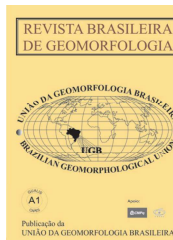


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 3 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i3.1547>



CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DAS GELEIRAS DA PENÍNSULA ANTÁRTICA

GEOMORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF ANTARCTIC PENINSULA GLACIERS

Aline Barbosa da Silva

*Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália, km 8, Rio Grande, Rio Grande do Sul. CEP: 96203-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4026-4591>
E-mail: linebsilva@yahoo.com.br*

Jorge Arigony-Neto

*Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália, km 8, Rio Grande, Rio Grande do Sul. CEP: 96203-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4848-2064>
E-mail: jorgerigony@furg.br*

Cleidir Eidelwein Bicca

*Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande
Av. Itália, km 8, Rio Grande, Rio Grande do Sul. CEP: 96203-900. Brasil
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0104-7156>
E-mail: cleidir.bicca@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
07/01/2019

Aceito (Accepted):
26/05/2019

Palavras-chave:

Geomorfologia; Geleiras;
Península Antártica.

Keywords:

Geomorphology; Glaciers;
Antarctic Peninsula.

Resumo:

O presente estudo tem como objetivo caracterizar a morfologia das geleiras da Península Antártica, usando uma chave para classificação desenvolvida no contexto do projeto internacional *Global Land Ice Measurements from Space*. No total, 1906 bacias de drenagem foram identificadas entre as latitudes 61°S e 73°S, correspondendo a uma área de 342.696,56 km². Cada bacia glacial foi então identificada de acordo com sua morfologia. A classificação primária mostrou que 61% das geleiras são de descarga, especialmente distribuídas por toda a Península Antártica. Considerando a forma, 54% foram identificadas como bacias simples, mais comuns ao sul da região, e 30% de massa de gelo estão associadas com bacias compostas por tributários, distribuídas principalmente, ao norte da área de estudo. A respeito da atividade frontal, 30% das geleiras foram classificadas como geleiras de desprendimento, 23% como desprendimento e piemonte, desprendimento e expansão, desprendimento e lobulada, e 17% são flutuantes, encontradas principalmente na porção norte e centro oeste, e 17% possuem pequenas frentes flutuantes, encontradas principalmente na parte norte e central do oeste e 17% estão alimentando plataforma de gelo no sul e leste parte da península central. Como características longitudinais, 50% das bacias são do tipo cascata e 38% são uniformes ou regulares, distribuídas por toda a região.

Além disso, 56% das geleiras possuem morainas laterais, distribuídas ao longo da Península Antártica e 30% das geleiras não possuem morainas.

Abstract:

The present study aims to characterize the morphology of Antarctic Peninsula glaciers, using a key for classification developed in the context of the international project Global Land Ice Measurements from Space. At total, 1906 glacial drainage basins were identified between latitudes 61°S and 73°S, corresponding to an area of 342,696.56 km². Each glacial basin was then identified according to its morphology. The primary classification of glaciers showed that 61% are outlet glaciers, spatially distributed throughout the whole Antarctic Peninsula. Considering the form, 54% were identified as simple basins, more common to the south of the region, and 30% of the ice masses are associated with basins composed by tributaries, distributed mainly to the north of the study area. Regarding the frontal activity, 30% of the glaciers were classified as calving glaciers, 23% as calving and piemonte, calving and expansion, and lobe and calving, and 17% have small floating fronts, found mainly in the north and central part of the west and 17% are ice shelf nourishing in the south and eastern part of the central peninsula. As for the longitudinal characteristics, 50% of the basins are cascading and 38% are uniform or regular, distributed throughout the region. In addition, 56% of the glaciers have lateral moraine, distributed along the Antarctic Peninsula and 30% of the glaciers do not have moraine.

1. Introdução

O primeiro inventário digital de geleiras foi criado pela Comissão Internacional de Geleiras e apresentado em 1894 no 6º Congresso Internacional de Geologia, em Zurique, na Suíça e levou o nome de *World Glacier Monitoring Service* (WGMS). A partir de 1986, o WGMS juntou-se ao PSFG (*Permanent Service on Fluctuations of Glaciers*) e ao *World Glacier Inventory* (WGI) e começaram a disponibilizar relatórios anuais com dados sobre as geleiras. Atualmente, esse inventário contém informações de mais de 130.000 geleiras, incluindo localização geográfica, área, comprimento, orientação, elevação e classificação. Porém, o maior número de geleiras classificadas se localiza nos Alpes.

No intuito de abranger todas as geleiras do planeta, foi criado, pelo *National Snow & Ice Data Center* (NSIDC) e coordenado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), o projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), que padronizou a aquisição de informações geoespaciais, utilizando imagens de satélite do sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), assim como Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os dados estão disponibilizados gratuitamente no site <http://www.glims.org/>.

A Península Antártica possui alguns inventários desenvolvidos para áreas específicas. Rabassa *et al.*, (1982) utilizaram mapas topográficos na escala 1:250 000, imagens multi-espectrais LANDSAT e fotografias aéreas (dos anos de 1979-80) das ilhas James Ross e Vega. Skvarca *et al.*, (1995), usando imagens óticas do sensor

LANDSAT TM e imagens SAR ERS-1, mapearam as geleiras da ilha James Ross, identificaram 39 geleiras de descarga. Braun *et al.*, (2001) elaboraram o primeiro inventário digital, utilizando fotos aéreas de satélites (SPOT, ERS) entre 1950 e 2000, a fim de delimitar as bacias de drenagem da ilha Rei George. Rau *et al.* (2004) publicaram um inventário de algumas geleiras do norte da Península Antártica, localizadas na Ilha James Ross, na Península Trinity, costa Danco e no norte da baía Marguerite, com imagens ASTER e LANDSAT.

Davies *et al.* (2012) fizeram um inventário detalhado do Norte da Península Antártica, que está disponível no site do projeto GLIMS, usando imagens ASTER, LANDSAT e SPOT-5 entre 1988 e 2009. Bliss *et al.* (2013) produziram um inventário das ilhas da Península Antártica, a partir dos dados do ADD e usando como subsídio imagens LANDSAT, MODIS e ASTER para uma eventual delimitação manual das bacias de drenagem entre 1957 e 2005. Cook *et al.* (2014) utilizando dados cartográficos, imagens LANDSAT e o modelo digital de elevação ASTER GDEM, com dados desde 1945 até 2010, delimitaram, de forma semiautomática, as linhas de contorno da Península Antártica entre 63°S e 70°S de latitude.

Este inventário de geleiras da Península Antártica contém a distribuição espacial de geofomas glaciais em um sistema de informações geográficas (SIG), a partir de imagens ASTER com 15 metros de resolução e abrange latitudes entre 61°S e 74°S. O objetivo principal deste trabalho foi contribuir para a construção do inventário de geleiras com a maior resolução espacial. A classificação

geomorfológica segue a metodologia determinada por RAU *et al.*, (2005) para as geleiras da Península Antártica.

A Península Antártica é a porção mais ao norte do continente Antártico e está no limite do gelo marinho sazonal. Por estas razões tem maior sensibilidade a variações climáticas (DE ANGELIS & SKVARKA, 2003; RAUP, 2006), pois é influenciada tanto por massas de ar frias subpolares como por massas de ar quentes de latitudes médias, tendo sua localização na zona da frente polar.

Essa sensibilidade a variações nas temperaturas oceânicas e do ar superficial, faz com que a Península Antártica seja mais susceptível as alterações climáticas recentes (ROTT *et al.*, 2011) ocorridas nos últimos 60 anos (VAUGHAN *et al.*, 2003). A região possui características distintas e diferentes de qualquer outro lugar da Criosfera.

A Península Antártica (figura 1) possui de 30 a 350 km de largura entre os mares de Bellingshausen e Weddell (AHLERT, 2005), com um platô interno com elevação média de 2.800 metros de altitude, tendo como ponto mais alto o Monte Jackson, com 3.000 metros acima do nível do mar (KING; TUNER, 1997). Essas características geomorfológicas da Península Antártica fazem com que as massas de ar úmidas vindas de oeste encontrem o platô da península e tragam precipitação de neve para a região. A região do mar de Weddell (KING; TUNER, 1997) é mais fria em relação a do mar de Bellingshausen (MORRIS; VAUGHAN, 2003), por conter gelo marinho na frente das geleiras o ano todo (COMPAGNUCCI; BARREIRA, 2012; WEISS *et al.*, 2012). Dessa maneira, a topografia da região atua como uma barreira natural na circulação atmosférica ao longo da península (REYNOLDS, 1981).

