UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Dissertação de Mestrado

APLICAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA A DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS DE DRENAGEM GLACIAL NA PENÍNSULA ANTÁRTICA

RAFAEL RECHIA ANDRADA

Rio Grande
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

RAFAEL RECHIA ANDRADA

APLICAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA A DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS DE DRENAGEM GLACIAL NA PENÍNSULA ANTÁRTICA

Dissertação de mestrado apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande

Prof. Dr. Marcos Wellausen Dias de Freitas
(Orientador)

Banca Examinadora:
Dr. Claúdio Wilson Mendes Júnior (UFRGS)
Dr. Jorge Arigony Neto (IO-FURG)

Rio Grande
2015

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Luiz Carlos e Ivana por todo o apoio e incentivo em todas as decisões que tomei até então em minha vida. Agradeço aos meus tios que tanto admiro e as minhas queridas avós Norma e Nedecy. Agradeço também a meu avô Jurandyr Rechia, que não está mais por aqui, mas que foi uma pessoa muito inspiradora na minha vida.

Aos meus amigos, não vou citar nomes, pois certamente esqueça alguém. Mas enfim, amigos estes que me deram apoio nos momentos difíceis, e que proporcionaram bons momentos de descontração e companheirismo.

Aos colegas e principalmente aos alunos da ASSPE que sempre se mostraram interessados no meu trabalho de mestrado e me incentivaram durante esses 7 meses em sala de aula.

À CAPES pela bolsa de estudos concedida durante o período do mestrado.

Ao meu orientador, o prof. Dr. Marcos Wellausen Dias de Freitas pelos ensinamentos, incentivo, sabedoria e também pelas dicas preciosas de rock'n'roll durante o período de orientação no mestrado.

À banca, por terem topado fazer parte dessa defesa de mestrado e também por serem pessoas inspiradoras durante meu processo de crescimento profissional.

A todos integrantes do LaCrio, aos atuais e aos que já passaram pelo laboratório. Nesses seis anos tem sido muito bom fazer parte desse ambiente com pessoas dedicadas e competentes. Agradeço por todos os momentos de descontração, e principalmente pela troca de conhecimentos e amizade.

Agradeço enfim, a minha namorada Suellen. Muito obrigado por todo o amor, incentivo e amizade ao longo desses anos.

RESUMO

Este trabalho apresenta o método desenvolvido para delimitação automática de bacias de drenagem glacial da Península Antártica a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Foram testados o Antarctic Peninsula 100m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM (APGDEM), Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model (RAMP DEM) e algoritmos de fluxo de drenagem e suavização do Quantum GIS (QGIS). Foram utilizados procedimentos de remoção de picos e depressões, definição de limiar para a área de captação com os algoritmos D8, DInf, DEMON e KRA , eliminação de dados superestimados, suavização de vetores com o algoritmo *Snakes* e agrupamento de subbacias hidrográficas a partir de estatística zonal com dados de referência de Oliveira et al., (2012) e Cook et al., (2014). O APGDEM se mostrou melhor que o RAMP DEM para a área de estudo, pois além de apresentar melhor resolução espacial, possibilitou a geração de redes de drenagem com dados menos superestimados. Os resultados das delimitações automáticas foram comparados e validados por análise morfométrica e índice estatístico *Kappa*. O algoritmo para extração de rede de drenagem DInf apresentou melhores resultados quando comparado aos dados de referência. O método automático desenvolvido se mostrou eficaz para a delimitação preliminar de bacias de drenagem glacial da Península Antártica. Embora os dados ainda necessitem de trabalho de edição, a metodologia elaborada poderá servir de base para delimitação de geleiras de outras regiões do planeta, contribuindo com estudos relativos ao monitoramento da Criosfera.

ABSTRACT

This work presents the method developed for automatic delineation of glacial drainage basins of the Antarctic Peninsula from Digital Elevation Models (DEM). The Antarctic Peninsula 100m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM (APGDEM), Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model (RAMP DEM) and drainage flow and smoothing algorithms of Quantum GIS (QGIS) were tested. Procedures such as the removal of sinks and peaks, threshold setting for the catchment area with the D8 algorithms, DInf, DEMON and KRA, eliminating overestimated data, smoothing vectors with *Snakes* algorithm and sub-basins grouping from zonal statistic with reference data by Oliveira *et al.,* (2012) and Cook *et al.,* (2014) were used. The APGDEM proved to be better than the RAMP DEM for the study area, because besides it showed better spatial resolution, it enabled the generation of drainage systems with less overestimated data. The results of the automatic delineation were compared and validated by morphometric analysis and statistical *Kappa index*. The algorithm for drainage network extraction DInf showed better results when compared to reference data. The developed method has proved to be effective in the preliminary delineation of glacial drainage basins of the Antarctic Peninsula. Although the data still require editing work, the methodology developed could be applied to the delimitation of glaciers in other regions of the planet, contributing to studies related to monitoring the Cryosphere.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da Península Antártica.....16

Figura 2 - Registro de eventos indicadores de mudanças climáticas na Península Antártica.....18

Figura 3 - Representação da dinâmica de uma geleira.....21

Figura 4 - Curvas de reflectância espectral do gelo e da neve.....23

Figura 5 - Etapas necessárias para delimitação de bacias e extração de informações hidrológicas utilizando as ferramentas de análise espacial.....25

Figura 6 - Valores estipulados, (b) unidirecional (D8) (c) Quinn et al., (1991) (MS), (d) Lea's (1992), (e) DEMON (Costa-Cabral e Burges, 1994), (f) DInf (D`).....26

Figura 7 - Fluxograma das etapas relativas ao processamento de dados e análises realizadas durante o trabalho.....33

Figura 8 - Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model (RAMP DEM)……39

Figura 9 - Antarctic Peninsula 100 m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM (APGDEM).....41

Figura 10 - Exemplo de como a ferramenta *Sink Removal* trabalha ajustando os valores no MDE.....43

Figura 11 - Máscara (matriz/janela móvel) sobre o alvo gerando um dado filtrado...44

Figura 12 - Comparação entre diferentes filtros passa baixa-média atenuando altas frequências e ruídos em modelos digitais de elevação.....45

Figura 13 - Procedimentos aplicados para a delimitação automática de bacias de drenagem glacial a partir do APGDEM.....46

Figura 14 - Diferença entre os limiares para a geração da área de captação.....48

Figura 15 - Resultado preliminar da delimitação automática demonstra subbacias compartimentadas e dados superestimados pelo algoritmo que necessitam ser eliminados em procedimento posterior.....49

Figura 16 - Diferença entre a delimitação com dados superestimados (vermelho) e após a correção e remoção de vértices excedentes (azul).....50

Figura 17 - Diferença entre o dado automático de bacias pré-suavização (azul) e pós-suavização pelo algoritmo *Snakes* (verde).....51

Figura 18 - Exemplo de como são aplicados os cálculos para os índices morfométricos na calculadora de campo do QGIS.....52

Figura 19 - Exemplo de uma das tabelas de atributos com a organização dos índices morfométricos gerados na calculadora de campo para uma das bacias delimitadas automaticamente.....53

Figura 20 - Ferramentas *Sink Drainage Route Detection* e *Sink Removal* atuando na remoção de valores discrepantes nos modelos digitais de elevação utilizados no trabalho.....54

Figura 21 - Separação automática de bacias a partir da aplicação de estatística zonal na delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) para cada algoritmo utilizando a classe majoritária na ferramenta Dissolve do QGIS.....57

Figura 22 - Separação automática de bacias a partir da aplicação de estatística zonal na delimitação de Cook *et al.,* (2014) para cada algoritmo utilizando a classe majoritária na ferramenta Dissolve do QGIS.....58

Figura 23 - Tabelas com os valores de mediana gerados em índices morfométricos, estabelecendo um comparativo entre a delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) e as automáticas geradas na metodologia proposta neste trabalho com os algoritmos D8, DInf, Demon e Kra.....60

Figura 24 - Tabelas com os valores de mediana gerados em índices morfométricos, estabelecendo um comparativo entre a delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) e as automáticas geradas na metodologia proposta neste trabalho com os algoritmos D8, DInf, Demon e Kra.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concordância da classificação pelo índice *Kappa*.....32

Tabela 2 - Softwares e sua aplicação no trabalho.....34

Tabela 3 - Características do Satélite TERRA.....35

Tabela 4 - Características do sensor ASTER.....36

Tabela 5 - Imagens ASTER utilizadas no trabalho.....36

Tabela 6 - Configurações utilizadas no processamento do AsterDTM.....37

Tabela 7 - Resultado do número de bacias obtidas com os algoritmos de fluxo D8, DInf, DEMON e KRA comparados aos dados de referência por estatística zonal com os dados de Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014).....56

Tabela 8 - Índice estatístico *Kappa* (k) aplicado aos dados de delimitação automática pelos algoritmos D8, DInf, Demon e Kra, e os produzidos por Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014).....64

LISTA DE ABREVIATURAS

APGDEM - *Antarctic Peninsula 100m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

ASTER GDEM - *Global Digital Elevation Model Aster*

FURG - *Universidade Federal do Rio Grande*

GLIMS - *Global Land Ice Measurements from Space*

LaCrio/FURG - *Laboratório de Monitoramento da Criosfera da Universidade Federal do Rio Grande*

MDE - *Modelo Digital de Elevação*

MISR - *Multi-angle Imaging SpectroRadiometer*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

MOPITT - *Measurements of Pollution in the Troposphere*

PA - *Península Antártica*

RAMP DEM - *Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model*

SIG - *Sistemas de Informações Geográficas*

SR - *Sensoriamento Remoto*

SWIR - *Short Wave Infrared*

VNIR - *Visible Near Infrared*

WGS84 - *World Geodetic System 1984*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1. OBJETIVOS 14
1.1.1. OBJETIVO GERAL 14
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
1.2. ÁREA DE ESTUDO 15
1.2.1. PENÍNSULA ANTÁRTICA 17
1.3. JUSTIFICATIVAS 19

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20

2.1. GELEIRAS 20
2.2. SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A GELEIRAS 22
2.3. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM 23
2.3.1. ALGORITMOS DE EXTRAÇÃO DE REDE DE DRENAGEM 26
2.4. VALIDAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA 28

3. MATERIAIS E MÉTODOS 32

3.1. MATERIAIS 33
3.1.1. SOFTWARES E FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESPACIAL 33
3.1.2. IMAGENS ASTER 34
3.1.3. MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO 37
3.1.4. RADARSAT ANTARCTIC MAPPING PROJECT DIGITAL ELEVATION MODEL (RAMP DEM) 38
3.1.5. ANTARCTIC PENINSULA 100 M DIGITAL ELEVATION MODEL DERIVED FROM ASTER GDEM (APGDEM) ... 40
3.2. PROCESSAMENTO DIGITAL PRELIMINAR DE MDE 42
3.2.1. ELIMINAÇÃO DE SINKS NOS MDE 42
3.2.2. FILTRAGEM DOS MDE 43
3.3. ANÁLISE E SELEÇÃO DE ALGORITMOS DE FLUXO 45
3.3.1. CÁLCULO DA ÁREA DE CAPTAÇÃO 47
3.4. DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS DE DRENAGEM 48
3.4.1. PROCEDIMENTOS APLICADOS À ELIMINAÇÃO DE DADOS SUPERESTIMADOS 49
3.5. VALIDAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA 52

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 53

4.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DE MDE'S E ESCOLHA DE PRODUTO 53
4.2. ANÁLISE E SELEÇÃO DE ALGORITMOS DE FLUXOS DE DRENAGEM 55
4.3. DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS DE DRENAGEM COM O MDE APGDEM 55
4.4. VALIDAÇÃO E ANÁLISE MORFOMÉTRICA 56

4.4.1. COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO DAS BACIAS DELIMITADAS AUTOMATICAMENTE E AS ELABORADAS POR OLIVEIRA ET AL., (2012) 59
4.4.2. COMPARATIVO ENTRE O RESULTADO DAS BACIAS DELIMITADAS AUTOMATICAMENTE E AS ELABORADAS POR COOK ET AL., (2014) 61
4.4.3. RESULTADOS DO ÍNDICE ESTATÍSTICO KAPPA (K) 63

5. CONCLUSÕES 65

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

1. INTRODUÇÃO

A Península Antártica (PA) foi uma das regiões do planeta que apresentou maior tendência de aquecimento atmosférico nos últimos cem anos. (KUNZ *et al*., 2012). Fenômenos como desintegração de plataformas de gelo (ROTT *et al.*, 1998; SKVARCA *et al.*, 1999; RACK e ROTT, 2004), aceleração e afinamento de geleiras (DE ANGELIS e SKVARCA, 2003; RIGNOT *et al.*, 2004; SCAMBOS *et al.*, 2004; PRITCHARD e VAUGHAN, 2007) e retração das frentes de geleiras (RAU *et al.*, 2004; COOK *et al.*, 2005) foram observados nessa região e são considerados consequências das alterações climáticas regionais (IPCC, 2007). Esta península teve expressiva redução de sua área de gelo nas últimas cinco décadas, de aproximadamente 28.000 km² (COOK e VAUGHAN, 2010; KUNZ *et al*., 2012), 12% de sua área total, em torno de 228.000 km² (RIGNOT *et al.,* 2008).

Por ser uma região de difícil acesso, monitorar mudanças nas massas de neve e gelo da PA demanda altos custos logísticos. Com o avanço das geotecnologias e técnicas para a geração de produtos de sensoriamento remoto, diversos estudos sobre a dinâmica de geleiras dessa península foram realizados a partir da análise de dados de sensores remotos de micro-ondas (passivos): (RIDLEY, 1993; ZWALLY & FIEGLES, 1994; TORINESI *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2006; MENDES JR, 2011) e micro-ondas (ativos): (BRAUN *et al.*, 2000; SCAMBOS *et al.*, 2000, 2004; RAU *et al.*, 2001, 2004; ARIGONY-NETO, 2006; ARIGONY-NETO *et al.*, 2007; ARIGONY-NETO, 2009; BRAUN *et al.*, 2009; ANDRADE *et al.*, 2013). Para análise de variações na superfície de geleiras (*e.g*., declividade, tamanho, forma e orientação) são utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDE). Apenas alguns MDE's existentes recobrem toda extensão da Península Antártica (JAÑA 2006), são eles: GTOPO30, Antarctic 5-km Digital Elevation Model from ERS-1 Altimetry, *SEASAT and GEOSAT Altimetry Data for the Antarctic and Greenland Ice Sheets* (IAS-1), GEOSAT Radar Altimetry Atlas of the Antarctic North of 72.1 Degrees South, GLOBE, DTIM2, *Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model* (RAMP DEM) *ASTER Global Digital Elevation*

Model (GDEM) versão 1, ASTER GDEM versão 2 e o *Antarctic Peninsula 100m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM* (APGDEM).

No trabalho realizado por Andrada *et al*., (2013) foram comparados os modelos de elevação ASTER GDEM versão 1 e 2, RAMP DEM e um MDE gerado pelo módulo ASTER DTM do software ENVI. De todos os modelos de elevação testados, foi verificado que o RAMP DEM, embora tenha menor resolução espacial que os outros MDE's, possui menos ruídos para análises topográficas para a região da Península Antártica. Recentemente, Cook *et al*., (2014) elaborou um inventário de geleiras para a Península Antártica a partir do APGDEM e utilizando um método semiautomático. A elaboração de um inventário de geleiras é importante, pois essas massas de gelo são indicadoras de mudanças climáticas e alterações nesses sistemas poderão contribuir significativamente com o aumento do nível médio dos mares. Partindo da hipótese de que bacias de drenagem glacial apresentam comportamento similar a bacias de drenagem fluvial, pode-se simular o percurso do fluxo na bacia de drenagem, bem como estabelecer os limites ou divisores entre bacias utilizando ferramentas de análise hidrológica. A qualidade dos dados gerados pelas ferramentas de análise hidrológica está diretamente ligada à utilização de um bom MDE e da escolha do limiar da área de captação, sendo esse o valor mínimo definido para a geração de uma rede de drenagem, quanto menor o limiar definido, mais densa será a rede de drenagem obtida (TRIBE, 1990; LI *et al.,* 2008). Sendo assim, é necessário testar diversos limiares que variam de acordo com a área de estudo, algoritmos de geração de fluxo e modelos digitais de elevação a fim de verificar quais dados são mais fidedignos à área de estudo, com a menor quantidade de valores espúrios ou discrepantes, caracterizados por depressões ou picos.

Neste contexto de busca de técnicas e metodologias de monitoramento de mudanças nas massas de neve e gelo desse ambiente de difícil acesso, este estudo tem por finalidade desenvolver uma metodologia para delimitação automática das bacias de drenagem glacial da Península Antártica com a utilização de Modelos Digitais de Elevação

(RAMP DEM e APGDEM) e com a avaliação do desempenho dos algoritmos de fluxo disponíveis.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para delimitação de forma automatizada de bacias de drenagem glacial da Península Antártica a partir do uso de Modelos Digitais de Elevação disponíveis para a Península Antártica (RAMP DEM e APGDEM).

1.1.2. Objetivos específicos

- Realizar o pré-processamento preliminar dos MDE's, como redução de *sinks e peaks* (picos e depressões) e filtragem para posterior extração automática da rede de drenagem;
- Analisar e selecionar diferentes algoritmos de fluxo a partir da comparação dos seus desempenhos para a geração automática da área de captação de fluxo de drenagem glacial;
- Gerar de forma automática a delimitação das bacias de drenagem glacial da Península Antártica utilizando técnicas de geoprocessamento;
- Comparar com avaliação visual e por análise morfométrica o desempenho dos algoritmos de fluxo considerados mais adequados ou mais populares através de comparação com bacias delimitadas de forma manual por interpretação de imagens de satélite na mesma região.

1.2. Área de estudo

A área de estudo abrange toda a porção continental da Península Antártica ao norte de 70°S. Esta península está localizada na Antártica Ocidental, entre 60°S e 75°S (Figura 1), e é banhada pelos mares de Bellingshausen a oeste, e Weddell a leste. A Península Antártica é composta por um platô interno com 1.500 m de elevação média, estendendo-se quase longitudinalmente entre as latitudes 63º S e 75ºS (AHLERT, 2005).

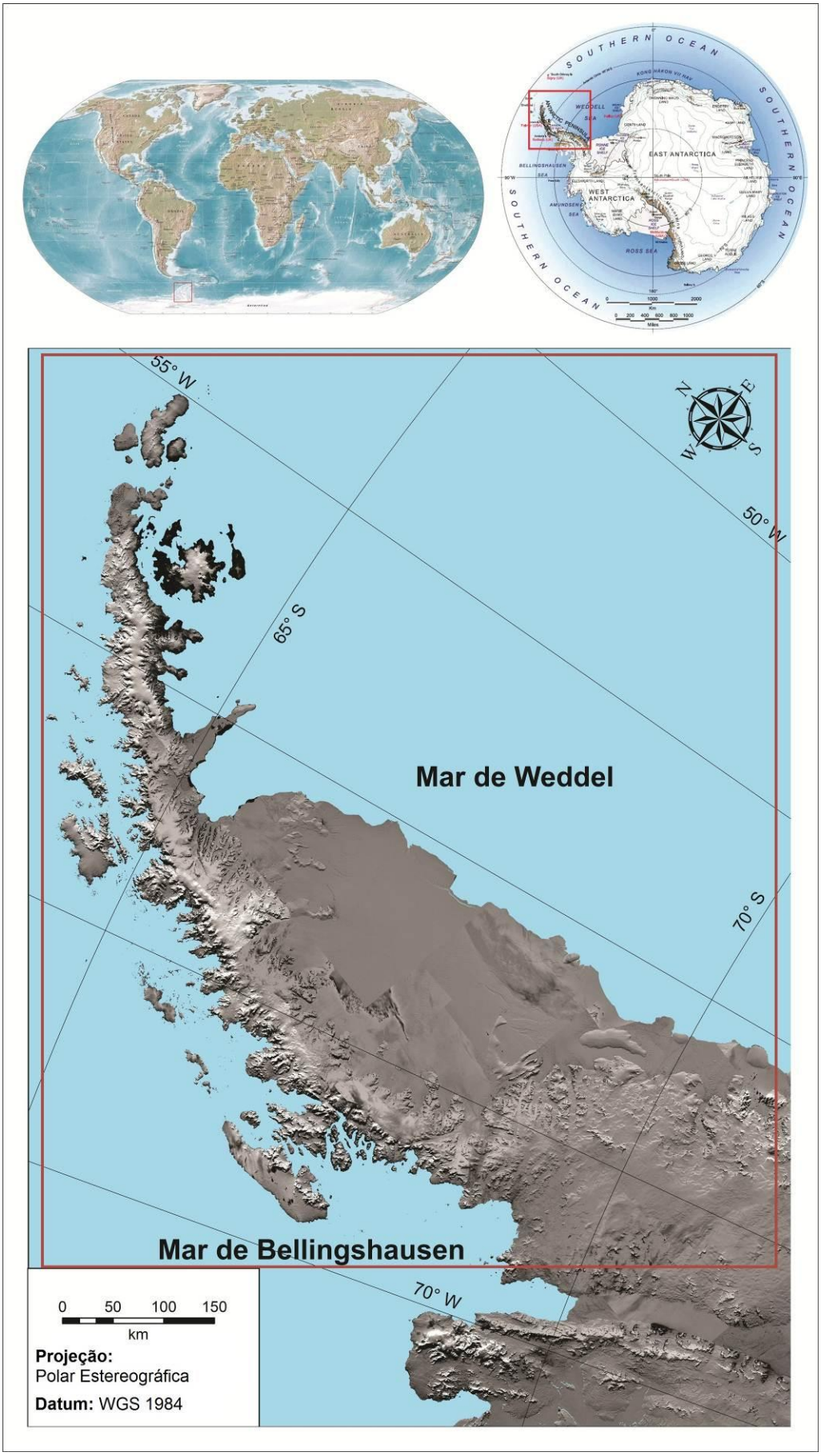


Figura 1 - Mapa de localização da Península Antártica. Fonte: AHLERT (2005).

