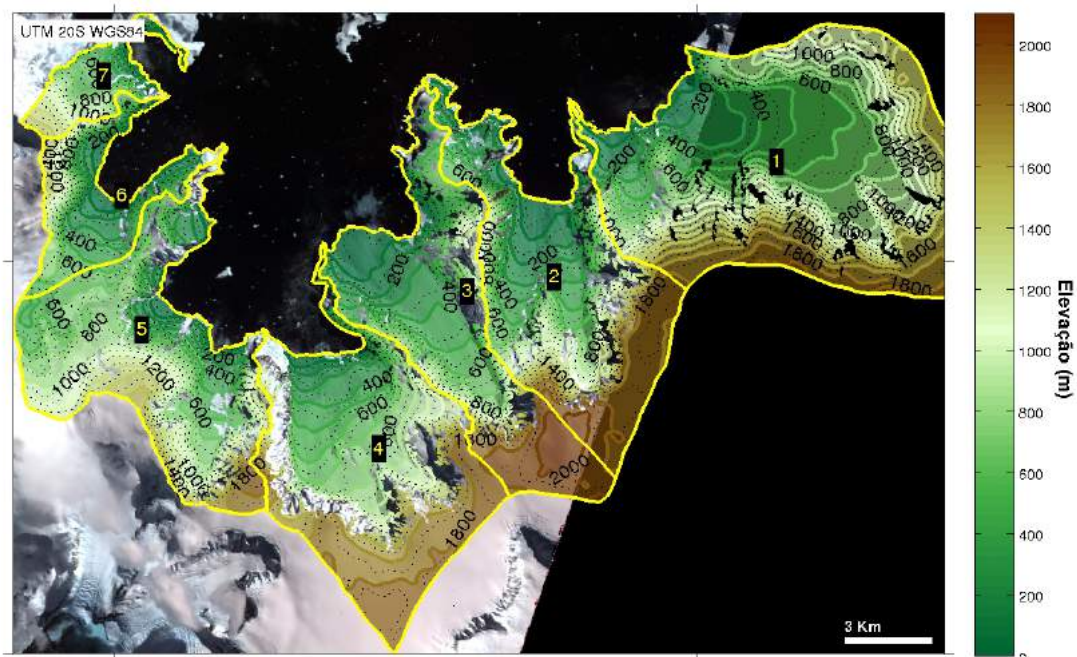


Figura 60: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 24/11/2006. Os números 1 a 7 correspondem as geleiras DN2-B1 a DN2-B7 mencionadas no texto.

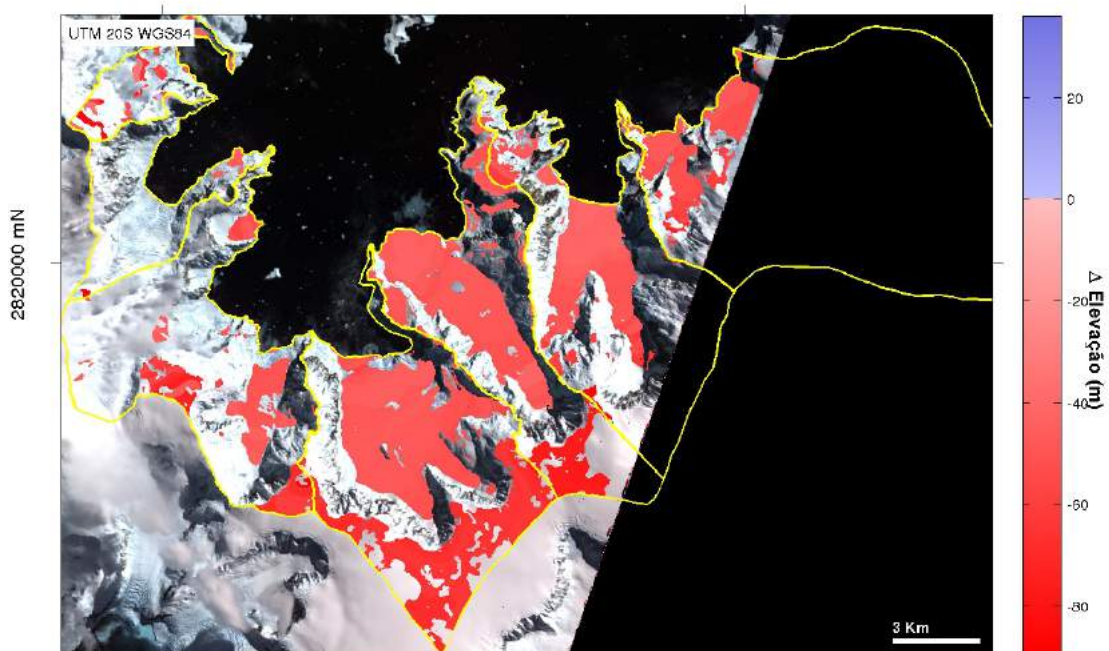


Figura 61: Diferença de elevação em DN2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 24/11/2006 e de 24/02/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

Os gráficos mostram valores elevados de mudança em elevação. Nota-se para Geleira Blanchard que a intensidade na m.m.a.e. aumenta geleira acima, o que pode ser explicado pela redução de área. Mesmo considerando que estimativas para as regiões mais altas estão sujeitas a uma menor exatidão, vale ressaltar os

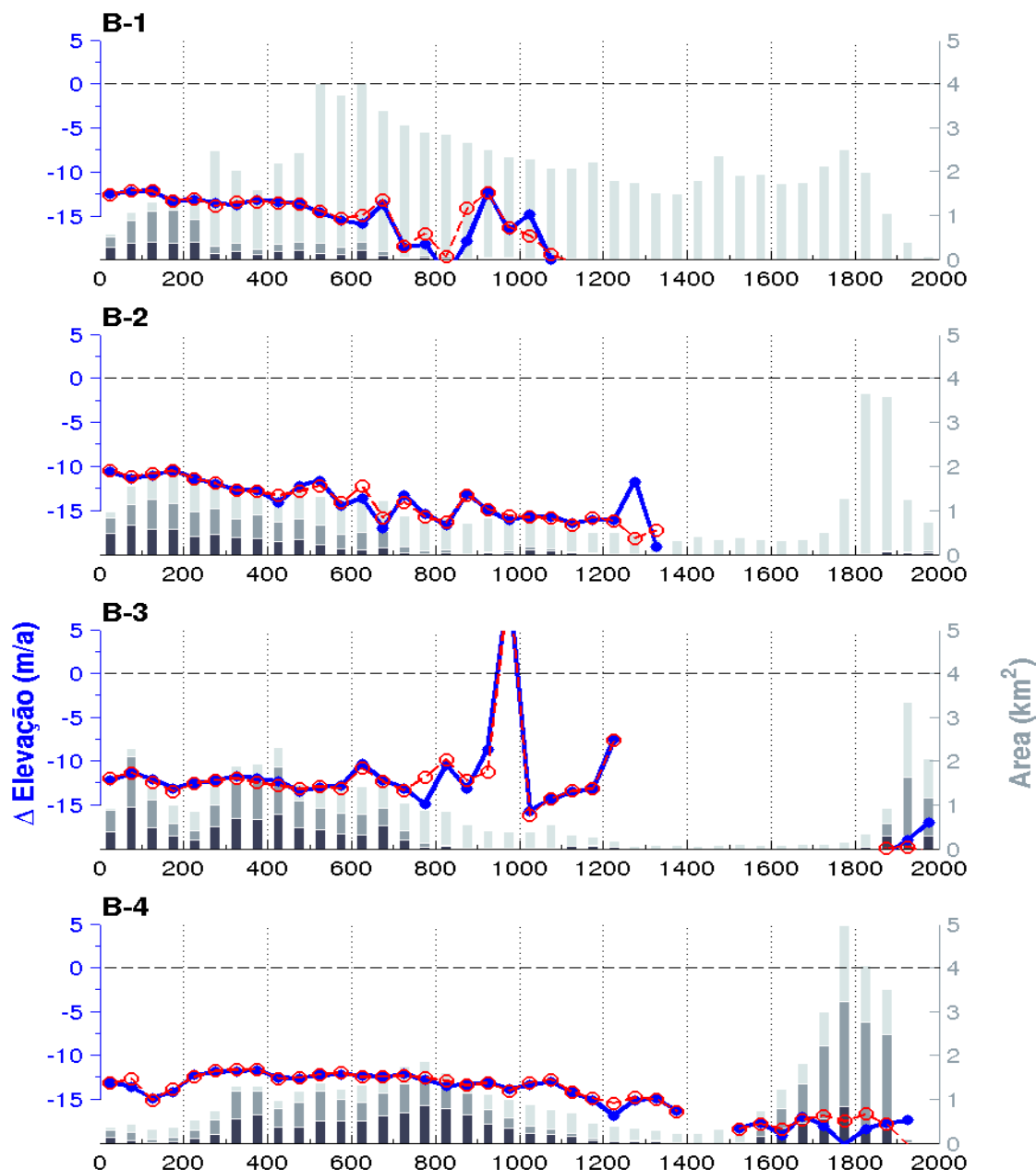


Figura 62: Mudança média anual em elevação para as geleiras DN2-B2 a DN2-B4 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

altos valores nas regiões altas das Geleiras Rozier e Montgolfier. Porém devido aos altos desvios padrões estas regiões foram desconsideradas. Comparando os valores encontrados para a porção da frente da Geleira Leonard (ainda que em pequena áreas) com a área DN1, nota-se uma incoerência. O par analisado nesta área apresenta valores muito maiores e em um menor intervalo de tempo. Isto pode ser explicado pela mudança mais significativa no terreno da geleira ter ocorrido nos primeiros anos a partir de 2002. Uma vez que este par compreende um período de

início de 2003 a 2006, houve registro desta maior mudança. Para o segundo par, que compreende um período maior (final de 2002 a 2010), este valor de mudança foi dividido por um maior intervalo temporal. Isto significa que a mudança maior na elevação ocorreu de 2002 a 2006, com menor mudança de 2006 a 2010. Para verificar a confiabilidade destes valores, foi realizada uma comparação entre os valores de elevação dos dois MDEs utilizados com a área de intersecção do MDE de 2010 utilizado na área DN1. O perfil foi extraído através do software ENVI®. A figura 63 mostra a diferença destes valores; a maior diferença entre os MDEs é entre 2003/2006, quase não havendo diferença entre 2006/2010.

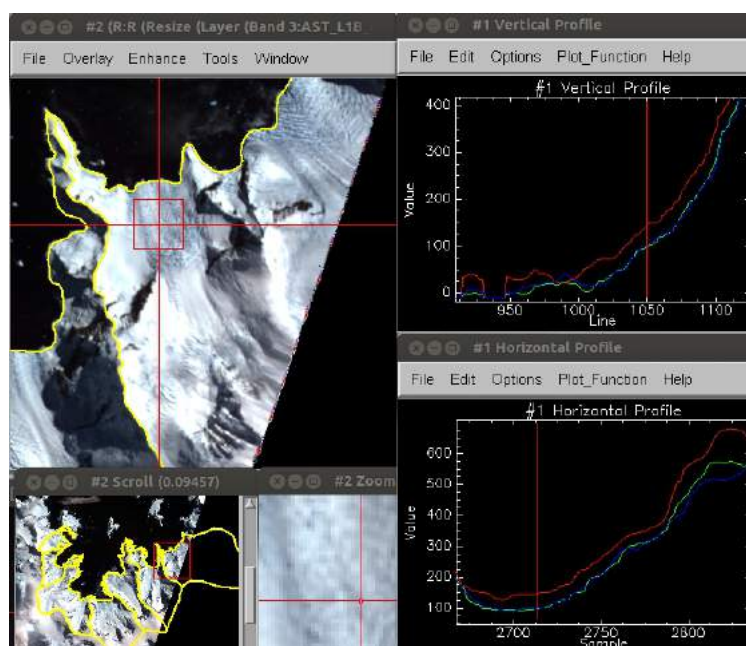


Figura 63: Comparação entre MDE de imagens de 2003 (vermelho), 2006 (verde) e 2010 (azul). A maior diferença de elevação é entre 2003 e 2006.

Porém ao comparar os valores do MDE de 2003 com a área de intersecção do MDE de 2002 da área DN1, nota-se que os valores são mais elevados para o MDE de 2003. Há possibilidade dos valores de 2003 estarem sobre-estimados, provavelmente pela grande presença de nuvem nesta imagem. Esta interferência parece ocorrer a partir de um percentual mínimo de cobertura de nuvem, induzindo a sobre-estimativa dos valores em sua fase de pós-processamento do programa AsterDTM. Uma maior investigação e testes são necessários. A tabela 20 resume as estimativas para as bacias desta área.

Tabela 20: Variação em volume total de gelo na região DN2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 janeiro de 2003 e em 24 novembro de 2006.

B1	-0,77	±0,13	-221,85	3,94	-2,682 ±10,77	82,71	7,4%	3,1%
B2	-0,61	±0,12	-177,72	2,18	-4,191 ±7,66	42,41	24,9%	10,7%
B3	-0,94	±0,23	-272,84	2,62	-7,839 ±4,41	34,80	48,3%	21,0%
B4	-1,07	±0,16	-310,72	2,65	-6,723 ±5,96	46,22	40,2%	19,5%
B5	-0,97	±0,18	-281,27	5,55	-6,545 ±5,86	42,98	12,8%	4,5%
B6	-0,14	±0,03	-41,18	2,58	-2,575 ±9,10	15,99	2,7%	1,2%
B7	-0,04	±0,01	-10,19	0,63	-1,180 ±9,89	8,63	3,8%	2,6%
TOTAL	-4,55	±0,85	-1315,77	20,15		273,74	20,0%	8,9%

4.7.3 Área DN3

A terceira área está localizada ao sul da Costa de Danco (figura 64). As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 24 de janeiro de 2003 e 8 de janeiro de 2005, intervalo de 2 anos. Este par de imagem apresentava grande quantidade de nuvens, ainda assim foi escolhido utilizá-lo para avaliar o aproveitamento destas imagens com grande cobertura de nuvens. Das seis bacias de drenagem representadas neste par, apenas a Geleira Talbot (DN3-B1), Geleira Archer (DN3-B2) e Geleira Sayce (DN3-B3) serão apresentadas a seguir, por apresentares dados para um maior numero de intervalos de altitude.