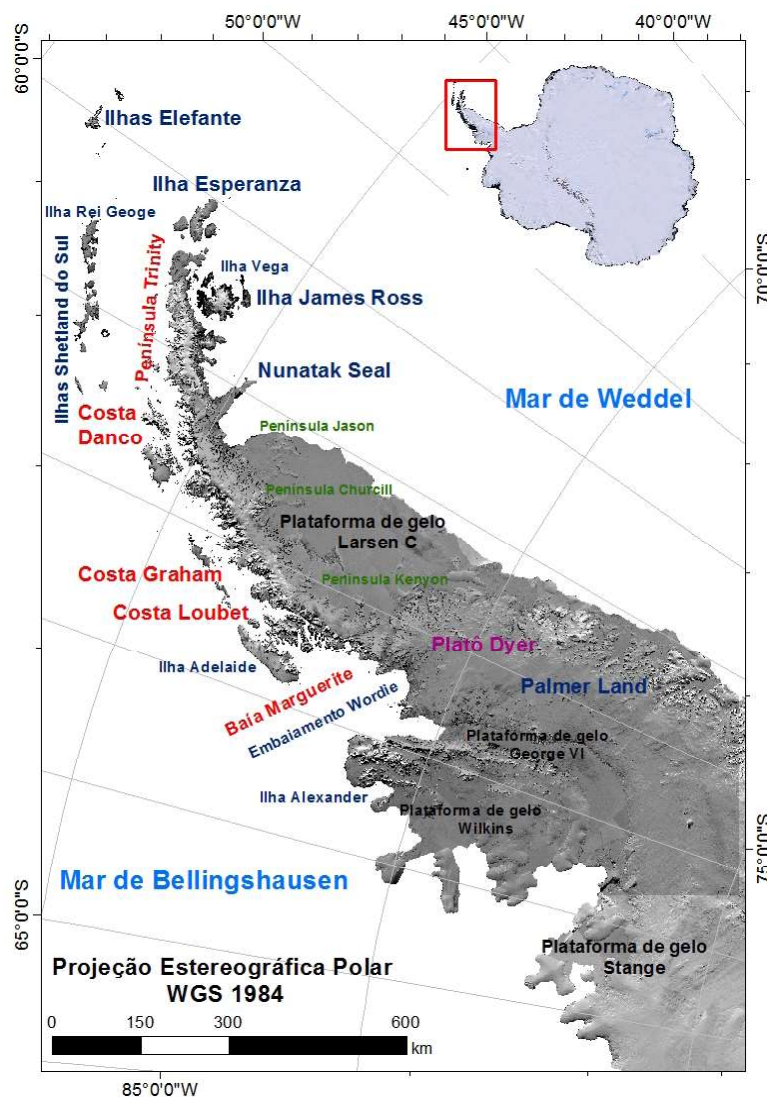


Figura 1 - Localização da área de estudo no continente Antártico (retângulo vermelho). A imagem da Península Antártica é uma Sub-set do mosaico LIMA (USGS, 2007).

A geomorfologia da Península Antártica é uma consequência da erosão glacial, relevos e sedimentos criados pelo manto de gelo e geleiras no passado e presente. A Península Antártica possui uma grande variedade de geoformas glaciais, sendo que a maior parte, aproximadamente 85% da sua área total, é constituída por geleiras de descarga, ou seja, geleiras que drenam suas massas de gelo para o mar ou para uma plataforma de gelo e 42% são geleiras de desprendimento, que perdem suas massas diretamente para o oceano (COOK *et al.*, 2014).

2. Classificação geomorfológica das geleiras

A classificação geomorfológica das geleiras, de acordo com Rau *et al* (2005), foi desenvolvida, exclusivamente, para as geleiras da Península Antártica. Essa classificação é realizada com base na classificação pri-

mária, forma, características frontais, perfil longitudinal e morainas (Tabela 1).

A classificação primária consiste em uma caracterização de nove classes de geleiras. As bacias de drenagem são divididas em (1) **Incerto ou variado**, (2) **Plataforma de gelo**, (3) **Geleira de rocha**, (4) **glacieret** e **Campo de neve**, (5) **Calota de gelo**, (6) **Campo de gelo**, (7) **Geleira de montanha**, (8) **Geleira de vale** e (9) **Geleira de descarga**. Duas categorias não foram utilizadas nesta classificação, o Manto de gelo continental, por ter proporção continental e este trabalho faz uma classificação mais detalhada e Corrente de gelo, pois elas ocorrem em uma zona no manto de gelo, onde as velocidades de gelo podem atingir centenas de metros por ano, a partir do deslizamento basal rochoso (SIMÕES, 2004) e este trabalho não mediu a velocidade de deslocamento das geleiras.

Tabela 1: Manual de classificação geomorfológica das geleiras da Península Antártica (RAU *et al*, 2010).

Classificação Primária	Forma	Características Frontais	Perfil Longitudinal	Moraina
Incertos ou Variado	Incertos ou Variado	Normal ou Variado	Normal	Sem Morainas
Campo de Gelo	Bacia Composta	Piemonte	Uniforme, regular	Morainas terminais
Calota de gelo	Bacia Composta tributárias	Expandida	Suspensa	Moraina Lateral
Geleira de descarga	Bacia Simples	Lobulada	Cascata	Combinação de Lateral e terminal
Geleira de Vale	Circo	Desprendimento	Cascata de gelo	-
Geleira de Montanha	Nicho	Coalescentes, não contribuinte	Interrupta	-
Glacieret e campo de neve	Cratera	Desprendimento e Piemonte	-	-
Plataforma de gelo	-	Desprendimento e Expansão	-	-
Geleira de Rocha	-	Desprendimento e lobulada	-	-
-	-	Plataforma de gelo alimentada	-	-
-	-	Flutuante	-	-
-	-	Desprendimento terrestre	-	-
-	-	Confluente, contribuinte	-	-

Plataformas de gelo são massas de gelo flutuante, conectadas ao continente. **Geleiras de rocha** caracterizam-se por deformações internas do gelo ou fluxo de lava com detritos contendo gelo intersticial, ou de lâminas de gelo entre os detritos rochosos (PAYNE, 1998). **Glaciet e campo de neve** são massas de neve e gelo muito pequenas ou massas de neve com pouco ou sem movimento por dois anos consecutivos e a área de ablação e acumulação não é bem definida. **Calotas de gelo** tendem a possuir uma forma redonda, com um perfil semi-parabólico, geralmente cobrindo um planalto. **Campos de gelo** formam-se, geralmente, em áreas extensas de bacias ou sobre planaltos, permitindo a formação de uma massa de gelo contínua sobre o relevo, sem interrupção por canais glaciares. Os campos de gelo possuem áreas menores que 50.000 km² de superfície. **Geleiras de montanha** ocorrem associadas a uma vertente da montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial, e não se encaixam em nenhuma outra classificação primária. **Geleiras de vale** com morfologia típica de vale e terminam em uma língua estreita. **Geleiras de descarga**, geralmente em uma forma de vale, representam a maioria das geleiras da Península Antártica, com drenagem a partir de um manto de gelo, campo de gelo, calota de gelo ou platô coberto de gelo.

As classificações quanto à forma, apresentam as seguintes denominações: **(1) bacia simples, (2) bacia composta, (3) bacia composta tributária, (4) flanco de gelo, (5) circo, (6) cratera e (7) nicho**. Nas **bacias simples**, as geleiras são alimentadas a partir de uma única bacia de captação de massa, com uma única área de acumulação (RAU *et al*, 2005). **Bacias compostas** possuem sistemas de descargas dendríticas ou geleiras de vale com mais de uma bacia que se fundem. **Bacias compostas tributárias** possuem, geralmente, várias áreas de acumulação. **Flancos de gelo** são bacias íngremes cobrindo de gelo as faces de uma montanha. **Circos** são geleiras em forma de leito de rocha firme e côncavo, não possui língua desenvolvida e a área de captação é criada através dos processos de erosão glacial. **Nichos** são pequenas geleiras em forma de vale ou depressões, aderindo um declínio na montanha, morfologicamente, menos desenvolvido que uma geleira de circo (WGMS, 1977).

As características frontais das geleiras permitem observar se a bacia: **(1) alimenta uma plataforma de gelo, (2) normal, (3) desprendimento terrestre, (4)**

coalescente, (5) confluyente, (6) piemonte, (7) expandida, (8) lóbulo, (9) desprendimento e piemonte, (10) desprendimento e expandida, (11) desprendimento e lóbulo, (12) desprendimento e flutuante. Aquelas que **alimentam uma plataforma de gelo** são as geleiras em que suas frentes fluem para uma plataforma de gelo. A classificação “**normal**” refere-se à geleira com uma frente simples, regular, com uma única linha frontal. Na bacia **desprendimento terrestre** a frente do gelo se quebra sobre penhascos ou pedaços de rochas de diferentes alturas. **Coalescente não contribuinte** são geleiras cuja língua se unem e fluem em paralelo com outra geleira sem fusão das massas de gelo. **Confluyente** é o contrário disso, a língua das geleiras tributárias emerge dentro de outras geleiras, fazendo o fluxo das duas massas se fundirem.

