



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA
PÓS GRADUAÇÃO EM OCEANOLOGIA

Variabilidade espacial do acúmulo de neve superficial da Geleira Union, Antártica ($79^{\circ}46'S - 83^{\circ}24' W$)

Christian Florian Göbel

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanologia da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Arigony-Neto
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil
Julho de 2019

Christian Florian Göbel

**Variabilidade espacial do acúmulo de neve superficial da
Geleira Union, Antártica (79°46'S - 83°24' W)**

Universidade Federal do Rio Grande FURG
Instituto de Oceanografia
Programa de Pós-Graduação em Oceanologia

Orientador: Prof. Dr. Jorge Arigony-Neto

Brasil
2019, v-1.0

Christian Florian Göbel

Variabilidade espacial do acúmulo de neve superficial da Geleira Union, Antártica (**79°46'S - 83°24' W**). – Brasil, 2019, v-1.0. 145 p.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Arigony-Neto

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande FURG

Instituto de Oceanografia

Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, 2019, v-1.0.

1. retroespalhamento SAR 2. GPR 3. acúmulo de neve 4. área de gelo azul 5. balanço de massa superficial 6. análise geoespacial

Christian Florian Göbel

**Variabilidade espacial do acúmulo de neve superficial da
Geleira Union, Antártica (79°46'S - 83°24' W)**

Trabalho aprovado. Brasil, 01 de Julho de 2019:

Prof. Dr. Jorge Arigony-Neto
Orientador

Dr. Ricardo Jaña
INACH/Co-orientador

**Prof. Dr. Cláudio Wilson Mendes
Júnior**
UFRGS/Membro externo

Dr. Juliana Costi
IMEF/Furg

Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata
IO/Furg

Dra. Paula Dentzien
IO/Furg

Brasil
2019, v-1.0

Agradecimentos

Agradecer a todas as pessoas que tiveram qualquer contribuição na realização de um doutorado é uma tarefa difícil. Especialmente na correria e loucura dos últimos dias, das últimas semanas e dos últimos meses. A caminhada foi longa, por todos os processos que passei e, ao mesmo tempo, rápida pela fugacidade dos momentos bons.

Muitas experiências e vivências incríveis. Talvez, a maior de todas foi ter pisado num lugar tão remoto, onde o mundo está de ponta cabeça, ou eu quem está no topo do mundo. Um lugar tão silenciosamente barulhento ventando no ouvido. Muito gelo, muita neve, muita água. Obrigado ao meu orientador Jorge Arigony-Neto e co-orientador Ricardo Jaña por confiarem em mim e me proporcionarem esta vivência.

Agradeço a toda minha família por todo amor e carinho mesmo a distância. À minha mãe, sempre uma fonte de inspiração para buscar forças e cumprir com os desafios que se apresentaram. Ao meu pai e todos meus antepassados de terras longínquas aos quais tenho gratidão.

Meu agradecimento aos amigos de cordada Salame e Guilherme, convívio intenso do início ao fim, um sempre dando o apoio que o outro precisava. Chegamos juntos até o final. Outros LaCrianos também fazem parte desta cordada, uns mais antigos, outros de passagem curta e uns mais novos: Adriano, Rodrigo e sua família, Inti, Aninha. Obrigado também a todas as pessoas que em algum momento passaram por este ambiente jovem e descontraído.

Um abraço apertado de muita gratidão à família Caramelow pelas deliciosas viagens, comilanças, encontros e STOP! Um agradecimento especial à Raquel, por um domingo tão especial que virou dois anos de parceria e aprendizado enorme. Seu apoio e conversas me ajudaram muito no encerramento deste ciclo. Obrigado.

Por fim ao programa de pós graduação e todos os professores que contribuíram na minha formação. À CAPES pelo financiamento e ao INCT da Criosfera pelo suporte financeiro para participação nas expedições e congresso.

Obrigado aos membros da banca por aceitarem o convite e pelas valiosas contribuições.

*"Há sempre alguma loucura no amor.
Mas há sempre um pouco de razão na loucura."
Nietzsche*

Sumário

1	CAPÍTULO 1	3
1.1	Introdução	3
1.2	Área de estudo	10
1.3	Justificativa	13
1.4	Hipótese	14
1.5	Objetivos	14
1.6	Estrutura da Tese	15
2	CAPÍTULO 2	17
2.1	Material e métodos referentes ao artigo 1 (capítulo 3)	17
2.1.1	Estação Meteorológica e Profundidade da Neve	17
2.1.2	<i>Perfis estratigráficos - Snowpits</i>	18
2.1.3	Imagens COSMO-SkyMed	20
2.1.4	TanDEM-X DEM e derivados	22
2.1.5	Classificação por cluster	24
2.2	Material e métodos referentes ao artigo 2 (capítulo 4)	25
2.2.1	Dados de GPS	25
2.2.2	REMA	25
2.2.3	TanDEM-X	26
2.2.4	Análise de acurácia dos DEMs	26
2.2.5	Diferença entre os DEM	27
2.2.6	Áreas mascaradas	28
2.2.7	Dados de GPR	28
3	CAPÍTULO 3 - ARTIGO 1	29
4	CAPÍTULO 4 - ARTIGO 2	95
5	CAPÍTULO 5	133
5.0.1	Síntese dos resultados	133
5.0.2	Conclusões e considerações futuras	136
	REFERÊNCIAS	139

Lista de abreviaturas e siglas

ASI	Agência Espacial Italiana
AWS	Estação Meteorológica Automática
CSK	COSMO-SkyMed
DEM	Digital Elevation Model
DGPS	Differential Global Positioning System
DLR	Agência Espacial Alemã
GPR	Radar de Penetração do Solo
HEM	Height Error Map
INACH	Instituto Antártico Chileno
IPPC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
LaCrio	Laboratório de Monitoramento da Criosfera
MB	Balanço de Massa
ME	Mean Error
MAD	Median Absolute Error
NMAD	Normalized Median Absolute Error
REMA	Reference Elevation Antarctica Model
RTK	Real Time Kinematic
SAR	Radar de Abertura Sintética
SMB	Balanço de Massa Superficial
TDX	TanDEM-X
w.e.	Water Equivalent

Resumo

O manto de Gelo Antártico apresenta um balanço de massa negativo e a componente balanço de massa superficial é principal fonte de incerteza nas estimativas. O motivo é a extensa área com médias de precipitação baixas e a intensa deriva da neve pelo vento. Desta maneira a variabilidade espacial da acumulação da neve deve ser considerado. A presente tese cumpre o objetivo principal de ampliar o conhecimento na dinâmica deposicional da neve para a região da cadeia de montanhas Ellsworth na Antártica Ocidental. Dados de 7 perfis estratigráficos em diferentes áreas da geleira junto com as características do micro-relevo superficial permitiram a interpretação de ambientes com dinâmica deposicional distinta. Dados da estação meteorológica instalada em 2013, forneceram um série temporal de 4 anos com resolução temporal única para a região. Além disso, perfis topográficos com um gps de alta precisão foram levantados por 72 km ao longo da bacia de drenagem glacial da Geleira Union. Em conjunto, o levantamento com radar de penetração de solo (GPR) foi realizado para investigação da estrutura estratigráfica da neve/firn até os 12 m de profundidade. O resultado do primeiro artigo foi um mapa com resolução de 12 m identificando 6 classes que representam áreas com uma maior ou menor taxa de acumulação de neve, de maneira relativa uma a outra. A método baseou-se na classificação automática por análise de cluster da resposta do sinal de 5 imagens de radar COSMO-SkyMed com 2,4 m de resolução, indicando características deposicionais distintas. Utilizou-se também um o modelo digital de elevação (DEM) TanDEM-X de 12 m de resolução para geração de dados geoespaciais de declividade, orientação do terreno, exposição ao vento e rugosidade, os quais foram adicionados como dados de entrada para aprimorar a classificação. No segundo artigo, realizou-se uma abordagem distinta para identificar os ambientes com maior taxa de acumulação com base em dois modelos digitais de elevação disponíveis para toda antártica, o que permite replicar o método para demais áreas com características de neve polar (seca). Os dois modelos de elevação utilizados foram o TanDEM-X e o recentemente lançado REMA. A teoria é que penetração do sinal de radar na banda-X, que compõem o produto TanDEM-X, sofre variação em função das características do pacote de neve. A maior penetração do sinal na neve está diretamente relacionado a um ambiente com uma maior taxa de acumulação. Como consequência, a elevação é subestimada no DEM. Quando comparado ao REMA, derivado por estereoscopia de imagens ópticas, a diferença permitiu identificar ambientes com maior taxa de acumulação. Ambos modelos foram validados a partir dos perfis de GPS. A validação do REMA apresentou um valor mediano dos erros absolutos de impressionantes 0,36 m. Esta abordagem, possibilita também identificar e delimitar áreas de gelo azul, importantes para o balanço de massa superficial, e zonas de baixa acumulação. Os perfis de GPR foram utilizados para correlacionar a diferença entre os dois DEMs com mudança na características da estrutura deposicional do pacote de neve. Áreas com maiores diferenças indicam uma diferença na taxa de acumulação até 3 vezes

superior. Os resultados ora apresentados apontam para o potencial de desenvolvimento de um proxy para a investigação da variabilidade do SMB em uma escala continental no interior da Antártica, o que pode contribuir com a calibração de modelos de SMB.

Palavras-chave: retroespalhamento SAR; GPR; acúmulo de neve; área de gelo azul; balanço de massa superficial; análise geoespacial.