A figura 65 ilustra espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Como comentado, a grande cobertura de nuvem limitou as estimativas a partir de intervalos variando de 400 a 700 m, dependendo da geleira. Observou-se exclusivamente valores negativos para mudança de elevação entre os MDEs.

A figura 66 ilustra os gráficos de m.m.a.e. por intervalo para as geleiras DN3-B1 a DN3-B3. Os valores estimados foram os mais intensos para os setores do lado oeste. Apesar da grande cobertura de nuvem, vale ressaltar que a maior presença de nuvens ocorreu na imagem mais recente (2005), havendo portanto um deslocamento do MDE devido à presença de nuvem. Devido a isso seria esperada uma tendência para estimativas positivas, como é observado nos primeiros intervalos de altitude nos gráficos. Desta maneira, pode-se considerar que o intervalo temporal da análise compreende um período com maiores mudanças, do mesmo modo como na área DN2.

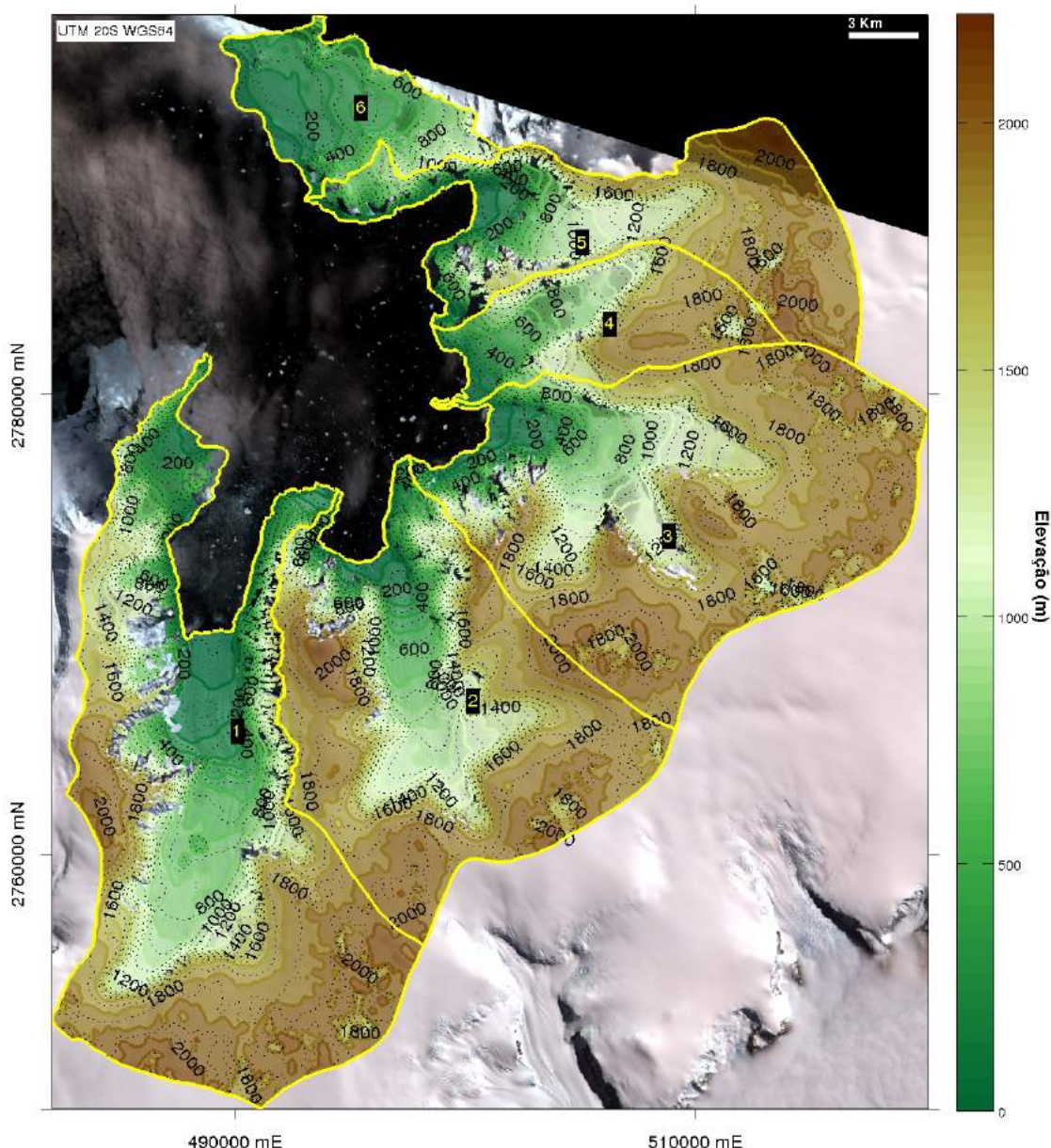


Figura 64: Representação das geleiras analisadas na área N1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 24/01/2003. Os números 1 a 6 correspondem as geleiras DN3-B1 a DN3-B6 mencionadas no texto.

Para uma área total de 835,1 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $6,56 \pm 1,60$ Gt para o período de 24 de janeiro de 2003 e de 8 de janeiro de 2005. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -1283 e $-84 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre $-5,95$ e $-1,80$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 11% da área total, e 5% considerando apenas os pixels com correlação acima de 28% nos dois MDEs. As estimativas para todas as bacias são apresentadas na tabela 21.

Os valores de perda de massa para esta área são maiores que para as outras deste setor. Com uma área equivalente à área DN1, o aporte de massa

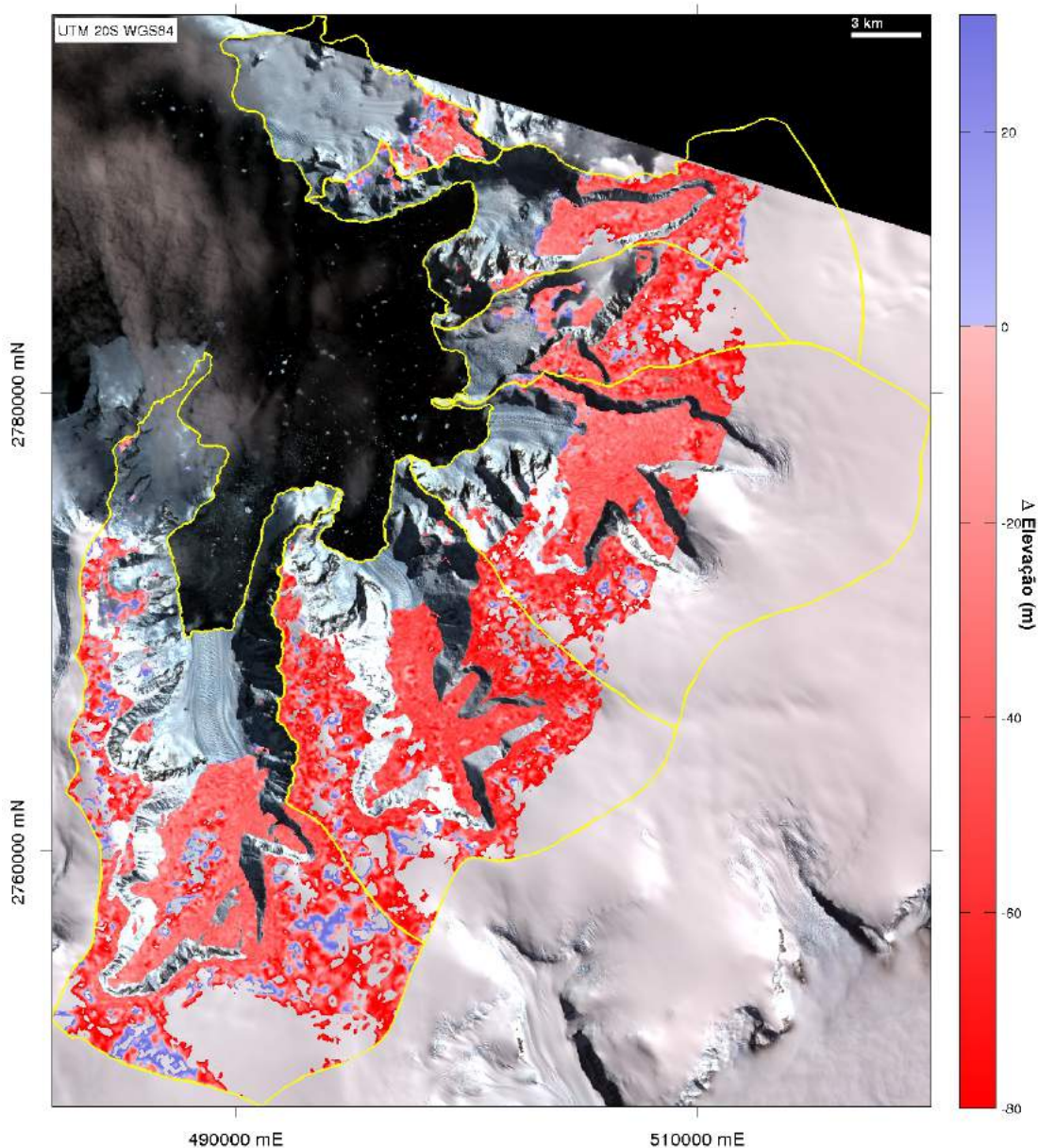


Figura 65: Diferença de elevação em DN3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 8/01/2005 e de 24/01/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

chegou a 6 Gt em dois anos. O maiores valores de Bn específico são das três primeiras geleiras, o que pode também ser explicado pelo fato de terem um maior número de intervalos estimados. Mas o valor de Bn específico é de todo modo bastante alto, comparável aos encontrado para as Geleiras mais dinâmicas das antigas plataformas de gelo Larsen A e Larsen B. Nota-se porém que as áreas foram pouco cobertas pelo MDE, com apenas 11% dos pixels, e um número muito menor (5%) considerando os pixels filtrados com 85% de correlação.

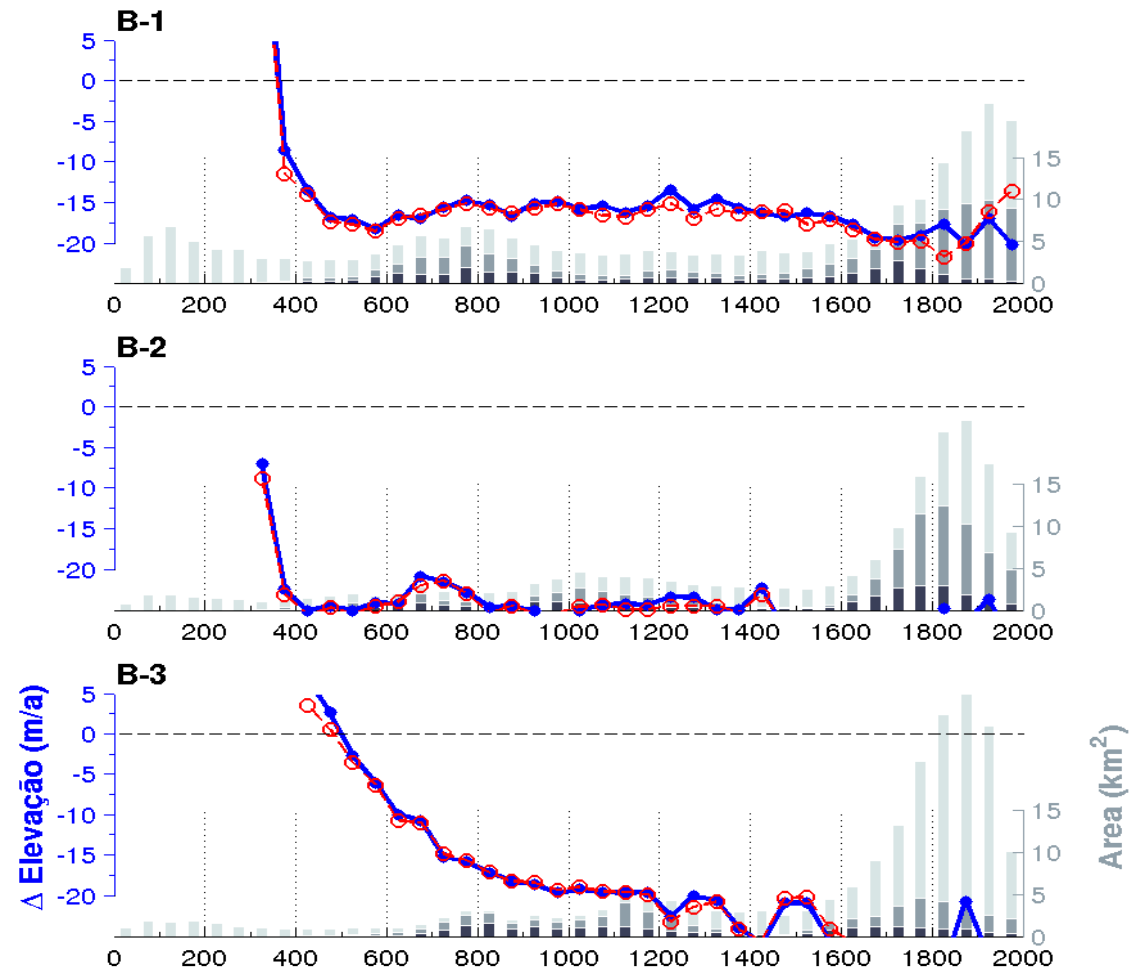


Figura 66: Mudança média anual em elevação para as geleiras DN3-B1 a DN3-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 21: Variação em volume total de gelo na região DN3, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 de janeiro de 2003 e de 8 de janeiro de 2005.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	6	Total	Desvio pa- drão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1		-2,26	±0,64	-1283,04	12,96	-5,449	±10,78	235,46	15%	6%
B2		-1,93	±0,30	-1095,60	8,59	-5,953	±18,42	184,05	12%	5%
B3		-1,44	±0,34	-814,26	7,91	-3,800	±15,24	214,27	14%	6%
B4		-0,33	±0,15	-186,66	6,79	-3,261	±11,40	57,25	9%	4%
B5		-0,46	±0,10	-258,35	4,53	-2,667	±14,40	96,86	10%	4%
B6		-0,15	±0,06	-84,80	2,16	-1,796	±13,15	47,22	9%	6%
TOTAL		-6,56	±1,60	-3722,7	43,0			835,1	11%	5%

4.8 Setor Costa de Graham

Este setor apresenta quatro áreas analisadas. O terceiro e quarto par compreendem a porção mais sul da Costa de Graham e apresentam sobreposição de geleiras. Essas duas áreas serão apresentadas juntas no último tópico.

