

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO AMBIENTE PROGLACIAL DAS GELEIRAS  
ECOLOGY, SPHINX, BARANOWSKI, TOWER E WINDY, ILHA REI GEORGE,  
ANTÁRTICA**

**CLEIVA PERONDI**

**ORIENTADORA: PROF. DRA. KÁTIA KELLEM DA ROSA**

**PORTO ALEGRE, ABRIL, 2018.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO AMBIENTE PROGLACIAL DAS GELEIRAS  
ECOLOGY, SPHINX, BARANOWSKI, TOWER E WINDY, ILHA REI GEORGE,  
ANTÁRTICA**

**CLEIVA PERONDI**

**Orientadora: Prof. Dra. Kátia Kellem da Rosa**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Bijeesh Kozhikkodan Veettil  
Prof. Dr. Marcos Wellausen Dias de Freitas  
Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer**

**Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação  
em Geografia como requisito  
para a obtenção do título de  
Mestre em Geografia.**

**PORTO ALEGRE, ABRIL, 2018.**

CIP - Catalogação na Publicação

Perondi, Cleiva

Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, Ilha Rei George, Antártica / Cleiva Perondi. -- 2018. 123 f.

Orientadora: Kátia Kellem da Rosa.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

1. Geomorfologia glacial. 2. Retração glacial. 3. Mudanças climáticas. 4. Mapeamento geomorfológico. I. da Rosa, Kátia Kellem, orient. II. Título.

**À minha família pelo  
apoio e incentivo.  
Dedico.**

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, professores e funcionários pela oportunidade de cursar esta etapa acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Centro Polar e Climático pela disposição de infraestrutura para o desenvolvimento dessa dissertação de mestrado.

À Prof. Dra. Kátia Kellem da Rosa pela orientação, ensinamentos, incentivos, disposição e paciência. É um exemplo de pessoa e profissional.

Aos Professores Nina Simone Vilaverde Moura e Ulisses Bremer pela contribuição no processo de qualificação desse trabalho.

Aos Professores Bijesh Kozhikkodan Veetil, Rosemary Vieira e Ulisses Bremer pela participação e contribuição na defesa da dissertação de mestrado.

Aos amigos especiais que a Geografia colocou no meu caminho: Shaiane (pelas conversas diárias, encurtando distâncias), Chiocheta (pela amizade de sempre), Ananda e Kátia Pires (pela ajuda e amizade). Aos demais amigos pela compreensão da ausência em momentos especiais, obrigada pela força e incentivo.

Ao Gabriel José Basso, meu companheiro de sempre, pela paciência e incentivo nessa trajetória. Essa conquista é nossa! Você merece meu eterno agradecimento.

Aos familiares que sempre torceram por mim. Dedico especialmente aos meus pais Ivanilde e Isidoro, e à Silvana, Didi, Rafael e Daniela, vó Vanilssa, e a minha segunda família Ivanilse e Nadir, Morgana e Joel. Agradecimentos sinceros a todos, por vocês o sonho do mestrado tornou-se realidade, o apoio de todos foi fundamental.

Ao meu Guri, que independente do momento, tenso ou tranquilo, me acompanhou com sua alegria de sempre.

Ao meu avô Reinaldo Pertile que mesmo em outra dimensão sempre foi meu alento.

## RESUMO

Esta dissertação objetiva investigar a evolução geomorfológica dos ambientes proglaciais (geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy) da margem leste do campo de gelo Warszawa (62°12'0" S - 58°30'0" W) na Ilha Rei George, Antártica, entre 1956 - 2017. Dados obtidos por sensores remotos, como Aster GDEM2, imagens Sentinel-2 (2017) e WorldView-2 (2014), possibilitaram o mapeamento geomorfológico das formas de relevo de mesoescala proglaciais. A variação frontal e de área total das geleiras foi estimada e mapeada com dados de imagens de satélite (Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014) e vetores de variação frontal de 1956, 1979, 1988 e 2000. Evidenciou-se um contínuo processo de retração nas geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, com perda total de área de 33%, 25%, 37%, 71% e 30%, respectivamente, no período. A geleira Windy apresentou mudanças recentes em seu término de maré para terrestre, formando uma área proglacial com a exposição de formas de relevo deposicionais glaciais. Estimou-se um aumento das áreas livres de gelo de 6,3km<sup>2</sup> no período entre 1956-2017. Em resposta ao processo de retração glacial, há exposição de formas de relevo nos ambientes livres de gelo na área de estudo com a formação da rede de drenagem fluvioglacial e glaciolacustre e a formação de ambientes proglaciais com exposição de morainas laterais, frontais, latero-frontais e *eskers*. As áreas livres de gelo recentes são suscetíveis a processos de retrabalhamento por ação gravitacional, eólica e pluvial. Foram determinados três estágios de evolução do ambiente proglacial das geleiras associadas às feições geomorfológicas geradas em cada fase. Como mudança ambiental detectada está a sucessão de ambientes proglaciais, paraglaciais e periglaciais.

Palavras-chave: geomorfologia glacial, retração glacial, mudanças climáticas, mapeamento geomorfológico.

## **ABSTRACT**

This dissertation aims to investigate the proglacial geomorphological evolution (Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers) in the western sector of Warszawa Ice Cap (62°12'0" S 58° 30' 0" W), Admiralty Bay coast, King George Island, Antarctica between 1956 and 2017. Data obtained by remote sensors, such as Aster GDEM2, Sentinel-2 (2017) and WorldView-2 (2014) images, were applied in geomorphological mapping of the proglacial mesoscale landforms. Glacial retreat and fluctuations of glaciers areas were estimated (using Sentinel-2 images, acquired in 2017, WorldView-2 data, acquired in 2014, and outline data of the 1956, 1979, 1988 and 2000). The results evidenced the continuous retreat processes in period for Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers, with of 33%, 25%, 37%, 71% and 30% of the area lost, respectively. The Windy glacier changed of outlet glacier for land terminus conditions in latest decades, with a recent proglacial environment development. In response to glacial retreat processes there is a glacial landforms exposition in new ice-free environments in the study area. Was recorded an increase of the 6.3km<sup>2</sup> in ice-free land areas between 1956 and 2017 in in the western sector of Warszawa Ice Cap. As response the retreat processes there are the development of the glacio-fluvial drainage network, glacio-lacustrine landforms and the formation of proglacial ice marginal environments with lateral moraines, lateral-frontal moraines, frontal moraines, eskers. Recent ice-free areas are susceptible to gravitational, wind and pluvial reworking process. Three stages of evolution of the proglacial environments of the glaciers associated with the geomorphological features formed in each phase and environmental changes in response the glacier retreat was determined. Was detected the succession of proglacial for paraglacial and periglacial environments as evidence of the environmental change.

Keywords: glacial geomorphology, glacial fluctuations, climatic changes, geomorphological mapping.

## **APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta Dissertação de mestrado, intitulada “**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO AMBIENTE PROGLACIAL DAS GELEIRAS ECOLOGY, SPHINX, BARANOWSKI, TOWER E WINDY, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA**”, foi desenvolvida entre Março de 2016 e Março de 2018 no Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em colaboração com o Centro Polar e Climático (CPC) da UFRGS.

A Dissertação é composta das seguintes partes:

### **Capítulo I: Aspectos introdutórios**

Trata sobre os aspectos introdutórios, objetivos, justificativa e área de estudo.

### **Capítulo II: Referencial teórico**

Aborda as referências utilizadas para o desenvolvimento desta dissertação.

### **Capítulo III: Resultados e discussões na forma de artigos científicos:**

Artigo submetido à Revista Antarctic Science, intitulado “Mudanças Glaciais Recentes no Setor Oriental do Campo de Gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica: Escalas de Tempo de Resposta e Novas Condições de Término Glacial”.

Artigo submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia, intitulado “Caracterização Geomorfológica das Áreas Livres de Gelo na Margem Leste do Campo de Gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima”.

Artigo submetido à Revista Quaternary and Environmental Geosciences, intitulado “Rápida Evolução do Ambiente Marginal às Geleiras do Setor Leste do Campo de Gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima”.

### **Capítulo IV: Considerações finais**



## LISTA DE ABREVIATURAS

---

AAEG: Área Antártica Especialmente Gerenciada

ASPA: *Antarctic Specially Protected Area*

Aster: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

ATCPs: *Antarctic Treaty Consultative Parties*

CNPq: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

EACF: Estação Antártica Comandante Ferraz

Embrapa: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESA: *European Space Agency*

GDEM: *Global Digital Elevation Model*

GMES: Monitoramento Global do Ambiente e Segurança

GPS: Sistema de Posicionamento Global

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC: Painel Intergovernamental sobre as mudanças climáticas

IRG: Ilha Rei George

MDE: Modelo digital de elevação

MSI: *Multispectral Instrument*

NASA: Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica

OLI: Imageador Operacional da Terra

OPERANTAR: Operação Antártica

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SPOT: *Système Probatoire pour l' Observation de la Terre*

TIN: *Triangular Irregular NetWork*

UTM: Universal Transversa de Mercator

USGS: Serviço Geológico dos Estados Unidos

WGS: Sistema Geodésico Mundial

## SUMÁRIO

---

LISTA DE ABREVIATURAS .....	7
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	9
1.2 Objetivos .....	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos .....	12
1.3 Justificativa.....	12
1.4 Área de Estudo.....	15
CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....	20
2.1 Dinâmica Glacial e Processos Erosivos e Depositionais.....	20
2.2 Geoformas Depositionais Proglaciais de Mesoescala e aplicação na reconstrução paleoglaciológica.....	27
2.3 Caracterização Ambiental da Ilha Rei George .....	34
2.3.1 Geologia .....	34
2.3.2 Aspectos Paleoclimatológicos da Ilha Rei George.....	37
2.3.3 Aspectos Climatológicos da Ilha Rei George .....	38
2.3.4 Aspectos Glaciológicos e geomorfológicos da ilha Rei George .....	39
2.3.5 Mudanças Climáticas Recentes e Consequências Ambientais na Ilha Rei George .	42
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
3.1 ARTIGO 1 : MUDANÇAS GLACIAIS RECENTES NO SETOR ORIENTAL DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA: ESCALAS DE TEMPO DE RESPOSTA E NOVAS CONDIÇÕES DE TÉRMINO GLACIAL .....	47
3.2 ARTIGO 2 : CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DAS ÁREAS LIVRES DE GELO NA MARGEM LESTE DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA .....	66
3.3 ARTIGO 3 : RÁPIDA EVOLUÇÃO DO AMBIENTE MARGINAL ÀS GELEIRAS DO SETOR LESTE DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA .....	90
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Introdução

As geleiras da Península Antártica, bem como de suas ilhas adjacentes, são sensíveis as recentes mudanças climáticas (TURNER *et al.*, 2009). Na Ilha Rei George há estudos que demonstram que desde 1950 há tendência para o aumento de temperatura média superficial do ar (SIMÕES & BREMER, 1995; AQUINO, 1999; ROSA *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2011; KEJNA *et al.*, 2013; SIMÕES *et al.*, 2015). Devido a essa sensibilidade às mudanças climáticas, estas áreas são alvos importantes para o monitoramento e entendimento de sua dinâmica (SIMÕES, 2011).

Geleiras de descarga tem uma resposta não linear e multifatorial às mudanças climáticas (JOUGHIN *et al.*, 2010) devido a respostas às mudanças na temperatura e correntes oceânicas (BENN *et al.*, 2007). Esse tipo de geleira tem término no mar, a área frontal tem formato de falésia, desse setor se desprendem *icebergs* (SIMÕES, 2004). Dessa forma há aceleração de fluxo de desprendimento diminuindo a espessura e aumentando a retração das geleiras (SANTOS, 2012).

Em contraste, geleiras de término em terra possuem sua dinâmica principalmente relacionadas ao clima (GLASSER *et al.*, 2011). Em ilhas da Península Antártica, Rabassa *et al.* (1982), Skvarca *et al.* (1995), Scambos *et al.* (2004), Rau *et al.* (2004a), Thomas *et al.* (2004), Rignot *et al.* (2008), Pritchard *et al.* (2009), Wendt *et al.* (2010), Rosa *et al.* (2014a), avaliaram perda total ou diminuição da área de pequenas geleiras de frente em terra desde a década de 1970.

A modificação da área frontal de uma geleira com término de maré para terrestre forma no setor frontal a área proglacial. Contêm feições deposicionais que registram informações indicativas de deglaciação, direção de fluxo entre outros dados (BENN & EVANS, 2010) como, por exemplo, avanço máximo da geleira, espessura e padrão de retração glacial (NAPIERALSKI *et al.*, 2007). Monitorar as características de formas glaciofluviais e lagos proglaciais é relevante, pois fornece dados importantes em relação aos processos e formas durante a recessão glacial (EVANS, 2003).

No ambiente proglacial há depósitos de sedimentos transportados pela geleira em sua frente, na área livre de gelo (Figura 1) (BENN & EVANS, 2010). Trata-se da área frontal ao gelo, influenciado pela ação glacial, como por exemplo, seu avanço e recuo e também pelo seu degelo (SLAYMAKER, 2009). Na área proglacial da geleira Ecology, por exemplo, há exposição de várias formas de relevo como eskers e depósitos morânicos (ROSA *et al.*, 2012a).

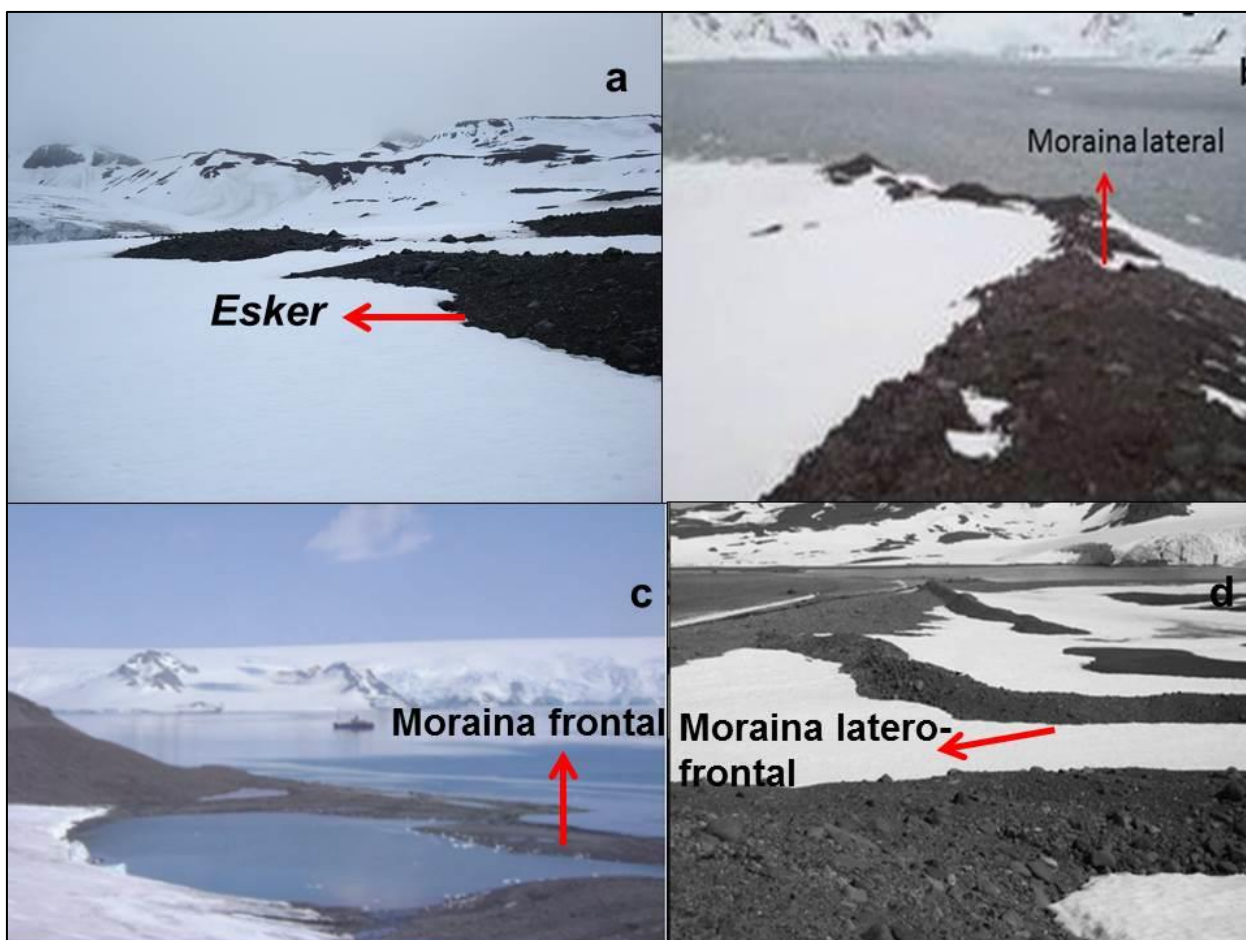


Figura 1:a) Esker na área proglacial da geleira Ecology. Fonte Rosa *et al.*,(2012a). b) Moraina lateral. Fonte: Rosa (2012b). c) Moraina frontal. Fonte: Rosa *et al.*,(2012a). d) Moraina latero-frontal. Fonte: Rosa *et al.*,(2012a).

Em setores distais à geleira é possível verificar ambientes paraglaciais (Figura 2), estes possuem interferência de elementos não glaciais, como o vento, drenagem e transporte de sedimentos que atuam para o retrabalhamento de suas características (BALLANTYNE, 2002).



Figura 2: Atividade paraglacial em moraina na área frontal da geleira Polar Club, Península Potter, ilha Rei George, Antártica. Fonte: Bonada *et al.*, (2018).

Ambientes periglaciais (Figura 3) formam-se em áreas deglaciadas, são diferenciados dos demais pela predominância de processos ligados ao gelo e presença de *permafrost* (FRENCH & THORN, 2006). As formas desse ambiente caracterizam-se por encostas constituídas por regolitos (SLAYMAKER, 2011).



Figura 3: Escarpa rochosa de Demay, margem leste do campo de gelo Warszawa, ilha Rei George, Antártica. Fonte: Bremer (2008).

Verificam-se poucos estudos sobre a geomorfologia dos ambientes proglaciais destas geleiras na região da Península Antártica e ilhas adjacentes (Rosa *et al.*, 2014a). O entendimento da geomorfologia glacial, como depósitos

expostos nas áreas recentemente livres de gelo possibilitam avaliar variações nas condições termais, direção de fluxo, dinâmica de avanço ou retração de geleiras, e conseqüentemente inferir mudanças ambientais (BENN & EVANS, 2010).

Estudos relacionados à geomorfologia glacial, através do mapeamento geomorfológico, visam descrever e analisar a interferência que as geleiras têm sobre a evolução proglacial. Sendo assim a realização de mapeamentos geomorfológicos tem importante função de compreender estes processos superficiais, pois são registros da evolução do ambiente proglacial (OTTO & SMITH, 2013).

As geleiras comportam-se de maneira diferenciada entre si, pois apresentam respostas condicionadas pelo ambiente em que se localizam, bem como sua geomorfologia, extensão, e por outros elementos como precipitação, derretimento, velocidade de fluxo e seu término em maré ou terrestre (SIMÕES, 2017).

Na Ilha Rei George pouco se sabe da resposta do ambiente proglacial às mudanças climáticas e como se diferencia em cada geleira. Entender a evolução geomorfológica proglacial em resposta à retração pode auxiliar em estudos de cenários futuros para estas geleiras.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral desse projeto é investigar a evolução geomorfológica proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa (62°12'0"S - 58°30'0"W) na Ilha Rei George, Antártica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- a) Analisar a dinâmica de retração das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy na área de estudo no período entre 1956 a 2017;
- b) Identificar as feições deposicionais de mesoescala marginais ao gelo e proglaciais e os processos geomorfológicos relacionados;
- c) Interpretar e investigar a relação entre o ambiente proglacial o comportamento das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy.

## **1.3 Justificativa**

Geleiras pertencentes às ilhas Shetlands do Sul são muito sensíveis às mudanças climáticas (SIMÕES *et al.*, 1999), isso se deve às pequenas dimensões das bacias de drenagem e menor espessura do gelo quando confrontadas ao manto de gelo que recobre o continente antártico. Outro fator que contribui a essa sensibilidade é que essas geleiras estão próximas do ponto de fusão sob pressão, característica de geleiras com regime termal úmido (KNAP *et al.*, 1996). Sendo assim, representam áreas importantes para estudos de cunho ambiental, por apresentar respostas com intervalos de décadas a centenas de anos aos efeitos de recentes mudanças climáticas.

As geleiras da Ilha Rei George têm apresentado retração glacial nas últimas décadas, como reflexo da tendência de aumento da temperatura média superficial do ar registrada no período (Rosa *et al.*, 2014a). Como resultado há a exposição de ambientes marginais ao gelo, com formas de relevo deposicionais e erosivas, evidenciando as mudanças nas geleiras de término em terra (BENN & EVANS, 2010).

Mapear estas formas em ambientes livres de gelo e entender a evolução destes ambientes na margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica, é relevante uma vez que podem evidenciar questões atuais e pretéritas relacionadas à dinâmica das geleiras e suas consequências para a dinâmica proglacial da área de estudo. Formas de relevo, originadas pela ação glacial, podem ter gêneses diferenciadas e este entendimento auxilia na reconstituição da evolução recente das geleiras, assim como variações em suas características de direção de fluxo e seu regime termal (BENNET & GLASSER, 1996).

Na atual conjuntura de mudanças climáticas, e as suas possíveis consequências ambientais sobre estes ambientes, é importante o desenvolvimento de estudos que caracterizem os ambientes proglaciais e a sua evolução recente. Há ambientes que são mais sensíveis aos efeitos climáticos, enquanto que outros são mais resilientes. As áreas de lago e alagadiços, em ambientes recentemente expostos pela retração glacial nas últimas décadas, sofrem diretamente com a tendência multianual de aumento de temperatura e também são alvos importantes de monitoramento.

O recorte de estudo deste trabalho está inserido na Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG) dessa forma é importante seu monitoramento

tendo em vista a diversidade de atividades que são desenvolvidas na margem leste do campo de gelo Warszawa que podem gerar impactos ao ambiente.

Arigony-Neto (2001) destaca que além do turismo na Ilha Rei George, há presença de pesquisadores de diversas nacionalidades e estações científicas, na Baía do Almirantado mais especificamente há três estações científicas e seis refúgios, além de turistas que visitam o local em períodos de verão.

É nesse local onde o Brasil desenvolve suas pesquisas de campo maioritariamente, dentro da AAEG, sendo assim é o local em que ocorrem os impactos de forma mais intensa da presença brasileira no continente antártico (BREMER, 2008).

A margem leste do campo de gelo Warszawa faz parte da Aspa 128 (*Antarctic Specially Protected Area*) a qual abriga espécies únicas de aves e mamíferos marinhos, local que deve ser preservado para que não ocorram impactos sobre as colônias de reprodução destes, sendo importante o conhecimento acerca desta área (ESTAÇÃO ANTÁRTICA POLONESA ARCTOWSKI, 2016).

O mapeamento geomorfológico oferece subsídios para interpretar processos erosivos e de deposição, já que possuem dados sobre o passado e presente das geleiras em estudo (ROSA, 2012b). Desta forma, monitorar as geleiras e a compreender a dinâmica geomorfológica proglacial da área de estudo possibilita compreender melhor as consequências das mudanças climáticas para estes ambientes. A análise da evolução geomorfológica proglacial, relacionado com as alterações nas geleiras, podem auxiliar no desenvolvimento de estudos comparativos de outros ambientes semelhantes e na extração de cenários de evolução ambiental diante da projeção de aumento da temperatura média superficial do ar para as próximas décadas.

Com a realização do mapeamento geomorfológico referente à área de estudo é possível a formação de um banco de dados, bem como a avaliação do Modelo Digital de Elevação utilizado para gerar determinados produtos para a análise hipsométrica.

Este trabalho contribui para estudos paleoclimatológicos do Holoceno Superior (após a Pequena Idade do Gelo) e também para estudos de evolução dos ambientes proglaciais recentes, tendo em vista a dinamicidade destes locais frente às mudanças climáticas.



A margem leste do campo de gelo Warszawa foi escolhida como recorte de estudo por ser um local importante para preservação da biodiversidade, dessa forma é importante o monitoramento, também por haver disponível dados de alta resolução para realização da pesquisa, bem como para produzir um banco de dados acerca da área tendo em vista a pouca produção científica recente disponível.

#### **1.4 Área de Estudo**

Neste item serão apresentadas as características fisiográficas da área de estudo, como sua localização e inserção na Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG), aspectos climáticos, glaciológicos, geomorfológicos e geológicos da ilha Rei George.

A área de estudo situa-se na Ilha Rei George, Antártica (Figura 4<sup>a</sup> e b), compreende as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, bem como suas áreas livres de gelo (1b), localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa.

Bremer (1998) enfatiza que o continente antártico durante muito tempo era concebido como um local distante e acessível a poucos, como por exemplo, a caçadores e cientistas, aos poucos através das descobertas científicas foram revelando que estas terras frias eram muito importantes e significavam mais que uma reserva natural. A Antártica representa função primordial ao planeta uma vez que influencia o clima global (DREWRY *et al.*, 1982).

Conforme a setorização proposta por Rakusa – Suszczewski (1993) o arquipélago das Shetlands do Sul é dividido em três grupos: Grupo Nordeste, Grupo Central e Grupo Sudoeste, a Ilha Rei George situa-se no Grupo Central do arquipélago, trata-se do setor principal, tendo em vista sua vasta extensão e quantidade de ilhas, sendo a Ilha Rei George e Livingston as maiores, as quais são mescladas pelas ilhas Nelson, Robert e Greenwich, importantes pela área e cobertura glacial, e ao seu entorno ilhas, ilhotas e rochedos.

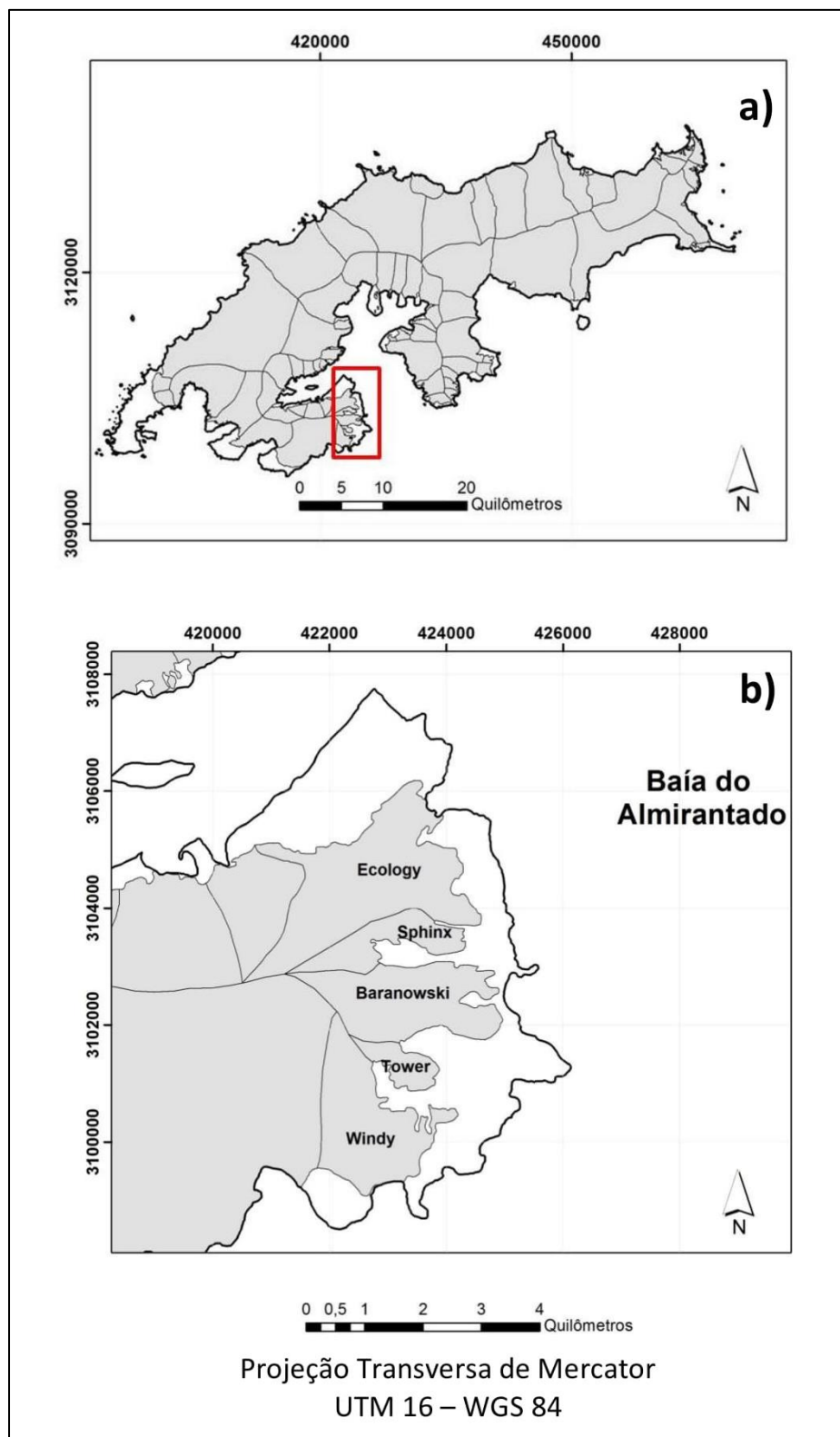


Figura 4 - Figura 4a – Localização da área de estudo na Ilha Rei George, Antártica. Figura 4b – Localização das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e suas áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George.

As áreas livres de gelo na área de estudo representam um setor da Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG) que foi estabelecida com o intuito de

minimizar impactos ambientais de origem antrópica na Antártica (ARIGONY-NETO *et al.*, 2002).

A Área Antártica Especialmente Gerenciada visa planejar e organizar as atividades tanto científicas como logísticas, a fim de evitar confrontos, auxiliando na cooperação entre os países que desenvolvem atividades nos mesmos locais, e também minimizar impactos sobre este ambiente, para isso é preciso um plano de gerenciamento, que deve ser revisado periodicamente (ATCPs, 1993).

O plano de gerenciamento regulariza o código de conduta para realização de atividades científicas, operações logísticas e para turistas que envolvam a área da AAEG, além de prover mecanismos para amenizar impactos ambientais marinhos e terrestres, proteção de suas características fisiográficas, biológicas, históricas e estéticas, para preservar a área e garantir a realização de futuras pesquisas científicas (ATCPs, 1993).

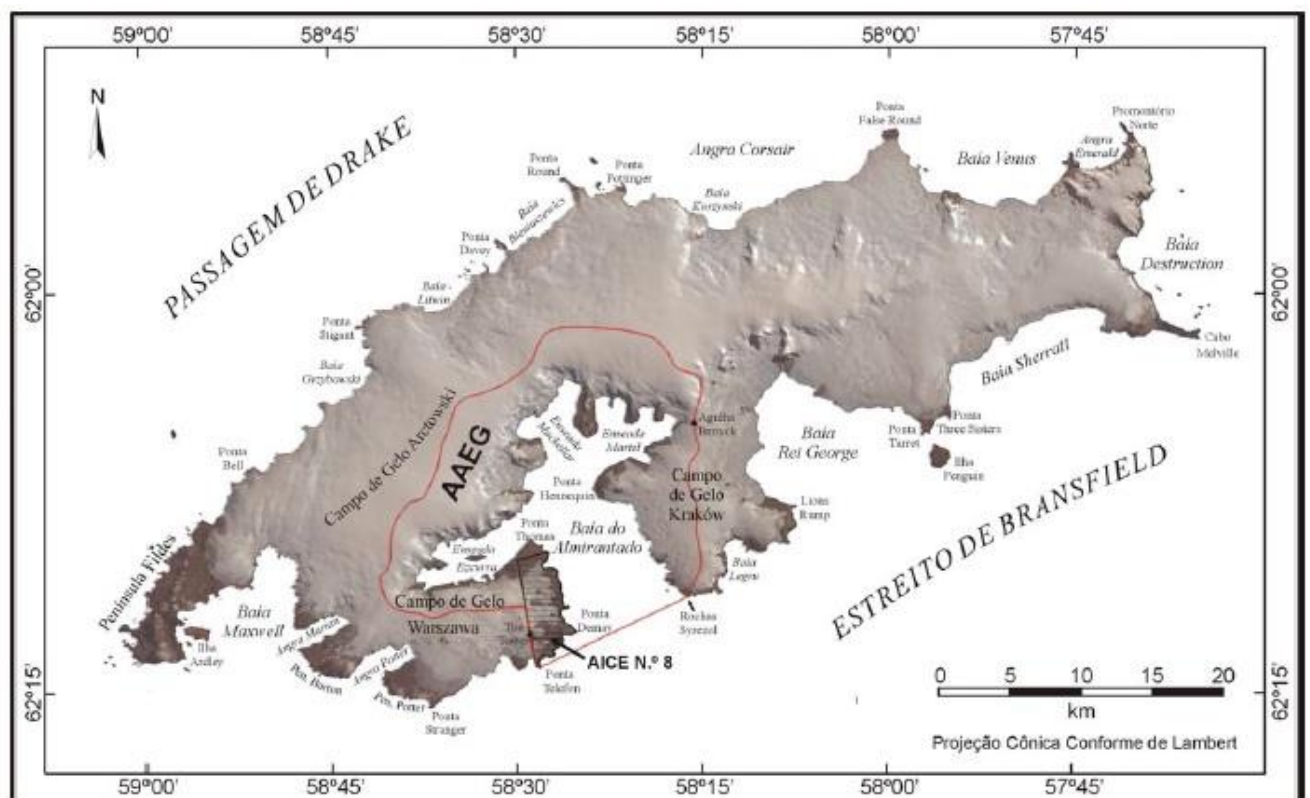


Figura 5 - Delimitação da Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG). Fonte: FOREIGN & COMMONWEALTH OFFICE, 1997.

Os limites da AAEG (Figura 5) compreendem a área interior da bacia glacial da Baía do Almirante, sua delimitação abrange desde a Ponta Telefon, situada ao sul, até a Tower, corta o campo de gelo Warszawa e segue para a parte oeste da

Enseada Ezcurra, abrangendo na porção nordeste a Enseada Martel e Enseada Mackellar, e ao sudeste passando pela Agulha Ternyck até o Cabo Syrezol e Ponta Telefon, estão incluídas nesta área (FOREIGN & COMMONWEALTH OFFICE, 1997).

A Ilha Rei George é uma área bastante visitada por turistas no continente antártico desde 1919 quando foi vista por William Smith (HEADLAND & KEAGE, 1985). Este fator está ligado a sua proximidade ao continente americano de aproximadamente 1000 km, por ser atrativo as atividades turísticas foi necessário que se gerenciasse a presença humana para que não comprometesse a preservação de seus ambiente e conseqüentemente as pesquisas científicas futuras (BREMER, 2008).

A margem leste do campo de gelo Warszawa (figura7) situa-se dentro da *Antarctic Specially Protected Area* (ASP) 128, (Figura 6) a qual abriga ambientes importantes que possibilitam a compreensão de aspectos pedológicos referentes à Antártica Marítima, pois possui áreas sem cobertura de gelo centenária, bem como áreas expostas recentemente (BREMER, 2008).

A ASPA 128 é rica em biodiversidade, há colônias de petrel gigante (*Macronectes giganteus*), pinguins Adelie (*Pygoscelis adeliae*), elefantes marinhos (*Mirounga leonina*) e presença de outros mamíferos e aves de habitat marinho. Dessa forma com o intuito de preservar estes animais e espécies vegetais que encontram nessa área as condições essenciais de sobrevivência, a entrada de pessoas é restrita (SANTOS, 2005).

Com a diminuição de cobertura de gelo na ASPA 128 há formas de relevo expostas na área frontal das geleiras ou entre as praias como, por exemplo, *eskers*, *flutes*, cordões morânicos, rochas com estria, estas feições passam por retrabalhamento paraglacial (BREMER, 2008).

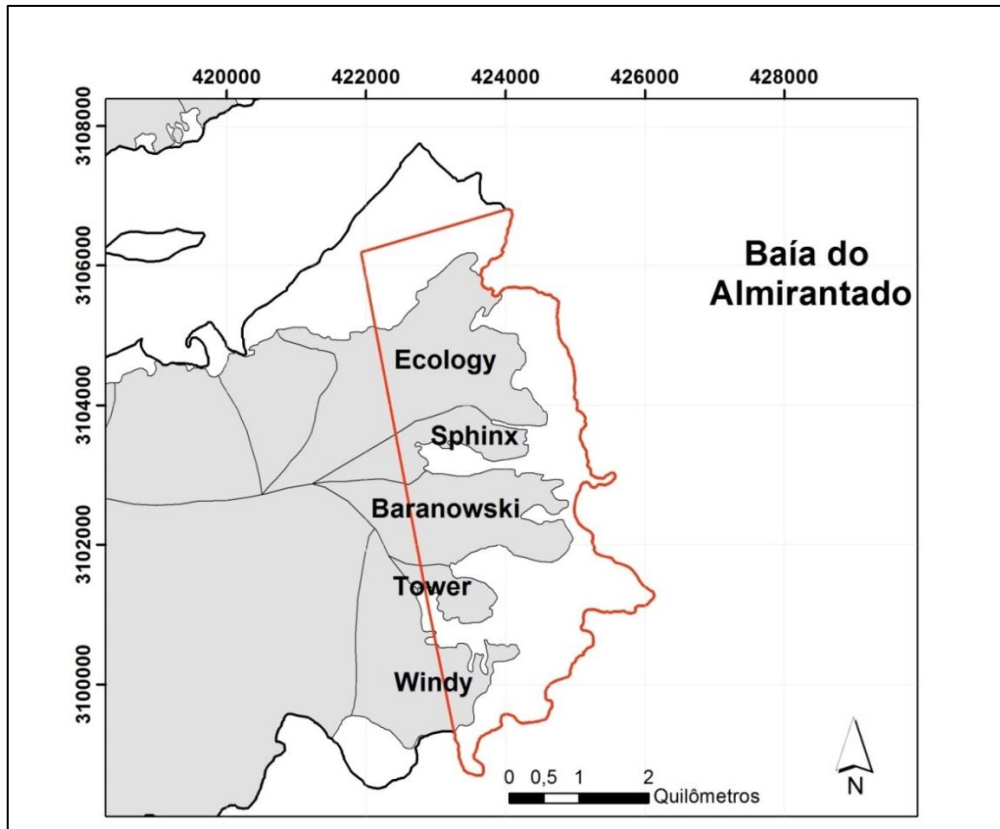


Figura 6 - Mapa da Antarctic Specially Protected Area (ASPA) 128.



