

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RECENTES VARIAÇÕES NA MORFOLOGIA DAS GELEIRAS  
DO MONTE MELIMOYU ( $44^{\circ}5'S$ ,  $72^{\circ}51'O$ ) – CHILE

FILIPE DAROS IDALINO

ORIENTADORA: PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. KÁTIA KELLEM DA ROSA

PORTO ALEGRE, FEVEREIRO DE 2019

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

RECENTES VARIAÇÕES NA MORFOLOGIA DAS  
GELEIRAS DO MONTE MELIMOYU (44°5'S, 72°51'O) –  
CHILE

FILIPE DAROS IDALINO

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Kátia Kellem da Rosa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões

Dr. Bijeesh Kozhikkodan Veettil

Dr. Denilson Ribeiro Viana

Dissertação de mestrado  
apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Geografia como  
requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Geografia.

PORTO ALEGRE, FEVEREIRO DE 2019

# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

**Reitor:** Rui Vicente Oppermann

**Vice-Reitor:** Jane Fraga Tutikian

## INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Diretor:** André Sampaio Mexias

**Vice-Diretor:** Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Idalino, Filipe Daros

Recentes variações na morfologia das geleiras do Monte Melimoyu (44°5'S, 72°51'O) - Chile. / Filipe Daros Idalino. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2019.  
[88 f.] il.

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2019.

Orientador(es): Kátia Kelle da Rosa

1. Retração glacial. 2. Análise multitemporal. 3. Patagônia Norte Chilena. 4. Monte Melimoyu. I. Título.

CDU 551.32

---

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Miriam Alves

CRB 10/1947

# **DEDICATÓRIA**

**Dedico este trabalho à minha  
família.**

*Cada um de nós compõe a sua história,  
cada ser em si carrega o dom de ser capaz,  
E ser feliz.*

*Almir Sater.*

## **Agradecimentos**

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, por toda sua estrutura e pela possibilidade de realizar este curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado, fundamental para a realização da pesquisa.

Ao Centro Polar e Climático (CPC), pelos apoios financeiros e da infraestrutura de alto nível disponível para o desenvolvimento do trabalho.

À professora orientadora, Dra. Kátia Kellem da Rosa, pela paciência, dedicação e tantas outras qualidades que constroem uma orientação sem igual, digna de uma profissional de alto nível. É uma honra tê-la como mentora e companheira em todos esses anos de caminhada.

A todos os colegas de laboratório, amigos do CPC, professores, pesquisadores, doutorandos, mestrandos e bolsistas de iniciação científica não aqui nomeados, pelo companheirismo de sempre nas horas de trabalho, distração e nos momentos além laboratório.

Aos meus amigos e companheiros de casa, por todos os bons momentos que tive o prazer de participar no nosso "andar superior", tanto aos que já seguiram suas vidas, quanto aos que ainda compartilham e fazem parte do meu dia-a-dia.

À minha família acima de tudo e todos, minha mãe Lourdes, meu pai Admilcio, meu irmão Jian e minha irmã Ana Paula, que com o apoio de sempre fizeram com que a fadiga e os problemas nunca se tornassem maior que a vontade de conquistar os meus objetivos.

A todas as outras pessoas aqui não mencionadas, amigos, familiares, que fizeram e fazem parte desta caminhada, onde nada é fácil, tampouco de graça, estando presente nos bons momentos e também nos ruins, o que nos faz entender o como é importante não estar sozinho.

## Resumo

Esta dissertação investiga variações em área e elevação das linhas de frente das geleiras do Monte Melimoyu (44°5'S - 72°51'O), localizado na região norte da Patagônia chilena, região de Aisén (América do Sul), entre 1970 e 2017, e compara com tendências na precipitação anual e temperatura média superficial do ar no período de 1950-2017. Imagens multiespectrais do Sentinel-2A e dados GLIMS foram utilizadas na análise em SIG para realizar o mapeamento da retração de geleiras e para a estimativa das mudanças na área glaciada. As características geomorfométricas (hispometria, declividade e a orientação) foram analisadas utilizando dados do ASTER-GDEM v.2. Para as análises climáticas da região, foram utilizadas séries temporárias de precipitação das estações meteorológicas de La Junta (43°58'S-72°39'O) e Puerto Aysén Ad (45°23'S-72°39'O), do Explorador Climático, Chile, e dados de reanálise de temperatura da universidade de Delaware. A precipitação anual média aproximada foi de 2359 mm no período de 1950 a 2017, e mostra tendência de diminuição de aproximadamente -18 mm/ano. Os dados de temperatura mostram média anual de 9,87°C e uma tendência contínua de aumento na região de 0,04°C entre 1948 e 2017. Diante disso, a superfície glaciada total em 1970 era de 80,97 km<sup>2</sup>, e em 2017 a área coberta pelas geleiras foi de 52,14 km<sup>2</sup> (-28,53 km<sup>2</sup> de área perdida), o que representou que aproximadamente uma perda de 35% de área total no período analisado. Todas as geleiras mostraram uma tendência à perda de área, com destaque geleiras nos setores Oeste, Sudoeste e Nordeste, com perdas entre 65% e 44% de área glaciada. Geleiras nos setores Oeste, Sudoeste e Norte apresentam as maiores variações de elevação da linha de frente, com variações entre 74 m e 468 m. Os contrastes entre as geleiras em perda de área e variação de elevação da linha de frente estão relacionados às diferenças de área e geomorfometria de cada geleira e as recentes variações das geleiras podem estar relacionadas com as tendências de aumento da temperatura do ar e diminuição da precipitação anual apresentadas. Muitas das geleiras que apresentaram as maiores perdas percentuais de área e variações da elevação da linha de frente no período, possuem as menores dimensões, altos valores de declividade e de elevação no setor frontal, e algumas podem desaparecer nas próximas décadas devido à continuidade das tendências a condições mais quentes e secas observadas para a Patagônia Norte chilena.

**Palavras-chave:** Retração glacial; Análise multitemporal; Patagônia Norte Chilena; Monte Melimoyu.

## Abstract

This dissertation investigates variations in area and the front lines elevation of the glaciers of Mount Melimoyu (44°5'S - 72°51'O), located in northern Patagonia, Aisén Region (South America), between 1970-2017, and compare with trends in annual precipitation and mean surface air temperature in the period 1950-2017. Sentinel-2A multispectral images and GLIMS data were used in GIS analysis to realize the retreat mapping of glaciers and to the estimated of glacierized area changes. The geomorphometric characteristics (hypsometry, slope and aspect) were analyzed using ASTER-GDEM v.2 data. For the climatic analyzes of region, were used temporal series of annual precipitation of La Junta (43°58'S-72°39'O) and Puerto Aysén Ad (45°23'S-72°39'O) stations, of Explorador Climático - Chile, and temperature data of reanalysis from the University of Delaware in the Mount Melimoyu region for the period 1950-2017. The mean precipitation was 2539 mm in the period 1950-2017 and is evidenced a tendency to decrease precipitation of approximately -18 mm per year. The temperature data show an annual average of 9.87°C and a continuous trend of increase in the region of 0.04°C between 1948-2017. On this, the total glacierized surface in 1970 was 80.97 km<sup>2</sup>, and in 2017 the covered area by glaciers was 52.14 km<sup>2</sup> (-28.53 km<sup>2</sup> of area lost), which represented approximately a loss of 35% in the glacial area for the analyzed period. All glaciers show a trend of area loss, with emphasis to glaciers in the West, Southwest and Northeast sectors, with losses between 65% and 44% of glacierized area. Glaciers in the West, Southwest and North sectors show the highest variations of front line elevation with variations between 74 m and 468 m. The contrasts between glaciers in loss of area and variation of front line elevation are related to differences in area and geomorphometry of each glacier and the recent glaciers variations may be related with trends of increased air temperature and decrease in annual precipitation presented. Many of glaciers that presented the highest percentage loss of area and variations of front line elevation in the period have the smallest dimensions, high values in the slope and elevation on frontal sector, and some glaciers may disappear in next decades due to the continuity of trends to warmer and drier conditions observed to the Chilean Northern Patagonia.

**Keywords:** Glacial retreat; Multitemporal analysis; Chilean Northern Patagonia; Mount Melimoyu.



## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Objetivo geral	11
1.1.1	Objetivos específicos	11
1.2	Justificativa	11
1.3	Área de Estudo	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1	Morfologia e Dinâmica das Geleiras	15
2.2	Características Ambientais da Patagônia Norte	18
2.2.1	Clima e Características Atmosféricas da Patagônia Norte	19
2.2.2	Deformação e Fluxo de Gelo da Patagônia Norte	23
3	METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	27
3.1	Artigo 1: Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data	28
3.2	Artigo 2: Variabilidade anual de precipitação e temperatura média superficial do ar no período de 1950-2017 no norte da região de Aisén - Chile	45
3.3	Artigo 3: Respostas das geleiras do Monte Melimoyu, Chile, às tendências mais secas e quentes na Patagônia Norte para as últimas décadas	58
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

# 1 INTRODUÇÃO

Pesquisas glaciológicas indicam que geleiras do mundo estão retraindo (BARRY, 2006; GARDNER *et al.*, 2013; COOK *et al.*, 2016). Em regiões montanhosas, as geleiras são importantes fontes de água doce que contribuem para a sustentabilidade das atividades socioeconômicas (COUDRAIN *et al.*, 2005), para as alterações no nível médio do mar e também à diferenciação do albedo da atmosfera (RIGNOT *et al.*, 2003; WILLIS *et al.*, 2012).

Esforços são realizados por cientistas no inventário, monitoramento e entendimento do estado atual das massas de gelo, bem como sua distribuição e volume, interações com o clima, influência de diferentes fatores na sensibilidade das geleiras a mudanças climáticas, 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 & GIERING, 2017).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) podem ser utilizados como base para a interpretação e caracterização desses ambientes (RIGNOT *et al.*, 2003) e as imagens de satélite, além de disponibilizadas gratuitamente, apresentam alto potencial à aplicação de metodologias voltadas às análises temporais. Diversos estudos têm aplicado MDE's, como o SRTM e ASTER (*Advanced Spaceborn Thermal Emission Radiation*) - GDEM (*Global Digital Elevation Model*) e imagens de satélite, como as missões Landsat e Sentinel-2A para analisar mudanças em ambientes glaciais com técnicas em SIG (Sistemas de Informações Geográficas).

As regiões chilena e argentina dos Andes tem mostrado mudanças nas geleiras, como balanço negativo de massa, com a retração glacial e diminuição de volume (RIGNOT *et al.*, 2003; FRANCOU *et al.*, 2003; COUDRAIN *et al.*, 2005; CASASSA *et al.*, 2007; IPCC, 2013; RABATEL *et al.*, 2013; PELLICCIOTTI *et al.*, 2014; MERNILD *et al.*, 2015).

O presente projeto tem como questionamento principal entender como as geleiras do Monte Melimoyu, derivadas de um campo de gelo e em uma região temperada dos Andes, com proximidade marítima e precipitação elevada, variaram em extensão e elevação da linha de frente nas últimas décadas.

## 1.1 Objetivo geral

Investigar as variações em área e elevação das linhas de frente das geleiras no Monte Melimoyu (44°5'S - 72°51'O), localizado na região norte da Patagônia chilena, região de Aisén (América do Sul).

### 1.1.1 Objetivos específicos

- a) Descrever as características morfométricas das geleiras, tais como área, hipsometria, declividade e a orientação;
- b) Determinar possíveis tendências na precipitação média anual e da temperatura anual média superficial do ar e os eventos associados à estas, na região do Monte Melimoyu, no período de 1950 a 2017, pelo uso de dados de estações meteorológicas e de reanálises;
- c) Investigar a variação da elevação de linha de frente e da área das geleiras e possíveis relações com a variabilidade da precipitação média anual e temperatura média anual no período 1950 a 2017.

## 1.2 Justificativa

As geleiras respondem às variações e mudanças climáticas inerente às questões de balanço de energia e é fundamental a diferenciação entre esses fatores para a correta interpretação das alterações glaciais do passado e para a atribuição correta de mudanças atuais (ROE, 2011). Elas podem fornecer uma perspectiva de longo prazo para o estudo das variações climáticas (KLOK & OERLEMANS, 2004) e são considerados indicadores-chave para evidenciar as mudanças climáticas globais (DYURGEROV & MEIER, 2000; HOELZLE *et al.*, 2003; HAEBERLI, 2005; OERLEMANS, 2005).

Pesquisas glaciológicas indicam que geleiras na região norte da Patagônia estão retraindo. As pequenas bacias de drenagens glaciais da cordilheira dos Andes que possuem cenários de desaparecimento nos próximos anos (RIVERA *et al.*, 2007; SCHAEFER *et al.*, 2013; SCHAEFER *et al.*, 2015; MOUGINOT & RIGNOT, 2015). Os resultados destes processos podem contribuir para a elevação média do nível do mar (RIGNOT *et al.*, 2003). As variações de área das geleiras em estudo podem apresentar consequências direta na disponibilidade de recursos hídricos na região, como a disponibilidade de água doce e também influenciar na alteração do nível do mar.

As variáveis climáticas são informações relevantes para o entendimento do comportamento dos sistemas ambientais, a Criosfera (JABERALANSAR *et al.*, 2018). Geleiras no Campo de Gelo Norte da Patagônia mostraram retração em resposta ao aumento da temperatura e ao decréscimo na precipitação, registrada desde meados do Holoceno até sua fase recente, nos séculos XVII e XIX (BERTRAND *et al.*, 2012). A continuação dessas tendências de mudança climática possivelmente resultará na redução do volume de gelo, como na região sul da América do Sul, incluindo o desaparecimento de pequenas geleiras (MAZZALI *et al.*, 2017).

As flutuações na posição terminal das geleiras, no balanço de massa e na área foram estudadas como sensíveis indicadores do clima por mais de século e são reconhecidas como um dos indicadores mais confiáveis das mudanças climáticas (FOREL, 1985; CIHLAR & BARRY, 2000; OERLEMANS, 2005; HAEBERLI, 2005; ZEMP *et al.*, 2015).

Dessa forma, acredita-se que é relevante entender os fatores que tem influenciado no balanço de massa pela quantificação da perda de área por meio do monitoramento dessas geleiras, e comparando os resultados com os dados de estações meteorológicas regionais. As geleiras do Monte Melimoyu foram escolhidas como área de estudo pela falta de dados geomorfométricos atualizados sobre as geleiras. É relevante o entendimento do comportamento dinâmico desta parte da Criosfera, obtendo dados de retração atualizados e com maior detalhe espacial e também a análise de tendência e correlação com dados meteorológicos. A geração e disponibilização de um banco de dados e em SIG podem auxiliar na ampliação do entendimento da dinâmica glacial de áreas semelhantes e no contínuo monitoramento dessa região.

### **1.3 Área de Estudo**

As massas de gelo escolhidas como área de estudo (Figura 1) formam um campo de gelo sobre um vulcão e estão localizadas na região norte da Patagônia chilena, no norte da XI região administrativa do Chile, região de Aisén (América do Sul). O Monte Melimoyu, a 44°5'S – 72°51'W, é um extenso vulcão inativo (com última erupção explosiva datada de 1800 anos) alcançando 2400 m de altitude, com aproximadamente 9,65 km de diâmetro na orientação Norte-Sul e possui uma cratera circular com cerca de 1,5 km de diâmetro coberta de gelo.