4.8.1 Área G1

Esta área está no limite norte da costa de Graham. As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 19 de setembro de 2005 e 27 de fevereiro de 2009, intervalo de 3,42 anos. Abrange no total 19 bacias de drenagem (figura 67), sendo as principais (em termos de área) as Geleiras Funk (B1), Lever (B2), Trooz (B11), Bussey (B12), Wiggins (B13), Hotine (B14), e Daguerre e Niépce (B19).

A figura 68 apresenta espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros, antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. Visualmente nota-se que valores negativos restringem-se às regiões mais baixas e de frente das geleiras, sendo valores positivos encontrado nas porções mais altas, principalmente na geleira G1-B19. Nota-se que as geleiras G1-B3 a G1-B8 possuem pequena área e foram pouco amostradas pelos MDEs.

Para uma área total de 1611,7 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $1,93 \pm 4,37$ Gt para o período avaliado. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -230,20 e 178,78 10^6 m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre -2,12 e 1,15 m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 44% da área total, e 22% considerando apenas os com correlação acima de 28% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela 22. Os valores de perda de massa indicam uma baixa contribuição desta área ao aporte de massa para a região, ainda que pela grande área que abrange. Menores valores de Bn específico e alguma perda de massa ocorre nas Geleiras G1-B11 a G1-B13, talvez por estas estarem sujeitas a uma maior ação das forças oceânicas de remoção de massa.

A geleira G1-B1 apresentou um Bn específico positivo, e a geleira ao lado, G1-B2, apresentou um valor bem próximo a zero. Pode-se notar que a Geleira Lever (B2) apresentou valores positivos em sua frente, e negativos posteriormente (gráficos na figura 69). Ao analisar a imagem com os valores de diferença de elevação entre os MDEs (figura 68), nota-se que a distribuição dos valores positivos ocorre na parte baixa e da frente de geleira. Valores mais negativos ocorrem nos

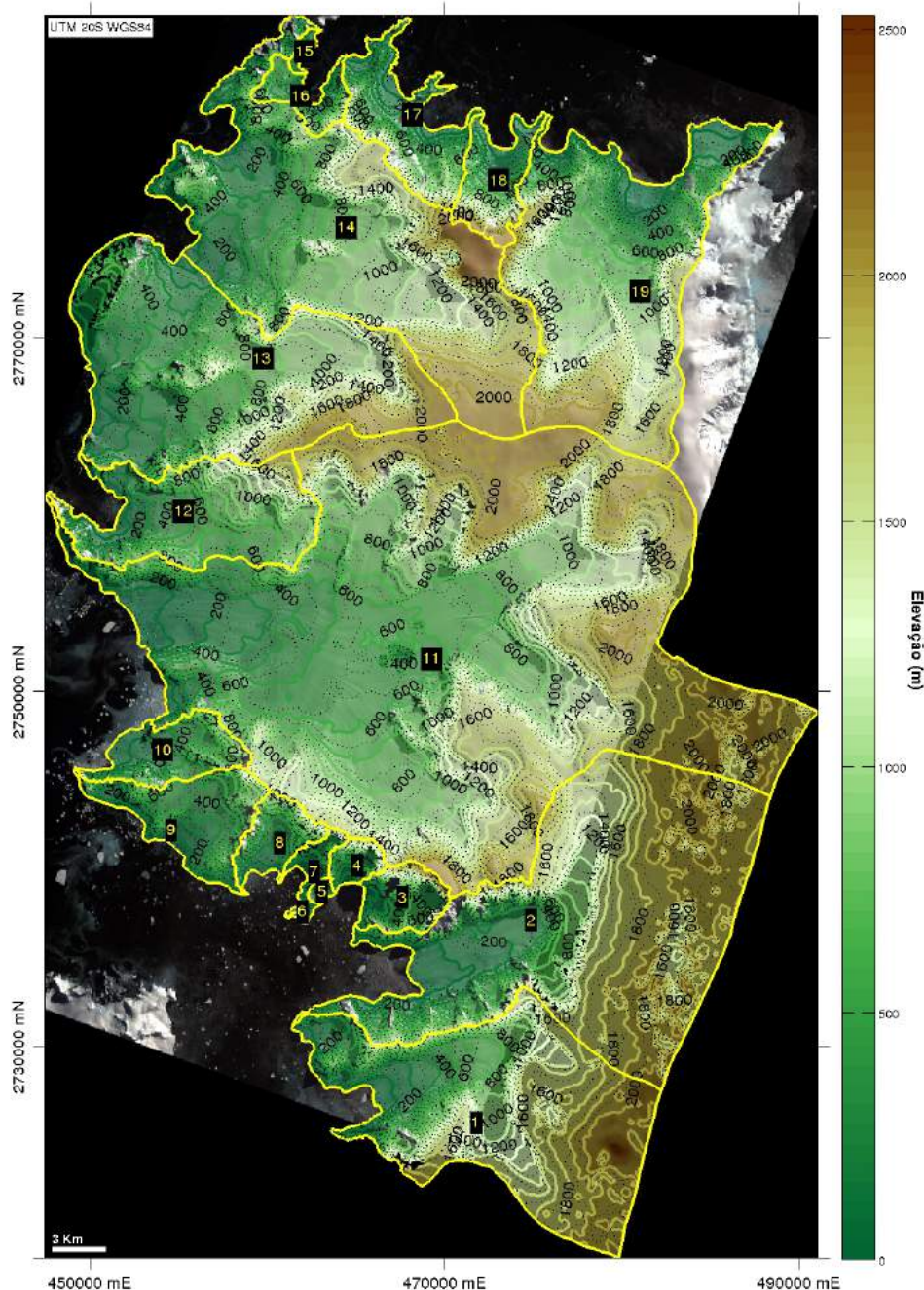


Figura 67: Representação das geleiras analisadas na área G1. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 27/02/2009. Os números 1 a 19 correspondem as geleiras G1-B1 a G1-B19 mencionadas no texto.

vales de pequenas geleiras à esquerda do fluxo central da Geleira Lever. Essas áreas que contribuem para os valores negativos no gráfico após os valores positivos. Algumas geleiras apresentam em média flutuações positivas (G1-B2, G1-B8, G1-B10, G1-B11, G1-B14, G1-B17), sendo que para a G1-B1 ocorre um avanço médio superior a 200 m a^{-1} durante o período de 1946 a 2001, como observado por FERRIGNO *et al.* (2006). Uma possível explicação seria que as forçantes da ablação atuando nas frentes das geleiras são inferiores ao fluxo de massa drenado das

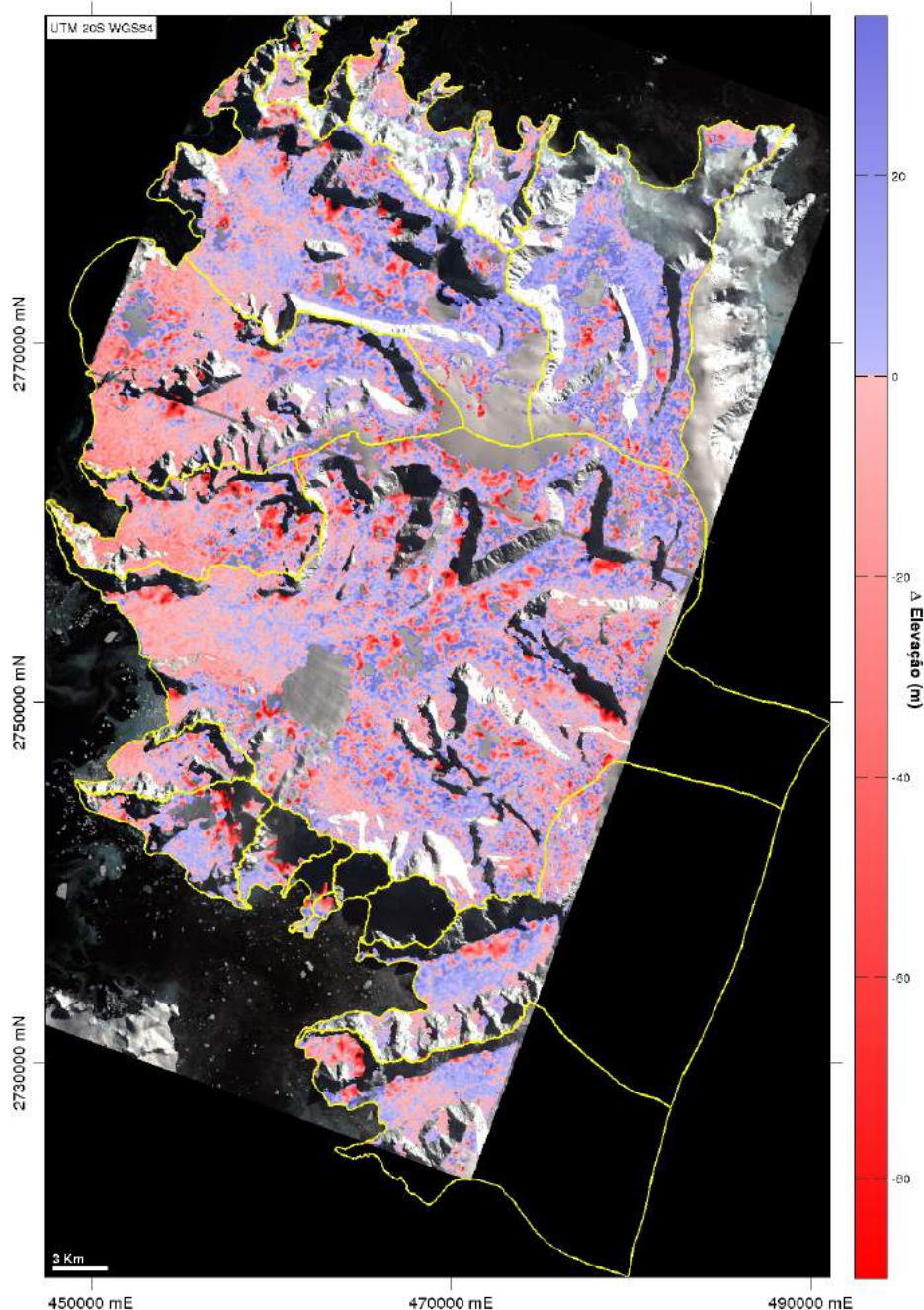


Figura 68: Diferença de elevação em G1, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/02/2009 e de 19/09/2005. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

regiões mais altas, acumulando-se à frente e/ou avançando às frentes de geleira. Neste caso, devido ao fato de estas duas geleiras estarem mais confinadas, elas apresentariam um balanço de massa positivo. Já as demais geleiras por apresentarem maior área de frente talvez estejam mais exposta às ações das forças marinhas (que atuam removendo massa de gelo permitindo que o fluxo de massa para o oceano ocorra), explicando assim um balanço negativo (G1-B2, G1-

Tabela 22: Variação em volume total de gelo na região G1, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 19 de setembro de 2005 e 27 de fevereiro de 2009

Bacias 16	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)		
	Total	Desvio pa- drão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1	-0,03	±0,13	15,18	6,24	0,108 ±0,77		140,24	21%	9%
B2	-0,13	±0,57	-13,05	9,33	-0,060 ±0,88		218,03	18%	9%
B6	0,00	±0,00	2,36	0,35	2,924 ±0,24		0,81	98%	72%
B7	0,00	±0,00	4,55	1,78	0,812 ±1,79		5,61	17%	6%
B8	-0,01	±0,02	4,05	2,99	0,307 ±1,23		13,21	32%	11%
B9	-0,01	±0,05	19,36	4,51	0,594 ±0,53		32,60	54%	22%
B10	-0,06	±0,11	-19,28	2,36	-0,896 ±1,02		21,51	55%	24%
B11	-0,24	±1,25	-33,23	12,20	-0,061 ±0,50		547,98	49%	21%
B12	-0,43	±0,52	-137,69	4,34	-2,119 ±1,08		64,98	70%	33%
B13	-0,78	±0,84	-230,20	6,81	-1,423 ±1,77		161,74	57%	26%
B14	-0,08	±0,42	35,12	7,38	0,189 ±0,98		186,02	48%	21%
B15	-0,01	±0,01	-1,86	0,49	-1,136 ±1,16		1,64	36%	27%
B16	-0,03	±0,06	-10,19	2,16	-0,969 ±0,66		10,51	32%	18%
B17	0,00	±0,00	0,00	0,00	0,000 #DIV/0!		33,85	0%	0%
B18	-0,02	±0,05	0,27	2,06	0,015 ±1,06		18,35	37%	18%
B19	-0,05	±0,24	178,78	31,51	1,156 ±1,50		154,61	35%	16%
TOTAL	-1,87	±4,25	-185,8	94,5			1611,7	41%	21%

B8, G1-B10, G1-B11, G1-B14, G1-B17).

A geleira G1-B19 apresentou maior balanço positivo (o maior valor para a geleira G1-B6 foi desconsiderado devido à sua pequena área) destes setores. O gráfico para esta geleira mostra valores negativos de mudança em elevação apenas nos primeiros intervalos de altitude, sendo positivo nos demais intervalos (figura 69).