Abstract

Antarctica has an important role in regulating the global climate. West Antarctica presents the more expressive of negative mass balance of Antarctica Ice Sheet. Mass balance studies assess the contribution of the ice sheet to the ocean. The Union Glacier in the Ellsworth Mountain Range drains its mass to the Ronne-Filchner Ice Shelf. A key component of understanding the mass balance of Antarctica is surface snow accumulation because of high continental areas and spatial variability. Field measurements are challenging to obtain, and any remote approach aids in understanding this process. In this thesis we present, with a remote sensing approach, two new methods to assess snow accumulation spatial variability of the Union Glacier. This glacier is located in Western Antarctica along the Ellsworth Mountains and drains to the Ronne-Filchner Ice Shelf. Mean surface mass balance (SMB) estimates range between 0,16 and 0,33 m water equivalent (w.e.) a^{-1} depending on site location and method. Despite agreement among studies, these studies did not represent the high spatial variability in snow deposition dynamics that is caused by relief, wind transport-driven accumulation, and high sublimation rates. A better understanding of these processes is required to improve SMB estimates. A Set of field data allowed the interpretation and classification of three different environments: deposition, erosion, and redistribution. Geospatial products derived from a high-resolution digital elevation model improved the automatic classification of these zones. A map delimiting 6 classes from lowest to highest accumulation rate was generated. For the second method, we validated the new REMA elevation model, which showed median absolute errors of impressive 0,36 m. Assuming it as the reference surface, we calculated the elevation differences between REMA and TanDEM-X DEMs. The penetration of the images interferometric signal, which are used to generate the TanDEM-X model, is influenced by the snowpack characteristics. The height differences allowed to identify environments with higher accumulation rate, up to 3 greater. This approach can also be used for tracking blue ice area, important for the SMB, and low accumulation rate zones. The results point to the potential developing of a proxy to investigate the SMB variability in a continental scale, which may contribute to climate models calibration.

Key-words: SAR backscattering; GPR; snow accumulation; blue ice area; surface mass balance; terrain analyses;

1 Capítulo 1

Neste capítulo, é traçado, inicialmente, um panorama acerca da importância da Antártica e seu papel climático, bem como é efetuada contextualização relativa às principais mudanças observadas no manto de gelo antártico e as consequências destas para o clima global. É ressaltada, também, a relevância de se considerar a componente acúmulo de neve para o entendimento do estado de equilíbrio das geleiras. Na sequência, são elencados os principais trabalhos com enfoque no sensoriamento remoto, em especiais voltados para os sensores ativos. Apresenta-se, ainda, a área de estudo, a partir de um panorama do atual conhecimento sobre a dinâmica glacial. Por fim, são definidos a justificativa, a hipótese e os objetivos, bem como a estrutura da tese.

1.1 Introdução

A Antártica desempenha um papel protagonista na manutenção do clima global, sendo este dirigido pela radiação solar, a qual incide durante todo o ano nas baixas latitudes. Esse excesso de radiação, quando comparado com os polos, é responsável por um enorme gradiente horizontal de temperatura. Em resposta, a atmosfera e o oceano transportam este excesso de calor em direção às altas latitudes, redistribuindo essa energia globalmente (figura 1.1). Portanto, os pólos cumprem a função de sumidouro de calor. Apesar da

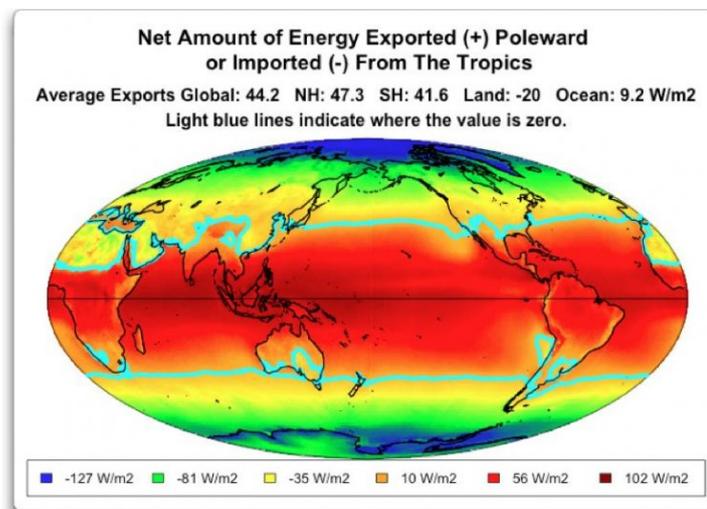


Figura 1.1 – A figura mostra a quantidade de energia, em W/m^2 , exportada (+) e importada (-) dos trópicos em função da incidência durante todo o ano nas baixas latitudes. Os polos cumprem um papel de sumidouro de calor, desempenhando importante papel na manutenção do clima global. Retirado de <https://wattsupwiththat.com/2013/12/21/the-magnificent-climate-heat-engine/>

dinâmica da interação entre oceano e atmosfera ser bem conhecida, a complexidade dos

processos de troca de calor e interação das plataformas e manto de gelo com o oceano e a atmosfera tornam as previsões das mudanças climáticas um desafio (TURNER et al., 2009).

O continente é dividido em Antártica Ocidental e Antártica Oriental, dadas as suas distintas características quanto ao regime de precipitação e derretimento. As massas de gelo da porção ocidental do manto de gelo Antártico apresentam em média valores negativos e mais expressivos de balanço de massa entre as massas de gelo antárticas (RIGNOT et al., 2008; RIGNOT et al., 2013) (figura 1.2a), sendo um forte indicativo das mudanças esperadas para todo sistema glacial local. A instabilidade do manto de gelo da Antártica Ocidental pode ser atribuída a três principais fatores: um maior aquecimento das temperaturas do ar (STEIG et al., 2009); a presença de águas quentes em profundidade em contato com as espessas plataformas de gelo, via vales submarinos cruzando a plataforma continental, (PRITCHARD et al., 2012); e a ocorrência de um embasamento rochoso abaixo do nível do mar, com canais profundos que aprofundam-se em direção ao interior do manto de gelo (JOUGHIN; ALLEY, 2011) (figura 1.2b, c, d).

O balanço de massa (*Mass Balance* - MB¹) consiste na integração de todos os processos de perda de massa, denominado ablação, e de ganho de massa, chamado acumulação, de todo o sistema glacial considerado, sendo um indicativo de seu estado de equilíbrio. Quando o MB é negativo, a massa de gelo é perdida por esses ambientes e terá como destino final os oceanos, contribuindo para o aumento do nível médio dos mares, além de possíveis impactos na dinâmica oceânica local e global.

Dados de estações meteorológicas demonstram um aumento pronunciado da temperatura na Península Antártica (MORRIS; VAUGHAN, 2003; TURNER et al., 2005). Apesar de (VAUGHAN; MARSHALL, 2003) não demonstrarem registro a longo prazo para as demais áreas da Antártica, (STEIG et al., 2009) evidenciam que um significativo aquecimento se estende muito além da península, cobrindo maior parte da Antártica Ocidental (figura 1.2b). Como consequência, constantes eventos de colapso de extensas áreas de gelo vêm sendo reportados nas últimas décadas (ROTT; SKVARCA; NAGLER, 1996; De Angelis; SKVARCA, 2003; RIGNOT et al., 2004; SCAMBOS et al., 2009; COOK; VAUGHAN, 2010). Cada vez mais esse sinal de balanço negativo parece migrar para as plataformas e geleiras mais ao sul (MCGRATH et al., 2012; PRITCHARD et al., 2012; HELLMER et al., 2012; HELLMER et al., 2017).

As plataformas de gelo servem como contenção para o fluxo de gelo vindo das geleiras e, após eventos de desintegração, um abrupto aumento do fluxo é observado (De Angelis; SKVARCA, 2003; SCAMBOS, 2004), o que afeta diretamente o balanço de massa destas geleiras e aumenta a contribuição para elevação do nível do mar (BERTHIER;

¹ Para fins de padronização em relação aos artigos que compõem a tese, optou-se por utilizar os acrônimos na língua inglesa.