Figura 7 - Margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica.  
Fonte: Marinha do Brasil, 2007.

## **CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO**

---

### **2.1 Dinâmica Glacial e Processos Erosivos e Depositionais**

Durante o desenvolvimento dessa dissertação inicialmente foram abordados aspectos introdutórios, na sequência o referencial teórico tratando sobre a sensibilidade das geleiras da Ilha Rei George às mudanças de temperatura superficial do ar, presença de formas de relevo deposicional de mesoescala em ambientes sem cobertura de gelo que se formam em resposta à retração frontal glacial, utilizado para embasar a pesquisa referente à análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy na margem leste do campo de gelo Warszawa.

As geleiras podem ser massas de neve e gelo, as quais deslocam-se da parte mais alta para a mais baixa de forma contínua, e sua formação ocorre quando a neve permanece no mesmo local durante o ano, acumulando até transformar-se em gelo (SIMÕES *et al.*, 2004).

Em uma geleira há duas partes que se distinguem entre si, a superior, zona de acumulação e a inferior, zona de ablação. A zona de ablação está situada em altitudes menos elevadas e caracteriza-se pela perda de massa da geleira e a linha entre ambas é chamada de linha de equilíbrio glacial, onde a fusão equilibra a acumulação anual de gelo (POMEROL *et al.*, 2013).

Há um estado de equilíbrio na geleira na parte mais elevada da mesma, existe aumento de sua massa, ou seja, na zona de acumulação, ocorrem processos de adição de água, gelo e neve, incluindo precipitação de neve, gelo ou água, transporte de gelo ou neve para a geleira (SIMÕES, 2004) e na parte inferior e mais baixa ocorre a perda de massa de gelo (REES, 2006) há diminuição de neve, gelo e água através de processos como derretimento, erosão, avalanches, evaporação entre outros, ocorre principalmente na estação do verão (SIMÕES, 2004).

Anualmente a geleira através da precipitação em forma de neve aumenta sua massa de gelo, mas também pode perder pelo processo de derretimento, quando

não há equilíbrio entre ganho e perda de sua massa, seu tamanho sofrerá mudanças com o passar do tempo (CUFFEY & PATERSON, 2010).

A retração de geleiras é ligada ao balanço de massa e desta forma, ao balanço de energia, com influência de precipitação e temperatura atmosférica, entre outros fatores, que interferem no equilíbrio entre ambas as zonas (KEJNA *et al.*, 1998).

Quando há flutuações climáticas locais o balanço de massa das geleiras não encontra equilíbrio, podendo ser então negativo ou positivo, em algumas áreas há estudos que mostram avanço de geleiras enquanto que outras mostram o recuo das mesmas, dessa forma não apresentam o mesmo comportamento, pois disparidades no clima local influenciam nessas diferenças comportamentais (CUFFEY & PATERSON, 2010).

Porém o índice temperatura não determina por si só a dinâmica da geleira, já que o seu regime de escoamento tem influência sobre seu comportamento, há também interferência eólica, umidade, nevascas, tipo de superfície, entre outras. E todos estes fatores pode apresentar dependência entre si, dessa forma, não pode-se associar o derretimento glacial a apenas uma variável, como o aquecimento do ar, por exemplo (CUFFEY & PATERSON, 2010).

Na Península Antártica há diversos estudos como Rabassa *et al.*, (1982), Rosa *et al.*, (2014a) que apontam para a perda de forma total ou diminuição da dimensão de geleiras com frente em terra desde 1970. De acordo com cada geleira há um tipo de resposta às mudanças climáticas, as geleiras de término em terra possuem seu comportamento ligado às flutuações climáticas (GLASSER *et al.*, 2011). Na margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica, as geleiras Sphinx, Baranowski, Tower e Windy possuem término em terra e a geleira Ecology apresenta término misto (Figura 7).

Geleiras de término em terra são aquelas que possuem sua área frontal assentada sobre rocha, e que não mantenha contato com o mar (RAU *et al.*, 2004 b). Diversos estudos vêm mostrando retração acelerada na Ilha Rei George de geleiras de término em terra durante as últimas décadas (ROSA *et al.*, 2014b; SIMÕES *et al.*, 2015).

Há evidências de que futuramente na Ilha Rei George as geleiras com término terrestre serão predominantes tendo em vista que estas dependem exclusivamente

do clima, e se as demais geleiras com término marinho continuar retraindo logo não terão mais ligações com o mar (CARRIVICK *et al.*, 2012).

A temperatura de sua estrutura interna é um parâmetro para a classificação das geleiras, a mesma é definida pelo balanço entre o calor basal e o gradiente de temperatura do interior da mesma e podem ser classificadas como: frias, temperadas e politermal (BENNETT & GLASSER, 1996). Sua temperatura exerce influência em vários processos glaciais como sua movimentação, degelo, erosão e deposição (BENN & EVANS, 2010) (Figura 8).



Figura 8 - Relação entre temperatura da geleira, erosão e sedimentação.  
Fonte: Bennet & Glasser (1996).

Há estreita relação entre a temperatura das geleiras os processos erosivos e de sedimentação (Figura 8), a ocorrência de abrasão glacial e remoção de detritos são mais comuns em geleiras de base quente, ligadas a presença de água oriunda do degelo, se houver fusão, a erosão e remoção ocorrem em menor proporção ou são praticamente inexistentes as geleiras de base fria, enquanto que o processo de sedimentação acontece em geleiras de base quente na região marginal (BENNET & GLASSER, 1996).

O regime termal basal de uma geleira pode ser diferente espacialmente, influenciando no fluxo de gelo e nos efeitos deste nos diversificados tipos de substratos que o gelo pode movimentar-se, além do controle sobre processos erosivos e deposicionais regulando sua ocorrência e intensidade (ROCHA-CAMPOS & SANTOS, 2009).



Rocha-Campos & Santos (2009) classificam a temperatura basal na interface entre gelo e rocha em três tipos: as geleiras de base fria ou seca o processo predominante é o congelamento, sem água de degelo, de base úmida ou quente há fusão e presença de água de degelo, o gelo não está aderido ao substrato como no caso anterior, e geleiras de base intermediária com ocorrência de congelamento e também de degelo.

Diretamente ligados à temperatura basal as geleiras depositam seus sedimentos de formas variadas, o regime termal é variável com o passar do tempo, pois a erosão ocorrida pelo gelo pode causar mudanças na velocidade da movimentação do mesmo e devido a mudanças climáticas e consequentes deglaciação (BENNETT & GLASSER, 1996).

Ao movimentar-se uma geleira provoca erosão e transporta sedimentos (Figura 9) rochosos glaciais, os quais podem ser transportados por água oriunda de degelo (BENNETT & GLASSER, 1996). Os sedimentos são heterogêneos granulometricamente, já que podem variar desde argila até matacões, partículas e fragmentos rochosos podem ser transportados na superfície da geleira, supraglacial, em seu interior, englacial e também em sua base, subglacial (HAMBREY, 1994).

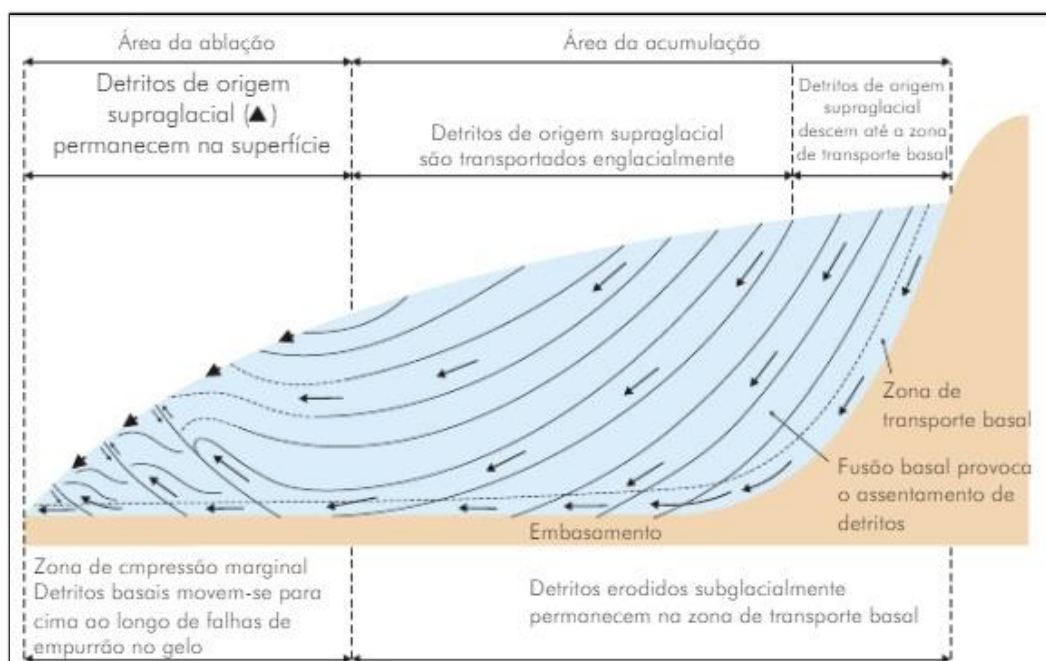


Figura 9 - Transporte de detritos glaciais. As setas representam o percurso que os detritos fazem possivelmente ao serem transportados. Fonte: Modificado de Rocha-Campos & Santos (2009).

O transporte de sedimento englacial e supraglacial é chamado passivo (HAMBREY, 1994). Quando o transporte ocorre na base da geleira, chamado

subglacial é denominado ativo, os detritos podem ter origem na agregação de sedimentos rochosos na base do gelo ou de materiais supraglaciais que chegaram até a camada basal, o setor de transporte basal é dividido em duas zonas: zona de tração, que coloca sedimentos rochosos em contato com a camada basal da geleira, e a zona de suspensão, na qual ocorre o transporte de detritos rochosos a um nível acima da base (BENNETT & GLASSER, 1996).

As características de sedimentos são modificadas de acordo com o tipo de transporte, pois os que foram deslocados na camada basal da geleira são diferentes dos que foram transportados de forma passiva (HAMBREY, 1994). Interpretar essas diferenças é importante para compreender a dinâmica das geleiras (BENNETT & GLASSER, 1996).

As geleiras movimentam-se com diferentes velocidades, havendo diminuição do centro para a região periférica, que também está ligada a inclinação da mesma e a espessura do gelo, quando a inclinação é de 12% o gelo escoia a partir da espessura da massa de gelo de 40 metros, e com essa inclinação a velocidade do movimento é proporcional à quarta potência da espessura do gelo, como acontece na Antártica, que seus mantos de gelo estão assentados em uma superfície plana praticamente (POMEROL *et al.*, 2013).

A movimentação das geleiras vem sendo comprovada desde o século XIX, através da introdução de marcadores na geleira, como rochas pintadas ou com marcos, bem como balizas cravadas no gelo, e na atualidade para realizar este monitoramento utiliza-se o GPS (Sistema de Posicionamento Global) (POMEROL *et al.*, 2013).

O deslizamento basal não acontece em todos os tipos de geleiras, porém todas são influenciadas por deformações internas, o aumento de níveis de deslizamento em geleiras temperadas acontece, pois há percolação do fluxo da água das chuvas somado ao derretimento superficial, que tem função de lubrificante basal (HAMBREY, 1994).

Exerce função lubrificante, pois ocorre na interface gelo/rocha (BENN & EVANS, 2010) e em locais em que o gelo em contato com a base está em ponto de fusão sob pressão, isso confirma-se pelo aumento da velocidade das geleiras na estação de verão, argumentando que a velocidade tem relação direta com a presença em maior ou menos quantidade de água basal (PATERSON, 1994).

Pode haver aceleração do deslizamento com o encontro de obstáculos na superfície da geleira (BENN & EVANS, 2010), já que a mesma contém áreas irregulares (BENNET & GLASSER, 1996) quando há barreiras aumenta a pressão na direção oposta ao fluxo (Figura 10), ocasionando deformações no gelo, havendo maior fluxo no entorno do obstáculo, podendo ser intensificado com o aumento da dimensão dos sedimentos (HAMBREY, 1994; BENNET & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 2010).

Com o encontro de obstáculos a geleira sofrerá pressão no sentido contrário (Figura 10) ao seu fluxo de deslizamento e a intensificação do mesmo, com a superfície irregular haverá descongelamento no setor montante e recongelamento a jusante. Isso ocorre, pois com a lubrificação da base haverá aceleração no deslizamento e a água do degelo ao chegar na parte com menor pressão passará por novo congelamento. Este processo ocorre quando os obstáculos encontrados pela geleira apresentam até 1 metro, se apresentar medidas maiores, menor é a capacidade de passagem do calor (BENN & EVANS, 2010).

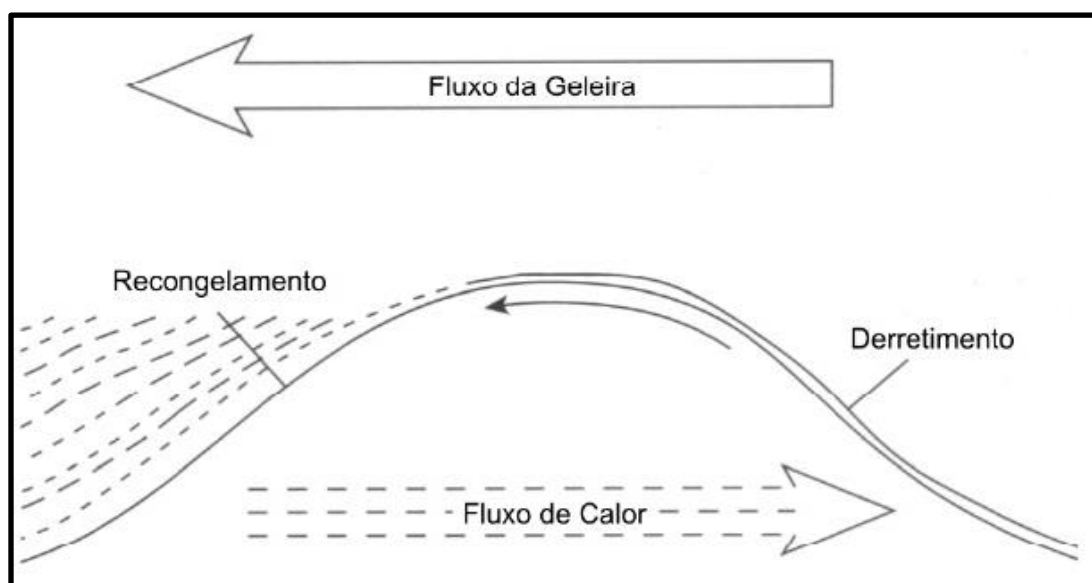


Figura 10 - Deslizamento pela pressão de fusão. Fonte: Modificado de Benn & Evans (2010).

Quando há presença de película de água na interface gelo/rocha ocorre redução de pressão e fricção da geleira sobre o substrato rochoso e com isso o aumento da velocidade do fluxo (POMEROL *et al.*, 2013; SUGDEN e JOHN, 1984). A partir da movimentação das geleiras e o transporte ativo de sedimentos há erosão

da superfície subglacial, há três tipos principais: abrasão, arrancamento e erosão gerada água do degelo.

A abrasão glacial causa desgaste em sua base rochosa, devido à passagem da geleira que contém detritos de rochas (BENNETT & GLASSER, 1996). Este processo causa estrias, polimento, esmagamento e moagem do substrato, bem como das partículas do interior da geleira, altera a superfície rochosa, arredondando a mesma (BENN & EVANS, 2010).

A intensidade e tipo de abrasão são controlados pelos detritos de rochas basais, pressão do contato da base com a rocha, velocidade do movimento da geleira, espessura do gelo, presença de água na camada basal entre outros (HAMBREY, 1994).

As estrias podem representar momentos distintos do fluxo de gelo (BENN & EVANS, 2010). Podem apresentar alguns milímetros a vários metros de comprimento, sua identificação é importante devido a sua orientação paralela ao deslocamento do gelo, assim pode-se inferir o padrão de fluxo da geleira (BENNETT & GLASSER, 1996).

O polimento é resultado de eventos individuais aliados ao estriamento, que desgastam a rocha, alisando-a (BENN & EVANS, 2010). Essa feição erosiva possibilita identificar a direção do fluxo da geleira (SHARP, 1988).

O processo de arrancamento glacial provoca fratura e remoção de detritos de rocha basal (BENNETT & GLASSER, 1996). Os fragmentos rochosos, ao serem transportados pela ação glacial, podem ser quebrados, aumentando o número de partículas de sedimentos e seu desgaste. A fragmentação acontece quando as partículas estiverem em contato entre si ou com sua base, enquanto que o esmagamento de sedimentos varia de acordo com sua resistência e duração deste processo (DREWRY, 1986).

A água de degelo na base glacial causa erosão, transporte e deposição (BENNETT & GLASSER, 1996). A presença em maior ou menor proporção varia de acordo com a temperatura basal da geleira, influenciando o deslizamento basal (BENN & EVANS, 2010) e no nível de erosão (RIIHIMAKI *et al.*, 2005). A água na base da geleira com regime termal basal úmido interfere na capacidade do fluxo hídrico e na remoção dos detritos que foram erodidos com isso renova a superfície

rochosa abrasiva e aumenta a quantidade de sedimentos (SUGDEN & JOHN, 1976; BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 2010).

Os sedimentos subglaciais ao serem transportados pelo fluxo de água subglacial são vistos como a principal forma de descarga destes sedimentos em geleiras temperadas para os ambientes proglaciais (BENNETT & GLASSER, 1996). Geleiras temperadas apresentam um fluxo de gelo acelerado devido ao deslizamento de sua base (MEIER *et al.*, 1994).

Quando as geleiras estiverem retraindo há maior aceleração de seus movimentos e também elevado nível de degelo em seu término (KOPPES *et al.*, 2010), o entendimento desses processos glaciais é fundamental para a compreensão do aporte de sedimentos no setor de término das geleiras (ANDERSON & MOLNIA, 1989).

A geomorfologia glacial visa analisar a interferência que as geleiras têm no desenvolvimento da paisagem e suas formas, e assim, extrair informações da dinâmica glacial (OTTO & SMITH, 2013). Como há obstáculos que impedem a visualização direta de processos geomorfológicos que acontecem abaixo da geleira, analisam-se as formas de relevo nas zonas proglaciais quando a retração (BENNETT & GLASSER, 1996).

Ao estudar os aspectos deposicionais na área proglacial, pode-se inferir a que tipo de transporte e processo erosivo que os mesmos foram submetidos, bem como a temperatura de base da geleira, esta por sua vez possibilita identificar a ocorrência de mudanças climáticas, já que há formas originadas pela dinâmica da geleira e a água proveniente de seu degelo (BENNETT & GLASSER, 1996).

O ambiente glacial diferencia-se em relação as suas dinâmicas em supraglacial, englacial, subglacial e proglacial (BENN & EVANS, 2010). Na frente de geleiras de frente em terra, há a zona de contato com o gelo, que compreende o ambiente marginal ao gelo, e a zona adjacente influenciada pelos processos glaciais, que compreende o ambiente proglacial. Nestes dois ambientes há formas de relevo formadas por processos subglaciais e marginais, glaciofluviais e glaciolacustres (BENN & EVANS, 2010).

## **2.2 Geofomas Depositionais Proglaciais de Mesoescala e aplicação na reconstrução paleoglaciológica**

Identificar e analisar as feições de relevo é fundamental uma vez que possibilita obter informações sobre a dinamicidade de processos glaciológicos atuais, para isso são utilizadas imagem de satélite para o monitoramento desses ambientes devido a sua localização remota e o mapeamento geomorfológico consiste em uma das principais técnicas de pesquisa em regiões glaciares representando a ordem cronológica das formas de relevo (HUBBARD & GLASSER, 2005).

Regiões glaciais possuem extensa variedade de formas de relevo e sedimentos, um dos maiores desafios é balizar essas formas e sua procedência.

As associações entre sedimentos e as formas de relevo são classificadas conforme seu ambiente deposicional por Benn & Evans (2010), em morainas marginais, associações subglaciais, glaciofluviais, supraglaciais, glaciomarinhas e glaciolacustrinas. As diferentes formas são expostas pela retração no ambiente proglacial (marginais de contato com o gelo atual e distal) e possibilitam reconstruir mudanças da frente da geleira ao longo do tempo, enquanto que as formas de relevo subglaciais fornecem informações relacionadas à direção de seu fluxo e regime termal (BENNETT & GLASSER, 1996).

Feições de relevo subglaciais se tratam de acumulações transversas ou longitudinais que se formam abaixo do gelo, ficando expostas com o recuo das geleiras. *Drumlins*, feições subglaciais, possuem forma oval ou arredondada assimétrica, podem atingir entre cinco a cinquenta metros de altura e dez a três quilômetros de comprimento, apresentam direção paralela ao fluxo do gelo e indicam o regime termal temperado, permitindo a reconstrução paleoambiental (BENNETT & GLASSER, 1996; BENN & EVANS, 2010).

Dentre as formas de relevo glaciofluviais destacam-se *flutings*, *eskers*, *kames*, terraços de *kames* e *kettles*. *Kettles* são feições supraglaciais e englaciais, as cavidades de *kettle* são locais originados pelo derretimento de gelo. *Kames* são cristas com topo aplainados, formas de contato com o gelo, sua orientação é paralela com o fluxo de gelo e podem estar dispostos em forma de terraços de *kames* são áreas de deposição, suavemente inclinados, sua presença indica redução glacial (BENN & EVANS, 2010).

*Flutings*, também subglaciais, são cristas alongadas com sedimentos alinhados a direção do fluxo de gelo, sugerem gelo com pouca espessura e base úmida, podem atingir três metros de altura (BENNETT & GLASSER, 1996).

*Eskers* possuem características glaciofluviais subglaciais em contato com o gelo (HAMBREY, 1994). Com cristas alinhadas e arredondadas e com diferentes tamanhos, sua composição de sedimentos é heterogênea, sua composição é constituída de areia e cascalho glaciofluvial (HAMBREY, 1994). Formam-se preferencialmente em áreas de término das geleiras, onde o gelo é praticamente estagnado (BENN & EVANS, 2010).

Dentre as associações formas de relevo e sedimentos depositadas marginais ao gelo destacam-se as morainas. Estes depósitos têm sua origem relacionada à deposição através de sedimentos glaciais por movimentos de massa e fluxos compressivos de empurrão e deformação glaciotectônica. Classificam-se em morainas mediais, laterais, morainas finais de avanço ou recessão, morainas em montículo (HAMBREY, 1994). Os sedimentos são *till* (heterogêneos, mal selecionados e podem variar desde argila a grandes blocos) (SHARP, 1988; BENN & EVANS, 2010).

As morainas mediais são salientes na área de ablação de algumas geleiras ativas, possuem características retilíneas, porém se o gelo se espalhar causa pressão, que pode curvar a feição moráinica (HAMBREY, 1994), estão constantemente sofrendo retrabalhamento pelo degelo (BENN & EVANS, 2010).

Morainas laterais tem sua formação diretamente vinculada à ação da geleira pela sua deposição de sedimentos em suas margens laterais. A moraina lateral pode ser alongada e formada pela fusão de morainas laterais de seu entorno e possuem formas assimétricas transversais em relação à geleira, devido à distribuição de seus fragmentos (BENN & EVANS, 2010).

Morainas em montículos apresentam topografia irregular, com degraus, se seus fragmentos forem espessos e estiver afastada do corpo da geleira a mesma torna-se estagnada. As morainas finais de despejo originam-se em margens frontais, perpendiculares ao fluxo de uma geleira em retração durante o processo de acumulação de sedimentos (BENNETT & GLASSER, 1996).

Moraina finais de avanço ou recessão forma-se na margem frontal das geleiras onde há avanço de geleira, pois empurra sedimentos e formam-se cristas

de acumulação sedimentar. Sua formação pode ocorrer em áreas subaquosas e terrestres, durante avanços glaciais sazonais, ou em substancial avanço de geleiras (BENNETT & GLASSER, 1996).

Cada sistema deposicional traz informações que remetem a formação de dinâmica da geleira, como retração, escoamento, direção de fluxo e velocidade destas (BENN & EVANS, 2010).

Com a retração ficam expostos ambientes livres de gelo, em áreas proximais a geleira trata-se do ambiente proglacial, este situado frontalmente ao gelo e influenciado pelo mesmo, como avanço, recuo e degelo (SLAYMAKER, 2009), esse ambiente são controlados por processos fluviais, lacustres ou marinhos que acontecem nas adjacências da geleira (SLAYMAKER, 2011).

As formas características de ambientes proglaciais e periglaciais são diferentes, as feições de relevo encontradas em setores proglaciais são resultantes de transporte de sedimentos, enquanto que em áreas periglaciais as formas são de encostas, dessa forma é comum que ambos ambientes sejam sobrepostos, pois sua localização marginal ao gelo e os processos de congelamento e descongelamento e/ou presença de *permafrost* não são particulares a nenhum (SLAYMAKER, 2011). A formação de ambientes periglaciais são vinculados a setores deglaciarizados (FRENCH & THORN, 2006).

Em setores distais as geleiras há ocorrência de processos paraglaciais (Figura 8) que consistem naqueles que são influenciados por condições não glaciais, trata-se de uma paisagem pós-glacial, dessa forma acontecem mudanças velozes, pelo retrabalhamento através do vento, fluxo hídrico e transporte de detritos (BALLANTYNE, 2002). De acordo com Hall (2007) os processos paraglaciais podem ser fluxos de detritos, a ação fluvial, de ventos, marinha, lacustre e pluvial. A água em forma líquida e a ação dos ventos na Ilha Rei George exerce importante função em seus aspectos geomorfológicos, pois com o transporte das partículas de materiais acarreta feições erosionais em áreas sem presença de gelo (BREMER, 1998).

A partir da deglaciação também há a formação de áreas com lagos e alagadiços. Esse tipo de ambiente situa-se na frente das geleiras e são condicionados pela média de regimes fluviais, lacustres e marinhos influenciados pelo degelo (SLAYMAKER, 2011).



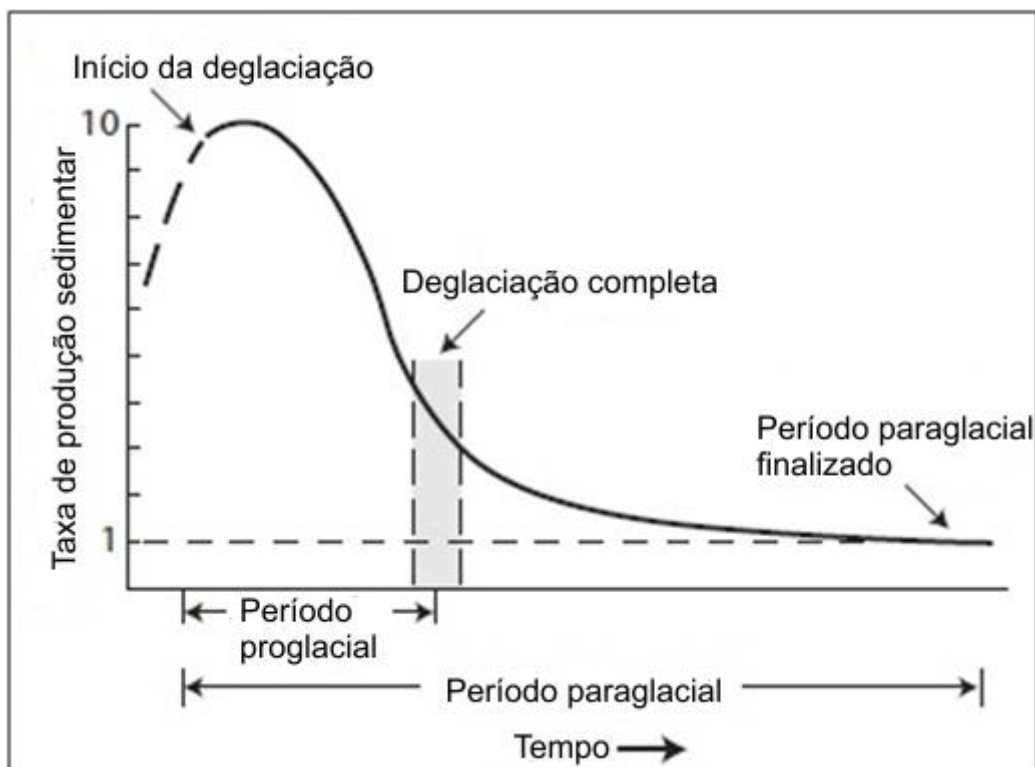


Figura 11- Ambiente paraglacial. Fonte: CHURCH & RYDER (1972).

Em regiões subpolares marítimas, as áreas úmidas são altamente sensíveis às mudanças climáticas, pois com o acréscimo do degelo glacial interanual ocorre aumento de áreas úmidas, mas com a diminuição do número de geleiras há uma possível alteração na dinâmica hidrológica em tais ambientes (ROSA *et al.*, 2015).

O Sensoriamento Remoto possibilita obter dados como Modelos Digitais de Elevação e imagens de satélite com resoluções variadas visando o reconhecimento de formas de relevo deposicionais proglaciais de mesoescala. Os produtos que são gerados através do Sensoriamento Remoto como os MDEs ajudam a detectar e monitorar processos geomorfológicos através do mapeamento geomorfológico glacial e auxiliaram no melhoramento de métodos para estudos de análise de superfícies (OTTO & SMITH, 2013).

Hattestrand *et al.* (2007) reconstruíram padrões de deglaciação e a direção de fluxo do gelo através de mapeamentos e usando imagens de satélite de alta resolução. A identificação de depósitos como *eskers* e *flutes* foi base para inferir que o fluxo de gelo mudou a direção durante o processo de deglaciação na Península Kola, no manto de gelo Fenoscandiano, na Rússia.

Outros exemplos de reconhecimento e mapeamento de feições geomorfológicas realizadas através de imagens de satélite (QuickBird), em ambientes glaciais, foram desenvolvidos por Schomacker & Kjær (2008) e Melo *et al.*, (2012), os quais mapearam de forma detalhada especialmente morainas.

Glasser *et al.*, (2011) identificaram retração em geleiras tributárias a plataforma de gelo Prince Gustav, Península Antártica, após o colapso da mesma, utilizando imagens Landsat 4 e 5, com resolução de trinta metros e o MDE Aster, devido aos erros que este contém para a suavização dos mesmos foi utilizado filtro passa-baixa e manual, a geleira Röhss (tributária), entre os anos de 2001 a 2009, retrocedeu aproximadamente 15 km, cerca de 70% de sua área.

Rosa *et al.*, (2011) utilizaram análise a campo e interpretação de imagens Quickbird de 2006 com 0,61 metros de resolução para realizar o mapeamento geomorfológico da área proglacial da geleira Wanda, Ilha Rei George, Antártica, e analisam a dinâmica glaciológica relacionadas as formas de relevo, para a identificação destas basearam-se em autores como Benn & Evans (2010) e outros. O mapeamento aponta *flutings*, cristas morânicas e canais proglaciais e mostra o ambiente deglaciarizado com aproximadamente 200 metros entre a linha de costa e a área frontal da geleira.

Andrade (2013) identificou na Península Potter, Ilha Rei George, através da utilização de imagens COSMO – SkyMed e Quickbird morainas de pequena extensão dispostas em montículos, as quais são atributos de ambientes recessionais em zonas proglaciais que se desenvolvem quando encontram-se em contato com gelo.

Rosa *et al.* (2013) identificaram, a partir de imagens QuickBird e imagens COSMO SkyMed em ambas as polarizações, diferentes depósitos glaciais em áreas proglaciais na Enseada Martel, como canais de drenagem de água de degelo, morainas laterais e frontais, *flutings*, feições erosivas como rochas *moutonnées* objetivando a reconstrução evolutiva deste ambiente glacial.

Bonada *et al.*,(2018) utilizou imagens de radar COSMO-SkyMed para a área da Península Potter, na Ilha Rei George Antártica, com o intuito de melhorar a interpretação visual e o mapeamento geomorfológico de feições como lagos proglaciais. Assim como, interpretou visualmente imagens QuickBird com composição RGB 432 e COSMO-SkyMed com polarização VV e HH com filtragens

espaciais e perfis topográficos, para identificar feições geomorfológicas e posterior mapeamento destas. Os resultados possibilitaram evidenciar a sequência cronológica da exposição das formas de relevo proglaciais com a evolução da retração.

Rosa *et al.* (2016) analisam a evolução de sistemas proglaciais e marginais ao gelo, através de análises laboratoriais dos sedimentos que foram coletados em campo, e utilizando imagens de satélite como Quickbird, CosmoSkyMed e TerraSar, com resolução espacial alta, e imagens Spot, Landsat e Sentinel de diferentes anos, evidenciando dessa forma que geleiras apresentam retração de maneira contínua deixando exposto ambiente proglacial, com presença de morainas marginais e frontais de recessão, *flutings* e depósitos de *till*.

Simões (2017) utilizou imagens do satélite Landsat e fotografias aéreas com o intuito de definir a alteração na área das geleiras Drummond e Widowson na Península Antártica entre os anos de 1957 – 2015 e o modelo digital de elevação Aster GDEM-2 para caracterizar a morfologia e morfometria das bacias de drenagem de ambas as geleiras, identificando morainas laterais e centrais na geleira Drummons e morainas laterais na geleira Widowson.

A partir dos trabalhos acima citados é possível concluir que os produtos de sensoriamento remoto são imprescindíveis e eficientes para estudos glaciais, uma vez que trazem resultados coerentes quando utilizados dados adequados à pesquisa que se pretende desenvolver.

O uso do Sensoriamento Remoto e do Sistema de Informações Geográficas (SIG) é indispensável para estudos nos ambientes glaciais, pois o mesmo possibilita a obtenção de imagens de um mesmo local em diferentes períodos, permitindo a observação e espacialização das mudanças que ocorrem (SLAYMAKER & KELLY, 2007).

Neste contexto o Sensoriamento Remoto tem contribuição significativa para o monitoramento da dinâmica glacial e mapeamento geomorfológico proglacial. Os sensores e técnicas em geoprocessamento desenvolveram-se significativamente para estudos relacionados à Criosfera, permitindo a compreensão da distribuição espacial de geleiras, bem como sua dinâmica (AMBINAKUDIGE & JOSHI, 2012).

## 2.3 Caracterização Ambiental da Ilha Rei George

### 2.3.1 Geologia

A geologia da ilha Rei George foi classificada por Ferguson no ano de 1921 como mesojurássica mesclada com lavas sedimentares intercaladas por basalto e andesito cenozoico, e com presença de intrusões quartzo, mica, diorito e andesito (BARTON, 1965).

O embasamento rochoso da Ilha Rei George possui formação datada do Pré-Cambriano ao Terciário Médio ou Superior, constituído por rochas sedimentares, metassedimentares e vulcânicas intrusivas, sua litoestratigrafia contém sedimentos do Paleozoico Superior, em alguns casos metamorfizados devido a processos vulcânicos ocorridos no Jurássico e Paleogeno ao Neogeno (CURL, 1980, BIRKENMAJER, 1980a; BIRKENMAJER, 1991). A atividade vulcânica expressiva na IRG durante o Jurássico Superior, pode ser percebida pelas camadas de basalto e andesitos, as quais são mescladas por rochas vulcanoclásticas ligado a subducção meso-cenozóico do assoalho do Oceano Pacífico, abaixo da Península Antártica (BIRKENMAJER, 1980a).

A estrutura da Ilha Rei George indica falhas e deformações (Figura 12) (BIRKENMAJER, 1980a). Há ocorrência de duas falhas importantes, ambas com orientação ENE – WSW, a Falha Ezcurra (EF) e a Falha Collins, o campo de gelo Warszawa (WB) está associado a estas falhas já que se originou da Falha Ezcura (BIRKENMAJER, 1983). O domo de gelo Warszawa é constituído por sedimentos de origem vulcânica não dobrados, em geral metamorfosados (TOKARSKI, 1987).

A Ilha Rei George consiste em vários blocos tectônicos que são separados por sua direção leste – nordeste e oeste – noroeste, essa configuração representa terrenos desarticulados entre eles e com distância ignorada (BIRKENMAJER, 1997) estes terrenos são cruzados por sistema de falhamentos que apresentam tendência noroeste-sudeste (BIRKENMAJER, 1989).

Birkenmajer (1980) classifica a litologia das Shetlands do Sul como formada por metassedimentos com rochas ígneas extrusivas e intrusivas, cuja formação datada do período Paleozoico Superior e Terciário.