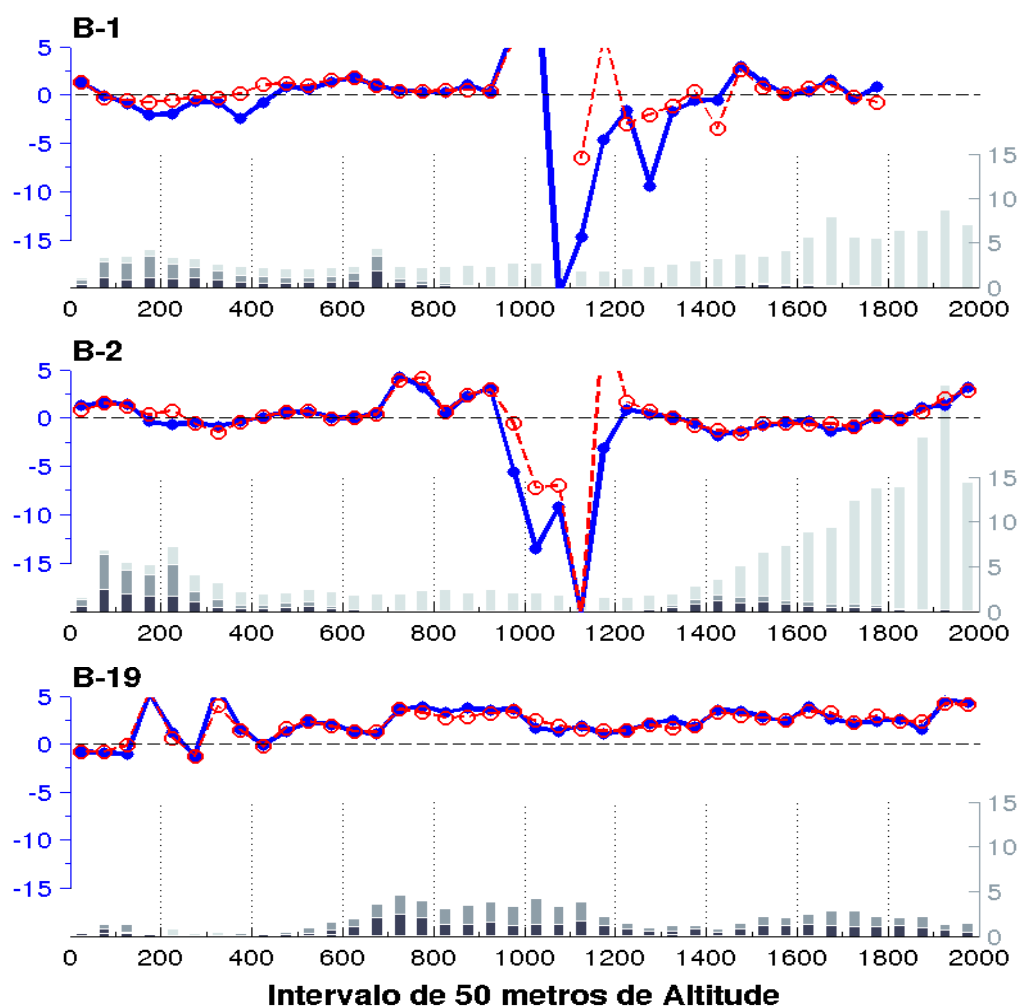


Figura 69: Mudança média anual em elevação para as geleiras G1-B1, G1-B2 e G1-B19 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

4.8.2 Área G2

A segunda área compreendeu três geleiras, Geleira Comrie (G2-B1), Geleira Luke (G2-B2) e Geleira Cadman (G2-B3) (figura 70). As imagens utilizadas para análise desta área foram adquiridas em 24 janeiro de 2003 e de 27 fevereiro de 2009, intervalo de 6,08 anos.

A figura 71 ilustra espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude. São observados valores positivos na porção mais baixa da geleira G2-B1. Valores negativos intensos ocorrem principalmente na região de platô das 3 geleiras. Estes

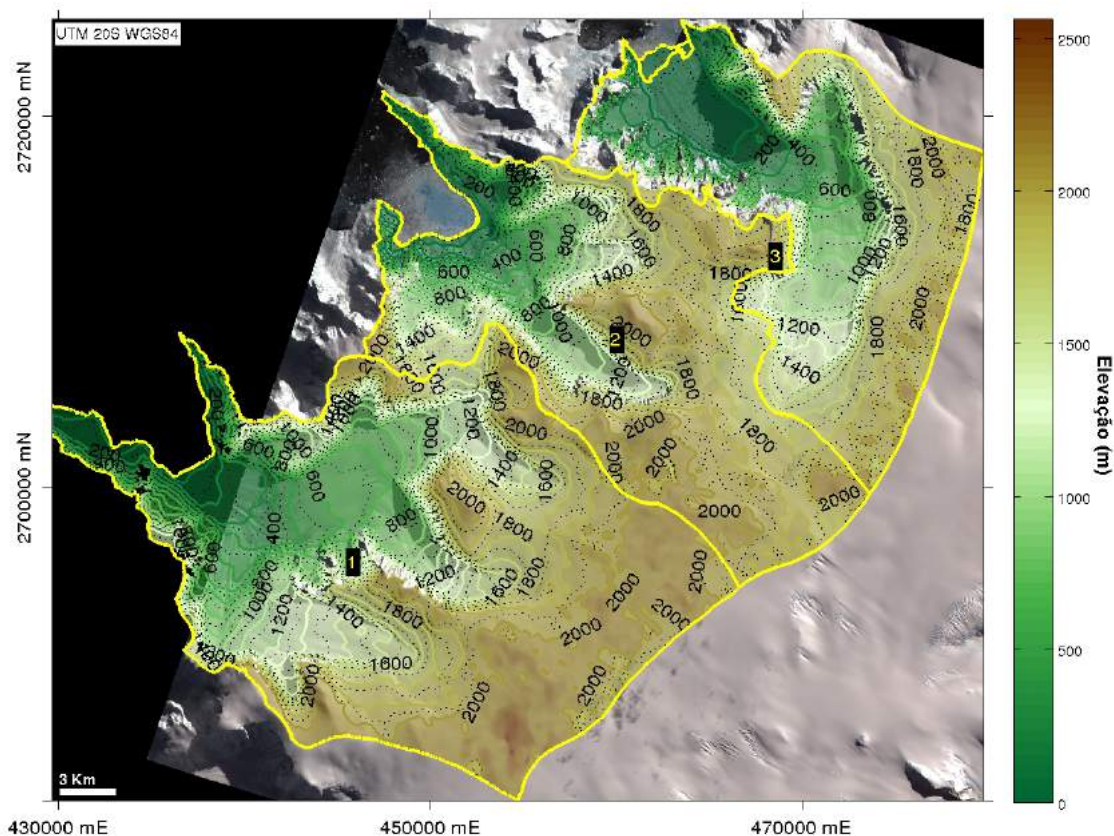


Figura 70: Representação das geleiras analisadas na área G2. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 27/02/2009. Os números 1 a 3 correspondem as geleiras G2-B1 a G2-B3 mencionadas no texto.

valores são devido a um menor contraste da imagem mais antiga, 2003, nas regiões cobertas por neve. O MDE da imagem de 2003 apresentou menores valores de correlação dos pixels nas regiões altas do platô, portanto a elevação nestas áreas foram provavelmente sobre-estimados. Estes valores ocorrem na região mais alta do vale da geleira G2-B3.

Os gráficos de m.m.a.e. por intervalos demonstram um padrão de aumento negativo das mudanças de elevação em função do aumento a altitude (figura 72). Este fato ocorre, como explicado acima, devido ao MDE de 2003 sobre-estimar as elevações nas regiões de platô.

Para uma área total de 895 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $6,48 \pm 3,18$ Gt para o período de 24 janeiro de 2003 e de 27 fevereiro de 2009. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -602 e $-227 \cdot 10^6$ m³ a⁻¹ e um balanço de massa específico entre $-2,51$ e $-0,60$ m a⁻¹. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 31% da área total, e 13% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela 23

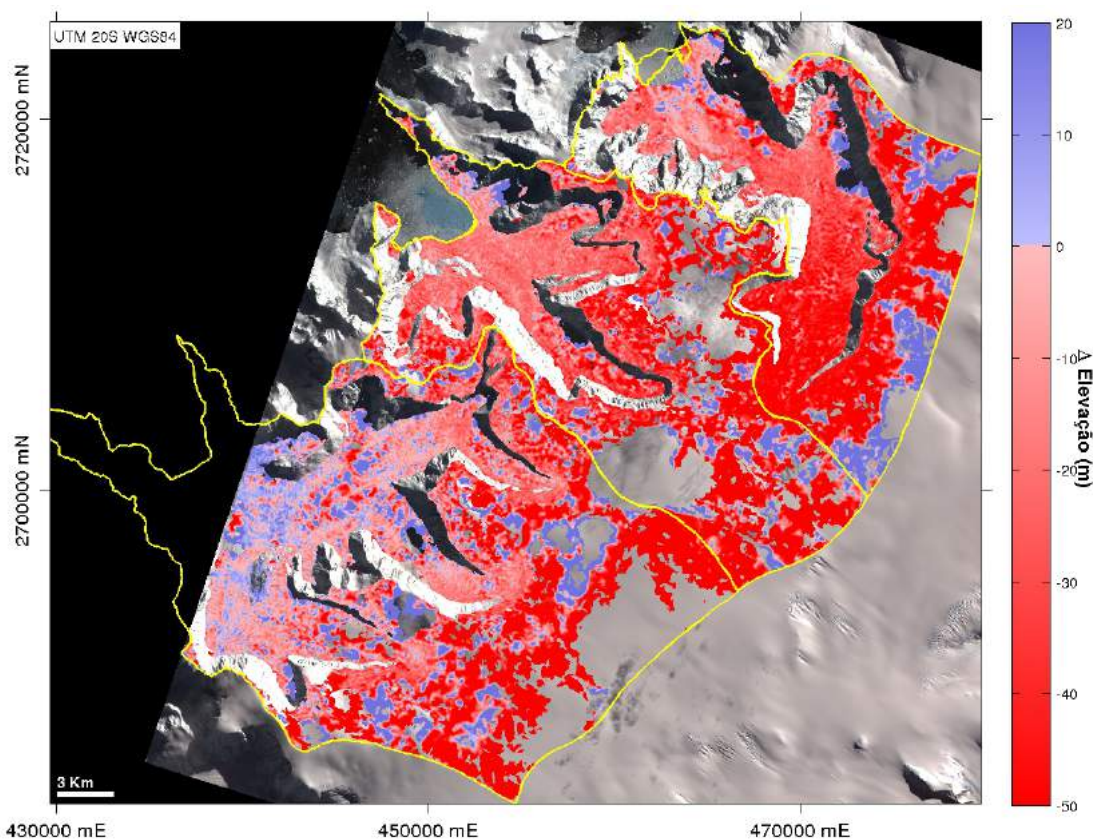


Figura 71: Diferença de elevação em G2, a partir de valores filtrados, entre imagens de 27/02/2009 e de 24/01/2003. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial e área de retração da respectiva bacia.

A três geleiras apresentaram um Bn específico negativo, sendo a da Geleira Cadman (G2-B3) o sinal mais intenso. Essas duas apresentaram uma mudança média de avanço da linha de costa para o período de 1946 a 2000 (FERRIGNO *et al.*, 2006) o que explicaria o maior valor de Bn. Esta geleira tem sua descarga para uma enseada diferente das duas primeiras bacias. Uma diferença em sua morfologia e outros fatores que influenciam sua dinâmica, como a batimetria a frente da geleira, podem ser a causa deste sinal mais intenso. Os valores estimados para as duas primeiras geleiras são próximos entre si, mas um pouco maior para a Geleira Comrie (B1). Porém esta geleira teve parte de sua área não compreendida. Uma explicação para valores de mudanças ligeiramente positivos na frente desta geleira pode ser a retração da linha de encalhe desta geleira. No entanto, Ferrigno *et al.* (2006) não relata variação na linha de costa nesta área. É mais provável portanto que as variações detectadas para estas áreas sejam tão pequenas quanto ao limite de exatidão do AsterDTM.