As bacias **Piemonte** ocorrem em áreas sem restrições topográficas (planície). A Classificação é clara pela expansão da frente das geleiras, com uma forma radial frontal. Se ela terminar no mar se usa a classe “**desprendimento e piemonte**”. Uma **bacia expandida** representa a expansão frontal sobre uma superfície plana, não necessariamente planície de uma bacia de drenagem. Nesse caso, a expansão lateral é menor que a geleira de piemonte. Se ela termina no mar, classifica-se como “**desprendimento e expandida**”. **Lóbulos** são formados onde a parte inferior da geleira deixa a parede de confinamento de um vale e se estende à uma superfície menos restrita para uma mais restrita. Se ela terminar no mar, se usa a classe “**desprendimento e Lóbulo**”. **Desprendimento** é uma classificação para uma bacia normal cuja terminação se estende até um lago ou o mar, produzindo *icebergs* e *growlers* na sua perda de massa, enquanto que, na bacia **Flutuante**, a terminação está boiando no mar e a linha de encalhe aproximado pode ser detectável.

As características longitudinais referem-se a uma definição do perfil longitudinal da bacia de drenagem, classificando-as como: **(1) normal, uniforme regular, (2) suspensa, (3) cascata, (4) cascata de gelo e (5) interrupta. Uniforme e regular**, entende-se por uma bacia sem alterações marcantes no perfil superficial da geleira, podendo se formar em encostas verticais. Na bacia **suspensa**, a geleira não tem conexão, sendo geralmente uma geleira de montanha, com inclinação acima de 60°. Na bacia **cascata**, o perfil muda na inclinação da superfície da geleira. **Cascata de gelo** é uma cobertura de gelo ao longo de uma vertente íngreme. **Interrom-**

vida ocorre quando o fluxo da geleira é interrompido abruptamente por um penhasco muito inclinado.

Morainas são derivadas do processo de erosão glacial. Ao se movimentarem as geleiras carregam detritos e os depositam de diversas formas nos lugares onde começa a ocorrer a fusão do gelo (BENNET; GLASSER, 2009). A classificação das morainas baseia-se principalmente na localização e orientação da mesma junto à geleira. São elas: **(1) morainas lateral, (2) terminal, (3) combinação de terminal e lateral e (4) sem moraina.** A moraina terminal origina-se dos detritos deixados na frente da geleira, no término dela, marcando o ponto de avanço máximo do gelo. Moraina lateral forma-se de cada lado da geleira, conforme a geleira se movimenta e carrega detritos.

3. Material e Método

Para a caracterização geomorfológica das geleiras, foi necessário, primeiramente, produzir um inventário das geleiras da Península Antártica. Para isso, foram utilizadas imagens de sensoriamento remoto, arquivos vetoriais referentes à linha de costa e um modelo digital de elevação.

Foram utilizadas 715 imagens do sensor ASTER e 84 imagens LANDSAT TM e ETM+, e as linhas de costa do *Antarctic Digital Database* (ADD), que cobriram quase que completamente a área de estudo (as áreas que não contem dados, as imagens, se existentes, possuíam muita interferência atmosférica) nos períodos de 22 de novembro de 2001 a 02 de março de 2015 para imagens ASTER, e 10 de dezembro de 1991 a 19 de janeiro de 2003 para imagens dos sensores LANDSAT TM e ETM+.

Em relação às imagens do sensor ASTER, foram utilizadas as bandas 1 (0.52 - 0.60 μm), 2 (0.63 - 0.69 μm) e 3 (0.76 - 0.86 μm) verticais, no instrumento VNIR, a bordo do satélite EOS-Terra, que correspondem a dois intervalos de comprimentos de onda no visível (verde e vermelho) respectivamente e um no infravermelho próximo. As imagens foram ortorretificadas utilizando o algoritmo AsterDTM.

A correção geométrica das imagens 3B e 3N foi feita em linguagem *Interactive Data Language* (IDL) com interface gráfica implementada no programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI), que utiliza os dados de efemérides do satélite, contidos no arquivo de

metadados da imagem ASTER de nível 1B. A configuração recomendada ao usuário pelo manual (SULSOFT, 2005) estabelece valores de altitude entre 0 e 3500 metros, resolução espacial de 15 m, correlação dos dados através de métodos de interpolação 2-D cúbicos e com tamanho da matriz de correlação de 3 x 3.

Os sensores LANDSAT 4 e 5 contêm o sensor *Thematic Mapper* (TM), e o satélite LANDSAT 7 possui o sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+). Esses dados não necessitaram de ortorretificação, pois já foram adquiridos com nível de processamento "LT1" (i.e., com correção das distorções do terreno, nível 1) realizado pelo USGS.

Foram utilizados dois modelos digitais de elevação, o AsterDTM 2 para delimitar as bacias de drenagem e o RAMP DEM para gerar os dados de morfologia das geleiras. Esses dois modelos foram escolhidos a partir de uma análise feita por ANDRADA *et al.*, 2013, onde foram comparados 4 modelos, o AsterGDDEM versão 1 e 2, RAMP DEM versão 2 e o MDE gerado pelo módulo ASTER DTM a partir das bandas 3N e 3B de uma imagem ASTER.

A linha de costa da Antártica (ADD, 2013) foi utilizada para cobrir as áreas sem imagens ASTER ou LANDSAT TM e ETM+. O ADD é um conjunto de dados vetoriais digitalizados a partir de mapas topográficos de média escala, complementados por dados digitalizados a partir de imagens de satélite, principalmente LANDSAT. Os dados do ADD serviram para delimitar a frente de 13 bacias de drenagem. Com as datas de 09 de março de 2008, 11 de outubro de 2010 e 08 de abril de 2015, os dados têm a escala 1:250.000 e possuem um erro de até 50 m.

O trabalho foi elaborado na projeção Estereográfica Polar e referenciado pelo sistema geodésico WGS84 e todas as edições vetoriais foram realizadas na escala 1:25.000. As técnicas aplicadas na metodologia podem conter erros de posicionamento e interpretação do foto-intérprete. As imagens ASTER, nas bandas 1, 2 e 3, a bordo do instrumento VNIR e as imagens LANDSAT na banda do infravermelho próximo (NIR) (i.e., banda 4 dos sensores TM e ETM+), possuem uma forte correlação na identificação de alvos semelhantes (CARVALHO-JÚNIOR *et al.*, 2005).

A digitalização dos polígonos referentes às bacias glaciais foi feita pela extração da rede de drenagem na forma semiautomática com a ferramenta de hidrologia

do pacote de Análise Espacial (*Spatial Analyst Tools*) do programa ArcGIS™ (ESRI, Inc.), (figura 2), elaborado por Andrada, (2013) e Oliveira (2013) entre as latitudes 57° O e 63° S e 67°O e 70° S, gerando 733

bacias de drenagem. O pacote hidrológico foi usado para modelar o fluxo da água através da superfície, a partir do AsterDTM 2.

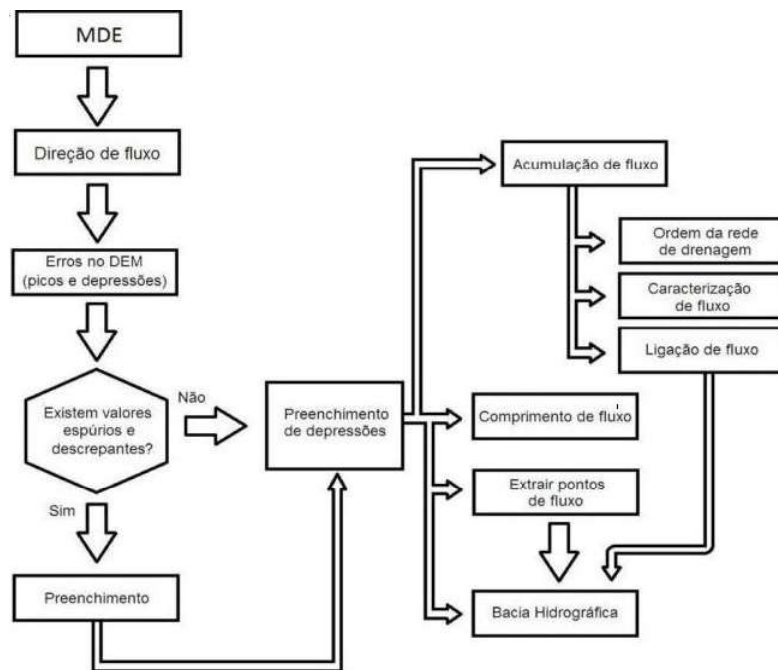


Figura 2 - Fluxograma contendo os procedimentos adotados para a delimitação das bacias de drenagem do pacote hidrológico do programa ArcGIS. Fonte: ESRI (2012) modificado por ANDRADA, 2013.