1.2.1. Península Antártica

A Península Antártica possui cerca de 70 km de largura e mais de 1300 km de extensão. Essa região é considerada indicadora de mudanças climáticas, pois se encontra em posição crítica, com temperaturas médias anuais pouco abaixo de 0°C, em locais próximos ao nível do mar (BRAUN; GOSSMANN, 2002). A PA registrou o maior aumento das temperaturas nas últimas décadas em todo o planeta (CHWEDORZEWSKA, 2009), aproximadamente 2,5°C nos últimos 50 anos (TURNER *et al*., 2005), tendo como consequência o registro de diversos eventos indicadores de alterações climáticas (ARIGONY-NETO, 2006), representados na Figura 2.

As geleiras da PA vêm sofrendo recentemente mudanças em sua condição de equilíbrio e perda de massa (ARIGONY-NETO, 2006). Esse desequilíbrio é devido ao aumento da temperatura do ar superficial (STEIG *et al.,* 2009; MULVANEY *et al.,* 2012) o que resulta em fenômenos como a retração, ablação e aceleração do fluxo de geleiras locais (COOK *et al*., 2005). Com o aumento da temperatura e a diminuição das camadas de neve e gelo, menor será o albedo e maior será a quantidade de radiação absorvida pela superfície, o que pode resultar no aquecimento regional. Logo, alterações nesses sistemas poderão contribuir significativamente com o aumento do nível médio dos mares em escala global (IPCC, 2007).

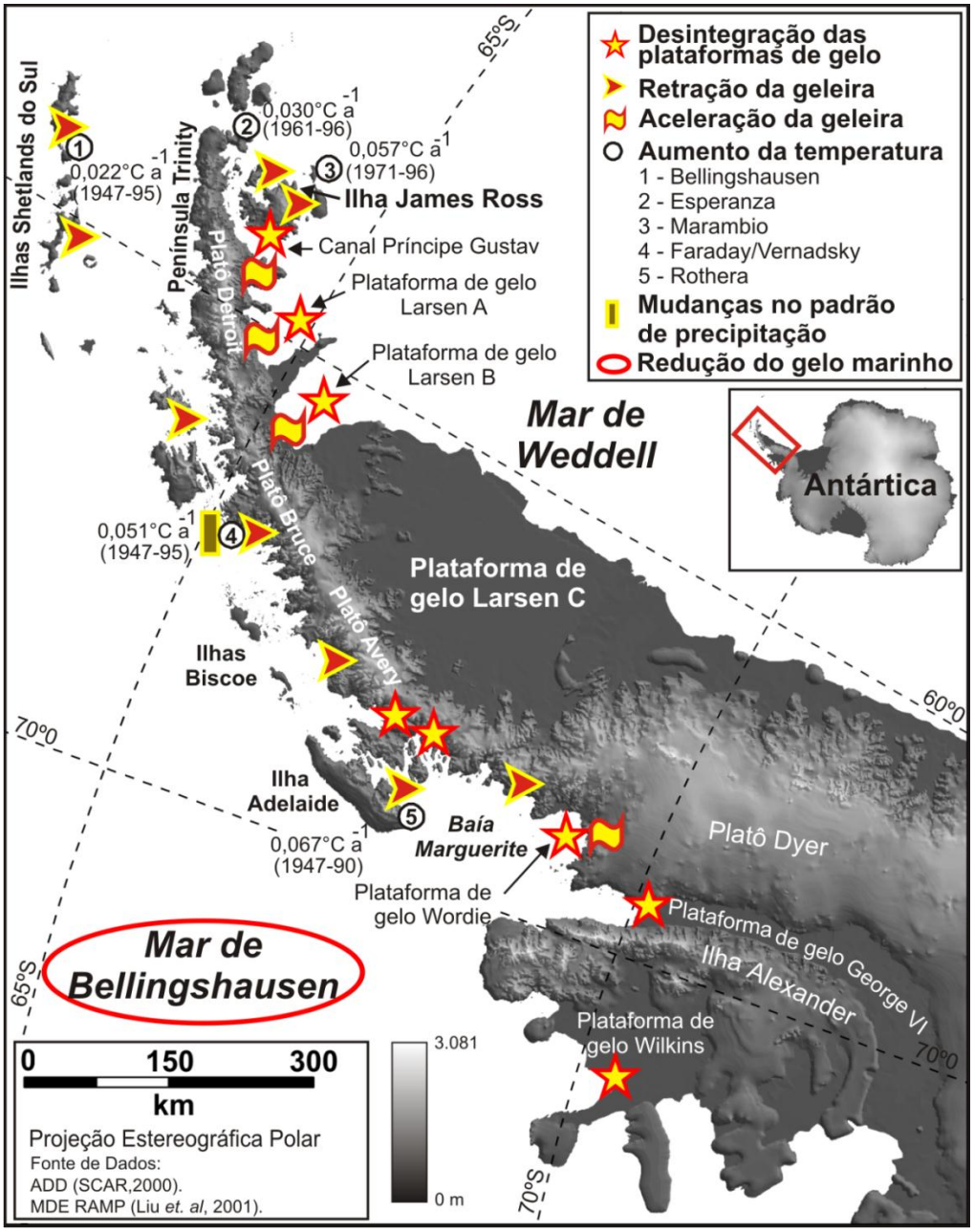


Figura 2 - Registro de eventos indicadores de mudanças climáticas na Península Antártica. Fontes: RAU (2003) e ARIGONY-NETO (2006).

1.3. Justificativas

Devido à presença de eventos indicadores de mudanças climáticas ocorridos na Península Antártica (TURNER *et al.,* 2013; ARIGONY-NETO *et al*., 2014; COOK, 2014; DAVIES *et al*., 2014; SCAMBOS *et al*., 2014) há a necessidade de se obter uma maior quantidade de dados sobre as geleiras desta região.

No estudo realizado por Oliveira *et al*. (2012), foram delimitadas de forma semiautomática, cerca de 600 bacias de drenagem glacial de toda a área continental da PA, ao norte de 70° S. Já no inventário de geleiras de Cook *et al*., (2014) foram delimitadas 1590 geleiras, também por um método semiautomático, em que 860 destas geleiras possuem terminação marinha, o que possibilita mensurar as frentes de geleira desde 1940 até a atualidade. Sendo assim, o presente estudo visa aprimorar os métodos anteriormente desenvolvidos, uma vez que a utilização de métodos automatizados, além de colaborar com a agilidade do trabalho, contribui com uma menor subjetividade e podem apresentar maior precisão do que técnicas manuais (TRIBE, 1992).

A execução deste trabalho contou com o apoio e fez parte das atividades realizadas no Laboratório de Monitoramento da Criosfera (LaCrio) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), no contexto do Projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS). O GLIMS é um projeto internacional para o monitoramento das geleiras de todo o planeta a partir da utilização de imagens de sensores remotos, onde os centros regionais coordenam as análises de diversos grupos, chamados *Stewards*, responsáveis pelo monitoramento de geleiras específicas ou pequenas sub-regiões (GLIMS, 2014). O LaCrio/FURG é o Centro Regional para a Península Antártica (RC18) do projeto GLIMS.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Geleiras

Geleiras são definidas como uma massa de neve e gelo que se move continuamente por fluência e muitas vezes por deslizamento basal (SIMÕES, 2004). Formam-se quando a taxa de acumulação de neve e gelo é superior à taxa de ablação. A precipitação cai em forma de neve e se deposita sobre áreas elevadas formando camadas. Na sequência, novas camadas de neve vão sendo depositadas e assim comprimem as camadas anteriores. Com o tempo, o ar vai sendo eliminado das camadas inferiores, aumentando a densidade do pacote de neve, recristalizando e formando gelo. A força de gravidade compacta as camadas de gelo e forma, então, as geleiras. Segundo Menzies (1995), geleiras são consideradas como um sistema que tende ao estado de equilíbrio, ou seja, a acumulação total na parte superior é igual à ablação na parte inferior. Quando a camada de gelo na geleira supera 60 m de espessura, as camadas inferiores assumem um comportamento visco-plástico (RIBEIRO, 2007). Isto faz com que essas massas de neve e gelo se movam continuamente por fluência ou deslizamento basal (SIMÕES, 2004), como no exemplo da Figura 3.

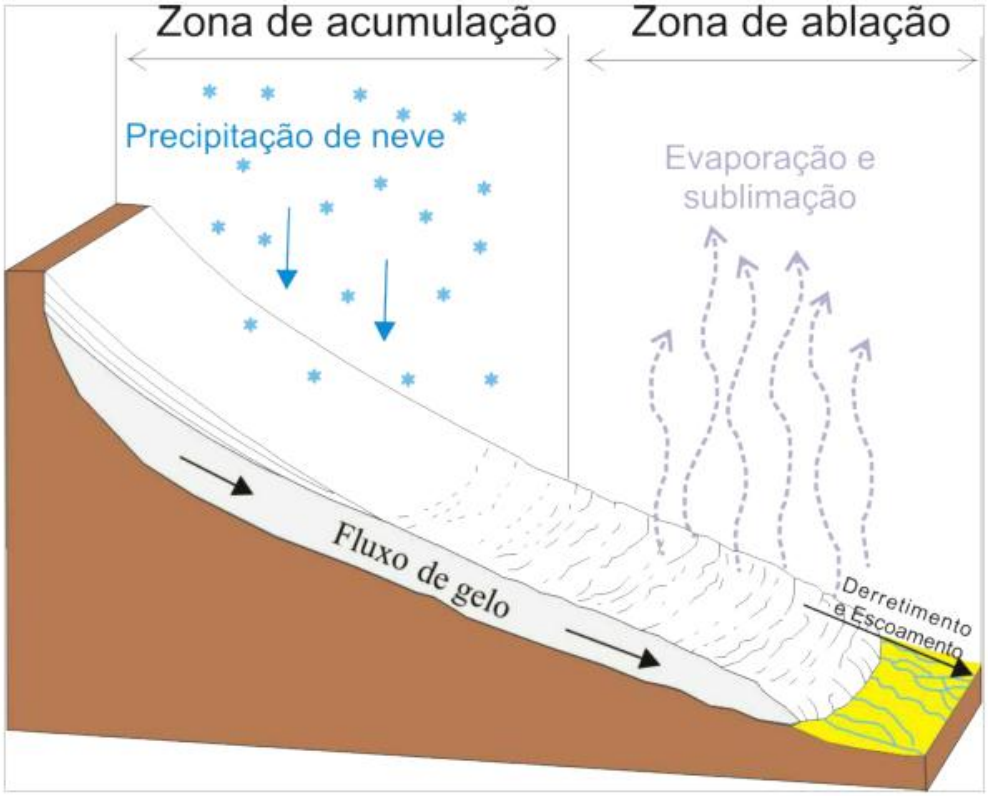


Figura 3 - Representação da dinâmica de uma geleira: A precipitação cai em forma de neve, que é acumulada e compactada devido à força da gravidade e condições favoráveis de temperatura e pressão, formando contínuas camadas de gelo. A força de gravidade vai compactando as camadas de gelo formando então as geleiras. Quando a camada de gelo na geleira supera 60 m de espessura, as camadas inferiores assumem um comportamento visco-plástico fazendo com que essas massas neve e gelo se movam continuamente por fluência ou deslizamento basal. Fonte: (STRAHLER. A & STRAHLER. A (2003), adaptado por RIBEIRO, 2007).

A maior parte das geleiras do continente Antártico se encontra na Península Antártica (WGMS, 2008). Na PA, as temperaturas são próximas a 0°C e o aumento da temperatura superficial do ar nas últimas décadas provoca desequilíbrio no balanço de massas nas geleiras, o que acelera o processo de ablação e o fluxo dessas geleiras (SILVA, 2012). O balanço de massa em uma geleira é a diferença entre o ganho e perda de massa em uma geleira. O balanço de massa positivo está relacionado à acumulação no pacote de neve na geleira e o balanço de massa negativo ocorre quando a geleira perde massa com destino os oceanos, o que

causa impactos na dinâmica local e contribui para o aumento do nível médio dos mares (GÖBEL, 2012).

2.2. Sensoriamento Remoto Aplicado a geleiras

Sensoriamento Remoto (SR) pode ser considerado como um misto entre arte e a ciência para a obtenção de informações sobre um determinado alvo sem a necessidade de contato físico com o mesmo e através de um conjunto de técnicas e metodologias baseadas em geotecnologias (JENSEN, 2009). O SR vem sendo amplamente utilizado em estudos sobre as geleiras no continente Antártico, principalmente na região da Península Antártica, onde as condições para trabalhos de campo demandam altos custos logísticos (AHLERT e SIMÕES, 2004). Parâmetros como balanço de massa, velocidade de fluxo, delimitação de geoambientes, monitoramento de zonas de neve e gelo, monitoramento e delimitação de geleiras, são obtidos a partir de dados de sensores remotos. Para a análise de dados dessas regiões cobertas por neve e gelo, é necessário o conhecimento do comportamento espectral destes alvos (BREMER, 1998). A partir dos valores de reflectância é possível identificar os diferentes estágios de formação do gelo (ZENG *et al.,* 1984), exemplificados nas curvas de reflexão de neve e gelo na Figura 4.

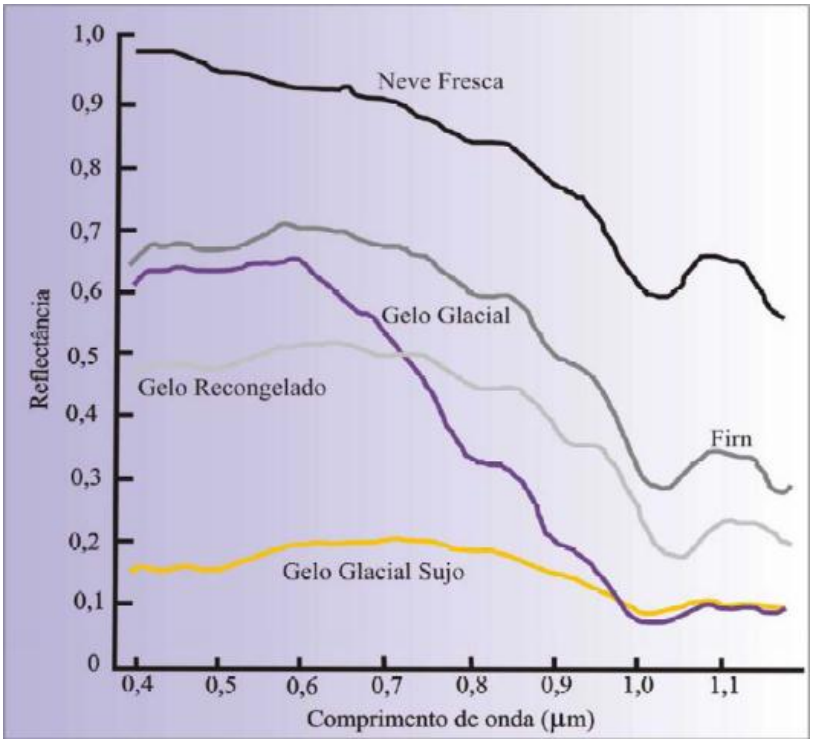


Figura 4 - Curvas de reflectância espectral do gelo e da neve.
Fonte: (ZENG *et al.,* (1984), adaptado por RIBEIRO, 2007).

De acordo com Zeng*et et al.,* (1984), na região do espectro visível (0,4 – 0,7 µm) a reflectância do gelo em comparação com a neve é relativamente baixa. No infravermelho próximo e médio (0,7 – 3,0 µm), é possível diferenciar alvos na superfície de geleiras, sendo estes: neve seca, neve úmida, *firn* (*i.e.,* estágio intermediário entre neve e gelo), gelo glacial, gelo recongelado, gelo glacial sujo e com presença de detritos. Essas diferenças nos valores digitais ou valores de brilho e de reflectância nos diferentes comprimentos de onda permitem classificar e monitorar as diferentes zonas de neve e gelo utilizando o SR (PETSCH, 2014).

2.3. Extração automática de redes de drenagem

Ferramentas de análise hidrológica de geoprocessamento em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) foram desenvolvidas para criar modelos da rede de drenagem. Essa abordagem fornece subsídios para: a) analisar os componentes físicos de uma

superfície, permitindo a identificação de depressões, b) determinar a direção de fluxo, c) calcular a acumulação de fluxo, d) delimitar bacias hidrográficas e, e) criar redes de drenagem derivadas de um modelo digital de elevação. Extrair esse tipo de dados da superfície terrestre é útil para estudos de caso e planejamentos regionais, uma vez que se pode simular o percurso da água na bacia de drenagem, bem como estabelecer os limites ou divisores entre bacias (FERNANDEZ, 2011).

Os procedimentos aplicados para a extração automática de redes de drenagem a partir de MDE são baseados no cálculo da área de captação, onde o usuário do SIG estabelece de forma empírica um valor mínimo do limiar para o cálculo da área de captação. Todos os valores de célula do MDE acima do limiar são definidos como pontos da rede de drenagem (BANON, 2013). Quanto menor o limiar escolhido, mais complexa e densa será a rede de drenagem (TRIBE, 1990; LI *et al.,* 2008). Ressalta-se que limiares pequenos embora gerem redes de drenagem mais densas, produzem linhas de drenagem artificiais paralelas nas áreas de menor declividade (FERNANDEZ, 2011). Para a delimitação de bacias de drenagem e extração de informações hidrológicas, algumas etapas devem ser seguidas, exemplificadas no fluxograma da Figura 5.

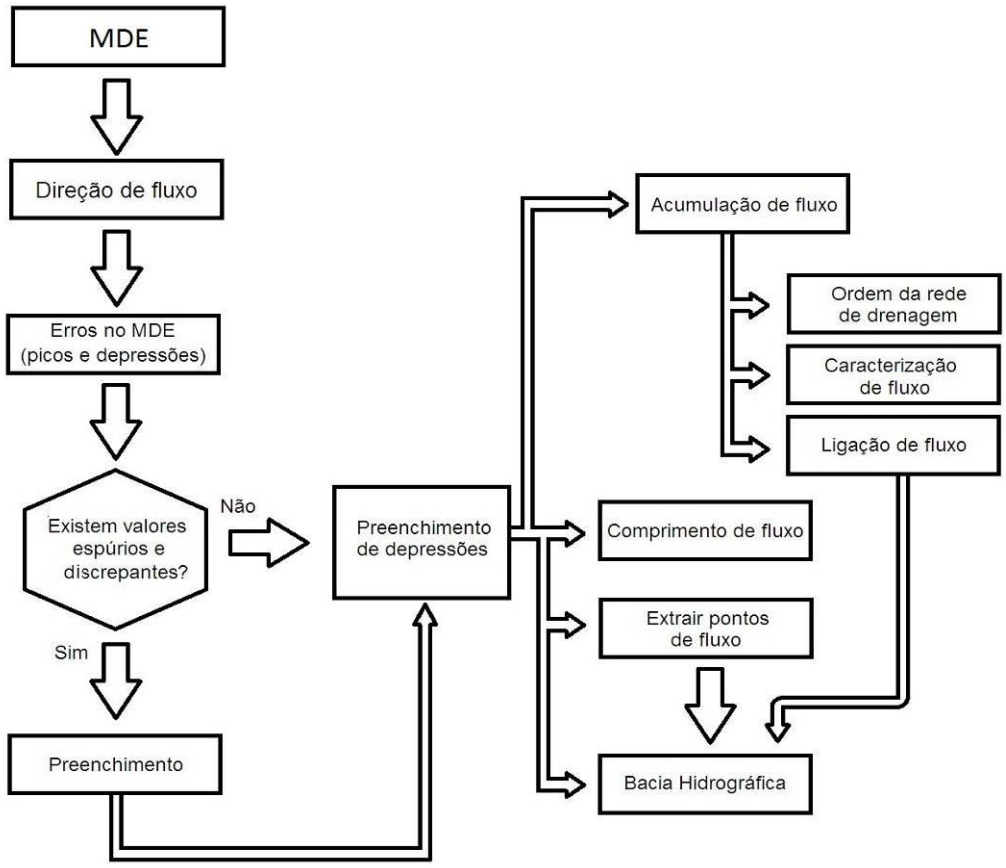


Figura 5 - Etapas necessárias para delimitação de bacias e extração de informações hidrológicas utilizando as ferramentas de análise espacial. Fonte: ESRI (2012).

