

# Rápida evolução do ambiente marginal às geleiras do setor leste do Campo de Gelo *Warszawa*, Ilha Rei George, Antártica Marítima

## *Rapid ice-marginal evolution in Warszawa Ice Cap East Sector glaciers, King George Island, Maritime Antarctica*

Cleiva Perondi<sup>ac</sup>, Kátia Kellem da Rosa<sup>ad</sup>, Rosemary Vieira<sup>be</sup>, Jefferson Cardia Simões<sup>af</sup>

<sup>a</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, <sup>b</sup>Universidade Federal Fluminense  
<sup>c</sup>[cleivaperondi@gmail.com](mailto:cleivaperondi@gmail.com), <sup>d</sup>[katia.rosa@ufrgs.br](mailto:katia.rosa@ufrgs.br), <sup>e</sup>[rosemaryvieira@id.uff.br](mailto:rosemaryvieira@id.uff.br), <sup>f</sup>[jefferson.simoess@ufrgs.br](mailto:jefferson.simoess@ufrgs.br)

### 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 (III) há processos paraglaciais intensos com a exposição recente de formas de relevos 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 de relevos deposicionais proglaciais estão retrabalhadas e ainda há o desenvolvimento de drenagem glaciofluvial. No estágio I 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 III é 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 terrestre, exceto a geleira *Ecology* que atualmente possui término misto. A topografia do embasamento rochoso mostrou influenciar a disposição espacial das geleiras durante a retração e a evolução geomorfológica.

**Palavras-chave:** Geomorfologia glacial; retração glacial; reconstrução paleoglacial; 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). Based on moraine features was generated the geomorphological mapping of ice-marginal areas 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 (III) 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 I 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 III is most dynamic and formed in the last two decades (2000-2017). 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 deposicionais de relevo encontradas em áreas livres de gelo são indicadoras de ocorrência de processos glaciológicos, como por exemplo, retrações ou avanços glaciais. As formas de relevo, de acordo com sua espacialização, revelam informações sobre 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 as

formas de relevo subglaciais fornecem informações relacionadas à direção de seu fluxo e regime termal (Bennett & Glasser, 1996).

Em resposta à retração glacial, o ambiente proglacial, situado frontalmente à geleira, é influenciado pela mesma através de seus avanços, recuos e degelo (Slaymaker, 2009). Esse ambiente livre de gelo 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 de 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 de relevo que podem ser encontradas no ambiente periglacial são de encostas com presença de regolitos (Slaymaker, 2011). Assim, esse tipo de ambiente forma-se vinculado a setores deglacializados (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 IRG possui geleiras de maré e com término em terra. Geleiras com término no mar podem ter sua área frontal em formato de falésia e apresentar desprendimento de *icebergs* (Simões, 2004). Com a aceleração de fluxo de desprendimento, diminui a espessura e aumenta a retração glacial (Santos, 2012). As geleiras de base terrestre possuem seu comportamento relacionadas ao clima, principalmente (Glasser *et al.* 2011). Rosa *et al.* (2020) mostram que as geleiras de término terrestre tiveram menor retração frontal em comparação com aquelas de término marinho da margem leste do campo de gelo *Warszawa*.

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 (Figura 1). Na IRG 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*, IRG, Antártica Marítima. Essas geleiras fluem em direção à baía do Almirantado e, assim como outras na mesma ilha, 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.* 2019, Rosa *et al.* 2020).

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 degelo, além de implicar mudanças na temperatura da IRG, já que suas massas de ar são provenientes do oceano (Kejna *et al.* 2013).

Turner *et al.* (2005) afirmam 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 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 desse gradativo aumento de temperatura são inúmeras, dentre elas a desintegração glacial 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 para a área de estudo, 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).