A forma automática para delimitar uma bacia de drenagem, descrita acima, é eficiente em cursos de rios, porém, quando aplicada na glaciologia, apresenta muitas distorções, como visto na figura 3. A ferramenta, geralmente, superestima a quantidade de bacias, já que mesmo em movimento, estimar a direção de fluxo de uma geleira é útil de forma visual, não de forma automática. Assim, essa ferramenta necessita de uma adaptação para ser utilizada na delimitação do curso de geleiras. Por esse motivo e, visando aumentar a precisão, todas as delimitações automáticas foram reprocessadas de forma manual.

Então, a delimitação de 1173 bacias de drenagem glacial foi digitalizada de forma manual na escala de 1:25.000. Essas áreas correspondem às coordenadas entre 67°O e 70°S até 69°O 74°S e todas as ilhas localizadas entre 54°O 61°S e 78°O 73°S. Para auxiliar na delimitação manual, as curvas de nível do AsterDTM (Figura 4) serviram de base na digitalização dos polígonos.

Para as áreas onde as geleiras alimentam uma plataforma de gelo, foram utilizadas as informações da posição da linha de encalhe do *Antarctic Digital Database* (ADD) para verificar se a posição observa-

da nas imagens de satélite estava correta. A linha de encalhe fica abaixo de uma plataforma apoiada sobre embasamento rochoso. Essas zonas de encalhe são muito difíceis de detectar (FRICKER *et al.*, 2009). Na imagem de satélite, geralmente, se nota uma elevação no limite entre a geleira e a plataforma de gelo.

A classificação geomorfológica das bacias de drenagem foi feita de forma visual, a partir do manual de classificação geomorfológica das geleiras da Península Antártica (RAU *et al.*, 2005). Por exemplo, a geleira Sjöegren, na figura 4, caracteriza longitudinalmente uma bacia composta tributária, ao lado dela, a geleira Boydell uma bacia composta e ambas na classificação primária são geleiras de descarga e suas frentes são flutuantes com morainas laterais. Essas informações são inseridas nas linhas de atributo do inventário de geleiras da Península Antártica. Os dados morfométricos como área, elevação mínima, elevação média, elevação máxima e declividade média, foram criados tendo como base as informações de elevação do RAMP DEM, extraídos através do algoritmo de estatística zonal no programa ArcGIS™ (ESRI, Inc.), que calcula essas informações dentro de zonas, ou seja, na linha de atributo de cada bacia de drenagem.

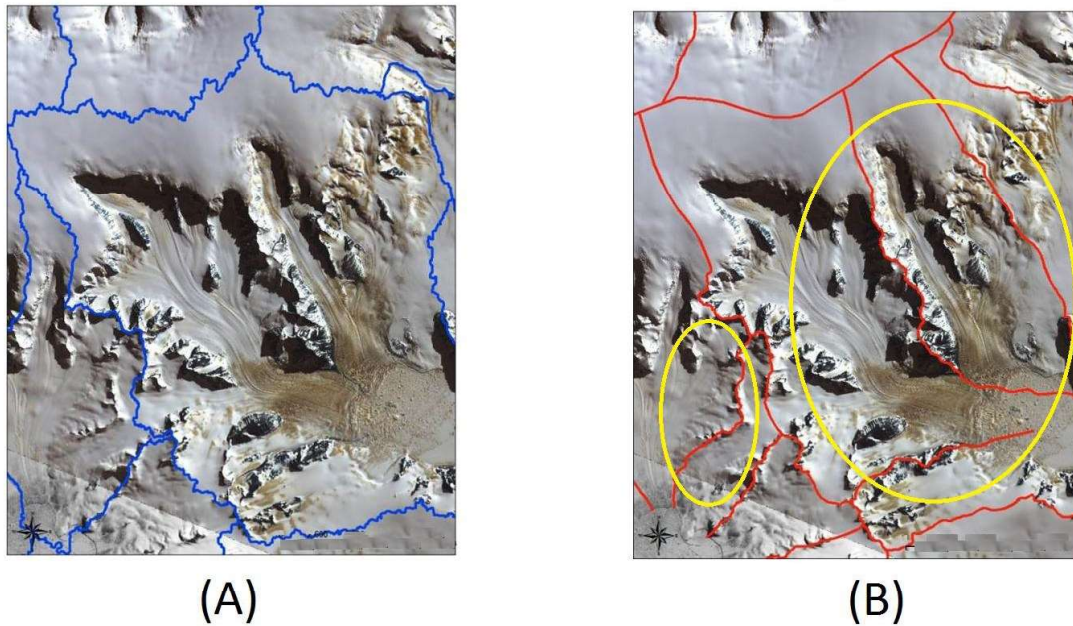


Figura 3 - (A) Bacias de drenagem delimitadas de forma automática e (B) bacias com correção manual da delimitação automática. Os círculos amarelos correspondem às principais diferenças entre a delimitação automática e manual. A imagem é uma subcena ASTER da geleira Sjöegren de 26 de setembro de 2001.

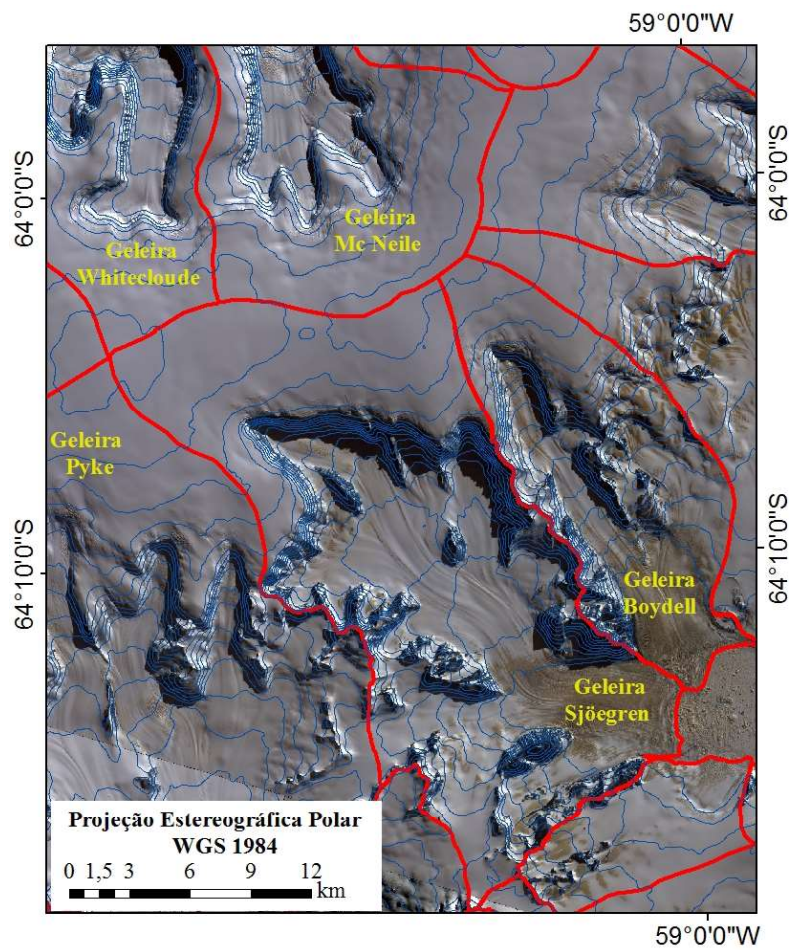


Figura 4 - Curvas de nível do AsterDTM, 100 m em azul e em vermelho os limites das bacias de drenagem. A imagem é uma subcena ASTER da geleira Sjöegren de 26 de setembro de 2001.

Para que o cálculo de área das bacias de drenagem não fosse superestimado por áreas livres de gelo foi necessário produzir uma máscara dessas regiões. Por isso se fez necessária a delimitação das áreas livres de gelo. Nas mesmas imagens utilizadas para delimitar as bacias de drenagem foi aplicado uma classificação supervisionada disponível no programa Erdas Imagine™ (*Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC*), fundamentado no método estatístico de máxima verossimilhança, que se baseia nas assinaturas espectrais de cada pixel, adquiridas pela amostra de pixels referentes a superfície de rocha e solo exposto, e o adiciona a uma classe. Com o resultado da classificação, foi gerado um arquivo vetorial, com todas as áreas de rochas na imagem. Esse arquivo foi utilizado como máscara no cálculo da área de gelo das bacias de drenagem.

4. Resultados e discussão

Através da metodologia proposta, foi possível gerar informações sobre as características geomorfológicas das geleiras da Península Antártica. Este inventário gerado a partir de imagens ASTER, resultou na delimitação de 1906 bacias de drenagem entre as latitudes 61°S e 73°S, correspondendo a uma área de 342.696,56 km² de gelo. As áreas livres de gelo correspondem a 5.363,38 km².

