



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

*Northeast Geosciences Journal*

v. 6, nº 2 (2020)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID19301>



## RECENTES ALTERAÇÕES NAS GELEIRAS E NOS SISTEMAS PARAGLACIAIS, ANTÁRTICA MARÍTIMA

Cleiva Perondi<sup>1</sup>; Kátia Kellem da Rosa<sup>2</sup>; Carina Petsch<sup>3</sup>; Filipe Daros Idalino<sup>4</sup>; Manoela Araújo Gonçalves de Oliveira<sup>5</sup>; Júlia Lopes Lorenz<sup>6</sup>; Rosemary Vieira<sup>7</sup>; Jefferson Cardia Simões<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Mestra em Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2202-2721>

E-mail: cleivaperondi@gmail.com

<sup>2</sup>Doutora em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-9658>

E-mail: katia.rosa@ufrgs.br

<sup>3</sup>Doutora em Geografia, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>

E-mail: carinapetsch@gmail.com

<sup>4</sup>Mestre em Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5587-5208>

E-mail: filipe.idalino@ufrgs.br

<sup>5</sup>Mestra em Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1695-1807>

E-mail: manuella.araujo@hotmail.com

<sup>6</sup>Graduanda em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4661-7316>

E-mail: jlopeslorenz@gmail.com

<sup>7</sup>Doutora em Geociências, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói/RJ, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0312-2890>

E-mail: rosemaryvieira@id.uff.br

<sup>8</sup>Doutor em Glaciologia, Centro Polar e Climático, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5555-3401>

E-mail: jefferson.simoese@ufrgs.br

### Resumo

O artigo investiga alterações nos sistemas paraglaciais e interconexões com a retração glacial em setores da ilha Rei George, Antártica Marítima. Foi analisado o ambiente proglacial, resultado da deglaciação recente, e identificados os tipos de formas de relevo em suas diferentes escalas. Estes registros são úteis para a reconstrução de estágios sucessivos evolutivos no sistema paraglacial. Os resultados demonstraram que o ambiente marginal às geleiras e sistemas paraglaciais estão evoluindo na ilha Rei George e há novas paisagens. Algumas geleiras apresentaram uma mudança importante entre 2000 e 2019, onde sua classificação mudou de geleira de terminação marinha para geleira de terminação terrestre (não-marinha). Atualmente há 21 geleiras com término em terra na ilha Rei George (correspondendo a 31% das geleiras) e 11 destas estão localizadas na Baía do Almirantado. 25% destas geleiras eram marinhas em 2000. Os novos ambientes paraglaciais (desde 2000) têm 1,7 km<sup>2</sup> ao total de área. Os ambientes marginais às geleiras (como as geleiras Ecology, Wanda, Windy, Anna Sul e Baranowski) mostraram formas de gênese não glacial, como planície de lavagem, depósitos de tálus, ravinas e canais fluviais no sistema paraglacial recente. O mapeamento geomorfológico evidencia que os processos paraglaciais se diferenciam entre os ambientes marginais ao gelo das geleiras, não são padronizados.

**Palavras-chave:** Processos geomorfológicos glaciais; Áreas livres de gelo; Mudanças climáticas.

### RECENT CHANGES IN GLACIERS AND PARAGLACIAL SYSTEMS, ANTARCTIC MARITIME

#### Abstract

The article investigates changes in paraglacial systems and interconnections with glacial shrinkage on King George Island, Maritime Antarctica. The proglacial environment, as a result of recent deglaciation, was analyzed, and the types of landforms and at different scales were identified. These records are useful for successive evolutionary stages paraglacial system reconstruction. Glaciers and paraglacial systems showed rapid changes and new

landscapes were detected on King George Island. Glaciers presented an important change between 2000 and 2018, where its classification has changed from marine-terminating to land-terminating glacier (no-marine). There are currently 21 glaciers land-terminating on King George Island (corresponding to 31% of the glaciers) and 11 are present in Admiralty Bay. 25% of these glaciers were marine in 2000. The new paraglacial environments (since 2000) has 1.7 km<sup>2</sup> of the total area. Ecology, Wanda, Windy, Anna South and Baranowski Glaciers showed outwash plain, talus slopes and fluvial channels landforms in recent paraglacial system. Geomorphological mapping shows that paraglacial processes which differ between environments marginal to glacier ice are not standardized.

**Keywords:** Glacial geomorphological processes; Ice free-land areas; Climate change.

## RECIENTES CAMBIOS EN GLACIARES Y SISTEMAS PARAGLACIARES, ANTÁRTICA MARÍTIMA

### Resumen

El artículo investiga los cambios en los sistemas paraglaciales y las interconexiones con la retracción de los glaciares en la isla Rey Jorge, Antártica Marítima. Se analizó el ambiente proglacial, resultado de la deglaciación reciente, y se identificaron los tipos de formas de relieve en sus diferentes escalas. Estos registros son útiles para la reconstrucción de sucesivas etapas evolutivas en el sistema paraglacial. Los glaciares y los sistemas paraglaciales están evolucionando rápidamente y se están detectando nuevos paisajes en la isla Rey Jorge. Los glaciares mostraron un cambio importante entre 2000 y 2018, donde su clasificación cambió de glaciar de terminación marina a glaciar de terminación terrestre (no marino). Actualmente hay 21 glaciares de terminación terrestres en la isla Rey Jorge (que corresponden al 31% de los glaciares) y 11 están presentes en la Bahía del Almirantazgo. El 25% de estos glaciares eran marinos en 2000. Los nuevos entornos paraglaciales (desde 2000) cubren 1,7 km<sup>2</sup> del área total. Los glaciares Ecology, Wanda, Windy, Anna Sul y Baranowski mostraron formas de llanuras de lavado, depósitos de tálus, barrancos y flujos superficiales fluviales en el sistema paraglacial reciente. El mapeo geomorfológico muestra que los procesos paraglaciales que difieren entre ambientes marginales al hielo glaciar no están estandarizados.