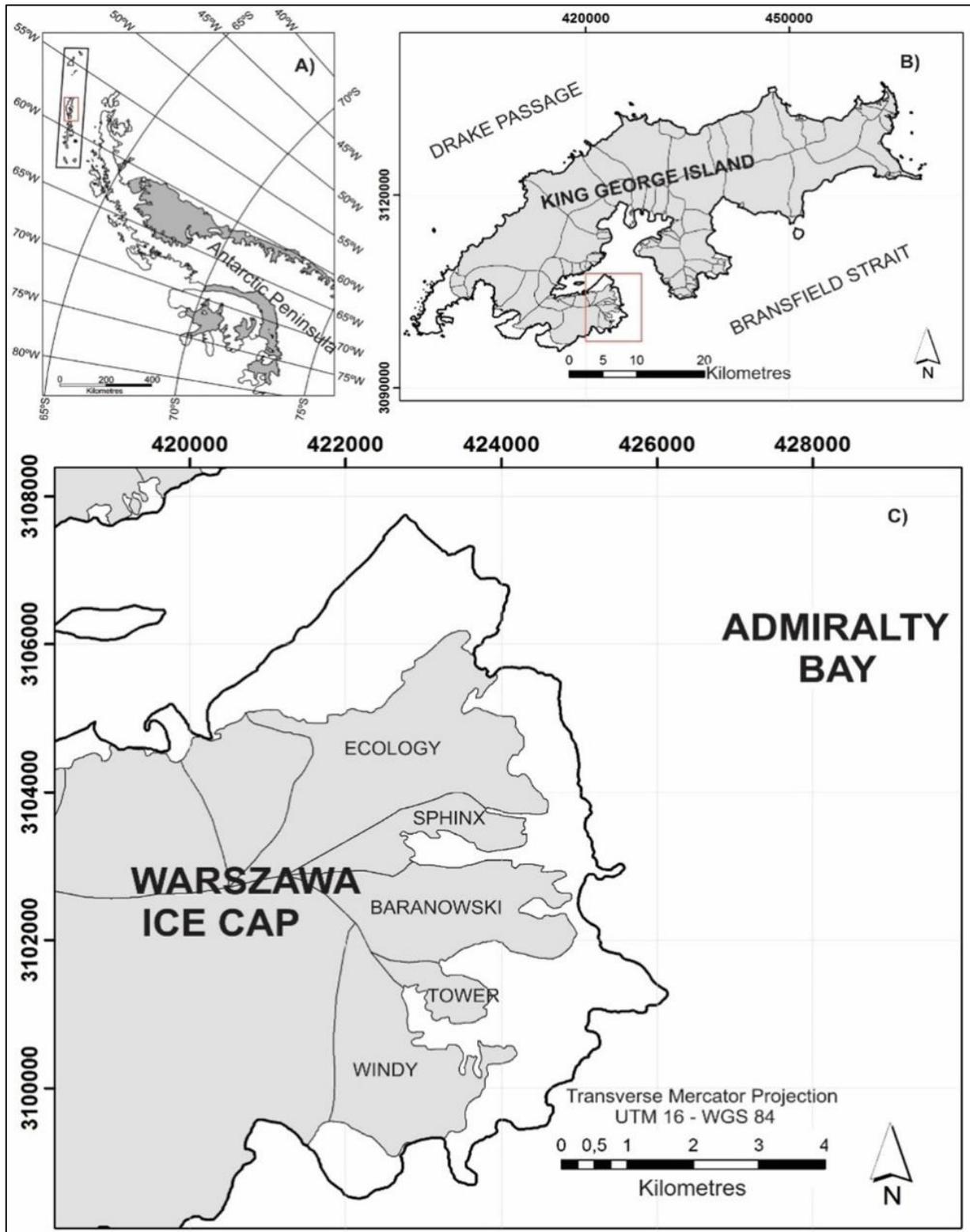


Figura 1- (a) Localização da Península Antártica, (b) Localização da margem leste do campo de gelo *Warszawa*, (c) Localização das geleiras *Ecology*, *Sphinx*, *Baranowski*, *Tower* e *Windy* e suas áreas livres de gelo. Adaptado de Perondi *et al.* (2019).

## 1.2 Materiais e métodos

A metodologia proposta utilizou dados cartográficos e imagens provenientes de diferentes sensores orbitais. Foram selecionadas imagens dos satélites *WorldView-2* de 2014 e *Sentinel-2* de 2017, e

foram considerados *shapefiles* de retração frontal das geleiras de Arigony-Neto (2001) e Rosa *et al.* (2020), disponibilizados pelo Centro Polar e Climático (CPC), referentes a área de estudo. 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).

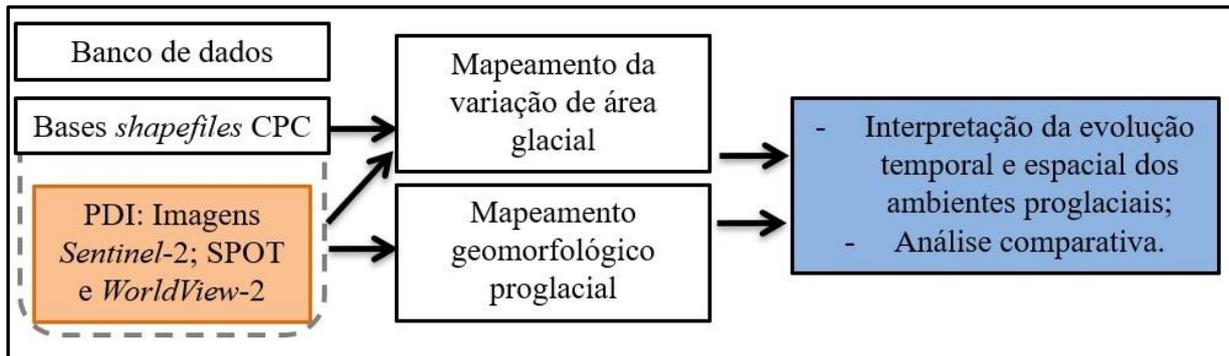


Figura 2- Fluxograma representativo das etapas metodológicas para este trabalho.

