

**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL**

**APLICAÇÃO DO ASTER-GDEM V.2 E SIG NA ANÁLISE  
DAS ALTERAÇÕES NAS BACIAS DE DRENAGENS  
NO MONTE MELIMOYU (44 ° 5'S - 72 ° 51'W) - CHILE**

**FILIFE DAROS IDALINO**

**PORTO ALEGRE, 2016**

**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL**

**APLICAÇÃO DO ASTER-GDEM V.2 E SIG NA ANÁLISE  
DAS ALTERAÇÕES NAS BACIAS DE DRENAGENS  
NO MONTE MELIMOYU (44 ° 5'S - 72 ° 51'W) - CHILE**

**FILIPPE DAROS IDALINO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO  
DE CURSO, APRESENTADO  
COMO REQUISITO PARA A  
CONCLUSÃO DO CURSO DE  
BACHARELADO EM GEOGRAFIA.**

**ORIENTADORA:**

**PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. KÁTIA KELLEM DA ROSA**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer**

**Doutoranda: Ana Maria Sanches Dorneles Ferreira de Oliveira**

**PORTO ALEGRE, 2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à minha família e em especial à minha mãe Lourdes Morgerot Daros e meu pai Admilcio do Nascimento Idalino, pelo apoio desde o início da graduação e mesmo a distância nunca ter deixado faltar carinho e dedicação.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kátia Kellem da Rosa pela maravilhosa orientação digna de uma grande professora e a sua atenção e dedicação sem igual para com seu orientado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao CPC - Centro Polar e Climático da UFRGS, pelo apoio tecnológico e espaço disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus tio e tia Paulo Roberto Corrêa da Silva e Denilde do Nascimento Idalino pelo apoio ao ceder um espaço em sua residência, estando sempre próximos e me auxiliando nos momentos de necessidades e me incentivando sempre que preciso.

À CEUPA - Casa do Estudante Universitário de Porto Alegre pela disponibilização da vaga de moradia, sem a qual não conseguiria concluir a graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de estudar gratuitamente em uma universidade de ponta com professores de alto nível e ao povo brasileiro responsável pela manutenção desta instituição vital.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo identificar e analisar as alterações nas bacias de drenagem glaciais do Monte Melimoyu - 44 ° 5'S - 72 ° 51'W - no período entre 1970 e 2016. Neste estudo foram gerados dados e mapeamentos com o método de delineamento manual por classificação visual da dinâmica glacial e características morfométricas como declividade, hipsometria e orientação de fluxo, utilizando técnicas em SIG com uma imagem Landsat 8 (2016), dados do GLIMS e o Modelo Digital de Elevação ASTER-GDEM v.2. Os resultados indicaram a tendência contínua do processo de retração das geleiras no período de 1970 e 2016 em resposta às mudanças climáticas. Os resultados possibilitaram identificar diferenças no padrão de retração entre as geleiras e encontrar possíveis relações com as características de elevação máxima e mínima (elevação da linha de frente das geleiras), declividade, área total e direção de fluxo predominante. Estes parâmetros podem explicar as diferenças de sensibilidade de algumas geleiras à tendência anual ao aumento da temperatura média superficial do ar e variação da precipitação anual registrada por outros estudos para a região nas últimas décadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Morfometria; Sensoriamento Remoto, Patagônia Chilena; Sistemas de Informações Geográficas; Glaciologia.

## ABSTRACT

This work aims to identify and analyze changes in the glacial drainage basins of Monte Melimoyu - 44 ° 5'S - 72 ° 51'W - between 1970 and 2016. For this study, data and mappings were generated with the method of manual delineation by visual classification of glacial dynamics and morphometric characteristics such as slope, hypsometry and flow orientation, were generated using GIS techniques through Landsat 8 (2016) image, GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) data and Digital Elevation Model ASTER-GDEM v.2. The results indicated a glacier retreat tendency of 1970 and 2016 in response of climatic changes. The results provided conditions for identify differences between glacier retreat patterns and related with hypsometric (maximum and outline elevation), surface slope, total area and ice flow direction characteristics. These parameters can be influencing the glacier sensitivities (for some glaciers) to changes in annual air temperature and precipitation range detected by others studies for region in the last decades.

**Keywords:** Morphometry; Remote Sensing; Chilean Patagonia; Geographic Information Systems - GIS; Glaciology.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	OBJETIVO GERAL .....	10
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
1.2	JUSTIFICATIVA .....	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
2.1	DINÂMICA DAS GELEIRAS.....	12
2.2	ÁREA DE ESTUDO .....	15
2.3	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E TÉCNICAS DE SIG NA GLACIOLOGIA.....	18
2.3.1	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO ASTER-GDEM PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS BACIAS DE DRENAGENS GLACIAIS .....	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
3.1	DADOS.....	22
3.2	ETAPAS METODOLÓGICAS .....	24
3.2.1	CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA.....	24
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA GLACIAL DA ÁREA DE ESTUDO .....	24
3.2.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS E MORFOLÓGICAS NA DINÂMICA DE RETRAÇÃO GLACIAL NAS ÚLTIMAS DÉCADAS.....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>26</b>
4.1	FISIOGRAFIA DAS BACIAS DE DRENAGEM DO MONTE MELIMOYU.....	26
4.2	VARIAÇÃO DE ÁREA DAS BACIAS DE DRENAGEM NO MONTE MELIMOYU .....	30
4.3	RELAÇÕES DAS TAXAS DE RETRAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS ..	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>37</b>
	Referências .....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Monte Melimoyu. ....	16
Figura 2. Mapa Hipsométrico do Monte Melimoyu. ....	26
Figura 3. Mapa de Declividade do Monte Melimoyu.....	28
Figura 4. Mapa de Aspecto do Monte Melimoyu. ....	30
Figura 5. Mapa de variação das linhas de frente.....	31
Figura 6. Mapa de retração de geleiras por períodos analisados.....	32
Figura 7. Mapa de Retração de geleiras da área de estudo.....	32
Figura 8. Gráfico da perda de área total em km <sup>2</sup> .....	33
Figura 9. Gráfico de elevação da linha de frente.....	36

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Principais dados utilizados neste trabalho.....	22
Tabela 2. Informações do dado ASTER-GDEM v.2 (2011).....	23
Tabela 3. informações do dado Landsat 8 OLI TIRS (2016) .....	23
Tabela 4. Elevação mínima, máxima e média do Monte Melimoyu .....	27
Tabela 5. Declividade do Monte Melimoyu por Bacias de Drenagem.....	28
Tabela 6. Relação de perda de área e taxa de retração .....	33

# 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da diminuição de área das Bacias de Drenagens (BD) glaciais é importante para estudos sobre as mudanças climáticas e a geração de cenários diante a projeção de tendência de aumento da temperatura média superficial do ar para as próximas décadas. O estudo de sistemas de drenagens glaciais é fundamental para a compreensão de várias questões que envolvem a glaciologia, incluindo a detecção de mudanças na dinâmica glacial (HUBBARD *et al.*, 1998).

As altas latitudes e altas altitudes favorecem a glaciação principalmente devido às baixas taxas de ablação. Em áreas montanhosas as geleiras são, com frequência, resultado da alta acumulação, frequentemente induzida pela orografia, e da baixa taxa de ablação, a qual diminui com a altitude (LEPPÄRANTA & GRANBERG, 2010). As geleiras respondem às mudanças climáticas inerente às questões de balanço de energia. A diferenciação entre esses fatores é fundamental para a correta interpretação das alterações glaciais do passado e para a atribuição correta de mudanças atuais (ROE, 2011).

Pesquisas glaciológicas indicam que geleiras na maior parte das áreas do mundo estão retraindo (BARRY, 2006; GARDNER *et al.*, 2013). Esforços têm sido realizados por cientistas no inventário, monitoramento e entendimento do estado atual das massas de gelo, sua distribuição e volume, interações com o clima, sensibilidade a mudanças climáticas, influência de diferentes fatores na sensibilidade das geleiras a estas mudanças ambientais, assim como na investigação do impacto das mudanças das geleiras nos recursos hídricos, riscos naturais e flutuações do nível dos mares (MEIER 1984; DYURGEROV & MEIER 2000; HAEBERLI *et al.*, 2000; KASER 2001; ARENDT *et al.*, 2002; HUGGEL *et al.*, 2002; MEIER *et al.*, 2003; BISHOP *et al.*, 2004; KARGEL *et al.*, 2005; CASASSA *et al.*, 2007; ROCHA, 2014).

Na região Chilena e Argentina dos Andes tem sido evidenciadas mudanças nas geleiras, como balanço negativo de massa, com a retração glacial e diminuição de volume (RIGNOT *et al.*, 2003; COUDRAIN *et al.*, 2005; FRANCOU *et al.*, 2005; CASSASSA *et al.*, 2007; MAGRIN *et al.*, 2007; RABATEI *et al.*, 2013; IPCC, 2013).

Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem ser utilizados como base para a interpretação e caracterização destes ambientes (RIGNOT *et al.*, 2003). Diversos estudos têm aplicado dados ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission And Reflection Radiometer*) GDEM (*Global Digital Elevation Model*) e Imagens orbitais multiespectrais com técnicas em SIG (Sistemas de Informações Geográficas) para analisar mudanças em ambientes glaciais.

As BD glaciais seguem uma determinada rede de escoamento, sendo formada pelos níveis de acumulação de neve e seu fluxo de gelo é direcionado pelas oscilações na topografia do terreno (ANDRADA, 2015). A aplicação de técnicas de SIG para a extração de informações morfométricas de BD glaciais, a partir de Modelos Digitais de Elevação, permite avaliar os condicionantes naturais que influenciam nas taxas de retração das BD glaciais e realizar comparativos das mudanças recentes apresentadas com as características topoclimáticas e ambientais.

É importante desenvolver estudos com a aplicação do MDE, como o ASTER-GDEM v.2, com as técnicas de SIG, para compreender a morfologia e morfometria das bacias de drenagens glaciais, assim como o processo de retração glacial.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

Analisar a morfometria e as alterações nas bacias de drenagens no Monte Melimoyu, na parte sul da Cordilheira dos Andes de acordo com a aplicação do modelo digital de elevação ASTER-GDEM v.2 e técnicas em SIG.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a) Caracterizar a hipsometria, declividade, e direção de fluxo das bacias de drenagens da área de estudo;
- b) Analisar as flutuações frontais das geleiras da área de estudo e relacionar às características topográficas e morfométricas.
- c) Gerar um banco de dados em SIG com informações atualizadas da dinâmica glacial e características morfométricas;
- d) Avaliar a utilização da metodologia proposta para fins de análise das bacias de drenagens glaciais;

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

O desenvolvimento, aprimoramento e avaliação de técnicas de SIG para extração de dados espaciais na caracterização da dinâmica de BD glaciais, como no Monte Melimoyu, é importante para o monitoramento e entendimento das recentes mudanças nestes ambientes.

Existe uma necessidade de atualização de dados de monitoramento glaciológico existentes para a área de estudo e uma maior caracterização destas bacias de drenagens, para dar suporte a análises sobre o entendimento das diferentes respostas

destas às mudanças ambientais regionais observadas. Andrada e Freitas (2015) denotam a importância da atualização dos dados com uso de metodologias avaliadas, por apresentarem a aplicação de técnicas de SIG que facilitam o processo de análise da paisagem glacial.

A região norte da Patagônia Chilena é composta por um sistema natural da cadeia montanhosa dos Andes. A região localizada no lado Oeste da cordilheira, em contato direto com o oceano pacífico sul, apresenta altos índices de precipitação e um sistema natural de fiordes. Devido à grande variação topográfica e de altimetria do relevo este estudo científico teve como necessidade utilizar um MDE como base para geração de dados cartográficos.

Pesquisas glaciológicas indicam que geleiras na região dos Andes estão retraindo, como, por exemplo, as pequenas bacias de drenagens glaciais da cordilheira dos Andes possuem cenários de desaparecer nos próximos anos (CASASSA *et al.*, 2007). As retrações das BD da área de estudo possuem consequências direta na disponibilidade de recursos hídricos na região. Mais de 80% do fornecimento de água potável das populações provem de geleiras de montanha (MESSERLI, 2001; VUILLE *et al.*, 2008).

O monitoramento de diminuição de área das BD na região sul da Cordilheira dos Andes é importante para estudos sobre as consequências das mudanças climáticas e para a geração de cenários futuros diante da projeção de tendência a aumento da temperatura média superficial do ar para as próximas décadas. Desta forma, as BD do Monte Melimoyu foram escolhidas como área de estudo por se observar a inexistência de dados morfométricos e de retração atualizados os quais podem auxiliar na ampliação do entendimento da dinâmica glacial da área de estudo. Muito pouco se sabe sobre como essas mudanças em massas de gelo estão ligados às mudanças no clima (SCHAEFER *et al.*, 2013).