**Palabras-clave:** Procesos geomorfológicos glaciares; Áreas libres de hielo; Cambio climático.

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas glaciais e marginais ao gelo são sensíveis às mudanças climáticas em andamento (COWIE; MOORE; HASSAN, 2014; CARRIVICK, 2015). Várias geleiras em regiões subpolares Antárticas têm evidenciado graus de retração acelerada nas últimas décadas.

Estudos de Ferrando, Rosa e Vieira (2009) relacionam que a água provoca fusão da superfície de neve sobre as geleiras, o fluxo de água de degelo penetra nas fendas e se conecta com fluxos englaciais e subglaciais nas geleiras temperadas, o que acelera a velocidade do processo de fusão da geleira no verão e mudanças no balanço de massa das geleiras na ilha Rei George.

Os ambientes proglaciais são definidos como aqueles localizados próximo da frente de uma geleira, campo de gelo ou manto de gelo (PENCK; BRUCKNER, 1909). Estes ambientes são ajustados conforme o regime de degelo e estão relacionados com processos glaciofluvial, glaciolacustrine e ainda glaciomarinhas. A hidrologia dos canais proglaciais exibe um padrão sazonal e diurno (CHURCH; GILBERT, 1975; EVANS; CLARK; MITCHELL, 2005; BENN; EVANS, 2010). Nesse setor há depósitos sedimentares transportados pela geleira, com feições de relevo expostas pela retração glacial formadas por processos subglaciais e marginais, glaciofluviais e glaciolacustres (BENN; EVANS, 2010). Esse setor reflete a dinâmica da geleira de processos de avanço, retração e degelo (SLAYMAKER, 2009).

Com o andamento da recessão glacial, a paisagem recentemente livre de gelo é submetida a rápidas mudanças geomorfológicas como processos sedimentológicos, hidrológicos e eólicos que se alternam na paisagem (KLAAR *et al.*, 2015). O termo paraglacial se refere a condições instáveis e com alta atividade geomorfológica associada à paisagem submetida a esta recente fase (BALLANTYNE, 2002), onde o grau de mudanças na paisagem e na carga sedimentar é elevado. Os processos paraglaciais são condicionados pela atividade glacial (CHURCH; RYDER, 1972; BALLANTYNE, 2002) e retrabalham as características físicas dos sedimentos (BALLANTYNE, 2002a; BENN; EVANS, 2010).

O termo paraglacial é definido por Slaymaker (2009) como processos não glaciais condicionados pela glaciação. A paisagem paraglacial pode ser caracterizada em termos de taxa de mudança e trajetória dessa mudança. Não pode ser definido em relação a geleiras (como no proglacial) ou por processos de clima frio (como no periglacial). O autor define que quase todas as formas de relevo e paisagens paraglaciais são transitórias. O desafio no estudo das paisagens paraglaciais é determinar suas taxas de mudança; quão longe elas avançaram ao longo da trajetória de glacial para não glacial; e como reconhecer empiricamente as relações espaciais e temporais entre as paisagens proglacial, periglacial e fluvial (SLAYMAKER, 2009).

As implicações dessa abordagem para as paisagens paraglaciais são discutidas em relação à geomorfologia histórica e dinâmica por diversos autores. Machado *et al.* (2019) sintetiza que a paisagem paraglacial não é definida nem por processos nem pela localização, mas sim pela trajetória de reajustes da paisagem, adotando o critério tempo. Ambientes paraglaciais são influenciados por fatores não-glaciais, como por exemplo, vento e drenagem que atuam remobilizando sedimentos (BALLANTYNE, 2002b).

O desenvolvimento geomorfológico seguido da retração glacial é influenciado pela alta carga sedimentar originada de depósitos glaciais, tais como morainas, *tills*, *eskers*, *flutings*. Os processos que envolvem a modificação destas envolvem movimento de massa, ação de degelo e recongelamento, processos fluviais entre outros. Conforme Petsch, Rosa, Simões e Simões (2018), na medida em que uma geleira retrai, ela expõe feições do terreno que são retrabalhadas pela ação intempérica e por processos glaciofluviais e glaciomarinhas.

Devido à alta variabilidade da mobilização sedimentar e ao aumento da atividade glaciofluvial a paisagem paraglacial torna-se dinâmica e há um período de ajustamento que termina quando

há a condição de um estado de diminuição da influência glacial condicionada pela escassez de aporte sedimentar glacial ou a estabilidade dos processos de retrabalhamento (BALLANTYNE, 2002b).

A evolução do ambiente proglacial com os processos paraglaciais reflete a retração da geleira. A identificação das mudanças ambientais das geleiras na ilha Rei George possibilitará

o entendimento de como esta área da Antártica está refletindo as mudanças climáticas desde o último século, região que possui, assim como toda a Península Antártica, interconexões climáticas com o sul do Brasil.