O mapeamento geomorfológico proglacial envolveu a identificação das feições deposicionais glaciais de mesoescala 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 e 2019) nas áreas livres de gelo na IRG por equipes do CPC e do Laboratório de Processos Sedimentares e Ambientais – UFF (LAPSA). 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 e *WorldView-2* de 2014.

O mapa geomorfológico evidenciou a seqüência cronológica da formação de depósitos relacionada ao padrão de retração glacial, com base na interpretação geomorfológica e uso de *shapefiles* de variação de linhas de frentes das geleiras determinadas por imagens de satélite por Rosa *et al.* (2020).

Foram determinados os estágios de evolução do ambiente marginal ao gelo relacionados à retração frontal e aos processos geomorfológicos proglaciais, paraglaciais e periglaciais associados. A cronologia para o estágio I integrou uso de vetores das frentes glaciais (de 1956, 1979 e 1988) e indicadores da antiga margem glacial, como as morainas latero-frontais (Boulton *et al.* 1985; Punkari, 1995; Cuffey *et al.* 2000; Kleman *et al.* 2006). A cronologia para a interpretação do estágio II e estágio III é determinada por vetores das frentes glaciais de 2000 e de 2017, respectivamente.

## 2. Resultados

### 2.1 Evolução dos ambientes marginais ao gelo

Foi possível reconstruir os estágios de retração das geleiras através do mapeamento geomorfológico, elaborado por Perondi *et al.* (2019), das feições deposicionais de mesoescala paralelos e perpendiculares ao fluxo da geleira, utilizando imagem de satélite de alta resolução (Figura 3).

As feições encontradas na área de estudo são predominantemente *eskers*, morainas frontais, laterais e latero-frontais, além de locais com núcleos de vegetação, canais de água de degelo entrelaçados ou não entrelaçados e lagos/lagoas (Figura 4).

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 identificam-se morainas frontais que marcam o limite máximo de avanço da geleira e seus estágios estacionários, essas feições são perpendiculares ao fluxo da geleira (Hambrey, 1994).

Na área proglacial da geleira *Baranowski* são observadas morainas frontais agrupadas em três complexos: os dois maiores complexos morânicos frontais da área proglacial foram formados recentemente (2000-2017), apresentam-se retrabalhados por ação hídrica proveniente do degelo glacial e o menor dos complexos formou-se entre 1979-2000 (Figura 4). Há *eskers* expostos entre meados de 1950-1979 (evidenciado pela linha de frente da geleira) e apenas um *esker* formado entre 2000-2017, que indicam fluxo de gelo de oeste para leste.

Na área frontal da geleira *Tower* foram evidenciadas morainas frontais indicando fases de estabilização durante 1950-2000 e um lago formado entre de 1979-2000 (Figura 4).

A geleira *Windy* teve acentuada retração na década de 1990 (Birkenmajer, 2002). Foram identificadas, com formação recente (2000-2017), morainas laterais (Figura 4) indicando que a extensão da geleira avançava para o norte, e diversos *eskers*, formados em contato com o gelo, evidenciando presença de água de degelo e canais subglaciais antigos fluindo para a margem da geleira.