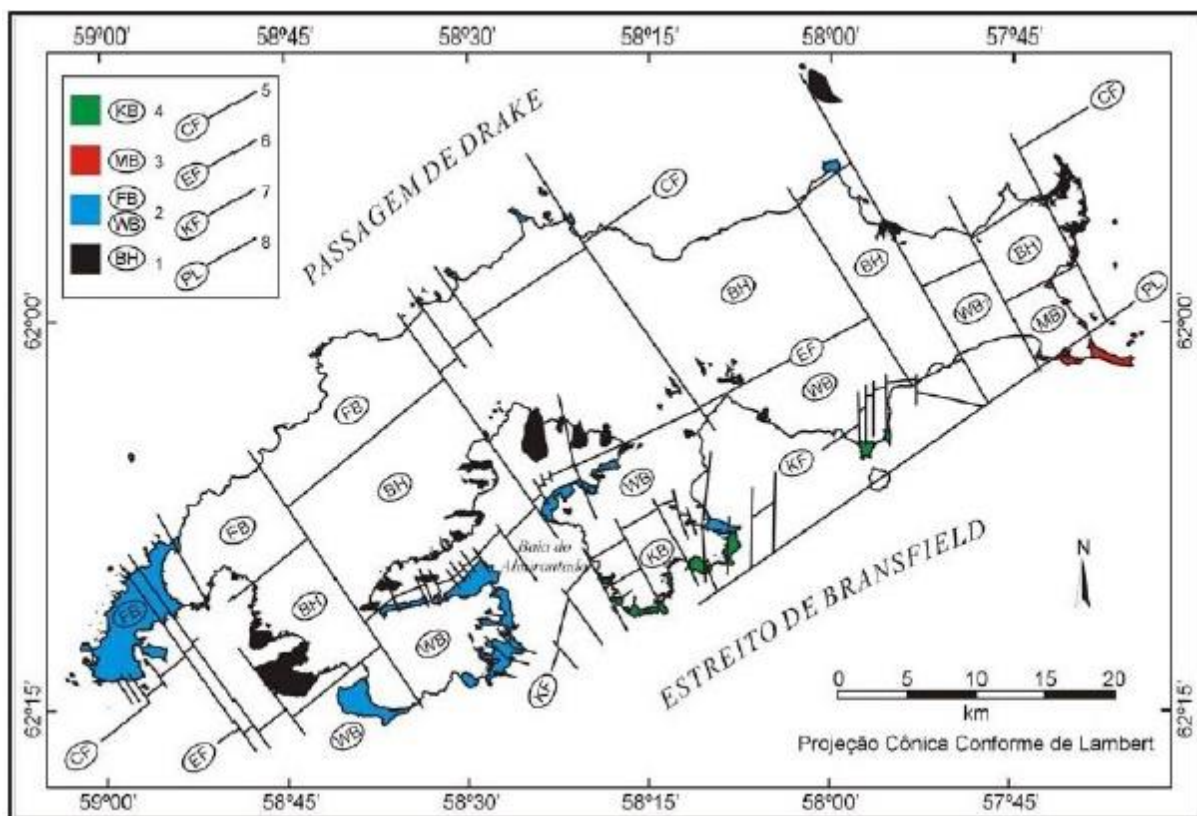


Figura 12 - Mapa Estrutural da Ilha Rei George. Fonte: Birkenmajer (1983). Onde: 1 – Horst Barton (BH); 2 – Bloco Warszawa (WB) e Bloco Fildes (FB); 3 – Bloco Melville (MB); 4 – Bloco Kraków (KB); 5 – Falha Collins (CF); 6 – Falha Ezcura (EF); 7 – Falha Kraków e 8 – Linha Penguin (PL).

A predominância litológica é de rochas básicas como basaltos por exemplo, que podem ser encontrados em diversas fases de alteração, há processos de metamorfismos de baixa pressão que propiciam a formação de minerais como clorita, calcita entre outros (THOMSON *et al.*, 1983).

A gênese das Shetlands do Sul liga-se a o surgimento do arco insular magmático de Scotia, o qual evoluiu durante a fragmentação do Gondwana há a aproximadamente 180 milhões de anos, quando iniciou a deriva das partes que constituam o Gondwana originando continentes, bem como algumas ilhas (MARTÍNEZ DE PISON *et al.*, 1992).

O Arco de Scotia é uma feição prolongada entre o nordeste da Península Antártica e a ponta meridional da América do Sul, trata-se de uma cordilheira submersa, o conjunto de ilhas das Shetlands do Sul se trata de uma parte emersa da Cordilheira Scotia submarina (SUGDEN & JOHN, 1976).

A Ilha Rei George situa-se em área tectonicamente ativa, que desde o Oligoceno está sujeita a diversas glaciações e também a movimento glacio-

eustáticos (BIRKENMAJER, 1991). Conforme mostra o mapa de falhas da área de estudo há diversas falhas, (Figura 13), dessa forma sustentando, de acordo com Birkenmajer (1980a) a ocorrência de falhas, bem como setores com deformações na Ilha Rei George, no Terciário superior devido ao processo que originou os falhamentos surgiu a Baía do Almirantado.

Braun (2001) considera as seguintes unidades geológicas como as principais existentes na Ilha Rei George: *Horst Barton*, Bloco *Fildes*, Bloco *Warszawa*, Bloco *Cracóvia* e Grupo *Penguin Island*.

*Horst Barton* situa-se nas partes altas da Ilha Rei George, com presença de rochas vulcânicas e sedimentos metamorfoseados de baixo grau (TOKARSKI, 1987). As rochas possuem origem terrestre, mas com interferência marinha (BIRKENMAJER, 1982) e idade datada de aproximadamente 66,7 e 26 Ma (BIRKENMAJER, 1997).

O Bloco *Fildes* é formado por rochas basálticas, bem como aglomerados de origem andesítica e algumas formações dacíticas com datação de aproximada de 59 milhões de anos (TOKARSKI, 1987).

O Bloco *Warszawa* possui em sua composição rochas de forma geral metamorfoseada vulcânica (BIRKENMAJER, 1980b). Com idade datada de 77 a 37 milhões de anos (GROENEWEG & BEUNGK, 1992).

Bloco *Cracóvia* possui depósitos vulcânicos, glaciais e interglaciais datados do Cretáceo (TOKARSKI, 1987).

Grupo *Penguin Island* com formação datada do Pleistoceno, com rochas sem influência de metamorfismo (TOKARSKI, 1987) com presença de crateras vulcânicas (BIRKENMAJER, 1979).

A área de estudo situa-se sobre o Bloco *Warszawa*, o qual é um Super Grupo da Ilha Rei George (BIRKENMAJER, 1980b), o qual é caracterizado por (TOKARSKI, 1987) como um composto de rochas vulcânicas as quais sofreram metamorfismo.

As caracterizações topográficas de áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo *Warszawa* são determinadas por sua capacidade de resistência, com feições de atividades vulcânicas e estreitamente relacionadas a glaciações anteriores (RACHLEWICZ, 1999).

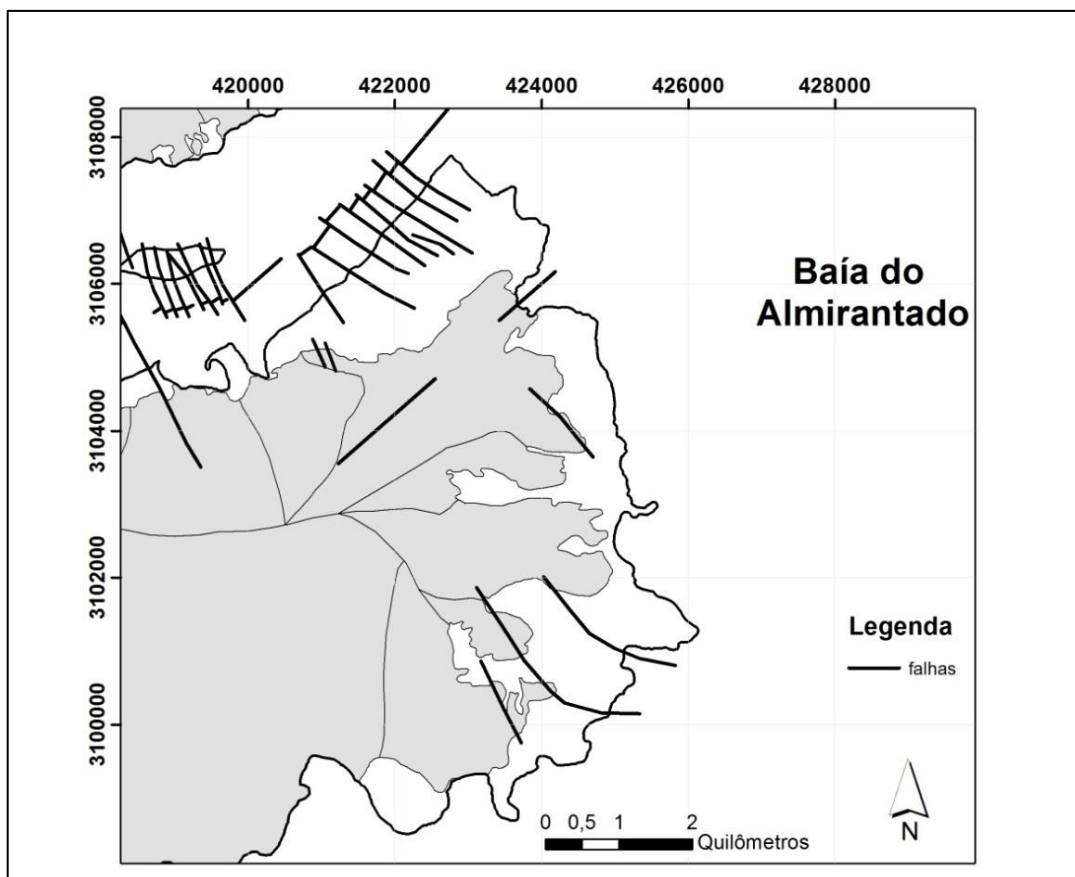


Figura 13 - Mapa de Falhas da Margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica.

### 2.3.2 Aspectos Paleoclimatológicos da Ilha Rei George

De acordo com estudos a Ilha Rei George passou por três fases desde o Último Máximo Glacial (SEONG *et al.*, 2006). As formas erosivas indicam que a extensão máxima da calota de gelo ocorreu durante o período de glaciação no Pleistoceno Superior a aproximadamente 20000 a 18000 anos A.P. (BIRKENMAJER, 1981).

Ocorreu um período de deglaciação entre 9000 a 5000 anos A.P. (MÄUSBACHER *et al.*, 1989). Há aproximadamente 7000 a 8000 anos A.P. classifica-se este espaço de tempo como um *optimum* climático no Holoceno (DOMACK *et al.*, 2001). Um novo período também denominado *optimum* climático ocorreu entre os anos 4000 a 2700 A.P. e que foi antecedido por um avanço glacial nos anos de 6200 a 2700 A.P. na área das Shetlands do Sul (YOON *et al.*, 2000).

Durante a Pequena Idade do Gelo ocorrida entre 1200 a 1800 D.C. ocorreu a expansão glacial considerada mais recente, deixando registradas as morainas de avanço (SEONG *et al.*, 2006).

As rochas da área de estudo pertencem à unidade Bloco Warszawa (BIRKENMAJER, 1983). Estudos indicam que a partir de depósitos glaciais evidenciam quatro períodos glaciais datados do Terciário como a Glaciação Cracóvia, ocorrida aproximadamente a 50 Ma, Glaciação Polonez sucedida por volta de 32 a 30 Ma, Glaciação de Legru, com data de 30 a 26 Ma e a Glaciação de Melville incidida entre 22 – 20 Ma, as quais foram intercaladas por três períodos interglaciais: Arctowski, Wesele e Wawel (BIRKENMAJER, 1996). As glaciações que ocorreram no bloco de gelo Warszawa emolduraram as características físicas do mesmo (RACHLEWICZ, 1999).

Atualmente no período interglacial a tendência de aumento da temperatura atmosférica está ocorrendo de forma acelerada na região das Shetlands do Sul, se comparada a outras regiões do globo (IPCC, 2007), na Ilha Rei George nos últimos trinta anos a temperatura aumentou 1°C.

### **2.3.3 Aspectos Climatológicos da Ilha Rei George**

As Shetlands do Sul são influenciadas por estar em região com influência de baixa pressão circumpolar e seu clima é condicionado por passagens de ciclones, que transportam ar quente e úmido. Nas Shetlands do Sul ciclones são mais frequentes no verão em relação a outras estações e devido à baixa pressão há precipitação abundante nesta área (TURNER *et al.*, 2004). Os ventos que predominam têm direção norte, noroeste, oeste e sudeste (BRAUN *et al.*, 2004).

Durante os meses de verão há registros de temperaturas positivas (BRAUN, 2001a) há mudanças na temperatura atmosférica interanual, alta umidade relativa do ar e cobertura de nuvens constante (BINTANJA, 1995).

Tanto em áreas livres de gelo como em locais cobertos por geleiras a temperatura atmosférica diminui de acordo com a altitude (KEJNA, 2008). Em partes mais altas do campo de gelo Warszawa, ocorre queda de temperatura do ar, podendo ser de 0,66 a 0,72°C a cada 100 metros de altitude (BRAUN *et al.*, 2001a)

De acordo com Kejna (2008) os ventos predominantes na geleira Ecology são catabáticos, sendo difundidos ao longo do bloco Warszawa. Estes são registrados, por exemplo, na geleira Sphinx (PIASECKI, 1988). O agente climático é responsável por controlar os processos ligados à retração da frente das geleiras na Península



Antártica, as variações de temperatura e na precipitação influenciam no degelo e no suprimento de material terrígeno (AQUINO, 1999).

#### **2.3.4 Aspectos Glaciológicos e geomorfológicos da ilha Rei George**

O campo de gelo da Ilha Rei George é constituído por domos ou campos de gelo menores, que se conectam, e seu gelo desliza por meio de bacias de drenagem em direção à periferia da geleira (SIMÕES & BREMER, 1995). Suas geleiras podem atingir 700 metros de altitude e abrangem 92,7% de toda a IRG com diferentes características topográficas (BREMER, 1998).

Um fator importante destacado por Bremer (1998) para estudos referentes à glaciologia da Ilha Rei George é o gradiente de calor geotermal, que se trata do calor transmitido pelo embasamento rochoso à massa de gelo, sendo um dos fatores determinantes da temperatura basal da mesma, pois o calor ao atingir a camada basal da geleira aumenta a temperatura do local, contribuindo para o derretimento do gelo.

A massa de gelo na Ilha Rei George encontra-se no ponto de fusão sob pressão (SIMÕES, *et al.*, 2004) os mantos de gelo que estão com temperaturas inferiores ao ponto de degelo sob pressão e com pouca água de degelo são diferenciados de geleiras temperadas as quais possuem água proveniente de degelo no interior de seu corpo (PATERSON, 1994).

O bloco de gelo Warszawa atinge 476 metros de altitude (BATTKE, 1990), seu formato é em cúpula, porém não se trata do bloco com maior elevação da Ilha Rei George, sua forma é assimétrica, e o gelo que o recobre flui para oeste, e também apresenta inclinação para leste. A superfície glacial é de forma geral uniforme, pois não apresenta mudanças severas em seu gradiente de elevação (RACHLEWICZ, 1999).

Este bloco alimenta as geleiras da área de estudo, a Ecology trata-se de uma geleira de vale com laguna a sua frente fluindo para a Baía do Almirantado, em ambos os lados possui zonas marginais com presença de morainas. As demais geleiras ao sul Sphinx, Baranowski e Tower apresentam seu término em terra (SOBOTA, *et al.*, 2015).

As geleiras Sphinx, Baranowski, Tower e Windy possuem configuração de seu término para terrestre, e a geleira Ecology possui término misto e suas áreas

livres de gelo possuem lagos e lagunas originadas pela água do degelo da neve e de geleiras.

Durante o período de ablação há ocorrência de água líquida devido ao derretimento de neve ou gelo (RACHLEWICZ, 1997). Eventos de glaciação e deglaciação tendem a causar mudanças ambientais nas zonas marginais à geleira e proglaciais (RACHLEWICZ, 1999).

Rachlewicz (1996) através de seus estudos evidenciou que nas últimas décadas, como resultado do balanço de massa negativo ocorreu aumento da ablação no bloco de gelo Warszawa.

Sobota *et al.*, (2015) investigaram o balanço de massa da margem leste do campo de gelo Warszawa, bem como o papel que as mudanças no clima exercem sobre o recuo das geleiras entre os anos de 1979-2012, dessa forma evidenciaram retração glacial a longo prazo com perda de 41% de sua área. Houve ampliação no número de dias com temperatura positiva e aumento da temperatura do ar elevando os níveis de ablação.

Warszawa apresenta baixa dinamicidade ao ser confrontado a outros blocos da Ilha Rei George é intensamente sensível às alterações climáticas, manifestando respostas imediatas às mudanças de temperatura (PETLICKI *et al.*, 2017)

A língua de gelo da geleira Ecology flui para direção nordeste do campo de gelo Warszawa em direção a Baía do Almirantado, sua frente de aproximadamente 700 metros, seu fluxo de gelo desliza na direção WSW – ENE, seus setores laterais possuem cristas morânicas podendo atingir 50 metros de altura, sua parte frontal apresenta lagos e morainas com direção nordeste assentada a uma base rochosa, a zona marginal ao gelo é drenada pela corrente hídrica proglacial, a qual percorre sob o gelo e coleta água de origem supraglacial por um perímetro de 600 metros até a Baía do Almirantado, local onde deságua (RACHLEWICZ, 1999).

Na área proglacial da geleira Ecology encontram-se rochas de origem vulcânica terciárias, fracionadas ou em blocos maiores. Podem ser visualizados vestígios como a orientação de rochas *moutonnées*, e direção de estriações que possibilitam concluir que a direção de um último avanço ocorrido apresentava direção sul – norte (RACHLEWICZ, 1999).

A geleira Sphinx flui do setor central do bloco Warszawa para a direção leste, é limitada em sua parte norte por rochas e sua área livre de gelo é formada por

rochas resistentes à ação glacial. Na parte sul há feições deposicionais, apresenta forma de trapézio e suas laterais são marcadas a oeste por uma borda glacial e a leste pela área costeira marítima (RACHLEWICZ, 1999).

Nas áreas de encontro das geleiras Sphinx e Baranowski, ao sul, há estrias paralelas ao fluxo do deslizamento do gelo, como pode ser observado na formação rochosa Ágat Point, com direção levemente ao sudoeste em comparação com a Península Antártica. Enquanto que na parte norte há áreas mais íngremes, como o do *Sphinx Hill*, o qual orienta o fluxo de gelo para leste. A anormalidade da direção do fluxo da geleira para o norte tem a possibilidade de ter relações com a pressão que a geleira Baranowski exercia sobre a mesma, já que esta apresenta ampla frente (RACHLEWICZ, 1999).

A geleira Baranowski apresenta frente extensa, com aproximadamente 1000 metros de extensão, com a presença de feições morânicas em sua área marginal ao gelo e água oriunda da fusão do gelo. A movimentação de sua geleira tem direção de Oeste para Leste, conforme evidenciam as estrias. Próximas à margem do gelo há morainas degradadas por influência do derretimento da geleira, traços de acumulação e sedimentos glaciofluviais também podem ser observados (RACHLEWICZ, 1999).

As cristas morânicas laterais estendem-se ao longo da borda sul da geleira Baranowski. Nas adjacências da costa marítima há maior espaçamento entre as mesmas. O balanço negativo glacial consecutivo tornou praticamente plana a área frontal da geleira, com espessura frontal de aproximadamente 10 metros (RACHLEWICZ, 1999).

A geleira Tower apresenta, em sua zona proglacial, material depositado constituído por *till* (detritos basais) (VIEIRA *et al.*, 2004). Apresenta processo de colonização vegetal, pequenos lagos e sistema de drenagem dinâmico (BREMER, 2008).

A geleira Windy, a sudoeste da Baía do Almirantado, passou por uma atenuada ação retracional na década de 1990 (BIRKENMAJER, 2002). Sua zona proglacial é retrabalhada por água oriunda de degelo e ação atmosférica, há depósitos formados por detritos basais, drenagem subglacial, pequenas lagoas, terraços glaciolagunares e glaciofluviais (BREMER, 2008).

### 2.3.5 Mudanças Climáticas Recentes e Consequências Ambientais na Ilha Rei George

A tendência de aumento da temperatura média superficial do ar da região da Península Antártica é uma das maiores em escala global (IPCC, 2013).

Turner *et al.* (2005) afirma que em toda a Península Antártica as mudanças climáticas possuem complexidade espacial e temporal, em relação ao século passado a temperatura média anual desta região aumentou aproximadamente 3,7° C. Ainda que Carrasco (2013) considere uma tendência a resfriamento nos últimos anos. Na IRG durante as últimas décadas (80-2000) o aumento da temperatura foi de 1°C, e as geleiras comportaram-se de forma sensível e essa mudança (KEJNA *et al.*, 2013). As consequências da tendência do aumento de temperatura média do ar são inúmeras, dentre eles a desintegração de geleiras e elevação do nível marítimo, sendo assim as geleiras deste local estão apresentando acelerada resposta ao aquecimento regional (KEJNA *et al.*, 2013; IPCC, 2013). A autora aponta que o oceano Antártico apresenta aumento de temperatura, o que influencia na desintegração e deglaciação do gelo, além de implicar mudanças na temperatura da Ilha Rei George, já que suas massas de ar são provenientes do oceano.

Os dias com precipitação líquida aumentaram nas últimas três décadas combinado com o aumento de dias que a temperatura média foi maior que 0°C a fusão de neve aumenta bem como o balanço negativo (FERRANDO, 2009).

Na Ilha Rei George há estudos que apontam a retração contínua de geleiras desde a década de 50 (SIMÕES e BREMER, 1995; AQUINO, 1999; ROSA *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2011; KEJNA *et al.*, 2013; ROSA *et al.*, 2014a; SIMÕES *et al.*, 2015).

A geleira Ecology, por exemplo, vem sofrendo retrações, esse processo aumentou na década de 1989 a 1999, alcançando até 30m/ano (BIRKENMAJER, 2002), essas mudanças para Simões *et al.* (1999) devem-se provavelmente ao aquecimento do clima regional.

Na Tabela 01 observa-se os valores de comprimento, largura, área e as taxas de retração para os períodos entre 1956 – 1979, 1979 – 1988, 1988 – 1995 e 1995 – 2000.

De acordo com os dados extraídos de Arigony-Neto (2001) a geleira de maior área é a Ecology com 5,55 km<sup>2</sup>, seguida da Baranowski, Sphinx e Tower, as taxas

de retração para os anos de citados em que há dados disponíveis observa-se que a geleira Ecology possui maior taxa de retração com 0,48 km<sup>2</sup>, em seguida a Baranowski com 0,46 km<sup>2</sup>, Tower com 0,37 km<sup>2</sup> e a geleira Sphinx com taxa de 0,23 km<sup>2</sup>.

Geleira	Comprimento (m)	Largura (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Retração (km <sup>2</sup> )			
				1956-1979	1979-1988	1988-1995	1995-2000
Ecology	3930	1510	5,55	0,01	0,38	0,48	0,48
Sphinx	2350	420	1,42	-	-	0,03	0,23
Baranowski	2320	1070	2,51	-	-	0,11	0,46
Tower	1200	600	0,57	-	0,21	0,20	0,37

Tabela 1 - Dados de retração das geleiras da área de estudo entre 1956 – 2000.

Fonte: Arigony-Neto (2001).

Aquino (1999) aponta que o fator climático, controla a retração das áreas frontais do gelo, pois mudanças de temperatura e precipitação influenciam o degelo. As retrações de geleiras na Península Antártica estão relacionadas ao aquecimento regional que vem ocorrendo (SIMÕES *et al.*, 2004) já que as massas de gelo das Ilhas Shetlands do Sul são sensíveis as mudanças no clima devido a seu posicionamento geográfico, espessura do gelo e por estarem próximas do ponto de fusão sob pressão (ARIGONY-NETO *et al.*, 2001).

Com a retração da geleira Ecology, por exemplo, há formação do ambiente sem cobertura de gelo expondo formas de relevo e depósitos, na área proglacial, os quais indicam condições termais úmidas da geleira e processos de retração (ROSA *et al.*, 2006).

Em resposta a estas mudanças verifica-se a exposição de formas de relevo deposicionais nas áreas proglaciais, como cristas morânicas de recessão, *flutings*, *eskers* e o aparecimento de canais de água e lagos oriundos do degelo (ROSA *et al.*, 2010, 2014, 2016).

Bremer (2008) argumenta que na área proglacial da geleira Baranowski e Tower o material que se encontra depositado é formado por detritos basais. Há presença de planícies glaciolagunares na zona sem cobertura de gelo com características hídricas subglaciais na geleira Baranowski, assemelhando-se a geleira Ecology, a qual possui em sua frente o laguna Ecology (Figura 14).

A planície glaciofluvial da geleira Sphinx evidencia, por suas formas de relevo o avanço e o recuo, morainas de retração retrabalhadas, *flutings* e alguns pequenos *eskers*. Há canais anastomosados, os quais transportam e retrabalham sedimentos de característica subglacial e subaéreo da geleira Sphinx até a Baía do Almirantado e esta dinâmica se assemelha ao que ocorre ao sul da geleira Baranowski (BREMER, 2008).



Figura 14- Geleira Ecology e laguna Ecology. Fonte: Rosa *et al*, 2009.

Na margem leste do campo de gelo Warszawa é possível que o *permafrost* seja encontrado não apenas às margens das geleiras Ecology e Baranowski, locais com descongelamento intensivo nos períodos do verão e submetido à ação de maré (BREMER, 2008).

### **CAPITULO 3 – METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES**

---

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussões obtidos através de pesquisa bibliográfica, geração de produtos geomorfométricos, análise de dados de temperatura para a área de estudo desde 1956 a 2017, mapeamento geomorfológico, estimativa da variação frontal das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, situadas na margem leste do campo de gelo Warszawa e ainda a evolução geomorfológica do ambiente proglacial das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa. Os resultados estão organizados em forma de três artigos submetidos, conforme normas do Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O primeiro artigo trata sobre a variação frontal das geleiras da área de estudo entre 1956-2017, que foi mapeada com base em imagens Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014 e vetores de variação frontal de 1956, 1979, 1988 e 2000. Foi evidenciado processo de retração contínua com aumento das áreas livres de gelo de 6,3km<sup>2</sup> no período entre 1956-2017, e formação da rede de drenagem fluvioglacial e glaciolacustre. Com destaque para as recentes mudanças ambientais, tem-se a geleira Windy, a qual apresentou alteração do seu término de maré para terrestre.

O segundo e terceiro artigo visam caracterizar a geomorfologia e a evolução geomorfológica do ambiente proglacial das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa, através de análise visual nas imagens Sentinel-2 e WorldView-2. Foram identificados ambientes periglaciais, paraglaciais e exposição de formas de relevo deposicionais de mesoescala na área sem cobertura de gelo como morainas laterais, latero-frontais e frontais, *eskers*, lagos, lagunas e canais de drenagem.

O terceiro artigo, baseado no mapeamento geomorfológico e com base nas fases de retração das geleiras, determina três estágios de retração frontal e as formas de relevo formadas em cada um. Evidencia a ocorrência de mudanças nesses ambientes como resultado da retração glacial, bem como direção de fluxo, avanço máximo das geleiras e presença de canais de drenagem. E em setores

distais ao gelo evidencia-se um ambiente mais estabilizado em comparação ao ambiente mais dinâmico (atual margem do gelo) aos processos paraglaciais.



### **3.1 ARTIGO 1: MUDANÇAS GLACIAIS RECENTES NO SETOR ORIENTAL DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA: ESCALAS DE TEMPO DE RESPOSTA E NOVAS CONDIÇÕES DE TÉRMINO GLACIAL.**

---

**Resumo:** Este trabalho objetiva analisar a dinâmica de retração das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica, entre 1956-2017. A variação frontal e de área total das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy foi estimada e mapeada com dados de imagens de satélite Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014, e vetores de variação frontal de 1956, 1979, 1988 e 2000. Com as análises estatísticas verificou-se que há uma relação entre a perda de área das geleiras no período analisado com a tendência de aumento de temperatura média superficial do ar e precipitação líquida anual registrada nas primeiras 5 décadas. Evidenciou-se um contínuo processo de retração nas geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, com perda total de área de 33%, 25%, 37%, 71% e 30%, respectivamente, no período. A geleira Ecology perdeu mais área em relação às demais, totalizando 2,3 km<sup>2</sup> e está parcialmente conectada a uma laguna no setor frontal. Estimou-se um aumento das áreas livres de gelo de 6,3 km<sup>2</sup> no período entre 1956-2017, com o desenvolvimento da rede de drenagem fluvioglacial e glaciolacustre. A geleira Windy apresentou mudanças em seu término de maré para terrestre, formando uma área proglacial com a exposição de formas de relevo deposicionais glaciais.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas, dinâmica glacial, análise multitemporal, Baía do Almirantado.

**Abstract:** This study aims to analyze the dynamics of glacier shrinkages of the eastern sector of the Warszawa Icefield, Admiralty Bay coast, King George Island, Antarctica, between 1956-2017. The Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers outline and area fluctuations were mapping and estimated using 2017 Sentinel-2 and 2014 WorldView-2 satellite images, and 1956, 1979, 1988 and 2000 outline glaciers data. The analysis indicated a relationship between loss area processes in period with increase superficial air mean annual temperature and annual liquid precipitation trends recorded for first 5 decades. The results evidenced a continuous retreat processes for Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers, with loss area of the 33%, 25%, 37%, 71% and 30%, respectively for glaciers. The Ecology Glacier lost most area that other glaciers analyzed (2,3 km<sup>2</sup>) and there is a lagoon connection with Admiralty Bay. There is increase of the ice-free áreas de 6,3 km<sup>2</sup> between 1956-2017, with development of the fluvioglacial and glaciolacustre drainage network. The Windy glacier presented recent outlet to land terminus configuration changes and generated a new proglacial area with glacial depositional landforms exposition.

**Key-Words:** climate change; glacier dynamics; multi-temporal analysis; Admiralty Bay.

## 1- INTRODUÇÃO

Há estudos que evidenciam o recuo frontal tanto de geleiras com término marinho como terrestre (Rau *et al.*, 2004; Rignot *et al.*, 2013; Cook *et al.*, 2014; 2016), mudanças de processos geomorfológicos, degradação do *permafrost* e mudanças na espessura da camada ativa em ambientes livres de cobertura glacial (Oliva & Ruiz-Fernández, 2015) e sensibilidade das geleiras às mudanças climáticas na região da Península Antártica. Na Estação Faraday a temperatura média aumentou 3,2°C em 63 anos (Turner *et al.*, 2005; Comin & Justino, 2017).

Entre diversos outros autores, Rabassa *et al.*, (1982), Simões & Bremer, (1995), Skvarca *et al.*, (1995), Thomas *et al.*, (2004), Rignot *et al.*, (2008), Rosa *et al.*, (2009), Kejna *et al.*, (2013) Rosa *et al.*, (2014), Simões *et al.*, (2015) identificaram uma perda total ou diminuição da área de pequenas geleiras de frente em terra desde a década de 70 em ilhas da região da Península Antártica. Isso se deve as pequenas dimensões das bacias de drenagem, menor espessura do gelo quando confrontadas ao manto de gelo que recobre o continente antártico (Simões, 2011). Outro fator que contribui a essa sensibilidade é que essas geleiras estão próximas do ponto de fusão (Knap *et al.*, 1996). As mudanças ambientais que estão ocorrendo na região da Península Antártica são ligadas à tendência de aquecimento regional observado para várias décadas e às mudanças no oceano, como a redução do gelo marinho e aquecimento superficial das águas (Li *et al.*, 2014).

Devido a essa sensibilidade às mudanças climáticas, estas áreas são importantes alvos para o monitoramento de mudanças ambientais e entendimento de sua dinâmica (Simões, 2011). A utilização de imagens de satélite e Sistema de Informações Geográficas (SIG) e Sensoriamento Remoto é indispensável para estudos nos ambientes glaciais, pois possibilitam a obtenção de imagens de um mesmo local em diferentes períodos, permitindo a observação e espacialização das mudanças ambientais que ocorrem (Slaymaker & Kelly, 2007; Ambinakudige, 2012).

Este artigo objetiva analisar a variação de área das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, localizadas no setor leste do campo de gelo Warszawa, na ilha Rei George, Antártica, no período entre 1956 a 2017.

O recorte de estudo deste trabalho está inserido na Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG). O entendimento do comportamento dinâmico das geleiras de término em terra nesta área polar é relevante para detectar

mudanças ambientais regionais através de comparativos entre a evolução geomorfológica das áreas livres de gelo relacionada às retrações e ainda para o desenvolvimento de cenários para as próximas décadas.

## 2- ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se no setor leste do campo de gelo Warszawa da Ilha Rei George, Antártica (Figura 1). A análise compreende as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e suas áreas livres de gelo. O recorte deste trabalho está inserido na Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG), dessa forma trata-se de uma área estabelecida com o objetivo de tornar mínimo o impacto gerado a partir da presença antrópica na Antártica (Arigony-Neto *et al.*, 2001).

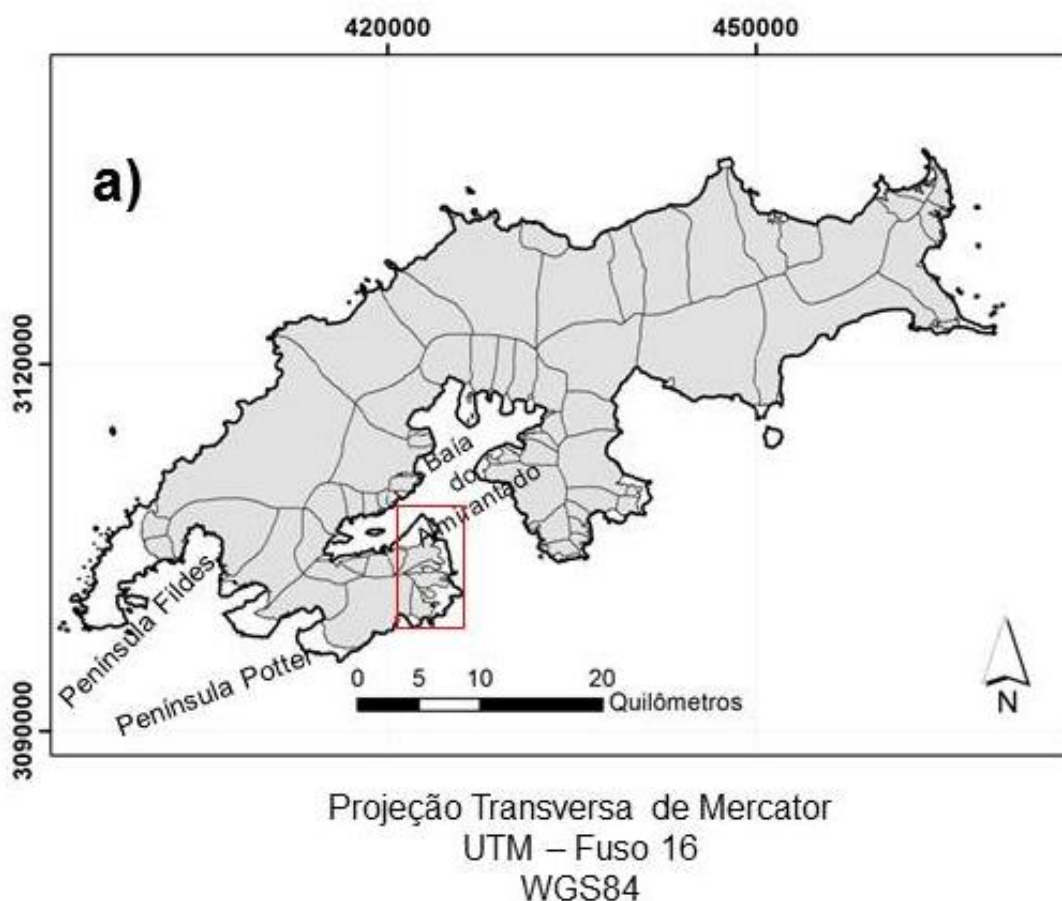


Figura 1- Localização da área de estudo das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e suas áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo Warszawa na Ilha Rei George.

O clima da ilha Rei George é condicionado por passagens de ciclones, mais frequentes no verão (Turner *et al.*, 2004). A ocorrência de precipitação anual na Ilha Rei George pode variar de aproximadamente 500 mm nas áreas que estão no nível do mar, para 800 a 2000 mm no topo da calota de gelo que recobre a Ilha (Rakusa-

Suszewski, 1993). Durante os meses de verão há registros de temperatura positiva (Braun *et al.*, 2001). Para a Ilha Rei George as temperaturas médias anuais são de -2,8°C e para os meses de inverno há variação entre -15,5 a -1,0°C, já para o período do verão varia de -1,3 a 2,7°C (Ferron *et al.*, 2004).

Em partes mais altas do campo de gelo Warszawa (entorno de 470 m de elevação), ocorre diminuição da temperatura do ar de 0,66 a 0,72°C a cada 100 metros de altitude (Braun *et al.*, 2001). De acordo com Kejna (2008), os ventos predominantes na geleira Ecology são catabáticos e provenientes do campo de gelo Warszawa.

No campo de gelo Warszawa, no período de ablação, compreendido entre os meses de dezembro a março, ocorre o derretimento da neve precipitada durante o inverno e início da primavera, formando canais glaciofluviais, alimentados também pelo descongelamento do *permafrost* e precipitação pluvial, no verão também há registros de ocorrência de precipitação nival (Bremer, 1998).

O campo de gelo Warszawa alimenta as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e atinge 476 metros de altitude (Battke, 1990). Seu formato é em domo, sua forma é assimétrica e o gelo flui para oeste e leste (Rachlewicz, 1999).

Na área de estudo há mudanças climáticas que vem ocorrendo nas últimas décadas. Na IRG, durante as últimas cinco décadas do século XX houve tendência ao aumento da temperatura (Kejna *et al.*, 2013). Os dias com precipitação líquida aumentaram no período, combinado com o aumento de dias que a temperatura média foi maior que 0°C a fusão de neve (Ferrando, 2009). As retrações de geleiras na região da Península Antártica estão relacionadas às mudanças climáticas regionais (Simões *et al.*, 2004; Kejna *et al.*, 2013; Simões *et al.*, 2015).

Aquino (1999) aponta que o fator climático, controla a retração das áreas frontais do gelo, pois mudanças de temperatura e precipitação influenciam o degelo. Glasser *et al.*, (2011) destaca que geleiras de término em terra possuem suas dinâmicas relacionadas primordialmente às condições climáticas.

### **3- MATERIAIS E MÉTODOS**

A variação da posição frontal das geleiras foi identificada visualmente nas imagens Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014.

A imagem Sentinel-2, utilizada neste trabalho, foi adquirida no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), e obtida em 10 de março de 2017. Estes dados possuem dez metros de resolução espacial, nível de processamento 1 C. A órbita do Sentinel-2 é heliossíncrona a 786 km de altitude (Drusch *et al.*, 2012). O MSI considera 13 bandas espectrais, sendo 4 bandas com 10 metros de resolução espacial e com os comprimentos de onda entre 490nm a 842nm. (Agência Espacial Europeia, 2017).

A imagem WorldView-2 utilizada para a realização deste estudo foi obtida em 6 de março de 2014, com resolução espacial de 50 cm, ortorretificadas e realçadas, recobrando uma área de 60 Km<sup>2</sup> (Moraes & Prudente, 2016). A imagem do satélite WorldView-2 foi obtida no final da estação de ablação de 2014 devido à ausência de cobertura de nuvens para uma melhor visualização da frente da geleira. O satélite Worldview-2e possui resolução espacial de 50 cm, com oito bandas multiespectrais nos comprimentos de onda de 400 450nm, banda azul: 450-510nm, banda verde: 510-580nm, banda amarelo: 585-625nm, banda vermelho: 630-690nm, banda vermelho borda: 705-745nm, banda infravermelho próximo: 770-895nm e banda infravermelho próximo 2: 860-1040nm (Moraes & Prudente, 2016).