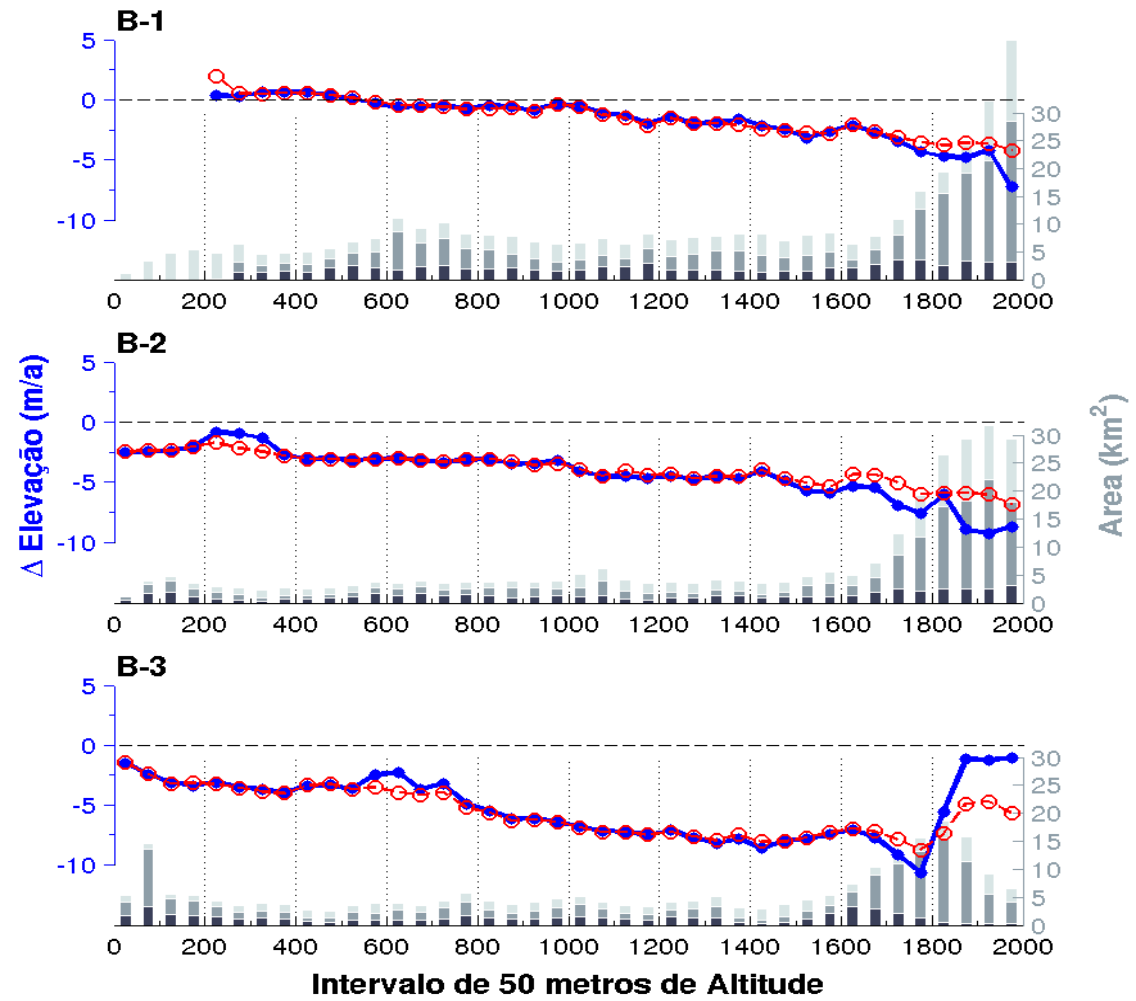


Figura 72: Mudança média anual em elevação para as geleiras G2-B1 a G2-B3 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Tabela 23: Variação em volume total de gelo na região G2, balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 24 janeiro de 2003 e de 27 fevereiro de 2009.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	3	Total	Desvio padrão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B1		-1,32	±1,46	-227,24	5,54	-0,602 ±1,14		377,67	34%	14%
B2		-1,85	±0,71	-337,01	3,61	-1,211 ±2,30		278,33	23%	11%
B3		-3,31	±1,01	-602,44	4,03	-2,511 ±2,96		239,94	37%	15%
TOTAL		-6,48	±3,18	-1166,7	13,18			895,9	31%	13%

4.8.3 Área G3 e Área G4

As duas áreas compreendem a porção mais ao sul da Costa de Graham e apresentam sobreposição de geleiras. A área G3 abrange dez bacias ao norte da Geleira Hugli (B11), não incluídas na área G4. A área G4 compreende duas geleiras ao sul do Piemonte de Gelo Widmark (B20), a Geleira Erskine (B21) e uma geleira menor não nomeada (B22). Essas três últimas estão ao sul do Cabo Bellue e fazem parte da Costa Loubt, mas serão apresentadas neste setor por questões práticas. As imagens utilizadas para análise da área G3 foram adquiridas em 4 janeiro de 2001 e 1 de fevereiro de 2006, intervalo de 5 anos (figura 73). As imagens utilizadas para análise da área G4 foram adquiridas em 27 dezembro de 2001 e 19 setembro de 2005 e, intervalo de 3,75. A figura com a representação das bacias compreendidas pela área G4 podem ser consultada em anexo.

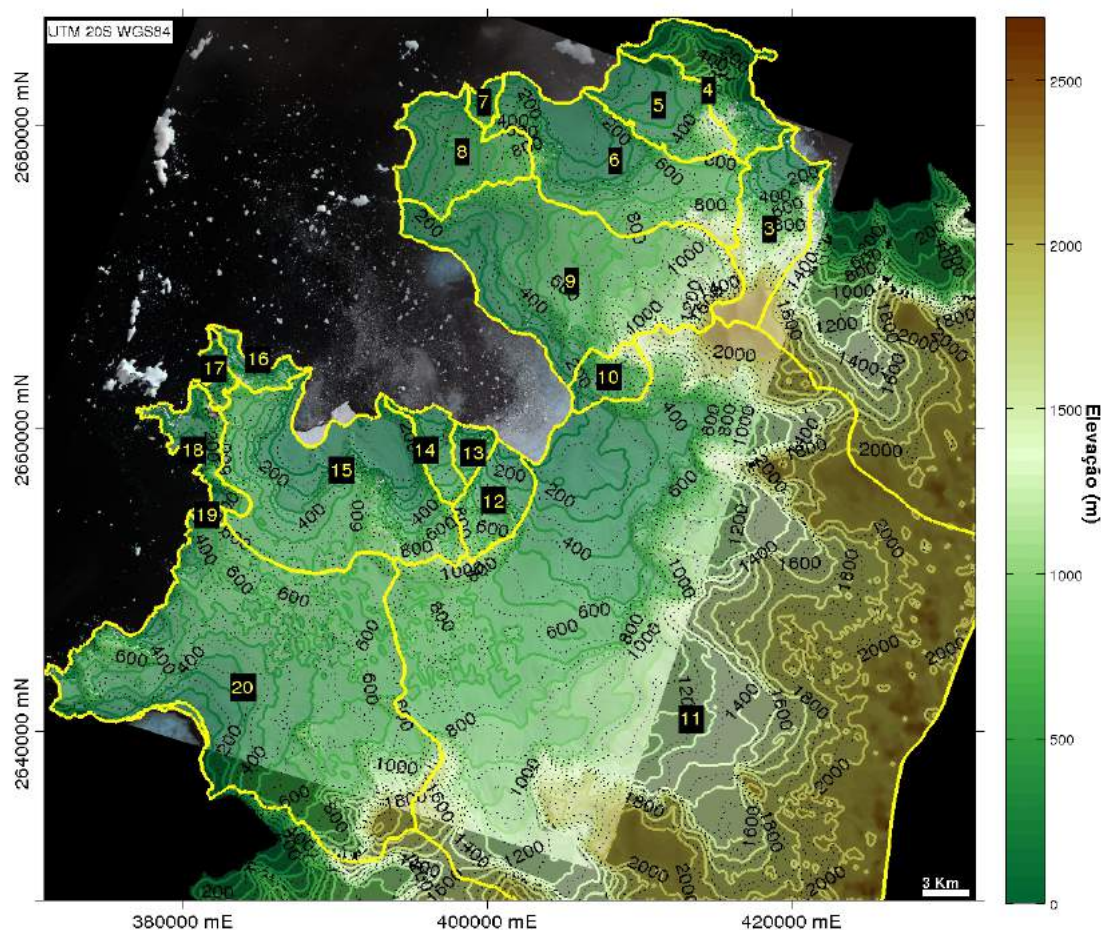


Figura 73: Representação das geleiras analisadas na área G3. Altimetria: ASTER GDEM. Imagem: composição colorida RGB321 de imagem ASTER adquirida em 01/04/2001. Os números 1 a 20 correspondem as geleiras G3-B1 a G3-B6 mencionadas no texto.

A figura 74 ilustra espacialmente os valores da diferença de elevação entre os MDEs em metros antes dos cálculos de m.m.a.e. por intervalos de altitude.

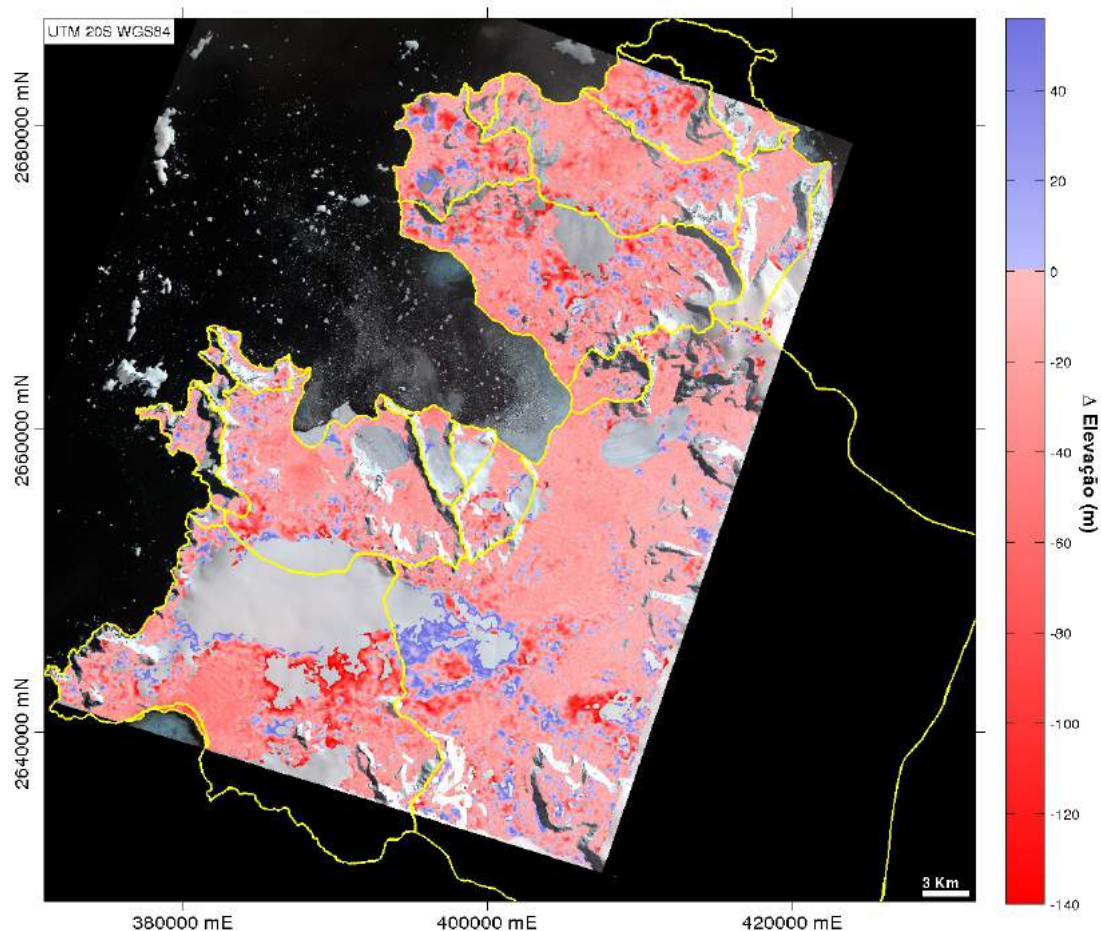


Figura 74: Diferença de elevação em G3, a partir de valores filtrados, entre imagens de 01/02/2006 e de 04/01/2001. As tonalidades de vermelho e azul representam redução e aumento de elevação, respectivamente. A linha amarela corresponde aos limites das bacias de drenagem glacial.

São observado quase exclusivamente valores negativos de diferença em elevação. Na geleira Hugi (G3-B11) as mudanças negativas são vistas até nas regiões mais altas da geleira. Valores positivos são notados em poucas áreas, como no Piemonte de gelo entre as geleiras Hugi e Widmark, região de baixa correlação dos pixels dos MDEs.

Na figura 75 são apresentados os gráficos de m.m.a.e. por intervalos para as 5 maiores geleiras da área G3. As cinco geleiras apresentaram valores quase constantes e negativos. As geleiras G3-B6 e G3-B9 apresentaram ao final um ligeiro acréscimo nos valores de mudança de elevação, que coincide com o início do platô. Observa-se também que a geleira G3-B11 foi bem amostrada pelo limite de abrangências dos MDEs. Uma redução do percentual de pixels em relação à área total ocorre apenas a partir dos 1000 m de altitude.