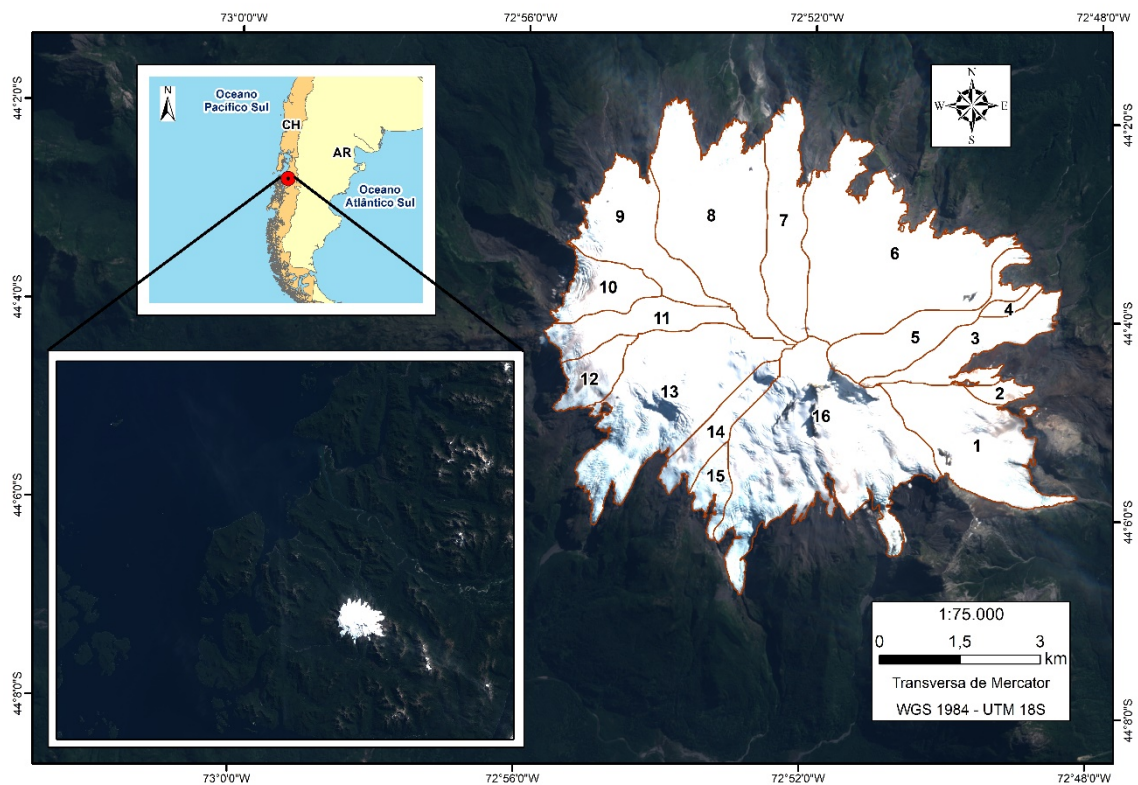


Figura 1: Localização do Monte Melimoyu. Dados Sentinel-2A, composição RGB 432 – cor verdadeira.

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 (MILLER, 1976).

Essa região, que também é chamada Patagônia chilena, é frequentemente influenciada por ciclones, e o elevado volume de precipitação deve-se à elevação do ar úmido proveniente do sudeste do Pacífico (GARREAUD *et al.*, 2013). Em contraste com o leste da Patagônia, a também chamada Patagônia Argentina que apresenta condições atmosféricas mais secas (400 a 1000 mm de chuvas por ano) caracterizando um clima semiárido (KÖPPEN, 1936).

As geleiras do Monte Melimoyu possuem uma área de cerca de 52,19 km<sup>2</sup> em formato circular, porém irregulares. O relevo não está totalmente coberto por gelo (Figura 2), deixando assim aparecer as feições vulcânicas do monte. Conforme essas características e sua área total, o Monte Melimoyu pode ser classificado como um *campo de gelo*, uma geleira que cobre área extensa, com superfícies plana ou ondulada e não é extenso o suficiente para formar o domo

de uma calota de gelo (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017).

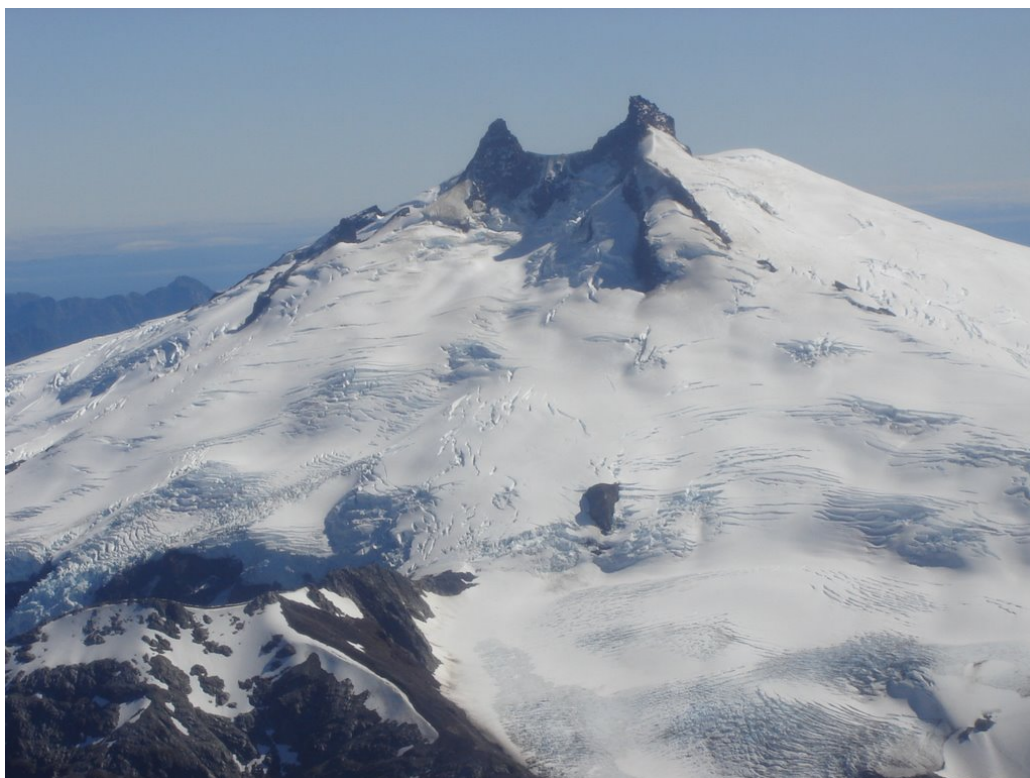


Figura 2. Feições rochosas do Monte Melimoyu livres de neve e/ou gelo. Fonte: Geoview, Chile. Disponível em: <http://cl.geoview.info/melimoyu,6715352p>. Acesso em: 03/05/2018.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Morfologia e Dinâmica das Geleiras

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 muitas vezes induzida pela orografia, e da baixa taxa de ablação, a qual diminui com a altitude (LEPPÄRANTA & GRANBERG, 2010). Elas seguem uma determinada rede de escoamento, sendo formadas pelos níveis de acumulação de neve e seu fluxo de gelo é direcionado pelas oscilações na topografia do terreno (ANDRADA, 2015).

A forma de uma geleira é função do clima e da topografia, e a morfologia de qualquer geleira é única para a sua localização na superfície da Terra. Consequentemente, há uma ampla variedade de morfologias de geleiras (Tabela 1), desde uma pequena geleira de nicho até os grandes mantos de gelo (BENN & EVANS, 1998).

Tabela 1. Classificação morfológica das geleiras (Benn & Evans, 1998).

Classificação de primeira ordem	Classificação de segunda ordem
Manto de gelo e calota de gelo não controlada pela topografia subglacial	Domo de gelo, corrente de gelo e geleira de descarga
Geleiras controladas pela topografia subglacial	Campo de gelo, geleira de vale, geleira de anfiteatro, piemonte de gelo, flanco de gelo, geleira de nicho
Plataformas de gelo	Plataformas de gelo confinadas, plataformas de gelo não confinadas e colinas de gelo.

Geleiras de montanha, ou geleiras alpinas caracterizam-se por qualquer geleira que flui entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial (SIMÕES, 2004; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017). Por consequência da própria capacidade erosiva do seu corpo de gelo e também deposicional, algumas geleiras são classificadas como Geleiras Rochosas (em espanhol *Glaciares Rocosos*, em inglês *Rock Glaciers*). São reconhecidas pela estrutura de fluxo característica e cobertura superficial de detritos (FERRANDO, 2017). Essa cobertura pode ser caracterizada como mantos detríticos



e pode estar relacionada a deposição morânicas (FERRANDO, 2017). Essa camada de detritos pode influenciar de diversas maneiras a dinâmica de uma geleira, onde sua dinâmica e possíveis mecanismos de alimentação-fusão estão claramente relacionados à interação entre precipitação de neve, o aumento de aporte radiativo, o aquecimento resultante e o papel das diferentes espessuras da cobertura de detritos (FERRANDO, 2017).

Nem todas as geleiras de regiões montanhosas possuem a morfologia do terreno entre paredes de vales, existem ainda as *Calotas de Gelo* e os *Campos de Gelo*.

Calota de Gelo é um corpo de gelo aproximadamente circular e, por definição, possui área inferior a 50000 km<sup>2</sup> e cobre totalmente a paisagem subjacente (CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017). São menores que os mantos de gelo, e podem ter vários domos e geleiras de descarga (Simões, 2004). Campos de Gelo são geleiras que cobrem extensas áreas, de superfície plana ou ondulada, mas não são extensos o suficiente para formar o domo de gelo (CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017). Ao contrário da calota de gelo, os campos não cobrem totalmente a topografia do local, e sua morfologia superficial é fortemente controlada pelo embasamento (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010).

Dentro da classificação das formas e tamanhos os campos de gelo são facilmente reconhecidos ao longo da Patagônia, principalmente em altas latitudes. Na região Sul da América do Sul (em latitude a cima de 40°S), de acordo com Avarena and Luckman (2009) se encontram em diversos tamanhos e formas como os campos de gelo Norte e Sul da Patagônia (Figura 3).



Figura 3. Campos de gelo Norte e Sul da Patagônia – Chile. Imagem do Google Earth, 13/12/2015.



Os campos de gelo da Patagônia estão entre os maiores da terra. Eles têm apenas 90 km de largura, mas estende-se por 360 km (Figura 3), entre as latitudes 46°S e 51°S de latitude (CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017). Esses campos de gelo são escoados por geleiras de diversas morfologias, que fluem através de brechas e passagens entre as montanhas (SIMÕES, 2004).

Uma 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. Formam-se quando o balanço de neve ou gelo é sempre positivo, quando os índices de acumulação anual são maiores do que os de ablação (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017). 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. Independentemente da região de formação, em todos os casos, geleiras podem ser divididas (SANCHES, 2013) em duas zonas:

- Zona de acumulação (Figura 4) que se refere aos pontos onde os processos pelo qual a neve, o gelo e a água são adicionados à geleira, ligados diretamente a precipitação direta de neve, gelo ou água (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017).
- Zona de ablação (Figura 4) que se refere a todos os processos pelo qual a neve, o gelo ou a água são perdidos pela geleira e isso inclui derretimento, evaporação, desprendimento, entre outros (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017).

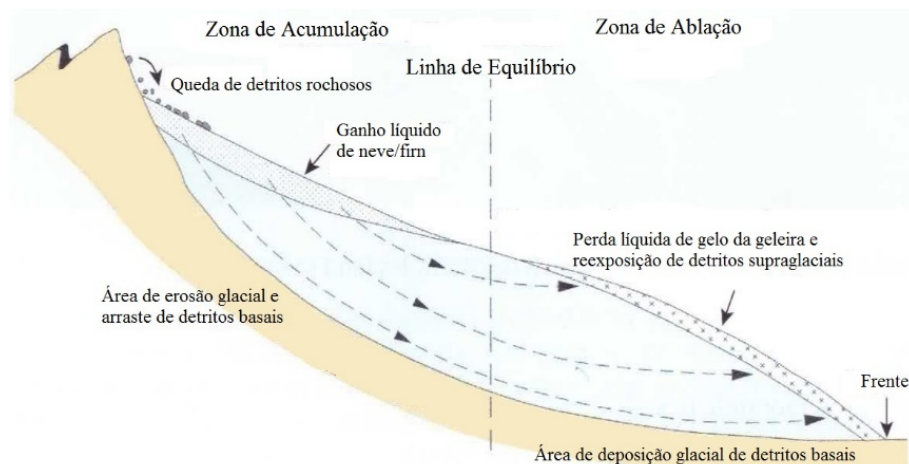


Figura 4. Esquema da seção longitudinal através de uma geleira de montanha ou de vale, ilustrando as áreas de acumulação e de ablação no contexto do fluxo de geleiras (Hambrey & Alean, 2017).

As regiões de acumulação se encontram nas áreas de altitudes mais elevadas (Figura 4), onde as temperaturas médias são mais baixas (iguais ou inferiores a 0° C) e as condições são propícias à precipitação de neve, já as regiões de ablação se encontram nas áreas de altitudes menos elevadas, onde as temperaturas são mais amenas e as condições são propícias à deglaciação. No ponto da superfície da geleira (Figura 4), onde durante o período de um ano, a ablação é igual à acumulação há a chamada Linha de Equilíbrio (BENN & EVANS, 2010). É determinada no final do período de ablação e frequentemente ocorre no limite entre o gelo sobreposto e o gelo de geleira (SIMÕES, 2004).

Sendo assim as geleiras são sistemas com entradas e saídas de massa, sendo que a relação entre ganho e perda de gelo é referida como balanço de massa (BEEL, 2013), podendo ser positivo ou negativo e resulta na dinâmica de retração frontal (SIMÕES, 2004). A frente da geleira corresponde ao limite inferior da mesma, que pode ser do tipo maré, quando uma geleira termina no mar, e de frente em terra, quando uma geleira termina em terra emersa (SIMÕES, 2004; PATERSON, 2010; CHRISTOPHERSON & BIRKELAND, 2017).

## **2.2 Características Ambientais da Patagônia Norte**

A Patagônia Norte, assim como a XI região administrativa do Chile, região de Aisén, é caracterizada por uma paisagem complexa com muitos fiordes e lagos (Figuras 1 e 3) que foram formados por erosão laminar glacial do manto de gelo da Patagônia durante o Quaternário. A Cordilheira 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).

A geomorfologia da área de estudo é dominada por processos glaciais e condicionantes tectônicos, como o vulcanismo, que modelaram a paisagem sob as condições da sua formação (Figuras 3 e 5). Durante fases de glaciação no Quaternário, a paisagem foi modificada por intensa erosão e deposição glacial (ARNALDS, 2012). A atividade vulcânica no sul dos Andes chilenos e pode ser importante para explicar o comportamento das geleiras, sendo que 25% da perda de massa de geleiras no mundo todo pode ser explicado pela atividade geotérmica (RIVERA *et al.*, 2012).



Figura 5. Aspectos físicos da América do Sul. Fonte: geotouring.webnode.pt. Em vermelho, quadrante aproximado da área de estudo.