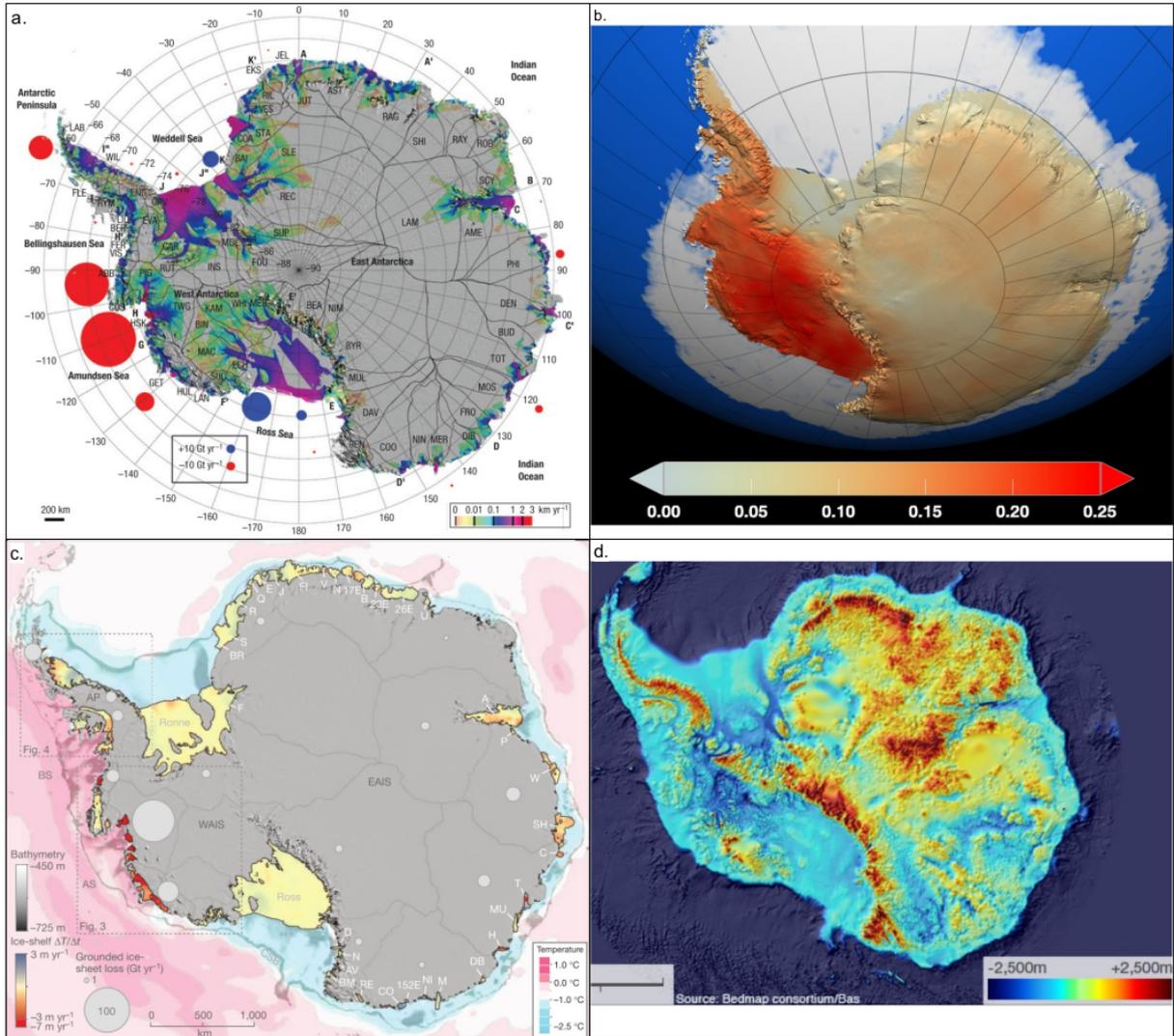


Figura 1.2 – (a.) Círculos denotam perda (vermelho) ou ganho (azul) de massa para as grande bacias em gigatoneladas por ano, retirado de (RIGNOT et al., 2008). Nota-se uma maior perda de massa da Antártica Ocidental (West Antarctica) em comparação à Oriental (East Antarctica). (b.) Tendências de temperaturas médias anuais, em graus Celsius por década, reconstruídas para 1979-2003, retirado de (STEIG et al., 2009). (c.) Temperatura potencial média do fundo marinho, em °C, estimada do World Ocean Circulation Experiment Southern Ocean Atlas (rosa e azul), retirado de (PRITCHARD et al., 2012). De origem na Corrente Circumpolar Antártica e movida pelo vento, a Água Circumpolar Antártica é relativamente quente, acima de 1 °C), salina e densa. Principalmente na Antártica Ocidental, essa água se aproxima da costa e é canalizada em profundidade (tipicamente mais profunda que 300 m) ao longo de vales no fundo do mar, acessando as plataformas de gelo e intensificando o derretimento basal. (d.) Elevação subglacial do leito antártico BEDMAP2 produzido pelo serviço geológico britânico. Percebe-se que uma grande parte do leito da Antártica Ocidental encontra-se abaixo do nível do mar e com muitos vales que aprofundam em direção ao interior do manto de gelo. Retirado de <https://www.bas.ac.uk/project/bedmap-2/>

Estas evidências de desequilíbrio, como desintegração e retração das plataformas de gelo, aumento do derretimento superficial e basal e aceleração de fluxo, concentram sua ocorrência principalmente na porção do manto de Gelo Antártico Ocidental (IMBIE, 2018). Esta porção é considerada potencialmente instável pelo fato de seu embasamento rochoso estar localizado abaixo do nível do mar, com o potencial de contribuir em até 3,3 metros para elevação do nível médio do mar (BAMBER et al., 2009). Além disso, muitas áreas apresentam um embasamento rochoso com um padrão topográfico inverso, ou seja, o embasamento aprofunda-se em direção ao continente. Neste caso, há maior penetração de águas oceânicas intensificando o derretimento basal, conseqüentemente reforçando novamente a retração da linha de encalhe num processo de *feedback* positivo (ROSS et al., 2012).

Além da relação direta entre um balanço negativo das geleiras com a elevação no nível médio dos mares e alteração das propriedades físicas, a interação entre oceano e criosfera ocorre na base das plataformas de gelo. O derretimento basal pode ser intensificado com o aquecimento das águas (PRITCHARD et al., 2012). Ademais, um aumento no aporte de água doce pode influenciar a salinidade no processo de formação de importantes massas de águas que irão compor a circulação global, como uma redução na salinidade da Água Antártica de Fundo no setor da Bacia Antártica Australiana (TURNER et al., 2009). (FAHRBACH et al., 2004), afirma que a baixa salinidade da Água de Fundo do Mar de Weddell sugere que o aporte de água doce no Mar de Weddell é considerável.

Ao levar em conta a intensificação dos processos de ablação acima mencionada, sobretudo nas porções marginais, os estudos devem considerar os processos de ganho ou perda de massa na superfície em toda sua extensão continental, denominados Balanço de Massa Superficial (Surface Mass Balance - SMB). A compreensão do SMB é necessária para determinar o presente estado do Manto de Gelo Antártico, prever sua potencial contribuição para a elevação no nível do mar e precisar sua história para reconstruções paleoclimáticas (EISEN et al., 2008). Como exemplo, um estudo recente mostra que um aumento médio na precipitação de neve na Antártica foi responsável por mitigar a contribuição na elevação no nível médio dos mares em um terço (MEDLEY; THOMAS, 2019) (figura 1.3).

No que se refere ao clima, o continente antártico apresenta condições mais frias e secas do que qualquer parte do Ártico (BENN; EVANS, 2010). Ainda assim, a precipitação de neve é o principal componente do SMB, devido à ausência de derretimento superficial no interior do continente. Isto ocorre devido à Corrente Circumpolar Antártica, que circula no sentido horário ao redor do continente Antártico, e é dirigida pelo fluxo de ar de oeste, junto com fatores oceanográficos. Como resultado da circulação atmosférica e oceânica predominantemente zonal ao sul das latitudes médias, há um fluxo de energia, atmosférico e oceânico, em direção ao pólo, muito menor do que comparado ao hemisfério norte.

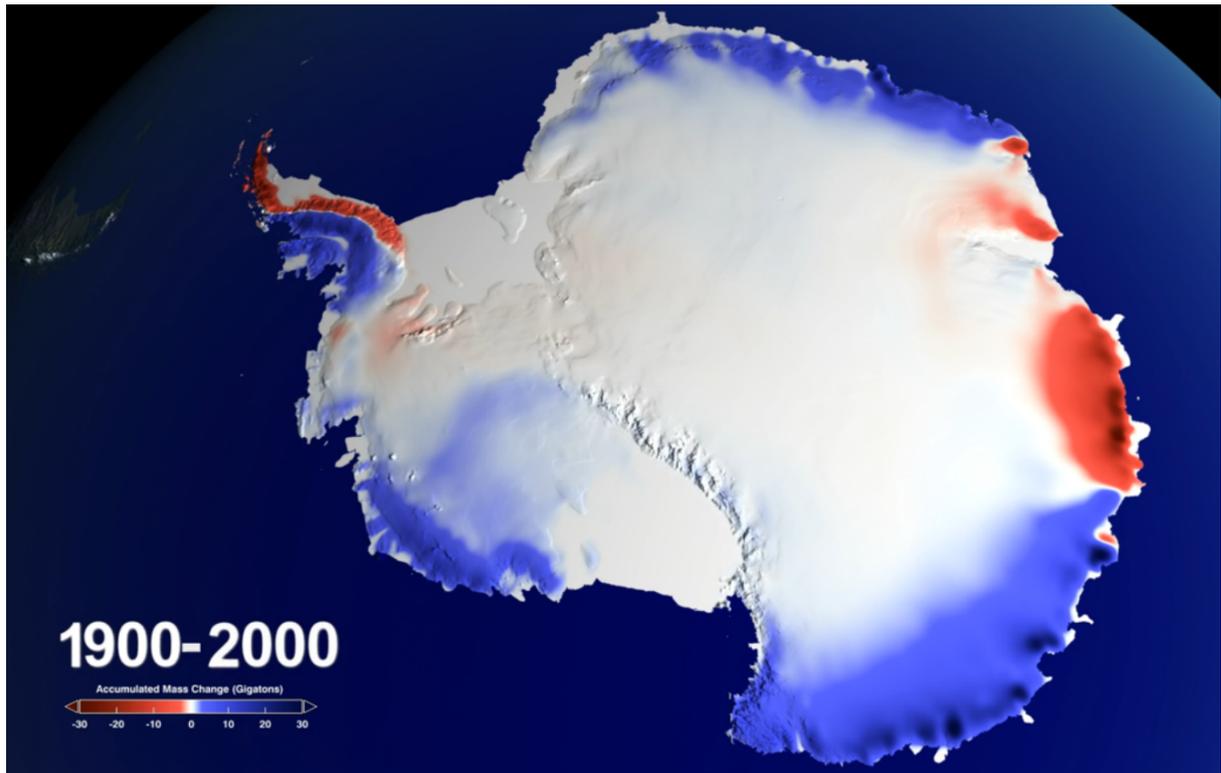


Figura 1.3 – Mudança da acumulação de massa superficial, em gigatoneladas, para o período de 1900-2000. O aumento da taxa de precipitação foi responsável por mitigar até 30% da perda de massa de todo o manto de gelo, retirado de (MEDLEY; THOMAS, 2019).

Além disso, a precipitação é máxima próxima à costa, onde a umidade é advectada do oceano, além de ser intensificada por efeito orográfico. Sobre as extensas plataformas de gelo, a precipitação da neve decresce com a distância da costa, como na Plataforma de Gelo Ronne, onde a precipitação diminui de 0,20 para 0,10 m a⁻¹ na linha de encalhe da plataforma a 600 km ao sul (GRAF et al., 1999). Outrossim, o vento no continente é intenso, com velocidades médias anuais de 5 – 10 m s⁻¹, na maioria das estações. Sendo assim, a deriva da neve em ambiente frio e ventoso faz com que as medições de precipitação sejam propensas ao erro (BENN; EVANS, 2010).

Tais dados, evidenciam que a criosfera exerce uma função fundamental no sistema climático global, de modo que seu constante monitoramento é essencial para compreendermos sua dinâmica atual e futuras alterações intensificadas pelas mudanças climáticas. Dada a extensa área que abrange o manto de gelo Antártico e seu difícil e custoso acesso, uma abordagem através do sensoriamento remoto contribui sobremaneira para o estudo deste ambiente.