A classificação primária das geleiras (Figura 5) mostrou que 62% das bacias da Península Antártica são de descarga, ou seja, drenam suas massas principalmente do platô coberto de gelo, ou campo de gelo ou calota de gelo, para o oceano ou para uma plataforma de gelo. Essa área corresponde a 282.330,22 km² de área de gelo.

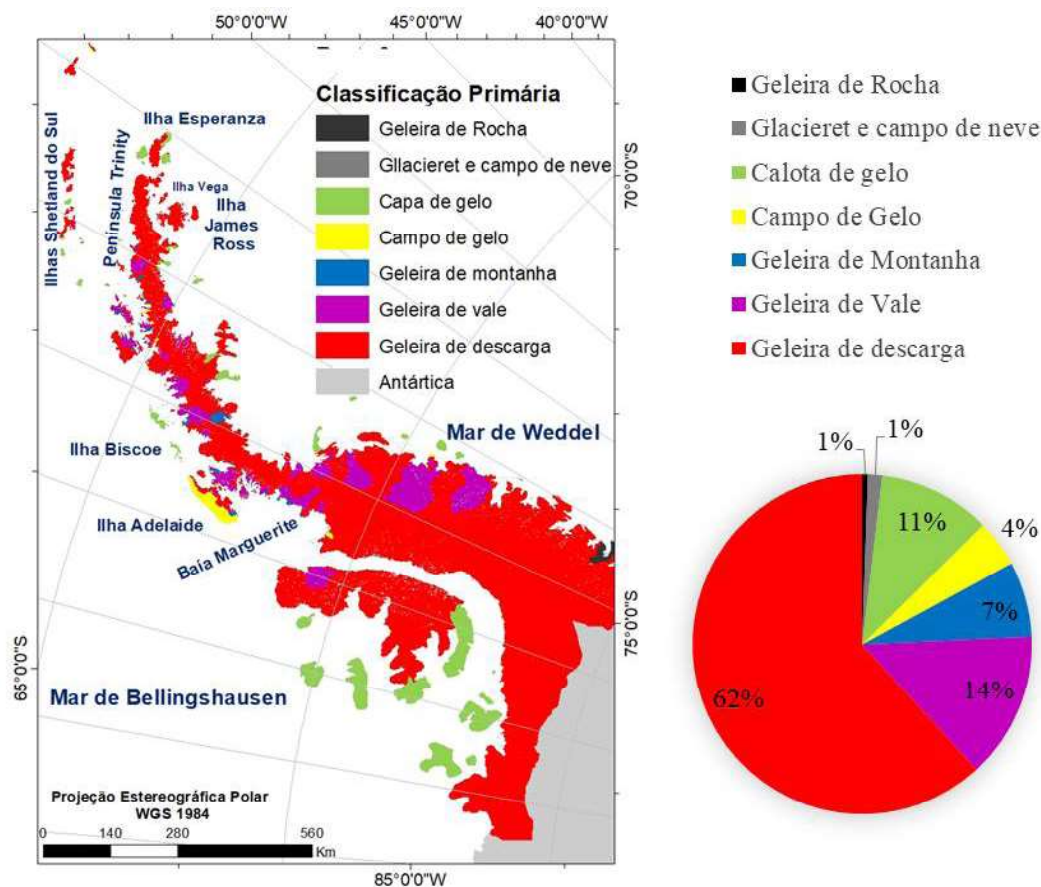


Figura 5 - Classificação primária das bacias de drenagem da Península Antártica.

As geleiras de descarga estão espalhadas por toda a Península Antártica e representam a quase totalidade das bacias estudadas. Isso ocorre porque a massa de gelo acumulado no platô de gelo é descarregada no oceano ou em uma plataforma de gelo para o lado oeste e leste.

Esse platô interno tem uma elevação média de 2.800 metros de altitude, o que corrobora, sobremaneira, para a ocorrência desse tipo de geleira.

A classificação em relação a forma (Figura 6) também seguiu um padrão. Cerca de 54% das bacias

exibem uma morfologia simples, com um único fluxo transferindo massa para uma única língua, representando uma área de 143.008,55 km²; outros 30% são de bacias compostas, geleiras que também possui uma

morfologia simples, porém na sua área de acumulação podem existir outras geleiras compondo uma mesma bacia de drenagem. Essa classificação se refere a 141.857,35 km² de área de gelo.

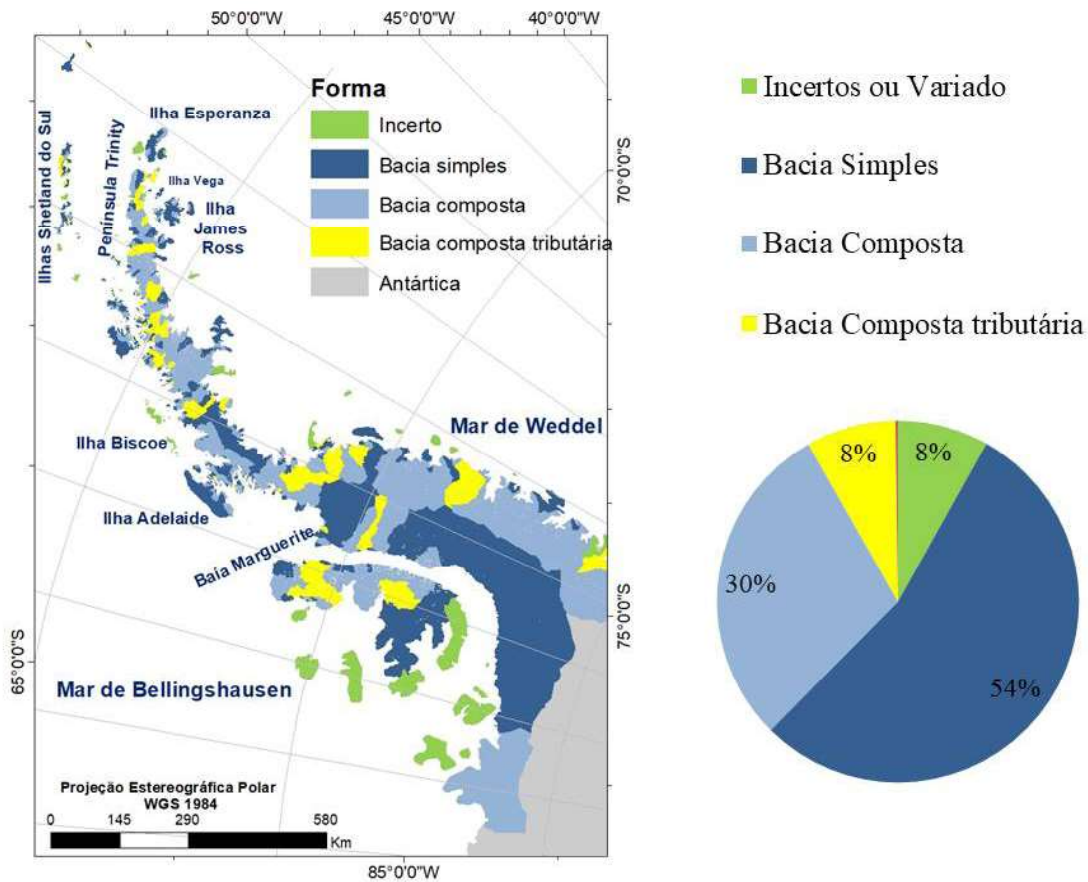


Figura 6 - Classificação em relação à morfologia das bacias de drenagem da Península Antártica.

As bacias simples e compostas representam a maior parte da classificação em relação a forma. Essas bacias estão espalhadas quase que uniformemente ao longo de toda a área de estudo.

Dentro da Baía Wordie, a geleira Fleming, classificada como uma forma simples e longitudinalmente em cascata, alimentava a plataforma de gelo Wordie, que atuava como encalhe de sua massa de gelo. A geleira começou a fluir cerca de 50% mais rápido a partir de 1974, quando aconteceu o primeiro colapso da plataforma de gelo Wordie. Desde então, com descarga de $6,8 \pm 0,3$ km³/yr, equivalendo a 84% de acumulação para $3,7 \pm 0,8$ km³/yr, foi constatado que sua taxa de afinamento foi de 2 m/yr (RIGNOT *et al.*, 2005).

As características frontais (Figura 7) são a categorização com mais alternativas de identificação das bacias de drenagem.