### 2.2.1 Clima e Características Atmosféricas da Patagônia Norte

A América do Sul abrange terras tanto em baixas quanto em médias latitudes, e possui uma geografia diversificada com a presença da Cordilheira dos Andes. A distribuição das terras sul-americanas em diferentes latitudes e com formas de relevo variadas proporcionam a atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a não homogeneidade climática desta região (REBOITA *et al.* 2010).

Segundo Köppen (1936) o clima da região de Aisén é classificado como Cfc (Figura 6), de regiões oceânicas e marítimas da região e das regiões costeiras ocidentais do continente, onde o clima é temperado úmido sem estação seca com verão curto e ameno.

Em níveis baixos no cinturão ocidental (aproximadamente latitudes 40° a 70°), observa-se um padrão complexo de sistemas móveis de alta e baixa pressão, enquanto que, entre 6000 m e 20000 m, existe um fluxo de ar constante do Oeste (BARRY & CHORLEY, 2013). A área escolhida como objeto deste estudo, assim como regiões situadas além da latitude 40° S da América do Sul é uma área chave para estudar a variabilidade climática neste

hemisfério pelos fluxos de ar do Oeste e as temperaturas da superfície do mar no Pacífico (ARAVENA & LUCKMAN, 2009).

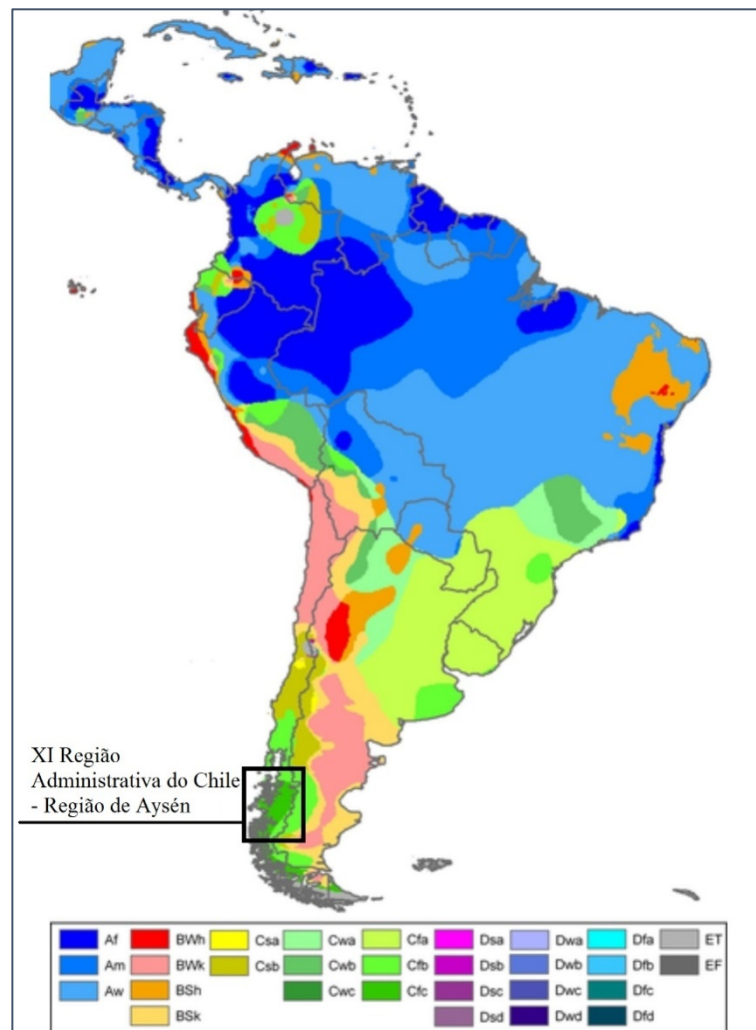


Figura 6. Classificação climática de Köppen na América do Sul (PEEL *et al.*, 2007). O retângulo demarcado na figura representa a localização aproximada da Região de Aysén.

O centro-sul do Chile (Figura 6) (onde se encontra a área de estudo) apresenta um ciclo anual de precipitação com valores máximos no inverno e mínimos no verão, apresentando maior homogeneidade ao longo do ano na parte mais austral (Figura 7) (REBOITA *et al.*, 2010). A ocorrência de precipitação nesta região é condicionada pela posição do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, conhecido como ASPS (ACEITUNO, 1980). Esse sistema é um centro de alta pressão semipermanente que deve sua existência ao movimento subsidente da célula de Hadley. No inverno, como o ASPS localiza-se mais ao norte (25° S – 90° W) do que no verão (33° S – 90° W), os ventos de oeste ao sul do ASPS atingem a Cordilheira dos Andes

nas latitudes, sendo forçados a ascender. Neste processo, o escoamento é resfriado adiabaticamente e favorece a precipitação na região (REBOITA *et al.*, 2010).

Para a Patagônia, a variabilidade nos padrões de precipitação também é influenciada, em uma escala inter-anual e inter-decadal, pelo Índice da Oscilação Antártica e pelo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (AVARENA & LUCKMAN, 2009; SCHAEFER *et al.*, 2013). O ENOS é um fenômeno acoplado de atmosfera oceânica enraizada no Pacífico tropical, e tem um efeito direto e forte sobre o Equador, o Peru e o norte do Chile, além de um efeito indireto (através de teleconexões atmosféricas) em grande parte da América do Sul subtropical estendendo-se também a altas latitudes (GARREAUD *et al.*, 2009). Anomalias de chuva e temperatura associadas à ocorrência dos eventos El Niño e La Niña são a principal fonte de variabilidade interanual para a América do Sul (ROPELEWSKI & HALPERT, 1987; ACEITUNO, 1988; KILADIS & DIAZ, 1989; MARENGO, 1992).

Perez *et al.* (2018) afirma que durante o período de 2000 a 2016, houve cinco ocorrências de El Niño ou fase quente do ENOS (2002, 2004–2005, 2006–2007, 2009 e 2015–2016) e três ocorrências de La Niña (1999–2000, 2007–2008 e 2010–2011). Os períodos de máxima cobertura média de neve, encontrados para a bacia hidrográfica de Aysén, coincidem com os períodos de La Niña (PEREZ *et al.*, 2018), com exceção do ano de 2005.

As regiões montanhosas da Patagônia também causam influência nos ventos na atmosfera, pois, ao encontrar uma barreira topográfica, uma corrente de ar tende a ascender e, nesse processo, pode ocorrer a formação de nuvens e precipitação. Normalmente, na presença de topografia elevada, ocorre chuva a barlavento (lado em que o ar ascende) e condições secas a sotavento (lado em que o ar desce), pois o ar descendo após cruzar a topografia se aquece e seca o que não favorece a formação de nuvens (REBOITA *et al.*, 2012).

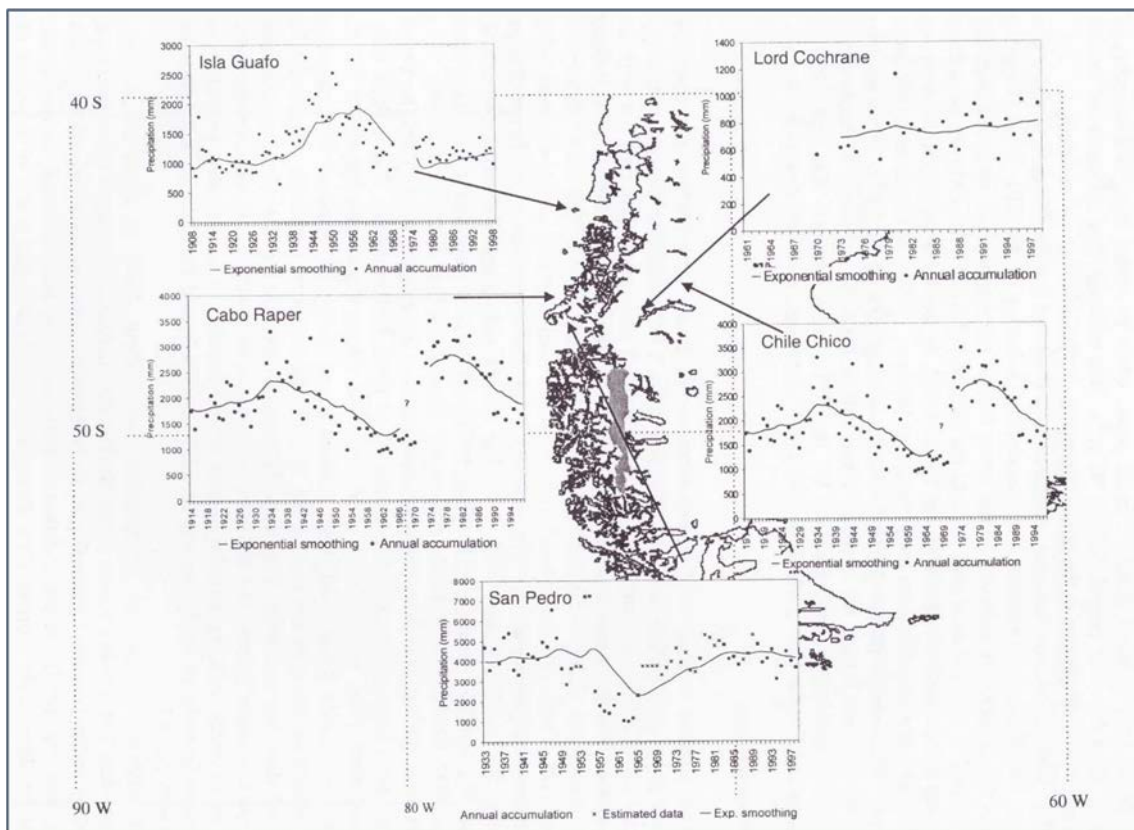


Figura 7. Precipitações recordes de estações pluviométricas localizadas ao norte do Campo de Gelo Sul – Chile (CASASSA, et al. 2002).

O efeito orográfico da circulação na Patagônia é pronunciado, com altos valores de precipitação que excedem os 5000 mm/ano em certas áreas a oeste da Patagônia e valores de até 200 mm/ano ou menores do Pampa Argentino para o leste (CASASSA *et al.*, 1998).

O regime de precipitação aumenta para o sul e com elevação do terreno e mostra uma forte sazonalidade, podendo apresentar regiões com ocorrência de um verão seco e com cinco meses (maio-setembro) em algumas porções territoriais ao norte, concentrando cerca de 80 – 90% da precipitação anual total (CARRASCO *et al.*, 2005). Já a porção Sul do Chile não sofre a ação do ASPS, assim, as massas de ar e as ondas baroclínicas (ondas nos ventos de oeste e que são fontes para o desenvolvimento de sistemas de baixa pressão) atuam o ano todo sobre esta área, o que justifica a precipitação praticamente homogênea (Figura 8) ao longo do ano, diferente do centro-sul (REBOITA *et al.*, 2010).



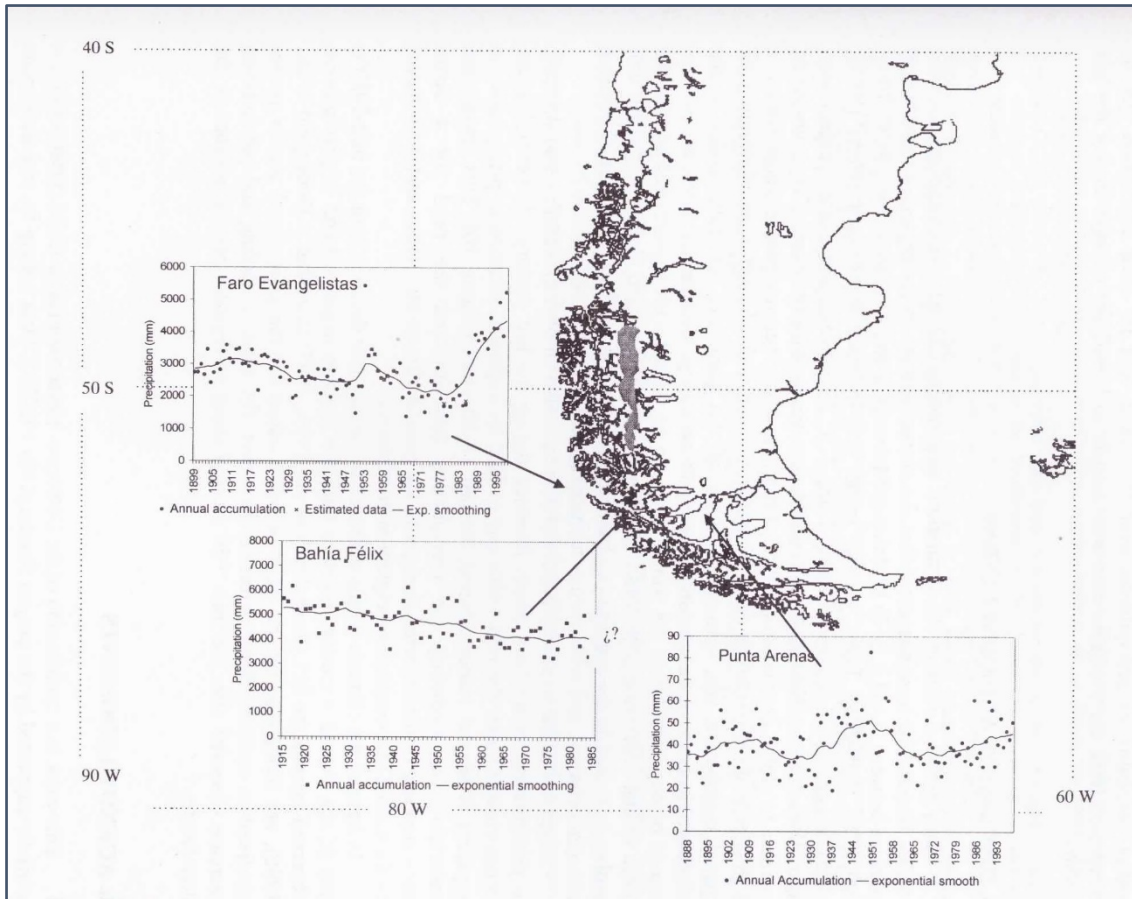


Figura 8. Precipitações recordes de estações pluviométricas localizadas ao sul do Campo de Gelo Sul - Chile (Casassa, et al. 2002).

## 2.2.2 Deformação e Fluxo de Gelo da Patagônia Norte

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.

Os limites entre as geleiras e os demais componentes da paisagem (rochas, lagos, oceanos, dentre outros tipos de término) são conhecidos como linha de frente das geleiras. Estes limites são utilizados em mapeamentos como parâmetros para medir a retração das geleiras, processo que caracteriza a diminuição das diminuições lineares da geleira (SIMÕES, 2004) e representam balanços de massa negativos apresentados em geleiras de montanha em todo o mundo (SANCHES, 2013). Barcaza *et al.*, (2017) avaliaram pela primeira vez um erro de medição com base no tamanho do pixel. No caso das geleiras livres de cobertura de detritos, essas medidas geram um erro de  $\pm 2\%$ , que foi ampliado para 5% como um erro representativo, levando em conta os piores cenários para as geleiras. Porém, os mesmos apontam que os possíveis erros foram minimizados por meio da edição manual dos dados.