Foram escolhidas as composições RGB843 na imagem Sentinel-2 e RGB543 na imagem Worldview-2 e gerados vetores da frente da geleira para cada data observando-se a diferença de reflectância superficial entre a superfície coberta por neve e com gelo exposto, considerando a diferença de refletância superficial entre a neve (albedo: 0,8-0,9) e o gelo exposto (albedo: 0,3-0,4) e a área exposta (Marshall, 2012). Para a análise dos dados, estes foram co-registrados.

A taxa de retração e ou avanço foi estimada para cada período de acordo com as datas das imagens de satélites. Também foram considerados os dados de variação frontal adquiridos por Arigony-Neto (2001) dos anos de 1956, 1979, 1988 e 2000 obtidos pela interpretação e mapeamento de imagens SPOT. Estes dados são representados em um gráfico de dispersão em linha, verificando-se a existência de tendências. Assim como são representadas as variações de área por período em gráfico de barras.

Os dados meteorológicos de temperatura média anual superficial do ar para os anos de 1956 a 2013 foram obtidos pela Estação Antártica Comandante Ferraz disponibilizados pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e para os

anos de 2014 até maio de 2017 pela Estação Russa Bellingshausen, localizada na Península Fildes na parte ocidental da Ilha Rei George.

#### 4- RESULTADOS

A margem leste do campo de gelo Warszawa teve um total de perda de área de 6,3 km<sup>2</sup>, ou seja, 37% da área total em 1956 no período de 1956 a 2017. Entre 1956 a 1979 a perda de área foi de 0,01 km<sup>2</sup>, entre 1979 a 1988 de 0,74 km<sup>2</sup>, entre 1988 a 1995 de 2 km<sup>2</sup> (0,3 km<sup>2</sup>/ano) e entre 1995 a 2000 de 1,7 km<sup>2</sup> (0,34 km<sup>2</sup>/ano). Para os últimos 17 anos (2000-2017) há continuação deste processo de retração, com 1,8 km<sup>2</sup> (0,1 km<sup>2</sup>/ano) de perda de área frontal (Figura 2).

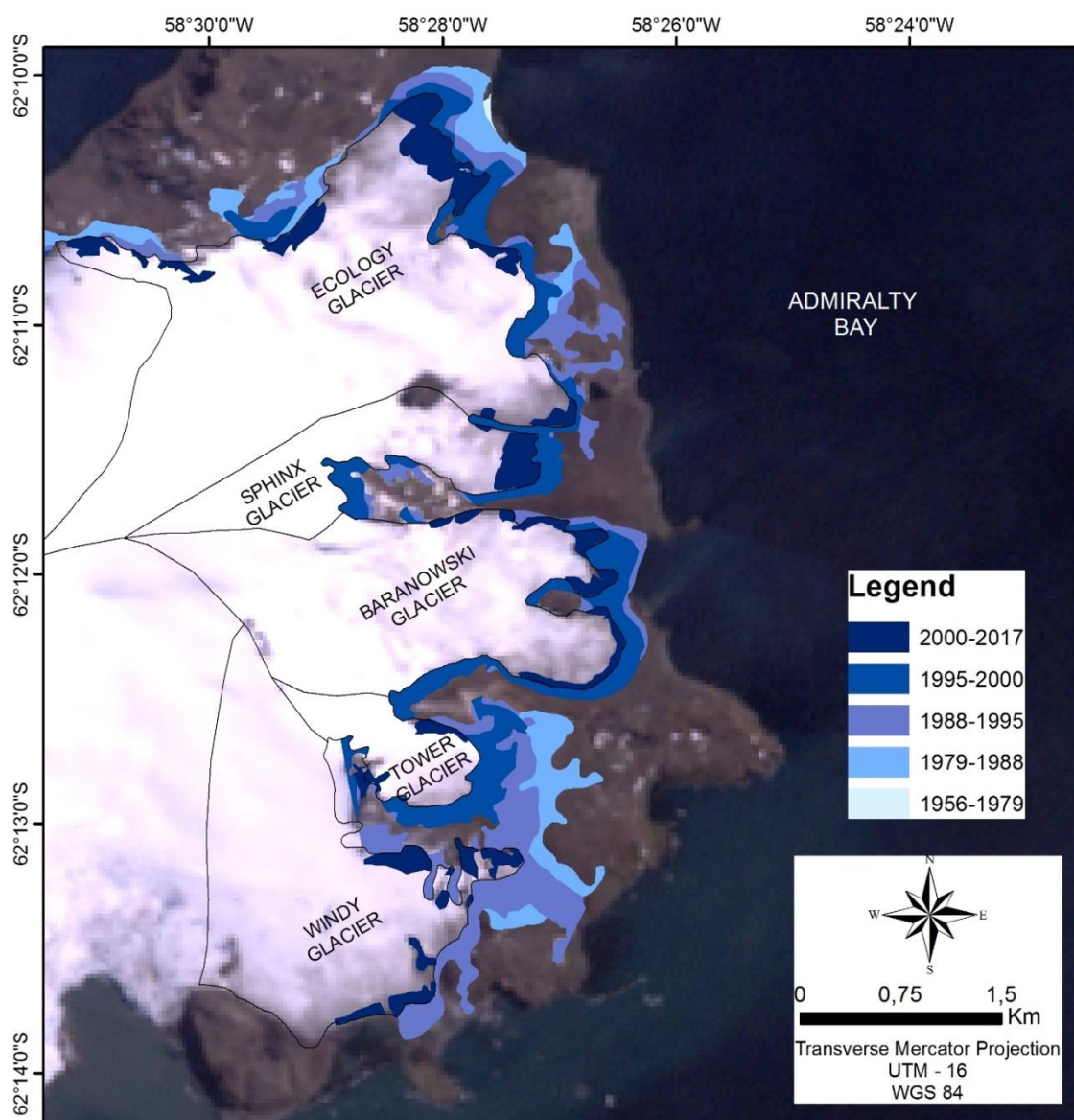


Figura 2- Retração frontal por período das geleiras da na margem leste do campo de gelo Warszawa da Baía do Almirantado.

As geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy apresentam verificou-se o processo de retração contínua no período entre 1956 a 2017 (Figura 2). Os resultados vão ao encontro dos obtidos por Arigony-Neto (2001) para o período entre 1956 a 2000 na margem leste do campo de gelo Warszawa da Baía do Almirantado.

Durante o período de 1956-1979 a geleira Ecology perdeu uma área de 0,01 km<sup>2</sup> (0,14% de perda da área total de 7,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) (Tabela 1). Para outras geleiras desta área não há evidência de retração para este espaço temporal (Figura 3).

No período entre 1979-1988 houve perda total de área coberta por geleiras na margem leste do campo de gelo Warszawa de 0,74 km<sup>2</sup> de uma área de 17,2 km<sup>2</sup> em 1956, com destaque para a geleira Ecology. Deste total houve a perda de 0,2 km<sup>2</sup> de área (11% de perda da área total de 1,8 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a geleira Tower, 0,39 km<sup>2</sup> da área (5,5% de perda da área total de 7,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a Ecology e 0,13 km<sup>2</sup> (3,7% de perda da área total de 3,5 km<sup>2</sup> em 1956) para a geleira Windy (Tabela 1) (Figura 3).

Durante 1988–1995 houve diminuição de 2 km<sup>2</sup> de uma área de 17,2 km<sup>2</sup> no total da cobertura de gelo em 1956 (Tabela 1), com destaque para as geleiras Windy e Tower. A perda de área foi de 0,53 km<sup>2</sup> (7,5% de perda da área total de 7,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a geleira Ecology, 0,03 km<sup>2</sup> (1,8% de perda da área total de 1,7 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a geleira Sphinx, 0,11 km<sup>2</sup> (3,5% de perda da área total de 3,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a Baranowski, 0,64 km<sup>2</sup> (35% de perda da área total de 1,8 km<sup>2</sup> da área em 1956) para a geleira Tower e 0,69 km<sup>2</sup> (19% de perda de total de área de 3,5 km<sup>2</sup> em 1956) para a geleira Windy (Figura 3).

No período entre 1995-2000 (apenas 5 anos) houve uma retração maior para todas as geleiras da área de estudo (Tabela 1), totalizando a perda de área total de 1,7 km<sup>2</sup> (10% de perda da área total de 17,2 km<sup>2</sup> da área em 1956), com destaque para a geleira Tower. A geleira Ecology retraiu 0,6 km<sup>2</sup> (8,5% de perda da área total de 7,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) neste período, a Sphinx 0,28 km<sup>2</sup> (16,5% de perda da área total de 1,7 km<sup>2</sup> da área em 1956), a Tower 0,37 km<sup>2</sup> (20% de perda de total de área de 1,4 km<sup>2</sup> em 1956) e a Baranowski com 0,45 km<sup>2</sup> (14,5 km<sup>2</sup> de perda da área total de 3,1 km<sup>2</sup> da área em 1956) (Tabela 1) (Figura 3).

Evidenciou-se que o processo de retração continuou entre 2000-2017, com a perda total de 1,8 km<sup>2</sup> (10,5% de sua área total de 17,2 km<sup>2</sup> em 1956), com destaque para as geleiras Ecology e Baranowski. A geleira Ecology apresentou retração de 0,80 km<sup>2</sup> (11,3% de perda da área total de 7,1 km<sup>2</sup> da área em 1956), a Sphinx 0,12 km<sup>2</sup> (7,5% de perda da área total de 1,7 km<sup>2</sup> da área em 1956), a Baranowski 0,60 km<sup>2</sup> (19,3% de perda da área total de 3,7 km<sup>2</sup> da área em 1956), a Tower 0,06 km<sup>2</sup> (3,3% de perda da área total de 1,8 km<sup>2</sup> da área em 1956) e a Windy 0,23 km<sup>2</sup> (6,5% de perda de total de área de 3,5 km<sup>2</sup> em 1956) (Figura 3).

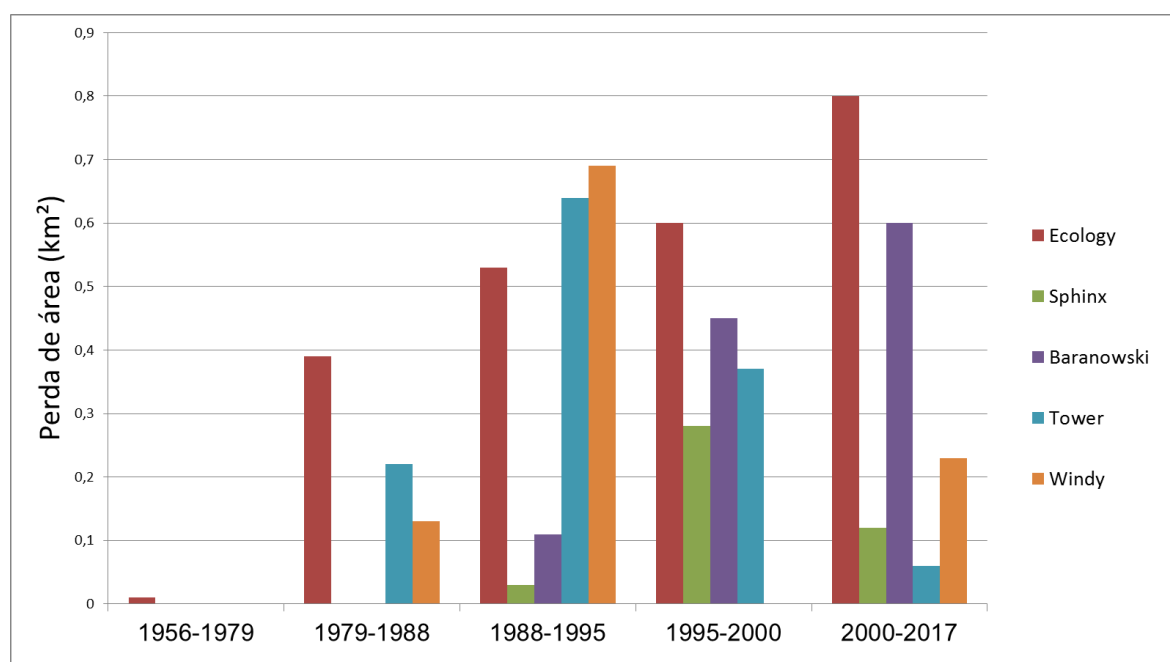


Figura 3- Gráfico de perda de área das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa por período de análise. Há ausência de dados no período entre 1956 a 1979 para algumas geleiras.

Geleira	Área em 1956 (km <sup>2</sup> )	Variação de área (km <sup>2</sup> )					Perda de área total (km <sup>2</sup> )	Perda de área total (%)
		1956 - 1979	1979 - 1988	1988 - 1995	1995 - 2000	2000 - 2017		
Ecology	7,1	-0,01	-0,39	-0,53	-0,60	-0,80	2,33	33
Sphinx	1,7	-	-	-0,03	-0,28	-0,12	0,43	25
Baranowski	3,1	-	-	-0,11	-0,45	-0,60	1,16	37
Tower	1,8	-	-0,22	-0,64	-0,37	-0,06	1,29	71
Windy	3,5	-	-0,13	-0,69	0	-0,23	1,05	30

Tabela 1- Dados de perda de área das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica.



Para a geleira Ecology, Petlicki *et al.*, (2017) argumenta que há pontos onde a posição frontal da geleira Ecology era estável neste período de retração e a taxa de retração foi insignificante, esses locais coincidem com o aparecimento de afloramentos rochosos, apontando que a retração das geleiras pode ser influenciado por pontos de ancoragem do fluxo de gelo.

A geleira Windy tem sua frente voltada para sudoeste e concluiu-se que a mesma apresentou importante mudança em suas condições ambientais, quando passou de geleira de maré para término em terra. Esta geleira apresentou condições de geleira de maré até aproximadamente o final da década de 1990.

As geleiras de maré apresentam dinâmica complexa, uma vez que seu balanço de massa e o comportamento das geleiras são afetados por vários elementos como clima, condições oceânicas, forma, quantidades de precipitação e derretimento de sua superfície (Cook *et al.*, 2012).

As geleiras com término no mar sofrem influência em seu processo de ablação frontal pela dinâmica de ondas e temperatura da água do mar, pois a taxa de desprendimento dos *icebergs* é condicionada pela temperatura da água do mar (Luckman *et al.*, 2015).

O desprendimento de icebergs em geleiras com término no mar é responsável pela diminuição da espessura do gelo, tornando frágil sua área frontal ocasionando a retração da mesma (Santos, 2012).

A partir dessa mudança ambiental, é possível evidenciar que os processos de retração da mesma encontram-se mais estáveis quando comparados aos anos anteriores em que tinha sua área frontal marítima, uma vez que a retração frontal diminuiu praticamente pela metade.

A geleira Windy pode passar a apresentar dinâmica mais estável que anteriormente, pois deixa de receber influência oceânica já que passa a estar assentada completamente em base rochosa sem possuir contato marítimo (Rau *et al.*, 2004) e tendo seu comportamento condicionado por ações climáticas (Glasser, *et al.*, 2011).

Com a alteração de término de maré para terrestre, na área frontal da geleira Windy há área livre de gelo, expondo formas de relevo deposicionais. Bremer (2011) argumenta que esse tipo de mudanças na área coberta por gelo para livre de gelo

afeta os ecossistemas terrestres e a dinâmica do sistema de drenagem (Kejna *et al.*, 1998)

Estudos de Moholdt *et al.*, (2012) não mostraram grandes diferenças nas taxas de retração frontal em geleiras de término terrestre e marinha. Esses resultados assemelham-se aos resultados do Ártico Canadense (Gardner, 2011). Mas diferem-se acentuadamente da Groenlândia, onde as taxas de retração frontal das geleiras são maiores para aquelas com término no mar do que com término terrestre (Sole, 2008).

O processo de recuo glacial é dinâmico e pode ser influenciado por diversos fatores, conforme aponta Petlicki *et al.*, (2017), esses elementos podem estar ligados tanto a topografia da geleira como em resposta as mudanças na temperatura atmosférica.

Desta forma, a mudança de término marinho para terrestre pode ser considerado como um indicador de mudança ambiental na área de estudo. Há geleiras com 50-100m de elevação (exceto a geleira Tower) e com declividade entre 8-20%.

Como é o caso de outras geleiras na Ilha Rei George, as quais podem desaparecer nas próximas décadas se sua taxa de retração apresentar continuidade. Observa-se, desde meados dos anos de 1979 a 2000, um período com significativa retração glacial para várias geleiras da Baía do Almirantado, como é o caso das geleiras Wanda, Dragão e Professor, com término em terra (Rosa *et al.*, 2014). A geleira Collins apresentou retração frontal para o período entre 1989–2006 teve perda de 8,4% de sua área (Simões *et al.*, 2015).

Há outras geleiras alimentadas pelo campo de gelo Warszawa, com término em terra, que registram recuo frontal nas últimas décadas, como por exemplo, a geleira Polar Club, que teve contínua retração no mesmo período. Entre 1981-2015 sua área reduziu 2,95 km<sup>2</sup>, correspondendo a 9,4% de sua área e a uma taxa de retração de 0,08 km<sup>2</sup>/ano. Sua taxa de retração para 1981-1990 foi de 0,17 km<sup>2</sup>/ano, para 1990-1999 foi de 0,03 km<sup>2</sup>/ano, para os 1999-2011 foi de 0,05 km<sup>2</sup>/ano e para 2011-2015 a taxa de retração foi de 0,12 km<sup>2</sup>/ano (Bonada *et al.*, 2016).

Comparativamente à geleira Collins e Polar Club, as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy apresentaram, para o período analisado, maiores taxas de retração, apresentando 0,03 km<sup>2</sup>/ano, 0,01 km<sup>2</sup>/ano, 0,3 km<sup>2</sup>/ano, 0,04 km<sup>2</sup>/ano e

0,05 km<sup>2</sup>/ano, respectivamente, assim como maiores perdas percentuais de suas áreas desde 1956 (com perdas de 83% a 89% para as geleiras Windy e Tower). Suas retrações são maiores em totais percentuais de perda de área do que as geleiras Dragão, Professor e Wanda.

É relevante investigar quais as causas deste processo de retração frontal na área de estudo nas últimas décadas e como as taxas estão aumentando. Sabe-se de acordo com estudos para a área que estas geleiras são sensíveis as mudanças climáticas (Simões *et al.*, 2015).

Na Ilha Rei George o aumento da temperatura média superficial do ar foi de 1°C da década de 50 até a década de 2000 e as geleiras respondem sensivelmente a essas alterações (Kejna *et al.*, 2013).

As geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa se apresentam com término em terra, dessa forma Braun & Gossmann (2002), afirmam que o recuo expressivo deste tipo de geleiras evidencia que está ocorrendo mudança nos parâmetros que controlam o balanço de massa das mesmas, principalmente o aumento da temperatura atmosférica.

A análise das séries históricas de dados de médias de temperatura atmosférica para a Ilha Rei George desde 1956 até 2017 indicam que há tendência ao aumento de temperatura superficial média do ar (Figura 4) e que a perda de área frontal de cada geleira está relacionada à tendência verificada do aumento de temperatura no inverno.

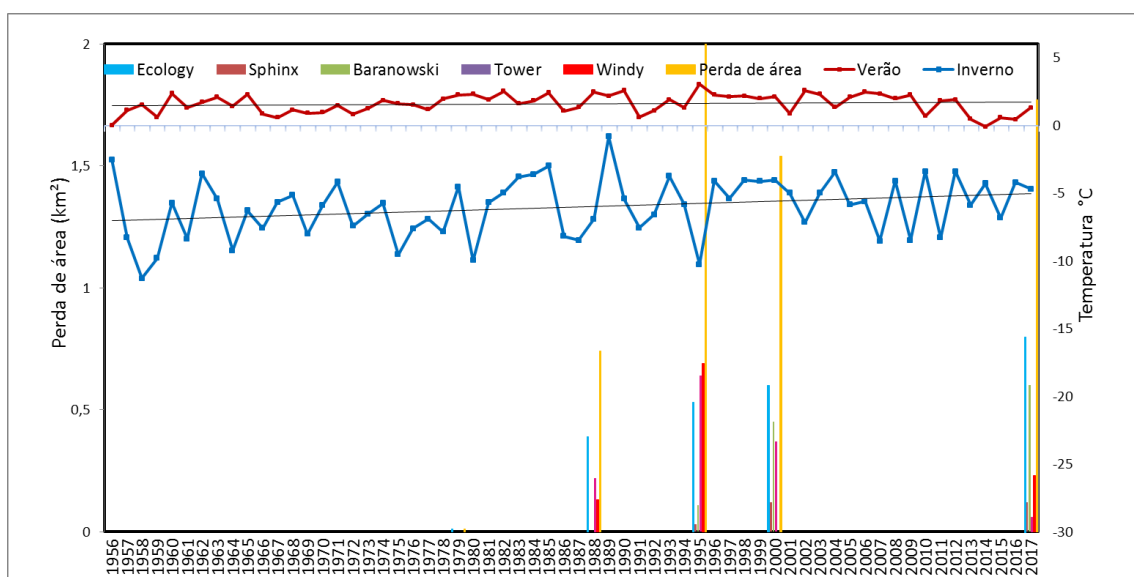


Figura 4- Gráfico com dados de temperatura média anual superficial do ar para o inverno e para o verão entre 1956 a 2017 e relação com perda de área.

## 5- DISCUSSÕES

As séries históricas de dados de temperatura atmosférica de 1956 a 2017 apontaram para um aumento das médias anuais dos dados de inverno, dessa forma interferem sobre o balanço de massa dessas geleiras conforme o que aponta Simões *et al.*, (2004) e Kejna *et al.*, (2013). Os estudos de Comin & Justino (2017) também evidenciaram aumento de temperatura de 0,8°C e 1°C durante o período de 1955 a 2010 e utilizaram dados das estações meteorológicas de Bellingshausen e Jubany.

Devido ao aumento de temperatura que está ocorrendo na Antártica há desencadeamento de outras mudanças ambientais, os quais interligam-se entre si. Simões *et al.*, (2004) afirma que as retrações que acontecem na Península Antártica apresentam relação com o aquecimento regional.

Com a retração evidenciada há, formação do ambiente sem cobertura de gelo e exposição de formas de relevo e depósitos na área proglacial. Como o derretimento de geleiras que mudam o albedo superficial e este por sua vez interfere na energia térmica e radiativa da superfície. Além disso, intrínseco ao derretimento glacial, pode ocorrer aumento do nível do mar (IPCC, 2013).

Com a retração glacial também há o aumento das áreas livres de gelo. Na área de estudo foi evidenciado o aumento de 6,3 km<sup>2</sup> de área livre de gelo no período 1956-2017. Há presença de canais formados por água de degelo, bem como lagos e lagunas, como é o caso da geleira Ecology, que em sua área proglacial possui uma laguna que flui para a Baía do Almirantado.

Em sua frente há a laguna Ecology, resultante da deglaciação e esta tem ligação com a Baía do Almirantado (Rosa, 2008). Estima-se que, em 2016, a dimensão deste corpo de água era de aproximadamente 0,29 km<sup>2</sup>, e a área com maior profundidade era na porção frontal da geleira com 11,83 m, variando em sua extensão de 1 a 9 m, possuindo vários afloramentos rochosos em partes mais rasas da laguna (Petlicki *et al.*, 2017). As análises das imagens de satélite indicaram que a partir de 1988 há uma maior parte de seu setor frontal com término terrestre.

Petlicki *et al.*, (2017), considera a geleira Ecology é influenciada pela dinâmica de maré, pois os sedimentos encontrados na laguna Ecology são de origem marítima. Observa-se que com a variação da maré a laguna torna-se conectada parcialmente ao sul da geleira. Estima-se que em 2016 a dimensão deste corpo de

água era de aproximadamente 0,29 km<sup>2</sup>, a área com maior profundidade era na porção frontal da geleira com 11,83 m (Figura 5) (Petlicki *et al.*, 2017).



Figura 5- Laguna Ecology, com afloramentos rochosos. Fonte: Vieira (2007).

Os resultados de retração identificados para a Ecology vão ao encontro de Kejna *et al.*, (1998) para o período de 1961-1996. E de acordo com Arigony-Neto (2001) no período entre 1956 a 2000. Porém, Kejna *et al.*, (1998) detectaram que sua retração máxima aconteceu entre os anos de 1987-1996, quando em sua parte norte retraiu de 480 m, ao sul 380 m e na parte central 620 m. Sua altitude diminuiu de aproximadamente 20,1 m a 29,5 m e entre os anos de 1961-1978, apresentou uma média de taxa de retração de 17,7 m/ano (Kejna *et al.*, 1998). A parte frontal da geleira Ecology possuía cerca de 20 m de altura com 700 m de largura em 2007.

Estudos de Braun (2001) Vieira *et al.*, (2005), Rosa *et al.*, (2006), Rosa (2008), Petlicki *et al.*, (2017) também mostram que está havendo perda de massa para a geleira Ecology e que esta foi acentuada no início dos anos 2000, e a taxa de retração diminuiu entre 2012-2016.

Entre 2012-2013, ainda há registros de recuo frontal, porém desacelerado (Petlicki *et al.*, 2017). Atualmente a geleira encontra-se fora de seu ponto de equilíbrio por possuir balanço negativo desde 1979 (Petlicki *et al.*, 2017).

As geleiras da margem oeste do campo de gelo Warszawa diferenciam-se entre si em aspectos como área, declividade e características hipsométricas. Em 1956, as geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy possuíam área de 7,1 km<sup>2</sup>, 1,7 km<sup>2</sup>, 3,1 km<sup>2</sup>, 1,8 km<sup>2</sup> e 3,5 km<sup>2</sup>, respectivamente, e ao final do ano de

2017 é possível evidenciar redução destas áreas para 4,8 km<sup>2</sup>, 1,27 km<sup>2</sup>, 1,94 km<sup>2</sup>, 0,5 km<sup>2</sup> e 2,45 km<sup>2</sup>, respectivamente.

Com declividades diferenciadas, a geleira Ecology apresenta relevo com suaves ondulações, enquanto que as demais possuem declividades que podem chegar a 75%. As geleiras de menor área não foram as que mais retraíram, com exceção da Tower. A geleira Windy e Tower perderam os maiores percentuais de área possuem menores elevações de suas respectivas áreas de acumulação.

As geleiras Tower e Sphinx apresentaram menor área perdida em 2000-2017, período comparado às duas últimas décadas (1979-2000), evidenciando que algumas geleiras podem estar refletindo, entre outros atributos, em escala de décadas um resfriamento da tendência da temperatura anual nos últimos anos registrada por Turner *et al.*, (2016).

É possível analisar como cenário futuro com base nas taxas de retração, e com a continuidade de aquecimento atmosférico acompanhado da retração frontal que essas geleiras possam ser suprimidas em no máximo dois séculos. As geleiras Ecology, Sphinx e Baranowski podem desaparecer em aproximadamente dois séculos, enquanto que as geleiras Tower e Windy, com menor área se comparadas às primeiras, podem desaparecer menos de um século.

## **6- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados possibilitaram evidenciar o aumento do processo de perda de área coberta por geleiras na área de estudos e o contínuo processo de retração frontal das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy desde 1956 até 2017. As geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy possuem atual configuração de seu término para terrestre e suas áreas livres de gelo possuem lagos e lagunas.

As retrações seguem a tendência de aquecimento regional na região da Península Antártica desde a década de 1960 até a década 2000. A retração de todas as geleiras é evidenciada mesmo nas últimas décadas sem tendência ao aquecimento regional atmosférico, assim como denotam análises recentes de Turner *et al.*, (2016), que mostram que o registro de temperatura atmosférica regional apresentou mudanças de uma tendência de aquecimento de 0,32°C entre 1979-1997 para um resfriamento de -0,47°C durante 1999-2014. Carrasco (2013) detectou

uma diminuição da taxa de aquecimento nas estações a oeste da Península Antártica entre 2001-2010 e uma leve tendência ao resfriamento na Ilha Rei George.

O processo de retração frontal das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa mostra-se estar associado às mudanças da temperatura atmosférica registrada para a Ilha Rei George nas últimas décadas, conforme pode ser verificado através de análises de séries históricas de dados de temperatura média atmosférica no inverno no período.

Com a interpretação das imagens Sentinel-2 e WorldView-2 foi possível estimar o aumento das áreas livres de gelo de 6,3km<sup>2</sup> na margem oeste do campo de gelo Warszawa no período de 1956-2017, sem a cobertura glacial há canais com água de degelo, lagos e lagunas como na geleira Ecology, por exemplo. A imagem WorldView-2, por sua melhor resolução espacial (0,5m), proporciona melhora na qualidade dos mapeamentos e facilita a delimitação da frente da geleira. Para os dados do Sentinel-2, são escassas as publicações de trabalhos que tenha utilizado tais imagens para verificar variação frontal glacial.

A geleira Windy apresentou mudanças ambientais importantes, mudou suas condições de término de maré para terrestre no período de 2000-2017, dessa forma modificando suas condições, podendo apresentar maior estabilidade, em sua área proglacial há formas de relevo deposicionais expostas.

É relevante o monitoramento das mudanças frontais das geleiras da área de estudo para o maior entendimento das mudanças climáticas e de cenários futuros para os próximos anos. Assim como é necessário o entendimento da resposta dos ambientes deposicionais proglaciais à retração com a utilização das feições geomorfológicas como indicadores de mudanças ambientais recentes.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AGÊNCIA ESPACIAL EUROPEIA. Sentinel *Online*. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 16/11/2017.
- AMBINAKUDIGE, S. & JOSHI, K. Remote Sensing of Cryosphere. 2012. In: ESCALANTE, B. R. (Org). Remote Sensing – Applications. Rijeka: INTECH, p. 369 – 380.
- AQUINO, F.E. Sedimentação Moderna Associada à Geleira de Maré Lange, ilha Rei George, Antártica. 1999. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. 106 p.

- BATTKE Z. 1990. Admiralty Bay, King George Island, 1:50000. *Romer State Cartographical Publishing House, Warszawa*.
- BRAUN, M. & GOSSMANN, H. 2002. Glacial Changes in the Areas of Admiralty Bay, Potter cove, King George Island, Maritime Antarctica. In: BEYER, L.; BOLTER (ED.) *Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes. Ecological Studies*, p. 75-87.
- BRAUN M. 2001. Ablation on the Ece Cap of King George Island (Antarctica) – an Measurements, modelling and Remote Sensing. Tese. Faculdade de Ciências da Terra. Universidade de Freiburg. 191 p.
- BRAUN M., SAURER H., VOGT S., SIMOES J.C. & GROSSMANN H. 2001. The Influence of Large-scale Atmospheric Circulation on the Surface Energy Balance of the King George Island Ice. *International Journal of Climatology*, **21**, p 21–36.
- BREMER, U.F. 1998. Morfologia e Bacias de Drenagem da Cobertura de Gelo da ilha Rei George, Antártica. Dissertação (Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 117p.
- BREMER, U. F. 2011. O Permafrost, os Criossolos e as Mudanças Climáticas. In: SIMÕES, J. C. *et al. Antártica e as Mudanças Globais: um Desafio para a Humanidade*. São Paulo: Blucher, p. 103-120.
- Bonada, B., Rosa, K. K. & Andrade, A. M. 2018. Caracterização Geomorfológica das Áreas Livres de Gelo em Resposta da Tendência de Retração da Geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **19**, 149-167.
- CARRASCO, J.F. 2013. Decadal Changes in the Near-surface Air Temperature in the Western Side of the Antarctic Peninsula. *Scientific Research*, **3**, p. 275–281.
- COMIN, A. N. & JUSTINO. F. 2017. Investigação Climatológica na Península Antártica e no Arquipélago das Shetland do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, **40**, p. 74-81.
- Cook, A.J., Murray, T., Luckman, A., Vaughan D.G., & Barrand, N. E. 2012. A New 100-m Digital Elevation Model of the Antarctic Peninsula Derived from ASTER Global DEM: Methods and Accuracy Assessment. *Earth System Science Data*, **4**, 129–142.
- COOK, A.; VAUGHAN, D.; LUCKMAN, A. & MURRAY, T. 2014. A New Antarctic Peninsula Glacier Basin Inventory and Observed Area Changes Since the 1940s. *Antarctic Science*, **26**, p. 614–624.
- COOK, A.J.; HOLLAND, P.R.; MEREDITH, M.P.; MURRAY, T.; LUCKMAN, A. & VAUGHAN, D.G. 2016. Ocean Forcing of Glacier Retreat in the Western Antarctic Peninsula. *Science*, **353**, p. 283–286,
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; MEYGRET, A.; SPOTO, F.; SY, O.; MARCHESE, F. & BARGELLINI, P. 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, **120**, p. 25–36.
- FERRANDO, F.A.; VIEIRA, R.; ROSA, K.K. 2009. Sobre el Calentamiento Global en la Isla Rey Jorge: Procesos y Evidencias en el Glaciar Wanda y su Entorno. *Revista Informaciones Geográficas*, **41**, p.25-40.



- FERRON, F. A.; SIMÕES, J. C.; AQUINO, F. E. & SETZER, A. W. 2004. Air Temperature Time Series for King George Island, Antarctica. *Pesquisa Antártica Brasileira*, **4**, p. 155-169.
- GARDNER A.S.; MOHOLDT, G.; WOUTERS, B.; WOLKEN, G.J.; BURGESS, D.O.; SHARP, M.J.; GRAHAM, C.J.; BRAUN, C. & LABINE, C. 2011. Sharply Increased Mass Loss from Glaciers and Ice Caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, **473**, p. 357–360.
- GLASSER, N. F.; SCAMBOS T. A.; BOHLANDER J.; TRUFFER M.; PETTIT, E. & DAVIES, B. J. 2011. From Ice-Shelf Tributary to Tidewater Glacier: Continued Rapid Recession, Acceleration and Thinning of Röhss Glacier Following the 1995 Collapse of the Prince Gustav Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, **57**, p. 397–406.
- KEJNA, M., LÁSKA, K. & CAPUTA, Z. 1998. Recession of the Ecology Glacier in the Period 1961 – 1996. In: Glowacki; Bednarek (eds.) *Polish Polar Studies. 25 th International Polar Symposium*, Warszawa, p. 121 - 128.
- KEJNA, M. 2008. Topoclimatic Conditions in the Vicinity of the Arctowski Station (King George Island, Antarctica) During the Summer Season of 2006/2007. *Polish Polar Research*, **29**, p. 95–116.
- KEJNA, M; ARAZNY, A. & SOBOTA, I. 2013. Climatic Change on King George Island in the Years 1948 – 2011. *Polish Polar Research*, **34**, p. 213-235.
- KNAP W.H.; OERLEMANS J. & CADEE M. 1996. Climate Sensitivity of the Ice Cap of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **23**, p. 154-159.
- LI, X.; HOLLAND, D.M.; GERBER, E.P. & YOO, C. 2014. Impacts of the North and Tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and Sea Ice. *Nature*, **505**, p.538–542.
- LUCKMAN, A.; BENN, D. I.; COTTIER, F.; BEVAN, S.; NILSEN, F. & INALL, M. 2015. Calving Rates at Tidewater Glaciers Vary Strongly With Ocean Temperature. *Nature Communications*, **6**.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- MARSHALL; S. J. 2012. The Cryosphere. Princeton Primers in Climate. Princeton University Press, 288 p.
- MOHOLDT, G.; WOUTERS, B. & GARDNER, A.S. 2012. Recent Mass Changes of Glaciers in the Russian High Arctic. *Geophysical Research Letter*, **10**.
- MORAES, M. F. & PRUDENTE, C.N. 2016. Fornecimento de Imagem de alta Resolução Para Parte da Ilha Bridgeman na Antártica. Nova Lima – MG, 8 p.
- OLIVA, M. & RUIZ-FERNÁNDEZ, J. 2015. Coupling Patterns Between Paraglacial and Permafrost Degradation Responses in Antarctica. *Earth Surface Process and Landforms*, **40**, p.1227–1238.
- PETLICKI, M.; SZILLO, J.; MACDONELL, S.; VIVERO, S. & BIALIK. 2017. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sensing*, **9**.

- RABASSA, J.; SKVARCA, P.; BERTANI, L. & MAZZONI, E. 1982. Glacier Inventory of James Ross and Vega Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, **3**, p. 260–264.
- RACHLEWIC Z G. 1999. Glacial Relief and Deposits of the Western Coast of Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands. *Polish Polar Research*, **20**, p. 89-130.
- RAKUSA – SUSZCZEWSKI, S. 1993. Introduction: The Structure and Functioning of the Near shore Ecosystem. In: RAKUSA – SUSZCZEWSKI, S. (Ed) The Maritime Antarctic Coastal Ecosystem of Admiralty Bay. Warsaw. *Polish Academy of Sciences*. Department of Antarctic Biology, p 32 – 34.
- RAU F.; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S. J. S. & RAU, P. B. 2004 . Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory. GLIM'S Regional Center Antárctic Peninsula. Alemanha. Institut für Physische Geographie, Freiburg, 36 p.
- RAU, F.; MAUZ, F.; DE ANGELIS, H.; JAÑA, R.; ARIGONY-NETO, J.; SKVARCA, P.; VOGT, S.; SAURER, H. & GOSSMANN, H. 2004. Variations of Glacier Frontal Positions on Northern Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*, **39**, p. 525–530.
- RIGNOT, E.; BAMBER, J.; VAN DEN BROEKE, M.; DAVIS, C.; LI, Y.; VAN DE BERG, W. & VAN MEIJGAARD, E. 2008. Recent Mass Loss of the Antarctic Ice Sheet from Dynamic Thinning. *Nature Geoscience*, **1**, p. 106–110.
- RIGNOT, E.; JACOBS, S.; MOUGINOT, J. & SCHEUCHL, B. 2013. Ice-shelf Melting Around Antarctica. *Science*, **341**, p.266–270,
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R. & SIMÕES, J. C. 2006. Dinâmica Glacial e Características Sedimentares Resultantes na Zona Proglacial da Geleira Ecology - Baía Do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **2**, p. 51 – 60.
- ROSA, K. K. 2008. Formas e Processos do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George, Antártica. Dissertação. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 139 p.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. J. & SIMÕES, J. C. 2009. Feições Sedimentológicas e Geomorfológicas do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George - Antártica. *Revista Pesquisas em Geociências*, **37**, p. 315-326.
- ROSA, K.K.; FREIBERGER, V.L.; VIEIRA, R.; ROSA, C.A. & SIMÕES, J.C. 2014. Mudanças Glaciais Recentes e Variabilidade Climática na Ilha Rei George, Antártica. *Revista Quaternary and Environmental Geosciences*, **5**, p. 176 – 183.
- SANTOS, V.L.C. 2012. Estudo da Dinâmica de Geleiras de Maré da Península Antártica Através de Imagens SAR de Alta Resolução. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 86 p.
- SIMÕES, J.C. & BREMER, U.F. 1995. Investigations of King George Island Ice Cover Using ERS-1/SAR and SPOT Imagery. *Revista SELPER*, **11**, p. 56-60.
- SIMÕES, J.C. 2004. Glossário da Língua Portuguesa da Neve, do Gelo e Termos Correlatos. *Pesquisa Antártica Brasileira*. p. 119 – 154.
- SIMÕES, J. C. GARCIA, C. A. E.; EVANGELISTA, H.; CAMPOS, L. S.; MATA, M.M. & BREMER, U. F. 2011. Antártica e as Mudanças Globais: Um Desafio para a

Humanidade. José Goldemberg (Coord.). *Série Sustentabilidade*. São Paulo: Blucher. 168p.