O artigo investiga as alterações nos sistemas paraglaciais que estejam associados às alterações nas geleiras na ilha Rei George, Antártica, nas últimas sete décadas (Figura 01).

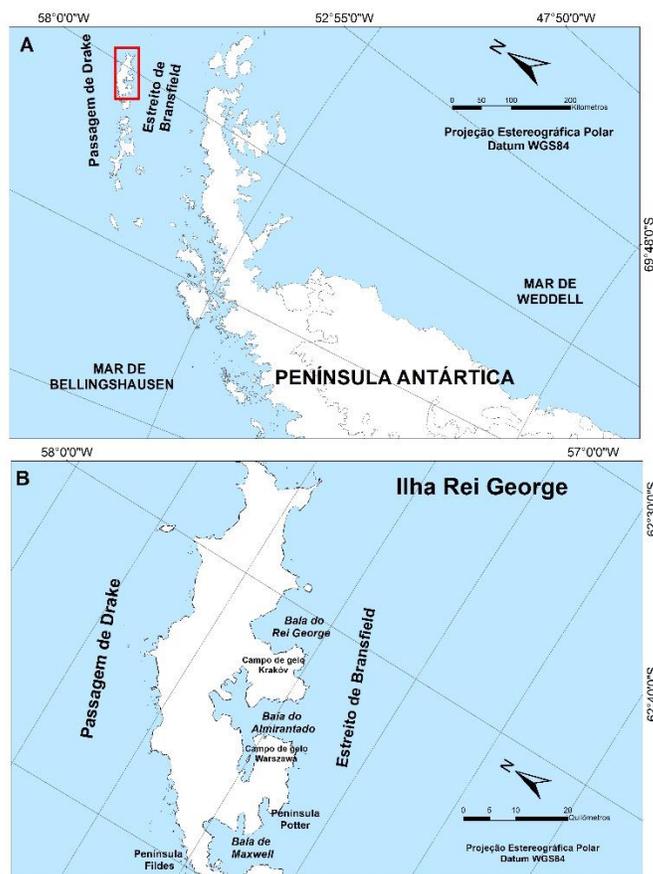


Figura 01 - Mapa de localização. A) Ilha Rei George a noroeste da Península Antártica. B) Localização da ilha Rei George.

## 2. METODOLOGIA

A evolução dos sistemas marginais ao gelo e a configuração de término das geleiras (marinho/terrestre e presença de laguna de contato com o gelo) foi investigada através do reconhecimento dos processos geomorfológicos e dados que possibilitassem comparar as formas de relevo glaciais identificadas em estudos anteriores (e.g ROSA *et al.*, 2009; PETSCH, ROSA, SIMÕES and SIMÕES, 2018; PERONDI, ROSA and VIEIRA, 2019, and ROSA *et al.*, 2020).

O artigo apresenta resultados de atividades de campo realizadas nas estações de ablação dos anos 2007/2008, 2010, 2011, 2013, 2014 e 2015 ao longo de áreas livres de gelo na ilha Rei George pelas equipes do CPC (Centro Polar e Climático) e do LAPSA (Laboratório de Processos Sedimentares e Ambientais – UFF). Foram consideradas os resultados das análises laboratoriais

para caracterização dos sedimentos coletados em campo, resultados das análises granulométricas e microscópicas e interpretação de imagens de satélite pré-processadas de Rosa *et al.* (2009) e Petsch, Rosa, Simões e Simões (2018).

Imagens de satélite, como COSMO-SkyMed (*Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation*), TerraSar-X, Wordview-2, Sentinel 1 e 2, ASTER, Landsat, SPOT, ortoimagens, REMA, TanDEM-X, PlanetScope e bases de dados do GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) e CPC, foram utilizados para a análise temporal (1956, 1979, 1988, 1995, 2000, 2003, 2009, 2011, 2014, 2017, 2018 e 2019) das geleiras e reconhecimento das feições e processos geomorfológicos glaciais e paraglaciais, conforme Benn e Evans (2010) e Heckmann e Morche (2019). Foram utilizados bases de dados de Rosa (2012), Rosa *et al.* (2014), Petsch (2019), Gonçalves *et al.* (2019) e Perondi, Rosa e Vieira (2019).

As feições encontradas em áreas livres de gelo foram utilizadas como indicadores da ocorrência de processos glaciais. A morfologia das morainas subaéreas, e a sua espacialização, revelaram a extensão máxima das geleiras de acordo com Napieralski, Harbor e Li (2007). Foi analisado o ambiente proglacial, resultado da deglaciação recente, e identificados os tipos de formas de relevo e em diferentes escalas. A definição de áreas proglaciais como 'a área entre a geleira LIA extensão e uma margem de geleira contemporânea (HECKMANN *et al.*, 2012) foi defendido porque tem utilidade para definir uma relação específica ao recuo da geleira e à dinâmica paraglacial subsequente. Estes registros são úteis para a reconstrução da evolução deste ambiente e o reconhecimento de estágios sucessivos.

Os sistemas proglaciais são classificados em diferentes zonas de acordo com a forma do relevo glacial e intensidade geomórfica (suprimento, deposição e retrabalho de sedimentos glaciais e paraglaciais) com base em Perondi, Rosa e Vieira (2019) e Rosa *et al.* (2020).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. O sistema glacial

A análise temporal das geleiras e reconhecimento das feições e processos geomorfológicos glaciais e paraglaciais evidenciam recentes mudanças nas geleiras. Há implicações das mudanças nas geleiras de maré, como uma possível diminuição da taxa de retração. Rosa *et al.* (2020) indica que as geleiras com término terrestre tiveram uma menor retração do que as geleiras com término marinho ao analisar um setor da baía do Almirantado, ilha Rei George. Outras características das geleiras também influenciaram na resposta destas às mudanças climáticas em andamento.