O vulcanismo tem influência por uma combinação de fatores, tais como a atividade efusiva e o aumento da temperatura geotérmica na base de geleiras, 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). No entanto, para a região sul do Chile, Rivera *et al.* (2006) relaciona que as geleiras localizadas em vulcões estão retraindo em resposta a forçantes climáticas. Na região norte da Patagônia o clima é altamente influenciado pelo Oceano Pacífico e os eventos decorrentes deste e também pelas oscilações atmosféricas provenientes do Sul, neste caso da Antártica.

A atividade vulcânica pode afetar as geleiras de duas formas opostas: isolando o gelo com cinzas e detritos, resultando em uma redução da ablação superficial e aumentando o derretimento subglacial devido à atividade geotérmica, resultando em maior desgaste do que em ambientes vulcânicos não ativos (PELLICCIOTTI *et al.*, 2014). Rivera *et al.*, 2006 avaliaram que as geleiras nos vulcões se encolheram principalmente em resposta a fatores de condução climáticos e, em particular, uma tendência decrescente de precipitação entre 1930 e 2000. Dados de reanálise também sugerem que o fluxo de oeste diminuiu principalmente sobre a Patagônia norte-central durante as últimas quatro décadas, causando uma tendência de seca a oeste dos Andes (GARREAUD *et al.*, 2013). No entanto, eles também descobriram que a resposta das geleiras é altamente heterogênea e também específica dependendo da atividade de vulcões individuais.

Com relação ao isolamento térmico por deposição sedimentar, algumas geleiras rochosas em regiões montanhosas podem apresentar uma cobertura de detritos às vezes tão uniforme que se tornam quase imperceptíveis quando próximas às encostas e a outras geleiras de rochas (FERRANDO, 2017). A cobertura sedimentar pode ter efeito de transmissor térmico ou isolante térmico a partir de  $\pm 3$  m de espessura, dependendo da seleção granulométrica e da litologia (FERRANDO, 2017).

Na área de estudo não é evidenciada atividade vulcânica recente capaz de influenciar significativamente no comportamento do gelo. Ainda que muito pouco ainda se conheça sobre as respostas às mudanças climáticas nessas áreas (MASIOKAS *et al.*, 2008; SCHAEFER *et al.*, 2013) as pesquisas indicam que as geleiras estão interagindo com esses condicionantes.

Geleiras do mundo todo estão retraindo continuamente (RIGNOT *et al.*, 2003; RIVERA *et al.*, 2007; WILLIS *et al.*, 2012), mas muito pouco se sabe sobre como essas alterações são ligadas a mudanças no clima para áreas da Patagônia Norte. Masiokas *et al.* (2008), atribuíram



a recessão de geleiras da região Norte da Patagônia, em 39°S e 43°S, à uma tendência para condições mais secas e mais quentes detectadas durante o período de 1912–2002, assim como Bertrand *et al.*, (2012) apontaram que as flutuações da geleira Gualas, no Campo de Gelo da Patagônia Norte, foram principalmente controladas por mudanças na precipitação e não de temperatura.

Tais condições podem influenciar diretamente no balanço de massa dos corpos de gelo. Schaefer *et al.* (2013) usou um modelo de balanço de massa de geleira para avaliar o passado e futuro balanço de massa superficial do campo de gelo da Patagônia Norte e evidenciou que a acumulação aumentou de 1990 para 2011 em relação a 1975–1990, enquanto as perdas de parto dobraram em 2000–2009, em comparação com 1975–2000.

A retração e o avanço da frente de geleiras foram utilizados como medidas de variações climáticas desde que os seres humanos tenham vivido próximos a ambientes glaciais. O clima está mudando constantemente, com variações anuais sobrepostas a tendências de longo prazo (NESJE & DAHL, 2000).

Muito pouco ainda se sabe sobre todas as variáveis do ambiente que causam o processo de ablação nas geleiras do Monte Melimoyu. Os estudos existentes indicam que a variável climática é uma das que exerce maior influência (PELLICCIOTTI *et al.*, 2014; MASIOKAS *et al.*, 2008), onde o aumento das temperaturas favorece o derretimento das camadas de gelo, forçando o processo de ablação das geleiras. Porém, além do aumento das temperaturas, outras condições como a diferença dos índices de precipitação podem influenciar na resposta da dinâmica de balanço de massa das geleiras.

As diferenças existentes nos climas locais, de orientação, tamanho, inclinação, e de velocidade individual das geleiras pode explicar o comportamento diferente de cada uma (NESJE, 1992; CASASSA *et al.*, 1997; HARRISON & WINCHESTER, 1998). Além disso, o efeito de uma determinada flutuação climática no balanço de massa da geleira depende da distribuição área-altitude da geleira (NESJE & DAHL, 2000). A declividade no setor frontal das geleiras pode ser um fator determinante no processo de ablação. Este fator pode influenciar em uma maior velocidade de deslizamento basal (ROSA *et al.*, 2015).

Cai *et al.* (2014) ressaltam que os eventos de El Niño estão associados frequentemente com incrementos na precipitação, podendo também aumentar a temperatura do ar, que juntos podem ter um efeito de altitude pronunciado na cobertura de neve durante a primavera e o outono. Nesse sentido, um aumento na temperatura do ar faz a isoterma de 0°C ascender para

maiores elevações, resultando em uma maior proporção de precipitação líquida ao invés de neve (MERNILD *et al.*, 2008; MALMROS *et al.*, 2018).

O regime termal de uma geleira influencia na dinâmica da água de degelo, tanto na deformação do gelo e na lubrificação do fundo quanto nos sedimentos e desenvolvimento de formas de relevo erosionais e deposicionais, assim como na sua resposta à variabilidade climática (HAMBREY, 1994). De certa forma, com a diminuição da altitude, a temperatura aumenta e a precipitação tende a se tornar cada vez mais líquida e a dinâmica das geleiras pode ser influenciada por essa condição climática, causando aumento de ablação e por consequência, a retração das linhas de frente.

Embora o clima seja o fator preponderante no regime térmico também há influência da topografia, que por sua vez também influencia no padrão local de precipitação (SANCHES, 2013). A orientação de uma geleira determina a intensidade da radiação solar que chega até a sua superfície e resulta em padrões complexos de temperaturas do solo e do ar e nas taxas de evaporação (WHITE *et al.*, 1992).

Nessas regiões montanhosas, a redistribuição de neve ocorre principalmente por vento e redistribuição gravitacional (PELLICCIOTTI *et al.*, 2014). Um número crescente de trabalhos recentes sugeriu que ambos os processos são importantes e capazes de mover quantidades consideráveis de massa (BERNHARDT & SCHULZ, 2010; GASCOIN *et al.*, 2013). Onde o vento induz o local da deposição preferencial de precipitação (LEHNING *et al.*, 2008; DADIC *et al.*, 2010), a neve é transportada por saltação (BERNHARDT *et al.*, 2009) e suspensão, podendo ocorrer a causa sublimação da neve (GASCOIN *et al.*, 2013). O efeito gravitacional exerce influência no balanço de massa, pois a neve pode ser controlada pela inclinação do embasamento local. Avalanchas são especialmente condicionadas a terrenos íngremes. Este processo é responsável pelo transporte de camadas espessas de neve dessas áreas (PELLICCIOTTI *et al.*, 2014; KUHN *et al.*, 1999).

### 3 METODOLOGIA, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das análises, obtidos a partir da execução procedimentos metodológicos permitiram avaliar as variações em área e elevação das linhas de frente das geleiras no Monte Melimoy, as tendências na precipitação média anual e temperatura média superficial do ar no período 1950-2017 e as características geomorfométricas (hispometria, declividade e a orientação). A metodologia, os resultados e discussões da dissertação estão organizados em forma de três artigos, conforme as normas do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

O artigo 1, publicado na revista *Geocarto International*, analisou uma imagem multiespectral do Sentinel-2A e dados do GLIMS (RGI, 2017) para o mapeamento de retração das geleiras, a fim de estimar as mudanças na área glaciada do Monte Melimoyu, no período de 1970-1986, 1986-2000, 2000-2017. Os resultados mostraram tendência contínua de retração das geleiras, com uma diminuição de 80,97 km<sup>2</sup> em 1970 para 52,14 km<sup>2</sup> em 2017, representando 35,61% de área perdida. As geleiras apresentaram uma grande sensibilidade para a variabilidade meteorológica, influenciadas pela geomorfometria e de área.

O artigo 2, submetido para a revista *Confins*, investigou a variabilidade nos dados meteorológicos e investigar a influência dos eventos de teleconexões com estes, na Patagônia Norte, na região do Monte Melimoyu, para obter uma série temporal completa de dados anuais de precipitação e de médias de temperatura superficial do ar, no período 1950 a 2017. A precipitação média aproximada foi de 2359 mm entre 1950 e 2017 e mostra uma tendência de diminuição da precipitação de -18 mm por ano. Os dados de reanálise de Delaware apresentaram uma temperatura média superficial do ar de 9,87°C no período de 1948 a 2017, e uma tendência contínua de aumento de 0,04°C por ano na temperatura na região.

O artigo 3, submetido para a revista da *ANPEGE (Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia)*, investigou a relação da variação da elevação de linha de frente e área das geleiras no Monte Melimoyu, estimadas utilizando dados do ASTER-GDEM v.2, dados do Sentinel-2A, do GLIMS e os dados da variação de área apresentados no artigo 1, com a variabilidade da precipitação anual e temperatura média anual, no período de 1950-2017. As geleiras apresentam variações de elevação da linha de frente entre 74 m e 570 m, e uma relação direta das variações das geleiras com a tendência de aumento da temperatura média do ar e diminuição da precipitação anual, apresentando contrastes relacionados às diferenças geomorfométricas, como a declividade.

### 3.1 Artigo 1: Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data

Artigo publicado na revista *Geocarto International*, do grupo Taylor & Francis Online, no dia 24 de janeiro de 2019.

Documento comprobatório de publicação e endereço do artigo:




Dear Filipe Daros Idalino,

Congratulations, we're delighted to let you know that your final published article (the Version of Record) is now on Taylor & Francis Online.

[Recent glacier variations on Mount Melimoyu \(44°50'S-72°51'W\), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data](#)

**Want to tell others you're published? Use your free eprints today**  
Every author at Taylor & Francis (including all co-authors) gets 50 free online copies of their article to share with friends and colleagues as soon as their article is published. Your eprint link is now ready to use and is:

<https://www.tandfonline.com/eprint/clsJy5tAzRHAdBDGGaGX/full?target=10.1080/10106049.2018.1557262>


  

You can paste this into your emails, on social media, or anywhere else you'd like others to read your article. Author feedback tells us this is a highly effective way of highlighting your research. Using this link also means we can track your article's downloads and citations, so you can measure its impact. Find out more about [sharing your work](#), how you can work with us to [highlight your article](#).

**Have you registered to access your Authored Works?**  
If you haven't already done so, now is the time to register for your [Authored Works](#), our dedicated center for all Taylor & Francis published authors. Authored Works gives you instant access to your article, and is where you can go to see how many people have downloaded it, cited it and access your Altmetric data.

To access your Authored Works, you will need to register with the email address below:

[filipe.daros.idalino@gmail.com](mailto:filipe.daros.idalino@gmail.com)

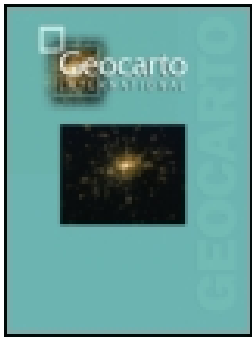


Taylor & Francis

URL do artigo:

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2018.1557262>

<https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557262>



## Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data

Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Francisco Ferrando Acuña, Bijesh Kozhikkodan Veettil, Jefferson Cardia Simões & Enoil Souza Jr

To cite this article: Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Francisco Ferrando Acuña, Bijesh Kozhikkodan Veettil, Jefferson Cardia Simões & Enoil Souza Jr (2018): Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data, Geocarto International, DOI: [10.1080/10106049.2018.1557262](https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557262)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1557262>



Accepted author version posted online: 11 Dec 2018.

Published online: 24 Jan 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 64



View Crossmark data [↗](#)



## Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data

Filipe Daros Idalino<sup>a</sup>, Kátia Kellem da Rosa<sup>b</sup>, Francisco Ferrando Acuña<sup>c</sup>, Bijesh Kozhikkodan Veetil<sup>d,e</sup> , Jefferson Cardia Simões<sup>b</sup>  and Enoil Souza Jr<sup>f</sup>

<sup>a</sup>Mestrando acadêmico no Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil; <sup>b</sup>Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil; <sup>c</sup>Departamento de Geografía, Universidad de Chile, Santiago, Chile; <sup>d</sup>Department for Management of Science and Technology Development, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam; <sup>e</sup>Faculty of Environment and Labour Safety, Ton Duc Thang University, Ho Chi Minh City, Vietnam; <sup>f</sup>Centro Polar e Climático (CPC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brazil

### ABSTRACT

This work analyzed the application of Sentinel-2 multispectral imagery and GLIMS data for mapping glacier retreat and to estimate glacier area changes of Mount Melimoyu, located in northern Patagonia, Chile for the period between 1970 and 2017. The results showed a decrease of about 35.61% in the area for the period analyzed and there is a continuing retreating trend in the region. The decreasing trend in mean annual precipitation may explain the recent glacier changes, which indicates a large sensibility for meteorological variability of glaciers, which is influenced by geomorphometry and glacier area, in the region. Using Sentinel 2 imagery, we provided inventory of rock glaciers in the study area. Glacier outlines obtained through manual delineation showed comparable results with the glacier outlines using Sentinel-2 MSI data in the study area, which shows greater accuracy in glacier mapping using Sentinel-2 data.

### ARTICLE HISTORY

Received 26 April 2018  
Accepted 5 December 2018

### KEYWORDS

Glacier Retreat;  
Geomorphometry; Remote Sensing; Chilean Patagonia; Sentinel-2

## 1. Introduction

Monitoring the changes in glacier surface is essential for understanding glacier dynamics and glacial geomorphological changes (Hubbard et al. 1998). Rivera et al. (2006) showed that glacierized areas of volcanoes in Patagonia are shrinking due to changes in the regional climate. Other than regional and global climate changes, volcanic activities (Rivera et al. 2012) and anthropogenic factors, such as mining activities (Urkidi 2010), are creating threats to glaciers in the central Andes of Chile. In the Chilean and the Argentinean Andes, glaciers have shown a negative mass balance (Coudrain et al. 2005; Francou et al. 2003; Casassa et al. 2007; IPCC 2013). Davies and Glasser (2012)

mentioned that there was an accelerated shrinkage of glaciers in the Patagonian Andes since the 1980s and also that a few isolated glaciers and ice caps shrank faster between 1986 and 2001 compared to the 2001–2011 period. Similar observations were done by Paul and Mölg (2014) regarding glacier surface changes and also a 59% increase in the area of glacial lakes between 1985 and 2011. Furthermore, Pellicciotti et al. (2014) pointed out that Patagonian glaciers were shrinking and thinning in the past decades and similar results were presented in Rignot et al. (2003) and Rivera et al. (2007). Mernild et al. (2015) mentioned that the mass loss in this region is  $-295 \pm 195 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  for the 2003–2012 periods. Malmros et al. (2016) demonstrated an area loss of 16% in the central Chilean Andes from 1989 to 2013/14.