Devido ao isolamento geográfico destas regiões, o sensoriamento remoto mostra-se como uma ferramenta valiosa para este propósito (BAMBER; KWOK; HOUGHTON, 2004; BAMBER; RIVERA, 2007). Dentre os sensores satelitais, os sensores ativos, como o Radar de Abertura Sintética (SAR), têm sido amplamente utilizados nas pesquisas polares,

principalmente pelo fato da aquisição ser independente da cobertura de nuvem e iluminação diurna. Muitos trabalhos, incluindo do grupo INCT da Criosfera, mostram sua aplicação como uma alternativa indicada no estudo da acumulação superficial (ARIGONY-NETO et al., 2009; BRAUN et al., 2000; COSTI, 2011; Mendes Junior, 2011; Pettinato et al., 2013). Na glaciologia, seu uso se dá na construção de DEM (RABUS et al., 2003; KRIEGER et al., 2007), medidas da velocidade de fluxo (LEMONS et al., 2018; GOMEZ et al., 2019), e, devido à penetração do sinal abaixo da superfície da geleira, o SAR pode ser usado na detecção de mudanças das fácies glaciais, i.e. zonas de percolação etc. (ARIGONY-NETO et al., 2007; ARIGONY-NETO et al., 2009) e acúmulo de neve (DIERKING; LINOW; RACK, 2012).

A aplicação deste sensor em pesquisas sobre acumulação de neve, a partir do retroespalhamento, tem um melhor desempenho em neve seca, onde não há conteúdo de água no estado líquido. Este, por sua vez, apresenta alta absorção do sinal SAR. A reflexão da radiação em uma superfície de neve plana é controlada pelo ângulo de incidência e a constante dielétrica da neve. Quanto maior a diferença entre a constante dielétrica da neve e a do meio externo (ar, a qual pode-se assumir a constante de um meio livre de 1), maior é o coeficiente de reflectância. A parte real da constante dielétrica para o gelo é praticamente constante ao longo do espectro das microondas, com valor de 3,17. Consequentemente, a parte real da constante dielétrica da neve seca depende somente da densidade da neve (REES, 2005), uma vez que esta determinará o percentual de ar que compõe o meio. Esta pode ser expressa como:

$$\varepsilon' = 1 + 1,9\rho_s \quad (1.1)$$

onde a densidade da neve ρ_s é expressa em Mg m^{-3} . Assim, a parte real da constante dielétrica para uma densidade típica de $0,3 \text{ Mg m}^{-3}$ é aproximadamente 1,57. A parte imaginária da constante dielétrica, a qual determina a absorção, é baixa para neve seca, com alguma dependência da temperatura.

Portanto, a neve seca se comporta como um meio quase transparente e dentre as três principais componentes que integram o sinal retroespalhado que chega até o sensor (figura 1.4), o espalhamento volumétrico é o mais significativo para neve seca (considerando o pacote de neve profundo suficiente para a penetração do sinal até a interface neve/gelo ou neve/rocha) (REES, 2005). Em função disso, a radiação apresenta uma alta interação e dependência da característica do pacote de neve. Forster et al. (1999), utilizando dados SAR com o comprimento de onda na banda-C, mostraram que a taxa de acumulação de neve e temperatura podem determinar retroespalhamento da superfície de neve para a zona de neve seca da Groenlândia, sendo a taxa de acumulação o fator mais importante. Tal relação, é mais sensível quando a taxa de acumulação é baixa, de $0,10 - 0,25 \text{ m w.e. (water equivalent) a}^{-1}$. Os autores também demonstraram que a contribuição do retroespalhamento superficial diminui com o aumento do ângulo de incidência. A partir de um ângulo maior

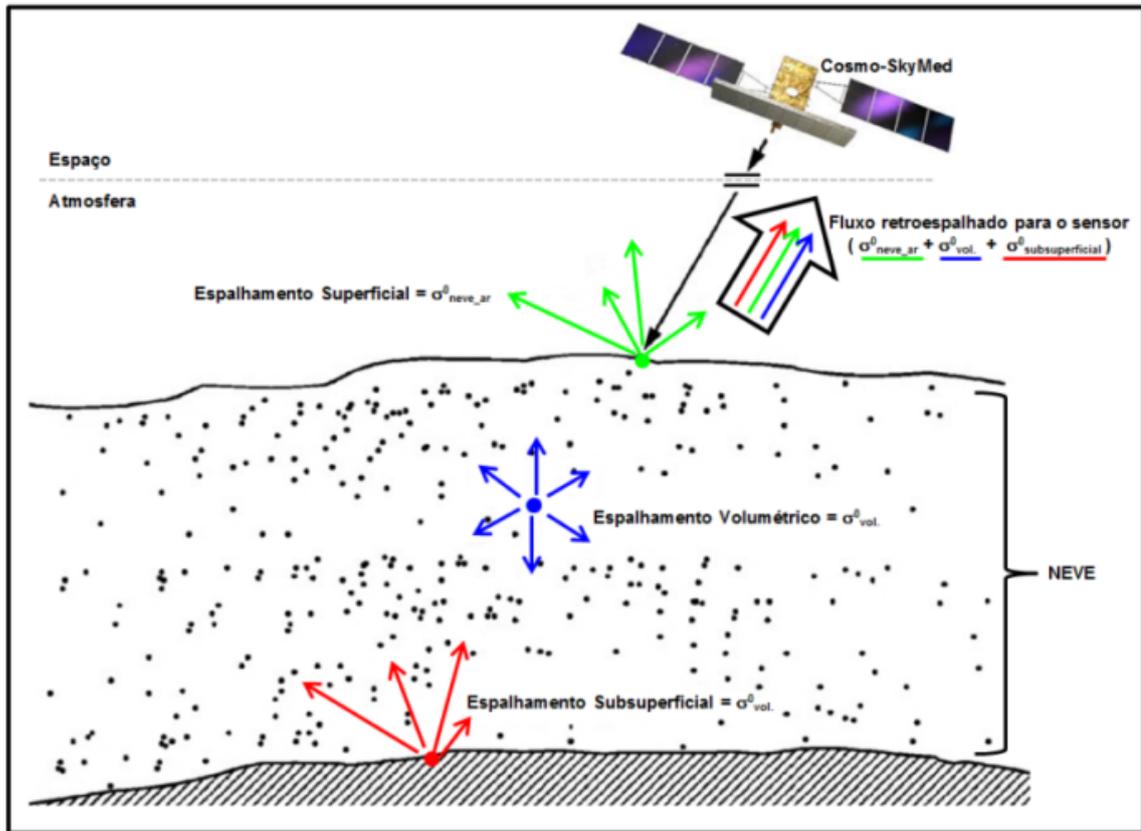


Figura 1.4 – Representação dos processos de retroespalhamento em um pacote de neve, retirado de (ESPINOZA, 2015)

que 30° , a contribuição é praticamente 100% do espalhamento volumétrico.

Especificamente, nas pesquisas sobre cobertura de neve em clima polar seco, as frequências de banda comumente utilizadas pelos sensores SAR são banda-C (4 a 8 GHz) e banda-X (8 a 12.5 GHz). A radiação eletromagnética nestes comprimentos de onda atinge até 20 m e 10 m de profundidade, respectivamente, com o pacote de neve (ROTT; STURM; MILLER, 1993). Para frequências maiores, a profundidade de atenuação diminui exponencialmente, reduzindo o espalhamento volumétrico e a interação com o pacote de neve e suas propriedades físicas (REES, 2005, seção 4.2.6).

Ademais, as aplicações relacionando o retroespalhamento SAR e propriedades da cobertura de neve têm focado na profundidade da neve (SHI; DOZIER, 2000) e acumulação de neve (FORSTER et al., 1999; ARTHERN; WINEBRENNER; VAUGHAN, 2006; DIERKING; LINOW; RACK, 2012). Poucos estudos o correlacionam com propriedades físicas da neve, como densidade, tamanho do grão, e número de camadas (estratificação), apesar de haver uma relação razoável entre eles. Sendo assim, a taxa de acumulação controlará a evolução do pacote de neve (metamorfismo) ao determinar o tempo de residência na profundidade sob influência da variação da temperatura. Por conseguinte, o grau de metamorfismo controlará, por sua vez, o perfil do tamanho do cristal de neve

ao longo da profundidade. Desta maneira, a estratigrafia do pacote de neve resulta numa assinatura específica do retroespalhamento, a qual pode ser relacionada a parâmetros relativos à dinâmica deposicional.

O presente trabalho se insere neste contexto, cuja estrutura central é a utilização de imagens de radar dos sensores COSMO-SkyMed (CSK), na caracterização de zonas com características de acumulação distintas, i.e. diferentes ambientes deposicionais e compreendendo a variabilidade regional, apresentada a seguir na seção da Área de Estudo. Imagens CSK foram empregadas com sucesso em estudos da identificação da cobertura de neve e diferentes fácies da geleira (SCHELLENBERGER et al., 2012; ANDRADE et al., 2015); e, também, na quantificação da profundidade do pacote de neve (Pettinato et al., 2013).

Outra fonte de dados comumente utilizada na glaciologia é o radar de penetração do solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR), que pode ser caracterizado também como parte do sensoriamento remoto, uma vez que consiste em um método não invasivo de estudo da subsuperfície. Existe uma gama de equipamentos e configurações no modo de operação e obtenção dos dados, mas a ideia central, como o nome radar sugere, é um sensor ativo que emite um pulso de baixa frequência e antena ou antenas captam o retorno deste sinal. Além disso, o sistema GPR pode ser operado diretamente da superfície de maneira estática, com pulso localizados, ou tracionada compondo um perfil geológico, ou ainda aerotransportados.

Na glaciologia, o uso de GPR aplica-se à determinação da espessura das diferentes fácies glaciais, a estruturas sub e englacial, bem como à dinâmica das plataformas de gelo e da idade do gelo marinho. Os perfis de GPR raso enfocam a investigação dos padrões de acumulação de neve, uma vez que este mapeia a estrutura interna da coluna da neve/*firn* ao longo do perfil. A variação na profundidade de camadas internas contínuas de mesma idade ao longo do perfil fornece informação sobre esses padrões, sendo necessário combinar estes dados com testemunhos de *firn*/gelo para a datação das camadas internas (EISEN et al., 2008).

1.2 Área de estudo

A Geleira Union (79°46'S, 83°24'W) é uma das maiores geleiras de descarga da porção sul das Montanhas Ellsworth no manto de gelo da Antártica Ocidental e tem seu gelo drenado para a enseada Constellation, como parte da Plataforma de Gelo Ronne-Filchner, voltada ao mar de Weddell (figura 1.5). Esta é a segunda maior plataforma de gelo (430.000 km²) do mundo, depois da Plataforma de Gelo Ross. O principal sistema de drenagem que alimenta a plataforma é a Corrente de Gelo Rutford, que integra várias bacias de drenagem glacial, entre elas a da Geleira Union.