A mudança no padrão de retração das geleiras também é ressaltada por outros autores em outras áreas. Sole *et al.* (2008) encontraram altas taxas de retração em geleiras marinhas (GARDNER *et al.*, 2011) e não encontraram nenhuma diferença significativa na retração frontal de geleiras marinhas quando pesquisou geleiras no Ártico. Também há interpretação de que a dinâmica das geleiras de maré é controlada principalmente pela temperatura da água dos oceanos (CARR; STOKES; VIELI, 2013).

O modelo de reconstrução de um dos setores amostrais (Figura 02) revela uma rápida evolução de sistemas paraglaciais relacionados a diferentes estágios de retração glacial decadal. Lagos proglaciais e geoformas glaciais tem recentemente surgido associados às novas condições de término de marinho para terrestre de algumas geleiras.

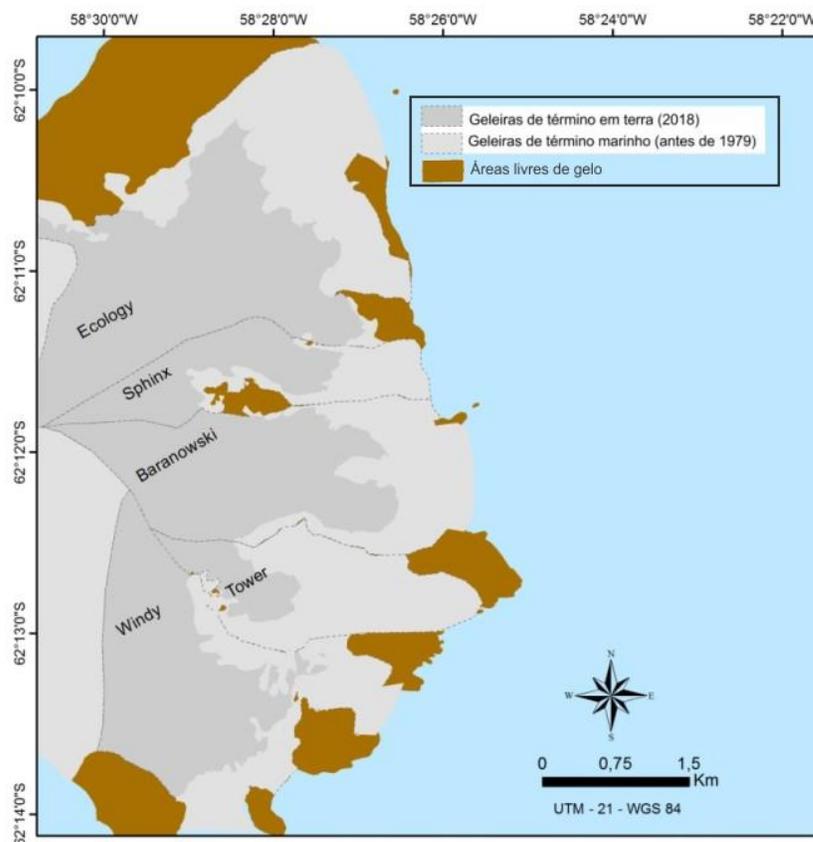


Figura 02 - Alterações das condições de término marinho para terrestre para o setor sudoeste da Baía do Almirantado, ilha Rei George, Antártica Marítima. Fonte: Perondi, Rosa e Vieira (2019).

Foram evidenciadas mudanças no padrão de retração e respostas nas formas e processos geomorfológicos com a distância da atual margem glacial, dessa forma apresenta-se o

mapeamento das geleiras que exibem mudanças em suas áreas frontais entre 1979-2018 (Figura 03).