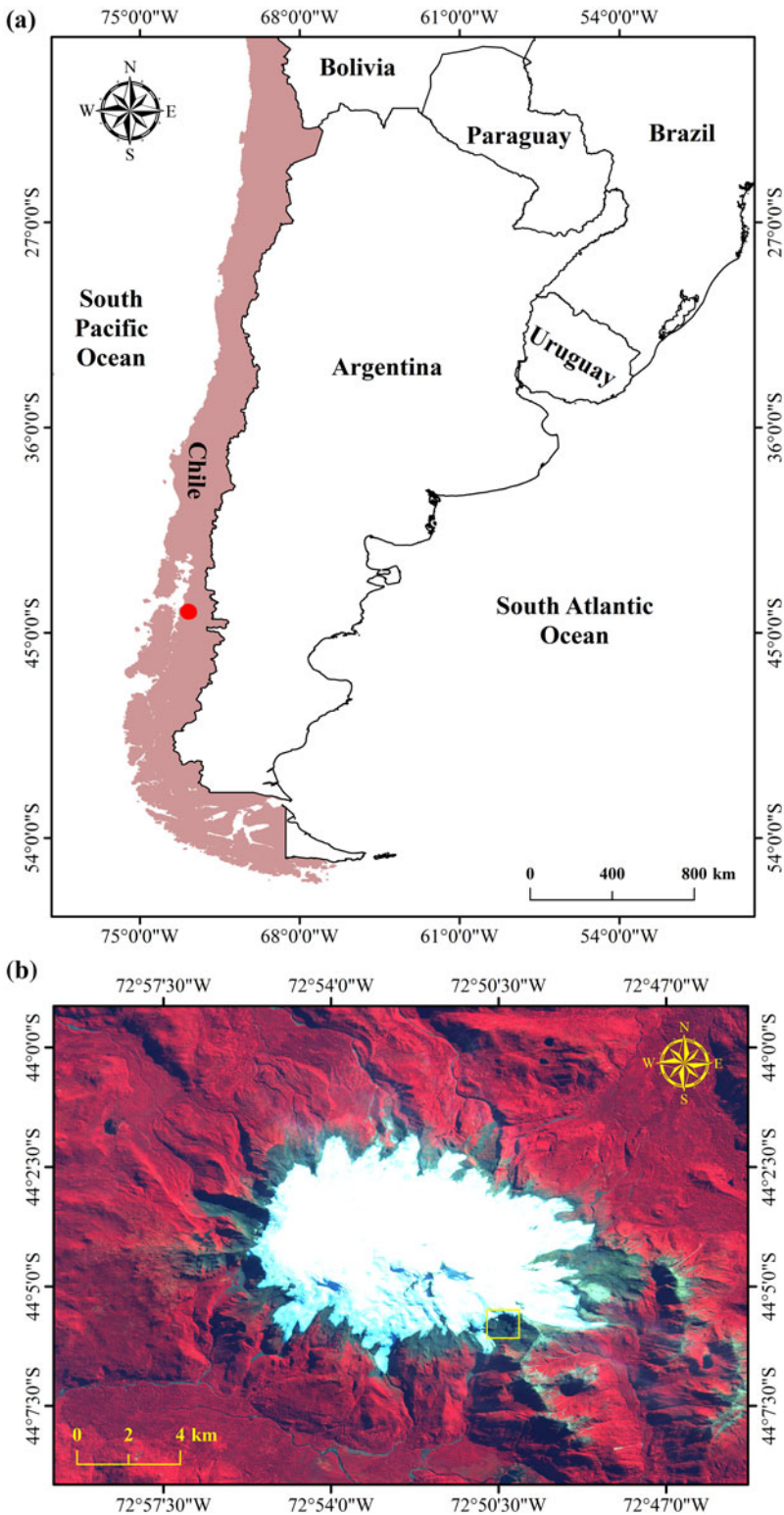
Despite the fact that the ice-covered regions in the Chilean Andes are eventually decreasing in size due to regional and global factors, a number of studies on mass balance fluctuations and glacier-climate interactions were supported by mining companies (Rabatel et al. 2011; MacDonell et al. 2013; Cornwell et al. 2016). As mentioned by Pellicciotti et al. (2014), even though the glaciers in the Andes of Chile are shrinking and losing mass, the number of studies conducted and the available data are still insufficient to provide a synopsis of glacier changes in the past and to explain the causes of the observed glacier changes.

Multitemporal remote sensing data is a key element for the accurate mapping of glacier fluctuations, which is one of the key indicators of climate change (Williams et al. 1991; Hall et al. 2003). Digital elevation models (DEM) and other remote sensing data can be used for the interpretation and characterization of glacial environments (Rignot et al. 2003). Kääb et al. (2002) emphasized that DEMs generated by photogrammetric methods from ASTER optical sensor data have to be evaluated in terms of accuracy and applicability for glaciological studies, allowing a series of studies, such as geomorphometric analysis, including mountainous regions. This article investigated variations in the area of glacierized surface of Mount Melimoyu ( $44^{\circ}05'S - 72^{\circ}51'W$ ) for the period from 1970 to 2017 and the relationship between the geomorphometric distribution of glacier surface and their temporal sensitivity using ASTER-GDEM v.2 and Sentinel 2 data.

## 2. Study site and climate conditions

Mount Melimoyu (Figure 1) is a permanently ice-covered active stratovolcano (2400 m a.s.l.) with a length of 10 km in the east-west direction (Lliboutry 1956; Naranjo and Stern 2004) and a 1.5 km diameter summit crater, which has a total of 16 glaciers radiating out in all directions. This poorly studied ice-covered volcano without historical eruptive activities is located in the southern volcanic zone in the southern Andes region (northern area of Chilean Patagonia). The study area is situated in the XIth administrative region of central Chile in the Aisen region. This region is characterized by a complex landscape with many fiords and lakes formed by glacial laminar erosion of the Patagonian ice sheet during the Quaternary. The study area is located in the South of the glaciological zones of Chile, determined by the National Glacier Strategy (DGA) in 2009.

The studied area has a cold climate with oceanic influence on heavy rains, strong westerly winds and high humidity due to the existence of the Andean orographic barrier (Garreaud et al. 2009). According to Köppen (1918), the western sector of the Andean reliefs in Aysen Region, where the Mount Melimoyu is located, has humid temperate climate with short and cold summer without dry season and pronounced maritime influence. The Patagonian glaciers are influenced by mid-latitude atmospheric circulation pattern and Antarctic cold fronts (Rasmussen et al. 2007). Synoptic-scale winds are



**Figure 1.** (top) Geographical location of Mount Melimoyu in Central Chile area; (bottom) Sentinel-2 image subset acquired in 2017 with RGB (8-4-3) false-colour composite. Rock glacier identified is shown within yellow block.



predominantly westerly (Kalthoff et al. 2002), from the Pacific Ocean, and steep Andean relief generate a high amount of precipitation in the Patagonian Ice Field (Rivera and Casassa 2004). The orographic effect on the Patagonian circulation is high, with the precipitation may reaches up to 5,000 mm/year westward and to 200 mm/year eastward (Casassa et al. 1998). The mean precipitation for the period 1970–2015 in this region is 2213 mm, with a maximum and a minimum of 3015 and 1405 mm, respectively (recorded by La Junta weather station, 45 m a.s.l., at Lat: 43°58'S; Long: 72°25'W).

According to the temperature data near the study area (Chaitén Lat: 42°56'S; Long: 72°42'W and Puerto Aisén Lat: 45°24'S; Long: 72°44'W), the average annual surface air temperatures is between 9 and 9.5 °C. The variations in temperature values are minima along the coastal sector and increase upward in the continent. The lack or discontinuity of records prevents us analyzing the trends in climatological data for long periods. However, Rosenbluth et al. (1997) and Falvey and Garreaud (2009) indicated an increase of ~0.25 °C per decade in the air temperature for the central Andes between 1975 and 2001.

### 3. Data

For updating the variations in glacier area between 2000 and 2017, Sentinel 2 (level 1C) data were used (Table 1). Sentinel 2 is a large-scale, high-resolution, multi-spectral European mission (Sentinel - ESA). Level 1C includes radiometric and geometric corrections, orthorectification, and spatial resolution of up to 10 m.

The Sentinel-2 data were generated by the European Space Agency (ESA) and its system is based on the concurrent operations of two identical satellites flying on a single orbit plane but phased at 180° each, hosting a Multi-Spectral Instrument (MSI) covering the visible to the shortwave infrared spectral range and delivering high spatial resolution imagery at global scale with a high revisit frequency (of 5–10 days). The MSI aims at measuring the reflected radiance from the earth surface through the atmosphere in 13 spectral bands spanning from the Visible and Near Infra-Red (VNIR) to the Short Wave Infra-Red (SWIR). The potential use of Sentinel-2 data for glacier mapping has been discussed in two latest review papers (Kääb et al. 2016; Paul et al. 2016). Recently, Sentinel-2 data have been used extensively in the Andes for glacier mapping (e.g. Veettil 2018; Veettil et al. 2018; Idalino et al. 2018).

For the comparative analysis of glacier retreat, we used the GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) data (Table 1) and processed in ArcGIS® software package. The Randolph Glacier Inventory (RGI 6.0) is a global inventory of glacier outlines (RGI

**Table 1.** Remote sensing data used in this study.

Data	Scale/spatial resolution	Period	Source
Sentinel 2 - L1C T18GXS_A00959	10m	2017/March/17	USGS
ASTER-GDEM v.2 Entity ID: ASTGDENV2_0S45W073	30m (spatial) and 2.4 arc- sec. (horizontal accuracy) Aprox. 12 m (vertical error) Tachikawa et al. (2011)	2011/October/17	USGS
Shapes of the glaciers	30m	1970/January/01 1986/January/14 2000/June/15	GLIMS - <a href="https://www.glims.org/RGI/">https://www.glims.org/RGI/</a>

Consortium 2017), which is a [supplementary data](#) to GLIMS. Production of the RGI was motivated by the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR5).

The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) was developed jointly by the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA) and Japan's Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI). It covers the earth surface between 83°N and 83°S and is comprised of 22,702 tiles. Tiles that contain at least 0.01% land area are available for studies in the Geographic Tagged Image File Format (GeoTIFF) format. Geomorphometric data was obtained using ASTER-GDEM v.2 data (Table 1).

The La Junta weather station (located at 35 km northeast of Mount Melimoyu) has provided the precipitation data used in this study. Meteorological data from Aysén-Ad station (located at 147 km southeast of Mount Melimoyu) were also used when precipitation data from La Junta station is absent for some years. The *Pearson (r)* test for data from these two stations show a correlation of 0.35 for average precipitation. The Aysén-Ad station (located 147 km southeast of Mount Melimoyu) has provided the temperature data used in this study. Meteorological data from Chaitén-Ad station (located 127 km north of Mount Melimoyu) were also used as temperature data from Aysén-Ad station is absent in some years. The *Pearson (r)* test for data from these two stations show a correlation of 0.32 for annual average temperature. These data are available from *Dirección General de Aguas* (DGA), Chile ([www.dga.cl](http://www.dga.cl)).

#### 4. Methodology

The geomorphometric characterization of the study area was performed by generating and interpreting slope maps, hypsometry and aspect using ASTER-GDEM v.2 data. Prior to glacier surface change analysis, all satellite data were coregistered to the 2017 Sentinel-2 scene and GLIMS data. An extraction of total glacier areas and outline delineation were performed for the quantification of glacial area loss as well as retreat rates for the period between 1970 and 2017. Glacier boundaries for 1970, 1986 and 2000 were provided by the GLIMS. In order to get 2017 glacial outline (scale 1:5.000), Sentinel-2 data with false-colour composite (R-G-B: 8-4-3) obtained on 03/17/2017 were used.

A  $\pm 1$  pixel uncertainty has been assumed for glacier areas more than 0.1 km<sup>2</sup> (Frey et al. 2012), which is applied in many recent studies. This uncertainty was estimated based on the Equation (1):

$$A_{er} = \pm 100 (f_s \cdot n \cdot m) / A_{gl} \quad (1)$$

Where,  $A_{er}$  = uncertainty associated with glacier area,  $A_{gl}$  = glacier area from the satellite image,  $n$  = number of pixels defining the perimeter of a glacier,  $m$  = spatial resolution of Sentinel-2 image expressed as area of a pixel (100 m<sup>2</sup> for a Sentinel-2 image with 10 m pixel size), and  $f_s$  is the systematic fractional pixel error and was taken as 1. An additional uncertainty of  $\pm 0.7\%$  was added based on comparing the Sentinel-derived area with Google Earth-derived glacier polygon. The total uncertainty was estimated as the root sum square of  $\pm 1$  pixel uncertainty and additional  $\pm 0.7\%$  uncertainty as given in Bolch et al. (2010).

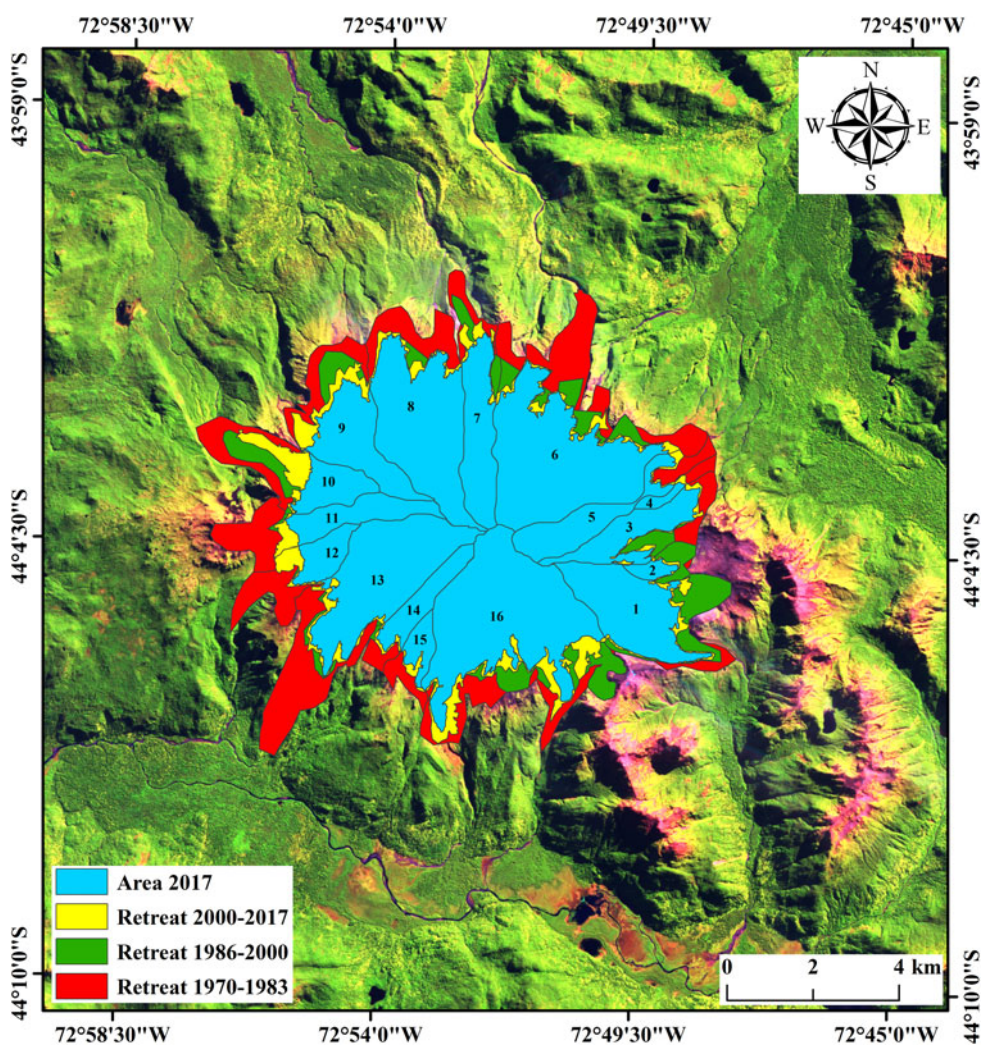
We analyzed the differences between topographic and geomorphometric characteristics of each glacier on Mount Melimoyu. Attributes such as glacier area and its variation over time were also evaluated in comparison to the characteristics determined for each glacier. The evaluation of glacier maps and the analysis of the data resulted from the comparative

analysis among glaciers, observing the differences in sensitivity to the regional atmosphere warming trends have been done for each glacier.