Como arquivo de entrada (*input*) deve-se utilizar um Modelo Digital de Elevação, pois é a partir dele que serão determinadas as células que definirão a direção de fluxo. Caso o MDE apresente valores discrepantes *(i.e.,* picos e depressões), deve-se utilizar a ferramenta para preenchimento de depressões, o que resultará em um MDE corrigido. Caso o objetivo seja gerar a rede de drenagem, deve-se primeiro calcular a acumulação de fluxo (*i,e*., área de captação) a partir do MDE. E, caso a finalidade seja delimitar bacias, é necessário identificar os pontos de fluidez, pois a partir de tais pontos que a bacias hidrográficas serão delimitadas de forma automática.

2.3.1. Algoritmos de extração de rede de drenagem

Para estudos hidrológicos em um ambiente de SIG, algoritmos de fluxo são utilizados para a geração automática da área de captação a partir de diferentes conceitos e abordagens, partindo de um MDE como dado matricial básico (MOORE *et al*., 1991). Salienta-se que os algoritmos de fluxo apresentam melhor eficácia quando utilizam MDE's com a remoção de depressões e picos (*i.e., sinks* e *peaks*) (JENSON e DOMINGUE, 1988). Dentre os algoritmos de fluxo mais utilizados estão o D8, Rho8, FD8, FRho8, KRA, DEMON e DInf, representados na figura 6 e descritos a seguir:

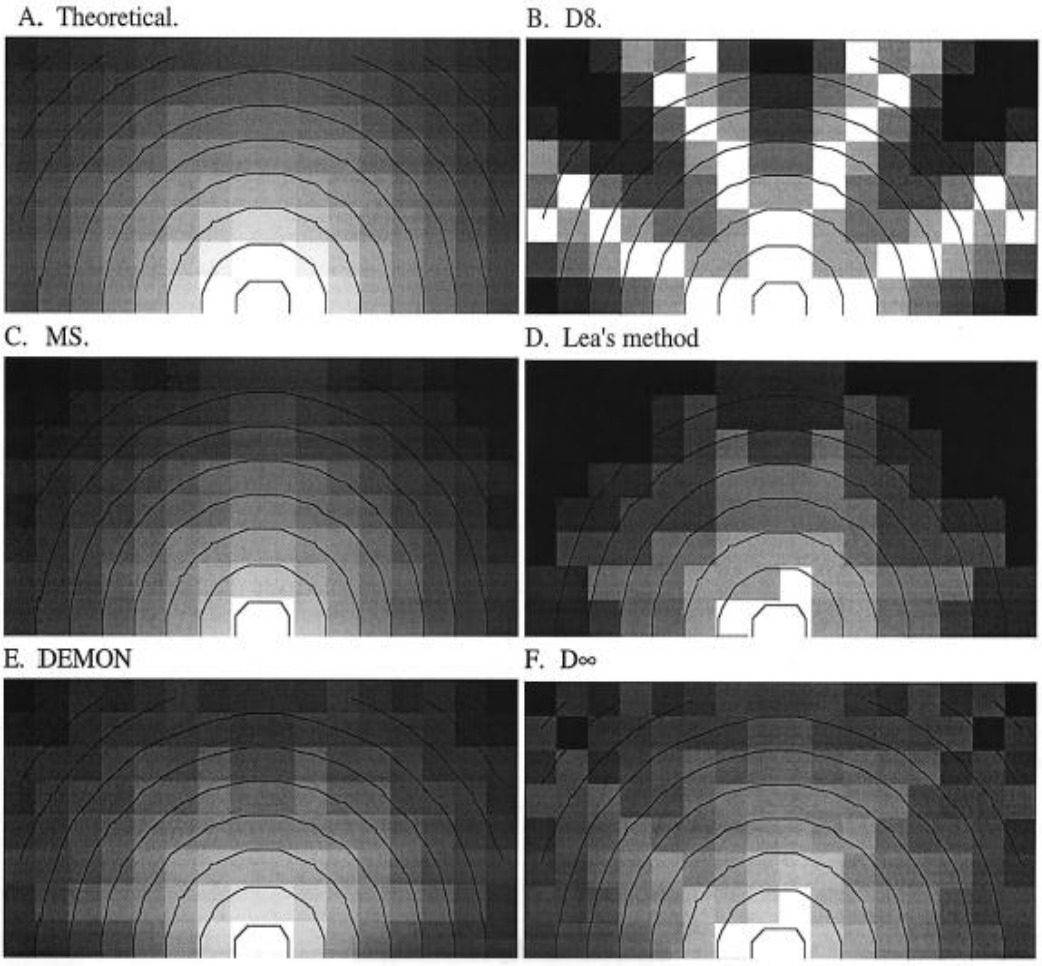


Figura 6 - Valores estipulados, (b) unidirecional (D8) (c) Quinn *et al.,* (1991) (MS), (d) Lea's (1992), (e) DEMON (Costa-Cabral e Burges, 1994), (f) DInf (D`). Fonte: TARBONTON (1997).

D8 (*Deterministic Eight-node*): Desenvolvido por O'Callaghan e Mark (1984), o algoritmo D8 faz com que o fluxo se desloque desde o centro de uma célula para o centro de uma das 8 células vizinhas inferiores onde seja detectado o declive mais acentuado. É utilizado na maioria dos pacotes hidrológicos presentes em SIG, devido à sua simplicidade computacional (TARBONTON *et al*., 1989). No entanto, de acordo com Fernandéz (2011), o D8 possui limitações, uma vez que o ângulo de movimento do fluxo é restrito aos múltiplos de 45°, não representando de modo fidedigno a realidade e superestimando os resultados gerados para a área de captação.

Rho8 (*Random Eight-node*): Implementado por Fairfield e Leymarie (1991), o Rho8 é uma versão otimizada do algoritmo D8 acrescido de um grau de aleatoriedade para a obtenção da direção de fluxo. O Rho8 assim como o D8 parte de uma célula central e direciona o fluxo para a célula vizinha com maior declividade. Segundo Fernandéz (2011), são calculados gradientes de declividade para cada uma das direções e, por conseguinte, é atribuído um valor aleatório para direcionamento do fluxo. Embora o dado de direção de fluxo gerado por esse algoritmo pareça mais realista e melhore os fluxos paralelos gerados pelo D8, por outro lado, por utilizar uma variável aleatória no computo da rede de fluxo, este algoritmo gera produtos sempre diferentes mesmo quando aplicado para a mesma área de estudo. Isto representa uma grande desvantagem para estudos onde se necessita de uma validação e reprodução metodológica.

FD8 e FRho8: Os algoritmos FD8 (QUINN *et al*., 1991) e FRho8 (FREEMAN, 1991), assim como o Rho8, são adaptações baseadas no algoritmo D8, os quais permitem a geração de fluxos divergentes. No FD8 e FRho8 o fluxo é distribuído em múltiplas direções a partir de uma célula central para as células vizinhas, onde é calculada uma base ponderada de inclinação sobre os canais definidos. Estes algoritmos eliminam os fluxos paralelos gerados pelo algoritmo D8 e fornecem uma distribuição mais realística da área de captação. No entanto, em feições de vale, a

dispersão do fluxo pode ser considerável, sendo recomendada a utilização do D8 ou Rho8 para correção (JESUS, 2009).

KRA (*Kinematic Routing Algorithm*): Desenvolvido por Lea (1992), o KRA é um algoritmo de fluxo conduzido unidimensional onde o fluxo se comporta como uma bola rolando em direção aos declives mais íngremes no MDE, considerando os quatro cantos do pixel, não restringindo sua posição ao centro da célula. A direção de fluxo é delimitada em função de um ângulo de orientação de vertentes local a cada 1° (JESUS, 2009).

DEMON (*Digital Elevation Model Networks*): O algoritmo DEMON (COSTA CABRAL; BURGES, 1994) define valores nas extremidades de cada célula do MDE para a geração da rede de fluxo. De acordo com Fernandéz (2011) a concentração do fluxo é atribuída pela variação no comprimento de contorno sendo maior em superfícies divergentes, menor em superfícies convergentes e constante em terrenos planos, gerando um fluxo tubular.

DInf (*Deterministic Infinity*): O DInf (TARBOTON, 1997) representa as direções de fluxo com base na maior declividade de oito facetas triangulares a partir de um pixel central e contíguos de 0° a 360°, o fluxo é contado no sentido anti-horário desde leste, o que permite a contribuição de fluxo em dois ou mais pixels vizinhos em ângulos contíguos.

2.4. Validação e análise morfométrica

Os procedimentos para validação e análise morfométrica são importantes para o estudo de parâmetros da formação geomorfológica da paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1980). A extração de dados morfométricos de bacias de drenagem digitalizadas em ambiente de SIG permite

quantificar e analisar estruturas da paisagem utilizando índices métricos como: a) área total da drenagem; b) perímetro; c) coeficiente de compacidade; d) índice de circularidade, e) dimensão fractal; f) razão perímetro-área; g) índice de forma (*shape index*), dentre outros (CHRISTOFOLETTI, 1981).

a) **Área total da drenagem (A) -** corresponde ao sistema fluvial delimitado por divisores de água projetados em um plano horizontal. (HORTON, 1945).

b) **Perímetro (P) -** corresponde à linha imaginária de delimitação do divisor de águas (SMITH, 1950).

c) **Coeficiente de compacidade (Kc)-** corresponde à relação entre o perímetro (P) da bacia de drenagem e a circunferência de um círculo de área equivalente à da bacia (VILLELA e MATTOS, 1975). O índice de compacidade pode ser calculado pela equação:

$$Kc = 0,28 * (P / \sqrt{A})$$

Sendo:
Kc = Coeficiente de compacidade
P = Perímetro
A = Área

d) **Índice de circularidade (IC) -** este índice é semelhante ao de compacidade (Kc), relacionando a forma da bacia com a de círculo de perímetro igual (MÜLLER, 1953; SCHUMM, 1956; CHRISTOFOLETTI, 1980). O índice de circularidade pode ser calculado pela equação:

$$IC = (12,57 * A) / P^2$$

Sendo:

IC = Índice de circularidade

A = Área

P = Perímetro

e) Dimensão fractal (FRAC) - relacionado ao grau de deformação das dimensões das formas geométricas da classe analisada de acordo com a escala de observação (LANG & BLASHCKE, 2009). Quanto mais elevada for a dimensão fractal, mais forte será o efeito de deformação nas características geométricas. A dimensão fractal pode ser calculada pela equação:

$$FRAC = 2 \log (P) / \log (A)$$

Sendo:

FRAC = Dimensão fractal

P = Perímetro

A = Área

f) Razão perímetro-área (PARA)

$$PARA = P/A$$

Sendo:

PARA = Razão perímetro-área

P = Perímetro

A = Área

g) Índice de forma (*SHP*) – corresponde à medida de forma de um fragmento comparado a uma forma padrão (FORMAN & GODRON, 1986): círculo quando se analisa dados no formato vetorial e quadrado em dados no formato matricial. O índice de forma pode ser calculado pela equação:

$$SHP = P/ 2\ \pi(Pi)\ A$$

Sendo:

SHP = Índice de forma

π (Pi) = 3,14

A = Área

Para validação de dados em relação a uma verdade terrestre, pode-se utilizar o índice estatístico *Kappa* (k) (COHEN, 1960). O índice *Kappa*, calcula o grau de concordância entre um mesmo fenômeno de determinada categoria com um dado de referência ou verdade terrestre. Este índice pode ser calculado pela fórmula descrita por Ponzoni e Rezende (2002):

$$k = N \Sigma xii – \Sigma(xi + .x+i) / N^2 - (\Sigma xi + .x+i)$$

Sendo:

k = Índice Kappa

N = Número total de observações

xii = Elementos da diagonal principal da matriz

xi = Somatório dos números das linhas

x+i = Somatório dos números das colunas

O índice *Kappa* varia entre valores de 0 a 1, quando o valor é igual a 1, há perfeita concordância entre os dados, e valores igual a zero indicam que não existe concordância entre os dados analisados (PONZONI e ALMEIDA, 1996). Os valores do índice *Kappa* em concordância com dados de verdade terrestre podem ser classificados de acordo com a tabela 1:

Tabela 1 - Concordância da classificação pelo índice *Kappa*. Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977) citado por Moreira (2001).

Valor do índice Kappa (k)	Grau de concordância
< 0	Péssimo
0 < k ≤ 0,2	Mau
0,2 < k ≤ 0,4	Razoável
0,4 < k ≤ 0,6	Bom
0,6 < k ≤ 0,8	Muito Bom
0,8 < k ≤ 1,0	Excelente

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresentará as etapas relativas ao processamento de dados e análises realizadas durante o trabalho, representadas no fluxograma da Figura 7: a) processamento digital preliminar de MDE através da eliminação opcional de ruídos; b) análise e seleção de algoritmos de fluxo; c) delimitação automática de bacias de drenagem glacial; d) validação e análise morfométrica.

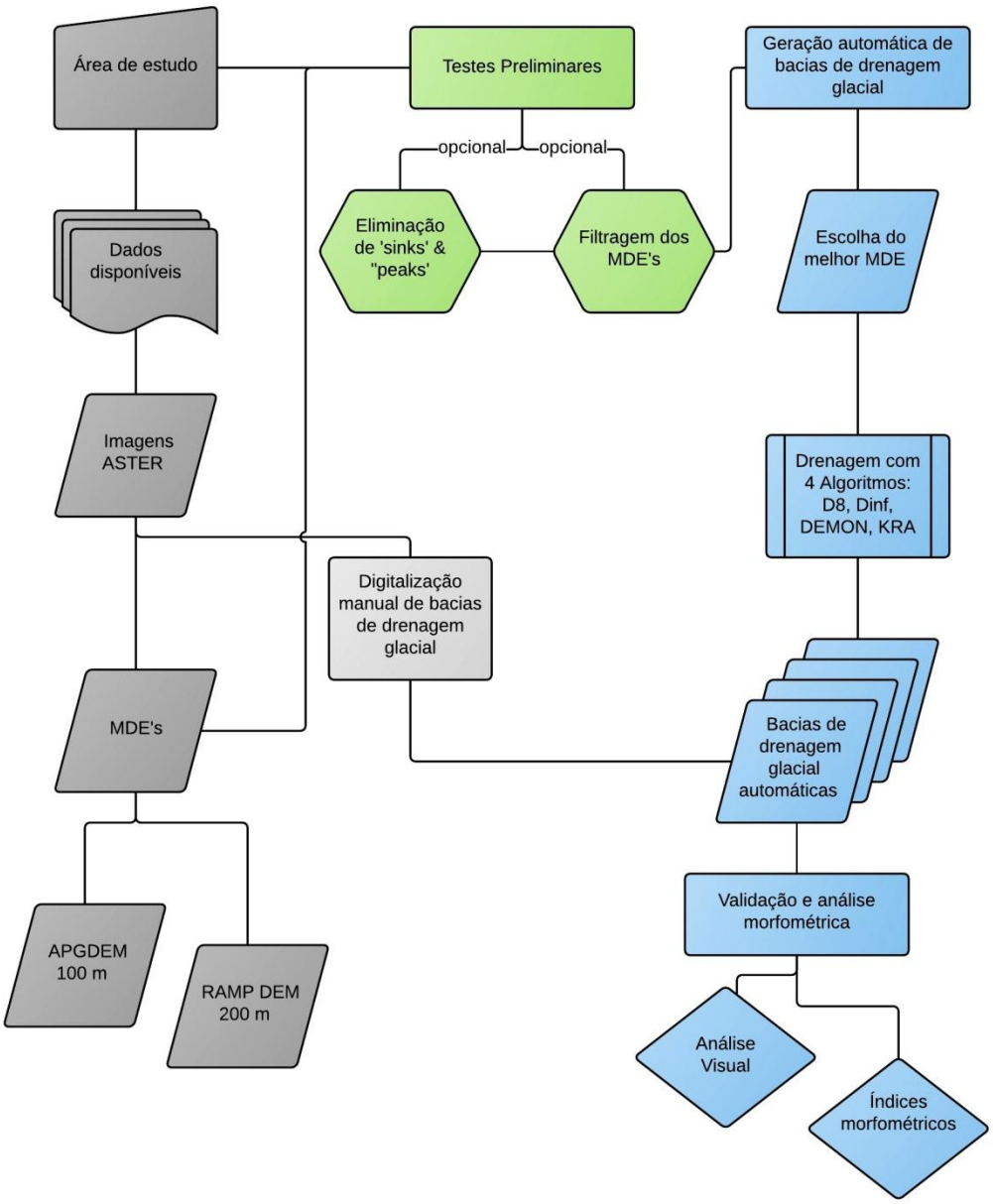


Figura 7 - Fluxograma das etapas relativas ao processamento de dados e análises realizadas durante o trabalho.

3.1. Materiais

3.1.1. Softwares e ferramentas de análise espacial

Os softwares e hardwares necessários para o processamento dos dados para o estudo estão disponíveis no Laboratório de Monitoramento da Criosfera (LaCrio/FURG). Na Tabela 2, estão descritas as aplicações

dos programas computacionais de processamento digital de imagens e SIG que foram utilizados.

Tabela 2 - Softwares e sua aplicação no trabalho

Software	Aplicação
ENVI® - Módulo ASTER DTM	Pré e pós-processamento de imagens.
Quantum GIS	Utilização de ferramentas e algoritmos de análise hidrológica; Delimitação automática de bacias de drenagem glacial.
ArcGIS™	Análise espacial; Elaboração de mapas e figuras.

3.1.2. Imagens ASTER

Lançado em 18 de dezembro de 1999, o sensor ASTER é um dos cinco sensores a bordo da plataforma orbital TERRA (Tabela 3), sendo o único instrumento que possui resolução espacial de 15 m a bordo dessa plataforma. Além do ASTER, a bordo da plataforma estão os sensores: MODIS, CERES, MISR e MOPIT.

Tabela 3 - Características do Satélite TERRA. Fonte: http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra/html

Missão	Earth Observing System (EOS)
Instituições Responsáveis	NASA
País/Região	Estados Unidos, Japão e Canadá
Satélite	TERRA (EOS-AM1)
Lançamento	18/12/1999
Local de Lançamento	Vandenberg Air Force Base
Veículo Lançador	Atlas IIAS
Situação Atual	ativo
Órbita	Polar e heliossíncrona
Altitude	705 km
Inclinação	98,2º
Tempo de Duração da Órbita	98,1 min
Horário de Passagem	10:30 A.M.
Período de Revisita	16 dias
Tempo de Vida Projetado	6 a 7 anos
Instrumentos Sensores	ASTER, MODIS, MISR, CERES e MOPPIT

Construído em colaboração pela NASA, Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI), e o Centro Japonês de Análise de dados do Sensoriamento Remoto da Terra (ERSDAC), o sensor ASTER possui uma configuração orbital que possibilita aquisições de produtos, compreendendo de 83ºS a 83°N, com uma resolução temporal de 16 dias de revisita (Tabela 4). Este sensor possui três subsistemas que ao todo compreendem 14 bandas multiespectrais. O subsistema VNIR possui comprimento de onda na região do visível e infravermelho próximo com uma resolução espacial de 15 m. Esse subsistema é constituído por dois telescópios independentes, um voltado para *nadir*, ou seja, apontado para a superfície da terra num ângulo de 90° com a superfície imageada considerando uma superfície plana (GÖBEL, 2012), e outro apontado para *off-nadir,* configuração que possibilita a obtenção de modelos de elevação para cada cena imageada (JENSEN, 2009). O SWIR compreende a faixa do infravermelho de ondas curtas entre (1,6 a 2,43

µm) com resolução espacial de 30 m, e o TIR compreende a faixa do infravermelho termal e apresenta resolução espacial de 90 m.