Estudos demonstram que existem mudanças sensíveis observadas nas geleiras da Cordilheira, os quais sugerem a importância de se inventariar e monitorar essas áreas sistematicamente para que se obtenha o máximo de informações atuais e pretéritas, bem como suas consequências sobre o ciclo hidrológico, tendo em vista o papel dinâmico da Criósfera. As geleiras Andinas, como na região Patagônica, estão retrocedendo, podendo comprometer a disponibilidade de água e contribuir para a elevação média do nível do mar (RIGNOT *et al.*, 2003).

RIBEIRO (2014) aplicou técnicas de Sensoriamento Remoto para investigar as variações de frentes de geleiras nas regiões tropicais dos Andes bolivianos nas últimas décadas. A metodologia foi avaliada positivamente pelo autor com base nos resultados,

correlacionando à retração de geleiras andinas em resposta às tendências de aquecimento das temperaturas globais, também fazendo menção a relação do comportamento dos corpos de gelo com o aumento da temperatura ar e da altitude da isoterma anual de 0°C.

Com a elevação da temperatura já registrada na América do Sul em um século, ante a média mundial de 0,74°C, as geleiras Andinas, como na região Patagônica, estão retrocedendo, podendo comprometer a disponibilidade de água e contribuir para a elevação média do nível do mar (RIGNOT *et al.*, 2003; COUDRAIN *et al.*, 2005; FRANCOU *et al.*, 2005; CASSASSA *et al.*, 2007; MAGRIN *et al.*, 2007; RABATEL *et al.*, 2013). As geleiras nos Andes diminuíram em até 50% desde a década de 1970, e algumas desapareceram por completo (IPCC, 2013). FRANCOU *et al.* (2003) destaca que muitas geleiras andinas podem desaparecer no Século XXI. No entanto, verifica-se que muitas geleiras têm estado em posição estável devido ao regime de precipitação (IPCC, 2013).

O Sensoriamento Remoto fornece dados importantes para a determinação e quantificação de mudança da paisagem glacial. Dada a extensão geográfica de muitas geleiras e dificuldades de acesso, observações e a detecção remota pode oferecer uma visão de áreas que não têm ou não podem ser acessadas, possibilitando caracterizar adequadamente as geleiras (USGS, 2015). Ao mesmo tempo, o Sensoriamento Remoto pode contribuir para o entendimento da dinâmica dos ambientes e como os ambientes estão refletindo a variabilidade de parâmetros climáticos.

A aplicação das técnicas de SIG como a manipulação e cruzamento integrado de dados gerados por estudos da Criosfera, análise de dados espaciais e manipulação de modelos digitais de elevação gratuitos podem possibilitar o contínuo monitoramento destes ambientes e disponibilização de informações em redes e *WebSites*. Tais aplicações são relevantes para avaliar com as diferentes características topoclimáticas e morfoclimáticas (diferenças de elevação da frente, orientação de fluxo, declividade) e ambientais podem influenciar nas diferenças de padrão de retração de BD no monte Melimoyu - 44 ° 5'S - 72 ° 51'W.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 DINÂMICA DAS GELEIRAS**

Geleira caracteriza-se por ser uma massa de neve e gelo que se move continuamente por fluência e muitas vezes por deslizamento basal, de um ponto mais

alto para outro mais baixo topograficamente. Podem ser classificadas como mantos de gelo, plataformas de gelo, calota de gelo, geleiras de *piemonte* e diversos tipos de geleiras de montanha, como geleiras de vale e geleiras de anfiteatro (SIMÕES, 2004).

Segundo o Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos, de SIMÕES (2004), os tipos de geleiras são constituídos pelas seguintes características:

- Campo de gelo é uma geleira que cobre uma área extensa, com superfície plana ou ondulada. A cobertura de gelo não é espessa o suficiente para cobrir montanhas ou formar uma calota, a morfologia superficial é fortemente controlada pelo embasamento. Geralmente, os campos de gelo são escoados por geleiras de descarga, que fluem através de brechas e passagens entre montanhas.
- Dentro da classe de geleiras de montanha, sendo qualquer geleira que flui entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial, temos os dois principais tipos:
  1. A geleira de anfiteatro é uma geleira que ocupa uma reentrância, arredondada e individualizada, em um lado de uma montanha, escavando-a profundamente. No momento que a geleira de anfiteatro flui além da sua reentrância, forma uma geleira de vale.
  2. A geleira de vale é uma geleira que é confinada entre as paredes de um vale e termina em uma língua estreita e várias destas podem convergir, formando um fluxo principal, ou seja, uma geleira de vale composta (geleira com vários fluxos tributários), onde as morainas indicam os limites de cada unidade;

A frente da geleira corresponde ao limite inferior da mesma, que pode ser de dois tipos: de maré, quando uma geleira termina no mar; de descarga, quando uma geleira drena um manto ou calota de gelo situada no interior e flui através de um desfiladeiro entre as montanhas periféricas; e frente em terra, quando uma geleira termina em terra emersa (SIMÕES, 2004).

Quanto à classificação térmica das geleiras, baseadas nas características termais na base da geleira (interface gelo-rocha) podem ser de base fria, onde a base está com temperatura sempre a baixo do ponto de fusão, ou de base úmida, onde a temperatura na base se encontra no ponto de fusão (SIMÕES, 2004).

As geleiras se formam onde o balanço de neve ou gelo é sempre positivo, quando os índices de acumulação anual são maiores do que os de ablação. Segundo SIMÕES (2004), a acumulação corresponde a todos os processos pelo qual a neve e gelo e a

água são adicionados a uma geleira, gelo flutuante ou a uma cobertura de neve sazonal. Este processo está ligado diretamente a precipitação direta de neve, gelo ou chuva. A ablação corresponde a todos os processos pelo qual a neve, o gelo ou a água são perdidos por uma geleira e inclui derretimento, evaporação, desprendimento, entre outros processos. Os índices de acumulação são usados para expressar a quantidade de gelo adicionada e sua área corresponde à parte mais elevada de uma geleira, onde anualmente ocorre ganho de massa. Já os índices de ablação são usados para expressar a quantidade de massa perdida.

A dinâmica entre a acumulação e ablação vai depender, sobretudo, dos aspectos físicos do ambiente, suas características morfométricas e a intensidade em que os eventos atmosféricos acontecem. A diferença entre a acumulação e a ablação em um determinado período é conhecida como Balanço de Massa, podendo ser positivo (quando os processos de acumulação são maiores que os de ablação) ou negativo (quando os processos de ablação são maiores que os de acumulação). Valores negativos de balanço de massa ocorrem com a retração, expressada pela diminuição nas dimensões lineares de uma geleira (RIVERA *et al.*, 2008).

Devido à variabilidade da extensão da capa de neve, pode-se utilizar a ALN (Altitude Limite da Neve) como um indicador mais preciso de tempo em lugar da área da geleira. No Equador, a variabilidade interanual do balanço de massa é controlada pelas variações anuais da temperatura do ar e a taxa média de ablação é substancialmente constante ao longo do ano em escalas de tempo estacionais (VEETTIL *et al.*, 2016).

A presença de atividade vulcânica, além da precipitação e tendência de aumento de temperatura média superficial do ar são fatores que influenciam na dinâmica de avanço e retração glacial (ANIYA *et al.*, 1997; WARREN & ANIYA, 1999; RIVERA *et al.*, 2008).

A atividade vulcânica no sul dos Andes chilenos é importante para explicar o comportamento das geleiras (área total de quase 500 km<sup>2</sup>), distribuídas nos topos e flancos dos 26 vulcões ativos localizados entre 36° e 37° S (RIVERA & BOWN, 2013). Salamantin *et al.* (2000) indicaram que em geleiras no topo de vulcões, 25% da perda de massa pode ser explicado pela atividade geotérmica. A atividade vulcânica tem influência por uma combinação de fatores, tais como a alteração de fluxo devido a terremotos e também com o aumento da temperatura geotérmica na base da geleira, o que induzir um maior deslizamento basal e deposição de cinzas no topo da geleira modificando o albedo da superfície (RIVERA *et al.*, 2012).

## 2.2 ÁREA DE ESTUDO

As BD glaciais no monte Melimoyu (Figura 01), escolhidas como área de estudo, estão localizadas na parte norte da Patagônia chilena. A área está situada na XI região administrativa do Chile, região de Aysén (América do Sul). A região é caracterizada por uma paisagem complexa com muitos fiordes e lagos que foram formados por erosão laminar glacial do manto de gelo da Patagônia durante o Quaternário. A Cordillera Patagônica, cadeia de montanhas que resulta da subducção da placa de Nazca sob o continente sul-americano, é pontuada por vários vulcões, além de muitas geleiras, como na área de estudo. Estas ocupam vales do fluxo corrente, montanhas e fiordes para o Ocidente e lagos em direção ao Leste (VANDEKERKHOVE, 2014).

O Monte Melimoyu (44 ° 5'S - 72 ° 51'W) é formado por um extenso vulcão sem atividade atual de cobertura glacial com uma pequena cratera de 1 km de diâmetro em forma de cúpula. O vulcão possui 10 km de área na orientação leste-oeste e tem uma altura de 2.400 m (NARANJO & STERN, 2004).

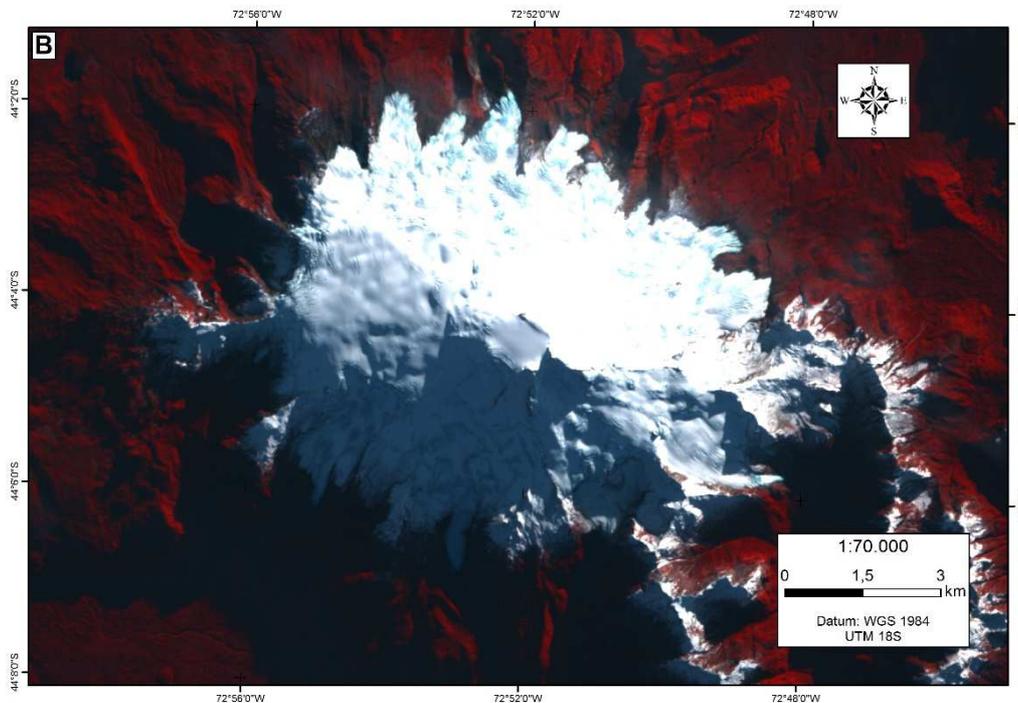
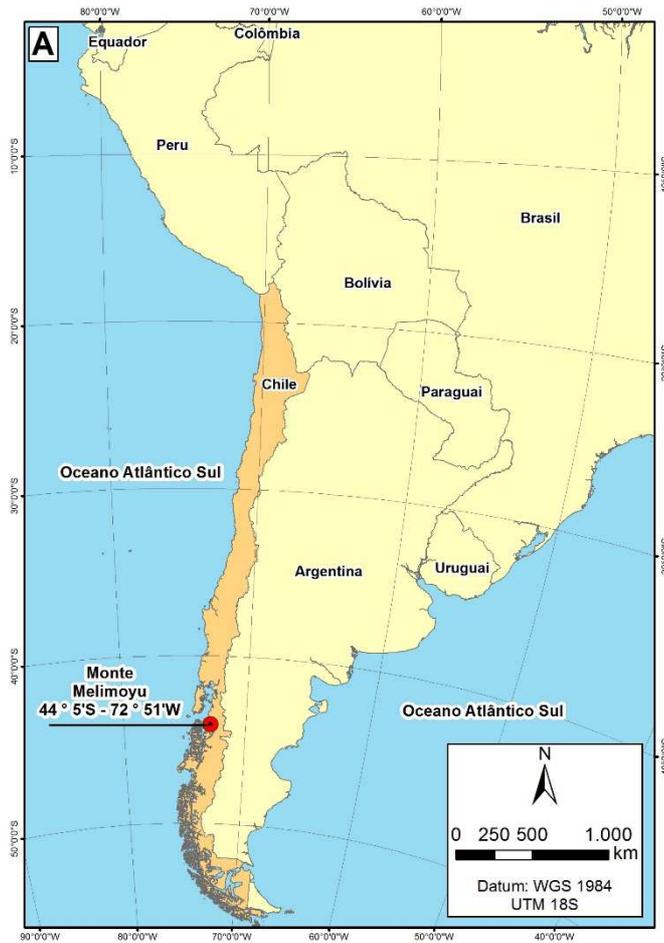


Figura 1. A: Localização do Monte Melimoyu no continente América do Sul. B: Mapa de localização da área de estudo. Imagem utilizada do Landsat 8, Sensor OLI TIRS, Data 02 de Julho de 2016 – Composição de Bandas 5-3-2 (Falsa Cor). Filipe Daros Idalino.