## 5. Results

### 5.1. Overall glacier surface changes

The glacierized area of Mount Melimoyu has been estimated as 52.14 km<sup>2</sup> in 2017 using Sentinel-2 data. The [Figure 2](#) and [Table 2](#) show the total glacier surface loss from Mount Melimoyu for the period between 1970 and 2017 as 28.83 km<sup>2</sup>, which represents 35.6% (0.61 km<sup>2</sup>/year) of the total glacier surface in 1970 (80.97 km<sup>2</sup>). The period of highest glacier surface loss has been observed as between 1970 and 1986 with 23.04% (1.33 km<sup>2</sup>/year) loss from its initial area in 1970. The retreat of glaciers 6, 10, 13 and 16 was more pronounced between 1970 and 1986 as well as between 2000 and 2017. Glaciers 1, 3, 7, 8,

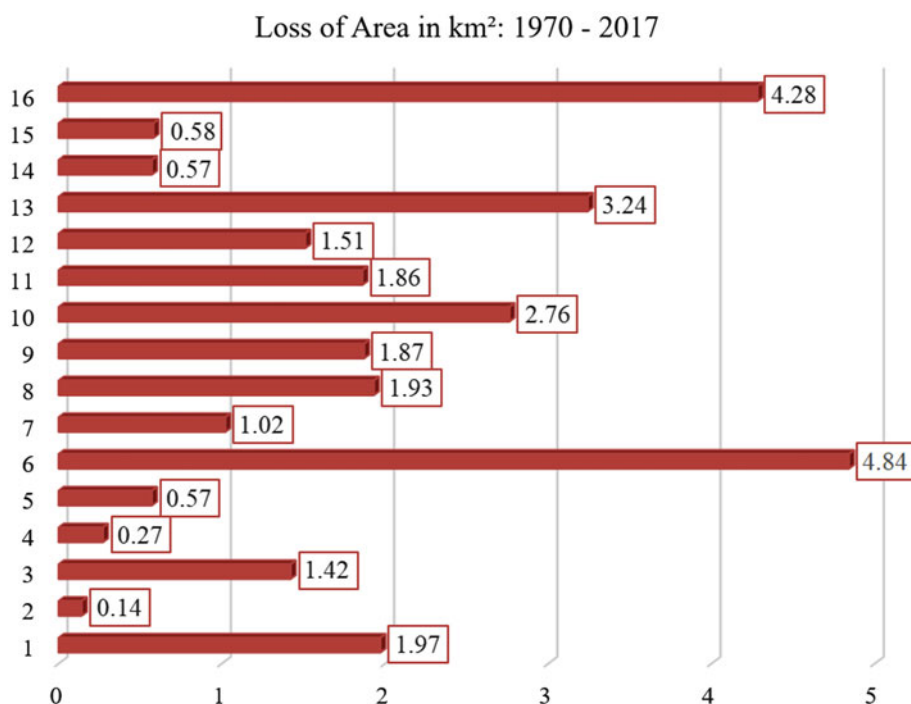


**Figure 2.** Glacier shrinkage map for Mount Melimoyu (1970-2017).

**Table 2. Glaciers area changes and comparison of glacier retreat rates (1970–2017).**

Glacier	Area (km <sup>2</sup> ) 1970	Area (km <sup>2</sup> ) 1986	Area (km <sup>2</sup> ) 2000	Area (km <sup>2</sup> ) 2017	Surface change rate (km <sup>2</sup> /year) 1970–1986	Surface change rate (km <sup>2</sup> /year) 1986–2000	Surface change rate (km <sup>2</sup> /year) 2000–2017	Total Surface change (km <sup>2</sup> ) 1970–2017	Total Retreat rate (km <sup>2</sup> /year) 1970–2017
1	6.07	5.78	4.48	4.1	-0.02	-0.093	-0.022	-1.97	0.042
2	0.5	0.92	0.42	0.36	0.026	-0.036	-0.0035	-0.14	0.003
3	3.63	2.74	2.43	2.21	-0.055	-0.022	-0.0129	-1.42	0.03
4	0.54	0.28	0.31	0.27	-0.016	0.002	-0.0023	-0.27	0.006
5	2.89	2.35	2.44	2.32	-0.034	0.006	-0.007	-0.57	0.012
6	13.12	9.8	8.84	8.28	-0.21	-0.068	-0.0329	-4.84	0.103
7	4.02	3.57	3.29	3	-0.028	-0.02	-0.017	-1.02	0.022
8	8.35	6.75	6.76	6.43	-1	0.0007	-0.0194	-1.93	0.041
9	4.95	4.03	3.81	3.08	-0.06	-0.016	-0.0429	-1.87	0.039
10	4.25	2.97	2.32	1.48	-0.08	-0.046	-0.0488	-2.76	0.059
11	3.73	2.18	2.13	1.87	-0.097	-0.0028	-0.0153	-1.86	0.039
12	2.62	1.21	1.45	1.11	-0.088	0.017	-0.02	-1.51	0.032
13	9.45	6.59	6.6	6.21	-0.18	0.0007	-0.0229	-3.24	0.069
14	2.02	1.51	1.54	1.45	-0.032	0.0021	-0.0053	-0.57	0.012
15	1.31	0.84	0.86	0.73	-0.029	0.0007	-0.0076	-0.58	0.012
16	13.52	10.81	10.71	9.24	-0.17	-0.007	-0.0864	-4.28	0.091
<b>Overall glacier coverage</b>	<b>80.97</b>	<b>62.33</b>	<b>58.39</b>	<b>52.14</b>	<b>-1.165</b> <b>(-1.44</b> <b>%/year)</b>	<b>-0.28</b> <b>(-0.45%/</b> <b>year)</b>	<b>-0.367</b> <b>(-0.63</b> <b>%/year)</b>	<b>-28.83</b> <b>(-35.6%)</b>	<b>0.61</b> <b>(0.76</b> <b>%/year)</b>

Negative values indicate loss of glacier surface.



**Figure 3.** Surface loss (in km<sup>2</sup>) for each outlet glacier between 1970 and 2017.

9, 11 and 12 presented a relatively average retreat and Glaciers 2, 4, 5, 14 and 15 showed smaller area loss (Figure 3).

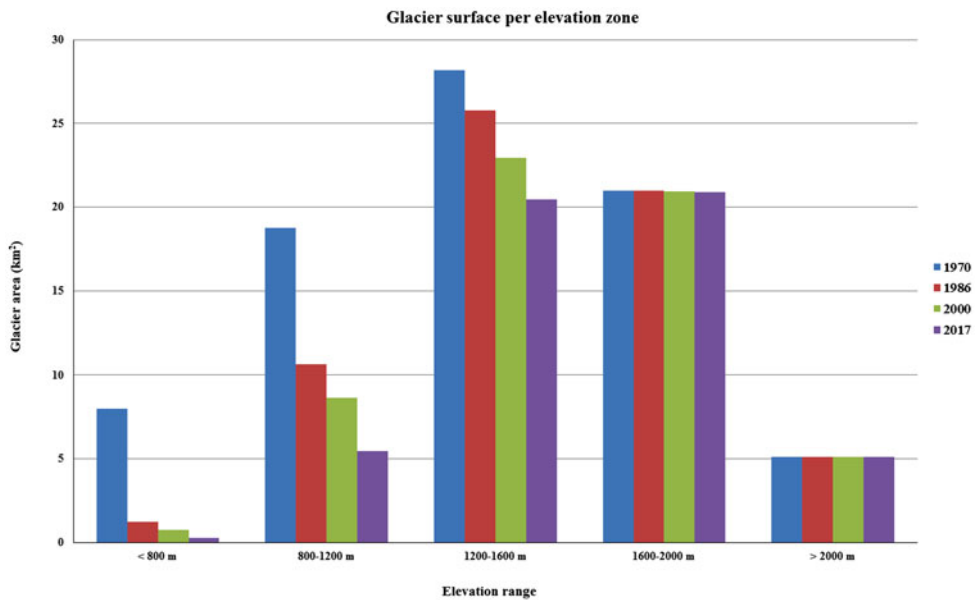
## 5.2. Characterization of the glaciers on Mount Melimoyu

Through visual analysis of Sentinel-2 data, it has been observed that there are 16 glaciers radiating from Mount Melimoyu (Figure 2), shaped and characterized as mountain glaciers. The glaciers were divided based on the elevation as: lower altitude (<1,301 m), medium altitude (1,301–1,500 m) and high altitude ( $\geq 1,501$  m). The drainage of the glacier number 16, which has the lowest elevation (670 m), present an ice flow at the terminus and formed as a rock glacier (with 0.21 km<sup>2</sup> of area), which has not been mapped in GLIMS (Figure 1). The estimated uncertainty for glacier area from Sentinel-2 data was around  $\pm 2.6\%$ . Details of minimum, maximum and mean elevation of glaciers on Mount Melimoyu is presented in Table 3. The glacierized areas of Mount Melimoyu have 670 m of minimum elevation, 2,399 m of maximum elevation and mean elevation of 1,539 m. Overall glacier surface distribution per elevation zones are shown in Figure 4. Nearly 97% (0.16 km<sup>2</sup>/year) of the glacierized areas below 800 m a.s.l. and 71% (0.28 km<sup>2</sup>/year) between 800 and 1200 m have lost during the study period. However, there were no changes in glacier coverage occurred above 1600 m a.s.l.

Overall glacier surface distribution per different slope classes (in degrees) is shown in Figure 5. Glacierized areas with slope higher than 35° lost more than 85% (0.14 km<sup>2</sup>/year) of its ice-covered area in 1970 during the study period. Lowest surface loss was observed in regions with slope between 7° and 21°; slightly more than 23% (0.22 km<sup>2</sup>/year) between 1970 and 2017. Nearly 28% (0.02 km<sup>2</sup>/year) of the ice-covered area in 1970 was lost, where slope below 7°, most of this region belong to lower altitudes.

**Table 3.** Minimum, mean and maximum elevation of the glaciers on Mount Melimoyu.

Glacier number	Minimum (m)	Maximum (m)	Mean (m)
1	737	2,083	1,421.5
2	1,295	1,680	1,487
3	891	2,255	1,573
4	962	1,294	1,128
5	802	2,399	1,600
6	854	2,315	1,584
7	998	2,308	1,653
8	987	2,287	1,637
9	1,168	1,967	1,567.5
10	1,387	1,797	1,592
11	1375	2,076	1,725.5
12	1,144	1,732	1,438
13	700	2,292	1,496
14	1,180	2,264	1,722
15	1,080	1,665	1,372.5
16	670	2,399	1,534.5

**Figure 4.** Glacier area distribution per elevation range on Mount Melimoyu.

Regarding the orientation, the Mount Melimoyu glaciers presented differences in flow directions (Figure 6), which is common for an ice cap covering a volcano summit. Highest shrinkage of glaciers occurred on the western (51% -  $0.07 \text{ km}^2/\text{year}$ ) and north-western (50.5% -  $0.09 \text{ km}^2/\text{year}$ ) slopes. Lowest shrinkage occurred on the northern (28% -  $0.097 \text{ km}^2/\text{year}$ ) and southern (29.9% -  $0.091 \text{ km}^2/\text{year}$ ) slopes.

### 5.3. Variations in precipitation and air temperature

The graph of annual average precipitations (Figure 7) shows a mean value of 2,266 mm/year. The lowest precipitation value of 719 mm/year and the highest value of 3,515 mm/year show a variation from to 2,796 mm between these values. The variation in mean



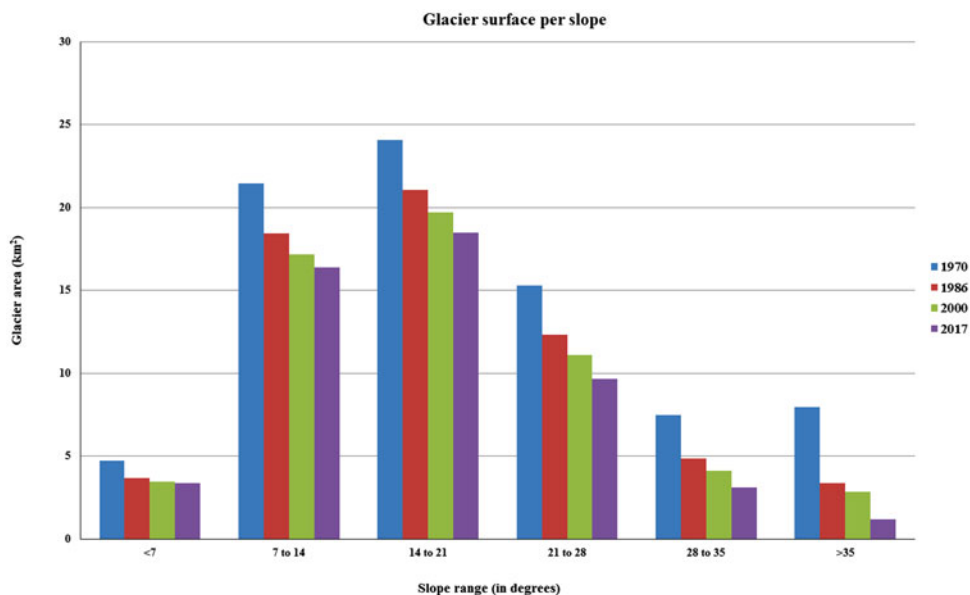


Figure 5. Glacier area distribution per slope on Mount Melimoyu.