Tabela 4 - Características do sensor ASTER. Fonte: http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/terra/html

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	1	0.520 - 0.600 µm	15 m	16 dias	60 km	8 bits
	2	0.630 - 0.690 µm				
	3 (Nadir)	0.760 - 0.860 µm				
	4 (Off-Nadir)	0.760 - 0.860 µm				
	5	1.600 - 1.700 µm	30 m	16 dias	60 km	
	6	2.145 - 2.185 µm				
	7	2.185 - 2.225 µm				
	8	2.235 - 2.285 µm				
	9	2.295 - 2.365 µm				
	10	2.360 - 2.430 µm				
	11	8.125 - 8.475 µm	90 m	16 dias	60 km	12 bits
	12	8.475 - 8.825 µm				
	13	8.925 - 9.275 µm				
	14	10.250 - 10.950 µm				
	15	10.950 - 11.650 µm				

As imagens ASTER foram selecionadas através da plataforma *Reverb*, disponível em: http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/ e foram solicitadas para o LaCrio para o projeto GLIMS. Neste presente estudo, foram selecionadas 3 imagens ASTER, solicitadas no nível de processamento L1B, que são imagens já pré processadas, corrigidas geometricamente, georeferenciadas e com valores de radiância reamostrados de 0 a 255. (Tabela 5).

Tabela 5 - Imagens ASTER utilizadas no trabalho

Imagens ASTER	Data da imagem
AST_L1B_00311152005132618_20110505090335_7179_VNIR_ORTHO	05 de Maio de 2011
AST_L1B_00301202006131310_20110622184218_19641_VNIR_ORTHO AST_L1B_00302162004131534_20110622184730_29727_VNIR_ORTHO	22 de Junho de 2011

Para auxiliar na análise visual, foi realizada a ortorretificação das imagens ASTER adquiridas utilizando o módulo AsterDTM do software ENVI. No modelo AsterDTM, para melhor representação das declividades no terreno, foi utilizada a configuração recomendada no manual do usuário do AsterDTM (SULSOFT, 2004), referidas na Tabela 6. Esse procedimento foi aplicado em todas as imagens ASTER utilizadas em testes preliminares no trabalho.

Tabela 6 - Configurações utilizadas no processamento do AsterDTM.

PARÂMETRO	CONFIGURAÇÃO
Resolução de saída	15 m
Método de correlação	Convolução cúbica 2D
Tamanho da janela de correlação	3x3
MDE orientado para norte	Sim
Análise de correlação estendida	Sim

3.1.3. Modelos digitais de elevação

Modelos Digitais de Elevação (MDE's) representam os valores de elevação ao longo de uma superfície topográfica. Conforme Valeriano (2008), MDE's são arquivos que contêm registros altimétricos

estruturados em linhas e colunas com valores de elevação em cada célula ou pixel. Segundo Ribeiro (2007), consistem na representação da superfície de um determinado terreno em ambiente digital. Neste estudo serão utilizados para extração automática da rede de drenagem os MDE's RAMP DEM e o APGDEM.

Os modelos digitais de elevação RAMP DEM e o APGDEM, ambos na projeção Estereográfica Polar datum WGS84, foram avaliados para definir qual apresentará melhores resultados na delimitação automática de bacias. Para esta finalidade, procedimentos como a eliminação de picos e depressões (*sinks* e *peaks*) e filtragens serão testados utilizando os módulos presentes no software Quantum GIS (QGIS) e ERDAS, descritos nos subcapítulos a seguir.

3.1.4. Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model (RAMP DEM)

RAMP DEM (Figura 8) foi gerado no *Byrd Polar Research Center* (BPRC) e desenvolvido para a ortorretificação de imagens *Radarsat Antarctic* SAR. Incorpora dados topográficos de altimetria por satélite radar, levantamentos de radar, dados do *Antarctic Digital Database* (ADD v.2) e mapas topográficos de grandes escalas advindos do *United States Geological Survey* (USGS) e do *Australian Antarctic Division* (AAD). Estes dados foram coletados entre os anos de 1940 até o presente, sendo a grande maioria adquiridos entre os anos de 1980 e 1990 (LIU *et al*., 2001).

O RAMP DEM está disponível nas resoluções espaciais de 1 km, 400m e 200 m nos formatos ARC/INFO e grade binária. Os MDE'S de 1 km e 400 m também são disponibilizados no formato ASCII. Estes dados são de livre acesso (http://nsidc.org/data/nsidc-0082.html).

Quanto à cobertura espacial, o RAMP DEM abrange toda a Antártica, de 60°S a 90°S de latitude, mas para o trabalho foi utilizado o limite meridional até 70°S. Este Modelo Digital de Elevação possui grande aplicabilidade em estudos da morfologia e dinâmica glacial, dentre as

aplicações pode-se citar o mapeamento de linhas de fluxo, determinação de áreas de captação, mapeamento de velocidades de fluxo e modelagem atmosférica (JEZEK, 1999).

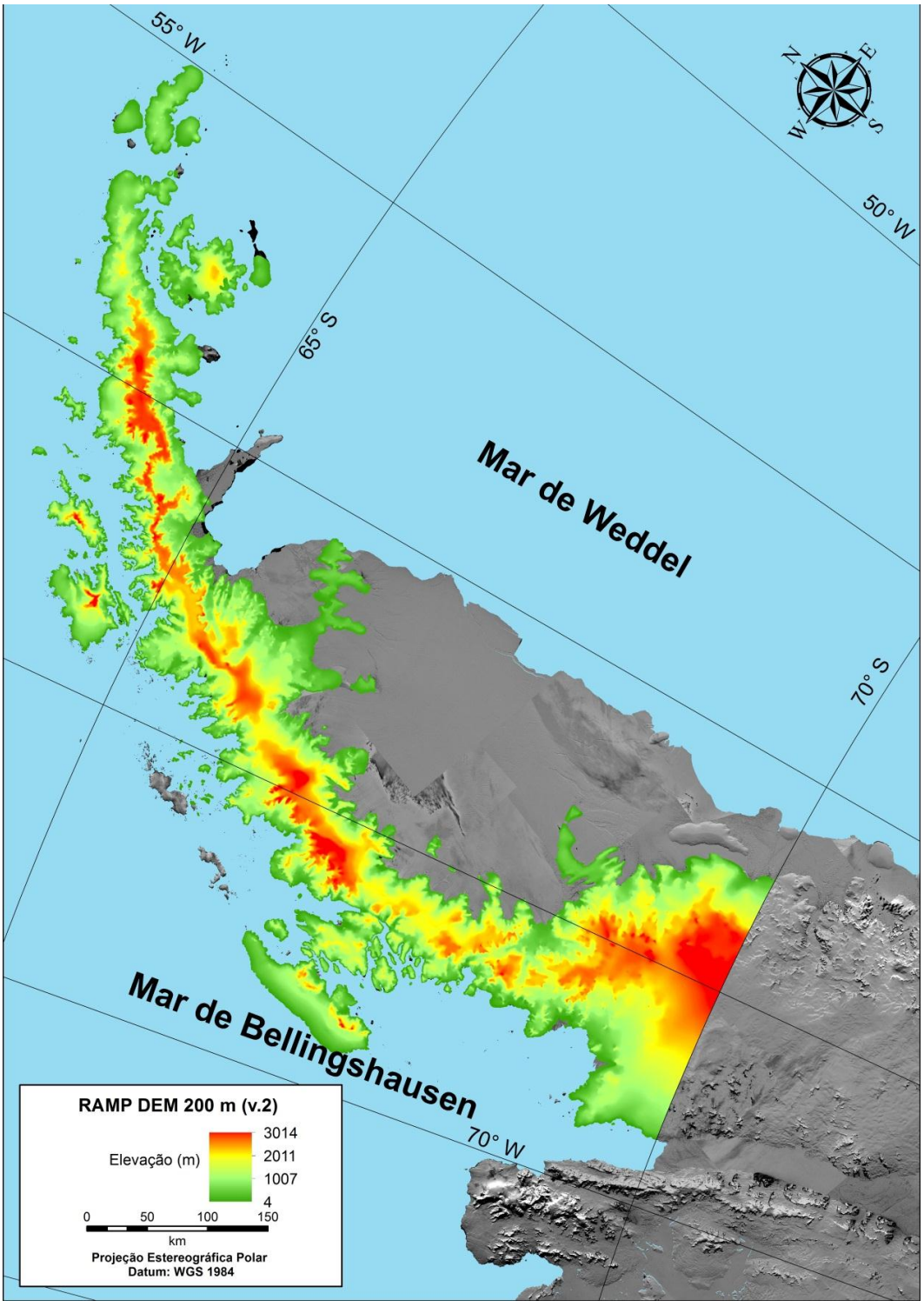


Figura 8 - *Radarsat Antarctic Mapping Project Digital Elevation Model* (RAMP DEM).

3.1.5. Antarctic Peninsula 100 m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM (APGDEM)

APGDEM (Figura 9) é um modelo digital de elevação com 100 m de resolução espacial para a região da Península Antártica, elaborado a partir de dados de imagens do sensor ASTER e do *Global Digital Elevation Model* (GDEM).

Desenvolvido utilizando um novo método para suavizar regiões com dados errôneos, o APGDEM possui uma diferença média de elevação de -4 m (± 25 m de erro médio quadrático [RMSE]), comparado aos dados do *NASA Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite* (ICESat) e -13 m, ± 97 m quando comparado ao GDEM, embora as precisões de elevação sejam menores para regiões de picos de montanhas e encostas íngremes (COOK *et al*., 2012).

O APGDEM abrange de 63°S até 70°S de latitude. Disponível no formato GeoTIFF este modelo digital de elevação pode ser adquirido gratuitamente (http://nsidc.org/data/nsidc-0516.html).

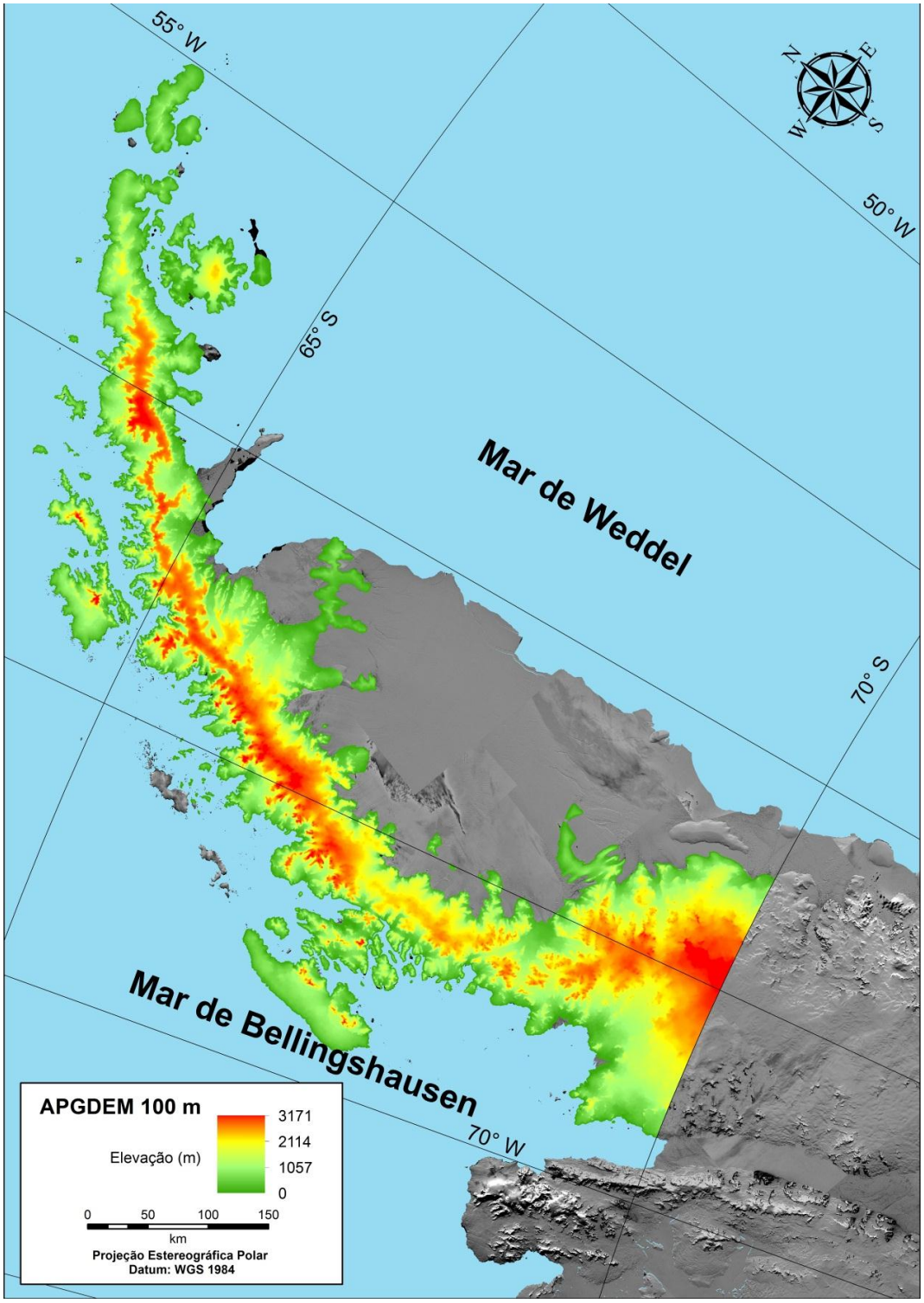


Figura 9 - *Antarctic Peninsula 100 m Digital Elevation Model Derived from ASTER GDEM* (APGDEM).

3.2. Processamento digital preliminar de MDE

3.2.1. Eliminação de Sinks nos MDE

O procedimento para a eliminação de *sinks* é aplicado em modelos digitais de elevação para remoção de imperfeições nestes dados. Essas imperfeições, caracterizadas como depressões ou picos devem ser corrigidas para gerar redes de fluxo e delimitar bacias de drenagem de forma mais fiel à verdade terrestre (HENGL *et al.,* 2004; GÖBEL, 2012). Na extensão SAGA GIS do software Quantum GIS, esse procedimento foi executado em *Terrain Analysis Preprocessing*, utilizando a ferramenta *Sink Drainage Route Detection.* Esta ferramenta faz uma média entre os valores das células no MDE detectando todos os valores espúrios que necessitam ser removidos (TARBOTON *et al*., 1991). Logo após, é necessário utilizar ferramenta *Sink Removal*, que remove os valores espúrios anteriormente detectados gerando um MDE corrigido. Por exemplo, considerando um pico, onde o ponto de fluidez está a 64 m, e o ponto mais profundo a 62,2 m (uma diferença de 1.8 m). Se o z-limite é definido como 2.4 m, este dissipador será preenchido. No entanto, se o limite de z é definido como 1.2 m, este dissipador não será preenchido uma vez que a profundidade deste dissipador excede esta diferença e seria considerado um dissipador válido (Figura 10).

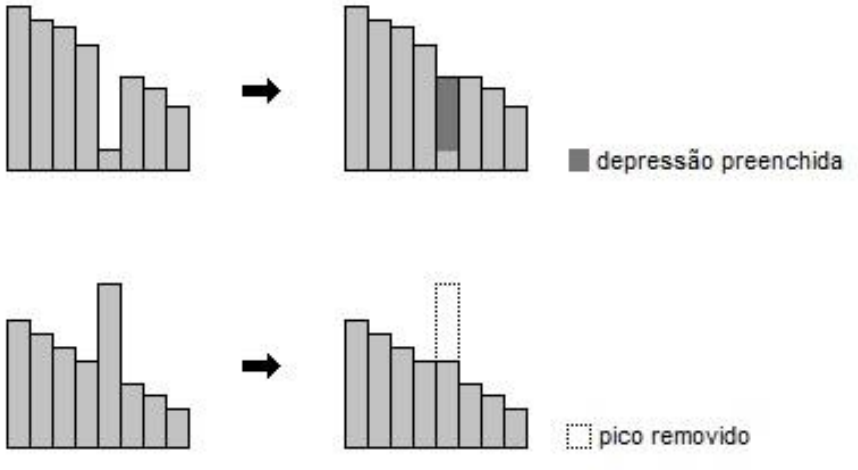


Figura 10 - Exemplo de como a ferramenta *Sink Removal* trabalha ajustando os valores no MDE.

3.2.2. Filtragem dos MDE

O processo de filtragem em imagens e modelos digitais de elevação é uma técnica na qual é possível modificar os níveis de cinza pixel a pixel através de funções matemáticas para destacar determinadas informações espectrais (SANTOS *et al.,* 2010). A filtragem está relacionada diretamente com a frequência espacial que é definida como a variação dos níveis de cinza por unidade de distância. Variações abruptas nos níveis de cinza estão relacionadas a altas frequências, destacando feições de bordas e limites no alvo enquanto que variações suaves estão relacionadas a baixas frequências representando alvos homogêneos (ERDAS, 2013). A filtragem se utiliza de uma operação chamada convolução, definida como um processo realizado pelo deslocamento de uma máscara (matriz/janela móvel) sobre o alvo pelo avanço de um pixel por vez. Essa máscara substitui os valores de determinado pixel por um novo valor, dependente dos valores dos pixels vizinhos, gerando um dado filtrado que é ponderado pelas soma dos níveis de cinza dos pixels e pelos coeficientes da máscara (Figura 11).

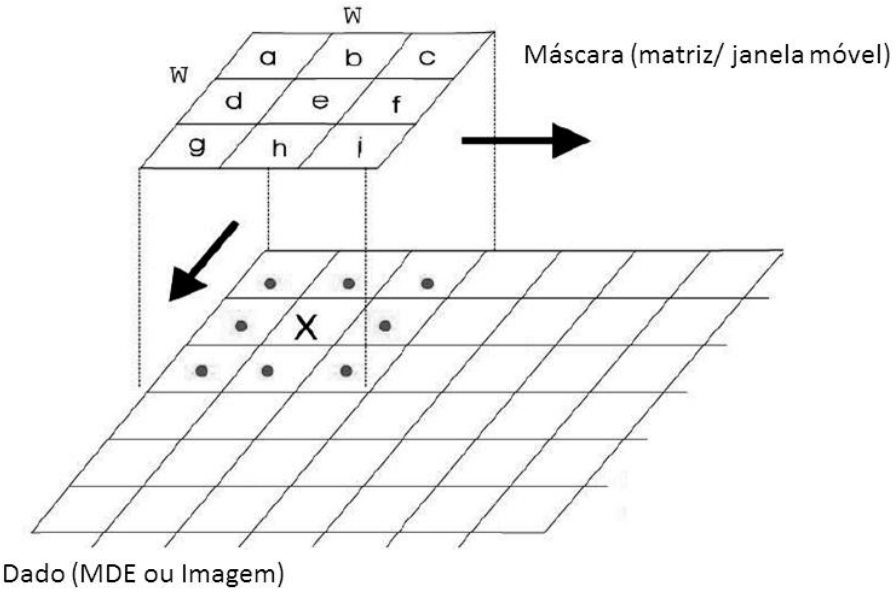


Figura 11 - Máscara (matriz/janela móvel) sobre o alvo gerando um dado filtrado, ponderado pelas soma dos níveis de cinza dos pixels e pelos coeficientes da máscara.

Segundo Santos *et al.*, (2010) as operações de filtragem podem ser divididas nas classes: a) filtragem linear; b) filtragem não-linear e c) filtragem morfológica. Neste trabalho serão testadas apenas as filtragens lineares do tipo Passa Baixa-Média 3x3, 5x5 e 7x7 nos modelos digitais de elevação para atenuação de altas frequências e minimizar ruídos nesses dados, como o exemplo da figura 12.

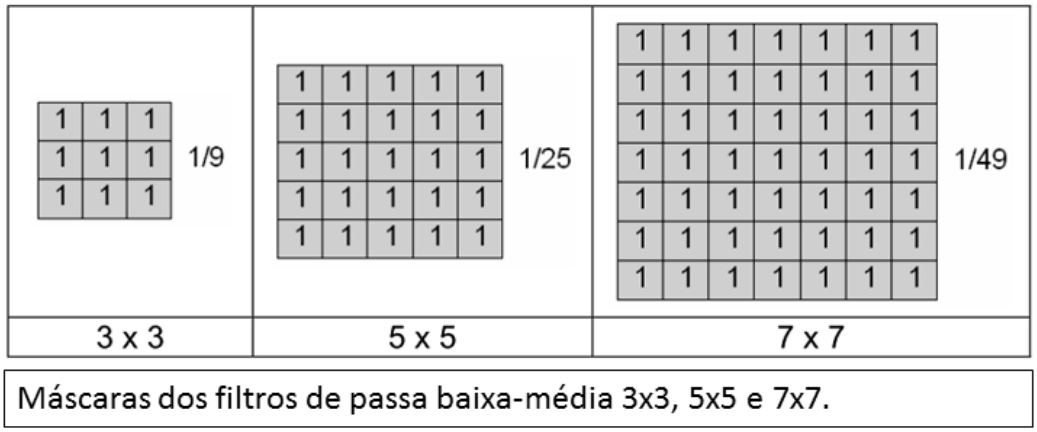


Figura 12 - Máscaras dos filtros passa baixa-média que são utilizados para atenuar altas frequências e ruídos em modelos digitais de elevação.