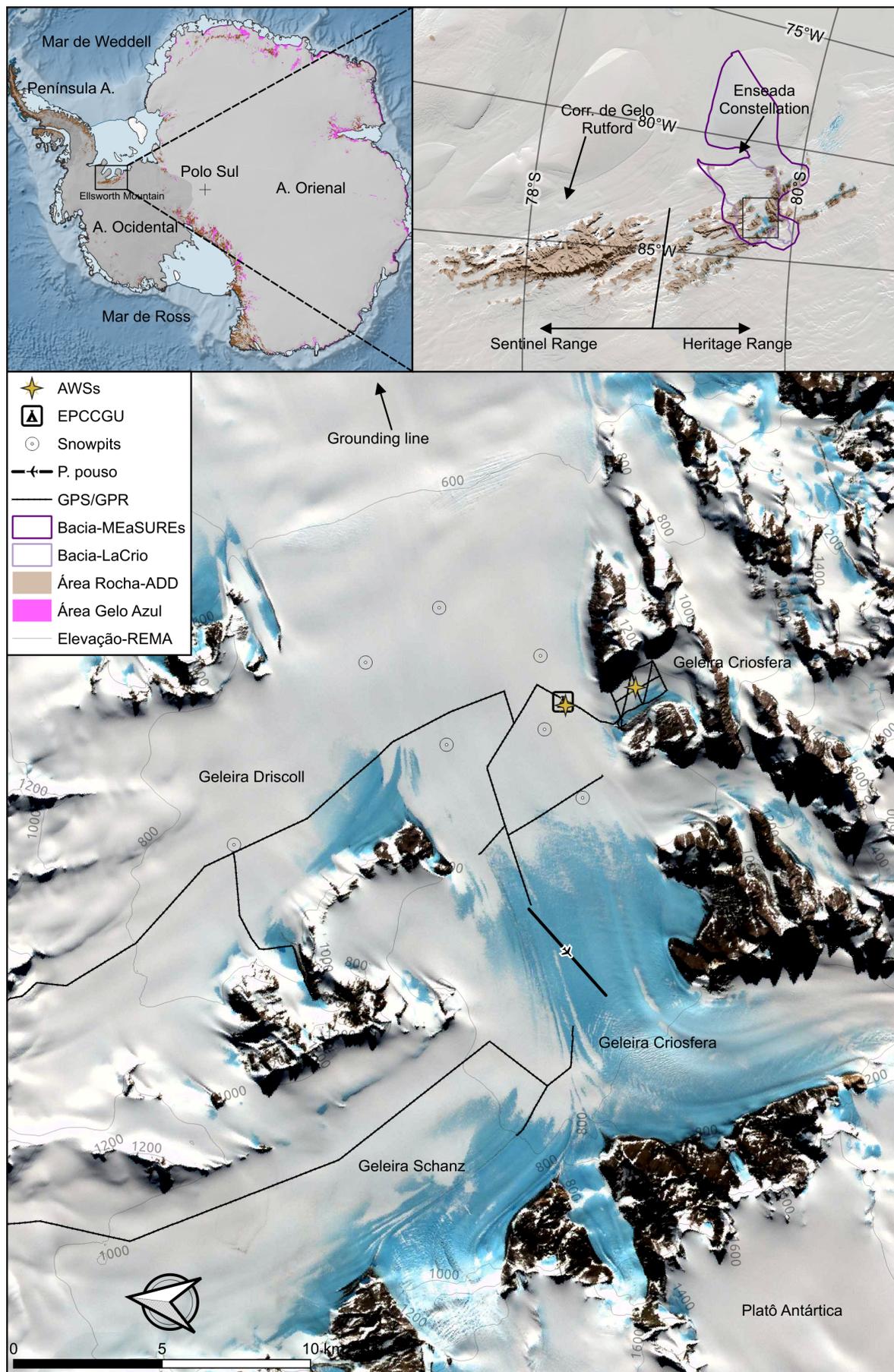


Figura 1.5 – Localização da área de estudo e principais toponímias. Os principais dados utilizados e localização das estações meteorológicas instaladas estão indicados pela legenda. Imagem de fundo: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA).

Tal plataforma, é dividida em duas pela Ilha Berkner, a leste a Filchner e a oeste a Ronne, a maior em área. Esta se encontra estável na última década, apesar do recente aquecimento atmosférico que afeta não só a Península Antártica como a Antártica Oeste (STEIG *et al.*, 2009). Por outro lado, Hellmer *et al.* (2012) alerta para uma possível desintegração da Plataforma de Gelo Filchner para o próximo século, devido à intensificação das taxa de derretimento basal, impulsionadas por águas mais quentes advectadas do Mar de Weddell, uma instabilidade para Ronne-Filchner, como um todo, é esperada (HELLMER *et al.*, 2017). Atualmente, a estimativa de perda por derretimento basal é de 154 Gt a^{-1} , aproximadamente 10% do derretimento basal do continente. (RIGNOT *et al.*, 2013).

A Geleira Union, desde seu divisor de drenagem com a Corrente de Gelo Institute até seu *grounding line* na enseada Constellation, tem 86 km de comprimento, integrando, então, a Corrente de Gelo Rutford. Com uma área de quase 3000 km^2 (bacia de drenagem glacial delimitada pelo grupo do Laboratório de Monitoramento da Criosfera, a partir do modelo digital de elevação TanDEM-X DEM, contra 8000 km^2 pelo projeto MEASURE que inclui *Ice Rise* a jusante (MOUGINOT; SCHEUCHL; RIGNOT, 2017)). A orientação de seu vale central é de sudoeste – nordeste com vários pequenos tributários drenando para o fluxo principal e dois grandes tributários representam expressiva contribuição em termos de áreas que ocupam, apresentando nome próprio: a Geleira Schanz e a Geleira Driscoll. Um estudo pioneiro sobre a dinâmica glacial, com base em balizas, sugeriu um estado próximo ao estacionário com um equilíbrio do balanço de massa líquido, inferido a partir da modelagem do fluxo de gelo, tendo como equivalente um acúmulo de neve de $0,13 - 0,23 \text{ m w.e. a}^{-1}$ (RIVERA *et al.*, 2010).

Negligenciando os processos de sublimação da superfície da geleira, Wendt *et al.* (2009) encontraram valores similares de acúmulo de neve para uma condição de equilíbrio no Vale Horseshoe a Sudoeste da Geleira Union. Ainda, Rivera *et al.* (2014) confirmaram uma condição próxima ao estado de equilíbrio e dados atualizados para o acúmulo médio de neve de $0,3 \text{ m a}^{-1}$, ou $0,12 \text{ m w.e. a}^{-1}$, considerando uma densidade média para neve de 400 kg m^{-3} . Ao determinar um ponto específico de medição, como a baliza B12, a jusante da área de gelo azul, os autores encontraram um balanço de massa superficial máximo de $0,2 \text{ m w.e. a}^{-1}$. Outras estimativas de acúmulo de neve são derivadas de modelos climáticos atmosféricos regionais (BERG *et al.*, 2006) e por meio de escassos dados de campo, (ARTHERN; WINEBRENNER; VAUGHAN, 2006) na faixa entre $0,16$ e $0,33 \text{ m w.e. a}^{-1}$. Em outro trabalho, realizado com amostras de testemunho de *firn* de seis locais ao redor da Geleira Union, exibem, no geral, um acúmulo de neve mínimo na faixa de $0,1$

– 0,2 m w.e. a⁻¹ e valores anuais máximos superiores a 0,3 m w.e. a⁻¹ (HOFFMANN et al., 2018).

Apesar destes estudos apresentarem uma concordância nas estimativas, não representam a variabilidade local no acúmulo de neve causada devido ao micro-relevo superficial, à variação no campo de vento, bem como aos processos de densificação. Por exemplo Hoffmann et al. (2018) encontraram um máximo absoluto de 0,47 e mínimo absoluto de 0,08 m w.e. a⁻¹ para um mesmo ano correspondente em diferentes locais. Logo, os pesquisadores concluíram que a variação espacial das tendências do acúmulo de neve nos locais amostrados está relacionada, sobretudo, à exposição ao vento. Tal variabilidade também é observada na variância do MB específico entre as medições das balizas (RIVERA et al., 2014). Portanto, este parâmetro impactará o SMB e, em consequência, o cálculo no MB da bacia de drenagem glacial.

1.3 Justificativa

Uma pretensão da presente tese consiste em representar e servir como piloto, na compreensão da variabilidade espacial e na dinâmica de acúmulo de neve para todo o conjunto da cadeia de montanhas Ellsworth, o que não é levado em consideração em modelos climáticos.

Ainda não é possível estimar um MB líquido para a GU, apesar das evidências sugerirem um estado próximo do equilíbrio (RIVERA et al., 2010; RIVERA et al., 2014). Além disso, a orografia da região associada ao transporte de neve pelo vento tornam a dinâmica de acumulação ainda mais complexa e sensível à generalização. Visto que as medidas do acúmulo superficial para a região limitam-se para uma secção e alguns pontos esparsamente distribuídos, de modo que algumas áreas ainda não foram foco de um estudo mais detalhado. Sendo assim, a motivação desta tese é preencher uma lacuna na investigação e no avanço do conhecimento, acerca da variabilidade espacial, quando possível temporal, da dinâmica de acúmulo de neve, contrastando os diferentes ambientes deposicionais na Geleira Union, integrante da cadeia de montanhas Ellsworth.

Os trabalhos apresentados como fruto desta tese representam esforços para uma melhor compreensão espacial da variabilidade deste parâmetro, a partir de uma abordagem em sensoriamento remoto, validados e apoiados em dados de campo. Os métodos ora apresentados, servem como pilotos, com potencial de serem replicados para as demais áreas das Montanhas Ellsworth, abrangendo área expressiva e envolvendo baixo custo, com a possibilidade de contínuo monitoramento.

Salienta-se que a replicabilidade do método se restringe ao ambiente polar de neve seca e sem conteúdo de água líquida. Outras potenciais áreas, para onde o estudo pode ser ampliado, referem-se à Antártica Oriental. Nestas áreas, ocorrem baixos valores de

acumulação, porém com grande impacto no SMB devido à sua extensão, além da ocorrência de áreas de balanço negativo como as de gelo azul.