Em termos de precipitação, a parte sul do continente apresenta uma forte assimetria zonal devido ao condicionante orográfico da Cordilheira dos Andes e de ventos úmidos de Oeste, predominantes e provenientes do Oceano Pacífico. Na Patagônia, os padrões de precipitação na maior parte refletem o efeito orográfico da Cordilheira dos Andes, que divide a Patagônia em duas regiões diferentes: Patagônia Ocidental e Patagônia Oriental. Na Patagônia Ocidental, o clima é superúmido, com precipitação média atingindo até 7.500 milímetros/ano (MILLER, 1976).

Esta região, que também é chamada Patagônia chilena, é frequentemente influenciada por ciclones, e o elevado volume de precipitação deve-se à elevação de ar úmido proveniente do sudeste do Pacífico (GARREAUD *et al.*, 2013). Em contraste com o leste da Patagônia, a também chamada Patagônia Argentina, apresenta condições atmosféricas mais secas (400 a 1000 mm de chuvas por ano) caracterizando um clima semiárido (GUT, 2008).

A geomorfologia da área de estudo é dominada por processos glaciais e condicionantes tectônicos, como o vulcanismo. Durante fases de glaciação no Quaternário a paisagem foi modificada por intensa erosão e deposição glacial (ARNALDS, 2012).

De acordo com o Inventário Nacional de Geleiras (com atualização no ano de 2014 – Direção Geral de Águas) e ROCHA (2014), devido à variabilidade e diversidade geográfica, climática, geomorfológica, topográfica e latitudinal do território chileno, a distribuição do número de geleiras apresenta grandes desigualdades regionais e de magnitudes das mesmas massas de gelo presentes em casa zona. Neste contexto, a Estratégia Nacional de Geleiras da DGA realizada no ano de 2009 dividiu o país em quatro zonas glaciológicas da seguinte maneira:

- Zona Norte: desde a fronteira com Perú até a bacia do rio Choapa;
- Zona Central: desde a bacia do rio Acongua até a bacia do rio Maule;
- Zona Sul: desde a bacia do rio Itata até a bacia do rio Aysén;
- Zona Austral: desde a bacia do rio Baker ao extremo sul do país.

A área de estudo está localizada na Zona Sul, entre as zonas glaciológicas do Chile. A maior importância em termos de superfícies de geleiras de montanha das zonas central e sul, é que não se detecta a presença de geleiras de rochas na zona sul (ROCHA, 2014). As geleiras da área de estudo obedecem aos parâmetros do relevo local e fluem entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial, caracterizando geleiras de vale (ROCHA, 2014).

Analisando por zonas glaciológicas, as disparidades são evidentes, sendo que a zona norte possui apenas 1% do total da superfície do país congelada, a zona central possui 4%, a zona sul possui 7% e a zona austral possui 88% da superfície de gelo. Contudo, na zona sul já não se encontra geleiras de rochas, a maior quantidade de geleiras (3.467) corresponde a glaciaretas (pequenas massas de gelo), com 61%, o que corresponde 19% (ROCHA, 2014).

Quanto à exposição das geleiras, percebe-se que todas as zonas glaciológicas apresentam orientações predominantemente a SE e S, apresentando em todas as zonas uma tendência similar em todas as regiões. Quanto à exposição das geleiras de todo país, a grande maioria destas apresentam orientação SE, com um total de 5.194 geleiras, o que corresponde a 21,5% de todas as geleiras. Contudo, a maior quantidade de superfície congelada possui orientação W, com 7.475 km<sup>2</sup>, correspondente a 31,6% do total de superfície de gelo do país, influenciado pelo grande tamanho de geleiras que fluem para face ocidental dos campos de gelo Norte e Sul (ROCHA, 2014).

Na zona sul pode-se encontrar geleiras desde os 450 metros, e as mais altas se encontram a uma altitude de 3.000 metros (ROCHA, 2014). Portanto, conclui-se que o efeito da latitude se faz evidente na distribuição de geleiras por altitudes (ESPINOZA *et al.*, 1979).

Quanto à altitude sobre o nível do mar das geleiras nas regiões, aproximadamente 57% da superfície de gelo se localiza entre os 1.000 e 2.000 metros, muito similar a tendência que se observa na frequência de geleiras por altitude média (ROCHA, 2014). As altitudes extremas que variam de poucos metros acima do nível do mar, caracterizando-se por predominância de 0 a 500 metros de altitude nas regiões de Aysén e Magallanes, onde algumas geleiras efluentes das faces ocidentais dos campos de gelo Norte e Sul terminam com sua frente nos fiordes que se unem com o Oceano Pacífico (ROCHA, 2014).

Pellicciotti *et al.* (2014) ressaltam que as geleiras da Patagônia estão retraindo e diminuindo de espessura nas últimas décadas, assim como denotam Rignot *et al.* (2003), Rivera *et al.* (2007). Rivera *et al.* (2006) relaciona que as geleiras encontradas em vulcões na Patagônia estão retraindo principalmente em resposta aos fatores ligados às mudanças climáticas regionais.

## **2.3 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E TÉCNICAS DE SIG NA GLACIOLOGIA**

As técnicas de SIG e o uso de dados de Sensores Remotos, aplicadas ao meio ambiente, têm sido de grande utilidade para os estudos glaciológicos e geomorfológicos

de diversas áreas do planeta. De certo modo, as áreas mais inacessíveis (física e logisticamente), incluindo as regiões polares e de montanha, também são imageadas constantemente pelos sensores acoplados aos satélites espaciais.

REKOWSKY (2016) aplicou o SRTM para as áreas de geleiras de montanhas na Venezuela e Colômbia entre os anos de 1985 e 2015 para obter dados de orientação do terreno, possibilitando a análise ponderada das características morfométricas de cada geleira, tendo a linha de frente destas como áreas limite para o estudo. Os dados utilizados se mostraram satisfatórios para a interpretação dos resultados e também para as análises morfométricas, que apesar das limitações quanto à resolução espacial, possibilitaram uma caracterização geral de elevações e orientações das áreas de geleiras.

A aquisição e disponibilização de dados altimétricos obtidos por sensores remotos, imagens de satélite e a aplicação das técnicas de SIG tem auxiliado no desenvolvimento de diversos estudos de monitoramento e detecção de mudanças nos ambientes glaciais.

VEETIL *et al.* (2016) utilizou o ASTER-GDEM e imagens do Landsat com o objetivo de compreender a relação das interações oceano-atmosféricas com as flutuações de geleiras nos Andes tropicais. A aplicação dos dados se mostrou relevante e de acordo com o autor as geleiras tropicais andinas estão retrocedendo a um ritmo alarmante desde o final da década 1970. O estudo indica que as geleiras das montanhas orientais do Peru e da Bolívia estão derretendo mais rapidamente, o que pode causar uma diminuição no abastecimento de água potável em algumas cidades, como La paz, na Bolívia.

SANCHES (2013) utilizou um MDE (gerado através da interpolação de pontos de elevação), e imagens do Landsat 5 (sensor TM) para identificar variações nas geleiras do Nevado Cololo entre 1975 e 2011 usando técnicas de Sensoriamento Remoto para caracterização glaciomorfológica e a obtenção de parâmetros das principais massas de gelo. Como resultados da aplicação do MDE e das imagens de satélite, mesmo que com incerteza sobre a resolução dos dados quanto aos aspectos reais, à utilização da metodologia se mostrou suficiente para a análise morfológica do ambiente, possibilitando afirmar o comportamento apresentado dos alvos com a tendência de aquecimento das temperaturas e sua influência na redução de área de geleiras.

### **2.3.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO ASTER-GDEM PARA ANÁLISE MORFOMÉTRICA E MORFOLÓGICA DAS BACIAS DE DRENAGENS GLACIAIS**

Diversos estudos têm aplicado Modelos Digitais de Elevação para detectar a configuração das bacias de drenagens, realizar a caracterização morfométrica e a direção de fluxo.

Para a classificação a morfométrica de ambientes glaciais, ROSA *et al.* (2014), utilizaram MDE gerado a partir de dados do SHOA (*Servicio Hydrográfico e Oceanográfico de La Armada del Chile*) na região do setor Norte da Baía do Almirantado, Antártica, a nos quais se realizou o procedimento de aerotriangulação com pontos de controles altimétricos. O procedimento permitiu também extrair as informações de hipsometria, declividade e orientação das vertentes, que possibilitou a caracterização morfométrica do ambiente a partir da análise avaliada dos resultados (quanto à porcentagem de declividade, gradiente topográfico e insolação na região).

A caracterização morfológica das geleiras na região de estudo se faz necessária pelo conhecimento da dinâmica dos corpos natural das geleiras. JOAQUIN (2010) aplicou o ASTER-GDEM para a análise topoclimática de geleiras de rocha da cordilheira Três Cruces, na Bolívia, caracterizando a morfologia dos alvos e também as características da região de atuação das geleiras.

Os MDE's e outros derivados de satélites podem ser usados para obter informações sobre mudanças na dinâmica de geleiras. Juntamente com outros dados que documentam mudanças na área dos campos de gelo, essas abordagens podem fornecer medições úteis no balanço de massa e volume de geleiras com um pouco mais de exatidão relacionada à densidade de perda (QUINCEY *et al.*, 2014). Os dados altimétricos são cada vez mais importantes nos estudos sobre geleiras, mas permanecem desafios com a disponibilidade de dados de alta qualidade, a falta atual de padronização para métodos de aquisição, processamento e representação de dados de elevação digital e a identificação e quantificação de erro e incerteza de DEM (QUINCEY *et al.*, 2014).

ANDRADA (2015), ANDRADA e FREITAS (2015) aplicaram o ASTER-GDEM v.2 e técnicas em SIG para o estudo de bacias de drenagem glaciais em seu estudo, utilizando Softwares de geoprocessamento (ArcGis e QGis), como método aplicado em Modelos Digitais de Elevação para delimitação semi-automática de bacias de drenagem glaciais na Península Antártica. Vários procedimentos aplicados para a extração automática de redes de drenagem glaciais a partir de MDE (como o ASTER-GDEM) 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. A direção de fluxo define a direção preferencial do escoamento da água na superfície e é extraído do MDE, a partir da identificação da direção de maior declividade (BANON, 2013).

A versão 1 do ASTER-GDEM (GDEM 1) foi compilada a partir de mais de 1,2 milhões de cenas base DEM, que cobrem superfícies terrestres entre as latitudes 83 ° N e 83 ° S, e lançado em 2009. O ASTER-GDEM v.2 (GDEM 2) foi lançado ao público em meados de novembro de 2011, pelo METI (*Ministry of Economy, and Trade Industry*) e a NASA, com intuito de aperfeiçoar a estrutura do GDEM 1 (TACHIKAWA *et al.*, 2011).

TACHIKAWA *et al.* (2011) avaliaram o ASTER-GDEM versão 2 (cenas obtidas em 2011) como possuindo uma resolução espacial 30 metros e erro vertical máximo aproximadamente de 12 metros e acurácia horizontal de 2.4 arc-sec. (72 metros), em comparação com a versão 4.1 do SRTM que possui erro vertical de 102 metros de acurácia horizontal e 30 metros de resolução espacial (cenas obtidas em 2000).

Kaab *et al.* (2002) destaca que o ASTER-GDEM, gerado por métodos fotogramétricos a partir de dados do sensor óptico ASTER, foi avaliado em termos de acurácia e aplicabilidade para estudos glaciológicos, permitindo uma série de estudos como a análise morfométrica, inclusive em regiões montanhosas.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 DADOS

A metodologia do trabalho consiste na obtenção de dados através do uso e processamento de um Modelo Digital de Elevação (MDE) a fins de obter dados espaciais e detectar mudanças nos ambientes glaciais e caracterizar a topografia e morfometria superficial das bacias de drenagens glaciais da área de estudo. Os dados utilizados como comparativos para a análise de alterações em Bacias de Drenagem foram do GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space). O período de análise foi escolhido de acordo com os dados disponíveis no GLIMS e a obtenção de uma cena do Landsat 8 sem cobertura de nuvens.

Foram obtidos e processados dados ASTER-GDEM Versão 2 (quadro 02) com resolução espacial de 30 m, e uma cena de 2016 do Landsat 8 (quadro 03) com resolução espacial de 30 m e banda 8 (pancromática) do sensor OLI (Operational Land Imager) de 15 m.

Tabela 1. Dados utilizados neste trabalho.