3.3. Análise e seleção de algoritmos de fluxo

Após testes e análise dos procedimentos para eliminação de *sinks* e *peaks* nos MDE, o APGDEM foi escolhido, por apresentar melhores resultados para a área de estudo e posterior geração da rede de drenagem. O processo de filtragem dos MDE não apresentou bons resultados em testes preliminares e por isso não foi utilizado no trabalho. Para o cálculo da área de captação, foram testados no APGDEM os algoritmos de direção de fluxo D8, KRA, DEMON e DInf (Figura 13), nos módulos *Terrain Analisys - Hydrology* e *Terrain Analisys - Channels*. Nestes módulos o usuário define basicamente o MDE e o dado de área de captação de fluxo para gerar produtos de canais de drenagem, bacias e subbacias de drenagem.

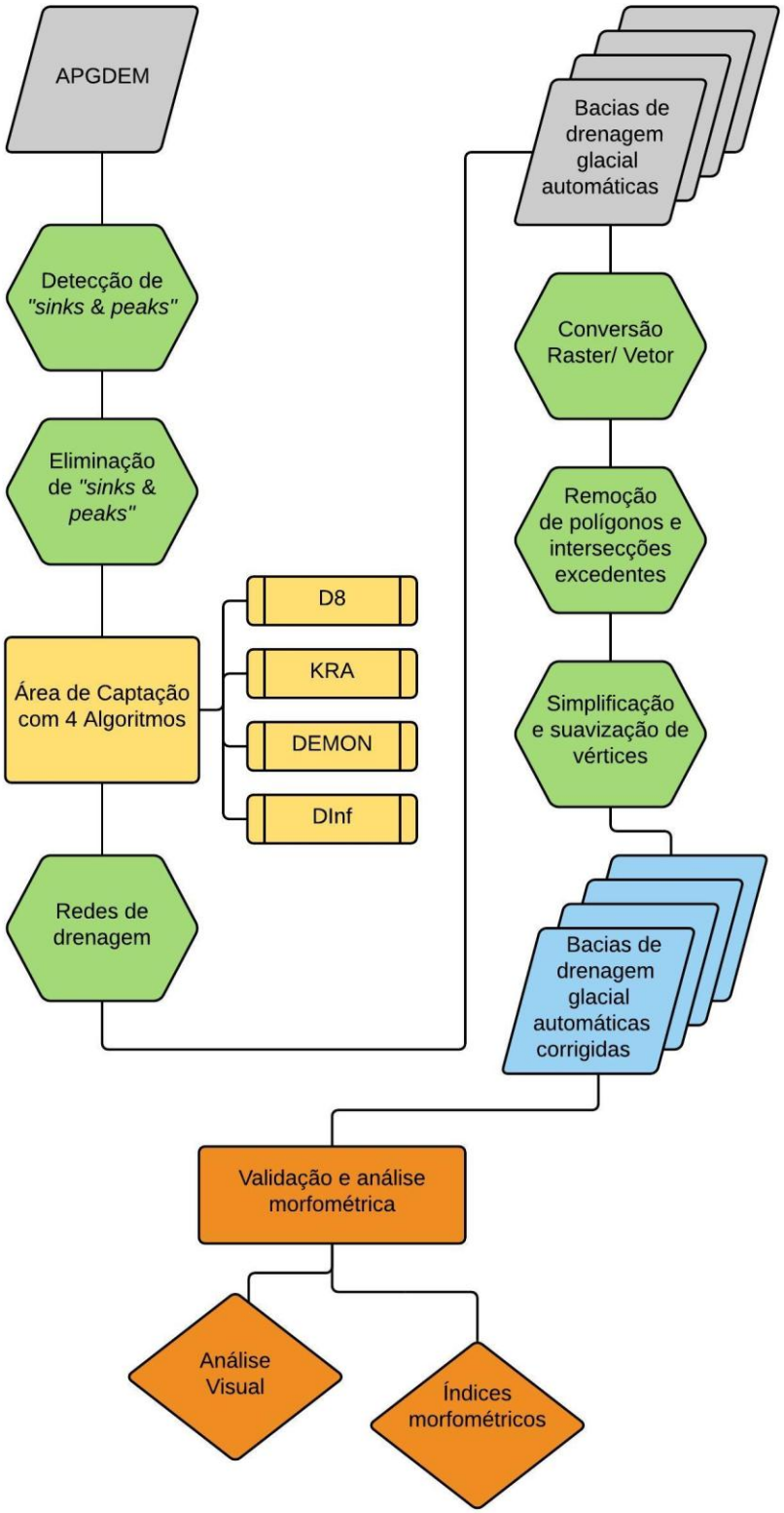


Figura 13 - Procedimentos aplicados para a delimitação automática de bacias de drenagem glacial a partir do APGDEM.

3.3.1. Cálculo da área de captação

Segundo Moore *et al.,* (1991), MDE's são utilizados como dado matricial base para o cálculo da área de captação. Nesse contexto, os algoritmos de fluxo, elaborados a partir de diferentes abordagens e conceitos, apresentam melhores resultados em MDE's com remoção de *sinks* e *peaks* (JENSON e DOMINGUE, 1988). Para o trabalho foram testados os algoritmos: D8 (O'CALLAGHAN e MARK, 1984), este algoritmo faz com que o fluxo se desloque desde o centro de uma célula para o centro de uma das oito células vizinhas inferiores onde seja detectado o declive mais acentuado; KRA (LEA, 1992), a direção de fluxo é delimitada em função de um ângulo de orientação de vertentes local a cada 1°, considerando os quatro cantos do pixel, não restringindo sua posição ao centro da célula; DEMON (COSTA CABRAL; BURGES, 1994), define valores nas extremidades de cada célula do MDE para a geração da rede de fluxo e a concentração do fluxo é atribuída pela variação no comprimento de contorno; DInf (TARBOTON, 1997) representa as direções de fluxo com base na maior declividade de oito facetas triangulares a partir de um pixel central e contíguos de 0° a 360°, o fluxo é contado no sentido anti-horário desde leste, o que permite a contribuição de fluxo em dois ou mais pixels vizinhos em ângulos contíguos.

A definição do limiar para o cálculo da área de captação está diretamente ligada à escala de detalhamento, variável para cada área de estudo. O analista do SIG estabelece de forma empírica um valor mínimo do limiar para o cálculo da área de captação, lembrando que todos os valores de célula do MDE acima do limiar são definidos como pontos da rede de drenagem (BANON, 2013) e quanto menor o limiar escolhido, mais complexa e densa será a rede de drenagem (TRIBE, 1990; LI *et al.,* 2008) (Figura 14). Diversos limiares foram testados para a extração automática da rede de drenagem, e o valor que gerou drenagens mais condizentes ao que se espera da verdade terrestre foi ≥ 100.000.

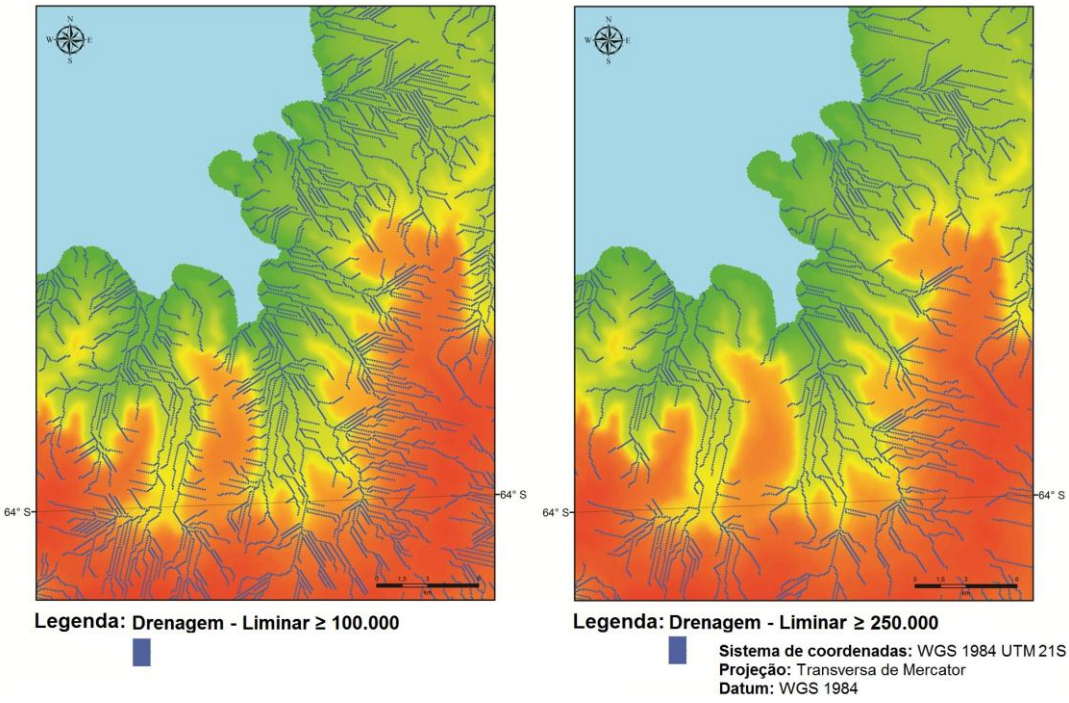


Figura 14 - Diferença entre os limiares para a geração da área de captação. Quanto menor o limiar escolhido, mais complexa e densa será a rede de drenagem. Dentre os valores testados, o valor que gerou drenagens mais detalhadas e condizentes ao que se espera da verdade terrestre foi ≥ 100.000.

3.4. Delimitação automática de bacias de drenagem

Após a geração da área de captação com os algoritmos de fluxo D8, KRA, DEMON e DInf, a próxima etapa foi delimitar automaticamente as bacias de drenagem glacial utilizando a ferramenta *Watershed* disponível em *Terrain Analysis - Channels* na extensão SAGA GIS. Como dado de entrada (*input*) foram selecionadas as áreas de captação elaboradas por diferentes algoritmos. Nessa ferramenta também é exigido um valor limiar para o tamanho mínimo de cada bacia e subbacia que serão geradas automaticamente. Diversos valores foram testados, e o valor = 100 foi definido. O resultado preliminar da delimitação automática (Figura 15) demonstra subbacias compartimentadas e dados superestimados pelo algoritmo que necessitam ser eliminados em procedimento posterior.

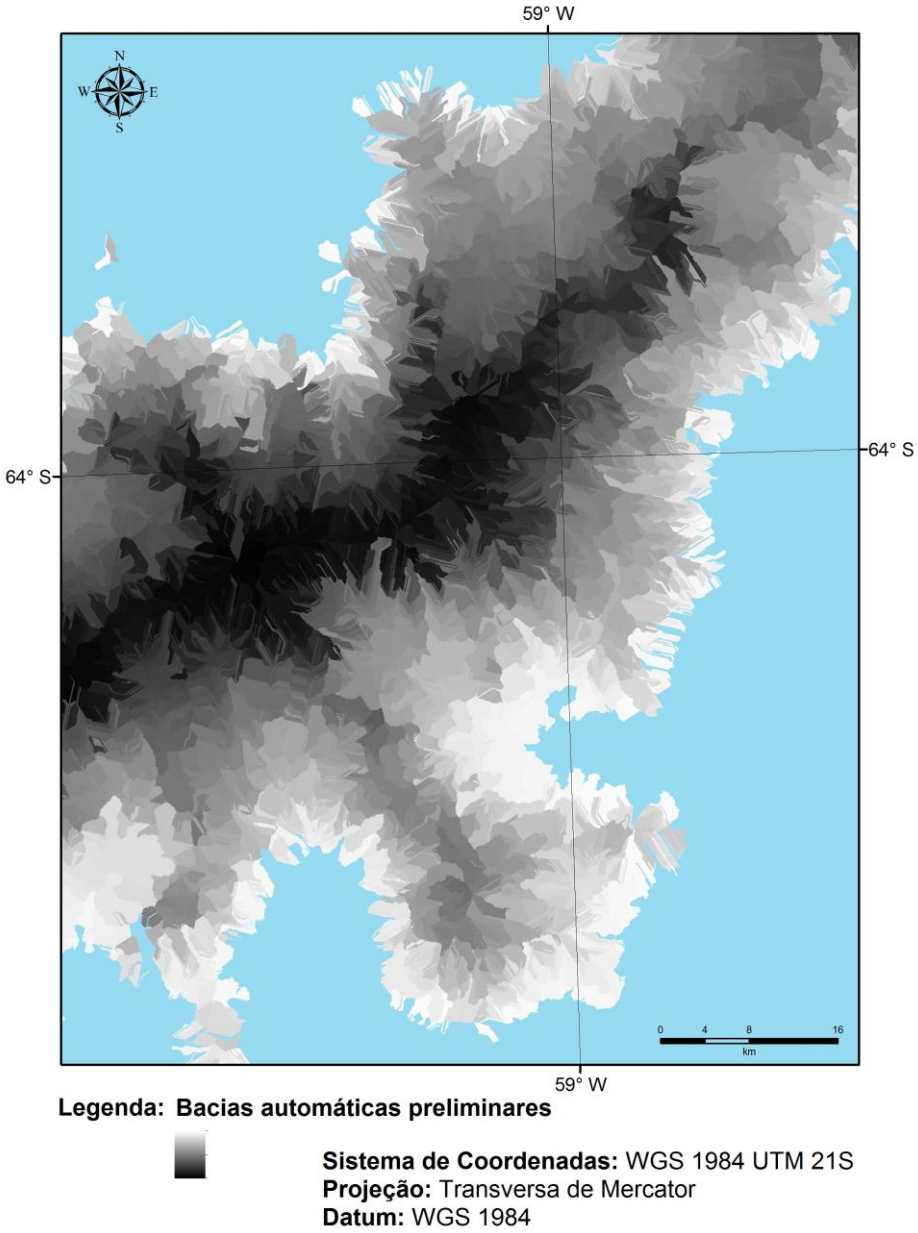


Figura 15 - Resultado preliminar da delimitação automática demonstra subbacias compartimentadas e dados superestimados pelo algoritmo que necessitam ser eliminados em procedimento posterior.

3.4.1. Procedimentos aplicados à eliminação de dados superestimados

O arquivo de delimitação automática de bacias é gerado no formato matricial (*raster*) e deve ser convertido para o formato vetorial (*shapefile*) para que seja possível remover dados superestimados. Esses dados

consistem em polígonos de área muito pequena com linhas sobrepostas, gerados automaticamente e que não correspondem a bacias de drenagem glacial. Na extensão GRASS GIS, na aba *Vector*, foi utilizada a ferramenta *v.clean/rmarea*. Esta ferramenta remove parte dos polígonos excedentes formados por intersecções de vetores sendo necessário determinar um limiar para a remoção destes dados. Diversos valores foram testados e o que apresentou melhores resultados foi = 500.000 (Figura 16).

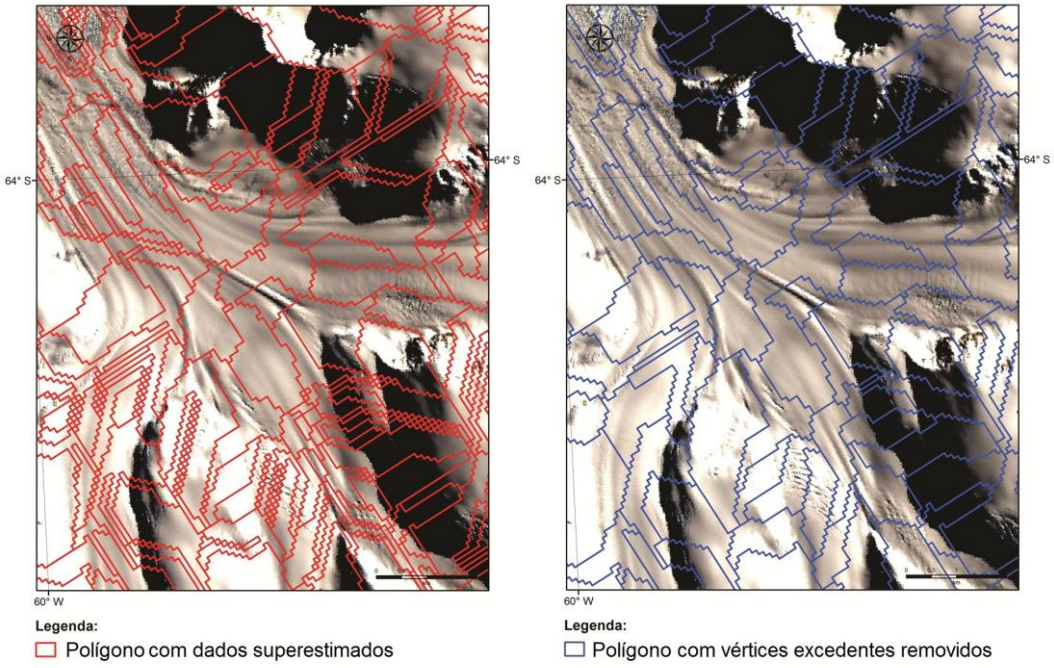


Figura 16 - Diferença entre a delimitação com dados superestimados (vermelho) e após a correção e remoção de vértices excedentes (azul). Nota-se que a ferramenta *v.clean/rmarea* remove os polígonos excedentes formados por intersecções de vetores.

O dado automático de delimitação de bacias possui muitos ângulos retos que necessitam ser suavizados. Para este fim, foi utilizada a ferramenta *v.generalize*, também presente na aba *Vector* da extensão GRASS GIS. No *v.generalize* é possível escolher diferentes algoritmos de simplificação e suavização de vértices. Todos os algoritmos disponíveis foram testados e o que apresentou melhores resultados na delimitação automática foi o algoritmo *Snakes* (KASS *et al.,*1988). O *Snakes* preserva

as características gerais do dado, suavizando as arestas nas linhas de delimitação. (Figura 17)

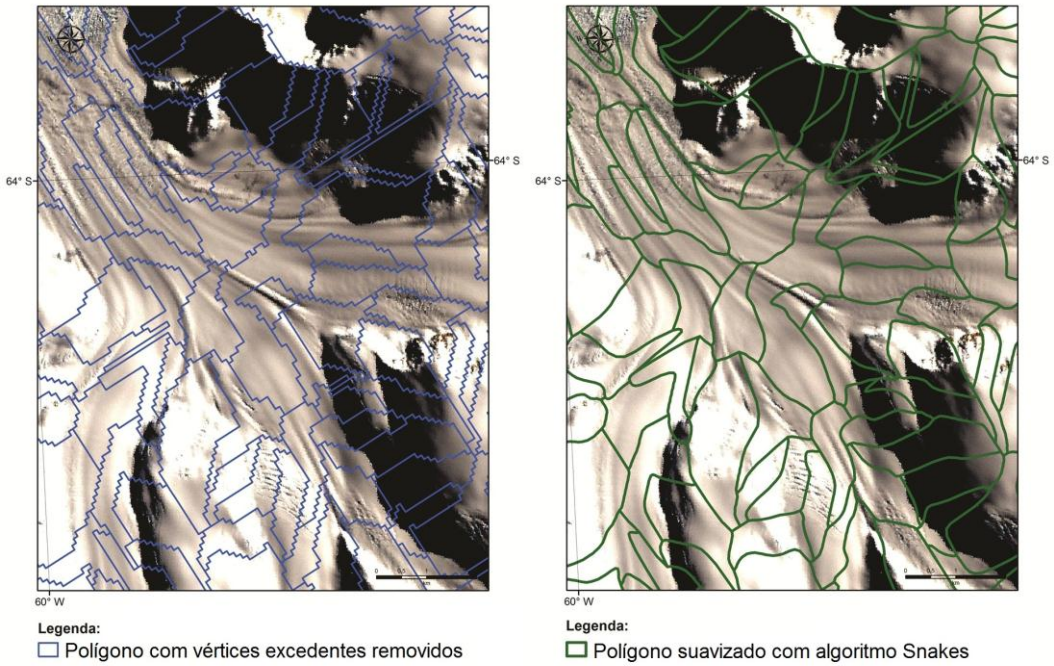


Figura 17 - Diferença entre o dado automático de bacias pré-suavização (azul) e pós-suavização pelo algoritmo *Snakes* (verde). Nota-se que o *Snakes* preserva as características gerais do dado, suavizando as arestas e ângulos retos nas linhas de delimitação.