As bacias de drenagem classificadas como des-

prendimento, ou seja, àquelas que estão em contato com o oceano e perdendo massa na forma *icebergs*, lançando água doce para o mar, representam a maior parte das geleiras da Península Antártica, 53% entre desprendimento e piemonte, desprendimento e expansão, desprendimento e lobulada e desprendimento, em uma área de 71.740,90 km², espalhadas, principalmente, nas regiões norte e centro oeste e outros 17% estão flutuantes. Ou seja, sua língua está em contato direto com o oceano, 20.172,98 km² da Península Antártica possuem essa característica e, especialmente, as geleiras mais ao norte possuem essa característica. Assim, 70% das bacias de drenagem têm ligação direta com águas oceânicas e podem contribuir diretamente para a elevação do nível dos mares. As bacias de drenagem, que alimentam uma plataforma de gelo, representam 17% em uma área de 235.871,30 km². Essas extensas regiões se dão pelo tamanho das plataformas de gelo, principalmente as maiores, como a Larsen (B, C e D).

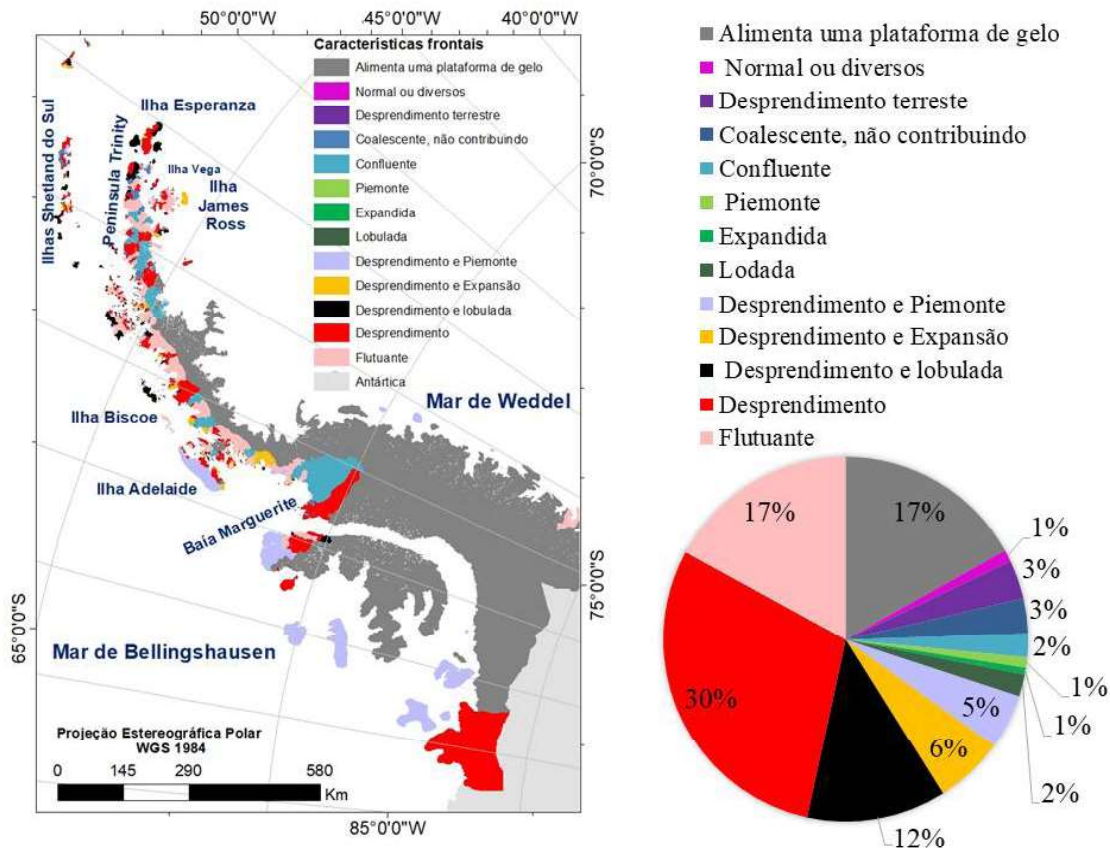


Figura 7 - Classificação em relação às características frontais das bacias de drenagem da Península Antártica.

A maior parte das geleiras da Península Antártica, 90%, estão em processo de retração, com uma grande variedade de geofomas glaciais. Aproximadamente, 85% da sua área total é constituída por geleiras de descarga, ou seja, geleiras que drenam suas massas de gelo do platô coberto de gelo para o mar ou para uma plataforma de gelo. Cerca de 42% são geleiras de desprendimento, que estão drenando suas massas de gelo diretamente para o oceano (COOK *et al.*, 2014). Na porção ocidental da Península Antártica, a retração de algumas bacias, provavelmente, se dá pelo aquecimento da água profunda circumpolar. No extremo noroeste, não encontramos esse padrão, pois as frentes das geleiras estão em águas mais frias (COOK *et al.*, 2016).

A costa centro oeste experimentou um aumento de 12% na retração de suas geleiras entre 1992 e 2005, como resultado da aceleração das geleiras, os dados das estações meteorológicas não mostram aumento na temperatura ar, o pode estar ligada a retração e afinamento frontal das geleiras é o aquecimento do oceano (PRITCHARD & VAUGHAN, 2007). Essa área tem 60% das bacias de desprendimento e 29% flutuantes. Nas ilhas Shetland

do Sul no Norte da Península Antártica, um estudo nas bacias de drenagem da capa de gelo da ilha Livingston mostra os possíveis efeitos do aumento da temperatura do ar superficial, onde as geleiras de descarga se deslocam a 250 m a⁻¹ (OSMANOGLU *et al.*, 2014).

Em um estudo entre 2008 e 2011, na ilha Rei George, foi estimado a velocidade de fluxo das geleiras em >225 m a⁻¹ e uma taxa de descarga de gelo em torno de 0,720 ± 0,428 Gt a⁻¹, valor este estimado para as geleiras de descarga e flutuantes, sugerindo que a perda de massa se dá pelo desprendimento de iceberg e degelo submarino (OSMANOGLU *et al.*, 2014). Outro estudo, realizado entre 2001 e 2008, permitiu constatar que a ilha Rei George perdeu 20 km² (aproximadamente 1,6% de sua área) (RÜCKAMP *et al.*, 2011). Além disso, dados geomorfológicos de duas geleiras, a Wanda e a Ecology, ao longo de cinco décadas, mostram que as bacias, que estão em processo de retração, tem suas bases úmida (ROSA *et al.*, 2015), o que pode acelerar, e muito, o movimento e desprendimento de uma geleira. As retrações estão quase que inteiramente ligadas a geleiras de maré (BRAUN; GOSSMANN, 2002).

Na ilha James Ross, as geleiras com terminação na terra foram as que mais sofreram retração entre 1998 – 2001 (DAVIES *et al.*, 2012). Entre 2000-2008 suas geleiras perderam 2,4 Gt a⁻¹ de massa de gelo, o equivalente a 47,1 km² de frente das geleiras (SCAMBOS *et al.*, 2014).

Em relação ao comprimento das geleiras, verificou-se que 50% das bacias são cascata, ou seja, apre-

sentam um perfil longitudinal que decai suavemente até a sua língua (Figura 8). Representando uma área de 181.842,10 km² e predominando na região centro oeste, 38% das geleiras são classificadas como uniforme ou regular. Apresentam uma queda na declividade. Essas geleiras somam 153.851,71 km², e estão localizadas principalmente na região mais ao sul da Península Antártica.