Dado	Escala/ Resolução	Data	Fonte
LANDSAT 8 – ID: LC82320912016184 LGN00	30/15m (pancromática)	02 de julho de 2016	USGS <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a>
ASTER-GDEM v.2	30m	2011	USGS <a href="http://earthexplorer.usgs.gov/">http://earthexplorer.usgs.gov/</a>
Base vetorial de dados com shapes das Bacias de Drenagem	30m	1970/01/01 1986/01/14 2000/06/15	GLIMS

Tabela 2. Informações do dado ASTER-GDEM v.2 (2011).

Resolução Espacial	1 Segundo de Arco (30 m).
Erro vertical máximo	Aprox. 12 m
Acurácia horizontal	2.4 arc-sec. (72 m)
Sistema de Coordenadas Geográficas	Geográficas de Latitude e Longitude
DEM Formato de Saída	GeoTIFF, 16-bit, em unidades de metros verticais Referenciado para o WGS84 / geóide EGM96
Valores de DN especial	-9999 para pixels vazios, e 0 para o corpo água do mar
Cobertura	De 83° N para o 83° S.

Tabela 3. Informações do dado Landsat 8 OLI TIRS (2016)

Em processamento	Nível 1 - Terreno corrigido
Resolução Espacial	OLI bandas multiespectrais 1 - 7, 9: 30 - metros banda pancromática OLI 8: 15 - metros. TIRS bandas 10-11: coletados em 100 metros, mas reamostrados 30 - metros para coincidir com bandas multiespectrais OLI
Característica dos dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Formato de dados GeoTIFF</li> <li>• Cubic Convolution (CC) resampling</li> <li>• Orientação Norte (MAP)</li> <li>• Universal Transversa de Mercator (UTM) mapa de projeção (projeção estereográfica polar para cenas com uma latitude centro maior ou igual a -63.0°)</li> <li>• Datum WGS 84 - Sistema Geodésico Mundial</li> <li>• 12 metros de erro circular, 90% de confiança de precisão global para OLI</li> <li>• 41 metros de erro circular, 90% de confiança de precisão global para TIRS</li> <li>• Os pixels com valores de 16 bits</li> </ul>
Fonte	Disponível em: <a href="http://landsat.usgs.gov/landsat8.php">http://landsat.usgs.gov/landsat8.php</a>

## 3.2 ETAPAS METODOLÓGICAS

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A caracterização morfométrica da área de estudo foi realizada com a geração e interpretação de mapas de declividade, hipsometria, aspecto e de sombreamento da área de estudo com dados do ASTER-GDEM v.2.

O início das etapas de processamento no software ArcGis® ocorreram com a definição do Sistema de Coordenadas para o sistema UTM zona 18S e para o Datum WGS 1984, e adicionando-se o arquivo *raster* MDE na área de controle do *software*. Após o processamento inicial, o MDE foi convertido para UTM, Fuso 18S, utilizando a ferramenta *Projections and Transformations* da caixa de ferramentas *Data Management Tools*, da extensão *ArcToolbox* e co-registrado com a imagem Landsat *OLI 8*. As bacias de drenagem da área de estudo foram delimitadas na imagem *Landsat OLI 8* (02/07/2016) obtendo-se a área total coberta por gelo em 2016 (Figura 09) e utilizando-se como base para o recorte do MDE com a ferramenta *Clip*. O mesmo procedimento de conversão foi aplicado ao arquivo shape de BD do GLIMS.

Os dados morfométricos foram gerados a partir dos resultados do processamento dos dados aplicando-se as ferramentas do *3D Analyst* ao recorte do MDE.

O mapa Hipsométrico foi gerado com a manipulação de histograma mínimo e máximo e com a aplicação do efeito *Hillshade* no recorte do MDE, buscando fornecer a visualização do terreno por meio de cores representando as cotas altimétricas de intervalos definidos de 200 m, entre 670 m e 2.399 m (Figura 05).

Para o mapa de Declividade foi aplicada a ferramenta do *Slope* ao recorte do MDE, obtendo-se a representação em porcentagem nas classes de 0 a 3%, 3 a 8%, 8 a 20%, 20 a 45%, 45 a 70% e maior que 70% (Figura 06).

Para o mapa de Aspecto foi aplicada a ferramenta *Aspect* ao recorte do MDE, gerando-se um arquivo raster com as orientações da área de estudo (de N a S), que tem como finalidade demonstrar a orientação das vertentes e da área de estudo e também demonstrar a base para a interpretação da incidência da radiação solar (Figura 07).

### 3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DA DINÂMICA GLACIAL DA ÁREA DE ESTUDO

A caracterização da dinâmica de retração das bacias de drenagens glaciais foi realizada pela aplicação de técnicas de SIG e análise temporal de dados obtidos por sensores remotos. Foi realizada a extração e mapeamento de áreas totais e da variação

frontal, utilizando o método de delineamento manual, com classificação visual de imagens, quantificada a perda de área e as taxas de retração das BD para o período de 1970 a 2016. Utilizou-se *shapes* das BD de 1970, 1986 e 2000 fornecido pelo GLIMS.

Para obter dados de 2016 foi usada a cena do LANDSAT 8, sensor OLI TIRS, obtida em 02/07/2016, por ser o dado utilizado pelo GLIMS nos mapeamentos anteriores. Aplicou-se a composição colorida RGB532 falsa cor para possibilitar melhor identificação dos alvos ao destacar a vegetação e rochas expostas na cor vermelha, distinguindo-se os alvos como neve e gelo dos demais alvos. Os dados do programa Landsat foram adquiridos no site oficial da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>), já corrigidos radiometricamente em nível G1 – ainda sim sendo necessário processar a correção do sistema de coordenadas e sistema de referência. Foi processado o recorte da área desejada e realizada a correção do sistema de coordenadas com a ferramenta *ProjectRaster*, do ArcGis. Neste caso utilizou-se o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) e o sistema de referência *World Geodetic System 84* (WGS84) – zona 18S.

O mapeamento da diferença das linhas de frente com a imagem Landsat representou a retração de área das BD no período entre 2000 e 2016. Para esse mapeamento foi necessária a criação de um novo polígono, com o *ArcCatalog* importando o sistema de coordenadas do raster recortado e adicionado a área de controle do ArcGis, juntamente com a cena do Landsat 8. Em seguida foi dado início a edição do polígono com a ferramenta *CreatFeatures*, utilizando o *Auto Complete Polygon*, permitindo mapear a diferença de área das BD com os vértices do polígono do GLIMS.

Realizou-se a análise e comparação dos resultados de retração e perda de área de gelo nas BD do monte Melimoyu para cada período. A tabulação dos dados possibilitou a comparação entre o total de área perdida e a taxa de retração por período analisado. Foi possível realizar o cálculo da taxa de retração pelo cálculo de área dos vetores em formato *shapefile*, criados a partir das imagens de satélite, na tabela de atributos do *shape*.

### **3.2.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES TOPOGRÁFICAS E MORFOLÓGICAS NA DINÂMICA DE RETRAÇÃO GLACIAL NAS ÚLTIMAS DÉCADAS**

A proposta do estudo foi efetuar análises para representar as diferenças comparativas entre as características morfológicas relacionadas à configuração topográfica e morfométrica de cada geleira. Atributos como áreas das BD e variação

destas ao longo do tempo também foram avaliadas relacionadas às características determinadas para cada geleira. A avaliação dos resultados dos mapas gerados e análises dos dados resultaram na análise comparativa entre as BD, observando-se as diferenças de sensibilidade à tendência a aquecimento atmosférico regional e relacionando-se às características apresentadas por cada geleira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 FISIOGRAFIA DAS BACIAS DE DRENAGEM DO MONTE MELIMOYU

As geleiras do Monte Melimoyu mostram-se, pela análise visual da imagem Landsat, com forma e caracterização de geleira de montanha, configurando-se como geleiras de vale com término em terra.

O mapa hipsométrico (Figura 05) para as bacias de drenagens do Monte Melimoyu mostra que a elevação mínima é de 670 m e a máxima de 2.399 m, com 1574,24 m de elevação média para a área de estudo.

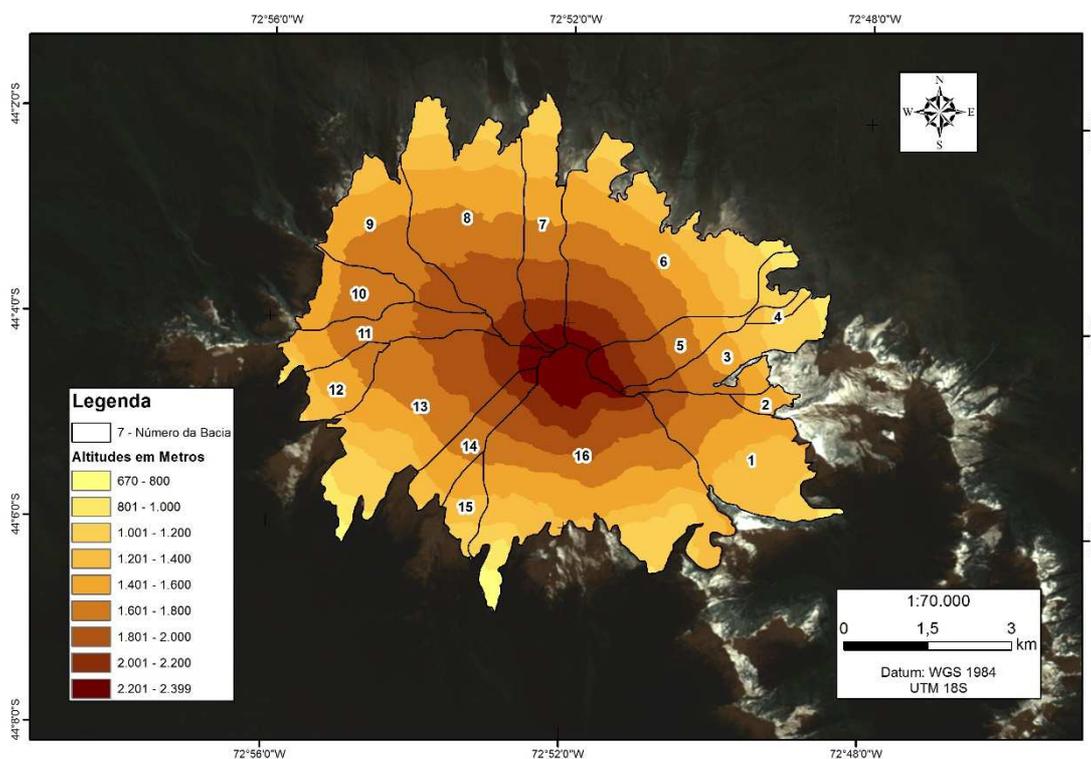


Figura 2. Mapa Hipsométrico do Monte Melimoyu.

De acordo com a tabela 04 as BD possuem elevação média de 1574,24 m, tendo a BD de número 15 com a menor cota média de 1332,00 m e a BD de número 5 com a

maior cota média de 1711,00 m. A BD de número 16 apresentam respectivamente os maiores valores de cota mínima (670 m) e a máxima (2399 m) do Monte Melimoyu devido sua extensão em área total.

Tabela 4. Elevação mínima, máxima e média do Monte Melimoyu por Bacias de Drenagem.

BD	Elev. Mínima (m)	Elev. Máxima (m)	Elev. Média (m)
1	737	2.083	1.460
2	1.295	1.680	1.500
3	871	2.255	1.422
4	962	1.294	1.153
5	788	2.399	1.711
6	826	2.315	1.556
7	953	2.308	1.653
8	983	2.287	1.595
9	1.164	1.967	1.604
10	1.370	1.797	1.627
11	874	2.076	1.665
12	1.118	1.732	1.487
13	680	2.292	1.583
14	1.125	2.264	1.681
15	993	1.665	1.332
16	670	2.399	1.599

O mapa de declividade (Figura 06) da área de estudo mostra que a área possui declividade mínima na classe de 0%, máxima de 271,11% e média de 33,29%.

As BD de número 2 e 4 não apresentaram declividades nas classes entre 0-3% e maior que 70%. As BD de número 14 e 15 não apresentaram declividades na classe entre 0-3%. A tabela 05 contém os dados de declividade por área total expressa em metros.