A carência de dados relativos a este ambiente justifica a escolha da área do estudo, além da facilidade logística ao local. Já que a atuação do grupo de pesquisadores brasileiros, desde 2011, possibilitou uma série de levantamentos de dados medidos em campo, o que fornece um laboratório para o desenvolvimento de ferramentas e métodos para as investigações, pois permite a presença para conhecimento local e medidas para calibração destes métodos. Assim sendo, o potencial de replicabilidade dos resultados para áreas adjacentes com características glaciológicas semelhantes inerentes à presente investigação, também justifica esta tese.

1.4 Hipótese

Com base nos trabalhos e conhecimentos atuais sobre o tema do acúmulo de neve, diretamente relacionado ao SMB apresentados anteriormente, a presente tese tem como intuito completar uma lacuna da informação sobre a área de estudo. Para tal, a seguinte hipótese foi proposta: **“Ao considerar a variabilidade espacial na taxa de acumulação da neve em diferentes ambientes deposicionais da região das Montanhas Ellsworth na Antártica Ocidental, o Balanço de Massa Superficial será distinto ao que se estima atualmente.”**

1.5 Objetivos

O objetivo principal da tese é identificar áreas com distintas características de acúmulo de neve, bem como estimar seus padrões deposicionais. Para isso, os seguintes objetivos específicos deverão ser atingidos:

- Caracterizar espacialmente os diferentes ambientes deposicionais de neve da Geleira Union, com uma abordagem integrada do sensoriamento remoto e análise geoespacial;
- Definir a estrutura e as espessuras das camadas do pacote de neve/*firn* nos diferentes ambientes deposicionais;
- Interpretar e projetar o impacto da alta variabilidade espacial da acumulação da neve na estimativa do balanço de massa superficial, com o uso de produtos de sensoriamento remoto.

1.6 Estrutura da Tese

Após este capítulo introdutório, no segundo capítulo, é fornecida uma visão geral dos conjuntos de dados e métodos usados na tese para alcançar esses objetivos. Para a obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanologia, é requerido que o discente realize a submissão de pelo menos dois artigos científicos como primeiro autor, em periódico com corpo indexado, sendo um deles aceito e outro submetido. Desse modo, os resultados da pesquisa desenvolvida durante o período de doutorado e a discussão dos resultados serão apresentados em forma de artigos nos capítulos 3 e 4. Os artigos de primeira autoria foram submetidos às revistas *Antarctica Science* e a *Geophysical Research Letter*, respectivamente.

No Capítulo 3, foram analisados dados estratigráficos de sete locais da Geleira Union com distintas respostas de retrospalhamento do sinal SAR na banda-X. Foi possível caracterizá-los com relação a um ambiente mais ou menos exposto ao vento. Assim, com o uso de imagens COSMO-SkyMed, em modo de aquisição Stripmap HIMAGE, foram mapeadas e classificadas as áreas de cobertura de neve por classes como resultado da interpretação dos dados dos poços de escavação de neve. Ao final, produtos derivados a partir de um DEM foram gerados para melhorar a análise de cluster proposta e a delimitação espacial dos ambientes deposicionais de neve. Ademais, as imagens SAR, com resolução de aproximadamente 2,5 metros, foram adquiridas no inverno de 2011 e verão 2011/2012, sendo que a resolução final da imagem classificada foi de 12 metros em função da resolução do DEM utilizado. Como resultado, são apresentadas 6 classes que representam, de maneira qualitativa, áreas de maior ou menor taxa de acumulação de neve.

No Capítulo 4, foram utilizados dois modelos digitais de elevação distintos, comparando-os, para identificar zonas de distintas características do pacote de neve, principalmente no que se refere à taxa de acumulação. Os DEMs foram validados com dados geodésicos obtidos em campo. A comparação com o segundo modelo baseado em SAR, identificou zonas em que o sinal apresenta uma penetração e interação mais rasa ou profunda com o pacote de neve. Sendo assim, propõe-se o uso dos dois modelos como identificadores da variabilidade espacial na taxa de acumulação da neve.

O último capítulo, fornece uma síntese dos resultados desta tese e sua contribuição no contexto das pesquisas da dinâmica glacial e futuras mudanças. Além disso, são propostos possíveis trabalhos futuros que visam avançar ainda mais no tema.

2 Capítulo 2

Neste capítulo, o material e métodos são apresentados separadamente para cada um dos artigos. Dessa maneira, o desenvolvimento desta tese teve uma etapa inicial reunir e ordenar o conjunto de dados disponíveis e levantados para a área de estudo em um ambiente SIG. As atividades, visando o estudo da dinâmica glacial na Geleira Union, iniciaram no verão 2011/2012, realizadas pela iniciativa do INCT da Criosfera, especificamente o Laboratório de Monitoramento da Criosfera (LaCrio) em conjunto com o Instituto Antártico Chileno (INACH). De forma resumida, a Tabela 2.1 resume todos os dados utilizados na elaboração dos dois artigos, as principais características e a fonte dos dados e os principais softwares utilizados também estão listados.

2.1 Material e métodos referentes ao artigo 1 (capítulo 3)

2.1.1 Estação Meteorológica e Profundidade da Neve

Uma estação meteorológica automática (*Automatic Weather Station* - AWS) foi instalada em 2013, próxima à base chilena Estacion Polar Científica Conjunta Glaciar Union (EPCCGU), precisamente nas coordenadas $79^{\circ}46, 22'S$, $82^{\circ}54, 72'W$ a 693 m acima do nível do mar (figura 2.1). Tomou-se o cuidado de posicioná-la a barlavento em relação à base, considerando o vento predominante de sudoeste no local. A estação coleta os principais parâmetros meteorológicos: temperatura do ar a nível da superfície, temperatura da neve (instalado à 0,5 m da superfície), umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar, direção e velocidade do vento. Em conjunto, foi instalado um sensor sônico (SR50) para registro da profundidade da neve a 50 m de distância da AWS. Os dados são registrados em médias horárias acompanhadas dos valores mínimos e máximos para algumas variáveis e, para otimizar o banco de bateria, o sensor sônico opera apenas por 2 minutos a cada hora. As médias horárias são enviados para um link web, através de um modem Iridium, enquanto que os parâmetros complementares como desvio, mínimo e máximo, ficam registrados no *datalogger* e são recuperados durante as expedições à geleira. Maiores detalhes podem ser consultados em Crespo (2018). Em 2015, uma segunda estação foi instalada em uma pequena geleira tributária chamada Criosfera (nome não oficial), também conhecida como Rossman Cove (destacada por um retângulo preto na figura 1, capítulo 3). Esta estação operou apenas por dois anos e foi desativada para realocação na Patagônia. Os dados foram reunidos, filtrados e tratados por Crespo (2018), em seu trabalho de conclusão do curso de oceanologia, sob orientação do autor desta tese.

Tabela 2.1 – Principais dados e softwares utilizados na elaboração dos dois artigos que compõem os resultados desta tese.

Tipo de dado	Resolução	Fonte do dado	Aquisição	Aplicação na tese
AWS + SR50	horária	LaCrio	início dez 2013	Fornecimento da série de 4 anos de acúmulo superficial pontual. Estimativa da direção média do vento local de 255°
Snowpits	7 - pontuais	LaCrio	verão 2011/2012	Artigo I - interpretação de áreas com características deposicionais distintas. Classificação em ambiente mais ou menos exposto ao vento.
GPS RTK	72 km em intervalos < 5 m	LaCrio	dez de 2014	Artigo II - registro e correção geométrica dos perfis GPR; e validação e comparação com DEMs.
GPR	72 km de perfil resolução horizontal 0.1-0.5 m alcance vertical de 12 e 60 m	LaCrio	dez de 2014	Artigo II - identificação da profundidade da interface <i>firm/gelo</i> ; diferença nas camadas deposicionais entre ambientes de maior e menor deposição.
StripMap Himage* COSMO-SkyMed	<3 m após correção geométrica	Agência Espacial Italiana - ASI Através de chamada de oportunidade submetido	dez 2011 - jan 2012	Artigo I - mapa de densidade e tamanho do grão derivados em função do retroespalhamento médio entre as imagens; Classificação automática a partir de análise de cluster k-means.
StripMap PingPong** COSMO-SkyMed	<8 m após correção geométrica	Agência Espacial Italiana - ASI Através de chamada de oportunidade submetido	jul 2011	Artigo I - Imagem com dupla polarização para composição de uma imagem colorida e escolha dos pontos de amostragem dos snowpits de acordo com a resposta distintas do retroespalhamento.
TanDEM-X DEM	12 m	Agência Espacial Alemã - DLR Através de chamada de oportunidade submetido	inverno 2014 e 2015	Artigo I - correção geométrica das imagens COSMOs; geração de produtos geoespaciais (declividade, orientação, da vertente, efeito do vento e rugosidade) para aprimoramento da classificação através da análise de cluster. Artigo II - validação e comparação do mesmo com dados topográficos GPS obtidos em campo; identificação de áreas de super/sub estimativa da elevação e descórrencia da maior penetração do sinal na faixa da banda-X.
REMA DEM	8 m	Polar Geospatial Center, University of Minnesota Distribuição gratuita	de 2014 a 2017	Artigo II - validação e comparação com dados topográficos GPS obtidos em campo; modelo utilizado como superfície de referência para identificação de áreas em que o TanDEM-X super/sub estima a elevação.
Software	Fonte	Licença	Descrição do uso	
QGIS+GRASS	https://qgis.org/	Open source	Organização de um SIG com todos os dados levantados em campo e imagens orbitais; Processament	
SNAP	https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/		Pré-processamento imagens SAR: calibração radiométrica, filtragem de speckle, correção geométrica	
SAGA	http://www.saga-gis.org/	Open source	Algoritmo <i>wind effect</i> ; Algoritmo análise de cluster <i>k-means</i> , para classificação semi-automáticas das diferente áreas de deposição da neve;	
ReflexW	https://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html	US\$ 120 licença; ou Versão gratuita Reflex2DQuick	Processamento dados GPR: conversão tempo-profundidade, para editar tamanho, reamostragem espacial, filtros e profundidade dos horizontes	
* https://earth.esa.int/web/guest/-/cosmo-skymed-stripmap-himage-mode				
** https://earth.esa.int/web/guest/data-access/view-data-product/-/article/cosmo-skymed-stripmap-ping-pong-mode				

2.1.2 Perfis estratigráficos - Snowpits

Os *snowpits* consistem em poços de escavação de neve para análise estratigráfica e apesar de realizados em quase todas as campanhas, apenas os sete *snowpits* efetuados



Figura 2.1 – Foto da estação meteorológica automática UNION13, instalada na Geleira Union próxima a base chilena EPCCGU, em 2013. Ao fundo, o sensor sônico SR50 para medição da altura da neve.

em 2011/2012 foram analisados para elaboração do artigo apresentado no capítulo 3. A realização de um *snowpit* demanda um expressivo esforço físico, além de muitas horas de trabalho, em média 5-6 horas. No entanto, eles permitem o acesso a uma neve antiga abaixo da superfície, havendo a recuperação de uma sequência de eventos, já que camadas de idades distintas são acessadas. Para estimar um BMS, a partir de *snowpits*, é preciso, além de medidas de densidade, uma boa datação das camadas (EISEN et al., 2008).