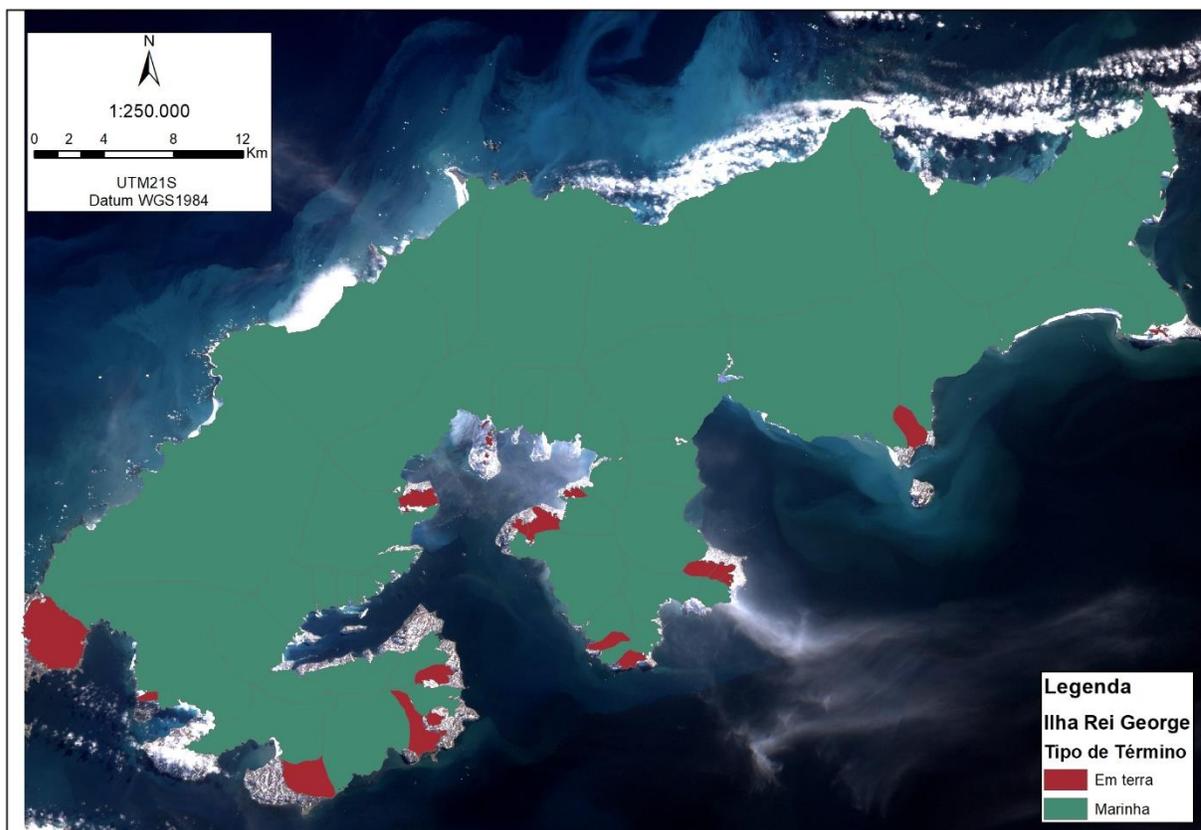


Figura 03 - Geleira de término em terra (não marinhas) da ilha Rei George, Antártica Marítima. Imagem Sentinel 2 de fevereiro de 2017. Fonte: USGS.

Geleiras e sistemas paraglaciais estão evoluindo rapidamente e novas paisagens são detectadas na ilha Rei George. As geleiras apresentaram uma mudança importante entre 2000 e 2018, onde sua classificação mudou de geleira de terminação marinha para geleira de terminação terrestre (não-marinha). 20% das geleiras marinhas da ilha Rei George (correspondendo a 16 das 80 geleiras marinhas em 1979) mudaram para terrestre durante 1979-2019. Os novos ambientes paraglaciais (desde 2000) têm 1,7 km<sup>2</sup> ao total de área. Nas bacias de drenagem do Drake, nenhuma geleira mudou de marinha para terrestre no período 2000-2018.

### 3.2. O sistema paraglacial

A identificação dos tipos de formas de relevo e diferentes escalas foram úteis para a reconstrução de estágios sucessivos evolutivos no sistema paraglacial. Observa-se a formação recente de lagos proglaciais em contato direto com a geleira, após a modificação de condições de geleira de término marinho (Figura 03 e Tabela 01) para uma geleira de término em terra.

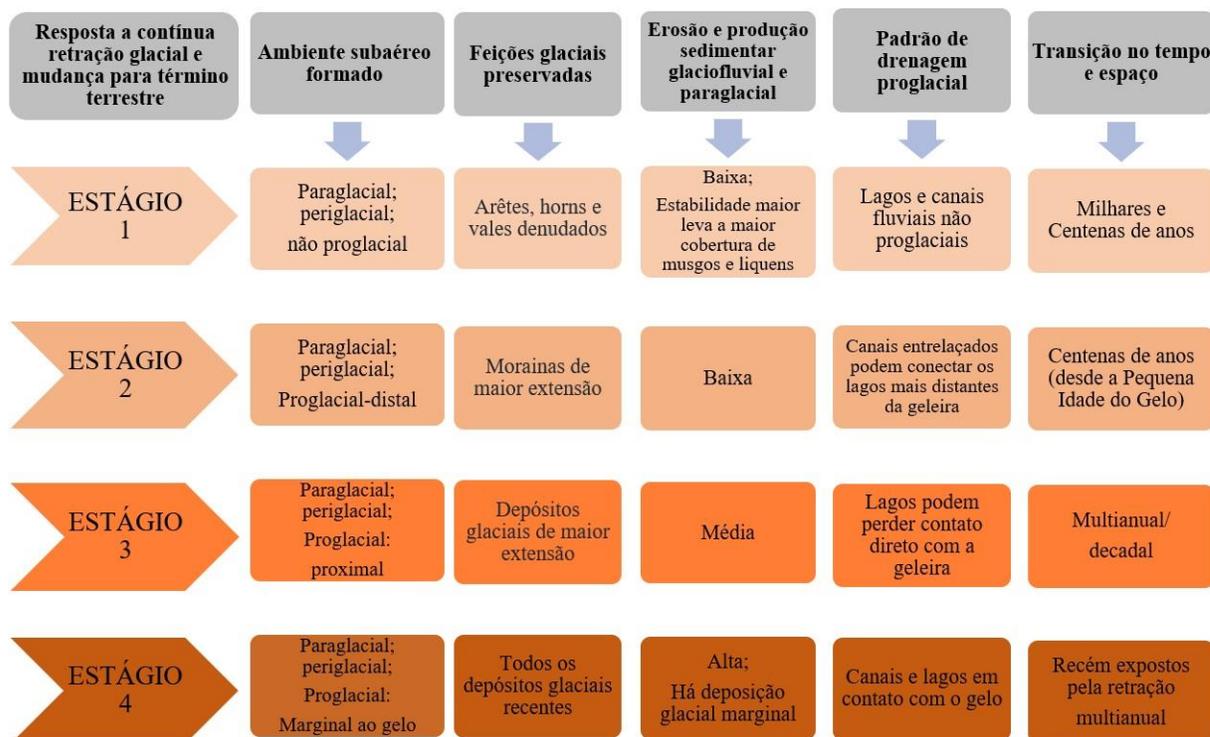
Tabela 01 - Classificação e evolução dos tipos de geleiras na ilha Rei George. Dados com ID são do WGI. Não foram mapeadas as cascatas de gelo (Icefalls).