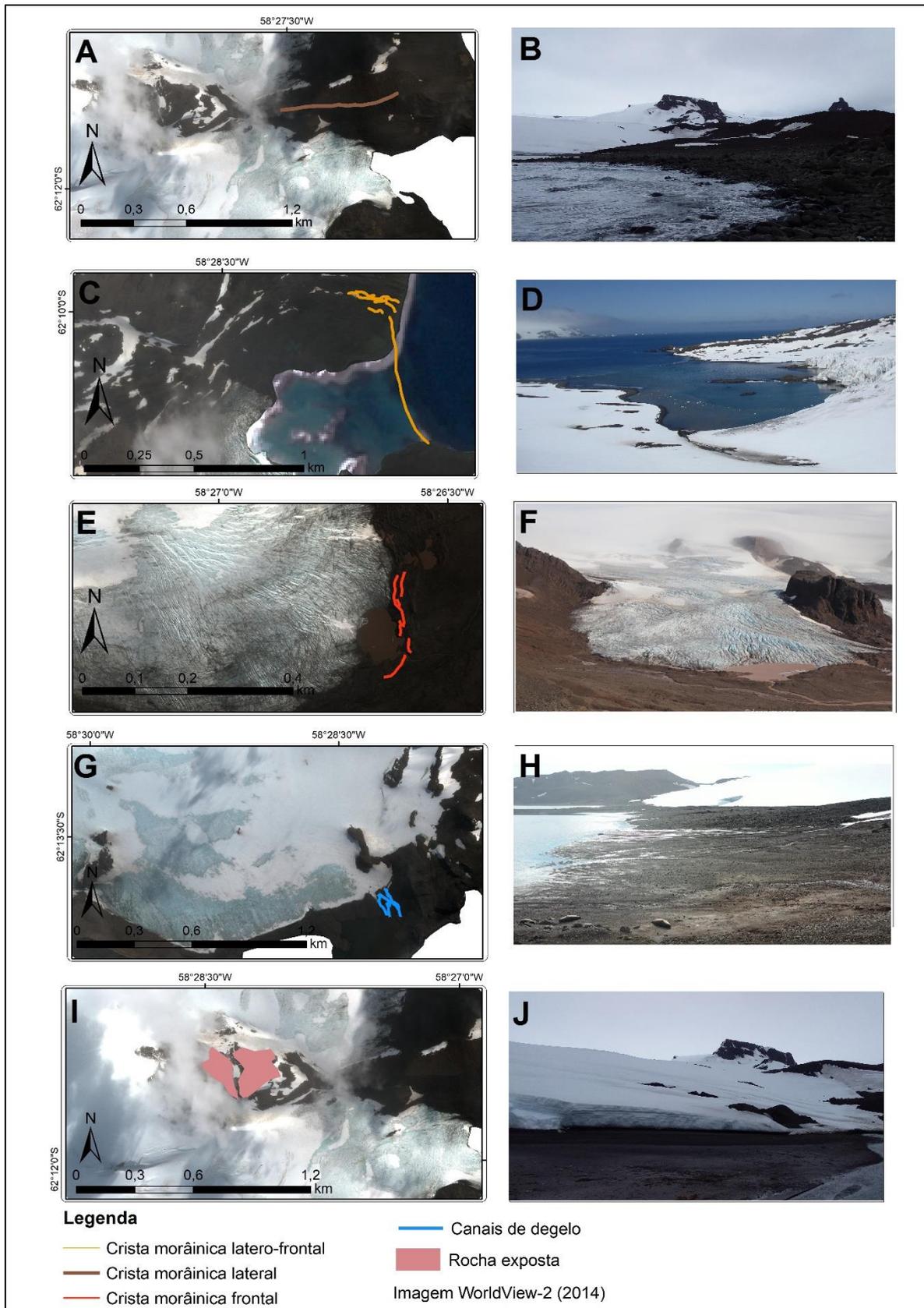


Figura 3 - A - Crista morânica lateral à geleira *Baranowski*. B- Foto tirada durante trabalho campo no verão de 2019/2020. Fonte: Autores (2019). C- Crista morânica latero-frontal na área proglacial da geleira *Ecology*. D - Foto tirada em trabalho de campo no verão de 2007. Fonte: Kátia K. Rosa (2007). E- Crista morânica frontal na parte sul da geleira *Baranowski*. F- Foto tirada no verão de 2019/2020. Fonte: Denni Moraes (2020). G- Canais de degelo na geleira *Windy*. H- Foto tirada durante trabalho de campo no verão de 2019/2020. Fonte: Autores (2019). I- Rocha exposta entre a geleira *Baranowski* e *Sphinx*. J- Foto tirada durante trabalho campo no verão de 2019/2020. Fonte: Autores (2019).