SIMÕES, C. L.; ROSA, K. K.; CZAPELA, F. F.; VIEIRA, R. & SIMÕES, J. C. 2015. Collins Glacier Retreat Process and Regional Climatic Variations, King George Island, Antarctica. *Geographical Review*, **105**, p. 462 - 471.

SKVARCA, P.; ROTT, H. & NAGLER T. 1995. Satellite Imagery, a Base Line for Glacier Variation Study on James Ross Island, Antarctica. *Annals of Glaciology*, **21**, p. 291–296.

SLAYMAKER, O. & KELLY, R.E.J. 2007. The Cryosphere and Global environmental Change. *Blackwell Publishing*.

SOLE, A.; PAYNE, T.; BAMBER, J.; NIENOW, P. & KRABILL, W. 2008. Testing Hypotheses of the Cause of Peripheral Thinning of the Greenland Ice Sheet: is Land-terminating Ice Thinning at Anomalously High Rates? *Cryosphere Discussions*, **2**, p. 673–710.

THOMAS, R.; RIGNOT, E.; CASASSA, G.; KANAGARATNAM, P.; ACUNA, C.; AKINS, T.; BRECHER, H.; FREDERICK, E.; GOGINENI, P.; KRABILL, W.; MANIZADE, S.; RAMAMOORTHY, H.; RIVERA, A.; RUSSELL, R.; SONNTAG, J.; SWIFT, R.; YUNGEL, J. & ZWALLEY, J. 2004. Accelerated Sea-level Rise from West Antarctica. *Science*, **306**, p. 255–258.

TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J.; LACHLAN-COPE, T.A.; CARLETON, A.M.; JONES, P.D.; LAGUN, V.; REID, P.A. & IAGOVKINA, S. 2004. The SCAR READER Project: Toward a High-quality Database of Mean Antarctic Meteorological Observations. *Journal of Climate*, **17**, p. 2890-2898.

TURNER, J.; COLWELL, S. R.; MARSHALL, G. J.; LACHLAN-COPE, T. A.; CARLETON, A. M.; JONES, P. D.; LAGUN, V.; REID, P. A. & IAGOVKINA, S. 2005. Antarctic Climate Change During the Last 50 Years. *Journal of Climatology*, **25**, p. 279-294.

TURNER, J.; LU, H.; WHITE, I.; KING, J.C.; PHILLIPS, T.; SCOTT HOSKING, J.; BRACEGIRDLE, T.J.; MARSHALL, G.J.; MULVANEY, R. & DEB, P. 2016. Absence of 21st Century Warming on Antarctic Peninsula Consistent With Natural Variability. *Nature*, **535**, p.411-415.

VIEIRA, R.; ROSSATO, M. S.; AQUINO, F. E. & SIMÕES, J. C. 2005. Feições Morfológicas Associadas ao Ambiente de Deglaciação da Geleira Ecology, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, **6**, p. 51-64.

### 3.2 ARTIGO 2: CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DAS ÁREAS LIVRES DE GELO NA MARGEM LESTE DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA

---

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é identificar as feições deposicionais de mesoescala marginais ao gelo e os processos geomorfológicos relacionados aos ambientes proglaciais das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, localizada na margem leste do campo de gelo Warszawa na Ilha Rei George, Antártica (62°12'0"S - 58°30'0"W). A análise geomorfométrica, através do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 30 m, possibilitou evidenciar que há predomínio das classes de elevação entre 0–100m, representando 37% da área total de estudo, e declividade média de 18%. A área proglacial das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa apresenta elevação média de 159m. Através da análise visual nas imagens Sentinel-2 e WorldView-2 foi realizado o mapeamento geomorfológico das áreas livres de gelo. A retração das geleiras na área de estudo tem levado a formação de ambientes proglaciais dinâmicos, com exposição de geofomas, como morainas laterais, frontais de recessão, latero-frontais, *eskers*, além de corpos hídricos como lagos e lagoas, canais de drenagem entrelaçados ou não. As formas de relevo deposicionais glaciais identificadas correspondem a estágios de retração da geleira evidenciados nas últimas décadas. Foram identificados ambientes periglaciais e paraglaciais com processos de ravinamentos, retrabalhamento de cordões morânicos descontínuos e a presença de núcleos de vegetação sobre áreas rochosas. As áreas livres de gelo recentes são suscetíveis a processos geomorfológicos, evidenciados pela exposição de formas de relevo e seu retrabalhamento por ação eólica e hídrica.

Palavras chaves: processos geomorfológicos glaciais; mudanças ambientais glaciais; sistemas proglaciais.

**Abstract:** The work aims to identify the ice-marginal depositional landforms and the geomorphological processes in proglacial environments of the Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers (east-flowing land-terminating glaciers of the Warszawa Ice cap), Admiralty Bay coast, King George Island, South Shetlands, Antarctica Maritime (62°12'0"S - 58°30'0"W). Was carried out the geomorphometrical analysis using the Digital Elevation Model (MDE). There is a predominance of elevation classes between 0-100 m, representing 37% of the total study area, and 18% of the surface has mean slope. The proglacial area of the east-flowing land-terminating glaciers of the Warszawa Ice cap presents an average elevation of 159m. The geomorphological mapping of glacial, glaciofluvial and glaciolacustre landforms of ice-free land areas was obtained with visual analysis of Sentinel-2 and WorldView-2 images. A dynamic proglacial environment is derived of the glacial retreat processes, and reveals different landforms, such as lateral, recession frontal, lateral-frontal moraines, eskers, lakes, lagoons and drainage channels. The identified glacial depositional landforms are representative of the glacial retreat stages evidenced in the last decades. Periglacial and paraglacial environments were identified with ravine processes, reworking of continuous morâinic ridges and the presence of vegetation cover areas. The recent ice-free land areas are susceptible to non-glacial

geomorphological processes, evidenced by the exposure of landforms and their reworking by wind and water action.

Key-words: glacial geomorphological processes, glacial environments changes, proglacial systems.

## 1. INTRODUÇÃO

O mapeamento geomorfológico possibilita compreender os processos que ocorrem superficialmente e que registram a evolução da paisagem (OTTO & SMITH, 2013). Contribui para a interpretação de processos deposicionais, desenvolvimento de estudos comparativos com outros ambientes glaciais para extrair cenários futuros (ROSA, 2012).

Ao analisar as feições em áreas livres de gelo é possível obter informações sobre a dinâmica glacial, e mapeá-las é uma técnica importante para pesquisas em regiões glaciais (HUBBARD & GLASSER, 2005).

A área livre de cobertura de gelo no setor frontal de uma geleira em retração forma a área proglacial. Esse ambiente possui feições de relevo deposicionais que registram informações indicativas do padrão de deglaciação, da direção de fluxo, entre outros processos, como seu avanço ou recuo, espessura e padrão de retração (NAPIERALSKI *et al.*, 2007; BENN & EVANS, 2010).

Os processos paraglaciais configuram-se por não sofrerem ações glaciais, é uma paisagem pós-glacial, então são influenciados por outros elementos como eólico e hídrico, por exemplo, (BALLANTYNE, 2002), não são definidos por sua localização e sim por sua modificação de ambiente glacial para não-glacial.

Os ambientes periglaciais são caracterizados pela influência da ação do gelo, presença de *permafrost* (SLAYMAKER, 2011) e são influenciados por clima frio, porém não-glacial (FRENCH, 2007). Dessa forma, pode ser classificado como uma zona de transição entre o não-glacial e glacial (FERREIA, 1991).

O objetivo deste trabalho é identificar as feições deposicionais de mesoescala marginais ao gelo e os processos geomorfológicos relacionados aos ambientes proglaciais das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa na ilha Rei George (IRG), Antártica Marítima.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

As geleiras da área de estudo Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, bem como suas áreas livres de gelo, estão localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa, na ilha Rei George, Antártica Marítima (Figura 1).

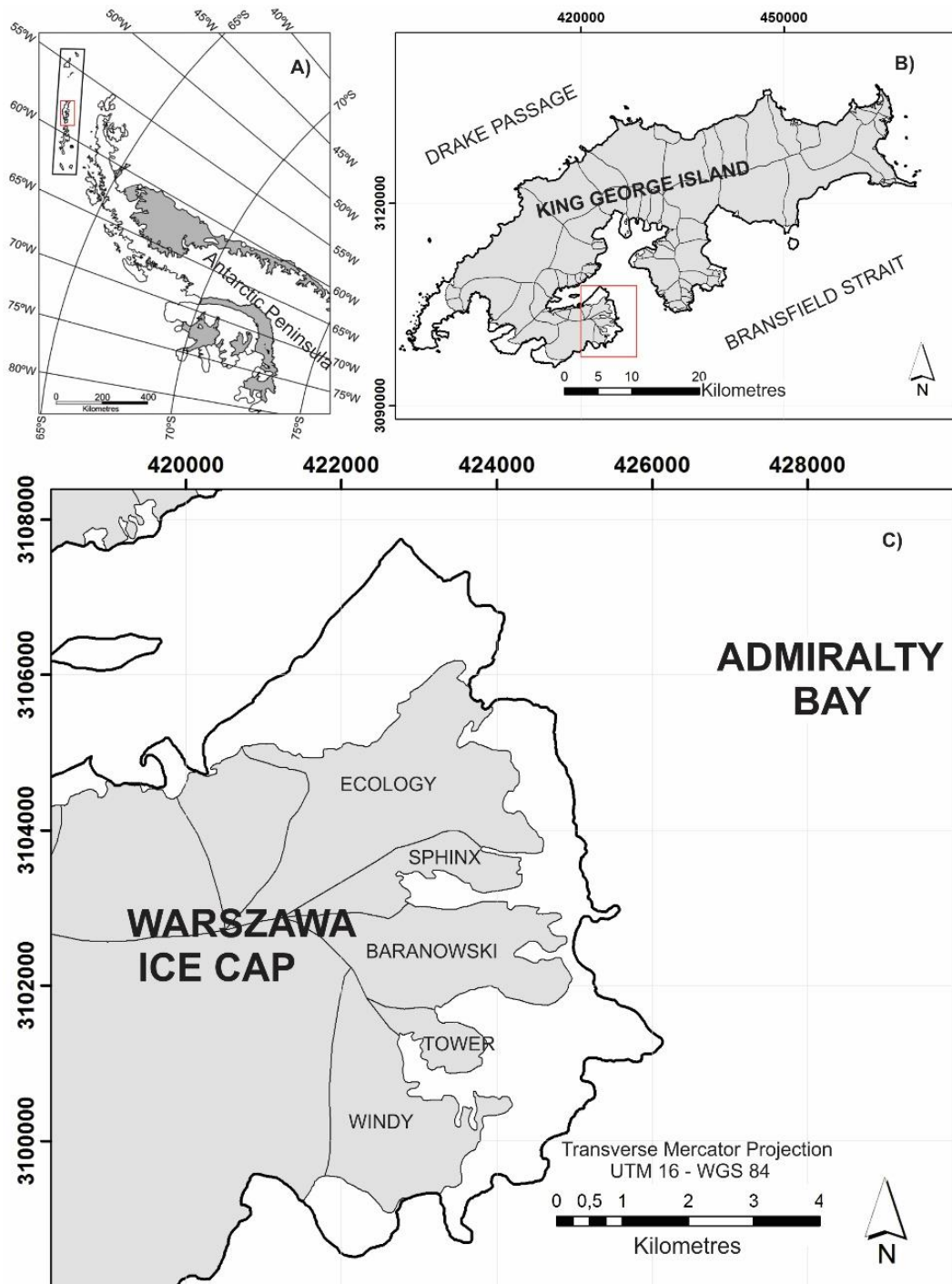


Figura 1- (a) Localização da Península Antártica, (b) Localização da costa leste do campo de gelo Warszawa, (c) Localização das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e suas áreas livres de gelo.

O embasamento rochoso da ilha Rei George possui formação datada do Pré-Cambriano ao Paleogeno e Neogeno constituído por rochas sedimentares, metassedimentares e vulcânicas intrusivas; sua litoestratigrafia contém sedimentos do Paleozoico Superior, em alguns casos metamorfizados devido a processos vulcânicos ocorridos no Jurássico e Paleógeno ao Neógeno (CURL, 1980, BIRKENMAJER, 1980a; BIRKENMAJER, 1991).

A predominância litológica é de rochas básicas como basaltos, por exemplo, que podem ser encontrados em diversas fases de alteração; há processos de metamorfismos de baixa pressão que propiciam a formação de minerais como clorita e calcita entre outros (THOMSON *et al.*, 1983).

A atividade vulcânica expressiva na IRG durante o Jurássico Superior pode ser percebida pelas camadas de basalto e andesitos, mescladas por rochas vulcanoclásticas ligado a subducção meso-cenozóico do assoalho do Oceano Pacífico, abaixo da Península Antártica (BIRKENMAJER, 1980a).

A ilha Rei George situa-se em área tectonicamente ativa, que desde o Oligoceno está sujeita a diversas glaciações e também a movimento glacio-eustáticos (BIRKENMAJER, 1991). A ilha - consiste em vários blocos tectônicos que são separados por sua direção leste – nordeste e oeste – noroeste, essa configuração representa terrenos desarticulados entre eles e com distância ignorada (BIRKENMAJER, 1997). Estes terrenos são cruzados por sistemas de falhamentos que apresentam tendência noroeste-sudeste (BIRKENMAJER, 1989).

O campo de gelo Warszawa (WB) está associado a estas falhas, já que se originou da Falha Ezcurra (BIRKENMAJER, 1983). Braun (2001) considera o Bloco Warszawa como uma unidade geológica. O Bloco Warszawa possui em sua composição rochas de forma geral metamorfoseada vulcânica (BIRKENMAJER, 1980b) e idade datada de 77 a 37 milhões de anos (GROENEWEG & BEUNGK, 1992). O Bloco Warszawa é caracterizado por Tokarski, (1987) como um composto de rochas vulcânicas as quais sofreram metamorfismo.

As caracterizações topográficas de áreas livres de gelo na margem oeste da baía do Almirantado, ilha Rei George são determinadas por sua capacidade de resistência à erosão, com feições de atividades vulcânicas e estreitamente relacionadas a glaciações anteriores (RACHLEWICZ, 1999).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização Morfométrica

Para realizar a caracterização geomorfométrica das áreas livres de gelo, inicialmente foram realizadas correções no Aster GDEM-2 (30 metros de resolução espacial), Modelo Digital de Elevação (MDE) selecionado para este trabalho, através do software ArcGIS™. A correção do MDE é necessária devido ao comprimento de ondas de determinados sensores a transposição de alguns obstáculos distanciam as medidas dos valores reais de determinado terreno, dessa forma corrigir tais produtos é indispensável para amenizar problemas e melhorar acurácia (GREGO *et al.*, 2013).

O MDE Aster GDEM 2 foi editado utilizando o software ArcGIS™. Foram geradas curvas de nível de 10 em 10 metros para reconhecer visualmente áreas com picos e depressões que não condizem com o terreno e comparado com imagem WorldView-2, os pontos que apresentavam incoerências tiveram suas curvas editadas.

Para a área de estudo o MDE utilizado apresenta dois problemas depressões e picos que não estão de acordo com a realidade do terreno. A edição e supressão dos picos foi realizada com a identificação destas áreas, geração de polígonos e utilização de dados do MDE de 100m de resolução espacial disponibilizado pelo Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CPC-UFRGS).

O dado utilizado foi recortado, reprojetoado para o sistema UTM 21S e datum WGS84. Em seguida, interpolou-se pelo método linear e em seguida convertido para raster. O MDE foi unido com o MDT gerado por ROSA *et al.*, (2014) e recortado de acordo com a área de interesse.

Para a análise geomorfométrica gerou-se mapas de hipsometria, de declividade, de orientação das vertentes, um modelo de sombreamento e cenas perspectivas tridimensionais dos ambientes livres de gelo da margem leste do campo de gelo Warszawa utilizando o 3D Analyst e ArcScene do ArcGIS®.

O mapa hipsométrico foi elaborado a partir do fatiamento do Modelo Digital de Elevação Aster GDEM-2 em diferentes classes. O mapa de declividade foi elaborado com seis classes temáticas em percentual, de acordo com a classificação da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1979).



As áreas absolutas e relativas de cada classe do mapa hipsométrico, de declividade e orientação das vertentes (drenagens) foram quantificados no programa ArcGIS™.

### **3.2 Mapeamento Geomorfológico Proglacial**

O mapeamento geomorfológico proglacial envolveu a identificação das feições deposicionais glaciais de meso-escala nas imagens WorldView-2 de 2014 e Sentinel-2 de 2017. A geração e análise de dados morfométricos, perfis topográficos, identificação de formas e processos realizados durante a Operação Antártica (OPERANTAR XX) também auxiliaram na interpretação e mapeamento.

Baseados em critérios de classificação e mapeamento das formas de relevo (Tabela 1) de Hambrey (1994), Bennett & Glasser (1996), Benn & Evans (2010) e Davies *et al.*, (2014), foi realizado o mapeamento de feições deposicionais glaciais de mesoescala.

Com base no mapa geomorfológico foi evidenciada a sequência cronológica da formação de depósitos ligados ao padrão de retração glacial. Para a determinação dos estágios de evolução do ambiente marginal ao gelo relacionados à retração glacial e processos geomorfológicos proglaciais, paraglaciais e periglaciais associados utilizaram-se a interpretação do mapeamento geomorfológico e dados vetoriais de variação de linha de frente das geleiras, as quais foram geradas por Perondi *et al.* (no prelo).

Esta metodologia foi baseada em estudos de reconstrução do ambiente glacial que utiliza como indicador a disposição espacial de formas de relevo, como morainas, concluindo sobre o processo de avanço e recuo das geleiras (Boulton *et al.*, 1985; Punkari, 1995; Cuffey *et al.*, 2000; Kleman, 2006).

Forma de relevo	Ambiente deposicional	Processo genético	Associação sedimento/forma	Critério de identificação	Relevância
<b>Moraina Lateral e latero-frontal</b>	Margem da geleira (BENN & EVANS, 2010).	Origem subglacial, englacial ou supraglacial, envolve deposição de sedimentos, movimentos de massa, deformação glaciectônica e outros processos (BENN & EVANS, 2010).	Caracterização sedimentar de <i>till</i> que varia conforme o transporte ativo ou passivo, constituída por grãos grossos e mal selecionados (BENNET & GLASSER, 1996; BELL, 2013; ASSINE & VESELY, 2015).	Possuem forma assimétrica transversal e/ou perpendicular à geleira. Podem ser de diversos tipos e são classificados de acordo com sua localização em relação à geleira (BENNET & GLASSER, 1996).	Marca a extensão de uma geleira (BENNET & GLASSER, 1996).
<b>Moraina frontal de avanço</b>	Limite máximo de avanço de uma geleira (HAMBREY, 1994).	Originada da deposição de sedimentos através de movimentos de massa e atividade glaciectônica (BENN & EVANS, 2010).	Compostos por grãos grossos, abundância de clastos arredondados, facetados, estriados se formados subglacialmente, depositados pela ação direta da geleira (BENNET & GLASSER, 1996).	Apresentam crista morânica externa, em geral arqueadas, podem não estar bem preservadas, refletem a margem frontal da geleira em (re) avanço (HAMBREY, 1994; BENN & EVANS, 2010).	Registram estágios estacionários de uma geleira (HAMBREY, 1994; BENN & EVANS, 2010).
<b>Moraina frontal de Recessão</b>	Margem frontal da geleira (HAMBREY, 1994; BENNET & GLASSER, 1996).	Formada durante estabilização da frente da geleira, durante uma recessão glacial, empurrada ou depositada por um pequeno avanço da geleira (BENN & EVANS, 2010).	Constituída por grãos grossos e baixa seleção granulométrica, abundância de clastos arredondados, facetados, estriados (HAMBREY, 1994; BENNET & GLASSER, 1996).	Perpendiculares ao movimento do gelo, na margem da geleira, podem ter forma de crista, cordão linear ou montículos descontínuos (HAMBREY, 1994; BENN & EVANS, 2010).	Documenta estágio estacionário de uma geleira, em seu avanço ou recuo. (BENN & EVANS, 2010).
<b>Esker</b>	Em contato com o gelo (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996; BELL, 2013).	Ocorre pela corrente de água subglacial, depósitos de enchimento das paredes de canais. Corrente de água na interface gelo/rocha, abaixo do gelo ativo (BENNETT & GLASSER, 1996).	Composição de grãos variada, geralmente grossos, cascalho e areia glaciofluvial com grau de arredondamento devido ao transporte pela água de degelo (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996).	Geralmente sinuoso. Alguns possuem cristas simples, outros podem ser entrelaçados. Sua orientação obedece a curso de uma drenagem (HAMBREY, 1994; BENNETT & GLASSER, 1996).	Indica fluxo hídrico de canal subglacial, base termal úmida e direção do fluxo de gelo (HAMBREY, 1994; BELL, 2013)
<b>Canais entrelaçados</b>	Com ou sem contato com geleira (SUGDEN & JOHN, 1984).	Fluvial com descarga de água de degelo.	Maior granulometria, camadas estratificadas, detritos refletem o transporte pela água (SUGDEN & JOHN, 1984).	Canais entrelaçados de água e leques deposicionais (BENN & EVANS, 2010).	Evidencia avanço e recuo da geleira (ASSINE & VESELY, 2015).

Tabela 1 - Critérios metodológicos de identificação das formas no seu ambiente deposicional.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise geomorfológica

A área de estudo possui elevação média do terreno de 159,14 m com desvio padrão de 132,17 m (Figura 2a e Tabela 2). As classes de elevação (em m) com maiores áreas são 0–100 representando 37,4% da área de estudo, seguida pela classe 100-200, a qual abrange 30,8%, na sequência a classe 200–300 abrangendo 23,9% da área de estudo, e subsequente as classes 300–400, 400–500, 500–600, representando respectivamente 6,7%, 1,02% e 0,2% da área total (Tabela 2).

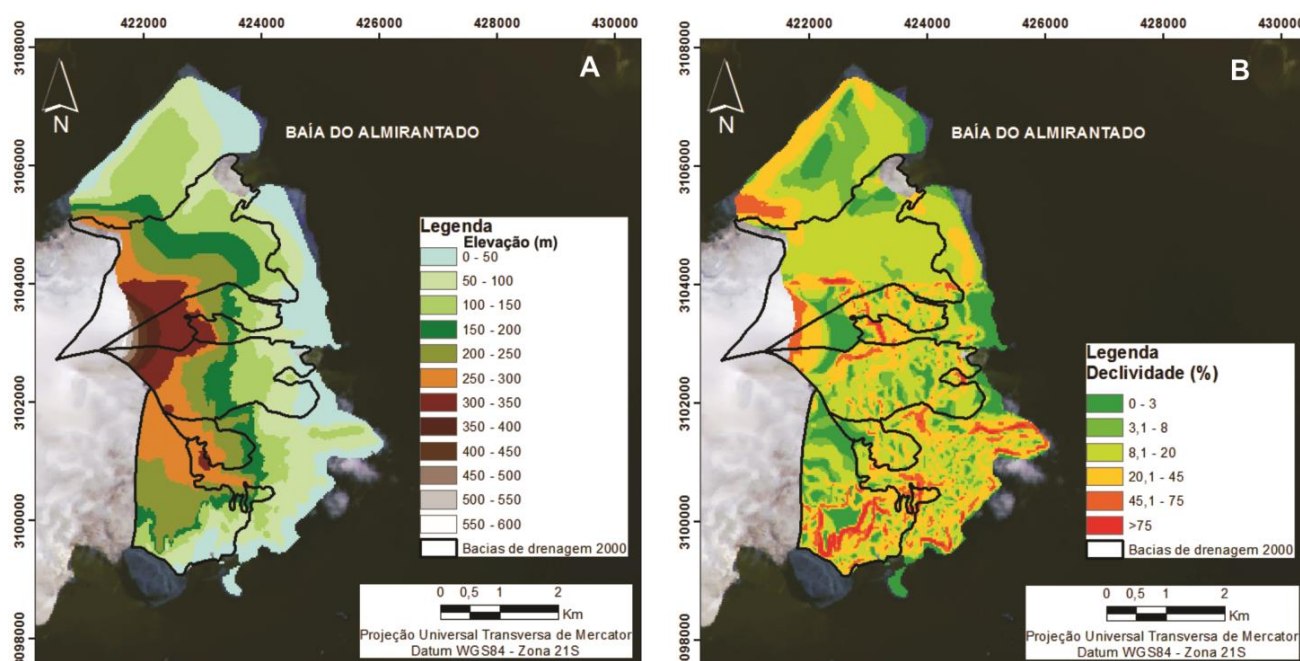


Figura 2 - (a) Mapa hipsométrico, (b) Mapa de declividade da margem leste do campo de gelo Warszawa, baseado na edição do MDE ASTER GDEM-2 e do MDE gerado pelo ortofotomosaico (Fonte: Rosa *et al.*, 2014).

Elevação (m)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
0 - 100	9,09	37,4
100,0000001 - 200	7,51	30,8
200,0000001 - 300	5,81	23,9
300,0000001 - 400	1,65	6,7
400,0000001 - 500	0,25	1,02
500,0000001 - 600	0,06	0,2
ESTATÍSTICAS (M)		
Mínima	Média	Desvio Padrão
0	159,14	132,17

Tabela 2 - Áreas absolutas e relativas e estatísticas das classes do mapa hipsométrico referente à margem leste do campo de gelo Warszawa.

Declividade		Margem leste do campo de gelo Warszawa	
Tipo de relevo	(%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Plano	0 – 3	3	12,3
Suave ondulado	3,1 – 8	3,30	13,5
Ondulado	8,1 – 20	10,07	41,3
Fortemente Ondulado	20,1 – 45	6,15	25,2
Montanhoso	45,1 – 75	1,49	6,1
Escarpado	>75	0,38	1,5
ESTATÍSTICAS (%)			
Mínima	Máxima	Média	Desvio Padrão
0	220,78	18,42	17,53

Tabela 3 - Áreas absolutas e relativas e estatísticas das classes do mapa de declividade referente à margem leste do campo de gelo Warszawa.

As áreas de maior elevação na margem leste do campo de gelo Warszawa estão localizadas em setores de geleiras, mas também podem ser encontradas em setores com exposição de rochas, como por exemplo, na bacia da geleira Baranowski, correspondendo ao *nunatak* Siodlo (Figura 3), circundado pela geleira; o Pico Pawson entre as geleiras Ecology e Sphinx e a Escarpa Anvil entre as geleiras Sphinx e Baranowski.

A classe de declividade de maior predominância na área de estudo é Ondulado, representando 41,3%, seguido pela classe de relevo Fortemente Ondulado, com 25,2% da área. Os dados estatísticos mostram que as áreas com declividade máxima são de 220,78%, média de 18,42 %, com desvio padrão de 17,53% (Figura 2b e Tabela 3).

As geleiras Windy e Tower possuem declive acentuado em suas áreas frontais livres de gelo, o qual varia de 3,1 a >75%, as áreas declivosas coincidem com áreas rochosas expostas e com picos, como o Pico *The Tower* e Brama, ambos na área livre de gelo da geleira Tower. Na geleira Baranowski as áreas menos declivosas estão localizadas próximas a Baía do Almirantado.

As demais geleiras da área de estudo, Baranowski, Sphinx e Ecology possuem gradiente de declive suavizado em relação às demais geleiras. A geleira Ecology, em sua área livre de gelo apresenta variação de declive desde 0% em área praial variando até 45% em direção à geleira, e suas vertentes estão voltadas principalmente a nordeste, a geleira Sphinx em sua área livre de gelo apresenta 0–3% de declividade em pontos próximos à baía do Almirantado, aumentando o declive em direção à frente da geleira, podendo atingir em alguns pontos 20–45%,

com vertentes orientadas à leste, noroeste e oeste. A geleira Baranowski apresenta declividade entre 0-3% na faixa praial, e os maiores percentuais, >75%, remetem ao Monte Siodlo (Figura 3).



Figura 3- Nunatak Siodlo  
Fonte: Bremer, 2008

## 4.2 Geomorfologia dos ambientes proglaciais

Devido à retração frontal das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, evidenciada por Perondi *et al.*, (no prelo), houve aumento de áreas sem cobertura de gelo, expondo dessa forma depósitos glaciais. Estas formas de relevo documentam a configuração antiga da geleira e seu histórico de deglaciação (ROSA, 2012).

Por meio do mapeamento geomorfológico e com base na tabela 1 foram identificadas na área proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy (Figuras 5-9): morainas frontais, laterais e latero-frontais, *eskers*, canais entrelaçados, lagos e lagunas, além de núcleos de vegetação em setores distais as geleiras.

### 4.2.1 Mapeamento geomorfológico do ambiente proglacial da geleira Ecology

Na área frontal da geleira Ecology (Figura 4) foram identificadas morainas latero-frontais, *eskers*, morainas frontais, canais com água de degelo, alguns entrelaçados e outros não, e próxima à linha de costa áreas e com núcleos de vegetação. As morainas latero-frontais encontram-se no setor norte da geleira Ecology, indicando extensão máxima da geleira, assim como denotam Bennet & Glasser (1996).

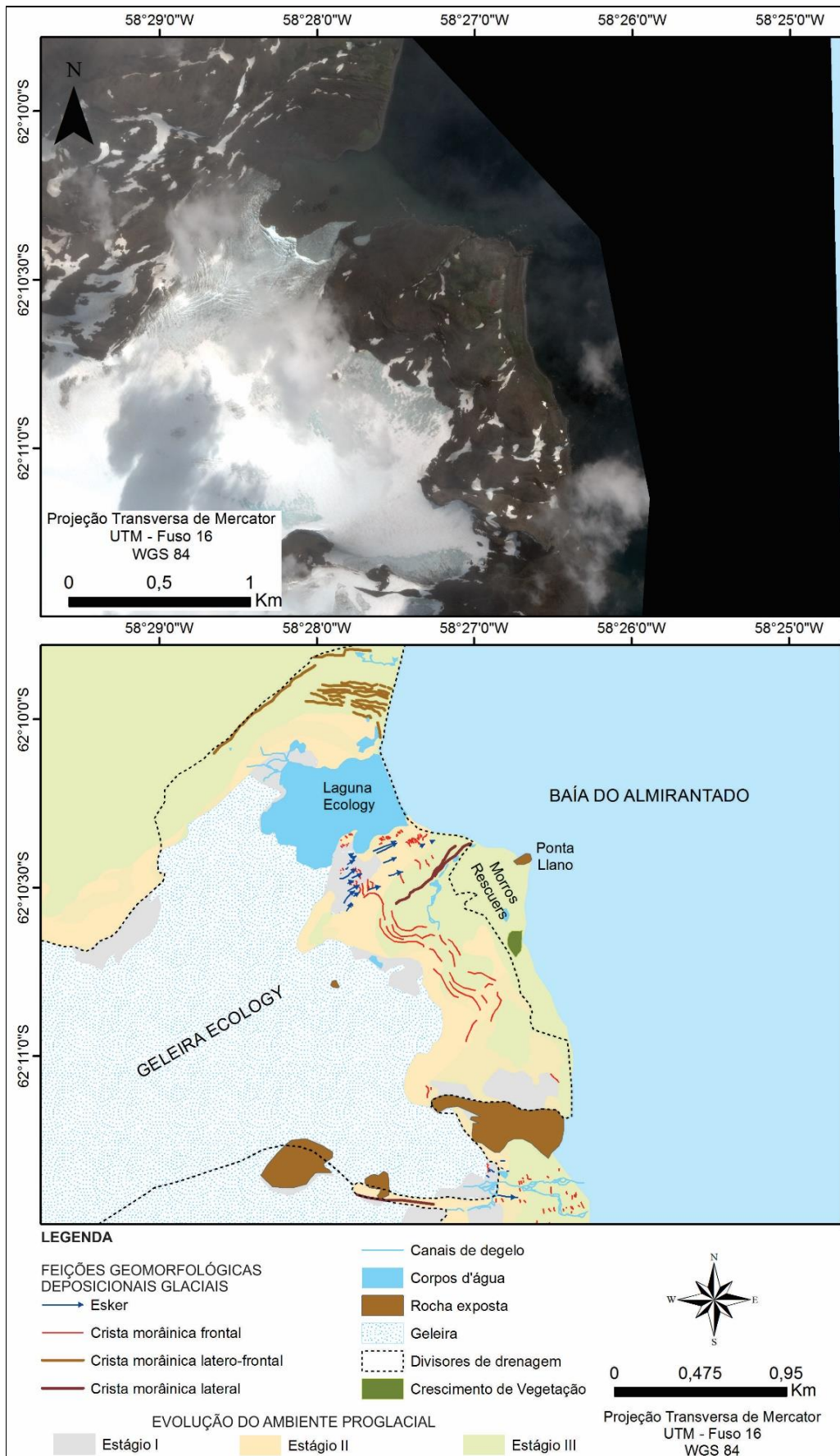


Figura 4- Mapeamento geomorfológico das feições deposicionais de meso-escala da área proglacial da geleira Ecology.

A moraina latero-frontal ao norte da Ecology, possui crista alongada, forma arredondada e íngreme, alinhada paralela ao fluxo da geleira (ROSA, 2012). Estas morainas laterais e latero-frontais, com aproximadamente 1 km de comprimento, possuem em alguns pontos mais de 30 metros de altura em relação à superfície, devido a essa elevação do cordão morâinico confirma que a geleira no passado era mais espessa e projetava sobre a Baía do Almirantado (VIEIRA *et al.*, 2005).

No mapeamento geomorfológico realizado para este trabalho não foi possível identificar morainas laterais ao norte da geleira Ecology, as quais podem ter sido retrabalhadas. Ainda no setor norte é possível observar fluxos de água de fusão próximos aos cordões morâinicos, conforme Vieira *et al.*, (2005) já haviam identificado.

Próximo às morainas identificou-se, através de sua morfologia, *eskers*, estes com cristas simples, indicam a direção do fluxo de gelo, remetem a presença de antigos canais de drenagem subglacial (HAMBREY, 1994; BELL, 2013), fluindo para a margem da geleira, situados em áreas que foram deglaciadas recentemente, assim como denota Sugden & John (1976). A formação dessas feições ocorre pelo preenchimento das paredes de gelo ativo, por onde flui a água de degelo, na interface gelo/rocha, transportando sedimentos (BENNET & GLASSER, 1996).

Em setores distais à geleira Ecology, livres de cobertura de gelo há mais tempo, evidenciam-se atividades paraglaciais através da presença de vegetação. Ballantyne (2002) ressalta a cobertura de vegetação como indicativo de que este terreno está estabilizado. A presença de lagos, laguna, canais de drenagem, refletem o recuo da geleira. Estes corpos de água são alimentados por água de degelo e precipitação pluvial (BREMER, 2008).

Na área frontal da geleira Ecology, em resposta a sua retração, há a laguna Ecology que se liga à baía do Almirantado, sendo uma geleira mista, pois tem término em terra, mas possui influência marítima devido à maré (ROSA, 2008). Esse corpo de água possui afloramentos rochosos em áreas rasas e através da dinâmica da maré, a laguna Ecology conecta-se de forma parcial ao sul com a geleira Ecology (PETLICKI *et al.*, 2017).

Os *eskers*, lagos e canais de drenagem que se encontram atualmente em contato com a geleira Ecology, estendem-se sobre o estágio evolutivo I, formados recentemente (2000-2017). Enquanto que corpos de água e morainas frontais de

maiores dimensões formaram-se no estágio II (exposto no período de 1979-2000), as morainas latero-frontais ao norte e lateral ao sul da geleira foram expostos no estágio III (expostos antes de 1979) (Figura 4).

#### **4.2.2 Mapeamento geomorfológico do ambiente proglacial da geleira Sphinx**

A geleira Sphinx (Figura 5) possui depósitos morânicos ao sul e sua zona proglacial possui aproximadamente 1.200 metros (de extensão) no sentido N-S e 800 metros E-W (de extensão) (RACHLEWICZ, 1999). Com base no mapeamento geomorfológico, observa-se que há morainas laterais retrabalhadas. Ao norte da geleira há também uma moraina lateral. Na área de contato com o gelo frontal não é possível observar feições deposicionais morânicas. Em setores distais à geleira há canais de drenagem, morainas frontais, lagos e *eskers*.

Os resultados vão ao encontro do que afirma RACHLEWICZ (1999), onde traz que na zona próxima ao gelo há morainas que podem atingir 20 metros de altura e ao norte há presença de canais entrelaçados, lagos e *eskers*. Pode-se inferir que na área frontal os depósitos foram retrabalhados, dessa forma não são mais identificáveis. O processo de retrabalhamento de feições nessa área proglacial é complexo, pois há influência de água de degelo de geleiras e ação atmosférica (BREMER, 2008). Os canais entrelaçados transportam e retrabalham sedimentos subglaciais e subaéreos ao longo da geleira Sphinx até a baía do Almirantado, assemelhando-se ao que ocorre na geleira Baranowski, situada ao sul de Sphinx (BREMER, 2008).

A geleira Sphinx é limitada por maciços de rochas expostas, e sua área proglacial é formada por rochas resistentes a interferência mecânica da ação glacial. No local de encontro entre as bacias das geleiras Sphinx e Baranowski, há formações rochosas como a *Ágat Point*. Na área proglacial da geleira Baranowski há feições morânicas, algumas retrabalhadas por ação hídrica e água de fusão de gelo. O escoamento de água de degelo sobre encostas íngremes causa instabilidade e conseqüentemente movimentos de massa (RACHLEWICZ, 1999).