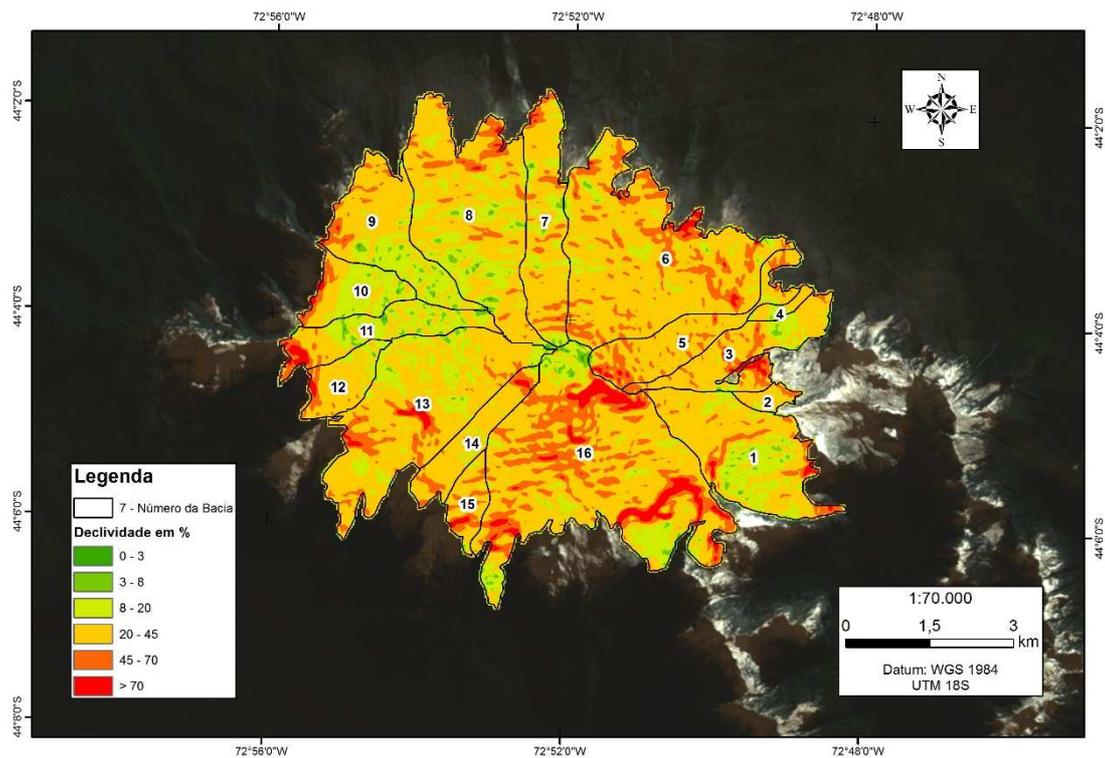


Figura 3. Mapa de Declividade do Monte Melimoyu.

Tabela 5. Declividade do Monte Melimoyu por Bacias de Drenagem.

BD	Classe 0-3%	Classe 3-8%	Classe 8-20%	Classe 20-45%	Classe 45-70%	Classe > 70%
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3179,01	82896,6	1170824,35	2460848,67	414297,91	57466,39
2	-	1218,5	48417,22	263773,38	38762,31	-
3	723,29	34549,02	329056,37	1544908,06	402752,2	71316,74
4	-	5063,35	95003,89	170882,62	2176,89	-
5	2633,06	6769,72	98143,81	1694613,51	487704,53	47551,8
6	2169,87	42118,41	639741,67	5994797,41	1622049,71	112656,42
7	4802,93	50603,07	561588,13	1998203,11	389720,19	15517,28
8	19971,75	132846,12	1589388,05	4128807,07	623852,24	30781,68
9	9784,99	129920,32	1042134,98	1713296,7	231502,94	7712,33
10	7728,12	46347,44	807181,99	531188,87	140359,53	23853,15
11	15794,88	162415,64	883955,87	783333,81	153184,45	94880,26
12	1446,58	6509,62	184971,91	858420,66	123654,04	27142,95
13	3851,56	62203,93	1303790,05	4331422,82	657711,61	122700,96
14	-	5207,93	119871,63	1189131,74	195677,81	28085,58
15	-	2698,71	36998,8	564301,33	216718,06	34274,9
16	29406,98	173390,17	1332695,85	5893320,83	2743660,06	870558,07

Na classe de declividade entre 3-8%, a BD de número 16 apresentou maior extensão de área, totalizando 173390,17 m<sup>2</sup>, seguida das BD de número 11, 8 e 9, com 162415,64 m<sup>2</sup>, 132846,12 m<sup>2</sup> e 129920,32 m<sup>2</sup> respectivamente (Tabela 05).

Na classe de declividade entre 8-20%, a BD de número 8 apresentou maior extensão de área, totalizando 1589388,05 m<sup>2</sup>, seguida das BD de número 16, 13, 1 e 9, com 1332695,85 m<sup>2</sup>, 1303790,05 m<sup>2</sup>, 1170824,35 m<sup>2</sup> e 1042134,98 m<sup>2</sup>, respectivamente (Tabela 05).

Na classe de declividade entre 20-45%, a BD de número 6 apresentou maior extensão de área, totalizando 5994797,41 m<sup>2</sup>, seguida das BD de número 16, 13 e 8, com 5893320,83 m<sup>2</sup>, 4331422,82 m<sup>2</sup> e 4128807,07 m<sup>2</sup>, respectivamente (Tabela 05).

Na classe de declividade entre 45-70%, a BD de número 16 apresentou maior extensão de área, totalizando 2743660,06 m<sup>2</sup>, seguida da BD de número 6 com 1622049,71 m<sup>2</sup> (Tabela 05).

A BD de número 16 apresenta maior extensão com declividade acima de 70%, com 870558,07 m<sup>2</sup> de área total, seguida das BD de número 13 e 6, com 122700,96 m<sup>2</sup> e 112656,42 m<sup>2</sup> respectivamente (Tabela 05).

Quanto à orientação, as geleiras do Monte Melimoyu se apresentam com diferentes orientações de fluxo, porém algumas predominam em cada Bacia de Drenagem. A BD glacial de número 1 apresenta orientação de fluxo predominante no sentido Sudeste (Figura 07).

As BD glaciais de número 2, 3, 4, 5 e 6 apresentam orientação de fluxo predominante no sentido Nordeste (Figura 07). As BD glaciais de número 7 e 8 apresentam orientação de fluxo predominante no sentido Norte (Figura 07). A BD glacial de número 9 apresenta orientação de fluxo predominante no sentido Nordeste (Figura 07). As BD glaciais de número 10 e 11 apresentam orientação de fluxo predominante no sentido Oeste (Figura 07). As BD glaciais de número 12, 13 e 14 apresentam orientação de fluxo predominante no sentido Sudoeste (Figura 07). As BD glaciais de número 15 e 16 apresentam orientação de fluxo predominante no sentido Sul (Figura 07).

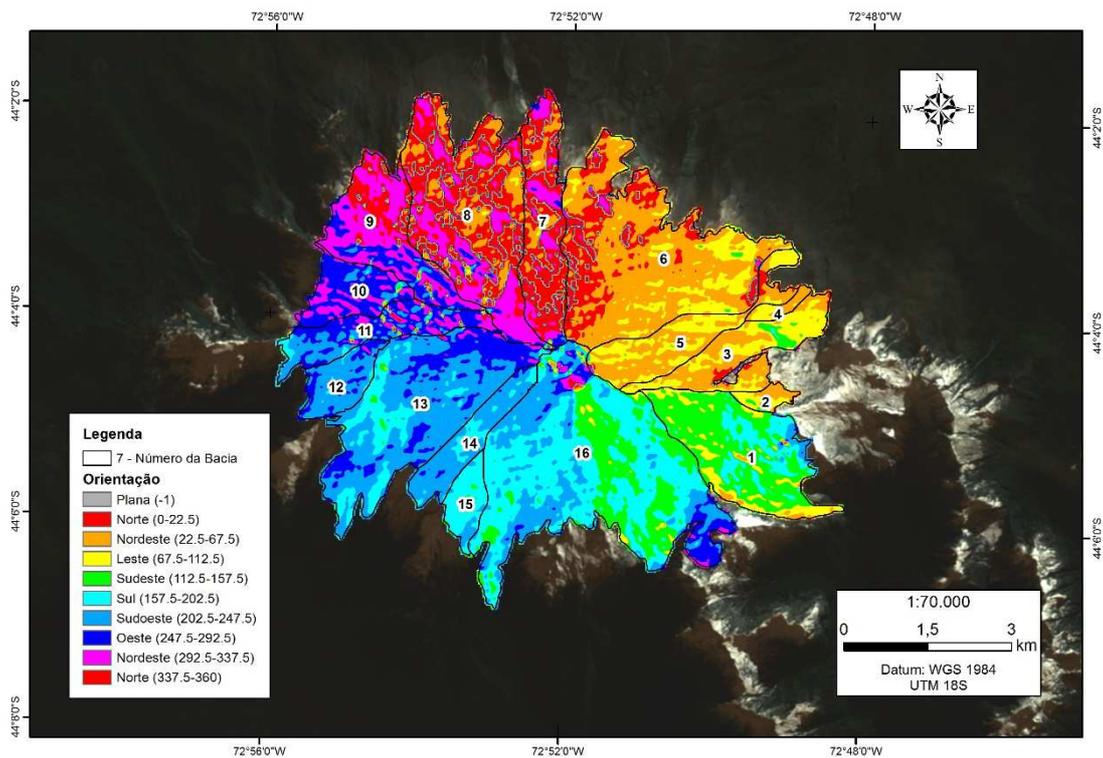


Figura 4. Mapa de Aspecto do Monte Melimoyu.

## 4.2 VARIAÇÃO DE ÁREA DAS BACIAS DE DRENAGEM NO MONTE MELIMOYU

O mapa de retração mostra uma perda total de área total glacial no período entre 1970 a 2016 de 25,40 km<sup>2</sup> do Monte Melimoyu (Figura 08, 09 e Tabela 06). Este valor representa 31,37% do total de 80,9702 km<sup>2</sup> apresentado em 1970.

O período de maior perda de área total corresponde a 1970 a 1986 (Figura 09 e Tabela 06), com 23,03% da área apresentada no ano de 1970. O período com menor perda de área total corresponde a 2000 a 2016, com 4,84% da área apresentada no ano de 2000 (Figura 10 e Tabela 06).

Todas as Bacias de Drenagem apresentaram perda de área contínua no período de análise, com algumas exceções (Figura 11). As BD de número 6, 10, 13 e 16 apresentaram maior perda de área (Figuras 08, 09, 10, 11 e Tabela 06), com 18,47% (4,69 km<sup>2</sup>), 10,59% (2,69 km<sup>2</sup>), 11,63% (2,95 km<sup>2</sup>) e 9,72% (2,47 km<sup>2</sup>), respectivamente, totalizando 50,42% (12,81 km<sup>2</sup>) do total de perda no período de 1970 a 2016 (Figura 11). Esta retração destas BD foi mais acentuada nos períodos de 1970 a 1986 e de 1986 a 2000.

As BD 1, 3, 8, 9, 11 e 12 apresentaram uma relativa média retração (Figuras 08, 09 e 10 e Tabela 06), comparando com as demais, com 0,45% (1,78 km<sup>2</sup>), 0,31% (1,24

km<sup>2</sup>), 0,47% (1,82 km<sup>2</sup>), 0,46% (1,81 km<sup>2</sup>), 0,41% (1,62 km<sup>2</sup>), 0,35% (1,41 km<sup>2</sup>), respectivamente, totalizando 2,45% (9,67 km<sup>2</sup>) do total de perda no período de 1970 a 2016. Esta retração foi mais acentuada nos períodos de 1970 a 1986.

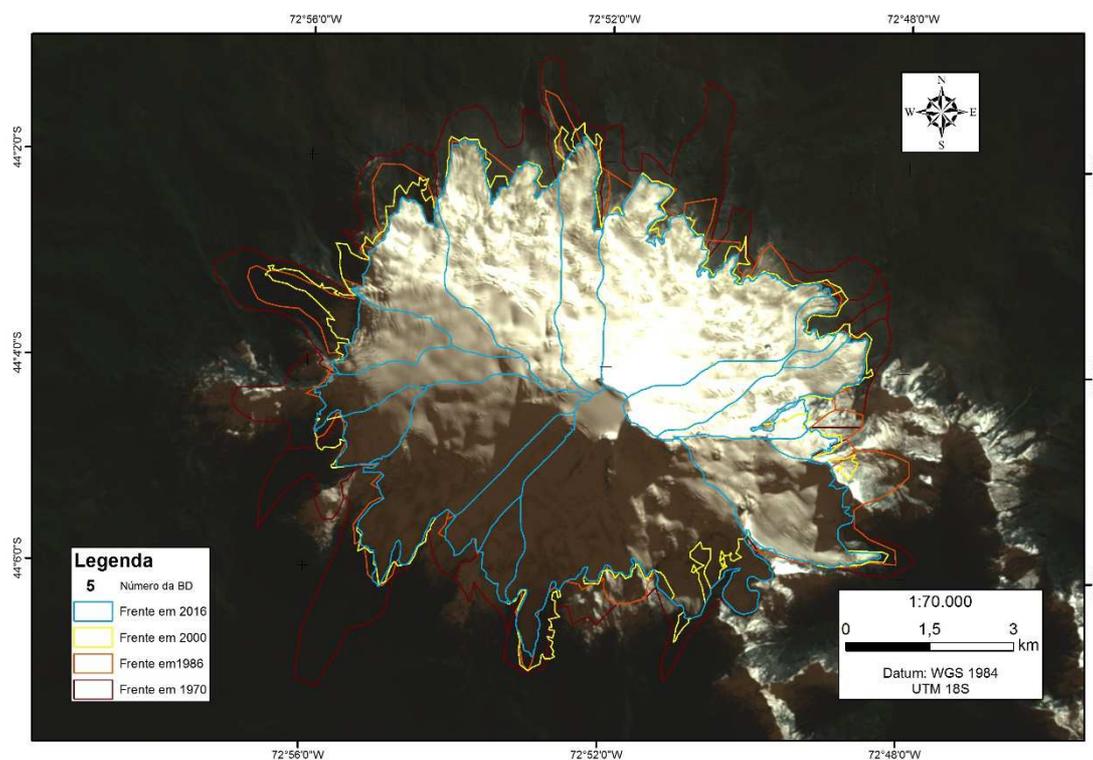


Figura 5. Mapa de variação das linhas de frente de Bacias de Drenagem da área de estudo nos anos de 1970, 1986, 2000 e 2016.