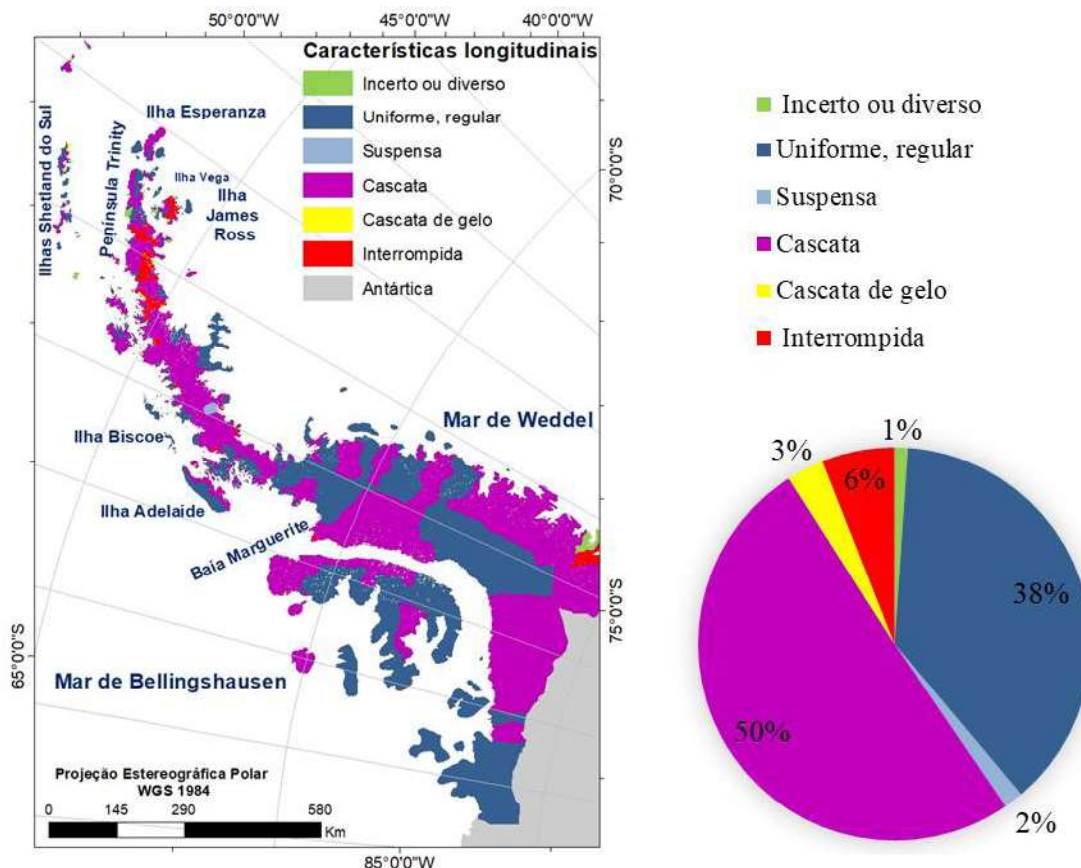


Figura 8 - Classificação das características longitudinais das bacias de drenagem glacial da Península Antártica.

As morainas (Figura 9) são feições difíceis de serem identificadas por imagens de satélite, pois são derivadas do processo de erosão glacial, quando as geleiras se movimentam carregam uma carga de detritos e as depositam de diversas formas nos lugares onde começa a ocorrer a fusão do gelo. Esses acúmulos de material não se dispõem em camadas como ocorre com os depósitos sedimentares, mas formam massas entremeadas de materiais grossos e finos, dando origem às morainas, que se classificam de acordo com a parte da geleira na qual foi depositada.

As morainas mais fáceis de classificar correspondem aos 56% de morainas laterais, essas bacias em

área têm 203.788,81 km². As morainas terminais, que representa apenas 3% das geleiras, são as mais difíceis de identificar e, geralmente, quando identificadas estão perto de morainas laterais. Os outros 30% das geleiras não possuem morainas expostas, representando uma área de 139.270,55 km².

A maior parte das morainas está na região norte da Península Antártica, provavelmente, porque foram expostas pelo excessivo degelo que vem ocorrendo nessa região, devido ao aumento da temperatura do ar, fazendo com que 79,3% das bacias estejam em processo de retração (DAVIES *et al.*, 2012).

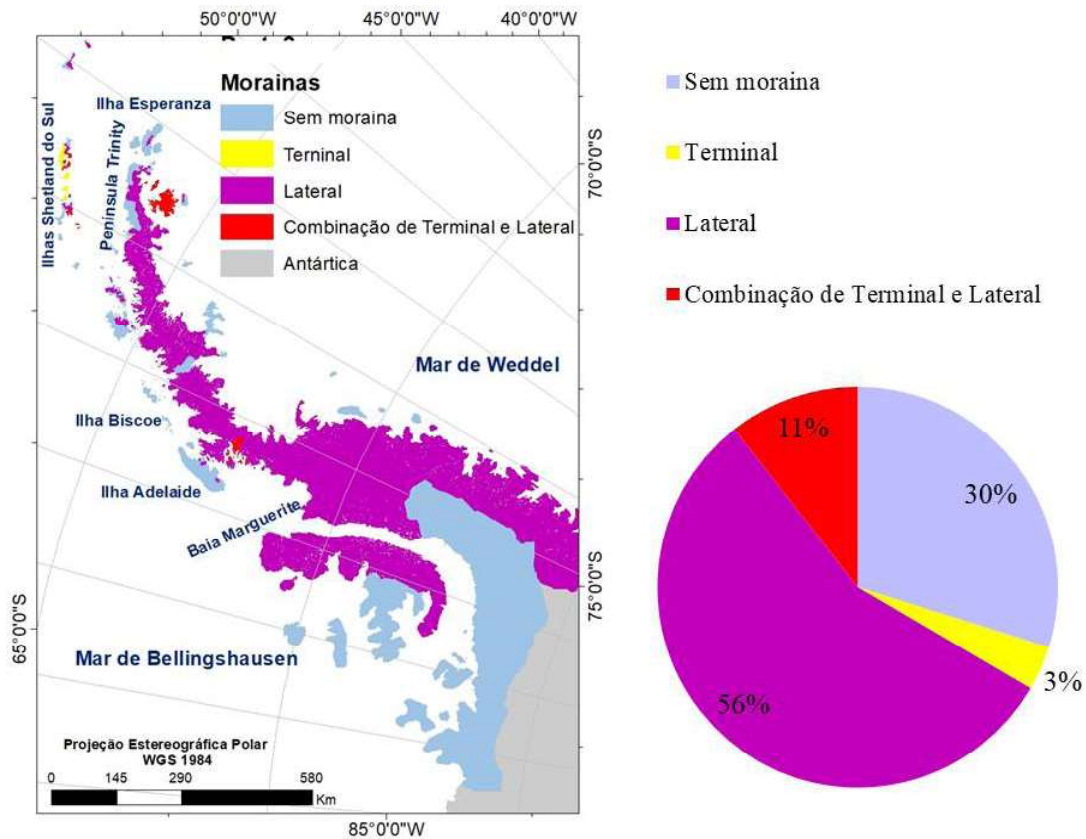


Figura 9 - Classificação das morainas das bacias de drenagem da Península Antártica

Conclusão

Concluimos que a partir da técnica de análise de imagens de sensores remotos é possível inferir sobre a classificação geomorfológica das geleiras. O trabalho identificou que 61% das bacias são de descarga, 14% compreendem as geleiras de vale, 7% correspondem as geleiras de montanha, 4% campo de gelo, 12% calota de gelo, 1% geleiras de rocha e 1% glacieret e campo de neve.

Em relação a sua forma, 54% são bacias simples, 30% bacias compostas, 8% são bacias compostas tributárias, menos de 1% são flanco de gelo, geleiras de circo, nicho e cratera, e 8% são incertas ou variadas.

A classificação das características primárias mostrou que 17% das geleiras são flutuantes, 30% tem sua retração por desprendimento, 12% desprendimento e lobulada, 6% desprendimento e expansão, 5% desprendimento e piemonte, 2% são lobuladas, 1% expandida, 1% piemonte, 2% confluyente, 3% coalescente não contribuinte, 3% desprendimento terrestre, 1% normal ou diverso e 17% alimentam uma plataforma de gelo. Nas características longitudinais, 50% são cascata, 38%

uniforme regular, 6% interrompida, 3% cascata de gelo, 2% suspensa e 1% incerta ou diversa.

O fato da maioria das geleiras da Península Antártica serem de descarga mostra a vulnerabilidade dessas massas de gelo às mudanças climáticas. A possível alteração no seu equilíbrio dinâmico, pelo derretimento ou aceleração de fluxo do gelo, por exemplo, tende a aumentar o seu potencial para drenar a massa de gelo de uma área elevada, platô interno, campo de gelo ou calota de gelo para o oceano ou uma plataforma de gelo.

Agradecimentos

Aos órgãos financiadores do presente trabalho, a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida durante o doutorado, a Universidade Federal do Rio Grande – FURG pelo espaço e suporte de pesquisa, o INCT da Criosfera, ao programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica pelo conhecimento adquirido durante o curso e ao Laboratório de Monitoramento da Criosfera – LaCrio pelos dados e programas utilizados para o desenvolvimento do presente estudo.