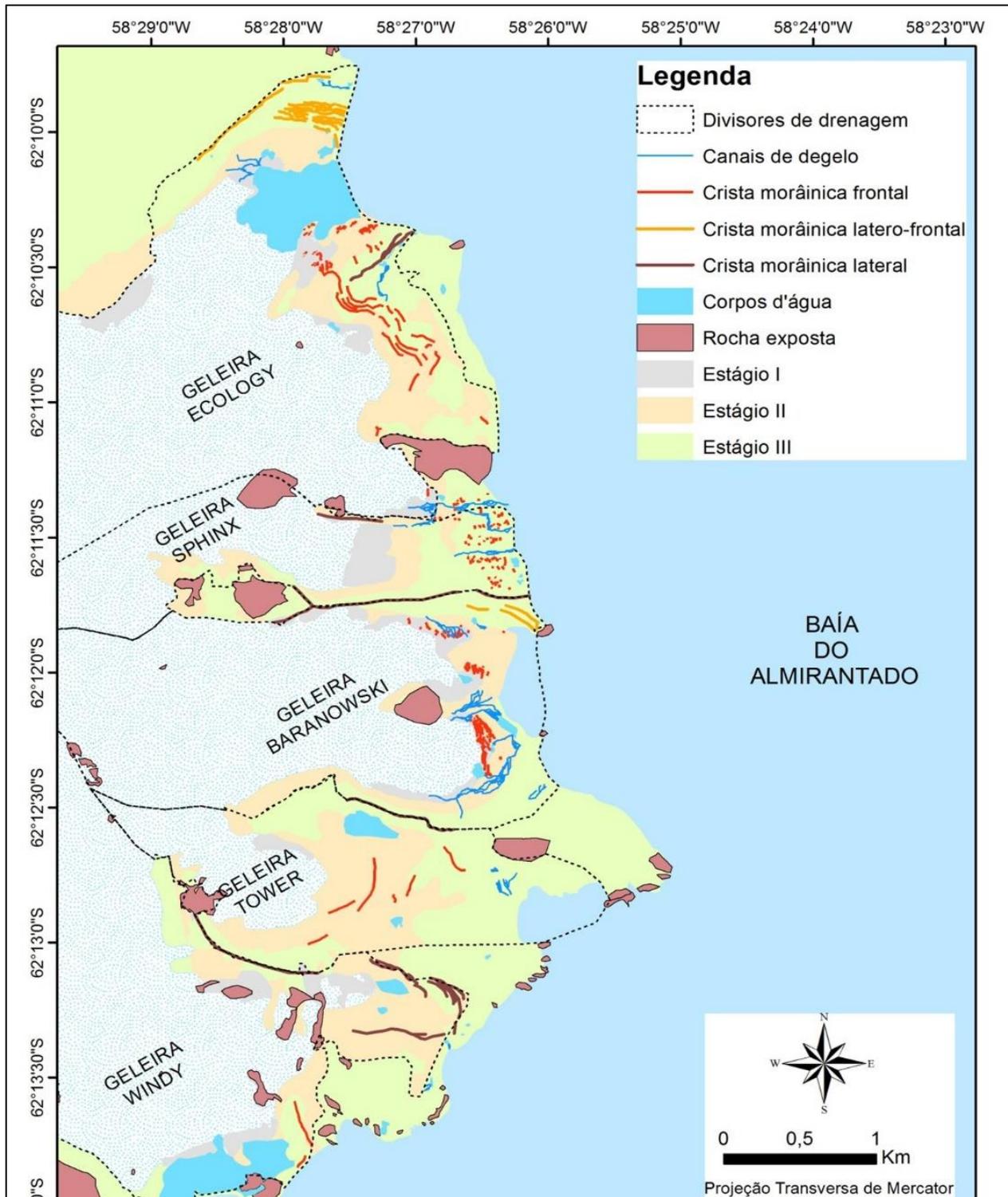


Figura 4 - Mapeamento geomorfológico da margem leste do campo de gelo Warszawa. Adaptado de Perondi (2018).

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 núcleos de vegetação. Há uma moraina frontal com sinais de retrabalhamento evidenciado por ter sua crista descontínua (Figura 4).

O ambiente proglacial da geleira *Windy* difere-se das demais quanto à localização dos *eskers*. Esse tipo de feição de relevo formado subglacialmente, em

contato com o gelo, indica que a geleira apresentava maiores dimensões. Há canais glaciofluviais que se ligam à laguna presente na área frontal da geleira, se trata 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.

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 4).

A geleira *Ecology* possui *eskers* 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 a baía do Almirantado. O ambiente proglacial desta geleira é complexo devido ao processo de fusão da mesma, 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*; a primeira apresenta dimensões e quantidade maiores em relação à segunda. Ambas se situam ao norte das geleiras e distanciadas das mesmas, apresentam-se com cristas descontínuas e evidentes sinais de retrabalhamento. Sua porção 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 às 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.

Atividades biológicas evidenciam um ambiente periglacial nas áreas livres de gelo da margem leste do campo de gelo *Warszawa*, 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.

### 3. Discussões

#### 3.1 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, 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 uma (Figura 5).

Os divisores das bacias de drenagem incluem os paleodivisores de drenagem glacial (Figura 5), estes encontravam-se 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*, enquanto as geleiras *Sphinx* e *Tower* possuem vales menores.

A partir do mapeamento das formas de relevo deposicionais de mesoescala, caracterizadas como morainas, inferiu-se que a retração frontal na área de estudo ocorreu em três fases (Figura 4), sem indícios de novos avanços entre 1956 e 2017.