Os sete *snowpits* realizados em 2011 objetivaram a coleta quase simultaneamente à aquisição das imagens SAR do sensor COSMO-SkyMed, para auxiliar na interpretação e calibração das estimativas realizadas, a partir das imagens. A escolha dos locais baseou-se em zonas com distinta resposta no sinal de retroespalhamento da imagem CSK, modo StripMap PingPong de julho de 2011, com resolução de 7,8 m. Neste modo de aquisição, o sensor realiza a aquisição da imagem com polarização cruzada. A composição colorida RGB, utilizada para escolha dos sete locais, foi VV-VH, VH, e VV (figura 1, capítulo 3). Apesar de uma menor resolução em relação ao modo de aquisição StripMap Himage (7,8 m contra 2,4 m após correção geométrica para a área de estudo) e quase mesma área de cobertura, a imagem PingPong, disponível anterior a expedição a campo, foi escolhida devido à aquisição com duas polarizações. A disparidade na polarização das bandas faz com que a diferença na estrutura física do pacote de neve seja realçada em uma composição colorida. Além disso, para a análise e interpretação das imagens concomitante aos dados de campo, utilizou-se as imagens Himages, já que apresentou um maior número de imagens

adquiridas para o período de verão de 2011/2012 e pela maior resolução espacial das imagens.

A análise estratigráfica de cada *snowpit* seguiu os procedimentos adotados pela maioria das agências de monitoramento da neve e avalanche. Estes são: a escavação de 2 m de profundidade, o registro do tamanho e tipo de cristal de neve, a dureza relativa às mãos de cada camada, e a temperatura e densidade a cada 10 cm de profundidade. Não foi feito um registro sistemático do microrrelevo da superfície em cada região, porém realizou-se um registro fotográfico da área do entorno, permitindo, assim, uma comparação com descrição e classificação do microrrelevo com o tipo de ambiente deposicional (deposição, erosão, redistribuição), apresentada por Goodwin (1990) e documentada por Fujiwara e Endo (1971).

2.1.3 Imagens COSMO-SkyMed

A constelação COSMO-SkyMed, lançada pela agência espacial italiana (ASI), é composta por quatro satélites equipados com um sensor Radar de Abertura Sintética (SAR), operando na frequência da banda-X (9,6 GHz). As imagens utilizadas neste trabalho foram adquiridas através de um anúncio de oportunidade da ASI para uso científico, sob o projeto “COSMO-SkyMed data in support of climate sensitivity studies of selected glaciers in Antarctica, South America, the Arctic and Northern Europe (GlacioCOSMO)”. Todas as imagens para a região da Geleira Union adquiridas através deste anúncio estão apresentadas na Tabela 2.2. As 5 imagens com modo de aquisição Himage, com uma resolução de aproximadamente 2,4 m após correção geométrica, foram utilizadas para a identificação e delimitação de diferentes ambientes deposicionais em função do sinal retroespalhado. Optou-se pela utilização somente das Himages, principalmente pela maior resolução e o maior número de imagens adquiridas, permitindo o processamento de uma

Tabela 2.2 – Características das imagens COSMO-SkyMed adquiridas através do anúncio de oportunidade da Agência Espacial Italiana. O ângulo de incidência de referência para todas as imagens é de 40°, mas os valores para pontos da grade exibem ângulos no intervalo de 22-26° para as HIMAGES e 19-22° para a PING PONG. A resolução apresentada na tabela se refere à informação que consta no metadado da imagem bruta. A resolução das imagens após correção geométrica é de 2,4 m e de 7,8 m, para os modos de aquisição HIMAGE e PING PONG, respectivamente.

Modo de imageamento	Data de aquisição	Resolução (Azimute x Range)	Polarização	Passada	Número do Satélite	Lado da visada
Himage	14-07-2011	0,97 x 1,87 m	HH	Descendente	2	Direito
Himage	14-07-2011	0,97 x 1,87 m	VV	Descendente	3	Direito
Himage	21-12-2011	0,97 x 1,87 m	VV	Descendente	3	Direito
Himage	14-01-2012	0,97 x 1,87 m	VV	Descendente	1	Direito
Himage	22-01-2012	0,97 x 1,87 m	VV	Descendente	2	Direito
Himage	30-01-2012	0,97 x 1,87 m	VV	Descendente	1	Direito
Ping Pong	14-07-2011	2,76 x 2,35 m	VH-VV	Descendente	3	Direito

imagem média, diminuindo assim a interferência do ruído de speckle em cada imagem. Outro motivo, foi em utilizar imagens de uma mesma polarização e geometria de aquisição semelhante, desta maneira a diferença na intensidade do sinal retroespalhado, entre as diferentes imagens, limita-se, apenas, à diferença da característica do pacote de neve.

As cinco imagens utilizadas, de polarização VV, foram pré-processadas com as seguintes etapas: calibração radiométrica, filtro de *speckle* (2 vezes filtro de mediana 5x5) e correção de terreno, empregando o modelo digital de elevação TanDEM-X, para projeção UTM. Para cada imagem, aplicou-se um algoritmo para geração de mapas das características físicas do pacote de neve, incluindo densidade e tamanho do grão.

Os algoritmos para transformação dos valores de retroespalhamento em parâmetros físicos foram desenvolvidos pelo grupo LaCrio e aplicados às imagens CSK. As equações dos algoritmos foram baseadas na inversão de um modelo de transferência radiativa (ESPINOZA; ARIGONY-NETO; JANA, 2014). Este descreve o comportamento do sinal SAR de frequência na banda-X num volume determinado de neve, em função de uma variável, enquanto os outros parâmetros do pacote de neve são parametrizados (i.e. variando-se somente o parâmetro modelado). Utilizou-se os algoritmos de maneira quantitativa, uma vez que estes não puderam ser validados qualitativamente, devido ao limitado número de dado de campo. De modo geral, altos valores de retroespalhamento estão associados a maiores densidades e maiores tamanhos do cristal de neve.

Ao focar em zonas de deposição de neve, excluem-se áreas de gelo azul exposto (*Blue Ice Area* - BIA). Em BIA, ocorre um menor espalhamento volumétrico e maior espalhamento superficial, em função da propriedade dielétrica do gelo. As áreas montanhosas também apresentam uma resposta particular do retroespalhamento por conta da superfície de rocha exposta, ou da geometria de aquisição, intensificando um espalhamento especular da superfície inclinada. Para mascarar estas áreas, foram usados dados poligonais do limite de BIA (Hui et al. 2014) e de rocha, fornecidos por Burton-Johnson et al. (2016) e pelo banco de dados digital antártico (*Antarctic Digital Database* ADD). Tais dados estão disponíveis pelo Projeto Quantarctica GIS e o polígono final das áreas foi editado manualmente, reunindo as três fontes acima citadas.

As cinco imagens foram empilhadas (*stacking*) para corresponderem a uma mesma posição e resolução de grade, utilizando-se uma reamostragem bilinear. Optou-se por esta reamostragem, uma vez que o ruído (*speckle*) foi, em sua maioria, eliminado com a dupla filtragem no pré-processamento da imagem. A interpolação bilinear, utilizada nesta reamostragem, produz uma interpolação mais suave do que a abordagem por vizinho mais próximo, desta forma a imagem representa o valor do retroespalhamento de uma maneira contínua no espaço, com valores a cada 2,4 m. A interpolação bilinear estima o valor apropriado de cada pixel, localizando a média ponderada pela distância dos quatro pixels mais próximos, localizados em direções diagonais; e garante uma transição suave

dos valores (cor, elevação, ou qualquer grandeza que a matriz represente) entre os pixels. Após o empilhamento, para cada pixel, o retroespalhamento médio entre as 5 imagens foi calculado. As cinco imagens com polarização VV exibem pequena diferença, com um desvio padrão de 1,1 dB, excluindo-se as áreas mascaradas (figure 2, capítulo 3).

A fim de testar se esta diferença poderia estar relacionada a uma influência temporal entre imagem de verão e inverno, excluiu-se a imagem com aquisição em junho. Não houve uma redução no desvio padrão da imagem média (linha azul na figura 2, capítulo 3). Conclui-se, portanto, que a diferença do sinal entre as imagens é independente do verão/inverno, e pode ser atribuída à pequena alteração na deposição da neve, mudança no relevo da superfície e mudança na geometria de aquisição. Adicionalmente, uma parcela da variância deve-se ao efeito *speckle*, inerente às imagens SAR. Assim, a diferença foi negligenciada, considerando (i.) a profundidade de atenuação da banda-X de até 8-10 m (HOFFER; MÄTZLER, 1980; ROTT; STURM; MILLER, 1993), (ii.) uma máxima mudança na altura da superfície de 60 cm, e (iii.) uma contribuição dominante do espalhamento volumétrico e insignificante reflexão superficial, devido ao alto ângulo de incidência e baixo contraste dielétrico (Forster et al. 1999, Du et al. 2010, Dierking et al. 2012).