Nenhuma das BD deixou de existir no período observado (Figura 09). Quinze das BD apresentaram perda de área em todo o período analisado, com exceção da BD de número 14 que não apresentou alterações de área no período de 2000 a 2016, mantendo-se com área de 1,54 km<sup>2</sup> (Figura 09 e Tabela 03). A BD 16 apresentou, na análise do período de 2000 a 2016, um aumento de área em relação ao período de 1986 a 2000, pois no mapeamento realizado com a cena do Landsat de 2016 obteve-se um acréscimo de área de 0,34 km<sup>2</sup>, de 10,71 km<sup>2</sup> em 2000 e 11,06 km<sup>2</sup> em 2016.

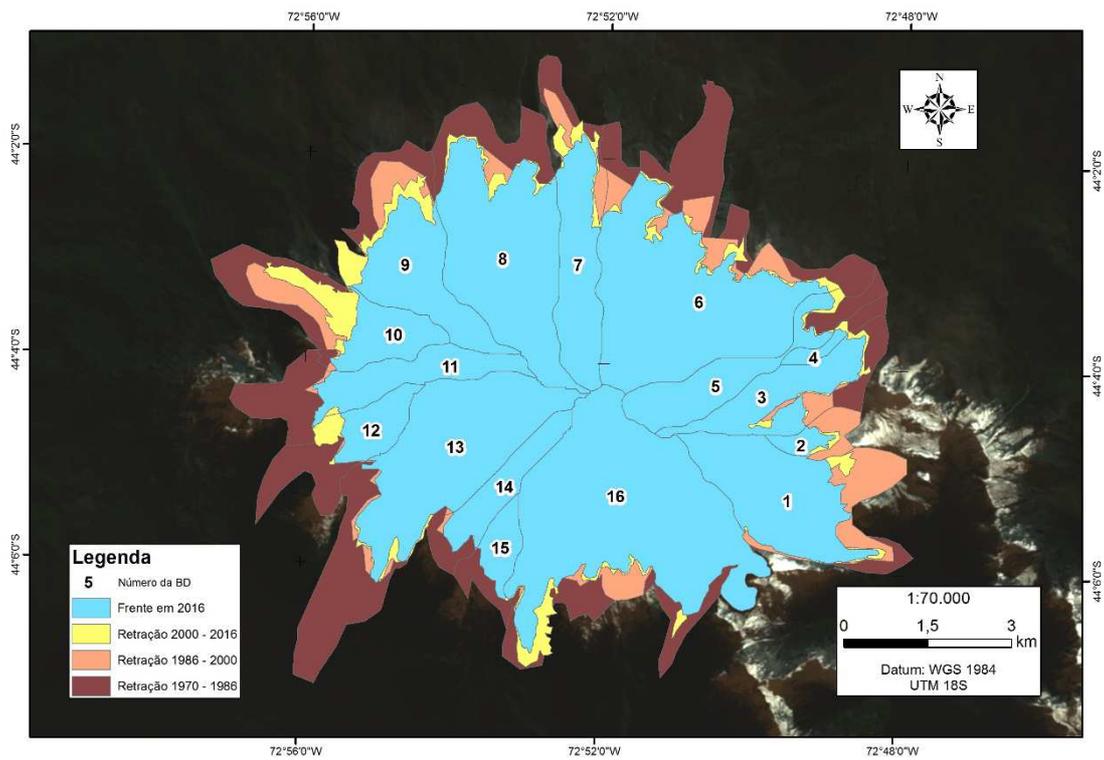


Figura 6. Mapa de retração de Bacias de Drenagem por períodos analisados.

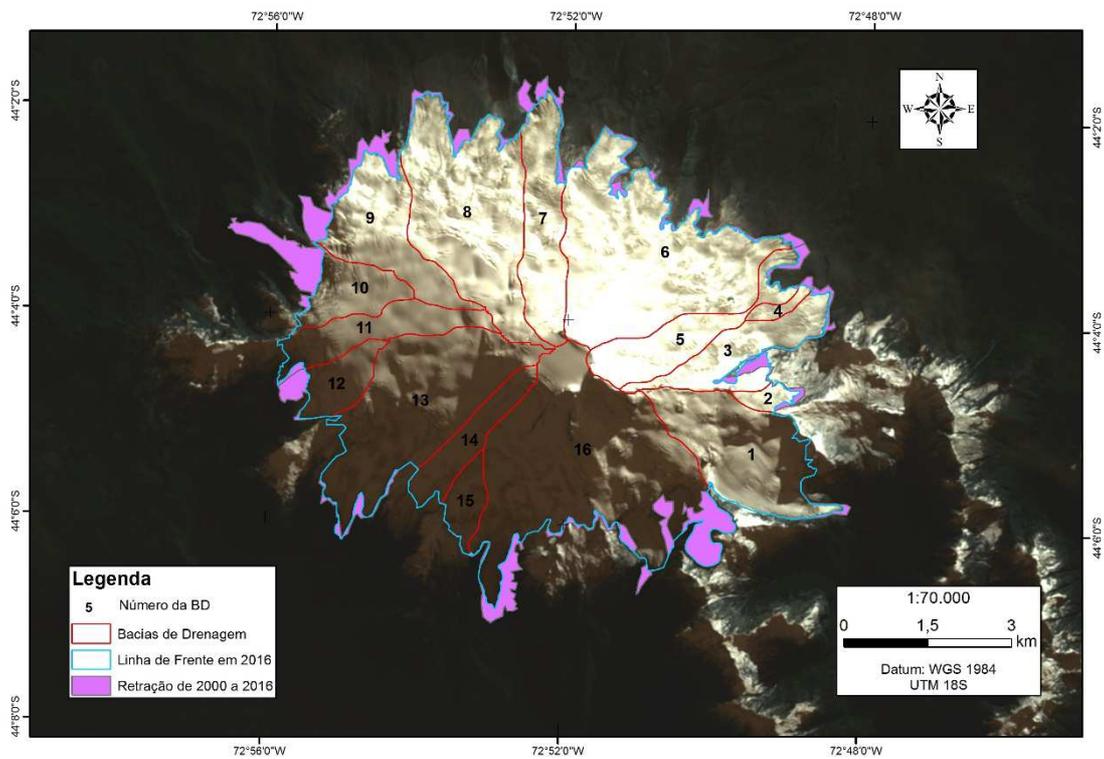


Figura 7. Mapa de Retração de Bacias de Drenagem da área de estudo para o período de 2000 a 2016.

Tabela 6. Relação de perda de área e taxa de retração das Bacias de Drenagem do Monte Melimoyu no período entre 1970 a 2016. Os valores em negativo representam ganho de área no período.

BD	Área (km <sup>2</sup> ) em 1970	Área (km <sup>2</sup> ) em 1986	Área (km <sup>2</sup> ) em 2000	Área (km <sup>2</sup> ) em 2016	Perda de Área (km <sup>2</sup> ) 1970-1986	Perda de Área (km <sup>2</sup> ) 1986-2000	Perda de Área (km <sup>2</sup> ) 2000-2016	Perda Total de Área (km <sup>2</sup> )	Taxa de Retração (km <sup>2</sup> /ano)
1	6,07	5,78	4,48	4,29	0,29	1,30	0,19	1,78	0,04
2	0,50	0,92	0,42	0,36	-0,42	0,50	0,07	0,15	0,01
3	3,63	2,74	2,43	2,39	0,89	0,31	0,04	1,24	0,03
4	0,54	0,28	0,31	0,28	0,26	-0,03	0,03	0,26	0,01
5	2,89	2,35	2,44	2,33	0,55	-0,09	0,11	0,56	0,01
6	13,12	9,80	8,84	8,43	3,32	0,96	0,41	4,69	0,10
7	4,02	3,57	3,29	3,01	0,45	0,28	0,28	1,01	0,02
8	8,36	6,75	6,76	6,54	1,60	-0,01	0,23	1,82	0,04
9	4,95	4,03	3,81	3,14	0,92	0,23	0,66	1,81	0,04
10	4,25	2,97	2,32	1,56	1,28	0,65	0,77	2,69	0,06
11	3,73	2,18	2,13	2,11	1,56	0,04	0,02	1,62	0,04
12	2,62	1,21	1,45	1,21	1,41	-0,24	0,24	1,41	0,03
13	9,45	6,59	6,60	6,49	2,86	-0,02	0,11	2,95	0,06
14	2,02	1,51	1,54	1,54	0,51	-0,03	0,00	0,48	0,01
15	1,31	0,84	0,86	0,85	0,46	-0,01	0,00	0,46	0,01
16	13,52	10,81	10,71	11,06	2,72	0,10	-0,34	2,47	0,05

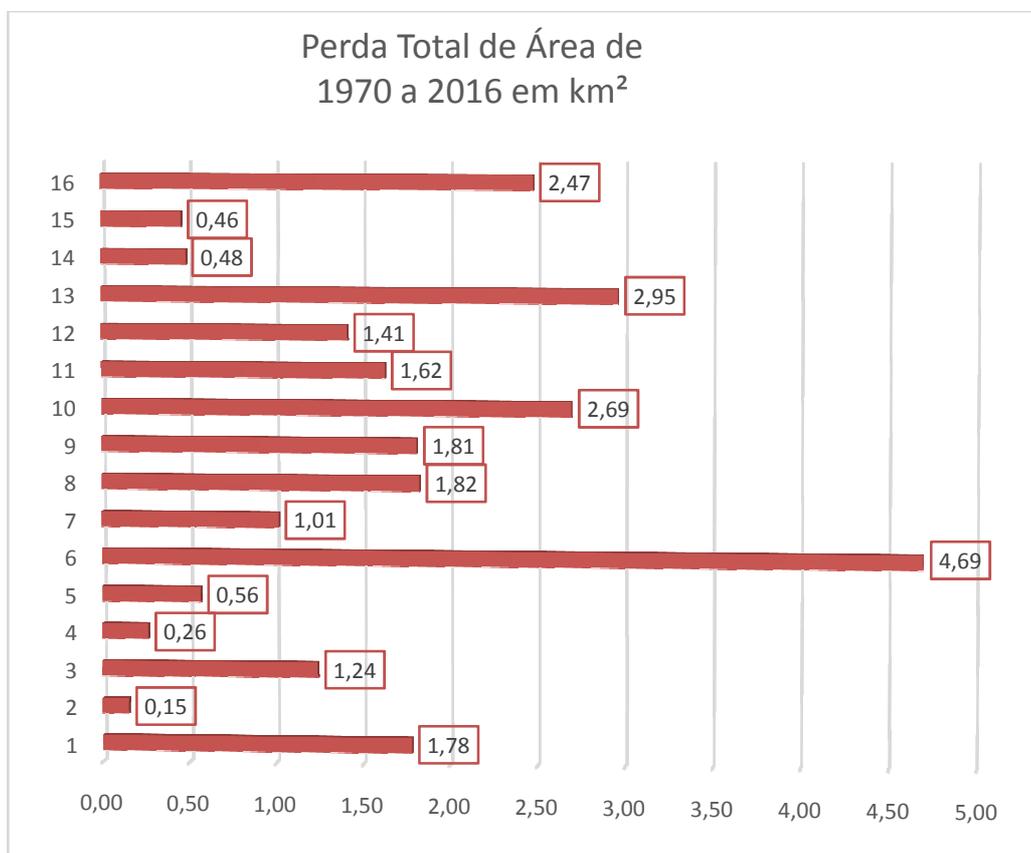


Figura 8. Gráfico da perda de área total em km<sup>2</sup> por número de Bacia de Drenagem.

As BD de número 2, 4, 5, 7, 14 e 15 apresentaram menor perda de área comparativamente às demais, com 0,58% (0,15 km<sup>2</sup>), 1,02% (0,26 km<sup>2</sup>), 2,22% (0,56 km<sup>2</sup>), 0,15% (1,01 km<sup>2</sup>), 1,89% (0,48 km<sup>2</sup>) e 1,79% (0,46 km<sup>2</sup>), respectivamente, no período de 1970 a 2016. Estes números totalizam apenas 7,52% (1,91 km<sup>2</sup>) do total de perda observado na área de estudo. A retração destas BD foi menos acentuada ainda nos períodos de 1986 a 2000 e de 2000 a 2016, conforme mostra a Figura 09 e a Tabela 03. É importante salientar que provavelmente estas áreas estão subestimadas ou superestimadas em 900 m<sup>2</sup> para os períodos até 2000, uma vez que cada pixel das imagens Landsat tem 30m x 30m (900 m<sup>2</sup>), com exceção da Landsat 8, superestimada em 225 m<sup>2</sup>, com o uso da banda pancromática com 15 m x 15 m (225 m<sup>2</sup>).