Para uma área total de 1822 km² analisada, obteve-se uma estimativa de perda de massa de $24,81 \pm 14,73$ Gt para o período de 4 janeiro de 2001 e 1 de

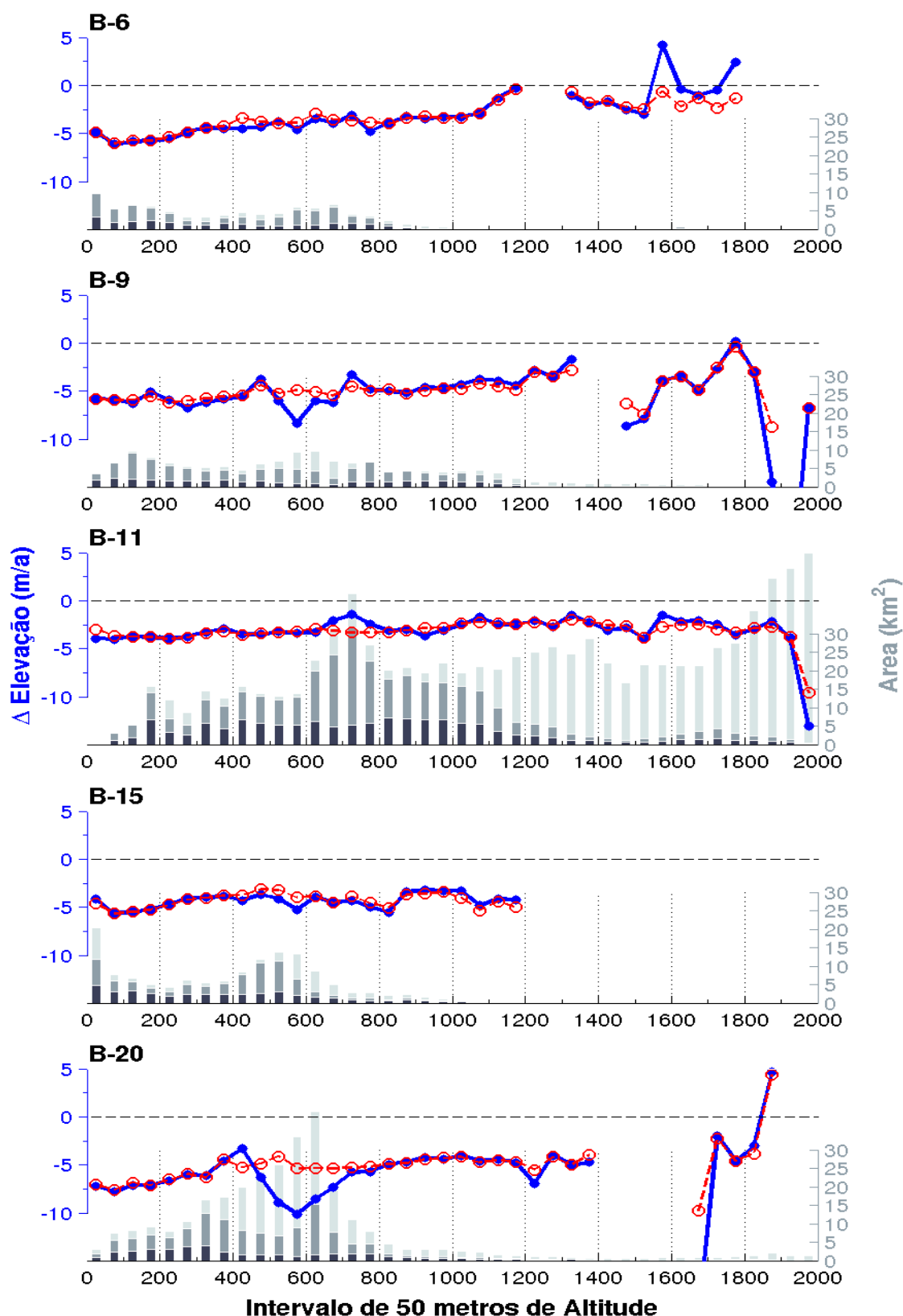


Figura 75: Mudança média anual em elevação para as geleiras G3-B11 a G3-B15 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

fevereiro de 2006. Para o mesmo período estimou-se um balanço de massa entre -1532 e $-4,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ e um balanço de massa específico entre -4,9 e $-1,60 \text{ m a}^{-1}$. Os pixels dos MDEs utilizados cobriram 49% da área total, e 19% considerando apenas os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDEs. As estimativas de cada geleira desta área são apresentadas na tabela 24

Tabela 24: Variação em volume total de gelo na região G3 balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 4 janeiro de 2001 e 1 de fevereiro de 2006.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	18	Total	Desvio pa- drão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B3		-0,33	±0,18	-72,30	1,97	-1,876 ±1,08		38,55	50%	25%
B4		-0,44	±0,22	-97,15	6,17	-2,641 ±0,78		36,78	14%	6%
B5		-0,71	±0,43	-155,10	4,20	-4,028 ±1,29		38,51	68%	16%
B6		-1,76	±0,89	-385,66	4,19	-4,156 ±0,99		92,80	79%	28%
B7		-0,07	±0,04	-15,08	0,94	-3,078 ±0,91		4,90	75%	33%
B8		-0,86	±0,61	-188,30	4,40	-4,234 ±0,84		44,47	85%	19%
B9		-3,39	±1,62	-740,67	6,57	-4,897 ±0,68		151,24	72%	23%
B10		-0,23	±0,09	-50,27	1,32	-3,351 ±1,45		15,00	59%	26%
B11		-7,01	±4,57	-1532,59	14,30	-1,735 ±1,31		883,49	39%	14%
B12		-0,39	±0,30	-85,70	2,75	-3,458 ±0,64		24,78	58%	25%
B13		-0,08	±0,04	-16,80	1,75	-2,205 ±1,93		7,62	21%	10%
B14		-0,10	±0,05	-21,59	0,88	-1,623 ±4,06		13,31	21%	10%
B15		-2,59	±1,42	-565,72	5,43	-4,135 ±0,74		136,82	69%	29%
B16		-0,08	±0,06	-17,15	0,99	-1,931 ±1,63		8,89	41%	20%
B17		0,00	±0,00	0,00	0,00	0,000 #DIV/0!		5,30	0%	0%
B18		-0,15	±0,13	-33,06	1,45	-1,813 ±1,00		18,23	48%	23%
B19		-0,02	±0,01	-4,60	0,62	-2,081 ±1,15		2,21	49%	24%
B20		-6,61	±4,07	-1445,38	15,33	-4,826 ±1,01		299,52	41%	12%
TOTAL		-24,81	±14,73	-5427,1	73,27			1822,4	49%	19%

As geleiras desta bacia apresentaram os menores valores de Bn específico dos setores do lado oeste. A taxa de perda de massa desta área é alta, $5,05 \text{ Gt a}^{-1}$, e é comparável ao setor Península Trinity proporcionalmente a área analisada. As cinco geleiras apresentadas nos gráficos acima apresentaram os maiores valores de Bn específico, com exceção da Geleira Hugi (G3-B11), que apresentou um menor valor. O alto Bn está relacionada com o fato de algumas geleiras apresentarem mudanças significativas em suas frentes de geleira (G3-B4, B5, G3-B6, G3-B15 e G3-B20). O menor Bn específico da Geleira Hugi (G3-B11) pode ser explicado pelo estreito canal disponível para drenagem de massa de uma ampla área de geleira.

4.8.4 Área G4

Na figura 76 são ilustrados os gráficos de m.m.a.e. por intervalos para as duas geleiras, G4-B21 e G4-B22, compreendidas somente pela área G4. O gráfico da geleira G4-B21 mostra valores e padrão não coerentes. Isto pode ser devido à presença de regiões com alta reflectância sobre o platô na imagem de 2001. Como resultado, as estimativas para as geleiras com maior altitude tendem a subestimar conforme a altitude aumenta (G4-B21 na figura 76; e G4B11 em anexo). Esta tendência torna-se visível ao observar os gráficos com os valores médios de correlação, que decrescem com aumento da altitude (figura 77.).

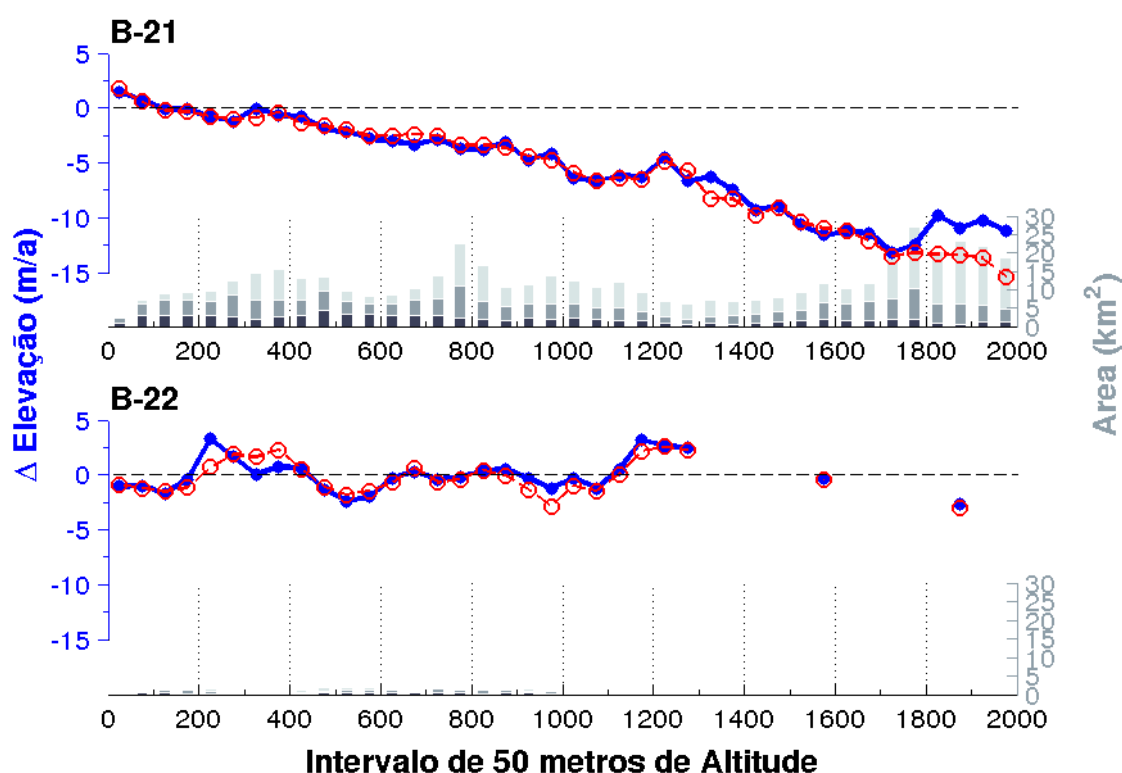


Figura 76: Mudança média anual em elevação para as geleiras G4-B21 a G4-B22 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). O eixo da direita mostra, nos mesmos intervalos de altitude, a área de toda geleira (barras cinza claro), dos pixels comuns a ambos MDEs (barras cinza escuro), e dos pixels dos MDEs com correlação acima de 85% (barras pretas).

Os valores de estimativa de balanço de massa e perda de massa calculados para a área G4 são apresentados na tabela 25.

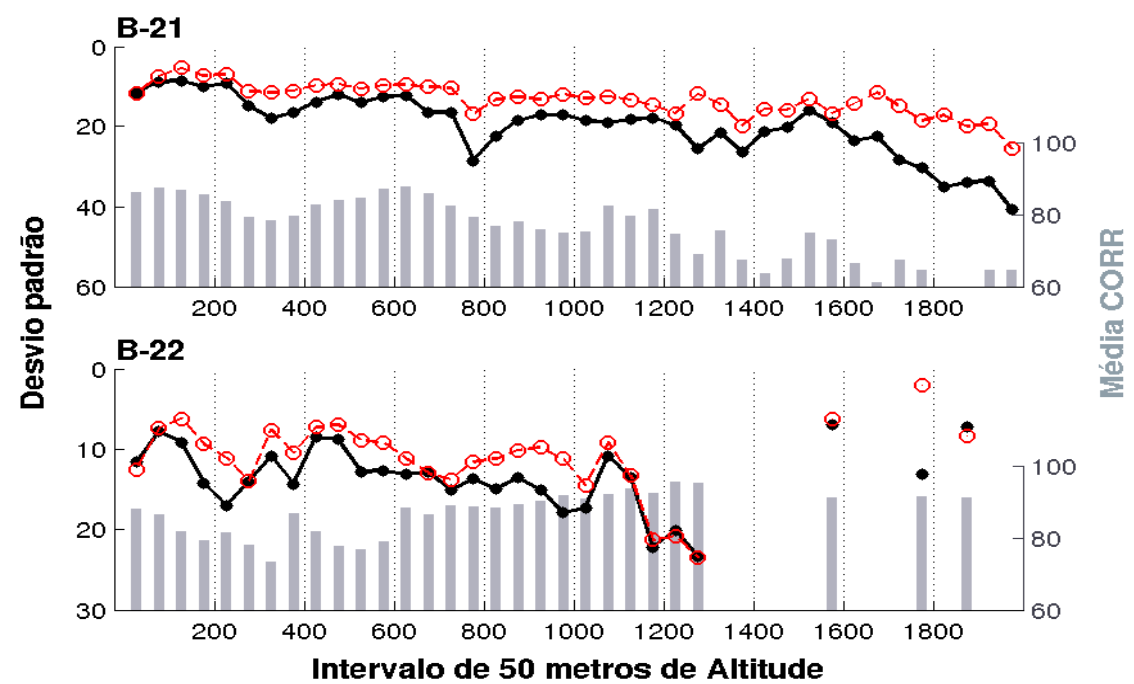


Figura 77: Desvio padrão dos valores de mudança média em elevação para as geleiras G4-B21 a G4-B22 calculada para intervalos de 50 m de altitude, com todos pixels do intervalo (linha azul), e com os pixels com correlação acima de 85% nos dois MDE (linha vermelha). As barras cinzas representam o valor médio de correlação dos pixels nos dois MDEs, nos mesmos intervalos de altitude.

Tabela 25: Variação em volume total de gelo na região G3 balanço de massa anual e balanço de massa específico entre 27 dezembro de 2001 e 19 setembro de 2005.