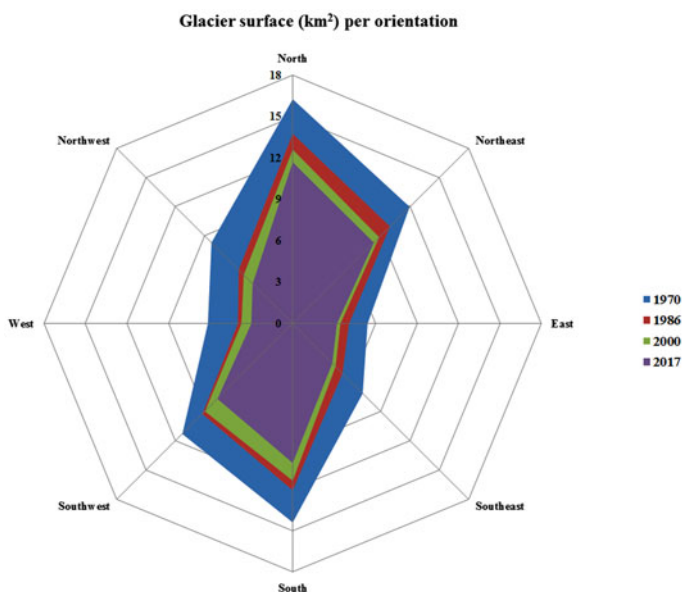
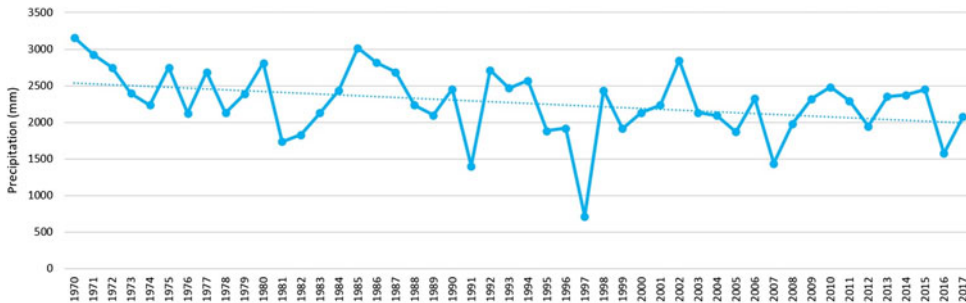


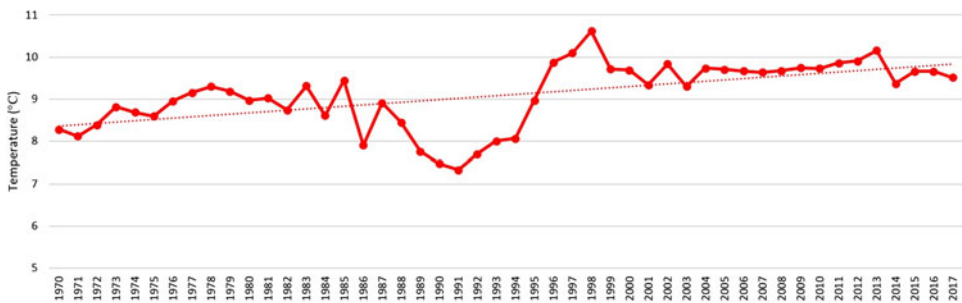
Figure 6. Glacier surface distribution per orientation on Mount Melimoyu (1970–2017).

annual was formed a linear gradient of trends represented by a dashed line. This line has an inclined conduit with trends to decrease in the analyzed period.

The graph for annual average temperatures (Figure 8) shows a mean value of 9.09 °C during the study period. The average temperature in 1970 was 8.28 °C and in 2017 it was 9.52 °C show a variation from to 1.24 °C between these values and an annual increasing of 0.025 °C in average temperature.



**Figure 7.** Trends in the average annual precipitation (1970–2017) at La Junta station, Chile.



**Figure 8.** Trends in the annual average air temperature (1970–2017) at Aisén Ad and Chaitén Ad stations, Chile.

## 6. Discussion

In general, the trends in glacier retreat observed on Mount Melimoyu were similar to the results given in Pellicciotti et al. (2014). The same study (Pellicciotti et al. 2014) pointed out that the Patagonian glaciers, including those glaciers in the northern Zone, were shrinking and thinning in the last decades. Similar observations can be found in a number of studies (e.g. Rignot et al. 2003; Rivera et al. 2007; Masiokas et al. 2008; Davies and Glasser 2012; Willis et al. 2012).

In the study area, there is no evidence of historical volcanic activity or recent eruptive record, but there could be an unknown geothermal activity, even though a very little is known about the responses to climate change in these regions (Masiokas et al. 2008; Schaefer et al. 2013). Rivera et al. (2006) observed that the glaciers located on volcanoes are shrinking in response to climate forcing and this observation is affirmed in recent studies (e.g. Pellicciotti et al. 2014).

The observed trends in glacier retreat from this study for Mount Melimoyu can be related to several factors, such as decreasing precipitation, as highlighted by Masiokas et al. (2008) for the Patagonian glacier recession, principally for the period between 1912 and 2002. Mid-tropospheric warming has been highlighted as one of the causes for glacier retreat in central Chile (Carrasco et al. 2005). The decreasing trend in mean annual precipitation is not the only factor for glaciers retreating in the Chilean Southern Andes. The air temperature data showed an increasing trend in the analyzed period ( $0.025^{\circ}\text{C}/\text{year}$ ). This result is in good agreement with the works of other authors in this region that show an increase of  $0.25^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  (Rosenbluth et al., 1997; Falvey and Garreaud, 2009 and Ferrando, 2014).

The results on fluctuations in glacier area for different periods (Figure 2) show different retreat rates for each glacier and these are related to its geomorphometric



characteristics and size (Figures 4 and 5). The characterization of glacier dynamics on Mount Melimoyu is important for monitoring and understanding of how different topoclimatic and morphoclimatic differences in front elevation, aspect, slope and environmental characteristics might influence the pattern of glacier shrinkage on Mount Melimoyu.

All of the glaciers on Mount Melimoyu, in general, presented a continuous retreating trend. Some glaciers can be grouped based on similar retreating trends during similar periods and in their similarities in total area, maximum elevation and predominant ice flow orientation. Glaciers 6, 10, 13 and 16 presented a higher retreat rate and percentage surface loss for the period between 1970 and 2017 (Figures 2 and 3, Table 2). Glacier number 10, with high retreat, currently has the highest terminus elevation, lowest maximum elevation and a front sector with high slope and is relatively less extensive. It can be argued that glaciers 6, 13 and 16 presented similar retreat pattern due to high slope values, except glacier 10. However, these glaciers presented a current outline elevation (in 2017) not as high as the other glaciers and their areas are not very extensive. It is worth mentioning that surface changes for glacier 6 was previously analyzed in a pilot study (Idalino et al. 2018) and the results were similar.

The studied glaciers presented different predominance in ice flow orientation patterns (Figure 6) and the glacier retreat rates were not low for south-facing glaciers in study area, probably due to their lower maximum elevation compared to other high altitude mountains in the Andean Cordilleras. In contrast to the high topographic influence on the precipitation distribution observed in the Andes Mountains (Garreaud et al. 2009), no clear shrinkage differences were observed in the study area between the west and east sides of the Mount Melimoyu, which can be due to the low elevation of the mountain.

Glaciers 1, 3, 8, 9, 11 and 12 presented relatively slower retreats when compared to other glaciers (Figures 2 and 3). Analysis of geomorphometric parameters of glaciers 8, 9 and 12 (with emphasis on number 9 and 12) presented termini with a high elevation when compared to the rest of glaciers in the group. Glacier number 12, besides presenting a high elevation and slope, the current terminus also presented little extension (Figure 2 and Table 2). Glacier number 1 has the highest surface on the highest slope class and low surface for the current terminus (Figure 4), whilst glacier number 11 has a high slope in the frontal sector and its area is not as extensive as the rest (Figure 2 and Table 2).

The lower retreat of the 2, 4, 5, 7, 14 and 15 glaciers can be related to the high elevation values of the current outlines (Figures 2 and 3 and Table 2). With regard to this retreat pattern, glaciers 14, 15 and 4 also present high values to the current outline (minimum elevation). This retreat pattern, especially for glaciers 5, 7 and 14, can be related to high values of maximum elevation, which influence the mass and energy balance, when compared to the rest. Glacier number 4 presents low slope values that could influence the low flow velocity and consequently a slower retreat.

Rather than high retreat rates on western and north-western slopes, we could not find any relationship between the retreat pattern and the characteristics of the ice flow orientation (Figure 6) that explain their different retreat patterns. Nicholson et al. (2009) mentioned that this region is not characterized as high ridgelines, so the glaciers are not limited to south-facing lee slopes and denote that the glaciers in this region do not have classical altitude-delimited accumulation and ablation areas. Instead, wind patterns determine the spatial distribution of snow accumulation and glacier surface loss, which can be a direction for future research.

The image quality and pixel resolutions are relevant for delineating glacier outlines from satellite images. Areas covered by supraglacial debris and fresh snow were identified from multi-spectral Sentinel-2 imagery, as pointed given in Malenovský et al. (2012). The

10 m spatial resolution of Sentinel-2 images certainly improved the delineation of glacial terrain features and boundaries. Sentinel-2 can be used for further studies to evaluate the potential of this novel data for detecting supraglacial debris, snow and rock glaciers.

## 7. Conclusions

The results of this study evidenced a reduction in glacierized surface of Mount Melimoyu at the rate of 0.61 km<sup>2</sup>/year for the period between 1970 and 2017. The findings improved the current knowledge of the widespread glacier decline pattern sampled from the cryosphere of the southern Andes. More than 1/3rd (0.79%/year) of the total glacier surface has been lost in just four decades in this subtropical region. The differences in the retreat pattern among the glaciers were identified and there are possible relations with characteristics of maximum and minimum elevation (outline elevation of the glaciers), slope and total area.

The decreasing trend in mean annual precipitations and the increase in mean annual temperature can be a possible reason for recent glacier surface changes. These variables, except a south-north facing orientation, have been observed to be related and can explain the differences in sensitivity of some glaciers to the variations in yearly average precipitation and average temperature recorded in the region in recent decades.

These results contribute to the Cryosphere monitoring efforts in this relatively less studied region, are available from Centro Polar e Climático ([www.centropolar.com](http://www.centropolar.com)) and National Institute of Science and Technology–Cryosphere (<http://www.ufrgs.br/inctcriosfera/>), and can be used to update GLIMS. This work provides satisfactory results on application of Sentinel-2 MSI and ASTERGDEM 2 data in these environments, which enables the development of comparative studies in other areas for a better understanding of the dynamic glacier response to regional and global climate change.

## Acknowledgments

The work is supported by the Brazilian Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES), Brazilian National Research Council for Scientific and Technological Development (CNPq), Programa de Pós-Graduação em Geografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), INCT-Cryosphere and Polar and Climate Centre, UFRGS, Brazil.

## ORCID

Bijeesh Kozhikkodan Veetil  <http://orcid.org/0000-0003-4158-4578>

Jefferson Cardia Simões  <http://orcid.org/0000-0001-5555-3401>

## References

- Bolch T, Menounos B, Wheate R. 2010. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sens Environ.* 114:127–137. doi:10.1016/j.rse.2009.08.015.
- Carrasco JF, Casassa G, Quintana J. 2005. Changes of the 0 °C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydrol Sci J.* 50(6):933–948.
- Casassa G, Haeberli W, Jones G, Kaser G, Ribstein P, Rivera A, Schneider C. 2007. Current status of Andean Glaciers. *Global Planet Change.* 59(1-4):1–9.
- Casassa G, Francou B, Ribstein P, Ames A, Alean J. 1998. Glaciers in South America. In: Haeberli, editor. *Into the second Century of World Glacier Monitoring. Prospects and Strategies.* Zurich: World Glacier Monitoring Service, IHP and GEMS. 125–145.

- Cornwell E, Molotch NP, McPhee J. 2016. Spatio-temporal variability of snow water equivalent in the extra-tropical Andes Cordillera from distributed energy balance modeling and remotely sensed snow cover. *Hydrol Earth Syst Sci.* 20(1):411–430.
- Coudrain A, Francou B, Kundzewicz Z. 2005. Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrol Sci J.* 50(6):925–932.
- Davies BJ, Glasser NF. 2012. Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (AD 1870) to 2011. *J Glaciol.* 58(212):1063–1084.
- Falvey M, Garreaud RD. 2009. Regional cooling in a warming world: recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J Geophys Res Atmos.* 114(D4) doi:10.1029/2008JD010519.
- Francou B, Vuille M, Wagnon P, Mendoza J, Sicart JE. 2003. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *J Geophys Res.* 108:4154. doi:10.1029/2002JD002959.
- Frey H, Paul F, Strozzi T. 2012. Compilation of a glacier inventory for the western Himalayas from satellite data: methods, challenges, and results. *Remote Sens Environ.* 124:832–843. doi:10.1016/j.rse.2012.06.020.
- Garreaud RD, Vuille M, Compagnucci R, Marengo J. 2009. Present-day South America climate. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* 281(3-4):180–195.
- Hall DK, Bayr K, Schöner W, Bindschadler RA, Chien YL. 2003. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893–2001). *Remote Sens Environ.* 86(4):566–577.
- Hubbard A, Blatter H, Nienow P, Mair D, Hubbard B. 1998. Comparison of a three-dimensional model for glacier flow with field data from Haut Glacier d’Arolla, Switzerland. *J GLACIOL.* 44:368–378. doi:10.3189/S002214300002690.
- Idalino FD, Perondi C, Rosa KK, Simões JC. 2018. Uso de Imagens Sentinel-2 para a Análises de Retração de Geleiras: Comparativo Entre Ambientes nas Latitudes 44oS e 62oS. *RBGF.* 11(3):1101–1111. doi:10.26848/rbgf.v11.3.p1101-1111.
- Kääb A, Huggel C, Paul F, Wessels R, Raup B, Kieffer H, Kargel J. 2002. Glacier monitoring from aster imagery: accuracy and applications. *Proceedings of EARSEL-LISSIG - Workshop Observing Our Cryosphere from Space*, Bern. March 11–13:41–53.
- Kääb A, Winsvold SH, Altena B, Nuth C, Nagler T, Wuite J. 2016. Glacier remote sensing using Sentinel-2. Part I: radiometric and geometric performance, and application to ice velocity. *Remote Sens.* 8:598. doi:10.3390/rs8070598.
- Kalthoff N, Bischoff-Gauß I, Fiebig-Wittmaack M, Fiedler F, Thürauf J, Novoa E, Pizarro C, Castillo R, Gallardo L, Rondanelli R, Kohler M. 2002. Mesoscale wind regimes in Chile at 30oS. *J Appl Meteor.* 41(9):953–970.
- Lliboutry L. 1956. Nieiles y glaciares de Chile. *Fundamentos de glaciología*. Santiago, Chile: Ediciones de la Universidad de Chile.
- Malenovsky Z, Rott H, Cihlar J, Schaepman ME, García-Santos G, Fernandes R, Berger M. 2012. Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sens Environ.* 120:91–101.
- Malmros J, Mernild S, Wilson R, Yde J, Fensholt R. 2016. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955–2013/14. *J Glaciol.* 62(232):391–401.
- 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.* 60(1-2):85–100.
- MacDonell S, Nicholson L, Kinnard C. 2013. Parameterisation of incoming longwave radiation over glacier surfaces in the semiarid Andes of Chile. *Theor Appl Climatol.* 111(3-4):513–528.
- Mernild SH, Beckerman AP, Yde JC, Hanna E, Malmros JK, Wilson R, Zemp M. 2015. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the Sub-Antarctic islands. *Global Planet Change.* 133:109–119.
- Naranjo J, Stern C. 2004. Holocene tephrochronology of the southernmost part (42°30’–45°S) of the Andean Southern volcanic zone. *Rev Geol Chile.* 31(2):225–240.
- Nicholson L, Marin J, Lopez D, Rabatel A, Bown F, Rivera A. 2009. Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Ann Glaciol.* 50(53):111–118.
- Paul F, Mölg N. 2014. Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011. *J Glaciol.* 60(224):1033–1043.