As geleiras *Ecology*, *Sphinx*, *Baranowski*, *Tower* e *Windy* alteraram seu término no período de 1956-2017 (Figura 5), as mesmas apresentavam terminação marinha anteriormente à década de 1950, evidenciado com base na reconstrução de feições morânicas. Atualmente apresentam-se com término em terra as geleiras *Sphinx*, *Baranowski*, *Tower* e *Windy*, e com término misto a geleira *Ecology*, que possui término em terra, mas mantém contato com o mar devido a ocorrência de maré alta (Rosa, 2009). Através dessa dinâmica da maré a laguna *Ecology* conecta-se ao mar, parcialmente, ao sul daquela geleira (Petlicki *et al.* 2017).

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 de relevo em diferentes períodos, retrabalhamento e setores de estabilização do terreno com presença de atividade paraglacial. Trata-se de ambientes dinâmicos, principalmente próximos a geleira, pois há canais de água de fusão de neve e gelo, superficial e subglacial, além de aporte hídrico significativo no verão (Perondi *et al.* 2020).

A geleira *Ecology*, com término misto, apresenta morainas latero-frontais elevadas ao norte, mostrando que os maiores níveis de deglaciação deram-se neste setor, enquanto na parte sul há morainas frontais, com pouca extensão e elevação evidenciando menor 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 de relevo deposicionais, devido ao retrabalhamento. Com o recuo glacial, as áreas livres de gelo ficam expostas a aceleradas modificações geomorfológicas, como por exemplo, processos hidrológicos, eólicos e sedimentares citados por Klaar *et al.* (2015). Em setores distais a atual frente da geleira, há morainas frontais retrabalhadas 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. 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 glacial, sem novos avanços. Há também *eskers* preservados nas proximidades da baía do Almirantado, indicando a extensão da geleira.