As morainas laterais ao sul e ao norte da geleira Sphinx e alguns canais de drenagem tiveram sua formação durante o estágio evolutivo I (mais recente exposto entre 2000-2017). Enquanto que a moraina lateral ao norte da geleira é formada no estágio II (exposto no período de 1979-2000). Durante o estágio III formam-se a moraina lateral ao sul da geleira Sphinx e *eskers* (exposto antes de 1979) (Figura 5).



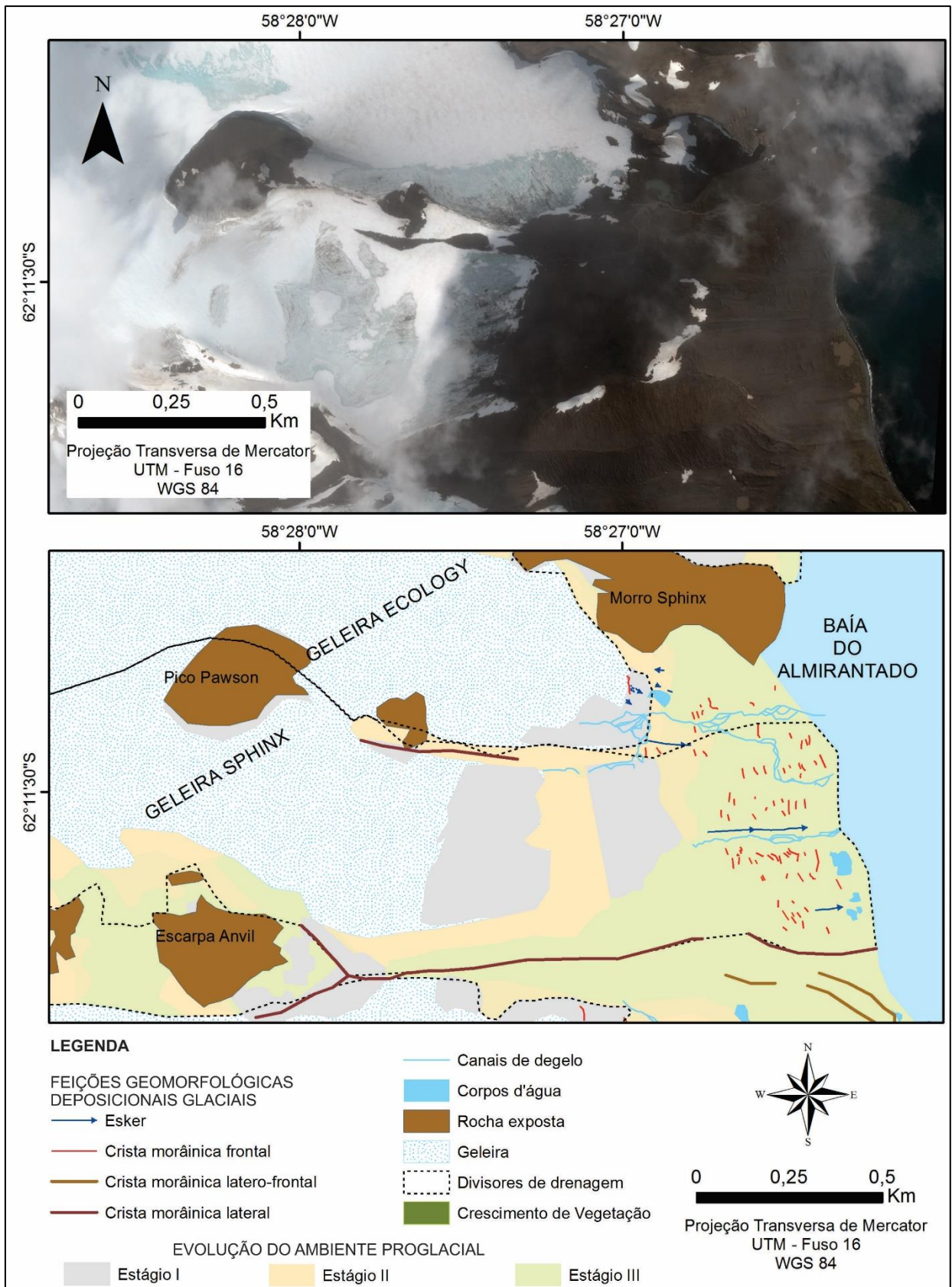


Figura 5- Mapeamento geomorfológico das feições deposicionais de meso-escala da área proglacial da geleira Sphinx.

### **4.2.3 Mapeamento geomorfológico do ambiente proglacial da geleira Baranowski**

A geleira Baranowski (Figura 6) apresentou acelerada retração na década de 1990, de acordo com BIRKENMAJER (2002). Como resultado desta retração, evidencia-se um amplo ambiente proglacial, com aproximadamente 1000 metros de extensão, e com a presença de feições morânicas em sua área marginal ao gelo e água oriunda de fusão glacial (RACHLEWICZ, 1999).

Em sua área proglacial é possível observar morainas laterais ao norte e ao sul da geleira. Essas feições são encontradas às margens das geleiras e sua formação ocorre por deposição de sedimentos (BENN & EVANS, 2010).

Morainas com forma transversal à geleira indica o ponto de avanço máximo da geleira, conforme afirma BENNET & GLASSER (1996). Também foram evidenciadas morainas latero-frontais retrabalhadas.

As cristas morânicas laterais estendem-se ao longo da borda sul da geleira Baranowski, onde há maior espaçamento entre as mesmas nas adjacências da costa marítima. Há um significativo escoamento hídrico na área proglacial da geleira Baranowski.

Dessa forma, a combinação de água de fusão e vertentes inclinadas causa instabilidade, bem como movimento de massa. RACHLEWICZ (1999) afirma que a erosão pelo escoamento superficial da água de fusão do gelo e da neve sob as encostas fortemente inclinadas causam a sua instabilidade, bem como possíveis movimentos de massa.

A linha frontal da geleira forma um penhasco, o qual na década de 1970 era fortemente influenciado e modelado pela ação litorânea (RACHLEWICZ, 1999).

*Eskers* e canais de drenagem e lagos são formados em contato com o gelo, alimentados por água de degelo, os quais se ligam através de canais entrelaçados aos demais lagos desta área proglacial.

Os corpos de água próximos de geleiras são mantidos por blocos das geleiras que se desprendem, correntes de água subglaciais ou englaciais (ASSINE & VESELY, 2002). Próximo à linha de costa percebe-se a presença de núcleos vegetacionais, evidenciando atividade paraglacial.

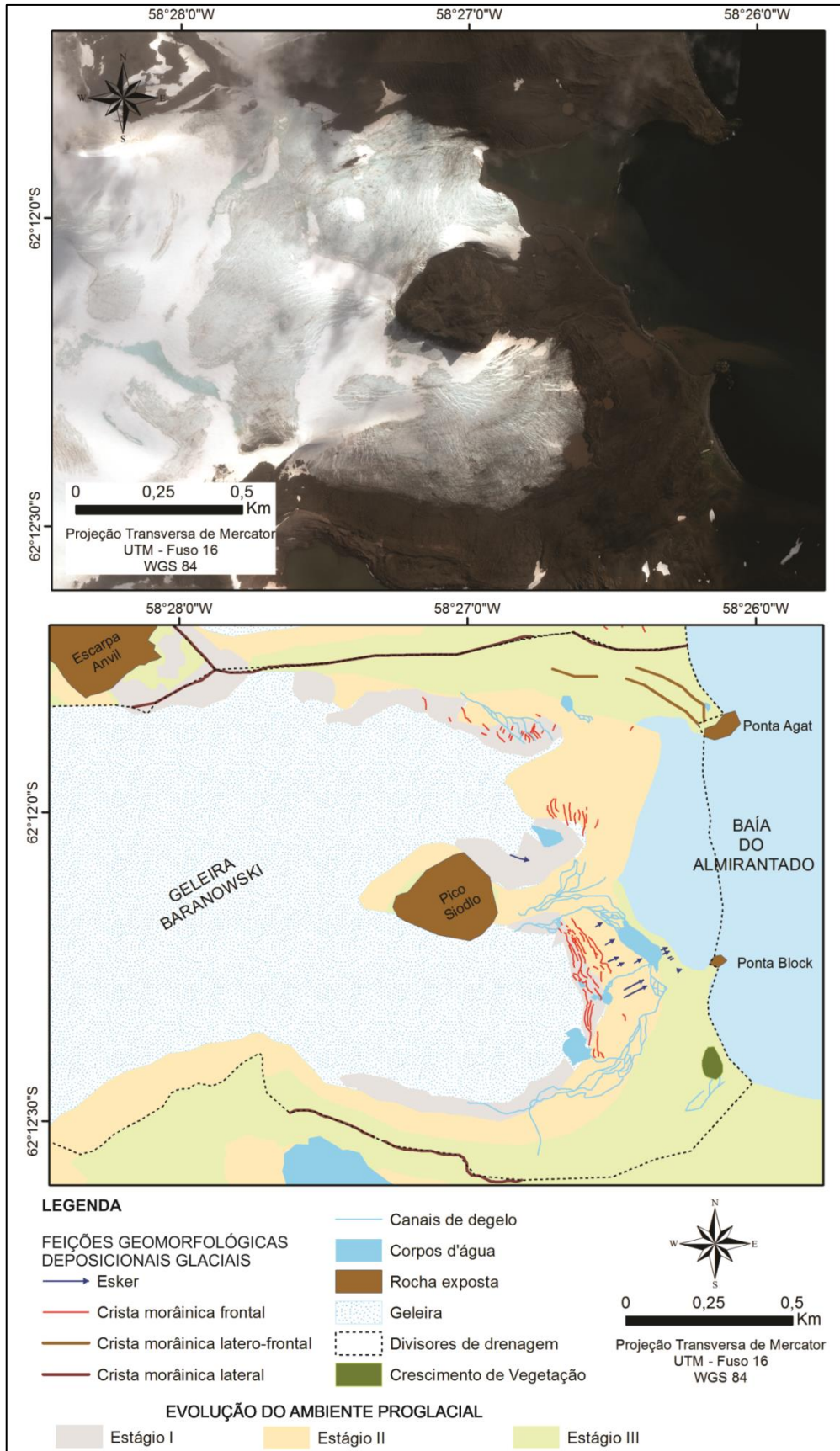


Figura 6- Mapeamento geomorfológico da das feições deposicionais de meso-escala área proglacial da geleira Baranowski

No local de encontro entre as bacias das geleiras Sphinx e Baranowski, há formações rochosas como a *Ágat Point*. Os resultados vão ao encontro do que evidencia RACHLEWICZ (1999), o qual traz as feições morânicas como retrabalhadas por ação hídrica proveniente de fusão de gelo e movimentos de massa (RACHLEWICZ, 1999).

Geoformas como morainas frontais, moraina lateral e *eskers*, além dos principais corpos de água mapeados formam-se sobre o estágio evolutivo I na área proglacial da geleira Baranowski (recentemente expostos, 2000-2017). Enquanto que lagos mais distais e *eskers* são formados durante o estágio evolutivo II (1979-2000), as morainas laterais ao sul e ao norte da geleira, além de morainas latero-frontais e *eskers* são formadas no estágio III (exposto antes de 1979) (Figura 6).

#### **4.2.4 Mapeamento geomorfológico do ambiente proglacial da geleira Tower**

A geleira Tower (Figura 7), localizada ao sul da geleira Baranowski apresenta elevação de aproximadamente 366,9 metros (MARSZ, 1985). Vieira *et al.* (2005) argumenta que na zona proglacial desta geleira, o material depositado é constituído por depósitos de *till* (detritos basais).

Em setores distais à geleira, há pontos com a presença de núcleos de vegetação e lagos entrelaçados, assim como traz BREMER (2008) ao ressaltar a presença do processo de colonização vegetal, pequenos lagos e sistema de drenagem dinâmico.

A moraina lateral ao sul da geleira Tower e moraina frontal são formadas durante o estágio evolutivo I do ambiente proglacial (o mais recentemente exposto, 2000-2017), enquanto que morainas frontais, lagos sem contato com o gelo formaram-se durante o estágio II (exposto no período de 1979-2000). Nas áreas distais à geleira há núcleos de vegetação e canais entrelaçados expostos desde o estágio III (formado antes de 1979) (Figura 7).

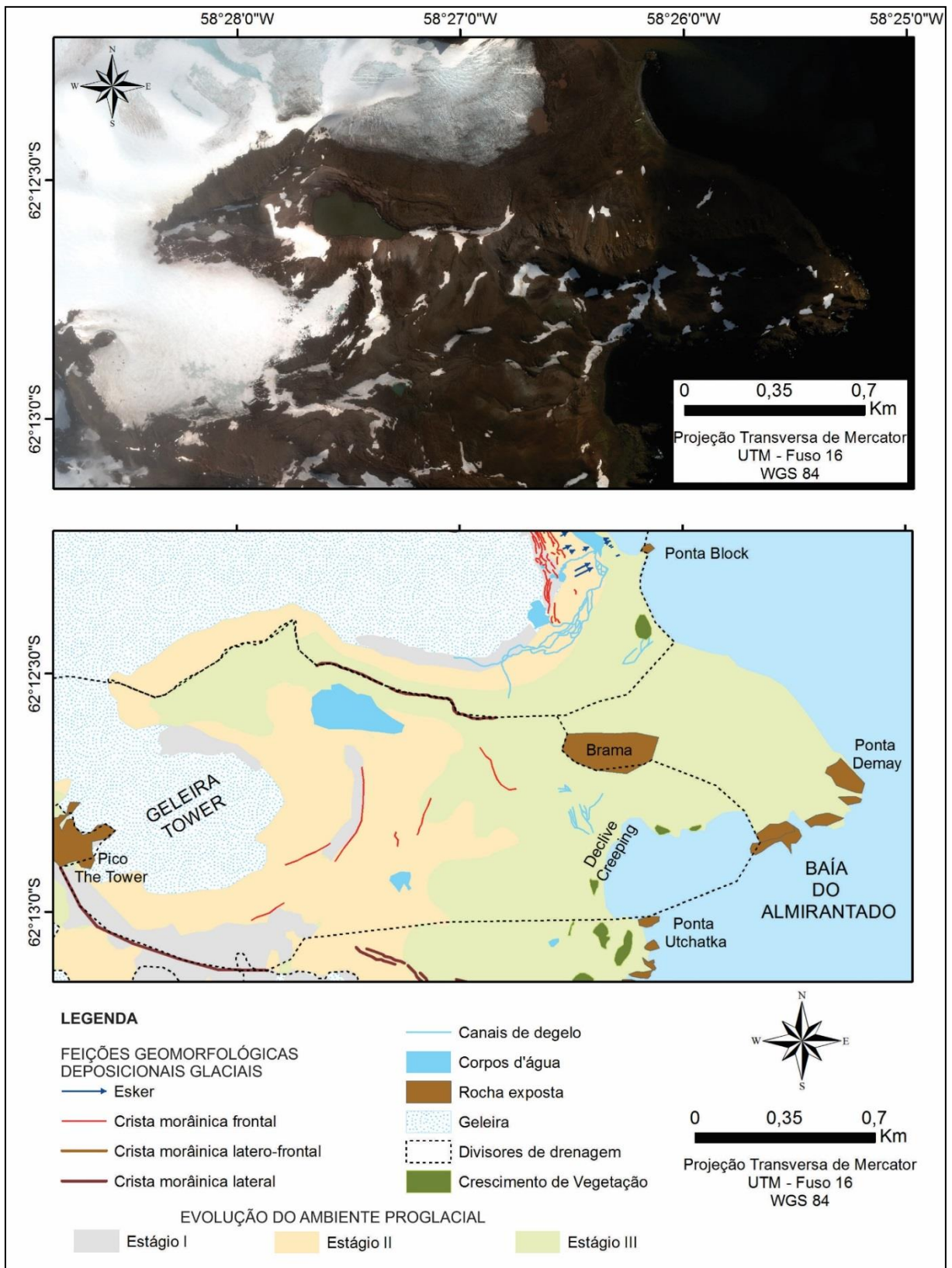


Figura 7- Mapeamento geomorfológico das feições deposicionais de meso-escala da área proglacial da geleira Tower.

#### 4.2.5 Mapeamento geomorfológico do ambiente proglacial da geleira Windy

A geleira Windy (Figura 8) possui uma zona proglacial retrabalhada por água de degelo e pluvial, há depósitos formados por detritos basais, drenagem subglacial, pequenas lagoas, terraços glaciolagunares e glaciofluviais (BREMER, 2008). Identificou-se morainas laterais, indicando a extensão da geleira para o norte e inúmeros *eskers*.

Morainas latero-frontais não foram identificadas na geleira Windy, Tower e Sphinx, mas foram observadas nas geleiras Baranowski e Ecology, em ambos os casos apresentando características de retrabalhamento por sua descontinuidade na área proglacial da geleira Ecology e Baranowski. O término destas feições ocorre no mar. A moraina latero-frontal externa localizada na extremidade da laguna Ecology é comumente coberta pela ação da maré e correntes (VIEIRA *et al.*, 2005).

Os *eskers* mapeados foram expostos sobre o estágio evolutivo I do ambiente proglacial da geleira Windy (o mais recentemente exposto, entre 2000-2017). Morainas laterais, morainas frontais e corpos de água principais formam-se durante o estágio II (exposto entre 1979-2000). Núcleos de vegetação e morainas frontais formaram-se durante o estágio III (exposto anteriormente a 1979) (Figura 8).

Há outras feições deposicionais na área proglacial de algumas geleiras da área de estudo que não foram possíveis de identificar, possivelmente pelo retrabalhamento dessas formas.

Na área livre de gelo da geleira Ecology foram identificados em trabalhos passados presença de *flutings* (ROSA *et al.*, 2006, VIEIRA *et al.*, 2005), bem como na área proglacial da geleira Sphinx (RACHLEWICZ, 1999; BREMER, 2008). As morainas laterais indicadas próximas à costa por Rachlewicz (1999) não são mais identificáveis.

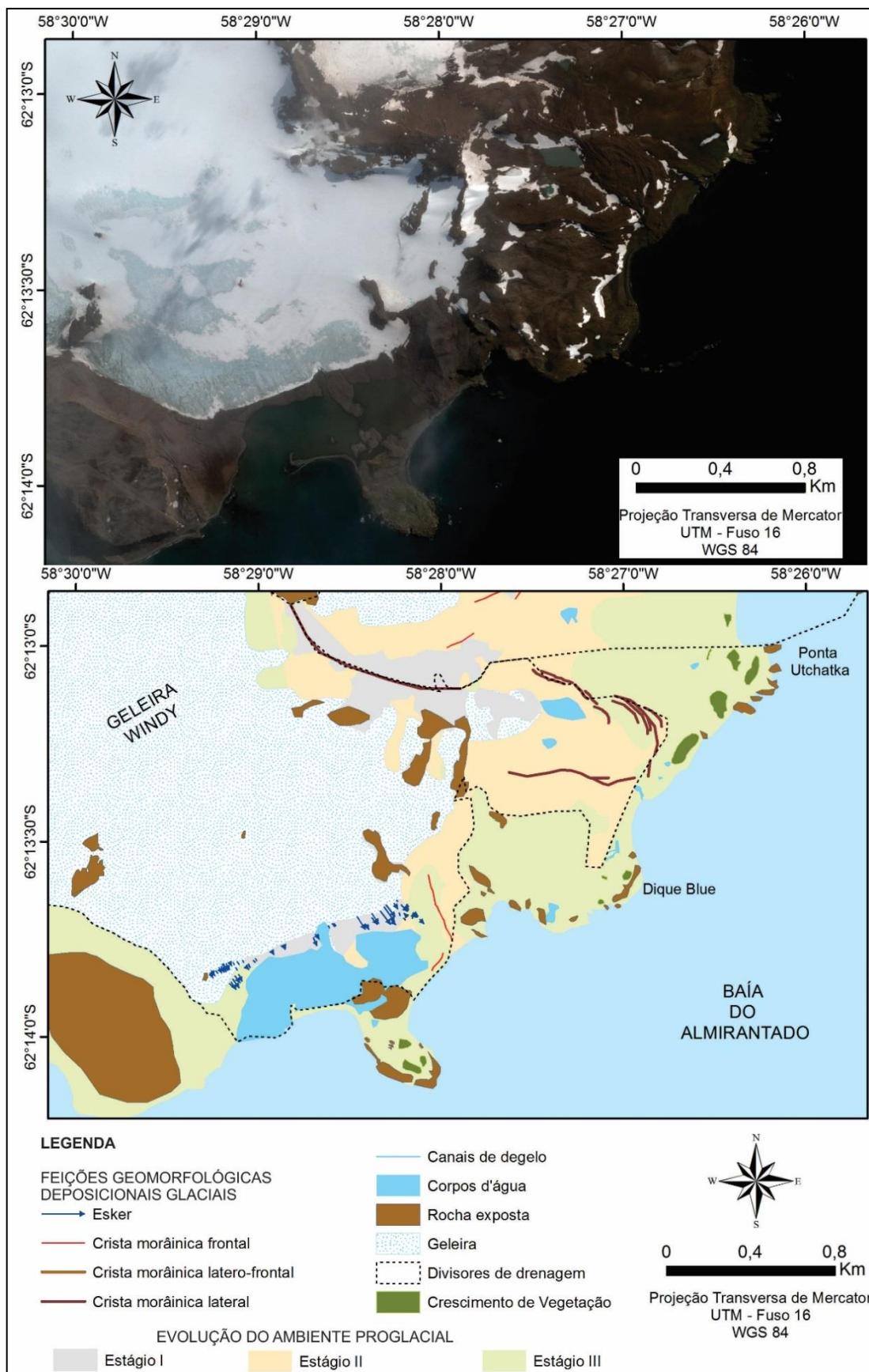


Figura 8- Mapeamento geomorfológico das feições deposicionais de meso-escala da área proglacial da geleira Windy.

## 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os produtos morfométricos (mapas de hipsometria, declividade, orientação das vertentes e modelo de sombreamento analítico) gerados a partir do MDE ASTER GDEM-2 e mapeamento geomorfológico trouxeram dados que possibilitam inferir mudanças ambientais que vêm ocorrendo na área de estudo, tais como a ocorrência de processos erosivos paraglaciais, mudanças morfológicas das geleiras e de suas áreas livres de gelo formadas a partir da retração das mesmas.

Foram identificados ambientes periglaciais com processos de ravinamentos, retrabalhamento de cordões morânicos descontínuos, e paraglaciais através de presença de núcleos de vegetação, situadas principalmente sobre áreas rochosas, esses ambientes ocorrem em áreas distais à geleira. As áreas livres de gelo recentes são suscetíveis a processos geomorfológicos, evidenciados pela exposição de formas de relevo e seu retrabalhamento por ação eólica e hídrica.

Nas áreas proglaciais verificam-se feições glaciais deposicionais e erosivas, como *eskers*, morainas frontais, laterais e latero-frontais, também há presença de canais com água de degelo, entrelaçados e outros não entrelaçados, lagos e lagunas. A disposição espacial das formas de relevo deposicionais de mesoescala contribui para a reconstrução glacial e de ambientes proximais às geleiras, e também como ferramenta de monitoramento destes ambientes.

**Agradecimentos:** A FAPERGS, o CNPq e o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) forneceram o suporte para essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSINE, M. L.; VESELY, F. F. **Ambientes Glaciais**. 2015. Disponível em: <http://www.geologiadobrasil.com.br/pdfs/ambientesglaciais.pdf>. Acesso em: 31/10/2016.

BALLANTYNE, C. K. Paraglacial Geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, p. 1935 – 2017. 2002. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00005-7.

BELL, R. C. **Glacial Systems and Landforms: a Virtual Interactive Experience**. London: Anthen Press, 2013. 136 p.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and Glaciation**. 2<sup>a</sup> ed. London: Hodder Education. 2010. 802p.

BENNETT M.R.; GLASSER, N.F. **Glacial Geology – Ice Sheets and Landforms**. England: John Wiley & Sons Ltd, 1996. 364 p.



BIRKENMAJER, K. Discovery of Pliocene Glaciation on King George Island, South Shetland Islands (West Antarctica). **Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences**, v. 27, p. 59-67. 1980a.

BIRKENMAJER, K.. Tertiary Volcanic-Sedimentary Succession at Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, v. 64, p. 8-65. 1980b.

BIRKENMAJER, K. Cenozoic Phases of Block-Faulting on King George Island (South Shetland Islands, Antarctica). **Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences**, v. 30, n. 1/2, p. 21-32. 1983.

BIRKENMAJER, K. 1989. King George Island. In: DALZIEL, I.W.D., BIRKENMAJER, K., MPODOZIS, C., RAMOS, V.A.; THOMSON, M.R.A (Eds): **Tectonics of the Scotia Arc. Antarctica**, p. 144-121.

BIRKENMAJER, K. 1991. Tertiary Glaciation in the South Shetland Islands, West Antarctica: Evaluation of Data. In: THOMSON, M.R.A., CRAME, J.A. & THOMSON, J.W. (Eds), **Geological Evolution of Antarctica**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 627-632.

BIRKENMAJER, K. Geology of the Northern Coast of King George Island, South Shetland Islands (West Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, v. 110, p. 7-26. 1997.

BIRKENMAJER, K. Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). 1956-2001. **Bulletin of Polish Academy of Sciences: Earth Sciences**, v. 50, n.1, p 5–19. 2002.

BOULTON, G.S; SMITH, G. D.; JONES, A. S.; NEWSOME. J. Glacial Geology and Glaciology of the Last Mid-latitude Ice Sheets. **Journal of Geological Society of London**, v. 142, p. 447-474. 1985. DOI: 10.1144/gsjgs.142.3.0447.

BRAUN, M. **Ablation on the Ice Cap of King George Island (Antarctica)**. PhD. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universitat Feiburg, 165 p. 2001.

BREMER, U. F. **Solos e Geomorfologia da Borda Leste da Península Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2008. 135 p.

CUFFEY, K. M.; CONWAY, H.; GADES, A. M.; HALLET, B.; LORRAIN, R.; SEVERINGHAUS, J.P.; STHEIG, E. J.; VAUGHN, B.; WHITE, J.W.C. Entrainment at Cold Glacier Beds. **Geology**, v. 28, p. 351-354. 2000. DOI: 10.1130/0091-613(2000)28<351:EACGB>2.0.CO;2

CURL, J.E. A glacial History of the South Shetland Islands, Antarctica. Ohio State University, **Institute of Polar Studies Report**, v. 63, 129 p. 1980.

DAVIES, B.J.; GOLLEDGE, N.R.; GLASSER, N.F.; CARRIVICK, J.L.; LIGTENBERG, S.R.M.; BARRAND, N.E.; VAN DEN BROEKE, M.R.; HAMBREY, M.J.; SMELLIE, J.L. Modelled Glacier Response to Centennial Temperature and Precipitation Trends on the Antarctic Peninsula. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 993–998. 2014. DOI:10.1038/nclimate2369.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. 1979. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ)**. Súmula da 10ª Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro. 83p.
- FERREIA, A. B. Os Ambientes Periglaciários e o Significado das Manifestações Periglaciárias Herdadas. **Finisterra Revista Portuguesa de Geografia**, v. 26, n. 51, p. 84-105. 1991. DOI: 10.18055/Finis1910.
- FRENCH, H. M. **The Periglacial Environment**. 3ª ed. Wiley, Chichester. 2007. 478p.
- GREGO, C. R.; LONG, R. M.; VICENTE, L. E.; LOEBMANN, D.; VEDOVATO, L. B.; OLIVEIRA, B.; LEIVAS, J.; VICTORIA, D. Otimização de Modelo Digital de Elevação - ASTER Utilizando Análise Geoestatística. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. 2013. p.1237-1243.
- GROENEWEG, W. J.; BEUNGK, F. F. 1992. The Petrography and Geochemistry of the King George Island Supergroup and the Admiralty Bay Group Volcanics, South Shetland Islands. In J. López-Martinez (Ed.). **Geología de la Antártida Occidental**. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, España, p. 43-60.
- HUBBARD, B.; GLASSER, N. **Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology**. Inglaterra: John Wiley & Sons Lda, 2005. 412p.
- HAMBREY, M. **Glacial Environments**. London: UCL Press, 1994. 296 p.
- KLEMAN, J.; HATTESTRAND, C.; STROEVEN, A. P.; JANSSON, K. J.; ANGELIS, H.; BORGSTROM, I. 2006. Reconstruction of Paleo-ice Sheets-inversion of their Glacial Geomorphological Record. In: KNIGHT, P. G. (Ed). **Glacier Science and Environmental Change**. Blackwell Publishing Ltd. Oxford, p.192-198.
- MARSZ, A. A. Charakterystyka Fizyczno-geograficzna Obszarów Lodowych w Otoczeniu Zatoki Admiralicji Jako Podstawa Rozpoznania Fragmentu Ekosystemu. **Manuscript Wyższa Szkoła Morska**, Gdynia, 146 p. 1985.
- NAPIERALSKI, J.; HARBOR, J.; LI, Y. K. Glacial Geomorphology and Geographic Information Systems. **Earth Science Review**, v. 85, p. 1-22. 2007. DOI: 10.1016/j.earscirev.2007.06.003.
- OTTO, J. C.; SMITH, M. J. Geomorphological Mapping. **British Society for Geomorphology**. v. 6, p. 1-10. 2013.
- PERONDI, C.; ROSA, K.K.; VEETIL, B. K. Mudanças Glaciais Recentes no Setor Oriental do Campo de Gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica: Escalas De Tempo De Resposta E Novas Condições De Término Glacial. **Revista Antarctic Science**, no prelo.
- PETLICKI, M.; SZILLO, J.; MACDONELL, S.; VIVERO, S.; BIALIK. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). **Remote Sensing**, v. 9, n. 6. 2017. DOI: 10.3390/rs9060520

- PUNKARI, M. Glacial Flow Systems in the Zone of Confluence Between the Scandinavian and Novaya Zemlya Ice Sheets. **Quaternary Science Reviews**, v. 14, p. 589-603. 1995. DOI: 10.1016/0277-3791(95)00026-L.
- RACHLEWICZ, G. Glacial Relief and Deposits of the Western Coast of Admiralty Bay, King George Island, South Shetlands Islands. **Polish Polar Research**, v. 20, n. 2, p. 89 – 130. 1999.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Dinâmica Glacial e Características Sedimentares Resultantes na Zona Proglacial da Geleira Ecology - Baía Do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 51 – 60. 2006. DOI: 10.20502/rbg.v7i2.78
- ROSA, K. K. **Formas e Processos do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008. 139 p.
- ROSA, K. K. **Dinâmica Glacial, Sedimentológica e Variações Ambientais em Geleiras na Enseada Martel, Ilha Rei George, Shetlands do Sul**. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012. 184 p.
- ROSA, K.K.; MENDES, C. W.; VIEIRA, R.; DANI, N.; SIMÕES, J.C. Análise Morfométrica do Setor Norte da Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica. **Boletim de Geografia**, v. 32, n. 1, p. 52-61. 2014. DOI: 10.4025/bolgeogr.v32il.18710.
- SLAYMAKER, O. Criteria to Distinguish Between Periglacial, Proglacial and Paraglacial Environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, p. 85 - 94. 2011. DOI: 10.2478/v10117-011-0008-y.
- SUGDEN, D. E.; JOHN B. S. **Glaciers and Landscape**. London: Edward Arnold Ltda, 1976. 376 p.
- SUGDEN, D. E.; JOHN B. S. **Glaciers and Landscape: A Geomorphological Approach**. London; New York: Editora Edward Arnold, 2<sup>a</sup> ed. 1984. 376 p.
- TOKARSKI, A. K. Structural Events in the South Shetlands Islands (Antarctica). III. Barton Horst, King George Island. **Studia Geologica Polonica**, v. 90, p. 7-38. 1987.
- THOMSON, M. R. A.; PANKHURST, R. J.; CLARKSON, P.D. 1983. The Antarctic Peninsula a Late Mesozoic – Cenozoic arc (Review). In: OLIVER, R. L.; JAMES, P. R.; JAGO, J. B. (Eds) **Antarctic Earth Science**. Canberra: Australian Academy of Science; Cambridge, p. 328–333.
- VIEIRA, R.; ROSSATO, M. S.; AQUINO, F. E.; SIMÕES, J. C. Feições Morfológicas Associadas ao Ambiente de Deglaciação da Geleira Ecology, Ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v 6, n 2, p. 51-64. 2005. DOI: 10.20502/rbg.v6i2.51

### 3.3 ARTIGO 3 : RÁPIDA EVOLUÇÃO DO AMBIENTE MARGINAL ÀS GELEIRAS DO SETOR LESTE DO CAMPO DE GELO WARSZAWA, ILHA REI GEORGE, ANTÁRTICA MARÍTIMA

---

**Resumo:** O objetivo deste trabalho é investigar a evolução geomorfológica das áreas livres de gelo associadas às geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, da margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George (IRG), Shetlands do Sul, Antártica Marítima (62°12'0"S - 58°30'0"W). Com base nas feições morânicas encontradas através de análise visual em imagens Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014, gerou-se o mapeamento geomorfológico das áreas marginais ao gelo (atuais ambientes proglaciais e reconstrução das áreas do passado) e a reconstrução das fases de estabilização frontal das geleiras da área de estudo. Foram evidenciados três estágios de evolução do processo de retração das geleiras e formação do ambiente proglacial. No estágio atual (I) há processos paraglaciais intensos com a exposição recente de formas deposicionais glaciais relacionadas a um ambiente proglacial marginal ao gelo. No estágio II, há uma sucessão do ambiente proglacial marginal ao gelo para um ambiente distal, as formas deposicionais proglaciais estão retrabalhadas e ainda há o desenvolvimento da drenagem glaciofluvial. No estágio III há o início da sucessão do ambiente proglacial distal e paraglacial para o periglacial e muitos lagos perdem conexão com a drenagem glaciofluvial. O ambiente formado no estágio I é o geomorfológicamente mais dinâmico e formado nas últimas duas décadas (2000-2017). Inferiu-se que as geleiras fluíam para a Baía do Almirantado, sendo todas de término de maré com a modificação de sua configuração de término para em terra, exceto a geleira Ecology que possui término misto. A topografia do embasamento rochoso mostrou influenciar a disposição espacial das geleiras durante a retração e também a evolução geomorfológica.

Palavras-chave: geomorfologia glacial; retração glacial; reconstrução paleoglaciológica; mudanças climáticas.

**Abstract:** The objective of this work is to investigate the geomorphological evolution of the ice-free land areas associated with Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower and Windy glaciers, located in the Eastern sector of Warszawa Ice cap, Admiralty Bay coast, King George Island, South Shetlands, Antarctica Maritime (62°12'0"S - 58°30'0"W). Was generated the geomorphological mapping of ice-marginal areas based on the moraine features found through visual in Sentinel-2 images of 2017 and WorldView-2 images of 2014, and was obtained the current proglacial environments and reconstruction of the glacial areas. Three stages of proglacial environment evolution with glacial retreat process were evidenced. At the present stage (I) there are intense paraglacial processes with the recent exposure of glacial depositional landforms related to ice-marginal proglacial environment. In Stage II, there is a succession of the ice-marginal proglacial environment for a distal environment, the proglacial depositional landforms are reworked and there a continuous development of glaciofluvial drainage. In stage III there is the beginning of the succession of the

distal and paraglacial proglacial environment to the periglacial and many lakes lose their connection with glaciofluvial drainage. The environment formed in stage I is the geomorphological most dynamic and formed in the last two decades (2000-2017) and have rapid evolution. The Windy Glacier only evidenced the Stage I. It was inferred that the glaciers flowed to Admiralty Bay with tidal terminus changed for land terminus configuration, except the mixed terminus of the Ecology glacier. The topography of the basement showed to influence the glaciers spatial configurations during the retreat and geomorphological evolution.

Keywords: glacial geomorphology, glacial retreat, paleoglaciological reconstruction, climatic changes.

## 1. INTRODUÇÃO

As feições encontradas em áreas livres de gelo são indicadores de ocorrência de processos glaciológicos, como por exemplo, retrações ou avanços glaciais. As formas de relevo, de acordo com sua espacialização, revelam informações para inferir extensão máxima da geleira, espessura, direção do movimento e padrão de retração glacial (Napieralski *et al.*, 2007), além dos recuos frontais e seus períodos (Benn & Evans, 2010).

As diferentes formas são expostas pela retração no ambiente proglacial (marginais de contato com o gelo atual e distal) e possibilitam reconstruir mudanças da frente da geleira ao longo do tempo, enquanto que as formas de relevo subglaciais fornecem informações relacionadas à direção de seu fluxo e regime termal (Bennett & Glasser, 1996).

Em resposta à retração ambientes sem cobertura de gelo ficam expostos nas zonas marginais das geleiras e o ambiente proglacial, situado frontalmente ao gelo e influenciado pelo mesmo, pelos processos de avanço, recuo e degelo (Slaymaker, 2009). Esse ambiente é controlado por processos fluviais, lacustres ou marinhos que acontecem nas adjacências da geleira e suas formas de relevo são derivadas de transporte de sedimentos (Slaymaker, 2011).

Como consequência do recente recuo de algumas geleiras, processos decorrentes do retrabalhamento deposicional têm sido investigados em ambientes glaciais, como o aumento dos depósitos de fluxos de detritos provenientes de cristas morânicas, considerados como um dos primeiros efeitos das mudanças ambientais (Ballantyne, 2002). Os processos paraglaciais que são influenciados por condições não glaciais formam uma paisagem pós-glacial, dessa forma acontecem alterações, pelo retrabalhamento através do vento, fluxo hídrico e transporte de detritos (Ballantyne, 2002). Comumente os ambientes paraglaciais e periglaciais podem

estar sobrepostos, tendo em vista sua localização próxima à geleira e suas características que podem pertencer a ambos os setores, como a presença de *permafrost*, as formas que podem ser encontradas no periglacial são de encostas com presença de regolitos (Slaymaker, 2011). Assim, esse tipo de ambiente forma-se vinculado a setores deglaciarizados (French & Thorn, 2006).

O objetivo desse artigo é investigar a evolução geomorfológica das áreas livres de gelo associadas às geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa na ilha Rei George (IRG), arquipélagos das Shetlands do Sul, Antártica Marítima.

### 1.1 Área de Estudo

A ilha Rei George possui geleiras de maré e de frente de base terrestre. Geleiras com término no mar podem possuir sua área frontal em formato de falésia e, ter desprendimento de *icebergs* (Simões, 2004), com aceleração de fluxo de desprendimento diminuindo a espessura e aumentando a retração das geleiras (Santos, 2012). As geleiras de base terrestre possuem dinâmica glacial principalmente relacionadas ao clima (Glasser *et al.*, 2011). O campo de gelo Warszawa possui geleiras que fluem para a baía de Maxwell, para o Estreito de Bransfield e para a baía do Almirantado.