Bacias	Perda de massa (Gt)		Bn (10 ⁶ m ³ a ⁻¹)		Bn específico (m a ⁻¹)		Área das bacias (km ²)			
	8	Total	Desvio pa- drão	Médio	Erro	Médio	Desvio	Total (km ²)	%MDE	%MDE_f
B11		-11,59	±5,33	-3451,5	20,4	-3,55	±3,68	973,1	25%	8%
B12		-0,25	±0,26	-74,7	3,6	-3,01	±1,03	24,8	55%	20%
B14		-0,06	±0,02	-16,9	0,9	-1,27	±4,42	13,3	16%	7%
B15		-1,53	±1,79	-455,0	10,2	-3,32	±0,62	136,8	53%	17%
B16		-0,07	±0,06	-19,4	5,1	-2,18	±0,86	8,9	33%	12%
B20		-2,52	±4,17	-750,1	22,0	-2,50	±0,97	299,5	42%	12%
B21		-2,61	±2,74	-769,5	12,5	-1,57	±2,41	489,1	32%	12%
B22		-0,06	±0,16	-16,2	3,1	-0,52	±0,82	31,4	53%	21%
TOTAL		-18,69	±14,53	-5553,3	77,8			1976,9	38,8%	13,6%

4.9 Discussão geral

Neste estudo, foram compreendidas 171 bacias de drenagem glacial. No total, foi estimada uma perda de massa de $54,79 \text{ Gt a}^{-1}$ entre 2001 e 2010, para uma área total de 24.044 km^2 da porção da Península Antártica localizada ao norte de $66,5^\circ\text{S}$. Desta estimativa, $38,64 \text{ Gt a}^{-1}$ foram perdidos do lado leste da península e $16,14 \text{ Gt a}^{-1}$ do lado oeste, sendo as áreas analisadas de aproximadamente de 14.537 e 9.506 km^2 , respectivamente. Os valores de perda de massa das geleiras estimados para cada setor da área de estudo são apresentados na tabela 26. Mesmo havendo diferença entre o tamanho da área analisada de cada um dos dois lados da península, pode-se notar que há diferença no balanço de massa, com maior perda de massa do lado leste. Estudos demonstram que a precipitação, e portanto o balanço de massa superficial, é mais intensa e até duas vezes maior para a região do lado oeste do que do lado leste da PA. Como consequência, o balanço de massa superficial (*i.e.*, acumulação de neve) pode ser duas vezes maior do lado oeste do que do lado leste (TURNER *et al.*, 2002). Mais recentemente um aumento na taxa de precipitação foi reportado, o que pode contribuir ainda mais para menores valores de perda de massa do lado oeste (TURNER *et al.*, 2005). Porém, essas geleiras permanecem retraído (PRITCHARD; VAUGHAN, 2007; TURNER *et al.*, 2009 p.247). Um outro fator que pode influenciar é a configuração orográfica das bacias de drenagem de cada lado da península. Do lado oeste as bacias de drenagem apresentam, de maneira geral, uma menor área de drenagem, com um maior percentual de áreas localizadas em altitudes elevadas e uma frente de geleira menos ampla. Já o lado leste, apresenta maiores áreas de bacia de drenagem, com mais área em baixas altitudes e frentes de geleiras bastante amplas. Isso é confirmado pela frequente presença das antigas plataformas de gelo do lado leste. Essas características contribuem para uma maior área de derretimento do lado leste como mostrado no trabalho de Mender Júnior (2011), e portanto um menor acúmulo superficial.

Com uma cobertura superficial de 71% da superfície do planeta, o oceano ocupa uma área de $A_o = 0,71(4\pi R_e^2)$, onde $R_e \sim 6370 \text{ km}$. Sendo assim, cada 1 Gt de água transferida do continente para o oceano irá elevar o nível do mar em $1/A_o$ quilômetros, ou $1/362$ milímetros (CUFFEY; PATERSON, 2010). O aporte de massa para o oceano calculado neste estudo representa uma contribuição de aproximadamente $0,15 \text{ mm a}^{-1}$ para elevação do nível médio dos mares. Prithcard e Vaughan (2007) estimaram uma contribuição de $0,16 \text{ mm a}^{-1}$ para a Península Antártica por volta do ano 2005 e de similar magnitude à contribuição das geleiras em retração do Alaska, ou seja, $0,14 \pm 0,04 \text{ mm a}^{-1}$ com provável aumento para

Tabela 26: Valores totais das estimativas de perda de massa de cada setor analisado.

Tabela 20. valores totais das estimativas de perda de massa de cada setor analisado.								
Setor		Nº de bacias	Período		Área analisada (km²)	Perda de massa (Gt a-1)		Perda de massa específica (m e.a a ⁻¹)
						Total	desvio	
Norte	N1	26	29/12/02	13/12/08	1072	3,18	1,88	2,97
	N2	6	15/11/01	15/11/05	580	1,50	1,40	2,59
	N3	8	26/09/01	15/11/05	931,6	2,92	1,89	3,14
Larsen A	LA1	6	02/10/03	18/11/06	1080,2	3,63	2,40	3,36
	LA2	3	22/11/01	02/02/03	1314,1	8,42	12,63	6,40
Larsen B	LB1	3	07/11/02	15/12/10	1383,5	7,18	3,00	5,19
	LB2* (B4)	1	22/11/01	15/12/10	534,91	1,41	0,54	2,63
	LB3	6	07/11/02	15/12/10	2048,2	4,49	2,90	2,19
	LB4	2	07/11/02	15/12/10	2738,4	3,44	3,03	1,26
Larsen C	LC	6	07/11/02	25/02/09	2854,4	2,47	2,09	0,86
Península Trinity	PT	7	05/03/02	20/01/06	572,2	1,43	1,52	2,50
Costa Davis	DV1	3	26/09/01	02/12/08	421,89	0,11	0,16	0,27
	DV2	9	22/11/01	27/09/04	1717,2	2,14	4,22	1,25
Costa Danco	DN1	33	07/11/02	15/12/10	837,1	0,61	0,32	0,73
	DN2	7	24/01/03	24/11/06	273,74	1,19	0,20	4,34
	DN3	6	24/01/03	08/01/05	835,1	3,28	0,80	3,93
Costa Graham	G1	16	19/09/05	27/02/09	1611,7	0,56	1,28	0,35
	G2	3	24/02/03	27/02/09	895	1,07	0,52	1,19
	G3	18	04/01/01	01/01/06	1822	5,05	2,98	2,77
	G4* (B21-22)	2	27/12/01	19/09/05	520,5	0,71	0,72	1,37
TOTAL		171			24044	54,79	44,48	

0,27 ± 0,10 mm a⁻¹ ao fim dos anos 1990, estimado por (ARENDR *et al.*, 2002). Com similares taxas de mudança climática, área, e precipitação de neve, podemos esperar uma contribuição da AP para o aumento do nível médio dos mares comparável a do Alaska (ARENDR *et al.*, 2002). Esses dois ambientes da criosfera são os de maiores contribuições para o aumento do nível médio dos mares. Como comparação, as geleiras da Patagônia, contruíram 0,042 mm a⁻¹ durante o período 1968/1975-2000 e 0,105 mm a⁻¹ entre 1995-2000 ((RIGNOT; RIVERA; CASASSA, 2003). Porém, sua contribuição por unidade de área é maior que a do Alaska e da PA.

A diferença da área de abrangência de cada setor analisado na dissertação limita uma comparação entre os mesmos. Para possibilitar a comparação entre setores, os valores de perda de massa anual apresentados na tabela 26 foram divididos pela área de cada setor, e são referidos aqui como perda de massa específica. Valores de perda de massa específica, em unidades de metro equivalente água, representam o quanto uma geleira perdeu de massa, se a mesma for distribuída sobre toda sua superfície.

Deste modo, ao comparar os valores de perda de massa específica,

observa-se que o setor Península Trinity (*i.e.*, 2,50 m e.a. a⁻¹) apresentou uma perda próxima das áreas do setor Norte (*i.e.*, 2,97, 2,59 e 3,14 m e.a. a⁻¹). Já os setores da Costa de Davis, Danco e Graham apresentaram pequenas perdas de massa (*i.e.*, entre 0,25 e 2,77 m e.a. a⁻¹). Os altos valores de perda de massa para as áreas DN2 e DN3, 4,34 e 3,93 m e.a. a⁻¹ respectivamente, diferem-se das demais estimativas das outras áreas destes setores, podendo estar sobre-estimados devido à influência de cobertura de nuvens nas estimativas de elevação dos MDE utilizados. Estas áreas devem ser melhor investigadas para um melhor entendimento destas altas perdas e/ou uma melhor estimativa. O setor Graham apresenta valores inferiores aos encontrados no lado leste da península, e nota-se uma diferença entre os valores de perda de massa específica de cada uma de suas 4 áreas. Isto indica uma variabilidade que pode ocorrer em nível regional. Esta variação pode ocorrer em decorrência de aspectos específicos de cada bacia de drenagem glacial, como altitude média, orientação das bacias de drenagem, morfologia subglacial, etc. Um exemplo da influência da altitude média da bacia de drenagem no balanço de massa específico, pode ser observado na área N3 e LA1. Nessas duas áreas, as bacias de drenagem glacial N3-B3, LA1-B2 e LA1-B4, menores que as demais e de baixa altitude, apresentaram um balanço de massa específico menor que as bacias de maior área e de maior perda de massa. O balanço de massa dessas geleiras apresenta uma diferença de até -2 m a⁻¹. Outra característica dessas bacias que deve ser observada é que além de restritas a baixas altitudes, elas não se comunicam com os platôs da Península Antártica, e portanto não recebem contribuição de fluxo de massa dessas áreas com maior acúmulo de neve. Portanto, uma estimativa do balanço de massa de uma região, a partir da análise de algumas poucas geleiras, deve ser utilizada com cuidado quando extrapolado para uma área mais abrangente, como toda a Península Antártica.

Os maiores desvios padrões das estimativas de balanço de massa ocorrem nos pares analisados com curto intervalo temporal entre os MDEs (*i.e.*, Áreas LA2 e DV2). Um curto intervalo temporal entre os modelos digitais de elevação faz com que os erros inerentes ao método, devido à exatidão dos MDEs ASTER, sejam próximos às estimativas de mudança de elevação. Isso também ocorre para MDEs comparados em regiões em que as mudanças de elevação do terreno são baixas, mesmo quando o intervalo temporal é alto (*e.g.*, Áreas DV1 e G1).

A partir dos valores totais da perda de massa em cada setor da área de estudo (tabela 26), torna-se claro que o lado leste da PA apresenta as maiores contribuições em termos de aporte de água doce para oceano do entorno desta região. As maiores contribuições ocorrem do setor Larsen A e Larsen B, com 12,05 e

16,52 Gt a⁻¹ respectivamente. As geleiras Drygalski e Hektoría (LA2-B2 tabela 10 e LB1-B1 tabela 11) foram as mais representativas de cada setor, com taxas de perdas, ou seja, perda de massa dividida pelo intervalo temporal do setor analisado, de 7,41 e 5,88 Gt a⁻¹ respectivamente. A maior perda estimada para a geleira Drygalski deve-se ao curto intervalo temporal analisado, de apenas 1,25 anos, que compreendeu um ano de alta descarga. Enquanto um maior intervalo temporal do setor LB1 reduz o valor de perda de massa em uma taxa anual. O setor Larsen C foi o único setor do lado leste a apresentar uma baixa contribuição de volume para o oceano, apesar de ter apenas uma pequena parcela de sua extensa área representada.

Rignot *et al.* (2008) estimaram uma taxa de perda de 107 Gt a⁻¹ para a Península Antártica no ano 2000, analisando uma área de 116 mil km² ao norte de aproximadamente 74°S, e 234 Gt a⁻¹ extrapolando a estimativa para uma área total de 234 mil km². Estes autores encontraram um aumento de 140% na taxa de perda líquida, ou seja, diferença entre entrada e saída de massa nos sistemas glaciais, para a PA entre 1996 e 2006, atingindo -60±46 Gt a⁻¹ neste último ano; sendo -47±9 Gt a⁻¹ apenas para o setor Graham Land (ao norte de -68°S). No mesmo trabalho, os autores encontraram uma taxa de perda de massa para as geleiras da região Larsen A e Larsen B dez vezes maior em 2006 (31 Gt a⁻¹) do que em 2000 (3 Gt a⁻¹), devido a uma aceleração abrupta de 300% em 2001. Estes autores afirmam, ainda, que as geleiras da Plataforma de Gelo Larsen C encontram-se próximas de um equilíbrio. Neste trabalho, as estimativas para o setor Larsen A e Larsen B somam uma taxa de 28,57 Gt a⁻¹. Para o setor Larsen C a estimativa de uma perda de massa específica de 0,86 m e.a. a⁻¹ indica um estado próximo de um equilíbrio. Os valores de balanço de massa específico deste setor apresentaram valores superiores a -1,7 m a⁻¹ e de aproximadamente 0 para a bacia LC-B5.

Tendo em vista o objetivo de uma ampla abrangência espacial das análises, buscou-se imagens com menor cobertura possível de nuvens. Devido à circulação atmosférica predominante e a topografia ao norte da PA, o lado oeste apresentou maior ocorrência de imagens com cobertura de nuvens do que o lado leste. Portanto, os pares selecionados para estes setores apresentaram maiores interferências das nuvens nas estimativas de mudanças de elevação. Nestas áreas das imagens os valores de elevação estimados pelo modelo são extremamente altas em relação à elevação real do terreno e não necessariamente com baixa correlação. Muitos destes valores foram eliminados por exclusão dos valores admitidos como limite de perda ou acumulação de massa de -30 e 15 m a⁻¹.

Cap.5. - Conclusões

Este trabalho demonstrou que as imagens ASTER podem ser utilizadas de forma satisfatória na investigação do comportamento dinâmico das geleiras, na escala regional na Península Antártica, e estimativa da contribuição de água doce para o oceano do entorno. Apesar do método apresentar uma série de limitações e erros inerentes, a descrição do processamento dos MDEs gerados a partir de imagens ASTER mostrou como estes erros podem ser reduzidos e uma análise em nível de bacia de drenagem glacial pode ser realizada.

Como demonstrado nesta dissertação, um maior intervalo temporal entre as aquisições de imagem ASTER é preferível para que uma menor relação entre o erro ou desvio padrão e as estimativas de mudança do terreno seja atingida. Além disso, um maior intervalo temporal entre as imagens representaria melhor o balanço de massa da geleira em longo prazo. Apesar de uma geleira poder responder por décadas e centenas de anos a perturbações pretéritas ao seu equilíbrio, vimos que respondem também de forma rápida, com escala de tempo de apenas alguns anos, a processos como desintegração de plataformas de gelo, e retração e avanço de sua frente. Como exemplo, podem ser ressaltados os altos valores negativos de balanço de massa para as geleiras tributárias de ex-plataforma de gelo Larsen B (-4,40 e -1,74 Gt a⁻¹ para as geleiras Hektoría e Green respectivamente na área LB1; -3,47 Gt a⁻¹ para a geleira Crane na área LB2), e geleiras que apresentaram retração das frentes (-0,91 Gt a⁻¹ para a geleira Sjögren na área N3; -2,40 Gt a⁻¹ para a geleira Edgeworth na área LA1; e -7,77 Gt a⁻¹ para a geleira Drygalsky na área LA2). Portanto, um maior intervalo temporal entre os MDEs analisados suavizaria um sinal mais intenso e pontual dos anos seguintes a eventos perturbadores da dinâmica glacial.