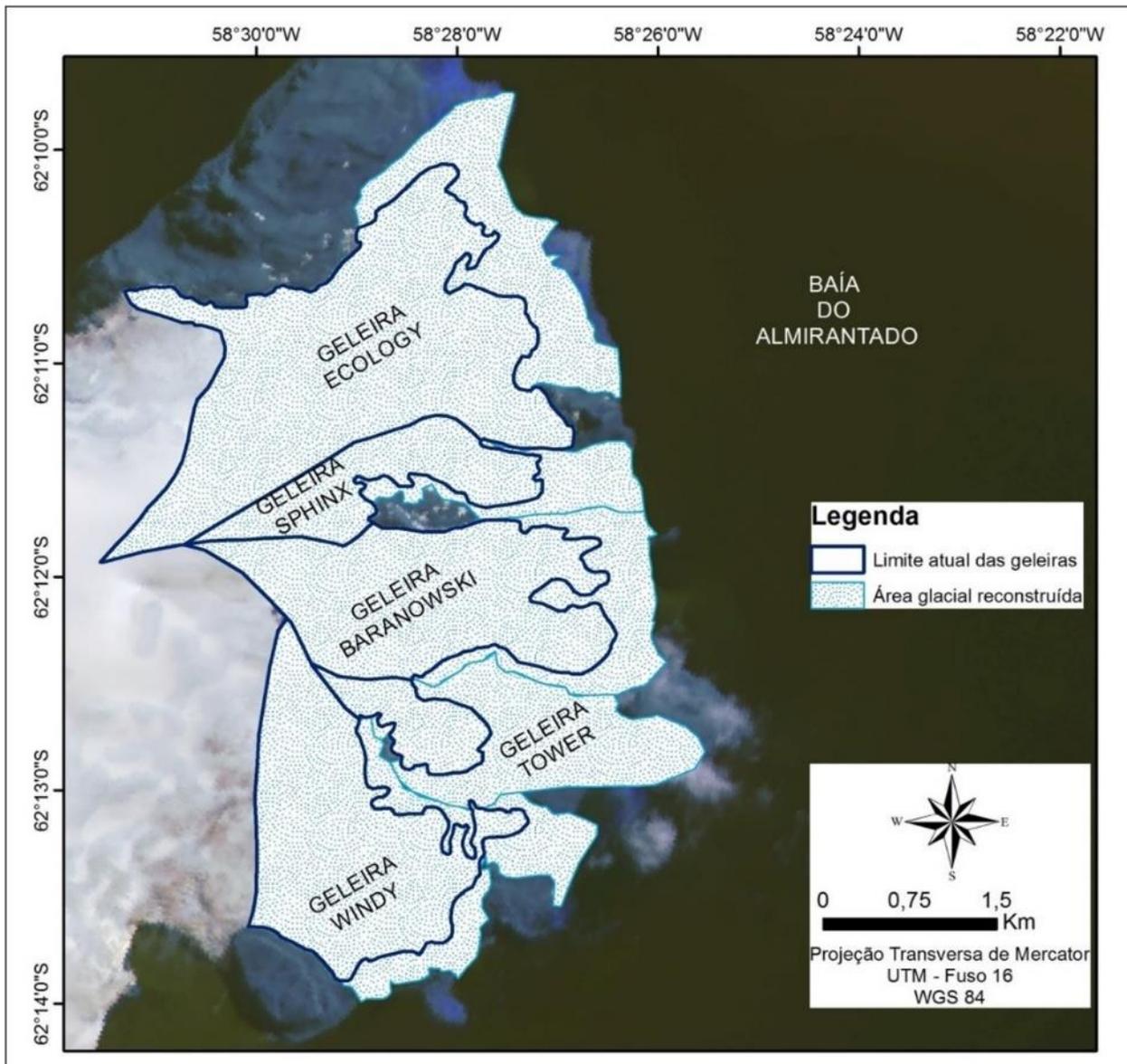


Figura 5 - Reconstrução do ambiente de deglaciação das geleiras da margem leste do campo de gelo *Warszawa*, segundo fases de retração frontal e depósitos expostos na área proglacial. Adaptado de Perondi (2018).

Na área proglacial da geleira *Tower* há poucos registros de feições deposicionais, algumas morainas frontais indicam fases de estabilização e duas morainas laterais retrabalhadas inferem seu avanço lateral máximo. Núcleos de vegetação são observados próximo à linha de costa.

A geleira *Windy* teve grandes mudanças na última década, seu término foi alterado de maré para terrestre, dessa forma modificando seu comportamento em relação ao processo de retração, que pode ser 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 novos avanços, algumas geleiras perdendo área mais rapidamente e outras de forma menos acelerada. Evidencia-se, através

de registros de retração frontal glacial e ao mapeamento geomorfológico, que a área proglacial de cada geleira tem evolução diferenciada.

### 3.2 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 (Quadro 1), através da identificação das formas, 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 III), próximo a atual frente da geleira para os estágios II e I que foram antigos ambientes proglaciais marginais ao gelo.

Quadro 1- Estágios da evolução do ambiente proglacial.

Resposta à retração glacial	Ambiente	Feições indicadoras	Processos geomorfológicos predominantes	Padrão de drenagem proglacial	Transição no tempo e espaço
Estágio I	Periglacial	Canais entrelaçados ou não, formação de vegetação	Periglacial inicial	Canais entrelaçados e alagadiços	Distal, não mais proglacial
Estágio II	Paraglacial: distal	Feições de relevo retrabalhadas pela ação da água	Paraglacial e glacial	Lagos perdem contato com gelo	Distal
Estágio III	Proglacial: proximal	Depósitos glaciais (morainas e <i>eskers</i> ), 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

Cada estágio de evolução do ambiente proglacial é caracterizado por processos e formas diferenciados entre si e para cada geleira. O estágio III é o mais atual, trata-se da área deglaciarizada entre 2000-2017. Esta área era ocupada, mais recentemente, pela extensão das geleiras e, portanto, é mais ativo geomorfologicamente pois recebe influência direta do comportamento de retração glacial. 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 atual frente da geleira, a influência desta diminui. Sua formação está relacionada ao período de 1979 a 2000. Os lagos continuam a receber água de degelo através de canais conectores onde ocorre o retrabalhamento dos depósitos que foram expostos na fase anterior (estágio III), como morainas frontais e *eskers*.

O estágio I é representado por um setor distal, ou seja, não marginal ao gelo. Dessa 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 o desenvolvimento de vegetação, o que influencia na estabilização do ambiente aos processos de retrabalhamento paraglacial e periglacial.

### 3.2.1 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 III 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 subglacial, a geleira possuía base termal

úmida e mostra 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 evidenciam a extensão máxima da geleira.

No estágio I formam-se morainas latero-frontais ao norte da geleira *Ecology*, moraina lateral, canais entrelaçados e lagos. A vegetação, representada por musgos e líquens, ocorre neste setor distal da geleira, onde não há influência da mesma.

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

A geleira *Sphinx* em sua área proglacial, no estágio III, apresenta morainas laterais, indicando sua extensão e formação de canais de drenagem. Esses 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*.

No estágio I, a moraina lateral ao sul da geleira *Sphinx* demonstra que a maior retração aconteceu neste setor. Morainas frontais indicam avanços máximos glaciais e *eskers* confirmam a direção leste do fluxo de gelo. No setor distal a geleira os lagos, canais entrelaçados e núcleos de vegetação se desenvolvem (Figura 6).



Figura 6- Planície glaciofluvial da geleira *Sphinx*, com presença de núcleos de vegetação. Fonte: Bremer (2008).

Durante o estágio III, na área proglacial da geleira *Baranowski*, lagos e canais de drenagem formam-se em contato com a mesma, além de morainas frontais, *esker* e moraina lateral.

No estágio II os lagos não têm contato glacial, são abastecidos por canais conectados à frente da geleira *Baranowski*, morainas frontais e *eskers* são observados.