Após a eliminação de dados superestimados e suavização nos arquivos de delimitação automática para cada algoritmo de fluxo, é necessário agrupar as subbacias confluentes. Para a tomada de decisão, foi feita uma estatística zonal, em *Zonal Statistics,* utilizando as delimitações elaboradas por Oliveira *et al*., (2012) e Cook *et al*., (2014) como dados de referência. A partir destes dados de referência é feito a separação das bacias automáticas em um único arquivo vetorial, utilizando a classe majoritária na ferramenta *Dissolve* do QGIS.

3.5. Validação e análise morfométrica

Os dados obtidos pelo método automático de delimitação de bacias foram comparados aos dados de delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014). Os índices morfométricos descritos no subcapítulo 2.4 foram calculados na calculadora de campos (Figura 18) na tabela de atributos no QGIS para as bacias delimitadas pelo método automático e também nas de referência, como no exemplo da figura 19. Com estes dados foi possível fazer a análise morfométrica e validação do método automático, juntamente com o índice estatístico *Kappa* (COHEN, 1960).

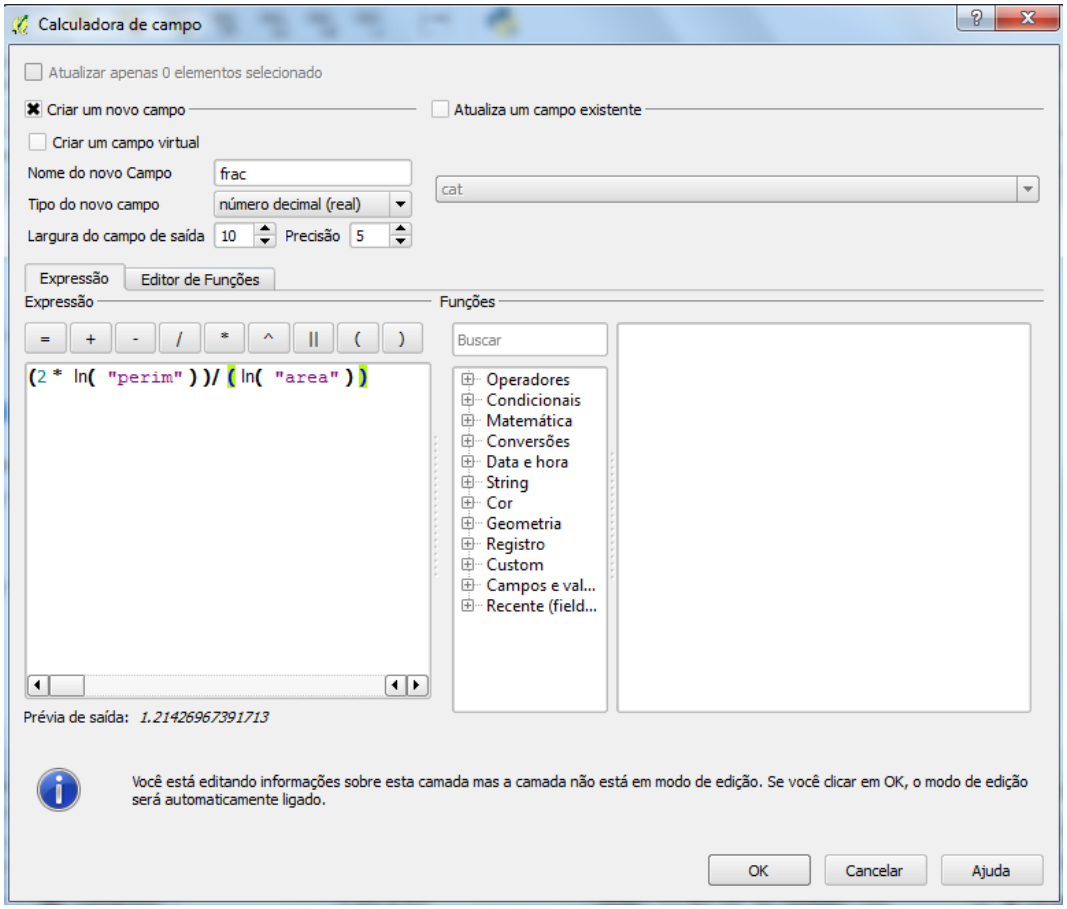
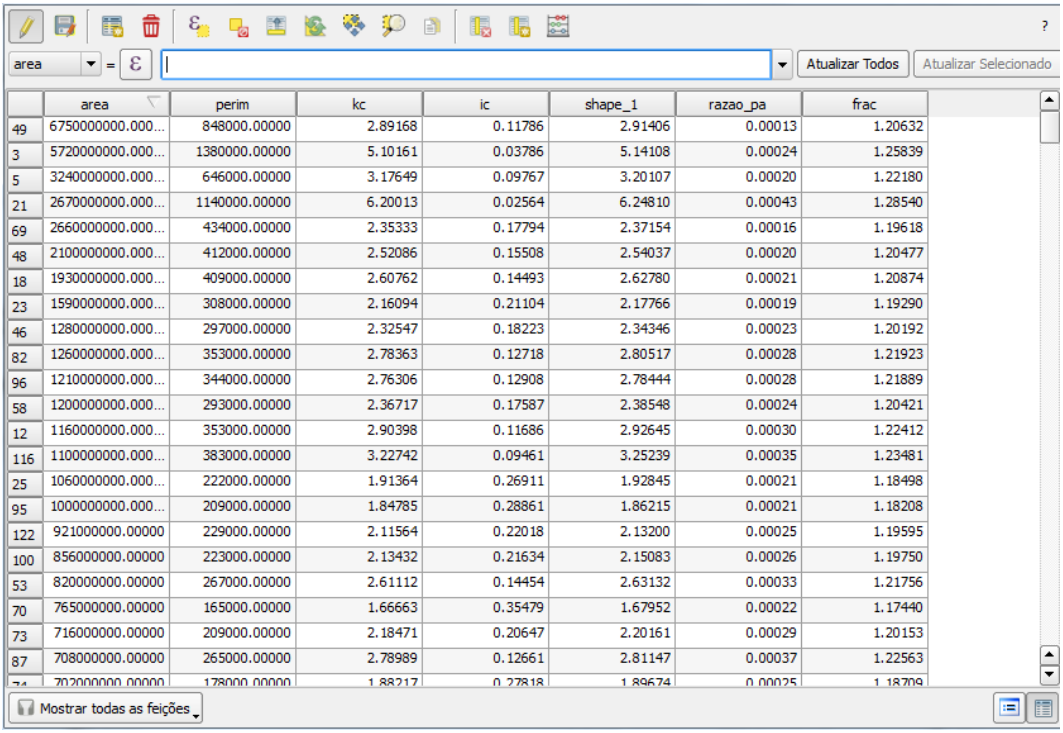


Figura 18 - Exemplo de como são aplicados os cálculos para os índices morfométricos na calculadora de campo do QGIS. Nesta etapa, é necessário nomear a nova coluna de dados correspondente ao índice morfométrico que se quer calcular, determinar se será um número inteiro, decimal, texto ou data, selecionar a largura do campo de saída e elaborar a expressão do índice morfométrico desejado.



	area	perim	kc	ic	shape_1	razao_pa	frac
49	6750000000.000...	848000.00000	2.89168	0.11786	2.91406	0.00013	1.20632
3	5720000000.000...	1380000.00000	5.10161	0.03786	5.14108	0.00024	1.25839
5	3240000000.000...	646000.00000	3.17649	0.09767	3.20107	0.00020	1.22180
21	2670000000.000...	1140000.00000	6.20013	0.02564	6.24810	0.00043	1.28540
69	2660000000.000...	434000.00000	2.35333	0.17794	2.37154	0.00016	1.19618
48	2100000000.000...	412000.00000	2.52086	0.15508	2.54037	0.00020	1.20477
18	1930000000.000...	409000.00000	2.60762	0.14493	2.62780	0.00021	1.20874
23	1590000000.000...	308000.00000	2.16094	0.21104	2.17766	0.00019	1.19290
46	1280000000.000...	297000.00000	2.32547	0.18223	2.34346	0.00023	1.20192
82	1260000000.000...	353000.00000	2.78363	0.12718	2.80517	0.00028	1.21923
96	1210000000.000...	344000.00000	2.76306	0.12908	2.78444	0.00028	1.21889
58	1200000000.000...	293000.00000	2.36717	0.17587	2.38548	0.00024	1.20421
12	1160000000.000...	353000.00000	2.90398	0.11686	2.92645	0.00030	1.22412
116	1100000000.000...	383000.00000	3.22742	0.09461	3.25239	0.00035	1.23481
25	1060000000.000...	222000.00000	1.91364	0.26911	1.92845	0.00021	1.18498
95	1000000000.000...	209000.00000	1.84785	0.28861	1.86215	0.00021	1.18208
122	921000000.00000	229000.00000	2.11564	0.22018	2.13200	0.00025	1.19595
100	856000000.00000	223000.00000	2.13432	0.21634	2.15083	0.00026	1.19750
53	820000000.00000	267000.00000	2.61112	0.14454	2.63132	0.00033	1.21756
70	765000000.00000	165000.00000	1.66663	0.35479	1.67952	0.00022	1.17440
73	716000000.00000	209000.00000	2.18471	0.20647	2.20161	0.00029	1.20153
87	708000000.00000	265000.00000	2.78989	0.12661	2.81147	0.00037	1.22563
74	702000000.00000	178000.00000	1.88217	0.27818	1.89674	0.00025	1.18709

Figura 19 - Exemplo de uma das tabelas de atributos com a organização dos índices morfométricos gerados na calculadora de campo para uma das bacias delimitadas automaticamente. Este processo também foi realizado nas bacias de referência de Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados deste trabalho: a) pré-processamento de MDE's e escolha de produto; b) análise e seleção de algoritmos de fluxos de drenagem; c) delimitação automática de bacias de drenagem com o MDE APGDEM; c) validação morfométrica e índices kappa com dados existentes gerados de forma manual e semiautomática.

4.1. Pré-processamento de MDE's e escolha de produto

A partir da metodologia elaborada, foi escolhido o APGDEM como melhor MDE para a área de estudo (Figura 20). O RAMP DEM não foi utilizado, pois mesmo após a correção de *sinks* e *peaks*, ainda gerava

redes de drenagem superestimadas. O procedimento de filtragem também não foi utilizado no trabalho, pois, uma vez aplicado nos MDE, diminui o aprofundamento dos canais de drenagem, intervindo negativamente no calculo das áreas de captação via algoritmos de extração de drenagem.

O procedimento preliminar para a eliminação de *sinks* e *peaks* no APGDEM permitiu que fossem gerados dados de delimitação automática de bacias mais fiéis ao que se espera da verdade terrestre (ANDRADA & FREITAS, 2015), utilizando os algoritmos de extração de drenagem D8, Dinf, Demon e Kra.

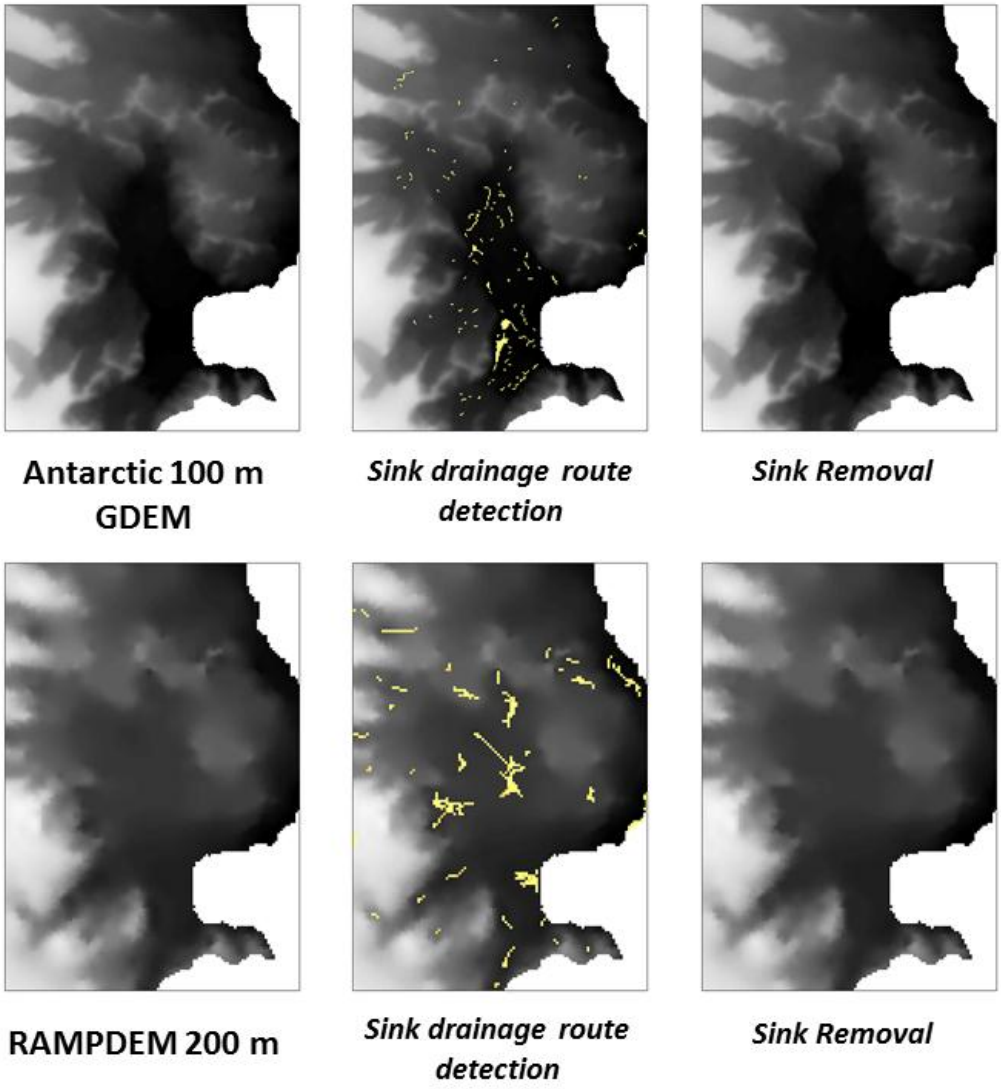


Figura 20 - Ferramentas *Sink Drainage Route Detection* e *Sink Removal* atuando na remoção de valores discrepantes nos modelos digitais de elevação utilizados no trabalho.

4.2. Análise e seleção de algoritmos de fluxos de drenagem

Para fins de comparação, foram utilizados 4 algoritmos de fluxo de drenagem: 1) D8 - algoritmo de processamento mais rápido e altamente utilizado em sistemas de SIG e em trabalhos onde o foco é a extração de drenagem simples; 2) KRA - a direção de fluxo é delimitada em função de um ângulo de orientação; 3) DEMON - a concentração do fluxo é atribuída pela variação no comprimento de contorno; 4) DInf - o fluxo é contado no sentido anti-horário desde leste, o que permite a contribuição de fluxo em dois ou mais pixels vizinhos em ângulos contíguos.

Procedimentos aplicados à eliminação de dados superestimados (descritos no subcapítulo 3.3.1) aprimoraram a qualidade das delimitações automáticas removendo vértices excedentes e suavizando arestas nos vetores. Estes procedimentos foram importantes para a geração do produto final das delimitações, pois eliminou a possibilidade de agrupar polígonos excedentes que não correspondiam a bacias de drenagem, e com a utilização do algoritmo *Snakes,* eliminou também parte dos ângulos retos nas linhas de delimitação.

4.3. Delimitação automática de bacias de drenagem com o MDE APGDEM

Na delimitação automática de bacias de drenagem, o foco foi evitar ao máximo a interferência do analista do SIG, prezando por manter a metodologia o mais automatizada possível para posterior comparação com os dados elaborados por Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014).

A estatística zonal utilizada no método automático gerou dois conjuntos de dados, um deles utilizando as bacias de drenagem de Oliveira *et al.,* (2012) como zonas, e o outro as bacias de drenagem elaboradas por Cook *et al.,* (2014).

O número de bacias geradas com os algoritmos de fluxo D8, DInf, DEMON e KRA comparados aos de Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014) estão descritos na tabela 7.

Tabela 7 – Resultado do número de bacias obtidas com os algoritmos de fluxo D8, DInf, DEMON e KRA comparados aos dados de referência por estatística zonal com os dados de Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014)

DELIMITAÇÃO	**Oliveira *et al.,* (2012)**	**D8**	**Dinf**	**DEMON**	**KRA**
Nº de bacias	496	437	432	436	437
DELIMITAÇÃO	**Cook *et al.,* (2014)**	**D8**	**Dinf**	**DEMON**	**KRA**
Nº de bacias	1590	1588	1464	1531	1541

Nota-se que tanto para os dados de Oliveira *et al.,* (2012) quanto para os de Cook *et al.,* (2014), o algoritmo D8 é o que gerou o número de bacias de drenagem mais próximo a essas referências. Este resultado já era esperado, pois em sua metodologia semiautomática, Oliveira *et al.,* (2012) utilizou o algoritmo D8 para delimitar automaticamente suas bacias drenagem e as corrigiu manualmente num segundo momento. Cook *et al.,* (2014) não explicitou detalhadamente sua metodologia de delimitação, no entanto acredita-se que o D8 também tenha sido o algoritmo utilizado como referência, uma vez que este algoritmo é mais utilizado nos pacotes de análise espacial em SIG.

4.4. Validação e análise morfométrica

Os resultados finais obtidos na delimitação automática de bacias foram comparados aos elaborados por Oliveira *et al*., (2012) e Cook *et al*., (2014) (Figura 21 e 22), utilizando os índices morfométricos: área, perímetro, coeficiente de compacidade, índice de circularidade, dimensão fractal, razão perímetro-área, índice de forma, índice estatístico *Kappa* e serão discutidos a seguir.

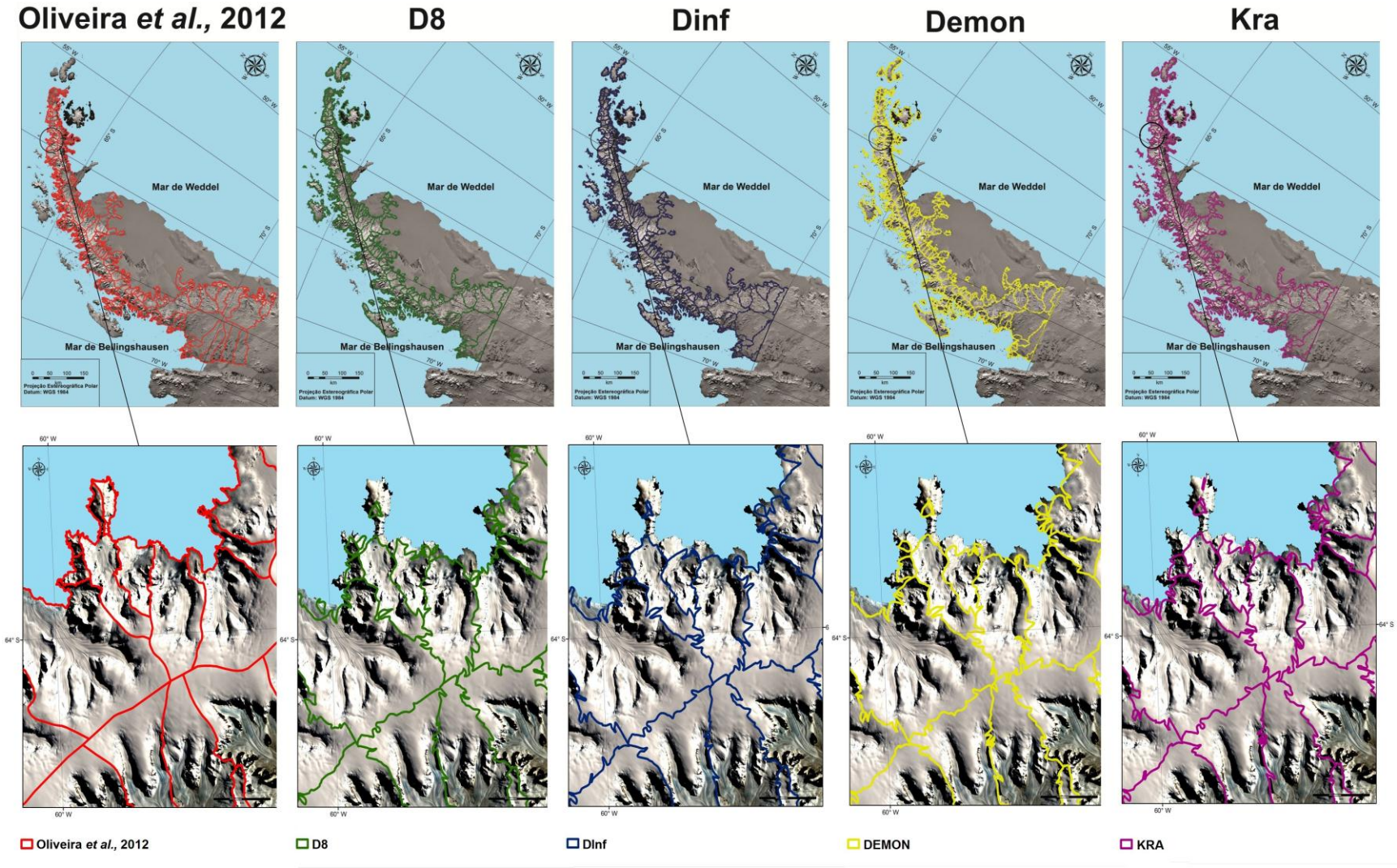


Figura 21 - Separação automática de bacias a partir da aplicação de estatística zonal na delimitação de Oliveira *et al.*, (2012) para cada algoritmo utilizando a classe majoritária na ferramenta *Dissolve* do QGIS.