Geleiras	1979	1988	2000	2011	2019
Geleiras com fluxo para o Estreito de Drake					
Ajax, Goetel, Dobrowolski, Lange, Viéville, Ana, Domeyko, Polonia, RGI60-19.01978, AQ7SSI000162, AQ7SSI000163, Rybak, Zalewski, AQ7SSI000114, Fourcade, Polar Friendship, Penderecki, Moczydowski, Stenhouse, Krak					
Znosco					
Nature					
Danowski					
AQ7SSI000104					
Windy					
White Eagle					
AQ7SSI000151 WGI ID					
Zbyszek					
Ecology					
Baranowski Norte					
Collins					
Polar Club (frente: Potter)					
Wanda					
Baranowski					
Dragon					
Professor					
Tower					
Sphinx					
Noble, Ferguson					
Krakowiak					
<b>Legenda</b>					
<i>Geleira marinha</i>					
<i>Geleira não marinha término em água (ambiente lacustre)</i>					
<i>Geleira não marinha término em terra</i>					

O mapeamento geomorfológico evidenciou que os processos paraglaciais se diferenciam entre os ambientes marginais ao gelo das geleiras e há estágios evolutivos que se desenvolvem com a retração glacial (Tabela 2). Os ambientes proglaciais que possuem áreas no estágio 4 correspondem ao ambiente marginal

de contato com o gelo. As geleiras que passaram de término marinho para término terrestre possuem apenas o Estágio 4. Atualmente o estágio 1 ocorre em setores mais antigos para as geleiras de término em terra.

Tabela 2 - Estágios evolutivos do sistema paraglacial que se desenvolvem com a retração glacial em alguns setores da ilha Rei George.



Os sistemas paraglaciais que possuem o primeiro estágio sucessional, caracterizam-se pela formação gradativa para um ambiente diversificado com predominância de atividade paraglacial e periglacial em relação à decrescente influência glacial. Movimentos de massa, intemperismo químico, atividade de congelamento e fusão do permafrost também são evidenciados, assim como nos demais estágios. Lagos com menor extensão e canais entrelaçados, alimentados por fluxo de degelo de neve e de gelo estagnado, principalmente, formam-se onde havia parte do corpo da geleira ativa. Canais entrelaçados são interconectados aos lagos proglaciais e alagadiços de menor extensão. Junto aos canais entrelaçados e lagos, alimentados essencialmente pela fusão de neve quando longe da margem glacial, há a formação de áreas úmidas com atividade orgânica, assim como há a colonização por musgos e líquens.

No segundo estágio, na área livre de gelo há uma maior área com predominância de modificações por atividade paraglacial do que no estágio anterior, pois há uma transição de glacial para periglacial sucessivamente com a maior estabilidade nos processos de retrabalhamento das formas de relevo glaciais. Na área exposta por mais tempo, processos paraglaciais são evidenciados em associação aos periglaciais. Lagos e canais entrelaçados, alimentados por fluxo de degelo de neve e de gelo,

formam-se onde havia parte do corpo da geleira ativa e são interconectados aos lagos proglaciais e alagadiços de menor extensão. Os lagos vão diminuindo de área e volume com o aumento de distância da margem glacial. Os depósitos coluvionares e glaciais já retrabalhados nos estágios anteriores, são erodidos em setores onde o fluxo de água de degelo de neve torna-se concentrado em episódios rápidos ao longo da estação de verão.

Em um terceiro estágio há a formação de um setor que é marginal ao gelo, mas não mantém contato. Ainda verifica-se, como no estágio anterior, que as formas se modificam com rápidas e intensas modificações por atividade paraglacial. O lago proglacial continua a receber fluxo de água de degelo subglacial, mas por canais proglaciais conectores (Figura 04). Os canais proglaciais auxiliam no retrabalhamento dos depósitos expostos na fase anterior e ainda na perda da conectividade destes. Pode ser evidenciada maior remoção sedimentar pela água de degelo do que transporte pelo gelo conforme há o distanciamento da frente da geleira. Movimentos de massa em áreas mais íngremes em depósitos morânicos mais antigos geram depósitos de tálus. Nestes setores da base das vertentes pode ocorrer maior deposição do que transporte por processos paraglaciais.



Figura 04 - Canais proglaciais conectores ao lago proglacial em evolução e retrabalhamento de depósitos de till de alojamento, flutings e morainas de recessão.