No estágio I há registros de morainas laterais ao sul e ao norte da geleira *Baranowski*, além de morainas latero- frontais, possibilitando inferir a extensão máxima do gelo. *Eskers* indicam fluxo leste da geleira. Lagos, canais de drenagem e áreas distais a geleira com vegetação indicam atividade periglacial.

A geleira *Tower*, no estágio III, 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, há formação de morainas frontais à geleira *Tower* e lagos sem contato com o gelo que são,

em parte, abastecidos por água proveniente do degelo do *permafrost* e por precipitação líquida, ocorrendo nos meses de verão (Bremer, 2008).

No estágio I, em setores mais distais da geleira *Tower*, formam-se áreas vegetadas e canais entrelaçados. O aparecimento de vegetação demonstra que neste ponto não há mais influência glacial.

A geleira *Windy*, durante o estágio III, 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 formados morainas laterais, lagos sem contato com a geleira *Windy*, moraina frontal e complexo lagunar frontal (Figura 7).

No estágio I (Figura 8), ocorrem áreas vegetadas, lagos, moraina frontal e canais de drenagem indicando que a zona frontal da geleira *Windy* se estendia até a faixa praial.



Figura 7- Complexo lagunar frontal na zona proglacial da geleira *Windy*. Fonte: Bremer (2008).



Figura 8 - Área correspondente ao estágio I do setor proglacial da geleira *Windy*, IRG, que apresenta área vegetada. Foto tirada em dezembro de 2019. Fonte: Autores (2019).

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 a geleira *Sphinx* apresenta apenas moraina lateral ao sul e ao norte. A geleira *Baranowski* assemelha-se a geleira *Ecology* no estágio III, 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. 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 I, lagos e canais de drenagem estão presentes nas áreas livres de gelo de toda a 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, presença de vegetação. 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 III). Verifica-se que as morainas latero-frontais ao norte da geleira *Ecology* e as morainas laterais ao norte da geleira *Windy*, estão retrabalhadas, remetendo ao estágio I, mais antigo, dessa forma, suas modificações devem-se a ação hídrica e 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 apresentarão características dos setores distais.

#### 4. 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* com 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 III, 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 I, 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 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 seu término 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 são 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

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e ao Centro Polar e Climático (CPC) por fornecerem o suporte para essa pesquisa.

### Referências

- AQUINO, F.E. 1999. Sedimentação moderna associada à geleira de maré Lange, ilha Rei George, Antártica. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 106 p.
- 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.
- BINTANJA, R. 1995. The local surface energy balance of the *Ecology* glacier, King George Island, Antarctica: Measurement sand modeling. *Antarctic Science*, 7:315-325.
- 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.
- BRAUN, M. Ablation on the ice cap of King George Island (Antarctica). Doctoral thesis. Faculty of Earth Sciences, Albert-Ludwigs-Universität Feiburg, 165 p. 2001.
- BRAUN M.; SAURER H.; VOGT S., SIMÕES 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*, 21:21–36.
- 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.
- 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*, 41:25-40. 2009.
- FRENCH, H.M., THORN, C. 2006. The changing nature of periglacial geomorphology. *Geomorphologie: 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.
- HAMBREY, M. 1994. *Glacial environments*. UCL Press, London, 296 p.
- 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.
- 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*, 29:95–116.
- KEJNA, M., ARAZNY, A., SOBOTA, I. 2013. Climatic change on King George Island in the years 1948–2011. *Polish Polar Research*, 34:213-235.
- KLAAR, M.D.J., KIDD, C., MALONE, E., BARTLETT, R., PINAY, G., CHAPIN, S., MILNER, A. 2015. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40:1088-1100.
- 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. 2018. Análise da evolução do ambiente proglacial das geleiras *Ecology*, *Sphinx*, *Baranowski*, *Tower* e *Windy*, Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de mestrado, Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.123.
- PERONDI, C., ROSA, K.K., VIEIRA, R. 2019. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo Warszawa, ilha Rei George, Antártica Marítima. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 20:411- 426.
- PERONDI, C., ROSA, K.K., PETSCH, C., IDALINO, F.D., OLIVEIRA, M.A.G., LORENZ, J.L., VIEIRA, R., SIMÕES, J.C. 2020. Recentes alterações nas geleiras e nos sistemas paraglaciais, Antártica Marítima. *Revista Geociências NE*, 6:292-301.
- 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., 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.
- ROSA, K.K., PERONDI, C., VEETIL, B.K., AUGER, J.D., SIMÕES, J.C. Contrasting responses of land-terminating glaciers to recent climate variations in King George Island, Antarctica. *Antarctic Science*, 32:398–407. 2020.
- 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.
- 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*, 25:279-294.
- 

Recebido 20 de março de 2018  
Aceito 31 de maio de 2022