### **4.3 RELAÇÕES DAS TAXAS DE RETRAÇÃO COM AS CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS**

De forma geral, os resultados de retração obtidos para as Bacias de Drenagem do Monte Melimoyu vão ao encontro de Pellicciotti *et al.* (2014). Os autores ressaltam que as geleiras da Patagônia, incluindo a região Norte, estão retraindo e diminuindo de espessura nas últimas décadas, assim como denotam Rignot *et al.* (2003), Rivera *et al.* (2007), Masiokas *et al.* (2008), Willis *et al.* (2012).

A atividade vulcânica no sul dos Andes chilenos também é importante para explicar o comportamento das geleiras, sendo que 25% da perda de massa de geleiras pode ser explicado pela atividade geotérmica (RIVERA *et al.*, 2012). A atividade vulcânica tem influência por uma combinação de fatores, tais como a atividade efusiva e o aumento da temperatura geotérmica na base da geleira, o que induz a um maior degelo basal e a um maior deslizamento basal (Rivera *et al.*, 2006). Também há a deposição de cinzas no topo da geleira, modificando o albedo da superfície e reduzindo a ablação superficial (RIVERA *et al.*, 2012, PELLICCIOTTI *et al.*, 2014).

Na área de estudo não é evidenciada atividade vulcânica recente. Ainda que muito pouco ainda se conheça sobre as respostas às mudanças climáticas nestas áreas (MASIOKAS *et al.*, 2008; SCHAEFER *et al.*, 2013). RIVERA *et al.* (2006) relaciona que as geleiras localizadas em vulcões estão retraindo em resposta a forçantes climáticas (PELLICCIOTTI *et al.*, 2014).

A retração registrada neste estudo para as BD do monte Melimoyu pode estar relacionada com vários fatores e como MASIOKAS *et al.* (2008) destaca ao atribuir as recessões da Patagônia, principalmente geleiras de descarga, às condições de tendência a maior aquecimento atmosférico no verão no período entre 1912 a 2002. Os autores afirmam análises de dados de temperatura da estação de verão no período

mostram que as temperaturas médias superficiais do ar têm aumentado 0,056 °C por década. Também pode se destacar as condições mais secas detectadas no mesmo período pelos autores para os invernos (Abril a Setembro), onde a precipitação diminuiu em 5% por década. As BD têm respondido a esta tendência de aquecimento atmosférico com a continuidade da retração observada no período analisado.

Os resultados de flutuação de área e variação frontal por período evidenciam diferentes taxas de retração para cada geleira e estes podem estar relacionados a suas características geométricas (morfometria e área). Todas, de forma geral, apresentaram tendência de contínua retração.

Algumas BD podem ser agrupadas em relação ao comportamento semelhante de retração por período e em suas semelhanças em características de área total, elevações máxima e da linha de frente atual, declividades e orientação predominante do fluxo de gelo principal. As BD de número 6, 10, 13 e 16 apresentaram maior taxa de retração e percentual de perda de área no período de 1970 a 2016 (Figura 11). A geleira de número 10, com alta retração, possui a linha de frente atual com alta elevação (Figura 12), assim como baixos valores de elevação máxima, um setor frontal com alta declividade e uma relativa pouca extensão. Pode se relacionar que estas BD 6, 13 e 16 apresentam características semelhantes em relação aos altos valores de declividade (com maior área nas classes que representam maiores valores de declividade) com exceção da geleira de número 10. Contudo estas BD apresentam valores de elevação da linha de frente atual (2016) (Figura 12) não tão altos quanto às demais e suas áreas extensas comparadas às demais. Estas BD apresentam diferentes orientações predominantes de fluxo de gelo (Figura 07).

As BD de número 1, 3, 8, 9, 11 e 12 apresentaram média retração comparada com as demais. Analisando os parâmetros morfométricos as BD de número 8, 9 e 12 (com destaque para as de número 9 e 12) apresentam a linha de frente com altos valores de elevação (Tabela 04 e Figura 12) em comparação com as demais do grupo. A geleira de número 12, além de apresentar altos valores de elevação e declividade da linha de frente atual, também apresenta pouca extensão. A BD de número 1 apresenta grande extensão de área nas classes de altas declividades e baixos valores elevação da linha de frente atual. Já a BD de número 11 possui alta declividade frontal e sua área não tão extensa quanto às demais.

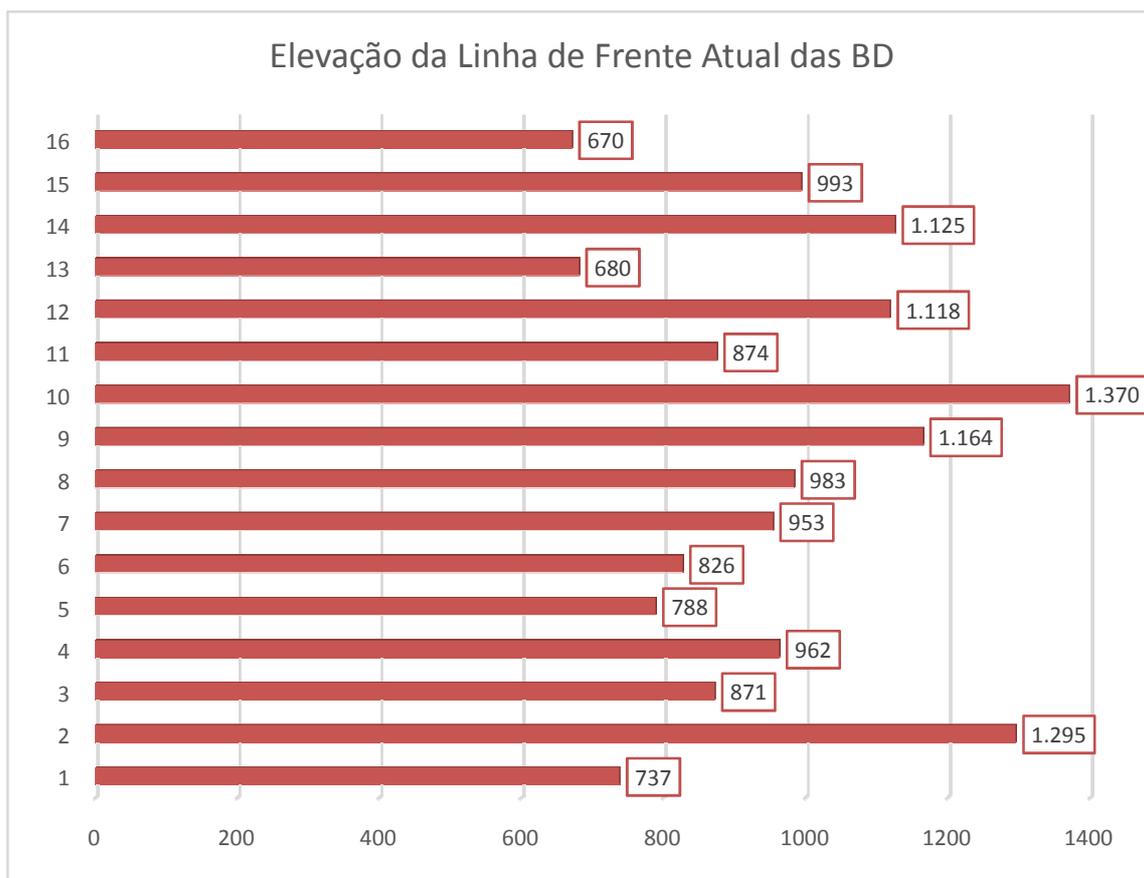


Figura 9. Gráfico de elevação da linha de frente atual das Bacias de Drenagem Glaciais (2016).

Enquanto que as BD de número 2, 4, 5, 7, 14 e 15 apresentaram menor taxa de retração no período analisado. A baixa taxa de retração da BD de número 2, com o menor valor de retração, pode estar refletindo aos altos valores de elevação da linha de frente atual (Tabela 04 e Figura 12). Quanto a este parâmetro as BD 14, 15 e 4 também apresentam altos valores da linha de frente atual (elevação mínima, Tabela 04). Este padrão de retração, especialmente no caso das de número 5, 7 e 14, também pode estar relacionado aos altos valores de elevação máxima quando comparado às demais, o que influencia no balanço de energia e de massa (Tabela 04 e Figura 12). A BD de número 4 apresenta baixos valores de declividade que podem influenciar na baixa velocidade de fluxo e consequentemente nos baixos valores de retração (Tabela 05).

Em relação à área das BD pode-se considerar que possuem pouca extensão, com exceção das BD de número 5, 7 e 14, desta forma a elevação da linha de frente (Tabela 04 e Figura 12) destas pode ser um fator de diminuição da sensibilidade às condições de tendência a maior aquecimento atmosférico destas à perda de área. Assim como as demais BD, não foi encontrada uma relação entre o padrão de retração e as características de orientação do fluxo (Figura 07) de gelo que explicassem as diferenciações encontradas.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram a tendência contínua à retração glacial nas últimas décadas das bacias de drenagens glaciais do Monte Melimoyu e indicaram que as Bacias de Drenagem desta região são sensíveis às mudanças climáticas. Os resultados possibilitaram identificar diferenças no padrão de retração entre as BD e encontrar possíveis relações com as características de elevação máxima e mínima (elevação da linha de frente das BD), declividade, área total e direção de fluxo predominante. Estes parâmetros, com exceção da orientação das bacias de drenagens, mostraram estar relacionados e podem explicar as diferenças de sensibilidade de algumas geleiras à tendência anual ao aumento da temperatura média superficial do ar e variação da precipitação anual registrada para a região nas últimas décadas.

É relevante a continuidade do monitoramento das mudanças observadas nas bacias de drenagens glaciais da área de estudo, pois assim como outras áreas na cordilheira dos Andes, reflete a tendência de retração contínua nas últimas décadas e possui repercussões como a disponibilidade de recursos hídricos para as populações residentes dessas regiões. Desta forma este trabalho contribui para um monitoramento com um banco de dados em SIG que possa ser disponibilizado via *WebSites*.

Também possibilita o desenvolvendo de estudos comparativos com outras áreas, obtendo-se assim uma maior compreensão do comportamento dinâmico glacial e como as diversas geleiras possuem sensibilidade diferenciada às mudanças climáticas recentes.

Para a maior compreensão dos processos e comportamentos destas geleiras de término em terra é relevante também a realização de estudos que relacionem os dados meteorológicos do período. Estudos geomorfológicos, como a identificação de feições morânicas indicadoras de processos de avanço e retração, que possam estar preservadas e indiquem oscilações no Holoceno, também são relevantes para trabalhos futuros, entre outros. Assim como, considerar as influências do vulcanismo e atividade geotermal que possam influenciar nesta dinâmica.

A resolução espacial de 30 metros ou ainda de 15 m com a banda pancromática (utilizando a fusão de bandas) do sensor OLI TIRS do Landsat 8 não permite o alto nível de detalhamento das áreas de pequenas Bacias de Drenagem Glaciais. Contudo, a sua utilização se mostrou satisfatória para identificar áreas de gelo com o método de delineamento manual.

Na análise e geração de dados com o MDE foi relevante neste estudo a utilização adequada da escala de representação com a resolução espacial e acurácia do dado. O ASTER-GDEM v.2 permitiu extrair informações importantes sobre orientação, elevação

e declividade do Monte Melimoyu. A obtenção de dados em campo possibilitaria integrar os dados em SIG, validar mapeamentos e monitorar com maior precisão. É interessante para trabalhos futuros realizar um comparativo entre os resultados obtidos pelo MDE ASTER-GDEM v.2 com a última versão do SRTM, trazendo assim, também contribuições metodológicas para as análises de ambientes glaciais dos Andes.

Com melhores valores de resolução espacial e temporal, assim como acurácia vertical seria possível determinar melhor a variação das variáveis topográficas e morfometrias de cada bacia de drenagem, atingindo resultados com maior precisão.