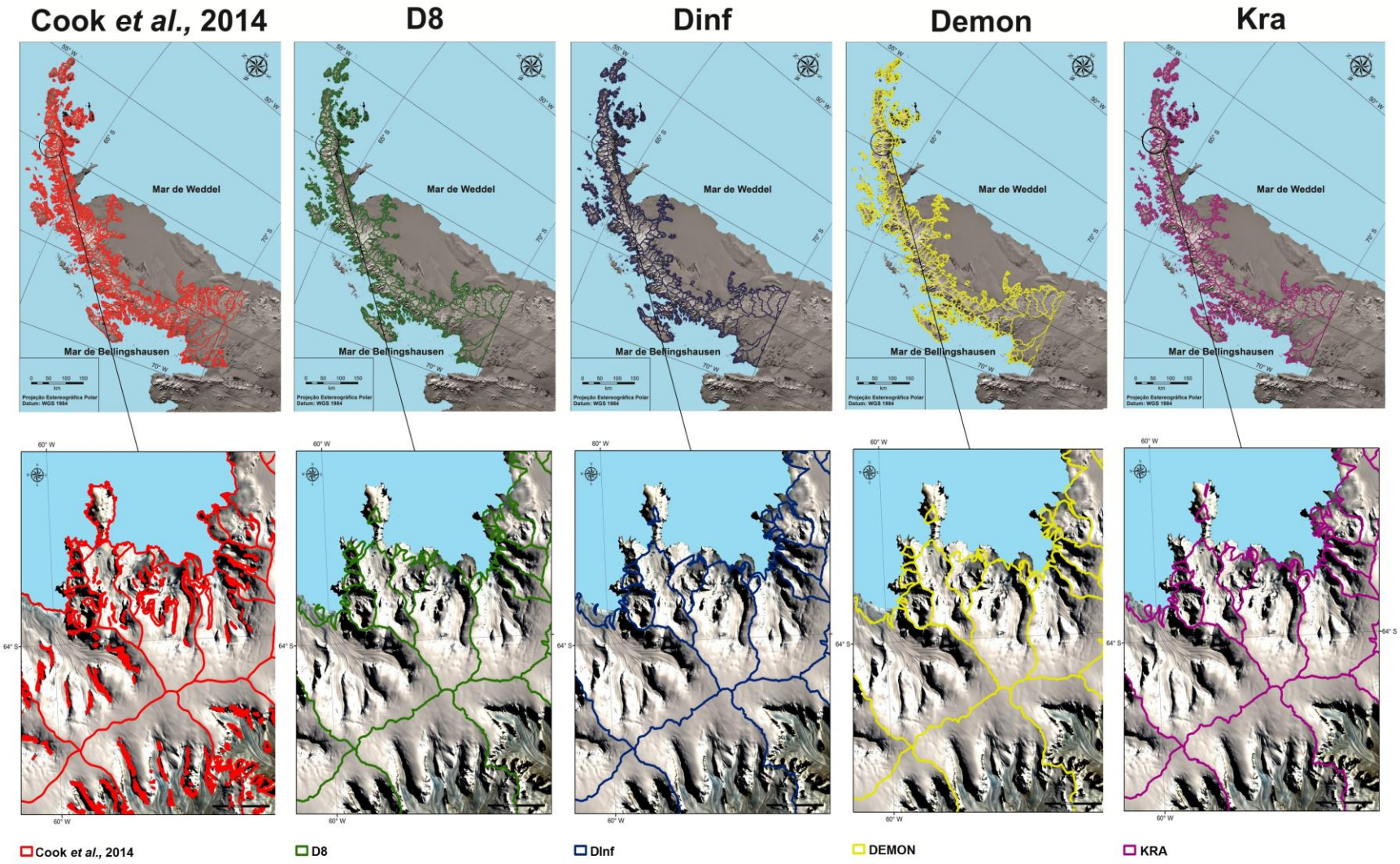


Figura 22 - Separação automática de bacias a partir da aplicação de estatística zonal na delimitação de Cook *et al.,* (2014) para cada algoritmo utilizando a classe majoritária na ferramenta *Dissolve* do QGIS.

4.4.1. Comparativo entre o resultado das bacias delimitadas automaticamente e as elaboradas por Oliveira et al., (2012)

Para estabelecer um comparativo entre os índices morfométricos, foi calculada a mediana nos índices para cada dado de delimitação. No índice de Área, a delimitação automática com o algoritmo D8 foi a que apresentou resultados mais próximos aos dos dados elaborados por Oliveira *et al.,* (2012). Este resultado se mostra condizente, pois na primeira etapa da elaboração do método semiautomático de Oliveira *et al*., (2012), as bacias de drenagem glacial foram delimitadas automaticamente utilizando o algoritmo D8, presente no pacote de análise espacial do software ArcGIS, e posteriormente foram corrigidas em análise visual. No índice Perímetro o resultado já é diferente, e os algoritmos DInf e Kra são os que apresentam valores mais próximos aos de Oliveira *et al.,* (2012). Para o Coeficiente de compacidade (Kc), que corresponde a relação entre o perímetro (P) da bacia de drenagem e a circunferência de um círculo de área equivalente à da bacia, o algoritmo que apresentou melhores resultados ao dado de referência foi o Dinf. No índice de circularidade (IC), que é semelhante ao de compacidade (Kc), relacionando a forma da bacia com a de círculo de perímetro igual, o resultado também apresenta o Dinf contendo os valores mais próximos ao dado de referência. No índice Dimensão fractal (FRAC), que relaciona o grau de deformação das dimensões das formas geométricas da classe analisada de acordo com a escala de observação, o algoritmo que apresentou melhores resultados foi o Dinf, este algoritmo também apresentou resultados mais próximos ao dado de Oliveira *et al*., (2012) para o índice morfométrico de Razão perímetro-área (PARA). No entanto, no Índice de forma (SHP), que corresponde à medida de forma de um fragmento comparado a uma forma padrão, neste caso um círculo, pois os dados analisados se encontram no formato vetorial, o algoritmo Demon apresentou valores de mediana mais próximos aos de Oliveira *et al.,* (2012). Todos estes resultados podem ser vistos na figura 23.

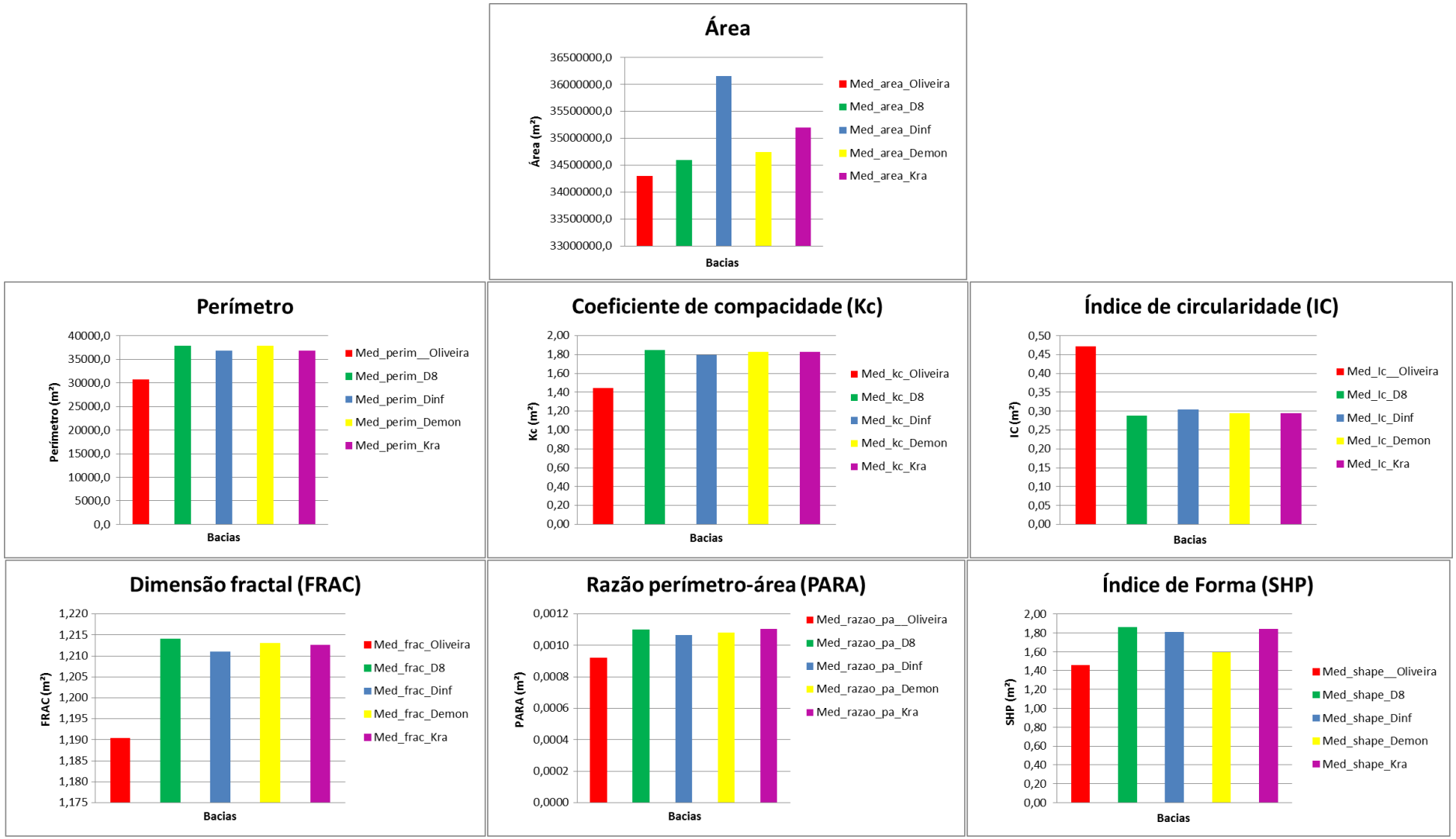


Figura 23 - Tabelas com os valores de mediana gerados em índices morfométricos, estabelecendo um comparativo entre a delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) e as automáticas geradas na metodologia proposta neste trabalho com os algoritmos D8, DInf, Demon e Kra.

4.4.2. Comparativo entre o resultado das bacias delimitadas automaticamente e as elaboradas por Cook et al., (2014)

Foi adotado o mesmo procedimento comparativo entre os dados de Cook *et al.,* (2014) e as delimitações automáticas geradas neste trabalho, calculando a mediana nos índices para cada dado de delimitação. No índice de Área, o algoritmo DInf foi o que mais se aproximou das delimitadas por Cook *et al.,* (2014). Na análise do índice Perímetro (P), novamente o DInf é algoritmo mais próximo ao dado de referência. O mesmo se aplica ao Coeficiente de compacidade (Kc), relação entre o perímetro (P) da bacia de drenagem e a circunferência de um círculo de área equivalente à da bacia, e no índice de circularidade (IC), que relaciona a forma da bacia com a de círculo de perímetro igual, em ambos índices o DInf se aproxima aos valores de mediana da delimitação de Cook *et al.,* (2014). Já no índice Dimensão fractal (FRAC), relação entre o grau de deformação das dimensões das formas geométricas da classe analisada de acordo com a escala de observação, o algoritmo Demon é o que apresenta valores mais próximos aos de referência. No Índice Razão perímetro-área (PARA) o algoritmo Kra é o que mais se aproxima ao dado de Cook *et al.,* (2014). E no Índice de forma (SHP), o DInf é o algoritmo que mais se aproxima ao dado de referência. Estes resultados estão representados nas tabelas presentes na figura 24.

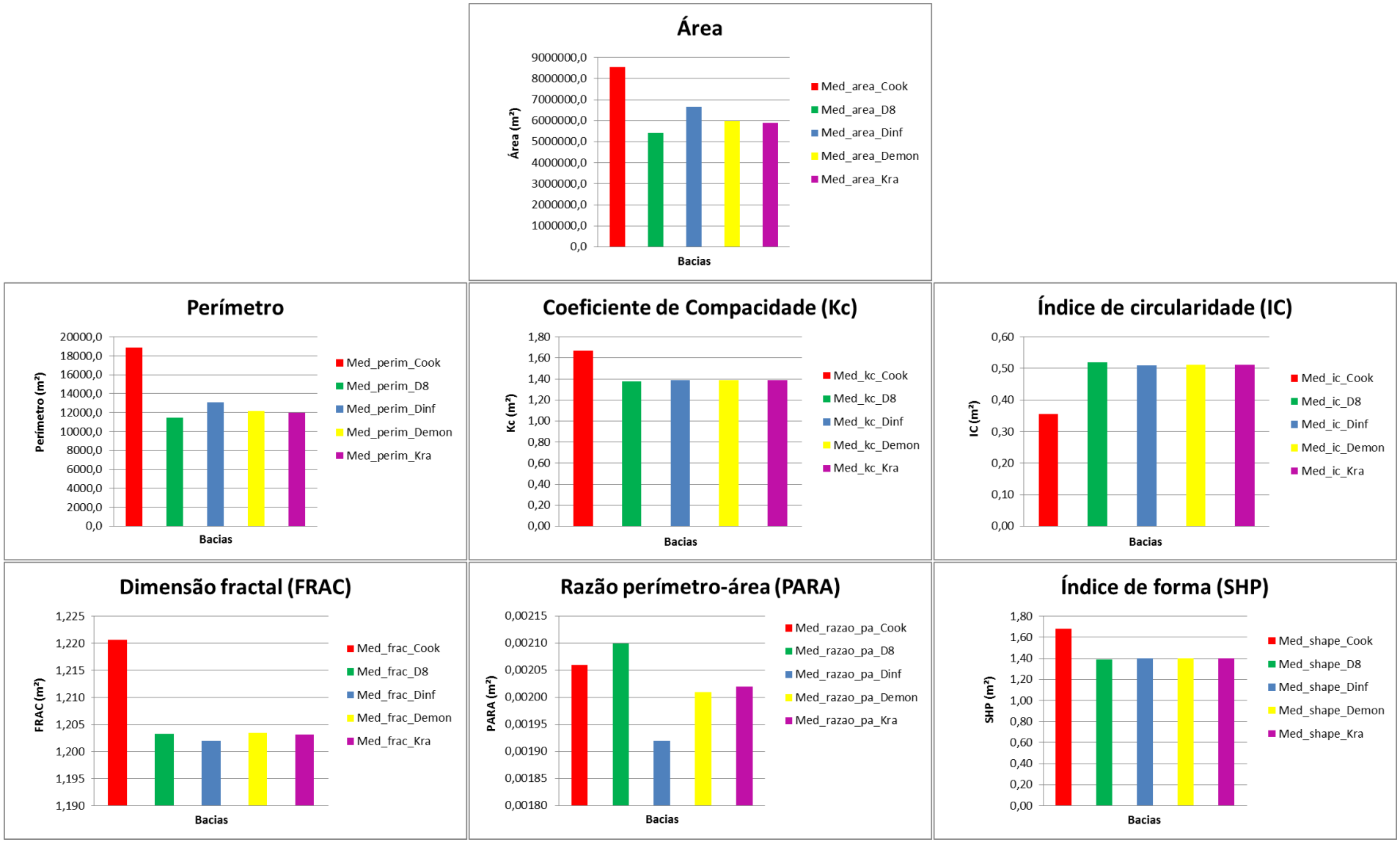


Figura 24 - Tabelas com os valores de mediana gerados em índices morfométricos, estabelecendo um comparativo entre a delimitação de Oliveira *et al.,* (2012) e as automáticas geradas na metodologia proposta neste trabalho com os algoritmos D8, DInf, Demon e Kra.

4.4.3. Resultados do índice estatístico *Kappa* (k)

O índice Kappa (COHEN, 1960) varia entre valores de 0 a 1, quando o valor é igual a 1, há perfeita concordância entre os dados, e valores igual a zero indicam que não existe concordância entre os dados analisados. Este índice foi calculado comparando os dados automáticos gerados pelos algoritmos D8, DInf, Demon e Kra, e os produzidos por Oliveira et al., (2012) e Cook *et al*., (2014) (Tabela 8). O *Kappa* foi calculado de duas maneiras, uma delas matricial, ou seja, transformando os dados para o formato *raster,* e a outra na linha, onde valores 1 correspondem a linha e valores zero fora da linha. Os valores *Kappa* matricial entre as delimitações automáticas pelos algoritmos D8, DInf, Demon e Kra comparados aos dados de Oliveira *et al*., (2012) apresentam em torno de 0,97 de concordância, o que é um bom resultado. Já na linha o resultado não é tão satisfatório, 0,1 em média. Esse valor pode ser justificado pelo ajuste manual feito por análise visual nos dados de Oliveira *et al*., (2012) confirmando que a interpretação e tomada de decisões na análise visual é bastante subjetiva e varia de analista para analista quando se trabalha em um SIG. Já quando o índice *Kappa* foi aplicado nos dados automáticos em comparação aos de Cook *et al.,* (2014) os valores são, em média de 0,98 para matriz e 0,3 nas linhas. Esses baixos valores de concordância no *Kappa* aplicado na linha, em ambos os dados de referência, podem ser justificados também pela escala cartográfica utilizada para correção dos dados no trabalho de Cook *et al.,* (2014), não explicitada em seu trabalho, mas que em comparação aos dados de delimitação gerados neste trabalho e nos de Oliveira et al., (2012) (escala 1:25.000), apresenta menor nível de detalhamento.

Tabela 8 – Índice estatístico *Kappa* (k) aplicado aos dados de delimitação automática pelos algoritmos D8, DInf, Demon e Kra, e os produzidos por Oliveira et al., (2012) e Cook *et al*., (2014)

Oliveira *et al.,* (2012)	*Kappa (k)*	*Kappa (k)*
Algoritmo	**Raster_Raster**	**Linha**
D8	0,972	0,1
DInf	0,972	0,096
Demon	0,972	0,099
Kra	0,973	0,096
Cook *et al.,* (2014)	*Kappa (k)*	*Kappa (k)*
Algoritmo	**Raster_Raster**	**Linha**
D8	0,981	0,384
DInf	0,981	0,362
Demon	0,981	0,319
Kra	0,981	0,318

5. CONCLUSÕES

O MDE APGDEM se mostrou melhor que o RAMP DEM para a área de estudo, pois além de apresentar melhor resolução espacial, possibilitou a geração de redes de drenagem com dados menos superestimados.

O procedimento para a correção de *sinks* e *peaks* no APGDEM foi necessário, pois removeu imperfeições neste dado o que permitiu gerar redes de drenagem mais fiéis ao que se espera da verdade terrestre.

A escolha de limiares para o cálculo da área de captação influencia diretamente na qualidade final da delimitação de bacias, sendo necessário testar diferentes valores de acordo com a área de estudo.

Procedimentos aplicados para a remoção de dados superestimados e algoritmos de suavização se mostraram eficientes para o trabalho.

O algoritmo para extração de rede de drenagem DInf apresentou melhores resultados quando comparado aos dados elaborados por Oliveira *et al.,* (2012) e Cook *et al.,* (2014).

A metodologia automática desenvolvida se mostrou eficaz para a delimitação preliminar de bacias de drenagem glacial da Península Antártica. Embora os dados ainda necessitem de trabalho de edição, a metodologia elaborada poderá servir de base para delimitação preliminar de geleiras de outras regiões do planeta, contribuindo com estudos relativos ao monitoramento da Criosfera.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHLERT, S.; SIMÕES, J. C; O sensoriamento remoto como recurso no estudo da Antártica. In: 4ª JORNADA DE EDUCAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO NO ÂMBITO DO MERCOSUL, 2004, São Leopoldo, RS. **Anais**... São Leopoldo: 2004, 5 p.