Este estudo corrobora com outras estimativas de um balanço de massa negativo das geleiras da Península Antártica, principalmente analisando o seu lado leste. Os valores estimados de contribuição de massa para o oceano foram de 38,64 Gt a⁻¹ para o lado leste, e de 16,14 Gt a⁻¹ para o lado oeste, num total de 54,79 Gt a⁻¹ para a porção ao norte de 66,5° S na Península Antártica, entre os anos 2001 e 2010. Este aporte representa uma contribuição de aproximadamente 0,15 mm a⁻¹ para elevação do nível médio dos mares. O real e direto impacto deste aporte de água doce na salinidade das águas oceânicas do entorno não é possível mensurar,

sendo necessário um contínuo estudo e monitoramento do aporte de massa das geleiras e como este varia, para que uma correlação com a variação na salinidade possa ser investigada. Sabe-se, no entanto, que a descarga de água doce de origem no lado leste da PA irá influenciar e incorporar-se à água densa com formação na porção noroeste do Mar de Weddell sendo então exportada para as camadas inferiores da Bacia de Bransfield. Já a descarga de água doce de origem no lado oeste irá influenciar os processos de mistura de massas de águas das camadas superiores da Bacia de Bransfield. As maiores contribuições em aporte de água doce para o oceano são dos setores cujos eventos perturbadores são mais recentes. Para o setor Larsen A foi estimado uma taxa de perda de massa de $12,05 \text{ Gt a}^{-1}$ para o período entre 2001 e 2006. Para o setor Larsen B esta taxa foi de $16,52 \text{ Gt a}^{-1}$ para o período entre 2002 e 2010.

O balanço de massa específico foi estimado para cada uma das 171 geleiras analisadas. Por levar em consideração a área de toda a geleira, normalizando a perda de massa pela superfície, este parâmetro permite uma comparação entre geleiras com hipsometria e áreas diferentes. Este parâmetro é um bom indicativo do afastamento da geleira de seu equilíbrio, e quanto mais negativo for, mais a geleira perderá massa para o oceano, até que um novo equilíbrio seja restabelecido. Este parâmetro variou entre -10 a 1 m a^{-1} aproximadamente. Os menores valores foram encontrados para as geleiras onde eventos perturbadores (*i.e.*, desintegração de plataformas de gelo e retração das frentes das geleiras) são mais recentes. O menor valor foi encontrado para a geleira Hektor, de -10 m a^{-1} para o período entre 2001 e 2010. Com uma menor ocorrência, os valores positivos restringiram-se aos setores do lado oeste. O maior valor foi encontrado para a geleira Niépce (G1-B19), com $1,15 \text{ m a}^{-1}$ para o período entre 2005 e 2009.

Além disso, houve variação regional do balanço de massa específico observado no setor Graham com uma diferença entre os valores de cada uma de suas 4 áreas. Esta variação pode ocorrer em decorrência de aspectos específicos de cada bacia de drenagem glacial como altitude média, orientação das bacias de drenagem, batimetria subglacial. Isso mostra que o balanço de massa pode variar para cada geleira dentro dos setores. Portanto, uma investigação do balanço de massa específico por bacias de drenagem individuais pode ampliar o conhecimento sobre o balanço de massa e sua variação espacial. Desta forma, seria possível reduzir as incertezas quando estimativas de balanço de massa para poucas geleiras for extrapolado para uma maior área.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, M. J. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. **international Journal of Remote sensing**, v. 21, n. 5, p. 847-859, 2000.
- ABRAMS, M. J. *et al.* ASTER user handbook v2. **Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory**, 2002.
- AINLEY, D. *et al.* The Antarctic Environment in the Global System. In: SUMMERHAYES, C. (Ed.). **Antarctic Climate Change and the Environment**. [S.l.] Scientific Committee on Antarctic Research, 2009. p. 1-32.
- AREFI, H.; REINARTZ, P. Elimination of the Outliers from ASTER GDEM Data. **The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXVIII, n. C, 2009.
- ARENDT, A. A *et al.* Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level. **Science (New York, N.Y.)**, v. 297, n. 5580, p. 382-6, 19 jul. 2002.
- ASTER-GDEM-VALIDATION-TEAM. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 - Summary of Validation Results**. [S.l.: s.n.].
- ASTERDTM-ENVI. **F.A.Q. - How does AsterDTM extract elevations? Are there any limitations?** Disponível em: <<http://www.envi.com.br/asterdtm/english/faq/index.htm#7>>. Acesso em: 26 jul. 2012a.
- ASTERDTM-ENVI. **F.A.Q. - How accurate are the extracted DTM and the other products produced by AsterDTM?** Disponível em: <<http://www.envi.com.br/asterdtm/english/>>. Acesso em: 26 jul. 2012b.
- BAMBER, J. L.; PAYNE, A. J. **Mass balance of the cryosphere: observations and modelling of contemporary and future changes**. [S.l.] Cambridge Univ Pr, 2004. p. chapter 4
- BAMBER, J.; RIVERA, A. A review of remote sensing methods for glacier mass balance determination. **Global and Planetary Change**, v. 59, n. 1-4, p. 138-148, out. 2007.
- BERTHIER, E. *et al.* Recent rapid thinning of the "Mer de Glace" glacier derived from satellite optical images. **Geophysical ...**, v. 31, n. 17, p. 2-5, 2004.
- BRAUN, M.; HUMBERT, A.; MOLL, A. Changes of Wilkins Ice Shelf over the past 15 years and inferences on its stability. **The Cryosphere**, v. 2, n. 3, p. 341-382, 23 maio. 2008.
- CHURCH, J. A. *et al.* Changes in sea level. , in: **JT Houghton, Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and CA Johnson (eds.): Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel**, p. 639-694, 2001.
- 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, fev. 2010.
- CUARTERO, A.; FELICISIMO, A.; ARIZA, F. J. Accuracy, reliability, and depuration of SPOT HRV and Terra ASTER digital elevation models. **Geoscience and Remote**, v. 43, n. 2, p. 404-407, 2005.
- CUFFEY, K.; PATERSON, W. **The physics of glaciers**. fourth edi ed. [S.l.] Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2010.

DE ANGELIS, H.; SKVARCA, P. Glacier surge after ice shelf collapse. **Science (New York, N.Y.)**, v. 299, n. 5612, p. 1560-2, mar. 2003.

DUARTE, V. **Estrutura e variabilidade interanual das massas de água no Estreito de Bransfield (Antártica) durante os verões austrais de 2003 e 2004**. [S.l.] UFRGS, 2006.

DYURGEROV, M.; MEIER, M.; ARMSTRONG, R. Glacier mass balance and regime: data of measurements and analysis. **Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado**, n. 55, 2002.

FAHRBACH, E. *et al.* Decadal-scale variations of water mass properties in the deep Weddell Sea. **Ocean Dynamics**, v. 54, n. 1, p. 77-91, 1 fev. 2004.

FERRIGNO, J. *et al.* Coastal-change and glaciological map of the Trinity Peninsula area and South Shetland Islands, Antarctica, 1843-2001. 2006.

FOSTER, T. D.; CARMACK, E. C. Temperature and salinity structure in the Weddell Sea. 1976.

FUJISADA, H. ASTER level-1 data processing algorithm. **and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 36, n. 4, p. 1101-1112, 1998.

FUJISADA, H. *et al.* ASTER DEM performance. . 2005, p. 2707-2714.

GARCIA, C. A. E.; MATA, M. M. Deep and bottom water variability in the central basin of Bransfield Strait (Antarctica) over the 1980-2005 period. **Clivar Exchanges**, v. 4, p. 48-50, 2005.

HAGEN, J. O.; REEH, N. In situ measurement techniques: land ice. In: **Mass Balance of the Cryosphere. Cambridge University Press, Cambridge, UK**. [S.l: s.n.]. p. 11-42.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D. P. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 2, p. 97-112, maio. 2004.

HIRANO, A.; WELCH, R.; LANG, H. Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 5-6, p. 356-370, abr. 2003.

HOCK, R. Glacier Mass Balance. **Summer school in Glaciology - Fairbanks/McCarthy**, n. 7-17 June 2010, p. 1-10, 2010.

HOWAT, I. M. *et al.* Rates of southeast Greenland ice volume loss from combined ICESat and ASTER observations. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. L17505, set. 2008.

HOWAT, I. M.; SUPPLEMENTAL. Supplemental Material: Rates of southeast Greenland ice volume loss from combined ICESat and ASTER observations. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 17, p. L17505, 2008.

JACOBS, S. S. Bottom water production and its links with the thermohaline circulation. **Antarctic Science**, v. 16, n. 4, p. 427-437, dez. 2004.

JANÁ, R. **Digital Elevation Models and Delineation of Antarctic Glaciers Using Stereo Capabilities of ASTER Satellite Images**. [S.l.] Albert-Ludwigs-Universität, 2006.

LP-DAAC. **On Demand Digital Elevation Model & Registered Radiance at the Sensor - Orthorectified**. Disponível em:
<https://lpdaac.usgs.gov/products/aster_products_table/on_demand/digital_elevation_model_registered_radiance_at_the_sensor_orthorectified/v1/ast14dmo>. Acesso em: 23 jun. 2012.

LUMPKIN, R.; SPEER, K. Global Ocean Meridional Overturning. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, n. 10, p. 2550-2562, out. 2007.

MANTYLA, A. W.; REID, J. L. Abyssal characteristics of the World Ocean waters. **Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers**, v. 30, n. 8, p. 805-833, ago. 1983.

MENDES-JÚNIOR, C. W. **MONITORAMENTO DA ZONA SUPERFICIAL DE NEVE ÚMIDA DA PENÍNSULA ANTÁRTICA PELO USO DE DADOS DOS SENSORES SMMR E SSM/I**. [S.l.] UFRGS, 2011.

MORRIS, E. M.; VAUGHAN, D. G. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of variability of ice shelves. **Antarctic Research Letters**, v. 79, n. Antarctic Research Series, p. 61-68, 2003.

OLIVEIRA, J. A. DE *et al.* **DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO SEMI-AUTOMÁTICO PARA O INVENTÁRIO DE GELEIRAS DA PENINSULA ANTÁRTICA** Rio Grande, 2012. Disponível em: <<http://apecs-brasil-iiworkshop.blogspot.com.br/>>

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

PRITCHARD, H. D. *et al.* Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. **Nature**, v. 461, n. 7266, p. 971-5, out. 2009.

PRITCHARD, H. D.; LUTHCKE, S. B.; FLEMING, A. H. Understanding ice-sheet mass balance: progress in satellite altimetry and gravimetry. **Journal of Glaciology**, v. 56, n. 200, p. 1151-1161, 1 dez. 2010.

PRITCHARD, H. D.; VAUGHAN, D. G. Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. F3, p. 1-10, 6 jun. 2007.

RIGNOT, E. *et al.* Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. **Geophys. Res.**, v. 31, n. 18, p. 2-5, 2004.

RIGNOT, E. Changes in ice dynamics and mass balance of the Antarctic ice sheet. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 364, n. 1844, p. 1637-55, 15 jul. 2006.

RIGNOT, E.; BAMBER, J. L. *et al.* Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling. **Nature Geoscience**, v. 1, n. 2, p. 106-110, 2008.

RIGNOT, E.; BOX, J. E. *et al.* Mass balance of the Greenland ice sheet from 1958 to 2007. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, p. 1-5, out. 2008.

RIGNOT, E.; RIVERA, A.; CASASSA, G. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. **Science (New York, N.Y.)**, v. 302, n. 5644, p. 434-7, 17 out. 2003.

ROTT, H. *et al.* The imbalance of glaciers after disintegration of Larsen B ice shelf, Antarctic Peninsula - Discussions. **The Cryosphere Discussions**, v. 4, n. 3, p. 1607-1633, 6 set. 2010.

ROTT, H. *et al.* The imbalance of glaciers after disintegration of Larsen-B ice shelf, Antarctic Peninsula. **The Cryosphere**, v. 5, n. 1, p. 125-134, 1 mar. 2011.

SCAMBOS, T. A. Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 18, p. 2001-2004, 2004.

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.

SILVA, A. B. D. **Variações na velocidade de fluxo de geleiras de maré da Península Antártica entre os períodos 1988-91 e 2000-03**. [S.l.] FURG, 2012.

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

SULSOFT. AsterDTM v2.2 - Installation & User's Guide. 2004.

SUMMERHAYES, C. The Antarctic Environment and the Global System. **In Antarctic Climate Change and The Environment**, p. 1-32, 2009.

TACHIKAWA, T. *et al.* **Characteristics of ASTER GDEM Version 2** Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International. **Anais...IEEE**, 2011 Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6050017>

TOUTIN, T. Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. **and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 40, n. 10, p. 2241-2247, 2002.

TOUTIN, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 7, p. 1855-1875, abr. 2008.

TURNER, J. *et al.* Spatial variability of Antarctic Peninsula net surface mass balance. **Journal of Geophysical**, v. 107, 2002.

TURNER, J. *et al.* A positive trend in western Antarctic Peninsula precipitation over the last 50 years reflecting regional and Antarctic-wide atmospheric circulation changes. **Annals of Glaciology**, v. 41, n. 1, p. 85-91, 2005.

TURNER, J. *et al.* **Antarctic climate change and the environment**. [S.l.] Scientific Committee on Antarctic Research, 2009.

VAUGHAN, D.; MARSHALL, G. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. **Climatic change**, p. 243-274, 2003.

WATANABE, H. Global Coverage os ASTER Data and its Accuracy and Availability. **The 11th International Symposium on Remote Sensing, Chiba University, Japan**, p. slides 48-51, 2005.

WELCH, R.; JORDAN, T.; LANG, H. ASTER as a source for topographic data in the late 1990s. **Geoscience and Remote**, v. 36, n. 4, p. 1282-1289, 1998.

WINGHAM, D. J. *et al.* Mass balance of the Antarctic ice sheet. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 364, n. 1844, p. 1627-35, 15 jul. 2006.

YAMAGUCHI, Y.; KAHLE, A.; TSU, H. Overview of advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER). **and Remote Sensing**, 1998.