Referências Bibliográficas

- ADD (2013) **SCAR Antarctic Digital Database**. Version 6.0. Em: <https://www.add.scar.org/>. Acesso: Agosto de 2012.
- AHLERT, S. **Variações morfológicas do campo de gelo da ilha Brabant, Antártica**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005. 102p.
- ANDRADA, R. R., **Desenvolvimento de métodos para o inventário de geleiras da península antártica**. (Monografia em geografia). Instituto de ciência humanas e da informação, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grade. 2013. 45p.
- ANDRADA, R. R.; OLIVEIRA, J. A.; BICCA, C. E.; MENDES JUNIOR, C. W.; ARIGONY NETO, J. Análise de parâmetros morfométricos de geleiras derivados de diferentes modelos digitais de elevação da Península Antártica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2013. p. 8782-8789. ISBN 978-85-17-00066-9.
- BENNETT, R. M.; GLASSER, N. F. **Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms** Second Edi ed. John Wiley & Sons, 2009. 402p.
- BLISS, A.; HOCK, R.; COGLEY, J.G. A new inventory of mountain glaciers and ice caps for the Antarctic Periphery. **Annals of Glaciology**, v. 54, n. 63, p. 191–199, 2013. DOI:10.3189/2013AoG63A377.
- BRAUN, M.; RAU, F.; SIMÕES, J. A GIS-based glacier inventory for the Antarctic Peninsula and the South Shetland Islands - A first case study on King George Island. **Geospatial information science**, v. 4, n. 2, p. 15-24, 2001. DOI: 10.1007/BF02826973.
- BRAUN, M.; GOSSMANN, H. Glacial changes in the areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, maritime Antarctica. **Geocology of Antarctic Ice-Free Coastal Landscapes**, pp. 75-89, 2002. DOI: 10.1007/978-3-642-56318-8_6.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARAES, R. F.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. F.; GOMES, R. A. Análise comparativa do processo de identificação automatizada de membros finais a partir de imagens com diferentes resoluções espectrais para a região de Niquelândia (AVIRIS, ETM+ E ASTER). **Revista Brasileira de Geofísica**, 23(1): 39-50, 2005. ISSN 0102-261X. DOI:10.1590/S0102-261X2005000100004.
- COMPAGNUCCI, R. H.; BARREIRA, S. Climatología de la variabilidad espacial de la concentración de hielo en los mares de Bellingshausen, Amundsen y Weddell. 2012. **Meteorologica**. Vol. 30 N° 2. Pag. 55-76.
- COOK, A. J.; VAUGHAN, D. G.; LUCKMAN, A. J.; MURRAY, T. A new Antarctic Peninsula glacier basin inventory and observed area changes since the 1940s. **Antarctic Science** 26(6), 614–624, 2014. DOI: 10.1017/S0954102014000200
- COOK, A. J.; Holland, P. R.; Meredith, M. P.; Murray, T.; Luckman, A.; Vaughan, D. G. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. **Science**, 353(6296), 283-286, 2016. DOI: 10.1126/science.aae0017.
- DAVIES, B.J.; CARRIVICK, J.L.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; SMELLIE, J.L. Variable glacier response to atmospheric warming, northern Antarctic Peninsula, 1988–2009. **Cryosphere**, 6,1031–1048, 2012. DOI: 10.5194/tc-6-1031.
- DE ANGELIS, H.; SKVARCA, P. Glacier Surge After Ice Shelf Collapse. **Science**, v. 299, p. 1560-1562, 2003. DOI: 10.1126/science.1077987.
- ESRI (2012). Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop help. Redlands. Disponível em: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/overview-of-the-hydrology-tools.htm>. Acesso: Junho de 2012.
- FRICKER, H.A.; COLEMAN, R.; PADMAN, L.; SCAMBOS, T. A.; BOHLANDER, J.; BRUNT, K. M. Mapping the grounding zone of the Amery Ice Shelf, East Antarctica using InSAR, MODIS and ICESat. **Antarctic Science**, 21(5): p. 515-532, 2009. DOI: 10.1017/S095410200999023X.
- KING, J.C.; TURNER, J. **Antarctic meteorology and climatology**. 1997. Cambridge: Cambridge University Press, 409 p.
- MORRIS, E. M.; D. G. VAUGHAN. Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of viability of ice shelves. **Antarctic Peninsula Climate Variability: Historical and Paleoenvironmental Perspectives**, v. 79, p. 61-68, 2003. DOI: 10.1029/AR079p0061.
- OLIVEIRA, J. A. **Resultados do primeiro inventário de geleiras da Península Antártica**. Monografia ((Monografia em geografia)). Instituto de ciência humanas e da informação, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande. 2013. 85p.
- OSMANOGLU, B.; NAVARRO F. J.; HOCK, R.; BRAUN, M.; CORCUERA, M. I. Surface velocity and mass balance of Livingston Island ice cap, Antarctica. **The Cryosphere**, v. 8, n. 5, p. 1807-1823, 2014. DOI: 10.5194/tc-8-1807-2014.
- PAYNE, D. Climatic implications of rock glaciers in the arid

- Western Cordillera of the Central Andes. **Glacial Geology and Geomorphology**, vp, 1998.
- PRITCHARD, H. D.; VAUGHAN, D. G. Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula, **Journal Geophysical Research**, vol. 112, no. F3, pp. F03, 2007. DOI: 10.1029/2006JF000597.
- RABASSA, J.; SKVARCA, P.; BERTANI, L.; MAZZONI, E. Glacier inventory of James Ross and Vega Islands, Antarctic Peninsula. **Annals of Glaciology**, 3, 260–264, 1982. DOI: 10.3189/S0260305500002883.
- RAU, F.; MAUZ, F.; DE ANGELIS, H.; JAÑA, R.; ARIGONY NETO, J.; SKVARCA, P.; VOGT, S.; SAURER, H.; GOSSMANN, H. Variations of glacier frontal positions on the Northern Antarctic Peninsula, **Annals of Glaciology**, vol. 39, no. 1, pp. 525–530, 2004. DOI: 10.3189/172756404781814212.
- RAU, F.; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S.J.S.; RAUP, B.H. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual, version 1.0. Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Regional Center “Antarctic Peninsula”, **Institut für Physische Geographie**, Albert-Ludwigs Universität, Freiburg, Germany, pp. 6-23, 2005. https://www.glims.org/MapsAndDocs/assets/GLIMS_Glacier-Classification-Manual_V1_2005-02-10.pdf. Acesso: Maio de 2012.
- RAUP, B. H. The GLIMS Glacier Inventory of the Antarctic Peninsula. **Earth Observer**, 18 (6):9–11, 2006.
- REYNOLDS, J. The distribution of mean annual temperatures in the Antarctic Peninsula. **British Antarctic Survey Bulletin**, v. 54, n. 1, p. 123-133, 1981.
- RIGNOT, E.; CASASSA, G.; GOGINENI, S.; KANAGARATNAM, P.; KRABILL, W.; PRITCHARD, H.; RIVERA, A.; THOMAS, R.; TURNER, J.; VAUGHAN, D. Recent ice loss from the Fleming and other glaciers, Wordie Bay, West Antarctic Peninsula. **Geophysical Research Letters**, V.32, Issue 7, 2005. DOI: 10.1029/2004GL021947.
- RÜCKAMP, M.; BRAUN, M.; SUCKRO, S.; BLINDOW, N. Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. **Global and Planetary Change**, v. 79, n. 1, p. 99-109, 2011. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2011.06.009.
- ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; FERNANDEZ, G.; MENDES JR, C. W.; VELHO, L. F.; SIMÕES, J. C. Recent changes in the Wanda Glacier, King George Island, Antarctica. **Pesquisas em Geociências**, 42 (2): 187-196, 2015. DOI:10.22456/1807-9806.78119.
- ROTT, H.; MUELLER, F.; NAGLER, T.; FLORICIOU, D.; EINEDER, M. Mass deficit of glaciers at the northern Antarctic Peninsula derived from satellite borne SAR and altimeter measurements. **IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. p. 3645-3648, 2011. DOI: 10.1109/IGARSS.2011.6050014.
- SCAMBOS, T. A.; BERTHIER, E.; HARAN, T.; SHUMAN, C. A.; COOK, A. J.; LIGTENBERG, S.; BOHLANDER, J. Detailed ice loss pattern in the northern Antarctic Peninsula: widespread decline driven by ice front retreats. **The Cryosphere**, 8(6), 2135-2145, 2014. DOI: 10.5194/tc-8-2135.
- SKVARCA, P.; ROTT, H.; NAGLER, T. Satellite imagery, a base line for glacier variation study on James Ross Island, Antarctica, **Annals Glaciology**, 21, p. 291–296, 1995. DOI: 10.3189/S0260305500015962.
- SIMÕES, J. C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, Rio de Janeiro, n.4, pages119-154, 2004.
- SULSOFT (2005). Aster DTM 2.0 Installation and User’s Guide. Technical report, Sulsoft Ltd, Porto Alegre, Brazil, 2005.
- USGS (2007). United States Geological Survey. **LANDSAT Image Mosaic of Antarctica (LIMA)**. U.S Geological Survey Fact Sheet– 3116, 4 p.
- VAUGHAN, D. G.; MARSHALL, G. J.; CONNOLLEY, W. M.; PARKINSON, C. MULVANEY, R.; HODGSON, D. A.; KING, J. C.; PUDSEY, C. J.; TURNER, J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. **Climatic Change**, 60, p. 243– 274, 2003. DOI: 10.1023/A:1026021217991.
- WEISS, A. I.; KING, J. C.; LACHLAN-COPE, T. A.; LADKIN R. S. Albedo of the ice covered Weddell and Bellingshausen Seas. **The Cryosphere**, 6, 479–491, 2012. DOI:10.5194/tc-6-479.
- WGMS (1977). Fluctuations of Glaciers 1970-1975 (Vol. III). F. Müller (ed.), IAHS (ICSU) / UNESCO, Permanent Service on Fluctuations on Glaciers, Zurich, Switzerland: 269 pp.