Os mapas de densidade e tamanho do grão foram gerados para cada imagem e, então, calculado o mapa médio. Finalmente, os mapas foram reamostrados por mediana para uma resolução menor compatível ao do DEM (12 m). Ainda, para suavização, um filtro de mediana 3x3 foi aplicado. As cinco imagens sobrepostas cobriram uma área de 1620 km² do vale glacial (Figure 1).

2.1.4 TanDEM-X DEM e derivados

Com o objetivo principal de adquirir um DEM global e de acurácia sem precedentes, a missão TanDEM-X é composta por dois satélites quase idênticos, TerraSAR-X e TanDEM-X, equipados com um SAR operando em X- banda. Ambos voando em órbita próxima e com aquisição em configuração bi-estática, o que permite a obtenção de interferogramas com alta precisão. O modelo digital de elevação TanDEM-X, daqui em diante referenciado apenas TDX, de alta resolução foi obtido pela Agência Espacial Alemã (DLR) através da proposta submetida “*TanDEM-X data in support of glacier mass balance and remote sensing studies of glaciers in Southern Patagonia and Ellsworth Mountains (Antarctica)*”. O DEM é disponibilizado em bloco (tiles) de tamanhos e resolução diferentes, dependendo da latitude, uma vez que a distância métrica em x , longitude, é reduzida em altas latitudes. A extensão e resolução são mantidas em y , variando em x (WESSEL et al., 2016). A maioria dos tiles obtidos para o trabalho, no intervalo de $|70^\circ| < |80^\circ|$, os *tiles* apresentam abrangência de $2^\circ \times 1^\circ$ (longitude x latitude) e resolução de $1,2'' \times 0,4''$ arco segundo em x e y , o que corresponde aproximadamente a 6×12 m. O TDX foi projetado para uma exatidão mínima de 10 m para o erro absoluto de altura, porém Wessel et al. (2018) encontraram

um erro menor que 2 m.

Na elaboração do artigo apresentado no capítulo 3, produtos geoespaciais de declividade, orientação da vertente, efeito do vento e rugosidade da superfície, gerados a partir do TDX. Em sua maioria, os algoritmos geoespaciais requerem uma grade regular com distâncias métricas para cálculos das características do terreno. Para isso, os tiles do TDX foram mosaicados em um raster virtual para em seguida ser reprojeto para uma grade regular de 12 m de resolução na projeção UTM com datum WGS84. Testaram-se diversos métodos de reamostragem para a reprojeção e o melhor resultado foi obtido com uma reamostragem bilinear. Testou-se, também, uma reprojeção para uma grade de maior resolução, adotando-se a de menor tamanho de pixel (em x) em que o TDX é disponibilizado. Ao final, definiu-se a resolução da grade de 12 m, preservando uma resolução equivalente em x e y . Depois de reprojeto, o TDX foi recortado para a extensão mínima das imagens CSK.

Foram utilizados os algoritmos de análise de terreno dos softwares QGIS v.3.4 e SAGA GIS, com um filtro mediano, com janela 5x5, aplicado a cada produto para uma melhor suavização, aprimorando o resultado das análises de cluster.

A declividade do terreno apresentou uma alta variabilidade, uma vez que o DEM representa a pequena escala das feições superficiais (~ 12 m). Como consequência, mesmo em áreas planas, o mapa de declividade demonstra valores entre 1° - 2° , o que pode significar a rugosidade da superfície. Como o enfoque da análise são áreas centrais dos vales com baixa declividade, fez-se necessário atribuir maior peso para o intervalo de valores mais baixos. Desta forma, aplicou-se uma transformação não-linear, extraído-se a raiz cúbica da declividade, similar a Plattner, Braun e Brenning (2004) para valores de curvatura do terreno.

O produto de orientação da vertente do terreno, também informalmente denominada aspecto, foi convertido para aspecto relativo da superfície α_r , *i.e.* o valor absoluto em graus ($^\circ$) da distância angular do aspecto do terreno α para o azimute da direção predominante do vento (PLATTNER; BRAUN; BRENNING, 2004; BÖHNER; ANTONIĆ, 2009). Esse valor é expresso como o cosseno do aspecto relativo $\cos(\alpha_r)$, onde 1 indica uma orientação máxima a barlavento e -1 máxima a sota-vento.

No que se refere a dados de rugosidade, entende-se que a influência desta variável terá o mesmo comportamento da curvatura, discutido por Plattner, Braun e Brenning (2004). Estes autores, observaram que em relação a baixos valores de curvatura da superfície, uma pequena variação deste parâmetro tem grande efeito na acumulação da neve, enquanto que mediante maiores valores, pequenas variações não apresentam maiores efeitos. Por este motivo, também extraiu-se a raiz cúbica dos valores.

Para o produto do efeito do vento sobre o terreno, utilizou-se o algoritmo do

software SAGA GIS, o qual referencia o trabalho de [Winstral, Elder e Davis \(2002\)](#). Neste algoritmo, há a opção de se fornecer uma grade com o campo de vento, quando este é conhecido, ou considerar uma direção média para toda a grade do DEM. No caso da segunda opção, [Böhner e Antonić \(2009\)](#) sugerem usar várias distâncias e diferentes direções, para então escolher os parâmetros com os quais o resultado apresenta melhor capacidade de explicar a variabilidade espacial do fenômeno alvo. Testou-se a geração do produto com duas direções médias de vento como entrada, 225° reportada por [Rivera et al. \(2014\)](#) e 255° com base nos registros da AWS Union13. O resultado com a direção de 255° melhor representou os ventos catabáticos predominantes no vale central.

2.1.5 Classificação por cluster

Uma análise de cluster foi realizada para uma classificação semi-automática das diferentes zonas de deposição de neve, a partir da imagem CSK. A análise de cluster é comumente utilizada para a exploração de mineração de dados em diversos campos como, *machine learning*, reconhecimento de padrões, análise de imagem, recuperação de informações, bioinformática, compressão de dados e computação gráfica. A clusterização envolve o agrupamento de um conjunto de objetos (cluster), neste caso, valores de pixel, de tal maneira que objetos dentro de um mesmo cluster são mais similares uns aos outros do que aos objetos em outro cluster. Tal método *k-means* interpreta a similaridade pela distância euclidiana de cada valor de pixel do centróide que define cada grupo de cluster. O particionamento pelo método *k-means* roda sucessivas interações, minimizando a raiz quadrada do erro para cada grupo e, em cada interação, ajustando o valor do centróide de cada grupo. O algoritmo utilizado foi o ‘*k-means clustering for grids*’ do SAGA GIS, com as opções: método ‘*Minimum Distance/Hill Climbing*’, normalização dos dados, e número máximo de interações.

Definiram-se seis classes com base na regra heurística do número de classes que se espera vezes dois, uma vez que três zonas de classificação eram esperadas: baixa, média e alta taxa de acumulação. No intuito de avaliar esta escolha heurística, utilizou-se o método *elbow*, no qual a soma quadrática dos erros é computada para todos os pixels, variando-se o número k de classes na análise de cluster. O método avalia a variância dos dados em relação ao número de clusters. Quando plotada num gráfico, a ideia é identificar o ponto a partir do qual um aumento no número de classes não representa um retorno significativo (uma redução no erro quadrático médio). Além disso, o teste *elbow* usou somente a imagem média dos valores de retroespalhamento (σ_Θ com valores de dB), como dado de entrada e o gráfico resultante, apesar de não apresentar um ponto bem definido, sugere um valor entre 4-6 classes (figura 3a, capítulo 3).

Por esta razão, efetuou-se também uma classificação com quatro e cinco classes, avaliando-se as distintas zonas geradas, a partir de uma interpretação visual, e, princi-

palmente, comparando-as com o tipo de ambiente em que cada *snowpit* foi classificado. Ao final, utilizou-se seis classes. Ademais, o método *elbow* mostrou que a curva decaí de forma menos inclinada quando as demais variáveis (produtos geoespaciais gerados) são adicionadas ao conjunto de dados de entrada na classificação de cluster; e nenhum “cotovelo” é identificável na curva (Figure 3b, capítulo 3). Optou-se por manter as seis classes também para a classificação com as demais variáveis de entrada, para uma melhor comparação dos resultados com a classificação, com base somente na imagem CSK média.

Outrossim, explorou-se a relação de cada produto com os valores de retroespalhamento (em dB) da imagem em um gráfico de dispersão hexbin (Figure S8, capítulo 3 (material suplementar)). Como exceção, a figura S8(e.) representa a relação da declividade não com os valores de dB mas sim com a rugosidade. Não se observou uma relação explícita de nenhuma variável com os valores de dB, porém, para rugosidade, declividade e elevação, um leve agrupamento das nuvens de pontos plotados é verificado. Desta maneira, aplicou-se o método *elbow*, usando somente essas quatro variáveis (rugosidade, declividade, elevação, e $\sigma-\Theta$) como dado de entrada para a classificação de cluster. O resultado não apresentou nenhum ponto aparente (*elbow*) definindo o número de classe. No entanto, dois pontos de quebra na curva apareceram para cinco e sete classes (Figura S9, capítulo 3).

2.2 Material e métodos referentes ao artigo 2 (capítulo 4)

2.2.1 Dados de GPS

As medições geodésicas ocorreram durante a campanha de verão 2014/2015 pelo método de posicionamento cinemático (*kinematic global position system* – KGPS), por meio de um equipamento Leica[®]. Os pontos do sistema de posicionamento global (GPS) foram pós-processados a partir do posicionamento de um ponto preciso (*Precise Point Position* – PPP) da estação base instalada no acampamento EPCCGU. Para a coleta dos pontos, durante o deslocamento, em sua maioria, utilizou-se uma moto de neve com velocidade variando entre 10-20 km h⁻¹. Excluíram-se todos os pontos com precisão planimétrica, altimétrica e absoluta superiores a um metro. Todos os pontos foram então movidos e encaixados para o pixel mais próximo da grade comum adotada (explicado na seção seguinte), portanto pixels com mais de um ponto simplificados para um único valor médio, sendo que a maioria dos pixels teve apenas dois pontos promediados, e 85% deles, apenas 3 ou menos.

2.2.2 REMA

O REMA é construído por estereoscopia, a partir de imagens de satélites comerciais operados pela DigitalGlobe Inc. de resolução submétrica. A alta resolução espacial e radiométrica destas imagens permite estimar a elevação com alta qualidade sobre superfícies