Na Ilha Rei George há registros de temperaturas positivas durante os meses de verão (Braun, 2001), mudanças na temperatura atmosférica interanual, alta umidade relativa do ar e cobertura de nuvens constante (Bintanja, 1995).

As geleiras da área de estudo Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, bem como suas áreas livres de gelo, estão localizadas na margem leste do campo de gelo Warszawa, na ilha Rei George, Antártica Marítima (Figura 1). Essas geleiras fluem para a baía do Almirantado e assim como outras na ilha Rei George, têm apresentado contínuo processo de retração nas últimas sete décadas (Arigony-Neto, 2001, Birkenmajer, 2002, Simões *et al.*, 2004, Rosa, 2012, Kejna, *et al.*, 2013, Bonada *et al.*, 2018, Perondi *et al.*, no prelo).

Nas últimas décadas as mudanças de temperatura ocorridas na Península Antártica são expressivas, o oceano Antártico apresenta aumento de temperatura que influencia na desintegração e deglaciação do gelo, além de implicar mudanças na temperatura da ilha Rei George, já que suas massas de ar são provenientes do oceano (Kejna *et al.*, 2013).

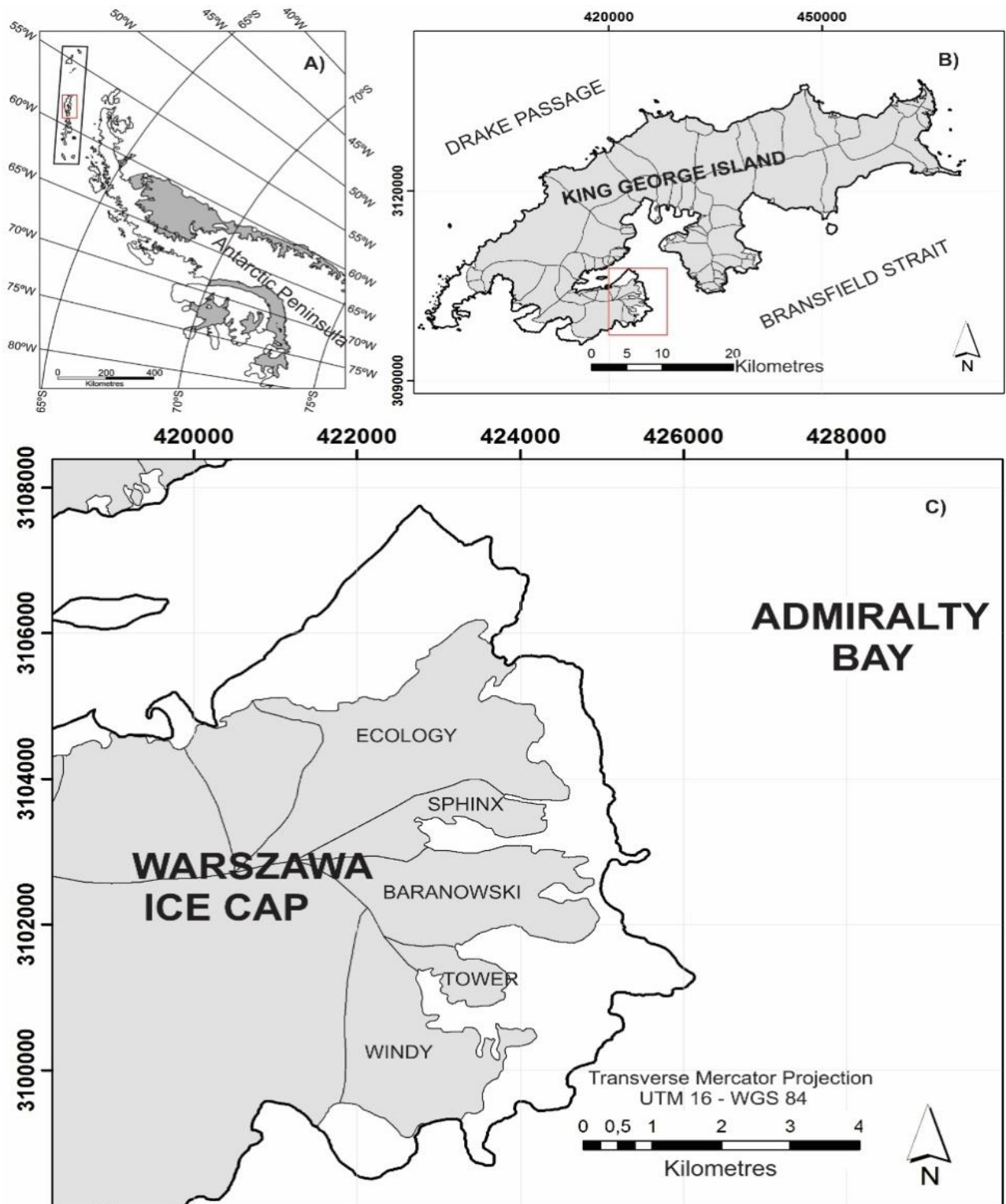


Figura 1- (a) Localização da Península Antártica, (b) Localização da costa leste do campo de gelo Warszawa, (c) Localização das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy e suas áreas livres de gelo.

Turner *et al.*, (2005) afirma que em toda a Península Antártica as mudanças climáticas possuem complexidade espacial e temporal, em relação ao século passado a temperatura média anual desta região aumentou aproximadamente 3,7°

C. Na IRG durante as últimas três décadas o aumento da temperatura foi de 1°C, e as geleiras comportaram-se de forma sensível e essa mudança (Kejna *et al.*, 2013).

O agente climático é responsável por controlar os processos ligados à retração da frente das geleiras e sedimentação na Península Antártica, as variações de temperatura e na precipitação influenciam no degelo e no suprimento de material terrígeno (Aquino, 1999).

Tanto em áreas livres de gelo como em locais cobertos por geleiras a temperatura atmosférica diminui de acordo com a altitude (Kejna, 2008). Em partes mais altas do campo de gelo Warszawa, ocorre queda de temperatura do ar, podendo ser de 0,66 a 0,72°C a cada 100 metros de altitude (Braun *et al.*, 2001).

As consequências deste gradativo aumento de temperatura são inúmeras, dentre eles a desintegração de geleiras e elevação do nível do mar, sendo assim as geleiras deste local estão apresentando acelerada resposta ao aquecimento regional (Kejna *et al.*, 2013; IPCC, 2013). Os dias com precipitação líquida aumentaram nas últimas três décadas combinado com o aumento de dias que a temperatura média foi maior que 0°C a fusão de neve aumenta bem como o balanço negativo (Ferrando, 2009).

## 1.2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta utilizou dados cartográficos e imagens provenientes de diferentes sensores orbitais (figura 2). Foram selecionadas imagens dos satélites WorldView-2 de 2014 e Sentinel-2 de 2017, e MDE Aster GDEM2 e foram considerados dados vetoriais de retração frontal das geleiras de Arigony-Neto (2001) e Perondi *et al.*, (no prelo) referentes à área de estudo.

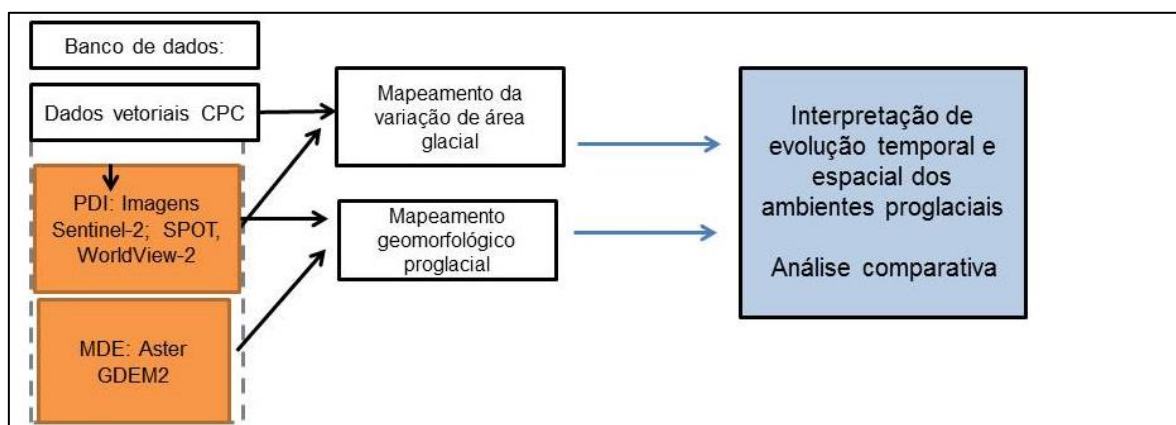


Figura 2- Fluxograma representativo das etapas metodológicas para este trabalho.



O mapeamento geomorfológico glacial foi a base para realizar a interpretação da evolução dos ambientes proglaciais de cada geleira relacionado à retração glacial e análise comparativa (Figura 2).

O mapeamento geomorfológico proglacial envolveu a identificação das feições deposicionais glaciais de meso-escala nas imagens WorldView-2 de 2014 e Sentinel-2 de 2017 e dados obtidos em campo (identificação de processos e formas no verão de 2007). Foram considerados os dados de variação frontal adquiridos por Arigony-Neto (2001) dos anos de 1956, 1979, 1988 e 2000 e determinada variação da posição frontal das geleiras nas imagens Sentinel-2 de 2017, WorldView-2 de 2014 e MDE Aster GDEM2.

O mapa geomorfológico evidenciou a sequência cronológica da formação de depósitos relacionada ao padrão de retração glacial. Com base na interpretação geomorfológica e uso de dados vetoriais de variação de linhas de frentes das geleiras determinadas por imagens de satélite por Perondi *et al.* (no prelo), foram determinados os estágios de evolução do ambiente marginal ao gelo relacionados à retração frontal e os processos geomorfológicos proglaciais, paraglaciais e periglaciais associados. A metodologia foi baseada em estudos de reconstrução do ambiente glacial utilizando como indicador a disposição espacial de formas de relevo, como as morainas, inferindo o processo de avanço e recuo das geleiras (Boulton *et al.*, 1985; Punkari, 1995; Cuffey *et al.*, 2000; Kleman, 2006).

## **2. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **2.1 Evolução dos ambientes marginais ao gelo e da dinâmica glacial**

Foi possível reconstruir os estágios de retração das geleiras através do mapeamento geomorfológico das feições deposicionais de mesoescala paralelos e perpendiculares ao fluxo da geleira, utilizando imagem de satélite de alta resolução.

As feições encontradas na área de estudo são predominantemente; *eskers*, morainas frontais, laterais e latero-frontais, além de locais com núcleos de crescimento de vegetação, canais entrelaçados, canais não entrelaçados e lagos/lagoas (Figura 3).

Entre 1978-2001 a retração foi maior no setor norte da geleira Ecology, em sua área frontal central formou-se a laguna Ecology resultado da deglaciação frontal (Birkenmajer, 2002). Ao sul desta laguna identifica-se morainas frontais que indicam

o limite máximo de avanço da geleira, e seus estágios estacionários, porém ativas, são perpendiculares ao fluxo da geleira (Hambrey, 1994).

Na área proglacial da geleira Baranowski observam-se morainas frontais agrupadas em três complexos: os dois maiores complexos morânicos frontais da área proglacial foram formados recentemente (2000-2017), apresentam-se retrabalhados possivelmente por ação hídrica proveniente do degelo da geleira e o menor dos complexos formou-se entre 1979-2000. Há *eskers* expostos entre meados de 1950-1979 (evidenciado pela linha de frente da geleira) e apenas um *esker* formado entre 2000-2017, estes indicam fluxo de gelo de oeste para leste (Figura 3).

Na área frontal da geleira Tower foram evidenciadas morainas frontais indicando fases de estabilização durante 1950-2000 e um lago formado em meados de 1979-2000 (Figura 3).

A geleira Windy teve acentuada retração na década de 1990 (Birkenmajer, 2002). Identificou-se com formação recente (2000-2017) morainas laterais, indicando que a extensão da geleira avançava para o norte e inúmeros *eskers*, estes formados em contato com o gelo, evidenciando presença de água de degelo e canais antigos fluindo para a margem da geleira (Figura 3).

Na área proglacial da geleira Windy formada próximo à linha de costa há morainas laterais retrabalhadas indicando que a geleira avançava para a baía do Almirantado, lagos sem contato com o gelo e presença de núcleos de vegetação e moraina frontal com sinais de retrabalhamento por ter sua crista descontínua (Figura 3).

O ambiente proglacial da geleira Windy difere-se das demais geleiras, Ecology, Sphinx, Baranowski e Tower, quanto à localização dos *eskers*, estes formados subglacialmente, em contato com o gelo, indicando que a geleira apresentava maiores dimensões.

Estes canais glaciofluviais ligavam-se a laguna presente na área frontal da geleira. tratando-se assim de uma geleira de base termal úmida. Os *eskers* não apresentam características de retrabalhamento, pois podem ter sido expostos recentemente, tendo em vista que a geleira Windy apresentou recente retração frontal (Figura 3).

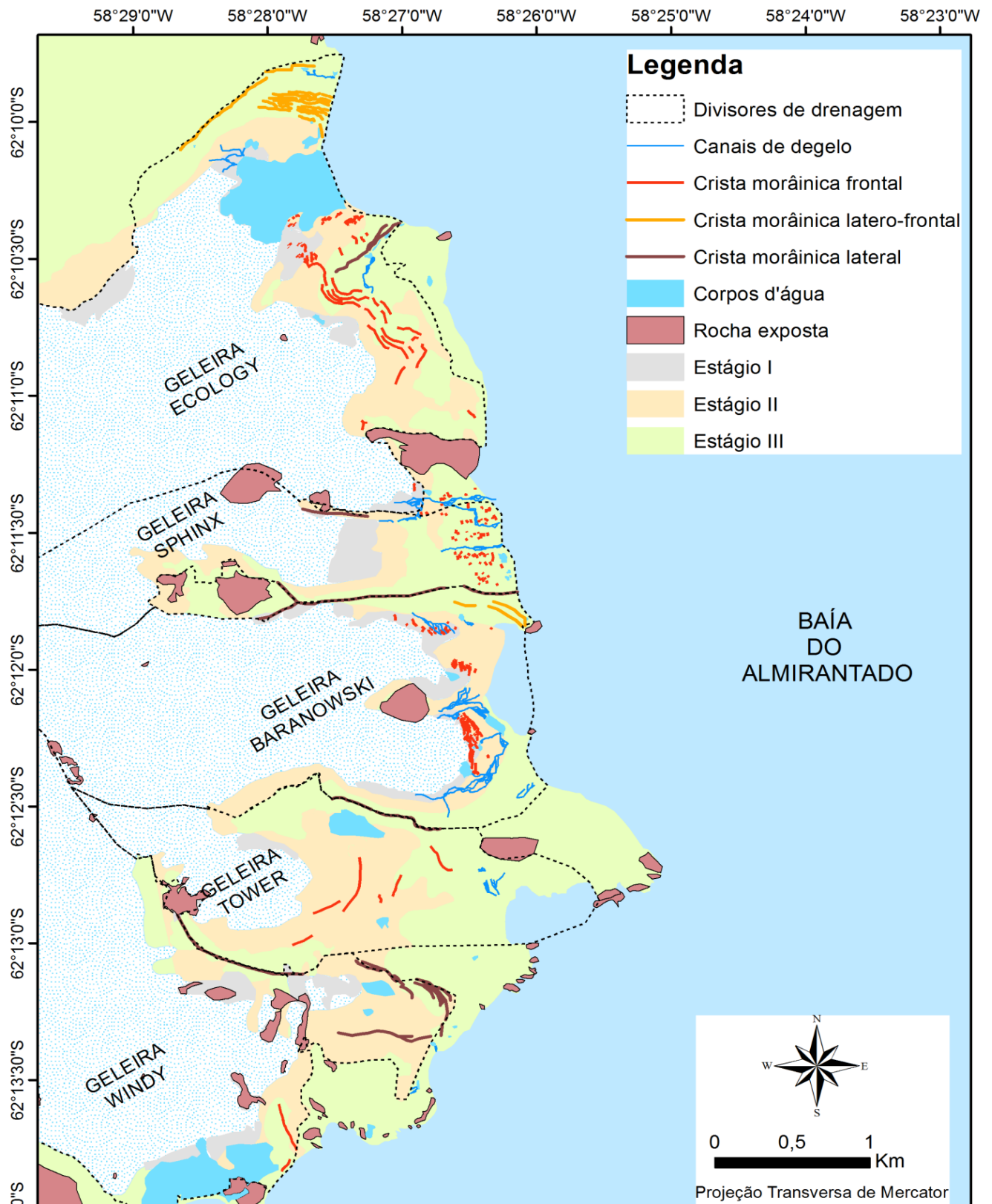


Figura 3 - Mapeamento geomorfológico da margem leste do campo de gelo Warszawa.

O setor frontal da geleira Sphinx, onde a exposição das áreas livres de gelo é mais recente (setor marginal ao gelo) não há registros de formas de relevo, somente

em setores distais à geleira (retração do período entre 1950-1970) há *eskers*, morainas frontais, lagos e canais de drenagem (Figura 3).

A geleira Ecology possui *eskers* (Figura 3) com formação recente (2000-2017), indicando presença de água subglacial (base termal basal úmida) e a direção do fluxo da geleira para nordeste em direção à baía do Almirantado. O ambiente proglacial desta geleira é complexo devido ao processo de fusão da geleira, pois modifica a topografia subglacial, redistribuindo o material na superfície (ROSA *et al.*, 2006).

Morainas latero-frontais foram identificadas apenas nas geleiras Ecology e Baranowski; na primeira apresenta dimensões e quantidade maiores em relação à segunda. Ambas situam-se ao norte das geleiras e distanciadas da mesma, apresentam-se com crista descontínua com evidentes sinais de retrabalhamento e com a parte frontal finalizada na baía do Almirantado possibilitando inferir aproximadamente a antiga posição frontal destas geleiras.

Para a geleira Tower não foram encontrados *eskers* em sua área proglacial, possivelmente por terem sido retrabalhados por atividade paraglacial, já que se situam geralmente próximo as margens das geleiras e estas quando retraem expõem um ambiente instável, com rápidas mudanças nas feições de relevo expostas.

A geomorfologia da área de estudo apresenta diferentes feições glaciais de mesoescala, predominantemente deposicionais. Essas feições trazem importantes informações acerca das geleiras e sua dinamicidade.

Atividades biológicas evidenciam um ambiente periglacial em todas as áreas livres de gelo da área de estudo, com exceção da geleira Windy, caracterizando-as como setores pós-glaciais. Estas geralmente estão situadas próximas à linha de costa e estão relacionadas à fase de retração anterior a 1979.

## **2.2 Reconstrução do ambiente de deglaciação das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa.**

Com base nas formas de relevo expostas na área proglacial, como as cristas morânicas laterais e frontais e *eskers* formados em diferentes períodos, foi possível determinar os paleodivisores das bacias de cada geleira e inferir o comportamento glacial frontal de cada geleira (Figura 4).

Os divisores das bacias de drenagem incluem os paleodivisores de drenagem glacial, quando se encontravam em maior extensão e formaram os vales através de processos de erosão glacial. Algumas geleiras apresentam vales maiores como é o caso de Ecology, Baranowski e Windy, em contrapartida as geleiras Sphinx e Tower são as que possuem vales menores.

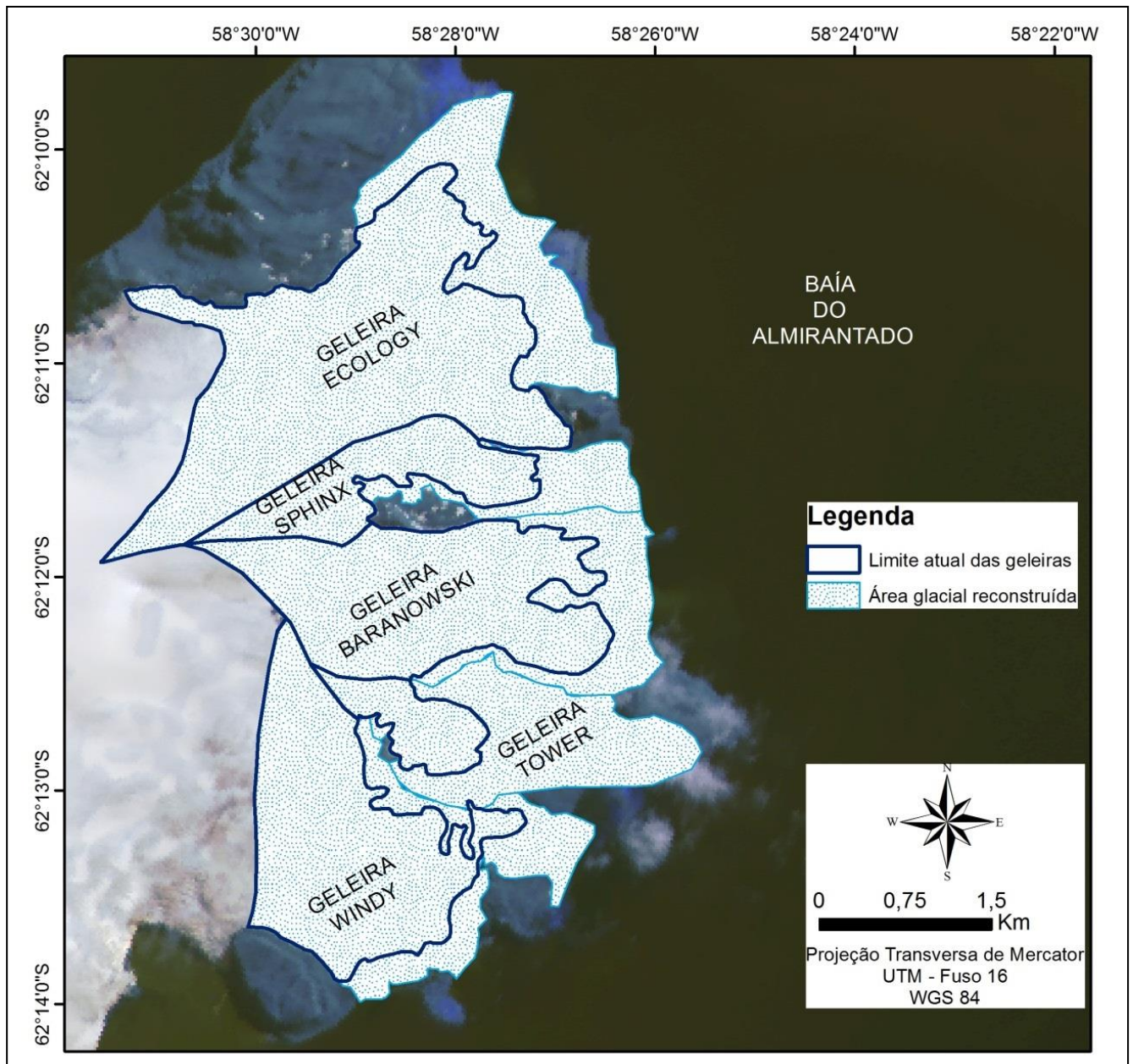


Figura 4 - Reconstrução do ambiente glacial no setor de deglaciação das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa, segundo fases de retração frontal e depósitos expostos na área proglacial.

A partir do mapeamento das formas de relevo caracterizadas como morainas inferiu-se que a retração frontal na área de estudo ocorreu em três fases (Figura 3), sem indícios de reavanço.

As geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy alteraram seu término no período de 1956-2017 (Figura 4), apresentavam término no mar anteriormente à década de 1950, evidenciado com base na reconstrução através de feições morânicas.

Atualmente apresentam-se com término em terra as geleiras Sphinx, Baranowski, Tower e Windy (esta mais recentemente), e com término misto a geleira Ecology, possui término em terra, mas mantém contato com o mar devido a ocorrência de maré (Rosa, 2008), através dessa dinâmica a laguna Ecology conecta-se parcialmente ao sul da geleira Ecology (Petlicki, *et al.*, 2017). Evidencia-se que nenhuma das geleiras apresentou reavanço durante o período 1956-2017 (figura 3).

Foi possível estabelecer uma sequência temporal da formação das feições deposicionais de mesoescala na área proglacial das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, relacionados aos estágios de padrão de retração glacial. A análise possibilitou realizar comparações entre os ambientes livres de gelo de cada geleira e verificar que a evolução de cada um foi diferenciada, com formações de feições em diferentes períodos, retrabalhamento e setores de estabilização do terreno, com presença de atividade paraglacial. Trata-se de ambientes dinâmicos, principalmente próximos a geleira com retrabalhamento de feições pela água de degelo e outros agentes.

A geleira Ecology, com término misto, apresenta morainas latero-frontais elevadas ao norte, mostrando que os maiores níveis de deglaciação deram-se neste setor no último estágio, enquanto que na parte sul há morainas frontais. Estas com pouca extensão e elevação evidenciam pouco tempo de estabilização frontal (Rosa *et al.*, 2009).

A geleira Sphinx, de base terrestre e com fluxo de oeste para leste, não apresenta em áreas proximais registros de feições deposicionais; possivelmente foram retrabalhadas. Com o recuo glacial as áreas livres de cobertura de gelo ficam expostas a aceleradas modificações geomorfológicas, como por exemplo, processos hidrológicos, eólicos e sedimentares citados por Klaar *et al.*, (2015). Mas, em setores

distais há morainas frontais retrabalhadas supostamente por terem sido formadas há mais tempo (no período 1979-2000), todas com pequena extensão.

A geleira Baranowski apresenta morainas latero-frontais exibindo a antiga extensão da geleira, mas com base nas morainas frontais sem grandes dimensões próximas à geleira infere-se que atualmente há acelerada atividade de retração, sugerindo pouco tempo de estabilização da geleira e sem reavanço. Há também *eskers* preservados nas proximidades da baía do Almirantado, indicando a extensão da geleira.

Na área proglacial da geleira Tower há poucos registros de feições deposicionais: algumas morainas frontais indicam fases de estabilização e duas morainas frontais retrabalhadas inferem seu avanço lateral máximo; próximo à linha de costa observa-se colonização de vegetação.

A geleira Windy teve grandes mudanças na última década, seu término foi alterado de maré para base terrestre, dessa forma modificando sua dinâmica, podendo ter retração mais lenta e estável em comparação a períodos anteriores.

As paisagens formadas na área frontal das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy indicam que a retração frontal é contínua, sem reavanço, algumas geleiras perdendo área mais rapidamente e outras de forma menos acelerada.

Evidencia-se, através de registros de retração frontal das geleiras aliado ao mapeamento geomorfológico, que a área proglacial de cada geleira tem evolução diferenciada. A geleira Windy apresentou acelerada retração principalmente na última década, enquanto que outras geleiras, como a Ecology, por exemplo, há registros de retração frontal desde a década de 1950. As formas expostas na área proglacial de Windy, como os *eskers*, evidenciam a formação de um ambiente proglacial recente.

### **2.3 Estágios de retração das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy**

Obteve-se a interpretação dos estágios de evolução do ambiente proglacial das geleiras da área de estudo desde meados de 1950 (Tabela 1) através da identificação das formas e processos geomorfológicos e da reconstrução das posições de estabilizações das frentes das geleiras durante a retração. Evidencia-se uma sucessão de ambientes geomorfológicos: de um estágio mais recente (estágio

l) próximo a atual frente da geleira para o estágio II e III que foram antigos ambientes proglaciais marginais ao gelo.

Tabela 1- Estágios da Evolução do Ambiente Proglacial.

<b>Resposta à retração glacial</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Feições indicadoras</b>	<b>Processos geomorfológicos predominantes</b>	<b>Padrão de drenagem proglacial</b>	<b>Transição no tempo e espaço</b>
Estágio I	Proglacial: proximal	Depósitos glaciais (morainas e eskers), lagos em contato com o gelo.	Atividade glacial e paraglacial.	Lago em contato com o gelo	Recém exposto pela retração (2000-2017) e marginal à geleira.
Estágio II	Paraglacial: distal	Feições de relevo retrabalhadas pela ação da água.	Paraglacial e pouca glacial	Lagos perdem contato com gelo	Distal
Estágio III	Periglacial	Canais entrelaçados ou não, formação de vegetação.	Periglacial inicial	Canais entrelaçados e alagadiços	Distal, não mais proglacial

Cada estágio de evolução do ambiente proglacial é caracterizado por processos e formas diferenciados entre si e para cada geleira. O estágio I é o mais atual, trata-se da área deglaciada entre 2000-2017. Esta área era ocupada mais recentemente pela extensão das geleiras, e, portanto, é mais dinâmica geomorfológica, pois recebe influência direta do comportamento de retração das geleiras. Como registro dessa fase são encontradas formas de relevo como morainas e lagos em contato com a geleira.

No estágio II, em locais distais à geleira, a influência desta diminui. Sua formação está relacionada ao período de 1979 a 2000. Atividade paraglacial predomina e diminui a ação dos processos glaciais. Os lagos continuam a receber água de degelo, mas através de canais conectores onde ocorre o retrabalhamento dos depósitos que foram expostos na fase anterior, como morainas frontais e eskers.

O estágio III é representado por um setor distal, ou seja, não marginal ao gelo. Desta forma, não representa mais um ambiente proglacial e há início da atividade periglacial (intemperismo químico, com influência de aporte de água de degelo da neve e gelo). É verificado um maior desenvolvimento de vegetação, com



colonização de musgos e líquens, o que influencia na maior estabilização do ambiente aos processos de retrabalhamento paraglacial e periglacial.

### **2.3.1 Comparativo entre as geleiras e a sucessão entre os estágios:**

As geleiras apresentam em cada estágio a formação diferenciada de seus ambientes proglaciais marginais ao gelo. No estágio I a área proglacial da geleira Ecology teve a formação de lagos em contato com a geleira, alguns canais de drenagem e continuidade da ligação com a baía do Almirantado através de uma laguna, além da presença de *eskers*. A formação de *eskers* indica que existiram canais de drenagem, a geleira possuía provavelmente base termal úmida e mostra qual o sentido direcional do fluxo da geleira (Hambrey, 1994), neste caso fluindo para leste. Durante o estágio II na área proglacial da geleira Ecology, lagos se formaram sem contato com a geleira; a presença de morainas frontais evidencia a extensão máxima da geleira. No estágio III formam-se morainas latero-frontais ao norte da geleira, evidenciando retração neste setor, moraina lateral, canais entrelaçados, lagos. A vegetação, representada por musgos e líquens, ocorre no setor distal da geleira, onde não há influência da mesma (Figura 5).

Com a formação de morainas laterais externas há evidência da extensão máxima da geleira, correspondendo provavelmente ao término no mar das geleiras. As morainas frontais desta fase estariam na forma de bancos morânicos (submarinos). Esta fase última máxima extensão das geleiras poderia estar relacionada ao avanço na Pequena Idade Gelo, evidenciada por Hall (2007) através da datação de morainas de avanço na Península Fildes (setor mais a oeste da Ilha Rei George).

A geleira Sphinx em sua área proglacial, no estágio I apresenta morainas laterais, indicando sua extensão e formação de canais de drenagem, estes canais evidenciam que a base da geleira é termal úmida. Durante o estágio II, a moraina lateral expõe-se ao norte da geleira indicando retração neste setor; é nesta fase que ocorre a separação da geleira Ecology. Canais de drenagem também são formados. Enquanto que no estágio III, a moraina lateral ao sul da geleira Sphinx demonstra que a maior retração dessa fase aconteceu neste setor e morainas frontais identificam avanços máximos do glacial, *eskers* confirmando a direção leste do fluxo de gelo. No setor distal da geleira lagos e canais entrelaçados se desenvolvem.



Figura 5 - Planície glaciofluvial da geleira Sphinx.  
Fonte: Bremer (2008).

Durante o estágio I, na área proglacial da geleira Baranowski, lagos e canais de drenagem formam-se em contato com a geleira, além de morainas frontais, *esker* e moraina lateral. No estágio II os lagos não têm contato com a geleira, e canais entrelaçados, morainas frontais e *eskers* são observados. No estágio III há registros de morainas laterais ao sul e ao norte da geleira e também morainas latero frontais, possibilitando inferir a extensão máxima do gelo; *eskers* indicam fluxo leste da geleira. Atualmente distal à geleira há lagos, canais de drenagem e musgos e líquens que indicam atividade periglacial.

A geleira Tower no estágio I apresenta formas de relevo em sua área proglacial: moraina lateral ao sul, indicando retração, e moraina frontal indicando até onde o gelo alcançava. No estágio II morainas frontais e lagos sem contato com o gelo, no entanto, são em parte abastecidos por água proveniente do degelo do permafrost e precipitação líquida, que ocorre nos meses de verão (Bremer, 2008). No estágio III, em setores mais distais da geleira, formam-se áreas vegetadas e canais entrelaçados; o aparecimento de vegetação (musgos e líquens) demonstra que neste ponto não há mais influência glacial.

A geleira Windy, durante o estágio I, torna-se de base terrestre, expondo *eskers* em sua área frontal indicando direção de fluxo para sudeste e morainas

laterais ao norte em sua área proglacial. Durante o estágio II, são formadas morainas laterais, lagos sem contato glacial, moraina frontal e complexo lagunar frontal (Figura 6). No estágio III ocorrem áreas vegetadas, lagos, moraina frontal e canais de drenagem indicando que sua zona frontal se estendia até a faixa praial.



Figura 6- Complexo lagunar frontal na zona proglacial da geleira Windy.  
Fonte: Bremer (2008)

Os ambientes proglaciais das geleiras da área de estudo diferem-se entre si em alguns aspectos, como por exemplo, a geleira Ecology, que em seu primeiro estágio apresenta morainas frontais, *eskers* e lagos, enquanto que a geleira Sphinx apresenta apenas moraina lateral ao sul e ao norte. A geleira Baranowski assemelha-se a geleira Ecology, também no estágio I, com exposição de diversas feições; a geleira Tower, com pouca retração neste estágio, expõe somente uma moraina frontal e outra lateral ao sul. A geleira Windy apresenta *eskers* e moraina lateral ao norte, indicando sua extensão lateral máxima anteriormente a esse período.

A geleira Windy, no estágio II, registra ao norte morainas laterais retrabalhadas, e uma moraina frontal; as geleiras Tower e Sphinx possuem algumas morainas frontais indicando fases de estabilidade das geleiras; já a geleira Baranowski apresenta neste estágio ambiente proglacial diversificado, com muitos canais entrelaçados que retrabalham os depósitos locais, lagos e *eskers* e morainas frontais, assemelhando-se a área proglacial de Ecology.

No estágio III, lagos e canais de drenagem estão presentes nas áreas livres de gelo de todas as geleiras da área de estudo, bem como as morainas frontais, exceto na geleira Baranowski, e morainas laterais. As geleiras Windy, Ecology, Baranowski e Tower possuem em seus setores distais à geleira a colonização de

musgos e líquens. As morainas latero-frontais estão presentes apenas na área proglacial de Ecology e Baranowski.

Podem ser encontrados setores com feições de relevo em condições de retrabalhamento, uma vez que estão expostas há mais tempo em relação ao estágio mais recente (estágio I). Verifica-se que as morainas latero-frontais ao norte da geleira Ecology e as morainas laterais ao norte da geleira Windy estão retrabalhadas, estas remetem ao estágio III, mais antigo, dessa forma, suas modificações devem-se à ação hídrica e também eólica. Sendo assim, é possível inferir através deste retrabalhamento e contínuo processo de retração frontal das geleiras que, com o decorrer do tempo, as feições nos setores proximais atuais às geleiras futuramente podem apresentar características dos setores distais.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A reconstrução de paleodivisores, através das feições morânicas das bacias das geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy evidenciam que a antiga extensão frontal das geleiras alcançava a baía do Almirantado, e hoje todas possuem término em terra, exceto a geleira Ecology que possui término misto. Sendo assim, está ocorrendo rápida evolução do ambiente marginal destas geleiras.

Através das análises geomorfológicas inferiu-se a ocorrência de três estágios da evolução do ambiente proglacial: estágio I, o mais recente e dinâmico, formado no período de 2000-2017. O estágio II, cuja formação remete ao período 1979-2000, com atividade paraglacial maior do que a glacial. E o estágio III, mais antigo, formado no período de 1956-1979, com atividade periglacial inicial, formação de áreas vegetadas e intemperismo químico.

Está ocorrendo uma rápida evolução dos ambientes marginais ao gelo e os processos geomorfológicos observados revelam que não há estabilização da deglaciação frontal das geleiras. A topografia do embasamento rochoso mostrou influenciar a disposição espacial das geleiras durante a retração e também a evolução geomorfológica.

Essa evolução causa mudanças ambientais na área frontal das geleiras, como é o caso da geleira Windy, que na última década mudou de geleira de maré para terrestre, dessa forma pode apresentar nestas condições estabilização em sua retração frontal. As formas expostas na área proglacial da Windy, como os *eskers*, evidenciam a formação de um ambiente proglacial recente.

Algumas posições inferidas das fases de estabilização das geleiras podem conter inconsistência, pois os resultados podem ter sido influenciados pelo retrabalhamento paraglacial das feições. A ação da água, oriunda do degelo de neve e da precipitação, é responsável pelo retrabalhamento de diversas feições, como as morainas, que em determinados pontos estão perdendo sua forma linear.