No quarto estágio há um ambiente recentemente exposto pela retração e em contato direto com a geleira. Depósitos morânicos de recessão são formados na posição frontal e lateral da geleira e ficam sujeitos ao início da atividade paraglacial, assim como os depósitos de flutings e eskers. Há uma alta intensidade nos processos paraglaciais, como movimentos de massa, intemperismo químico, entre outros. Canais de fusão da neve e do gelo superficial, inclusive subglacial, emergem no ambiente marginal ao gelo recentemente formado e há bastante suprimento de água líquida no verão. Lagos e lagunas proglaciais possuem contato direto com a geleira (Figura 04).

A geleira Wanda, localizada na ilha Rei George, possui o estágio 4 nos setores: lateral e latero-frontal. Nos setores mais antigos, as formas glaciais evidenciam que havia transporte glacial ativo e deposição de matacões e grandes blocos rochosos, alta proporção de deposição de till e deposição de flutings. Os sedimentos subglaciais deste setor são morfologicamente facetadas e com estriações, evidenciando maior dinâmica da geleira (velocidade de fluxo e deslize basal). O transporte sedimentar em condições de um fluxo possivelmente mais ativo do que o atual depositavam morainas marginais e frontais de recessão de maior espessura sedimentar do que as expostas no estágio 4.

Os estágios apresentados podem ser sintetizados em uma proposta que admite 3 ambientes, um proximal, em contato com o gelo, e dois distais. Para os depósitos glaciais na margem da geleira Wanda e Ecology é possível aplicar este zoneamento. O ambiente livre de gelo pela retração nos últimos anos é relacionado a uma maior modificação sedimentar, mas as morainas frontais de recessão apresentam mais sedimentos finos do que as morainas mais antigas. Os processos de transporte de sedimentos pelo vento e pela água de degelo da neve pode levar os sedimentos de granulometria mais fina para setores a jusante na vertente. Quanto mais distante da atual margem glacial e mais antiga for a sua exposição pelo recuo glacial, observa-se uma maior estabilidade dos depósitos devido à presença de musgos e líquens em setores menos íngremes. Ao mesmo tempo evidencia-se que cada ambiente marginal ao gelo distingue-se em vários aspectos, como a disponibilidade de água de degelo, a forma da vertente e declividade, além da maior ou menor influência das geleiras e da ação marinha, entre outros aspectos.

O monitoramento e análises durante e pós-campo possibilitaram avaliar o relacionamento entre os processos e formas com a retração que vem ocorrendo. Na paisagem formada mais recentemente, todos os processos evidenciam a recessão glacial, sem reavanço nas últimas décadas. O aumento de canais de água de degelo ao longo da margem da geleira, conectividade

com lagos proglaciais e a formação de um terreno susceptível à alteração por processos paraglaciais marcam as fases iniciais de um sistema paraglacial com a menor influência glacial, em uma relação transitória de processos e formas, assim como afirma Heckmann e Morche (2019).

Os setores paraglaciais recentes (criados desde 2000) são caracterizados por novos lagos proglaciais, formas glaciais e glaciofluviais de mesoescala (stoss and lee, morainas recessionais e flutings). As geleiras Ecology, Wanda, Windy, Anna Sul e Baranowski mostraram formas não glaciais como as de planície de lavagem, depósitos de tálus, ravinhas e canais fluviais no sistema paraglacial recente.

Esses ambientes paraglaciais recém-formados são importantes alvos de monitoramento. Muitas geleiras e sistemas paraglaciais contemporâneos estão evoluindo rapidamente e novas paisagens estão surgindo na ilha Rei George devido à alterações nos tipos de geleira e à desestabilização de algumas formas de relevo, erosão pela água de degelo, e demais processos paraglaciais ativos. Os processos glaciofluviais também tornam esses ambientes desfavoráveis à preservação de (pequenas-métricas) formas de relevo.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reconstrução da evolução dos sistemas paraglaciais registram a formação de estágios sucessivos evolutivos entre as geleiras e mudanças na configuração de término marinha para geleiras de término terrestre.

Foram evidenciadas mudanças no padrão de retração e respostas nas formas e processos geomorfológicos. O mapeamento das geleiras que apresentaram mudanças evidencia que nas bacias de drenagem do Drake, nenhuma geleira mudou de marinha para não marinha no período 2000-2018. Foi apresentada a atualização dos polígonos das áreas de bacias de drenagem, tipo de geleiras e as áreas livres de gelo para toda a ilha Rei George.

O mapeamento geomorfológico evidencia que os processos paraglaciais se diferenciam entre os ambientes marginais ao gelo das geleiras, não são padronizados. A localização em valores de declividade, disposição espacial no vale e a sua localização no ambiente marginal ao gelo assim como o grau de distúrbio do ambiente e o padrão de drenagem por mapeamento geomorfológico também devem ser critérios a serem identificados no contínuo monitoramento das mudanças nas feições geomorfológicas e evolução do ambiente marginal ao gelo. A ampliação de dados em campo para outras latitudes, em auxílio à identificação do estágio de evolução do ambiente

deposicional, em resposta à retração glacial, pode possibilitar o detalhamento da evolução destes sistemas paraglaciais da Antártica e a extração de cenários preditivos de evolução, diante da projeção de tendência de aumento da temperatura média superficial para as próximas décadas nas regiões polares.