A utilização de técnicas de SIG possibilitou o processamento e obtenção de diversos dados que foram registrados em um único sistema espacial de referência, gerando uma base de dados para a descrição da análise morfométrica das Bacias de Drenagem Glaciais e para a continuidade do monitoramento desta área.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADA, R. R., FREITAS, M. W. D. 2015. 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.
- ANIYA, M., SATO, H., NARUSE, R., SKVARCA, P., CASASSA, G. 1997. Recent Glacier Variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. *Arct. Alp. Res.*, v. 29(1), p. 1–12.
- ARENDR, A., ECHELMEYER, K., HARRISON, W., LINGLE, G., VALENTINE, V. 2002. Rapid Wastage of Alaska Glaciers and their Contribution to Rising Sea Level. *Science*, v. 297, p. 382–386.
- ARNALDS, O. 2012. Andosols. In: Chesworth, W. (Ed.) *Encyclopedia of Soil Science*.
- SPRINGER, BERLIN BAHLBURG, H. 2003. On The Influence of Paleozoic Paleogeographic Patterns on Andean Mountain Building in Northwestern Argentina and Northern Chile. *Actas – 10° Congreso Geológico Chileno, Concepción*.
- BARRY, R. 2006. The Status of Research on Glaciers and Global Glacier Recession: A Review. *Progress in Physical Geography*, v.30, n. 3, p.285–306.
- BERTRAND, S., FAGEL, N. 2008. Nature, origin, transport and deposition of andosol parent material in south central Chile (36-42°S). *Catena*, v. 73, p. 10-22.
- BENN, D. I., EVANS, D. J. A. 1998. *Glaciers and Glaciations*. Londres: Edward Arnold, 734 p.
- BISHOP, M., BARRY, R., BUSH, A., COPLAND, L., DWYER, J., FOUNTAIN, A., HAEBERLI, W., HALL, D., KAAB, A., KARGEL, J. 2004. Global land-ice Measurements from Space (GLIMS): Remote Sensing and GIS Investigations of the Earth's Cryosphere. *Geocarto International*, v. 19, n. 2, p. 57–84.
- CASSASSA, G., RIVERA, A., RIBSTEN, P., SCHNEIDER, C. 2007. Current Status of Andean Glaciers. *Science Direct - Global and Planetary Change*, v. 59, p.1-9. Disponível em:  
[https://www.researchgate.net/publication/41821982\\_Current\\_status\\_of\\_Andean\\_glaciers?enrichId=rgreq-7281cfd2e2bd0bc157d744cb4a44cf3-](https://www.researchgate.net/publication/41821982_Current_status_of_Andean_glaciers?enrichId=rgreq-7281cfd2e2bd0bc157d744cb4a44cf3-)

XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzQxODIxOTgyO0FTOjk3NjUxNzczMTQ5MTkzQ  
DE0MDAyOTM0MDU4MjA%3D&el=1\_x\_3

COUDRAIN, A., FRANCOU, B., KUNDZEWICZ, Z. 2005. Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources - Editoria. *Hydrological Sciences Journal*, v. 50, n. 6, p. 925–932.

DOMIC KUSCEVIC, L., FUENTES ARAVANA, A., GECELECIUFFI, P. 2000. *Geografía de Chile*. Santiago de Chile: Santillana de Pacífico S.A.

DYURGEROV, M., MEIER, M. 2000. Twentieth Century Climate Change: Evidence from Small Glaciers. *Proceedings of the National Academy of Science*, v. 97(4), p. 1406–1411.

ELLIES, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile – An overview. *Acta geológica hispánica*, v. 35, n. 3-4, p. 279-284.

ESPINOZA, G., GUTIERREZ, J., HAYEK, E. 1979. Gradiente latitudinal de las temperaturas máximas, mínimas y medias en Chile. *Anales del Museo de Historia Natural Val paraíso*, v. 12, p. 77-82.

FRANCOU, B., VUILLE, M., WAGNON, P., MENDOZA, J., SICART, J.E. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research*, v. 108 (D5), p. 4154.

GARDNER, A., MOHOLDT, G., COGLEY, J., WOUTERS, B., ARENDT, A., WAHR, J., BERTHIER, E., HOCK, R., PFEFFER, W., KASER, G. 2013. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea-Level Rise: 2003 to 2009. *Science*, v. 340, p. 852–857.

GARREAUD, R., LOPEZ, P., MINVIELLE, M., ROJAS, M. 2013. Large-scale control on the Patagonian climate. *Journal of Climate*, v. 26, p. 215-230.

GUT, B. 2008. Geology, climate, and soils of Patagonia. In: *Trees in Patagonia*. Basel: Birkhäuser, p. 9-18.

HAEBERLI, W., BARRY, R., CIHLAR, J. 2000 Glacier Monitoring Within the Global Climate Observing System. *Annals of Glaciology*, v. 31, p. 241–246.

HUGGEL, C., KAAB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, P., PAUL, F. 2002. Remote Sensing Based Assessment of Hazards from Glacier Lake Outbursts: A Case Study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 39(2), p. 316–330.

JOAQUIM, G., 2010. *Utilização Do Sensoriamento Remoto No Mapeamento Das Geleiras De Rocha Da Cordilheira Três Cruces, Bolívia*. Trabalho de Conclusão de Curso, p. 56-76.

KÄÄB. A., HUGGEL C., PAUL F., WESSELS R., RAUP B., KIEFFER H., KARGEL J., 2002. Glacier Monitoring From Aster Imagery: Accuracy and Applications. [http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary\\_GDEM2\\_validation\\_report\\_final.pdf](http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf)

KARGEL, J., ABRAMS, M., BISHOP, M., BUSH, A., HAMILTON, G., JISKOOT, H., KAAB, A., KIEFFER, H., LEE, E., PAUL, F. et al. 2005. Multispectral Imaging Contributions to Global Land Ice Measurements from Space. *Remote Sensing of the Environment*, v. 99, p. 87–219.

KASER, G. 2001. Glacier–Climate Interaction at Low Latitudes. *Journal of Glaciology*, v. 47, p. 195–204.

LEPPÄRANTA, M., GRANBERG, H. 2010. Physics of Glacier Remote Sensing. In: PELLIKA, P., REES, W. (eds.). *Remote Sensing of Glaciers: Techniques for Topographic, Spatial and Thematic Mapping of Glaciers*. London: CRC Press, p. 81-98.

LUEBERT, F., PLISCOFF, P. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. *Editorial Universitaria, Santiago*.

MASIOKAS, M., VILLALBA. R., LUCKMAN. B., LASCANO, M., DELGADO, S., STEPANEK, P. 2008. 20th-Century Glacier Recession and Regional Hydroclimatic Changes in Northwestern Patagonia. *Global Planet Change*. v. 60: p. 85–100.

MEIER, M. 1984. Contribution of Small Glaciers to Global Sea Level. *Science*, v. 226, p. 1418–1421.

MEIER, M., DYURGEROV, M., MCCABE, G. 2003. The Health of Glaciers: Recent Changes in Glacier Regime. *Climatic Change*, v. 59, p. 123–135.

MESSERLI, B., 2001. The International Year of Mountains (IYM), the mountain research initiative (MRI) and PAGES. *Editorial, Pages News*, v. 9, n. 3, p. 2.

MILLER, A. 1976. The climate of Chile. In: Schwerdtfeger, W. (ed.) *Climates of Central and South America*. Elsevier, Amsterdam, p. 113-145.

NARANJO, J., STERN, C., 2004. Holocene Tephrochronology of the Southernmost Part (42°30'-45°S) of the Andean Southern Volcanic Zone. *Revista Geológica de Chile*, v. 31, n. 2, p. 225 - 240.

PETSCH, C. 2014. Sensoriamento remoto da calota de gelo da ilha Renaud - Antártica. Dissertação de mestrado apresentada à *Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geografia*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/94737>.

PELLICCIOTTI, F., RAGETTLI, S., CARENZO, M., MCPHEE, J. 2014. Changes of Glaciers in the Andes of Chile and Priorities for Future Work. *Science of the Total Environment*. v. 493 p. 1197–1210

QUINCEY, D. J., BISHOP, P., KÄÄB, A., BERTHIER, E., FLACH, B., BOLCH, T., BUCHROITHNER, M., KAMP, U., KHALSA, S., TOUTIN, T., HARITASHYA, K., RACOVITEANU, A., SHRODER, F., RAUP, H. 2004. *Digital Terrain Modeling And Glacier Topographic characterization*. In: KARGEL, S., LEONARD, J., BISHOP, P., KÄÄB, A., RAUP, H. Global Land Ice Measurements from Space. Berlin: SPRINGER, p. 113-144.

RABATEL, A., FRANCOU, B., SORUCO, A., GOMEZ, J., C´ACERES, B., CEBALLOS, J., BASANTES, R., VUILLE, M., SICART, J., HUGGEL, C., SCHEEL, M., LEJEUNE, Y., ARNAUD, Y., COLLET, M., CONDOM, T., CONSOLI, G., FAVIER, V., JOMELLI, V., GALARRAGA, R., GINOT, P., MAISINCHO, L., MENDOZA, J., M´EN´EGOZ, M., RAMIREZ, E., RIBSTEIN, P., SUAREZ, W., VILLACIS, M., WAGNON, P. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, v. 7, p. 81–102. Disponível em: <http://www.the-cryosphere.net/7/81/2013/tc-7-81-2013.pdf>.

REBOITA, M., KRUSCHE, N., AMBRIZZI, T., ROCHA, R. 2012. *Entendendo O Tempo E O Clima Na América Do Sul*. *Terra e Didática*, v. 8, n. 1, p.34-50. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v8-1/pdf81/s3.pdf>.

RIGNOT, E., RIVERA, A., CASASSA G. 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. *Science*, v. 302, 434-436.

RIVERA, A., BOWN, F., CASASSA, G., ACUNA, C., CLAVERO, J. 2005. Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S). *Hydrology Science Journal*, v. 50 p. 74-963.

RIVERA, A., BOWN, F., MELLA, R., WENDT, J., CASASSA, G., ACUNA, C. 2006. Ice Volumetric Changes on Active Volcanoes in Southern Chile. *Ann Glaciol.* v. 43, p. 111–22.

RIVERA, A., BENHAM, A., CASASSA, G., BAMBER, J., DOWDESWELL, J. 2007. Ice Elevation And Arealchanges Of Glaciers From The Northern Patagonia Icefield, Chile. *Global Planet Chang.* v. 59, p. 126–37.

RIVERA, A., CORRIPIO, J., BROCK B., CLAVERO, J., WENDT, J. 2008. Monitoring Ice Capped Active Volc´An Villarrica in Southern Chile by Means of Terrestrial Photography Combined With Automatic Weather Stations and GPS. *J. Glaciol.* v. 53, p. 920–30.

RIVERA, A., BOWN, F., CARRIÓN, D., ZENTENO, P. 2012. Glacier Responses to Recent Volcanic Activity in Southern Chile. *Environmental Research Letters*, v.7, p. 014036. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/1/014036>.

RIVERA, A., BOWN, F. 2013. Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37e46S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 45, p. 345

ROCHA, A., A., S. 2014. Caracterización Glaciológica De Chile Y Valoración De Servicios Ecosistémicos De Glaciares En Base A Mercados Reales (Estudio De Caso Del Monumento Natural El Morado). *Trabalho e Conclusão de Curso. Universidade de Chile, Santiago.*

ROE, G. 2011. What do glacier tell usa bout climate variability and climate change? *Journal of Glaciology*, v. 57, p. 203.

ROSA, K., MENDES, Jr, C., VIEIRA, R., DANI, N., SIMÕES, J. 2014. Análise Morfométrica Do Setor Norte Da Baía Do Almirantado, Ilha Rei George, Shetlands Do Sul,Antártica. *Boletim Geográfico*, v. 32, n. 1, p. 52-61.

SAGREDO, E. A., LOWELL, T.V. 2012.Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change*, v. 86-87, p. 101-109.

SALAMANTIN, A., MURAV'YEV, Y., SHIRAIWA, T., MATSUOKA, K. 2000. Modelling Dynamics of Glaciers in Volcanic Craters. *Journal of Glaciology*. v. 46, p. 87-177.

SCHAEFER, M., MACHGUTH, H., FALVEY, M., CASASSA, G. 2013. Modeling Past and Future Surface Mass Balance of the Northern Patagonia Icefield. *Journal Of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 118, p. 571-588.

SIMÕES, J. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. *Pesquisa Antártica Brasileira*. v. 4 p. 119-154.

TACHIKAWA, T., KAKU, M., IWASAKI, A., GESCH, D., OIMOEN, M., ZHANG, Z., DANIELSON, J., KRIEGER, T., CURTIS, B., HAASE, J., ABRAMS, M., CRIPPEN, R., CARABAJAL, C. 2011. Compiled by Dave Meyer4 on behalf of the NASA Land Processes Distributed Active Archive Center and the Joint Japan-US ASTER Science Team. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results*.

Landsat 8 - cena Disponível em: USGS, 2015. <https://www.usgs.gov/>

VUILLE, M., KASER, G., JUEN, I. 2008. Glacier Mass Variability in the Cordillera Blanca, Peru and its Relationship With Climate and Large Scale Circulation. *Global and Planetary Change*, v. 63, p. 14-28.

VUILLE, M., FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B.G., BRADLEY, R.S. 2008. Climate change and tropical Andean glaciers-Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, v. 89, p.79-96.

VANDEKERKHOVE, E. 2014. *The volcanic ash soils of Northern Chilean Patagonia (44°– 48°S): Distribution, weathering and influence on river chemistry*. Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen: Gent. 99p.

WILLIS, M., MELKONIAN, K., PRITCHARD, M., RAMAGE, J. 2012. Ice Loss Rates At The Northern Atagonian Icefield Derived Using A Decade Of Satellite Remote Sensing. *Remote Sensing Environment*, v. 117. p. 184–98.

WARREN, C., ANIYA, M. 1999. The Calving Glaciers of Southern South America. *Global and Planetary Change*, v. 22, p. 59–77.