AHLERT, S. **Variações morfológicas do campo de gelo da ilha Brabant, Antártica.** Dissertação de Mestrado – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2005. 102 p.

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: **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 2013, Foz do Iguaçu, PR. Anais**... Foz do Iguaçu: 2013, p. 8782–8789.

ANDRADA, R. R.; FREITAS, M. W. D.. Método aplicado em Modelos Digitais de Elevação para a delimitação semiautomática de bacias de drenagem glacial na Península Antártica. In: **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2015, João Pessoa. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, João Pessoa: 2015. p. 6920-6927.

ANDRADE, A, M. **Delimitação de geoambientes na península Potter, Ilha Rei George (Antártica Marítima), utilizando dados COSMO-Skymed e QuickBird.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Porto Alegre, 2013. 153p.

ARIGONY-NETO, J. **Monitoring glacier parameters on the Antarctic Peninsula – a centerline approach combining satellite and GIS data.**Tese de Doutorado – Faculdade de Ciências Ambientais e Florestais, Universidade de Freiburg. 2006. 136p.

ARIGONY-NETO, J.; SAURER, H.; JAÑA, R.; RAU, F.; SIMÕES, J. C.; GOβMANN, H. Monitoring snow parameters on the Antarctic Peninsula using satellite data: a new methodological approach. **EARSeleProceedings**, v.1, n.5, p.100- 110, 2006.

ARIGONY-NETO, J; VOGT, S; SIMÕES, J. C. Snowmelt dynamics of the Antarctic Peninsula as detected by SAR imagery during the austral summer 2006/2007. In: _____. **Simpósio Brasileiro sobre Pesquisa Antártica**, 15, 2007, São Paulo. **Anais…**São Paulo: SP, v. 1, p.62, 2007.

ARIGONY-NETO, J.; RAU, F.; SAURER, H.; JANA, R.; SIMÕES, J. C.; VOGT, S.A time series of SAR data for monitoring changes in boundaries

of glacier zones on Antarctic Peninsula.**Annals of Glaciology**, Cambridge, v.1, n.46, p.55-60, 2007.

ARIGONY-NETO, J. An automatic algorithm for monitoring the melting zone of the Antarctic Peninsula using ASAR WS data. In: _____. **MOCA-09**: Our warming planet, 2009, Montreal. Anais… Montreal: IAMAS-IAPSO-IACS Joint Assembly, v. 1. p. J16.3-J16.3.2009.

ARIGONY-NETO, J., SKVARCA, P., MARINSEK, S., BRAUN, M., HUMBERT, A., MENDES JUNIOR, C. W., JAÑA, R. **Monitoring glacier changes on the Antarctic Peninsula.** In: Jeffrey S. Kargel; Gregory J. Leonard; Michael P. Bishop; Andreas Kääb; Bruce Raup. (Org.). Global Land Ice Measurements from Space. 1ed.Berlin: Springer, p. 717-741, 2014.

BANON, L.C. **Árvores de decisão aplicadas à extração automática de redes de drenagem.** Dissertação - (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013. 87p. Disponível em:<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3FB9RFE>. Acesso em: 1jun, 2014.

BICCA, C.E. **Variações nas geleiras da porção norte da Cordilheira Real durante o período de 1984 a 2010 através do Sensoriamento Remoto.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012. 74p.

BRAUN, M.; RAU, F.; SAURER, H.; GOßMANN, H.. Development of radar glacier zones on the King George Island ice cap, Antarctica, during the austral summer 1996/97 as observed in ERS-2 SAR-data. **Annals of Glaciology**, Cambridge, n.31, p.357-363, 2000.

BRAUN, M. and H. GOSSMANN. Glacial changes in the areas of Admiralty Bay and Potter Cove, King George Island, maritime Antarctica. In Beyer, L. and M. Bölter, eds. **Geoecology of Antarctic ice-free coastal landsdcapes**. Berlin, etc., Springer- Verlag, 75–89, 2002

BRAUN, M.; HUMBERT, A.; MOLL, A. Changes of Wilkins Ice Shelf over the past 15 years and inferences on its stability.**The Criosphere**, Göttingen, n.3, p.41-56, 2009.

BREMER, U. F. **Morfologia e bacias de drenagem da cobertura de gelo da Ilha Rei George, Antártica.** Porto Alegre, UFRGS-CEPSRM, 1998. 119 p. (Dissertação de Mestrado)

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. **2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.**

CHRISTOFOLETTI, **A. Geomorfologia fluvial. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.**

CHWEDORZEWSKA, K. J. Terrestrial Antarctic ecosystems in the changing world: an overview. **Polish Polar Res** 30:263–276, 2009.

COHEN, J. A. Coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v.20, n.1, p.37-46, 1960

COOK, A.J.; FOX, A. J.; VAUGHAN, D. G. & FERRIGNO, J.G. Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. **Science** 308(5721):541–544, 2005.

COOK, A.J.; VAUGHAN, D.G. Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. **The Cryosphere**, v. 4, p.77-98, fev 2010.

COOK, A.J., T. MURRAY, A. LUCKMAN, D. G., VAUGHAN, and N. E. BARRAND. ***A New 100-m Digital Elevation Model of the Antarctic Peninsula Derived from ASTER Global DEM: Methods and Accuracy Assessment***, ***Earth Syst***. Sci. Data, 4, 129-142, doi:10.5194/essd-4-129-2012, 2012.

COOK, A.J. **Spatial and Temporal Changes in Marine-terminating Glaciers on the Antarctic Peninsula since the 1940s**. Tese de Doutorado. Swansea University, 2014.

COOK, A.J., D.G. VAUGHAN, A.J. LUCKMAN and T. MURRAY.***A new Antarctic Peninsula glacier basin inventory and observed area changes since the 1940s***, ***Antarctic Science***, 26(6): p. 614-624, 2014.

COSTA-CABRAL, M.C.; BURGES, S.J. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resources Research**, v. 30, n.6, p. 1681-1692, 1994.

DAVIES, B.J; GOLLEDGE, N.R; GLASSER, N.F; CARRIVICK, J.L; LIGTENBERG, S.RM; BARRAND, N.E; BROEKE M.VD.R; Michael J HAMBREY, M.J; SMELLIE, J.L. Modelled glacier response to centennial temperature and precipitation trends on the Antarctic Peninsula. **Nature Climate Change**, v. 4, n.11, p. 993-998, 2014.

DE ANGELIS, H. & SKVARCA, P. Glacier surge after ice shelf collapse. **Science** 299(5612):1560–1562, 2003.

ERDAS.ERDAS Field Guide.**Intergraph Corporation**. ***2013. Disponível em:<http://www.hexagongeospatial.com/Libraries/Misc_Docs/ERDAS_FieldGuide_PDF_Intergraph_brand.sflb.ashx>. Acesso em: 15 jun 2014.***

.

ESRI: Enviromental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop help. Redlands***, 2012. Disponível em: http://resources.arcgis.com/en/home/* **Acesso: 10/01/2014.**

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P. Drainage networks from grid digital elevation models. **WaterResourcesResearch**, v. 27, n. 5, p.709-717, 1991.

FERNANDÉZ, D.C.J. **Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. 92p. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39K8BSL>. Acesso em: 1jun, 2014.

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-22, 1991.

FORMAN, R.T.T; GODRON, M. **Landscape Ecology**. Nova York, John Wilwy e Sons. 619p, 1986.

GLIMS. 2013. **Global Land Ice Measurement from Space.**Disponível em: http://www.glims.org. Acesso em 20 jun, 2014.

GÖBEL, C.F. **Estimativa do Balanço de Massa da porção norte da Península Antártica pelo uso de imagens do sensor ASTER**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Química, Física e Geológica) – Programa de pós-graduação em Oceanografia Química, Física e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande.2012.135 p.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D. P. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 2, p. 97-112, maio.2004.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysicalaproach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Washington, v. 56, n. 1, p. 275-370, 1945.

IPCC. Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. **Cambridge University Press**, Cambdrige, 996 p. 2007.

JAÑA, R. **Digital Elevation Models and Delineation of Antarctic Glaciers Using Stereo Capabilities of ASTER Satellite Images.**[S.l.]: Albert-Ludwigs-Universität, 2006.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento remote do ambiente:** uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009. 598p.

JENSON, S.K. and J.O. DOMINGUE. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **PhotogrammetricEngineeringand Remote Sensing**. 54(11):1593-1600, 1988.

JESUS, N de. **Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica de bacias hidrográficas.** Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. 2009. 162 p.

JEZEK, K.C. Glaciological properties of the Antarctic ice sheet from RADARSAT-1 synthetic aperture radar imagery.**Annals of Glaciology** 29:286-290, 1999.

KASS, M. et. al. Snakes active contour models. **International Journal of Computer Vision**, 1, 321-33, 1988.

KUNZ, M.; KING, M.A.; MILLS, J.P.; MILLER, P.E.; FOX, A.J.; VAUGHAN, D.G. &MARSH, S.H. 2012. Multi-decadal glacier surface lowering in the Antarctic Peninsula.**Geophysical Research Letters**, 39, 10.1029/ 2012GL052823, 2012

LANG, S.; BLASCHKE, T. **Análise da paisagem com SIG.** Tradução: Hermann Kux, São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

LEA, N.L., An Aspect driven kinematic routing algorithm. In: Parsons, A. J.; Abra- hams, A. D.; **Overland flow**: hydraulics and erosion mechanics. London: Chapman &Hall, 1992.

LI, L.; WANG, J.; HAO, Z.C. Appropriate contributing area threshold of a digital river network extracted from DEM for hydrological simulation. Hydrological Research in China: Process Studies, Modelling Approaches and Applications (**Proceedings of Chinese PUB International Symposium**, Beijing, September 2006). IAHS Publ. 322, 2008.

LIU, H.; WANG, L.; JEZEK, K. C. Automated delineation of dry and melt snow zones in Antarctica using active and passive microwave observation from space. **IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 44, n. 8, p. 2152-5163, 2006.

LIU, H., K. JEZEK, B. LI, and Z. ZHAO.**Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2.Boulder**, Colorado USA: NationalSnowand Ice Data Center. Digital media, 2001..

MENDES JR., Cláudio Wilson. **Monitoramento da zona superficial de neve úmida da Península Antártica pelo uso de dados dos sensores SSMR e SSM/I.** Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2011. 148p.

MENZIES, J. **Modern Glacial Environments: Processes, Dynamics and Sediments.** Oxford, Butterworth-Heinemann Ltd, 621 p. 1995

MOORE, I.D, R.B. GRAYSON, and A.R. LADSON. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. **Hydrologic Processes.** 5(1):3-30, 1991.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 1.ed. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

MORRIS, E.M.; VAUGHAN, D.G. 2003*.* Spatial and temporal variation of surface temperature on the Antarctic Peninsula and the limit of variability of ice shelves.In: DOMACK, E. LEVENTER, A.; BURNETT, A.; BINDSCHALLER, R.; CONVEY, P.; KIRBY, M. (Ed.). **Antarctic Peninsula climate variability historical and paleoenvironmental perspectives**. Washington: American Geophysical Research, 2003. p.61-68.

MÜLLER, V.C. **A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristic in the Clinch Mountain Area**. New York: Virginia and Tennesse. Dept. of Geology. n. 3, p. 30, 1953.

MULVANEY, R., ABRAM, N.J., HINDMARSH, R.C.A., ARROWSMITH, C., FLEET, L., TRIEST, J., SIME, L.C., ALEMANY,O.& FOORD, S. Recent Antarctic Peninsula warming relative to Holocene climate and ice-shelf history.**Nature**, 489, 141–204, 2012.

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, GraphicsandImageProcessing**, v.28, n.3, p.328- 344, 1984.

OLIVEIRA, J. A. DE et al. Desenvolvimento de um método semi-automático para o inventário de geleiras da Peninsula Antártica. In: Resumos do APECS BRASIL, 2012, Rio Grande, RS. **Anais...** Rio Grande: 2012. ***Disponivel em: http://apecs-brasil-iiworkshop.blogspot.com.br/***

.

PAUL, F.; BARRY, R.G.; COGLEY, J.G.; FREY, H.; HAEBERLI, W.; OHMURA, A.; OMMANNEY, C.S.L.; RAUP, B.; RIVERA, A.; ZEMP, M. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. **Annals of Glaciology**, p. 119-126, 2009.

PRITCHARD, H. D. & VAUGHAN, D. G. Widespread acceleration of tidewater glaciers on the Antarctic Peninsula. J **Geophys Res** 112:F03S29. doi:10.1029/2006JF000597, 2007.

PETSCH, C. **Sensoriamento Remoto da calota de gelo da Ilha Renaud – Antártica.**Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, 2014. 114p.

PONZONI, F. J.;ALMEIDA, E. S. A estimativa do parâmetro kappa (k) da análise multivariada discreta no contexto de um SIG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. **Anais**... São José dos Campos: INPE, 1996. Artigos, p. 729-733. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00014-5. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.05.09.39/doc/T130.pdf> Acesso: 26 jun, 2014.

PONZONI, F. J.;REZENDE, A. C. P. Influência da resolução espacial de imagens orbitais na identificação de elementos da paisagem em Altamira-PA. **RevistaÁrvore**, Viçosa, v. 26, n. 4, p.403-410, 2002.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O.The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models.**Hydrological Processes**, v. 5, p 59-79. 1991.

RACK, W. & ROTT, H. Pattern of retreat and disintegration of Larsen B Ice Shelf, Antarctic Peninsula.**Ann Glaciol**39:505–510, 2004.

RAU F.; BRAUM, M.; FRIEDRICH, F.; WEBER, F.; GOβMANN, H. Radar glacier zones and its boundaries as indicators of glacier mass balance and climatic variability. **EARSeLeProceedings**, v.1, n.1, p.317-27, 2001.

RAU F. The upward shift of the dry snow line on the northern Antarctic Peninsula.**EARSeL e Proceedings** 2 (1), 113-121, 2003.

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. **AnnalsofGlaciology**, Cambridge, n.39, p.525-530, 2004.

RIBEIRO, R.R. **Determinação das variações das geleiras da Cordilheira TresCruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos.**Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007. 106 p.

RIDLEY, J. Surface melting on Antarctic Peninsula ice shelves detected by passive microwave sensors, **Geophysical Research Letters**, Washington, v.23, n.20, p.2639-2642, 1993.

RIGNOT, E.; CASASSA, G.; GOGINENI, P.; KRABILL, W. RIVERA, A. & THOMAS, R. H. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B ice shelf. **Geophys ResLett** 31(18):L18401. doi:10.1029/2004GL020697, 2004.

RIGNOT, E.; BAMBER, J. L.; BROEKE, M. R. VAN DEN; et al.Recent Antarctic ice mass loss from radar interferometry and regional climate modelling.**Nature Geosci,** v. 1, n. 2, p. 106-110, fev 2008.

ROTT, H.; RACK, W.; NAGLER, T. & SKVARCA, P. Climatically induced retreat and collapse of northern Larsen Ice Shelf, Antarctic Peninsula. ***Ann Glaciol 27:86–92, 1998.***

SANTOS, A.R; PELUZIO, T.M.O; SAITO, N.S. **SPRING 5.1.2: passo a passo: aplicações práticas.** Alegre, ES: CAUFES, 2010. Disponível em <http://www.mundogeomatica.com.br/Livros/Livro_Spring_5.1.2_Aplicacoes_Praticas/Livro_SPRING_512_PassoaPasso_Aplica%C3%A7%C3%A3o_Pr%C3%A1tica.pdf>. Acesso: 15 jun2014.

SCAMBOS, T.A.; BOHLANDER, J.; SHUMAN, C.; SKVARCA, P. Glacier acceleration and thinner after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica, **Geophysical Research Letters**,Washington, v.31, doi:10.1029/2004GL020670. 2004.

SCAMBOS T.A.; HULBE, C.; FAHNESTOCK, M.; BOHLANDERT J. The link between climate warming and break-up of ice shelves in the Antarctic Peninsula. ***Journal of Glaciology, Cambridge, v.154, n.46, p.516-530, 2000.***

SCAMBOS, T. A.; BERTHIER, E.; HARAN, T.; SCHUMAN, C. A.; COOK, A. J.; LIGTENBERG, S. R M; BOHLANDER, J. Detailed ice loss pattern in the northern Antarctic Peninsula : Widespread decline driven by ice front retreats. **The Cryosphere**, volume 8, issue 6, pp. 2135 – 2145, 2014

SCHUMM, S.A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey.**Bulletin of the geological Society of América**, v. 67, n.5, p. 597-646, 1956.

SILVA. A.B da.**Variações na velocidade de fluxo de geleiras de maré da Península Antártica entre os períodos de 1988-91 e 2000-03.** Dissertação (Mestrado em Oceanografia Química, Física e Geológica) – Programa de pós-graduação em Oceanografia Química, Física e Geológica, Universidade Federal do Rio Grande. 2012. 84 p.

SIMÕES, J.C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, Rio de Janeiro, n. 4, p.119 – 154, 2004.

SKVARCA, P.; RACK, W.; ROTT, H.; IBARZÁBAL & DONÁNGELO, T. Climatictrendandtheretreatanddisintegrationof ice shelvesontheAntarcticPeninsula. **Polar Res** 18(2):151–157, 1999.

STEIG, E.J.; SCHNEIDER, D.P.; RUTHERFORD, S.D.; MANN, M.E.; COMISO, J.C & SHINDELL, D.T. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. **Nature**, 457, 459–464. Corrigendum: Nature, 460, 766, 2009.

STRAHLER, A. &STRAHLER, A. 2003.**Introduction to Physical Geography**.Wiley and Sons, Chichester, 683p, 2005.

SULSOFT.**AsterDTM v2.2** - Installation & User's Guide. 2004.

TARBOTON, D. G. **The analysis of river basins and channel networks using digital terrain data.** 1989, Sc.D. Thesis, Department of Civil Engineering, M.I.T., Cambridge, MA, (Also available as Tarboton D. G., R. L. Bras and I. Rodriguez-Iturbe, (Same title), Technical report no 326, Ralph M. Parsons Laboratory for Water resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, M.I.T., September 1989).

TARBOTON, D. G., R. L. Bras, and I. Rodriguez-Iturbe.On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrological Processes.** 5: 81–100, 1991.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and contri- buting areas in grid digital elevation models.**WaterResourcesResearch,** v. 33, n.2, p. 309-319. 1997

TEODORO, V. L. I. ; TEXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **RevistaUniara**, n.20, 2007.

TORINESI, O.; FILY, M.; GENTHON, C. Interannual variability and trend of the Antarctic Ice Sheet summer melting period from 20 years of spaceborne**Arctic, Antarctic and Alpine Research**, Boulder,v.1, n.38, p.147-152, 2003.

TRIBE, A. Towards the automated recognition of landforms (valley heads) from digital elevation models. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HAN- DLING, 4., 1990, Zurich, Switzerland. **Proceedings**…, Zurich, Switzerland, 1990, p.45-52

TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: A review and a new method. **Journal of Hydrology**, 139: 263-293, 1992

TURNER, J; COLWELL, S.R.; MARSHALL, G.J.; LACHLAN-COPE, T.A.; CARLETON, A.M.; JONES, P.D.; LAGUN, V; REID, P.A.; IAGOVKINA, SVETLANA. Antarctic climate change during the last 50 years.International, **Journal of Climatology**, 25 (3).279-294, 2005

TURNER, J; MAKSYM, T.; PHILLIPS, T.; MARSHALL, G. J. and MEREDITH, M. P. The impact of changes in sea ice advance on the large winter warming on the western Antarctic Peninsula. **Int. J. Climatol**., 33: 852–861. doi: 10.1002/joc.3474, 2013

VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE-15318-RPE/818). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24>. ***Acesso em 10 jun 2014.***

WGMS. Global Glacier Changes: Facts and Figures. ed. Zemp, M., I. Roer, A. Ka¨a¨b, M. Hoelzle, F. Paul and W. Haeberli. United Nations Environment Programme, **World Glacier Monitoring Service**, Zürich. 2008.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.WGMS. **Global Glacier Changes: Facts and Figures**. ed. ZEMP, M.; I. ROER, I.; KÄÄB, A.; HOELZLE, M.; PAUL, F.; HAEBERLI, W. United Nations Environment Programme, World Glacier Monitoring Service, Zürich, 2008.

ZENG, Q., CAO, M. FENG, X. LIANG, F. CHEN, X E SHENG, W. A study of spectral reflection characteristics for snow, ice and water in the north of China, in **Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission: Proceedings of the Hamburg Symposium**, IAHS Publ. 145, 451–462, 1984.

ZWALLY, H.J.; FIEGLES, S. Extent and duration of Antarctic surface melting, **Journal of Glaciology**, Cambridge, v.136, n.40, p.463-476, 1994.