## 5. REFERÊNCIAS

- Ballantyne, C.K. A general model of paraglacial landscape response. *The Holocene*, v. 12, n.3, 371–376, 2002a.
- Ballantyne, C.K. Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, v. 21, 1935–2017, 2002b.
- Benn, D.I.; Evans, D.J.A. *Glaciers and Glaciation*. Abingdon, Oxfordshire: 2<sup>a</sup> ed. Hodder Education, 2010. 802p.
- Carrivick, J. An assessment of the rapid evolution of ice-marginal and proglacial systems due to ongoing climate change. *Geophysical Research Abstracts*, v. 17, 1163, 2015.
- Church, M.; Gilbert, R. Proglacial fluvial and lacustrine environments. In: JOPLING, A. V.; MACDONALD, B. C. (Eds.). *Glaciofluvial and Glaciolacustrine Sedimentation*. SEPM Special Publication, 23. Tulsa, Okla.: Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, 1975. p. 22-100.
- Church, M.; Ryder, J.M. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, 3059–3071, 1972.
- Cowie, N. M.; Moore, R. D.; Hassan, M. A. Effects of glacial retreat on proglacial streams and riparian zones in the Coast and North Cascade Mountains. *Earth Surface Processes Landforms*, v. 39, 351–365, 2014.
- Evans D.J.A.; Clark C.D.; Mitchell W.A. The last British Ice Sheet: a review of the evidence utilized in the compilation of the Glacial Map of Britain. *Earth Science Reviews*, v. 70, 253–312. 2005.
- 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, 25- 40, 2009.
- Gardner, S.; Moholdt, G.; Wouters, B.; Wolken G.J.; Burgess, D.O.; Sharp, M.J.; Cogley, J.G.; Braun C.; Labine C. Sharply increased mass loss from glaciers and ice caps in the Canadian Arctic Archipelago. *Nature*, v. 473, n. 357-360. 2011.
- Goncalves, M. A.; Rosa, K. K.; Vieira, R.; Simões, J. C. Variação de área das geleiras do campo de gelo Kraków, Ilha Rei George, Antártica, no período 1956-2017. *Caminhos da Geografia (UFU Online)*, v. 20, 55-71, 2019.
- Heckmann, T.; Haas, F.; Morche, D.; Schmidt, K.-H.; Rohn, J.; Moser, M.; Leopold, M.; Kuhn, M.; Briese, C.; Pfeifer, N.; Becht, M. Investigating an Alpine proglacial sediment budget using field measurements, airborne and terrestrial LiDAR data. *IAHS Publication*, p.438-447. 2012.
- Heckmann, T.; Morche, D. *Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. Switzerland, Springer. 2019. 361p.
- Klaar, M.J.; Kidd, C.; Malone, E.; Bartlett, R.; Pinay, G.; Chapin, S.; Milner, A. Vegetation succession in deglaciated landscapes: implications for sediment and landscape stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 40, 1088–1100, 2015.
- Machado, M. R.; Oliveira, F. S.; Schaefer, C. E. G. R.; Francolino, M. R.; Michel, R. F. M. Paisagens polares não glaciais (Proglacial, paraglacial e periglacial): Revisão de conceitos e contribuições da pesquisa pedogeomorfológica brasileira. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 3, p.603-622, 2019.
- Napieralski, J.; Harbor, J.; Li, Y. K. Glacial Geomorphology and Geographic Information Systems. *Earth Science Review*, v. 85, 1-22. 2007.
- Penck, A.; Bruckner, E. *Die Alpen im Eiszeitalter*. Leipzig: Tauchnitz, 1909. 1199 p.
- Perondi, C. ; Rosa, K. K; Vieira, R. Caracterização geomorfológica das áreas livres de gelo na margem leste do campo de gelo Warszawa, ilha Rei George, Antártica Marítima. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, 411-426, 2019.
- Petsch, C.; Rosa, K. K.; Simões, C. L.; Simões, J. C. *Morfologia de feições geomorfológicas periglaciais e proglaciais da península Fildes*. In: XVII SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. 2018. Campinas-SP. Disponível em: <https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/issue/view/75>. Acesso em: 06/11/2020.
- Petsch, C.; Costa, R. M. ; Rosa, K. K; Vieira, R. ; Simoes, J. C. Identification and mesoscale mapping of the proglacial zone of the Collins glacier, King George Island, Antarctica. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 10, 18-39, 2019.
- 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, 315-326. 2009.
- Rosa, K. K. *Dinâmica glacial, sedimentológica e variações ambientais em geleiras na Enseada Martel, ilha Rei George, Shetlands do Sul*. Porto Alegre, 2012. 175f. Tese (Doutorado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2012.

---

Rosa, K.K.; Freiberger, V.L.; Vieira, R.; Rosa, C.A.; Simões, J.C. Glacial recent changes and climate variability in King George Island, Antarctica. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 05, n. 2, 176-183, 2014.

Rosa, K. K.; Perondi, C.; Veettil, B. K.; Auger, J. D. ; Simões, J. C. Respostas contrastantes de geleiras terrestres às variações climáticas recentes na Ilha King George, Antártica. *Antarctic Science*, v. 32, n. 5, p. 398-407. 2020.

Slaymaker, O. Proglacial, Periglacial or Paraglacial? *The Geological Society*, v. 320, 71- 84, 2009.

Sole, A.; Payne, T.; Bamber, J.; Nienow,P.; Krabill, W. Testing hypotheses of the cause of 849 peripheral thinning of the Greenland Ice Sheet: is land-terminating ice thinning at anomalously high rates? *The Cryosphere*, v. 2, n. 673-710. 2008.

## 6. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à CAPES, PROANTAR e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

---

Recebido em: 20/11/2019

Aceito para publicação em: 04/12/2020