Agradecimentos: A FAPERGS, o CNPq e o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) forneceram o suporte para essa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ARIGONY-NETO, J. 2001. Determinação e Interpretação de Características Glaciológicas e Geográficas com Sistema de Informações Geográficas na Área Antártica Especialmente Gerenciada Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 98 p.
- BALLANTYNE, C. K. 2002. Paraglacial Geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21:1935–2017.
- BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. 2010. *Glaciers and Glaciation*. Hodder Education, London, 802p.
- BENNETT M.R.; GLASSER, N.F. 1996. *Glacial Geology – Ice Sheets and Landforms*. John Wiley & Sons Ltd, England, 364 p.
- BIRKENMAJER, K. 2002. Retreat of Ecology Glacier, Admiralty Bay, King George Island (South Shetland Islands, West Antarctica). 1956-2001. *Bulletin of Polish Academy of Sciences: Earth Sciences*, 50:5–19.
- BONADA, B.; ROSA, K. K.; MEDEIROS, A. M. 2018. Caracterização Geomorfológica das Áreas Livres de Gelo em Resposta da Tendência de Retração da Geleira Polar Club, Península Potter, Ilha Rei George, Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19:149-167
- BOULTON, G.S; SMITH, G. D.; JONES, A. S.; NEWSOME. J. 1985. Glacial Geology and Glaciology of the Last Mid-latitude Ice Sheets. *Journal of Geological Society of London*, 142: 447-474.
- BREMER, U. F. 2008. Solos e Geomorfologia da Borda Leste da Península Warszawa, Ilha Rei George, Antártica Marítima. Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa. 135 p.
- CUFFEY, K. M.; CONWAY, H.; GADES, A. M.; HALLET, B.; LORRAIN, R.; SEVERINGHAUS, J.P.; STHEIG, E. J.; VAUGHN, B.; WHITE, J.W.C. 2000. Entrainment at Cold Glacier Beds. *Geology*, 28: 351-354.
- HAMBREY, M. 1994. *Glacial Environments*. UCL Press, London, 296 p.
- FRENCH H.M., THORN C. 2006. The Changing Nature of Periglacial Geomorphology. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 3: 1–33.
- GLASSER, N. F.; SCAMBOS T. A.; BOHLANDER J.; TRUFFER M.; PETTIT, E.; DAVIES, B. J. 2011. From Ice-shelf Tributary to Tidewater Glacier: Continued Rapid Recession, Acceleration and Thinning of Röhss Glacier Following the 1995 Collapse

of the Prince Gustav Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *Journal of Glaciology*, 57:397–406.

HALL, B. 2007. Late-Holocene advance of the Collins Ice Cap, King George Island, South Shetland Islands. *The Holocene*, 17:1253–1258.

KLAAR, M. DJ.; KIDD, C.; MALONE, E.; BARTLETT, R.; PINAY, G.; CHAPIN, S.; MILNER, A. 2015. Vegetation Succession in Deglaciaded Landscapes: Implications for Sediment and Landscape Stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40:1088-1100.

KEJNA, M; ARAZNY, A.; SOBOTA, I. 2013. Climatic change on King George Island in the Years 1948 – 2011. *Polish Polar Research*, 34: 213-235.

KLEMAN, J.; HATTESTRAND, C.; STROEVEN, A. P.; JANSSON, K. J.; ANGELIS, H.; BORGSTROM, I. 2006. Reconstruction of Paleo-ice Sheets-inversion of their Glacial Geomorphological Record. In: KNIGHT, P. G. (Ed). *Glacier Science and Environmental Change*. Blackwell Publishing Ltd. Oxford. 192-198p.

NAPIERALSKI, J.; HARBOR, J.; LI, Y. K. 2007. Glacial Geomorphology and Geographic Information Systems. *Earth Science Review*, 85:1-22.

PERONDI, C.; ROSA, K.K.; VEETIL, B. K. Mudanças Glaciais Recentes no Setor Oriental do Campo de Gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica: Escalas De Tempo de Resposta e Novas Condições de Término Glacial. *Revista Antarctic Science*, Submetido.

PETLICKI, M.; SZILLO, J.; MACDONELL, S.; VIVERO, S.; BIALIK. 2017. Recent Deceleration of the Ice Elevation Change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). *Remote Sensing*, 9:1-18.

PUNKARI, M. 1995. Glacial Systems in the Zone of Confluence Between the Scandinavian and Novaya Zemlya Ice Sheets. *Quaternary Science Reviews*, 14:589-603.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. 2006. Dinâmica Glacial e Características Sedimentares Resultantes na Zona Proglacial da Geleira Ecology - Baía Do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2:51 – 60.

ROSA, K. K. 2008. Formas e Processos do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 139 p.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. J.; SIMÕES, J. C. 2009. Feições Sedimentológicas e Geomorfológicas do Ambiente de Deglaciação das Geleiras Wanda e Ecology, Ilha Rei George - Antártica. *Revista Pesquisas em Geociências*, 37: 315-326.

ROSA, K. K. 2012. Dinâmica Glacial, Sedimentológica e Variações Ambientais em Geleiras na Enseada Martel, Ilha Rei George, Shetlands do Sul. Tese de doutorado. Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 184 p.

SANTOS, V.L.C. 2012. Estudo da Dinâmica de Geleiras de Maré da Península Antártica Através de Imagens SAR de Alta Resolução. Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande, 86 p.

SIMÕES, J.C. 2004. Glossário da Língua Portuguesa da Neve, do Gelo e Termos Correlatos. Pesquisa Antártica Brasileira. 119–154.

SIMÕES, J.C.; FERRON, F.; BERNARDO, R.; ARISTARAIN, A.; STIEVENARD, M.; POUCHET, M.; DELMAS, R. 2004. Ice Core Study from the King George Island, South Shetlands, Antarctica. *Earth Surface Process and Landforms*, 30: 885 – 900.

SLAYMAKER, O. 2009. Proglacial, Periglacial or Paraglacial? *The Geological Society*, 320:71 – 84.

SLAYMAKER, O. 2011. Criteria to Distinguish Between Periglacial, Proglacial and Paraglacial Environments. *Quaestiones Geographicae*, 30:85 - 94.

## **CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS**

---

Ao analisar a dinâmica de retração das geleiras da margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, Antártica no período de 1956-2017, evidenciou-se um processo contínuo de retração, sem fases de reavanço, nas geleiras Ecology, Sphinx, Baranowski, Tower e Windy, as quais apresentaram uma perda total da área de 33%, 25%, 37%, 71% e 30%, respectivamente, no período. A geleira Ecology perdeu mais área comparada às demais, totalizando 2,3 km<sup>2</sup>.

A geleira Windy apresentou mudanças em seu término de maré para terrestre, dessa forma, modificando suas condições de configuração de término. Nesta atual fase pode apresentar maior estabilidade do processo de retração por não ter mais influência direta da ação das ondas e temperatura do mar na ablação frontal. Em sua área proglacial há formas de relevo deposicionais expostas, formando uma área proglacial com a exposição de formas de relevo deposicionais glaciais.

A retração frontal das geleiras da área de estudo está conectada as alterações da temperatura atmosférica da Ilha Rei George, conforme foi evidenciado em análise de séries históricas de dados de temperatura média atmosférica no inverno no período.

Utilizando as imagens Sentinel-2 e WorldView-2 estimou-se o aumento das áreas sem cobertura de gelo de 6,3 km<sup>2</sup> na margem leste do campo de gelo Warszawa entre 1956-2017. A imagem WordView-2, por sua melhor resolução espacial (0,5m) e também a imagem Sentinel-2, proporcionam melhora na qualidade dos mapeamentos e facilitam a delimitação da frente da geleira em relação às outras imagens disponíveis. Para os dados do Sentinel-2, são escassas as publicações de trabalhos que tenha utilizado tais imagens para verificar variação frontal glacial e identificação de geoformas glaciais.

A utilização do Aster GDEM-2 (30 m de resolução) apenas foi possível após a correção de picos e depressões inexistentes na área de estudo. A partir deste MDE gerou-se produtos geomorfométricos (mapas de hipsometria, declividade, aspecto e



modelo de sombreamento analítico) que possibilitaram inferir características sobre declividade, elevação e orientação das vertentes do ambiente

Baseados na integração em ambiente de SIG, produtos geomorfométricos e em imagens Sentinel-2 de 2017 e WorldView-2 de 2014 foi realizado o mapeamento geomorfológico. Foi verificado que nas áreas expostas há feições de relevo deposicionais de mesoescala como como *eskers*, morainas frontais, laterais e latero-frontais, além de lagos, lagunas e canais de drenagem. Mapear estas feições de relevo possibilitaram o entendimento da evolução do ambiente proglacial recente na margem leste do campo de gelo Warszawa, Ilha Rei George, sendo relevante para evidenciar questões atuais e passadas do comportamento das geleiras.

Após mapear a disposição espacial das morainas foi possível reconstruir os paleodivisores das geleiras, inferindo que em suas dimensões originais e como a área frontal atingia a Baía do Almirantado. Em comparação, atualmente, as geleiras Sphinx, Baranowski, Tower e Windy possuem término em terra, e a geleira Ecology possui término misto. Dessa forma, o mapeamento geomorfológico foi um instrumento importante para o monitoramento destes ambientes glaciais.

Observando a disposição das formas de relevo no ambiente proglacial e com base nas retrações frontais inferiu-se a ocorrência de três estágios sucessionais da evolução do ambiente proglacial proximal e distal à margem da geleira. O estágio I é o mais atual e dinâmico, formou-se entre 2000-2017, é proximal às geleiras, há lagos ainda em contato com a geleira e suas feições são recentemente expostas à ação paraglacial. O estágio II, formado anteriormente ao primeiro (1979-2000), possui feições já retrabalhadas possivelmente pela ação hídrica e pode estar mais estável aos processos de retrabalhamento pós-deposicional. E o estágio III, formado entre 1956-1979, possui atividade biológica, com musgos e líquens, e evidencia sucessão para um ambiente predominantemente periglacial.

No decorrer deste trabalho detectou-se que há rápida evolução dos ambientes marginais ao gelo em um processo contínuo de sucessão dos ambientes (proglacial-paraglacial-periglacial) em resposta à retração da geleira. Algumas geleiras, como a Windy teve seu término alterado de maré para terrestre na última década, podendo, dessa forma, apresentar estabilização em seu recuo frontal em relação aos anos anteriores. Esta geleira apresenta apenas o estágio I de evolução geomorfológica proglacial, ou seja, ainda possui processos geomorfológicos que

levam a um alto retrabalhamento pós-deposicional das feições. Estas são características de um ambiente mais dinâmico em relação aos processos geomorfológicos glaciais e paraglaciais (evidência de um ambiente proglacial).

A evolução do ambiente proglacial ocorre com o processo de retração das geleiras, tornando a área relacionada ao estágio III a mais distante da frente da geleira, em relação à área do estágio I, que se encontra marginal ao

gelo. Desta forma, evidencia-se que com a distância da frente da geleira diminui a sua influência glacial e também há um maior tempo em que as feições deposicionais estão expostas à ação dos processos de retrabalhamento paraglacial. Assim, o setor do estágio III é uma área geomorfológicamente mais estável (menos processos de movimentos de massa, transporte sedimentar eólico e escoamento superficial da água devido a presença de cobertura vegetal e menores declividades) e possui condições de sucessão para um ambiente periglacial.

No contexto de ocorrência de mudanças climáticas, evidenciadas na área de estudo, é relevante desenvolver estudos caracterizando os ambientes livres de gelo e sua evolução recente, pois há ambientes que são altamente sensíveis aos efeitos das alterações do clima, como os ambientes proglaciais, paraglaciais e periglaciais, sendo alvos importantes de monitoramento.

Devido às mudanças climáticas é importante a caracterização da evolução geomorfológica dos ambientes proglaciais, pois há ambientes que se apresentam sensíveis como as áreas de lagos, os quais são diretamente afetados pela tendência multianual de mudanças de temperaturas média do ar.

Os resultados obtidos nessa dissertação mostram recentes mudanças ambientais na margem leste do campo de gelo Warszawa. Sendo assim, é importante o contínuo monitoramento, para compreender cenários futuros para estas geleiras e o ambiente proglacial, pois estes são indicadores de respostas em curto espaço de tempo aos efeitos de mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AMBINAKUDIGE, S.; JOSHI, K. Remote sensing of cryosphere. In: ESCALANTE, B. R. (Org). **Remote Sensing – Applications**. Rijeka: INTECH, p. 369 – 380. 2012.
- ANDERSON, J.; MOLNIA, B. F. Glacial-marine sedimentation. Short course in geology. **American Geophysical Union**, Washington, v. 9, 127 p. 1989.
- ANDRADE, A. M.; POELKING, E. L.; SCHAEFER, C. E. R.; FILHO FERNANDES, E. I.; JUSTINO, F. B. Mudanças climáticas regionais e seus reflexos nas variações da frente da geleira Polar Club, península Potter, ilha Rei George, entre 1986 e 2009. In: **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba, p.5624-5631. 2011.
- ANDRADE, A. M. **Delimitação de geoambientes na península Potter, ilha Rei George (Antártica Marítima), utilizando dados COSMO-SkyMed e QuickBird**. Dissertação. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 150 p.2013.
- ARIGONY-NETO, J. **Determinação e interpretação de características glaciológicas e geográficas com Sistema de Informações Geográficas na Área Antártica Especialmente Gerenciada Baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. 98 p. 2001.
- ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C.; BREMER, U. F.; DANI, N. Perspectivas para o gerenciamento ambiental da Baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 15, p. 92 – 99. 2002.
- AQUINO, F.E. **Sedimentação moderna associada à geleira de maré Lange, ilha Rei George, Antártica**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de mestrado. 106 p. 1999.
- ATCPs. Protocol on environmental protection to the Antarctic Treaty, With Annexes. **Polar Record**, v. 29, p. 256 – 275. 1993.
- BARTON, C. M. The geology of South Shetland Islands. III, The stratigraphy of King George Island. **British Antarctic Survey Report**, v. 44, p. 1-33. 1965.
- BALLANTYNE, C. K.; Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, v. 21, p. 1935 – 2017. 2002.
- BATTKE Z. Admiralty Bay, King George island, 1:50000. **Romer State Cartographical Publishing House**, Warszawa. 1990.
- BENN D. I.; WARREN, C. R.; MOTTRAM, R. H. Calving processes and the dynamics of Calving glaciers. 522 **Earth-Sci. Revs.**, v 82, p. 143–179. 2007.
- BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. **Glaciers and glaciation**. 2<sup>a</sup> ed. London: Hodder Education. 802p. 2010.

BENNETT M.R.; GLASSER, N.F. **Glacial geology – ice sheets and landforms**. England: John Wiley & Sons Ltd, 364 p. 1996.

BINTANJA, R. The local surface energy balance of the Ecology glacier, King George island, Antarctica: Measurement and modeling. **Antarctic Science**, v. 7, n. 3, p. 315-325. 1995.

BIRKENMAJER, K. Age of the Penguin Island Volcano, South Shetland Islands (West Antarctica), by the lichenometric method. **Bulletin Polish Academy of Sciences** v. 27, n. 1-2, p. 69-76. 1979.

BIRKENMAJER, K. Discovery of Pliocene glaciation on King George island, South Shetland Islands (West Antarctica). **Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences**, v. 27, p. 59-67. 1980a.

BIRKENMAJER, K. Tertiary volcanic-sedimentary succession at Admiralty Bay, King George island (South Shetland Islands, Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, v. 64, p. 8-65. 1980b.

BIRKENMAJER, K. Raise marine features and glacial history in the Vicinity of Arctowski station, King George island (South Shetland Islands, Antarctica). **Quaternary Science Reviews**, v. 29, n.2, p. 109-117. 1981.

BIRKENMAJER, K. Late Cenozoic phases of block-faulting on King George island (South Shetland Islands, West Antarctica). **Bulletin Polish Academy of Sciences**, v. 30, p. 21-32. 1982.

BIRKENMAJER, K. Cenozoic phases of block-faulting on King George island (South Shetland Islands, Antarctica). **Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences**, v. 30, n. 1/2, p. 21-32. 1983.

BIRKENMAJER, K. King George island. In DALZIEL, I.W.D., BIRKENMAJER, K., MPODOZIS, C., RAMOS, V.A.; THOMSON, M.R.A (Leaders): **Tectonics of the Scotia Arc. Antarctica**, p. 144-121. 1989.

BIRKENMAJER, K. Tertiary glaciation in the South Shetland Islands, west Antarctica: evaluation of data. In: Thomson, M.R.A., Crame, J.A. & Thomson, J.W. (Eds), **Geological evolution of Antarctica**. Cambridge: Cambridge University Press, p. 627-632. 1991.

BIRKENMAJER K. Polish geological research on King George island. **Polish Polar Research**, v. 17, p. 125-141. 1996.

BIRKENMAJER, K. Geology of the northern coast of King George island, South Shetland Islands (West Antarctica). **Studia Geologica Polonica**, v. 110, p. 7-26. 1997.

BIRKENMAJER, K. Retreat of Ecology glacier, Admiralty Bay, King George island (South Shetland Islands, West Antarctica). 1956-2001. **Bulletin of Polish Academy of Sciences: Earth Sciences**, v. 50, n.1, p 5–19. 2002.

BONADA, B.; ROSA, K. K.; ANDRADE, A. M. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo em resposta da tendência de retração da geleira Polar Club,

- Península Potter, ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, pp, 149-167. 2018.
- BRAUN M.; SAURER H.; VOGT S.; SIMÕES J.C. and GROSSMANN H. The Influence of large-scale atmospheric circulation on the surface energy balance of the King George island ice. **International Journal of Climatology**, v. 21, p 21–36. 2001a.
- BRAUN, M. **Ablation on the ice cap of King George island (Antarctica)**. PhD. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Feiburg, 165 p. 2001.
- BRAUN, M.; SAURER, H.; GOßMANN, H. Climate, energy fluxes and ablation rates on the ice cap of King George island. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 87-104. 2004.
- BREMER, U.F. **Morfologia e bacias de drenagem da cobertura de gelo da ilha Rei George, Antártica**. Dissertação (Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 117p. 1998.
- BREMER, U. F. **Solos e geomorfologia da borda leste da península Warszawa, ilha Rei George, Antártica marítima**. Minas Gerais: Universidade Federal de Viçosa. Tese de Doutorado. 135 p. 2008.
- CARRASCO, J.F. Decadal changes in the near-surface air temperature in the western side of the Antarctic peninsula. **Scientific Research**, v. 3, p. 275–281, 2013.
- CARRIVICK, J. L.; DAVIES, B. J.; GLASSER, N. F.; NYVLT, D.; HAMBREY, M. J. Late-holocene changes in character and behaviour of land-terminating glaciers on James Ross Island, Antarctica. **Journal of Glaciology**, v 58, p. 1176 - 1190. 2012.
- CHURCH, M.; RYDER, J. M. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. **Bulletin Geological Society of America**, v, 83, p. 3059–3072. 1972.
- CUFFEY, K. M.; PATERSON, W.S. **Physics of glaciers**. Oxford: Pergamon/Elsevier. 4<sup>a</sup> ed. 704 p. 2010.
- CURL, J.E. **A glacial history of the South Shetland Islands, Antarctica**. Ohio State University, Institute of Polar Studies Report, v. 63, 129 p. 1980.
- DAVIES, B.J.; GOLLEDGE, N.R.; GLASSER, N.F.; CARRIVICK, J.L.; LIGTENBERG, S.R.M.; BARRAND, N.E.; VAN DEN BROEKE, M.R.; HAMBREY, M.J.; SMELLIE, J.L. Modelled glacier response to centennial temperature and precipitation trends on the Antarctic peninsula. **Nature Climate Change**, 2014.
- DOMACK, E.; LEVANTER, A.; DUNBAR, R.; TAYLOR, F.; BRACHFIELD, S.; SJUNNESKOG, C. Chronology of the palmer deep site, antarctic peninsula: a holocene palaeoenvironmental reference for the Circum-Antarctic. **The Holocene**, v. 11, p. 1-9. 2001.
- DREWRY, D. J.; JORDAN, S. R.; JANKOWSKI, E. Measured properties of the antarctic ice sheet: surface configuration, ice thickness, volume and bedrock characteristics. **Annals of Glaciology**, v. 3, p. 83 – 91. 1982.
- DREWRY, D. **Glacial geologic processes**. Londres: Edward Arnold, 276p. 1986.

ESTAÇÃO POLONESA ARCTOWSKI. Aspa 128. Disponível em: <http://www.arctowski.pl/index.php?p=158>. Acesso em: 20/02/2017.

EVANS, D. J.A. Ice-marginal terrestrial landsystems: active temperate glacier margins. In: EVANS, D. J. A. (Ed.) **Glacial Landsystems**. London, p. 12 – 37. 2003.

FERRANDO, F.A.; VIEIRA, R.; ROSA, K.K. Sobre el calentamiento global en la isla Rey Jorge: procesos y evidencias en el glaciar Wanda y su entorno. **Revista Informaciones Geográficas**, v.41, p.25-40. 2009.

FOREIGN; COMMONWEALTH OFFICE. **List of protected areas in Antarctica**. London. In collaboration with the British Antarctic survey. 1997.

FRENCH H.M., THORN C. The changing nature of periglacial geomorphology. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 3, p. 1–33. 2006.

GLASSER, N. F.; SCAMBOS T. A.; BOHLANDER J.; TRUFFER M.; PETTIT, E.; DAVIES, B. J. From ice-shelf tributary to tidewater glacier: continued rapid recession, acceleration and thinning of Röhss glacier following the 1995 collapse of the Prince Gustav ice shelf, Antarctic Peninsula. **Journal of Glaciology**, v. 57, p. 397–406. 2011.

GROENEWEG, W. J.; BEUNGK, F. F. The petrography and geochemistry of the king george island supergroup and the Admiralty Bay group volcanics, south shetland islands. In J. López-Martinez (Ed.). **Geología de la Antártida Occidental**. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, España, p. 43-60. 1992.

HALL, B. L. Late-holocene advance of the collins ice cap, King George island, South Shetland islands. **The Holocene**, v. 17, n. 8, p. 1253-1258. 2007.

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

HATTESTRAND, C.; KOLKA, V.; STROEVEN, A. The keiva ice marginal zone on the Kola península, NW Rússia – a key component for reconstructing the paleoglaciology of the northeastern fennoscandian ice sheet. **Boreas**, 36 p. 352 – 370. 2007.

HEADLAND, R. K.; KEAGE, P. L. Activities on the King George island group, South Shetlands Island, Antarctica. **Polar Record**, v. 22, p. 475 – 484. 1985.

HUBBARD, B.; GLASSER, N. **Field techniques in glaciology and glacial geomorphology**. John Wiley & Sons Lda. Inglaterra. 2005.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change 2007: **Climate change 2007: Synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment. IPCC, Geneva, Switzerland. 2007.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013: The physical science basis**. Contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2013.

JOUGHIN, I.; SMITH, B. E.; HOLLAND, D. M. Sensitivity of 21st century sea level to ocean-induced thinning of Pine island Glacier, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 37, 2010.

KEJNA, M., LÁSKA, K.; CAPUTA, Z. Recession of the Ecology glacier in the period 1961 – 1996. In: Glowacki; Bednarek (eds.) **Polish Polar Studies. 25 th International Polar Symposium**, Warszawa, p. 121 - 128. 1998.

- KEJNA, M. Topoclimatic conditions in the Vicinity of the Arctowski Station (King George Island, Antarctica) During the summer season of 2006/2007. **Polish Polar Research**, v. 29, n. 2, p. 95–116. 2008
- KEJNA, M.; ARAZNY, A.; SOBOTA, I. Climatic change on King George island in the years 1948 – 2011. **Polish Polar Research**, v. 34, n. 2, p. 213-235. 2013.
- KNAP W.H.; OERLEMANS J.; CADEE M. Climate sensitivity of the ice cap of King George island, South Shetland Islands, Antarctica. **Annals of Glaciology**, v. 23, p. 154-159. 1996.
- KOPPEL, M.; SYLWESTER, R.; RIVERA, A.; HALLET, B. Variations in sediment yield over the advance and retreat of a Calving Glacier, laguna San Rafael, north Patagonian Icefield. **Quaternary Research**, v, 73, p. 84 – 95. 2010.
- MARTÍNEZ DE PISON, E.; LOPEZ-MARTÍNEZ, J.; ARCHE, A. Relieve, unidades y tipos glaciares de la isla Livingston, Islas Shetlands del Sur. In: **Congreso Geológico de España y 3º congreso Latinoamericano de Geología**. Salamanca España, p. 261 – 269. 1992.
- MÄUSBACHER, R.; MÜLLER, J.; MUNNICH, M.; SCHMIDT, R. Evolution of postglacial sedimentation in Antarctic lakes (King George Island). **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.33, p. 219-234. 1989.
- MEIER, M. F. Columbia glacier during rapid retreat: interactions between glacier flow and iceberg calving dynamics. **Proceedings, Workshop on the Calving Rate of West Greenland Glaciers in Response to Climate Change**. Copenhagen. 171 p. 1994.
- MELO, R; VIERA, G; CASELLI, A.; RAMOS, M. Susceptibility modeling of hummocky terrain distribution using the information value method (Deception Island, Antarctic Peninsula). **Geomorphology**, v. 155-156, p. 85-95. 2012.
- NAPIERALSKI, J.; HARBOR, J.; LI, Y. K. Glacial geomorphology and geographic information systems. **Earth Science Review**, v. 85, p. 1-22. 2007.
- OTTO, J. C.; SMITH, M. J. Geomorphological mapping. **Butish Society for Geomorphology**. v. 6, p. 1-10. 2013.
- PATERSON, W.S.B. **The physics of glaciers**. Oxford. 3<sup>a</sup> ed. 480 p. 1994.
- PETLICKI, M.; SZILLO, J.; MACDONELL, S.; VIVERO, S.; BIALIK. Recent deceleration of the ice elevation change of Ecology Glacier (King George Island, Antarctica). **Remote Sensing**, v. 9, n. 6. 2017.
- PIASECKI J. Wybrane problemy przebiegu elementów meteorologicznych rejonie lodowca sphinx podczas lata antarktycznego 1978/79 R. (Zatoka Admiralicji, Wyspa Króla Jerzego) [selected problems of meteorological elements in the Spinx glacier region (Admiralty Bay, King George Island) during the Antarctic summer 1978/1979]. **Acta Universitatis Wratislaviensis**, v. 738, p. 173–192. 1988.
- POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLAT, S. Glaciologia. In: **Principios de geología: técnicas, modelos e teorías**. 14<sup>a</sup> ed. Bookman. p. 872 – 899. 2013.

- PRITCHARD, H. D.; ARTHERN, R. J.; VAUGHAN, D.G.; EDWARDS, L. A. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. **Nature**, v. 461, n 7266, p. 971–975. 2009.
- RABASSA, J.; SKVARCA, P.; BERTANI, L.; MAZZONI, E. Glacier inventory of James Ross and Vega Islands, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**., v. 3, p. 260–264. 1982.
- RACHLEWICZ, Z G. Ablacja lodowca Ekologii, Wyspa Króla Jerzego, (Szetlandy Południowe ) w roku 1991. **Materiały XXII Sympozjum Polarnego, Wrocław-Książ**, p. 61-68. 1995.
- RACHLEWICZ, Z G. Zmienność facjalna osadów przedpola lodowca Ekologii - Wyspa Króla Jerzego - Szetlandy Południowe. In: A. Kostrzewski (ed.): **Geneza, Litologia i Stratygrafia Utworów Czwartorzędowych**, v. 57, p. 249-262 . 1996.
- RACHLEWICZ, Z G. Events of mid-winter thawing in the Vicinity of H. Arctowski Station, South Shetlands. **Polish Polar Research**, v. 18, p. 15-24, 1997.
- RACHLEWICZ, G. Glacial relief and deposits of the western coast of Admiralty Bay, King George island, South Shetlands Islands. **Polish Polar Research**, v. 20, n. 2, p. 89 – 130. 1999.
- RAKUSA – SUSZCZEWSKI, S. Introduction: The structure and functioning of the near shore ecosystem. In: RAKUSA – SUSZCZEWSKI, S. (Ed) **The maritime antarctic coastal ecosystem of Admiralty bay**. Warsaw. **Polish Academy of Sciences**. Department of Antarctic Biology, p 32 – 34. 1993.
- RAU F,; MAUZ, F.; DE ANGELIS H,; JAÑA, R.; NETO, J. A.; SKVARCA, P.; VOGT, S.; SAURER, H.; GOSSMANN, H. Variations of glacier frontal positions on the northern Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**., v. 39, p. 525–530. 2004a.
- RAU F,; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S. J. S, RAU, P. B. Illustrated GLIMS **Glacier Classification Manual Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory**. GLIM`S Regional Center Antárctic Peninsula. Alemanha. Institut Für Physische Geographie, Freiburg, 36 p. 2004b.
- REES, W. G. **Remote sensing of snow and ice**. Taylor & Francis. 2006.
- RIGNOT, E.; BAMBER, J.; VAN DEN BROEKE, M.; DAVIS, C.; LI, Y.; VAN DE BERG, W.; VAN MEIJGAARD, E. Recent mass loss of the Antarctic ice sheet from dynamic thinning. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 106–110. 2008.
- RIIHIMAKI, C .A.; MACGREGOR, K.R.; ANDERSON, R.S.; ANDERSON, S.P.; LOSO, M.G. Sediment evacuation and glacial erosion rates at a small Alpine glacier. **Journal of Geophysical Research, Earth Surface**, v 10, 2005.
- ROCHA – CAMPOS, A. C.; SANTOS, P. R.; Ação geológica do gelo. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. (Org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Editora USP, 2ª Ed. 558 p. 2009.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Dinâmica glacial e características sedimentares resultantes na zona proglacial da geleira Ecology - baía do Almirantado, Ilha Rei George – Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n 2, p. 51 – 60. 2006.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERRANDO, F. J.; SIMÕES, J. C. Feições sedimentológicas e geomorfológicas do ambiente de deglaciação das geleiras



Wanda e Ecology, ilha Rei George - Antártica. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 37, n. 1, p. 315-326. 2009.

ROSA, K.K.; VIEIRA, R.; VELHO, L.F.; HAMMES, F.; SIMÕES, F.L.; MARQUETTO, L.; SIMÕES, J.C. Processos de evacuação sedimentar por canais de água de degelo fluvioglaciais na geleira Wanda, ilha Rei George, Antártica In: **Livro de resumos: Geología siglo XXI: Llave para el desarrollo de nuestros recursos naturales. VI Congreso Uruguayo de Geología**, Cidade de Minas, p.32-33. 2010.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERNADEZ, G, B.; SIMÕES, F. L.; SIMÕES, J. C. Glacial landforms and glaciological processes of the temperate Wanda glacier, South Shetlands. **Investigaciones Geográficas**, v. 43, p. 3 – 16. 2011.

ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; ACUÑA, F.; SIMÕES, J. Interpretação geomorfológica e evolução do ambiente de deglaciação da geleira Ecology, ilha Rei George, Antártica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v 5, p. 81-93. 2012a.

ROSA, K. K. **Dinâmica glacial, sedimentológica e variações ambientais em geleiras na enseada Martel, ilha Rei George, Shetlands do Sul**. Tese de doutorado. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 184 p. 2012 b.

ROSA, K. K.; MENDES JR., C. W.; ARIGONY-NETO, J.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Use of COSMO-SkyMed imagery for recognition of geomorphological features in the Martel inlet ice-free areas, King George island, Antarctica. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, p. 8.936-8.951. 2013.

ROSA, K.K.; FREIBERGER, V.L.; VIEIRA, R.; ROSA, C.A; SIMÕES, J.C. Mudanças glaciais recentes e variabilidade climática na ilha Rei George, Antártica. **Revista Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, nº 2. 2014, p. 176 – 183. 2014a.

ROSA, K. K.; SIMÕES, C. L.; MAROTTA, H.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Recent glaciological and geomorphological changes in Kraków ice field and Collins glacier, King George island, Antarctica. In: **SCAR OPEN SCIENCE CONFERENCE, 2014**, Auckland. p. 38. 2014b.

ROSA, K.K; MENDES, C. W.; NETO, J.A.; PETSCH, C.; SIMÕES, J. C. Potencial do uso das imagens COSMO-SkyMed na investigação da dinâmica de áreas alagadas em ambientes glaciais recentemente expostos, campo de gelo Kraków, ilha Rei George, Antártica. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**. João Pessoa-PB. 2015.

ROSA, K. K.; PETSCH, C. ; SIMÕES, C. L. ; CAMPANA, A. S. ; GONCALVES, M. A.; VIEL, J. A. Evolução de ambientes proglaciais em resposta às mudanças climáticas. In: XI SINAGEO, 2016, Maringá. **Anais do Simpósio Brasileiro de Geomorfologia**, 2016.

SANTOS, M. A. R. **O Turismo na área antártica especialmente gerenciada Baía do Almirantado**. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 138 p. 2005.

SANTOS, V.L.C. **Estudo da dinâmica de geleiras de maré da península Antártica Através de imagens SAR de alta resolução**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 86 p., 2012.

- SCAMBOS, T. A.; BOHLANDER, J. A.; SHUMAN, C. A.; SKVARCA, P. Glacier thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n.18402, p. 1–4. 2004.
- SCHOMACKER, A.; KJÆR, K. Quantification of dead-ice melting in ice-cored moraines at the high-artic glacier Holmstronbreen, Iceland. **Svalbard Boreas**, v. 37, n. 2, p. 211-225. 2008.
- SEONG, Y.B.; LIM, H.S.; YOON, H.I.; LEE, Y.I.; KIM, Y.; OWEN, L.A. A preliminary geomorphic overview of late quaternary glacier fluctuations in the South Shetland Islands, West Antarctica: **Journal of the Korean Geographical Society**, n. 41, p. 513-526. 2006.
- SHARP, R.P. **Living ice**. Cambridge: Cambridge University press, 225 p. 1988.
- SIMÕES, J.C.; BREMER, U.F. Investigations of King George island ice cover using ERS-1/SAR and SPOT imagery. **Revista SELPER**, v. 11 n. 1-2, p. 56-60. 1995.
- SIMÕES, J.C.; BREMER, U.F.; AQUINO, F.E.; FERRON, F.A. Morphology and variations of glacial drainage basins in King George island icefield, Antarctica. **Annals of Glaciology**, v. 29, p. 220-224. 1999.
- SIMÕES, J.C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**. p. 119 – 154. 2004.
- SIMÕES, J.C.; FERRON, F.; BERNARDO, R.; ARISTARAIN, A.; STIEVENARD, M.; POUCHET, M.; DELMAS, R. Ice core study from the King George island, South Shetlands, Antarctica. **Earth Surface Process and Landforms**, v. 30, n. 7, p. 885 – 900. 2004.
- SIMÕES, J. C. GARCIA, C. A. E.; EVANGELISTA, H.; CAMPOS, L. S.; MATA, M.M.; BREMER, U. F. **Antártica e as mudanças globais: um desafio para a humanidade**. José Goldemberg (Coord.). **Série Sustentabilidade**. São Paulo: Blucher. 168p. 2011.
- SIMÕES, C. L.; ROSA, K. K.; CZAPELA, F. F.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Collins glacier retreat process and regional climatic variations, King George island, Antarctica. **Geographical Review**, v. 105, n. 4, p. 462 - 471. 2015.
- SIMÕES, C. L. **Retração das geleiras Drummond e Widdowson em respostas às recentes mudanças ambientais na península Antártica (1957–2016)**. Dissertação. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 79p. 2017.
- SKVARCA, P.; ROTT, H.; NAGLER T. Satellite imagery, a base line for glacier variation study on James Ross Island, Antarctica. **Annals of Glaciology**, v. 21, p. 291–296. 1995.
- SLAYMAKER, O.; KELLY, R.E.J. The cryosphere and global environmental Change. **Blackwell Publishing**. 2007.
- SLAYMAKER, O. Proglacial, periglacial or paraglacial? **The Geological Society, London**, n 320, p. 71 – 84. 2009.
- SLAYMAKER, O. Criteria to distinguish between periglacial, proglacial and paraglacial environments. **Quaestiones Geographicae**, v. 30, p. 85 - 94. 2011.

- SOBOTA, I.; KEJNA, M.; ARAZ'NY, A. Short-term mass changes and retreat of the Ecology and Sphinx glacier system, King George island, Antarctic Peninsula. **Antarctic Science**, v. 27, p. 500–510. 2015.
- SUGDEN, D. E.; JOHN B. S. **Glaciers and landscape**. London: Edward Arnold Ltda, 376 p. 1976.
- SUGDEN, D. E.; JOHN B. S. **Glaciers and landscape**: A geomorphological approach. London; New York: Editora Edward Arnold, 2 ed. 376 p. 1984.
- THOMAS, R.; RIGNOT, E.; CASASSA, G.; KANAGARATNAM, P.; ACUNA, C.; AKINS, T.; BRECHER, H.; FREDERICK, E.; GOGINENI, P.; KRABILL, W.; MANIZADE, S.; RAMAMOORTHY, H.; RIVERA, A.; RUSSELL, R.; SONNTAG, J.; SWIFT, R.; YUNGEL, J.; ZWALLEY, J. Accelerated sea-level rise from west Antarctica. **Science**, v. 306, p. 255–258. 2004.
- THOMSON, M. R. A.; PANKHURST, R. J.; CLARKSON, P.D. The Antarctic Peninsula a late mesozoic – cenozoic arc (Review). In: Oliver, R. L.; James, P. R.; Jago, J. B. (Eds) **Antarctic Earth Science**. Canberra: Australian Academy of Science; Cambridge, p. 328–333. 1983.
- TOKARSKI, A. K. Structural events in the south shetlands islands (Antarctica). III. Barton Horst, King George Island. **Studia Geologica Polonica**, v. 90, p. 7-38. 1987.
- TURNER, J.; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J.; LACHLAN-COPE, T.A.; CARLETON, A.M.; JONES, P.D.; LAGUN, V.; REID, P.A.; IAGOVKINA, S. The SCAR READER Project: toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. **Journal of Climate**, v. 17, p. 2890-2898. 2004.
- TURNER, J.; BINDSCHADLER, R.; CONVEY, P.; PRISCO, G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D.; MAYEWSKI, P.; SUMMERHAYES, C. Antarctic climate change and the environment. Cambridge. **Scientific Committee on Antarctic Research**, p. 1-32. 2009.
- TURNER, J.; COLWELL, S. R.; MARSHALL, G. J.; LACHLAN-COPE, T. A.; CARLETON, A. M.; JONES, P. D.; LAGUN, V.; REID, P. A.; IAGOVKINA, S. Antarctic climate change during the last 50 years. **Journal of Climatology**, v. 25, p. 279-294. 2005.
- VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C.; ROSSATO, M. S. AQUINO, F. E. Feições geomórficas e sedimentares associadas à retração da geleira Ecology, baía do Almirantado: Implicações para a dinâmica do gelo e regime térmico. **XII Simpósio de Pesquisa Antártica**. São Paulo. 2004.
- WENDT, J.; RIVERA, A.; WENDT, A.; BOWN, F.; ZAMORA, R.; CASASSA, G.; BRAVO, C.; Recent ice-surface elevation changes of Fleming glacier in response to the removal of the Wordie ice shelf, Antarctic peninsula. **Annals of Glaciology**, v. 51, n 55, p. 97–102. 2010.
- YOON, H.H.; PARK, B.K.; KIM, Y.; KIM, D. Glaciomarine sedimentation and its paleoceanographic implications along the fiord margins in the South Shetland islands, Antarctica during the Last 6000 years. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 157, p. 189-211. 2000.