- Paul F, Winsvold SH, Kääb A, Nagler T, Schwaizer G. 2016. Glacier remote sensing using Sentinel-2. Part II: mapping glacier extents and surface facies, and comparison to Landsat 8. *Remote Sens.* 8:575. doi: [10.3390/rs8070575](https://doi.org/10.3390/rs8070575).
- Pellicciotti F, Ragettli S, Carenzo M, McPhee J. 2014. Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Sci Total Environ.* 493:1197–1210.
- Rabatel A, Castebrunet H, Favier V, Nicholson L, Kinnard C. 2011. Glacier changes in the Pascua Lama region, Chilean Andes (29 S): recent mass balance and 50 years surface area variations. *Cryosphere.* 5(4):1029–1041.
- Rasmussen A, Conway H, Raymond F. 2007. Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. *Global Planet Change.* 59(1-4):203–216.
- RGI Consortium 2017. Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. Digital Media.
- Rignot E, Rivera A, Casassa G. 2003. Contribution of the Patagonia icefields of South America to sea level rise. *Science.* 302(5644):434–436.
- Rivera A, Casassa G. 2004. Ice elevation, areal and frontal changes of glaciers from Torres del Paine National Park, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic Alpine Res.* 36(4):379–389.
- Rivera A, Bown F, Mella R, Wendt J, Casassa G, Acuña C, Rignot E, Clavero J, Brock B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Ann Glaciol.* 43:111–122.
- Rivera A, Benham A, Casassa G, Bamber J, Dowdeswell J. 2007. Ice elevation and areal changes of glaciers from the northern Patagonia icefield, Chile. *Global Planet Change.* 59(1-4):126–137.
- Rivera A, Bown F, Carrión D, Zenteno P. 2012. Glacier responses to recent volcanic activity in southern Chile. *Environ Res Lett.* 7(1):014036.
- Rosenbluth B, Fuenzalida HA, Aceituno P. 1997. Recent temperature variations in southern South America. *Int J Climatol.* 17(1):67–85.
- Schaefer M, Machguth H, Falvey M, Casassa G. 2013. Modeling past and future surface mass balance of the northern Patagonia icefield. *J Geophys Res Earth Surf.* 118(2):571–588.
- Tachikawa T, Kaku M, Iwasaki A, Gesch D, Oimoen M, Zhang Z, Danielson J. 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version. – Summary of Validation Results. Presentation of the ASTER Science Team Meeting, Kyoto, Japan.
- Urkidi L. 2010. A global environmental movement against gold mining: Pascua–Lama in Chile. *Ecol Econ.* 70(2):219–227.
- Veettil BK. 2018. Glacier mapping in the Cordillera Blanca, Peru, tropical Andes, using Sentinel-2 and Landsat data. *Singapore J Trop Geogr.* 39:351–363.
- Veettil BK, Wang S, Simões JC, Pereira SFR. 2018. Glacier monitoring in the eastern mountain ranges of Bolivia from 1975 to 2016 using Landsat and Sentinel-2 data. *Environ Earth Sci.* 77:452.
- Williams RS, Jr. Hall DK, Benson CS. 1991. Analysis of glacier facies using satellite techniques. *J Glaciol.* 37(125):120–128.
- Willis M, Melkonian K, Pritchard M, Ramage J. 2012. Ice loss rates at the northern Patagonian icefield derived using a decade of satellite remote sensing. *Remote Sens Environ.* 117:184–198.

## 3.2 Artigo 2: Variabilidade anual de precipitação e temperatura média superficial do ar no período de 1950-2017, no norte da região de Aisén - Chile

Confirmação da submissão:



Filipe Daros Idalino <filipe.daros.idalino@gmail.com>

### [CF] Agradecimento pela Submissão

1 mensagem

They <herve.thery@usp.br>

Para: Mr Filipe Daros Idalino <filipe.daros.idalino@gmail.com>

27 de dezembro de 2018 13:41

Mr Filipe Daros Idalino,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "Variabilidade anual de precipitação e temperatura média superficial do ar no período de 1970-2017 para a região do Monte Melimoyu (44°S - 72°51'O), Patagônia Norte - Chile" para Confins. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:  
<http://journals.sfu.ca/confins/index.php/confins/author/submission/3284>  
Login: filipedalino

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Théry  
Confins

Confins  
<http://journals.sfu.ca/confins>



CAPA   SOBRE   PÁGINA DO USUÁRIO

Capa > Usuário > Autor > Submissões > #3284 > **Resumo**

## #3284 Sinopse

RESUMO   AVALIAÇÃO   EDIÇÃO

### Submissão

Autores	Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Pedro Teixeira Valente, Jefferson Cardia Simões
Título	Variabilidade anual de precipitação e temperatura média superficial do ar no período de 1970-2017 para a região do Monte Melimoyu (44°S 72°51'O), Patagônia Norte - Chile
Documento original	<a href="#">3284-17913-4-SM.DOCX</a> 2018-12-27
Docs. sup.	Nenhum(a) <a href="#">INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR</a>
Submetido por	Mr Filipe Daros Idalino
Data de submissão	dezembro 27, 2018 - 07:41
Seção	Artigos
Editor	Nenhum(a) designado(a)

### Situação

Situação	Aguardando designação
Iniciado	2018-12-27
Última alteração	2018-12-27

USUÁRIO  
Logado como:  
**filipedalino**  
• [Perfil](#)  
• [Sair do sistema](#)

IDIOMA  
Selecione o idioma

TAMANHO DE FONTE

URL do Manuscrito:

<http://journals.sfu.ca/confins/index.php/confins/author/submission/3284>

# Variabilidade anual de precipitação e temperatura média superficial do ar no período de 1950-2017, no norte da região de Aisén - Chile

## Resumo

Este artigo investiga a variabilidade nos dados meteorológicos na Patagônia Norte, na região do Monte Melimoyu (44°5'S-72°51'O), no período 1950-2017. O teste de *Pearson (r)* foi aplicado para medir o coeficiente de correlação entre as amostras para a composição e as análises temporais de precipitação. Para a série de dados de precipitação anual, utilizou-se dos dados mensais da estação meteorológica de Puerto Aysén Ad. (45°23'S-72°39'O) e de La Junta (43°58'S-72°25'O), onde se obteve uma correlação de 0,57 entre os dados. A precipitação média aproximada foi de 2539 mm no período de 1950-2017, e mostra uma tendência de diminuição da precipitação de aproximadamente -18 mm por ano. Para a série de média anual de temperatura superficial do ar, foram utilizados os dados de reanálise de Delaware. Os resultados mostram uma temperatura média superficial do ar de 9,87°C no período de 1948 e 2017, e uma tendência contínua de aumento na temperatura na região de 0,04°C por ano.

**Palavras-chave:** Variabilidade Meteorológica; Série de dados temporais; Monte Melimoyu; Patagônia Norte.

## Annual variability of precipitation and average air temperature in the period 1950-2017 on north of Aisén region - Chile

### Abstract

This article investigates the variability in the meteorological data in North Patagonia, in the region of Mount Melimoyu (44°5'S - 72°51'O), between 1950-2017. The *Pearson (r)* test was applied to measure the correlation coefficient between the samples for the composition and the temporal precipitation analyzes. For the annual precipitation data series, we use monthly data from the Puerto Aysén Ad weather station (45°23'S - 72°39'W) and La Junta station series (43°58'S - 72°25'W), where a correlation of 0.57 between data series was obtained. The approximate mean precipitation was of 2539 mm between 1950-2017 and shows a tendency to decrease precipitation of approximately with a mean of -18 mm/year. For the annual average air surface temperature series, we used the Delaware reanalysis data. The results showed an average surface air temperature of 9.87°C for the period between 1948-2017, and a continuous trend of temperature increase of 0.04°C/year.

**Keywords:** Meteorological variability; Temporal data series; Melimoyu Mont; Northern Patagonia.

## Variabilité annuelle de précipitations et de température superficielle de l'air, pour la période 1950-2017, au nord de la région de Aisén - Chili

### Résumé

Cet article vise examiner la variabilité des données météorologiques en Patagonie du Nord, dans la région du Mont Melimoyu (44°5'S - 72°51'O), pour la période 1950-2017. Pour déterminer le coefficient de corrélation entre les échantillons pour la composition et les analyses chronologiques de précipitations, on a eu recours au test de corrélation de *Pearson (r)*. Pour la série de données de précipitations annuelles, les données de la station météorologique de Puerto Aysén Ad. (45°23'S - 72°39'O) sont utilisées pour compléter la série de la station de La Junta (43°58'S - 72°25'O), où une corrélation de 0,57 a été obtenue entre les données de précipitations annuelles. La précipitation moyenne est approximativement de l'ordre de 2539 mm au cours de la période sus-mentionnée. Celle-ci tend à diminuer de l'ordre de -18 mm par an approximativement. Les données de réanalyse du Delaware ont été utilisées pour déterminer la série de moyenne annuelle de température superficielle. Les résultats obtenus indiquent une température moyenne superficielle de 9,87°C pour la période 1948-2017 et tend à augmenter de façon continue de l'ordre de 0,04°C par an.

**Mots-clés:** Variabilité météorologique; Série de données temporelles; Mont Melimoyu; Patagonie du Nord

## **Introdução**

A distribuição das terras sul-americanas em diferentes latitudes e com formas de relevo variadas proporcionam a atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a não homogeneidade climática desta região (REBOITA *et al.* 2010).

Em níveis baixos no cinturão ocidental (aproximadamente latitudes 40° a 70°), observa-se um padrão complexo de sistemas móveis de alta e baixa pressão, enquanto que, entre 6000 m e 20000 m, existe um fluxo de ar constante do Oeste (BARRY & CHORLEY, 2013). Sobre esta região, as variações climáticas são produzidas principalmente por perturbações incorporadas no fluxo de oeste e são fortemente modificadas pela parte sul dos Andes (GARREAUD *et al.*, 2013). Neste caso, as regiões montanhosas da Patagônia influenciam nos ventos na atmosfera, pois, ao encontrar uma barreira topográfica, uma corrente de ar tende a ascender e, nesse processo, pode ocorrer a formação de nuvens e precipitação (REBOITA *et al.*, 2012). A elevação a barlavento leva a condições hiperumidas ao longo da costa do Pacífico e do declive ocidental dos Andes (GARREAUD *et al.*, 2013).

Para a Patagônia, a variabilidade nos padrões de precipitação também é influenciada, em uma escala interanual e interdecadal, pelo Índice da Oscilação Antártica (Southern Annual Mode - SAM) e pelo El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (ARAVENA & LUCKMAN, 2009; SCHAEFER *et al.*, 2013) que tem sido frequente utilizado nas últimas duas décadas (GONZÁLEZ 2004). O ENOS é um fenômeno acoplado de atmosfera oceânica enraizada no Pacífico tropical, e tem um efeito direto e forte sobre o Equador, o Peru e o norte do Chile, além de um efeito indireto (através de teleconexões atmosféricas) em grande parte da América do Sul subtropical estendendo-se também a altas latitudes (GARREAUD *et al.*, 2009).

Anomalias de chuva e temperatura associadas à ocorrência dos eventos El Niño e La Niña são a principal fonte de variabilidade interanual para a América do Sul (ROPELEWSKI & HALPERT, 1987; ACEITUNO, 1988; KILADIS & DIAZ, 1989; MARENGO, 1992). A influência da variação do ENOS deve ser levada em consideração nos estudos meteorológicos nas áreas ao Sul da América do Sul, associada a anomalias positivas na circulação anticiclônica no sudeste do Pacífico durante o verão (MONTECINOS & ACEITUNO, 2003).

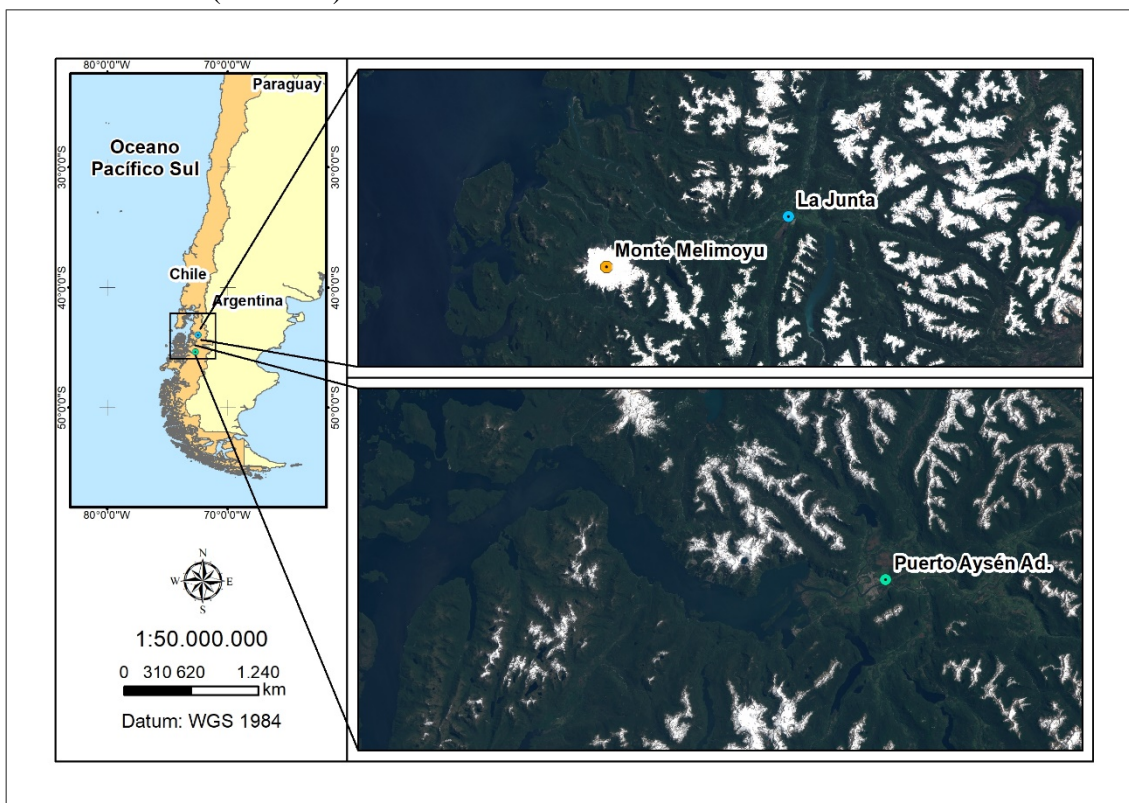
Este artigo objetiva analisar possíveis tendências na precipitação anual e da temperatura média anual superficial do ar, no período 1950-2017 para a região do Monte Melimoyu, através de dados mensais de estações meteorológicas para precipitação e dados de reanálise para a temperatura. O trabalho procura analisar e correlacionar os eventos de ENOS e SAM com os dados meteorológicos, em vista da falta de estudos diagnosticando o efeito destes em regiões específicas (GARREAUD *et al.*, 2009).

## **Área de estudo**

O Monte Melimoyu é um extenso vulcão com 2400 m de altitude com aproximadamente 9,65 km de diâmetro na orientação Norte-Sul (Figura 1). Possui uma cratera circular com cerca de 1,5 km de diâmetro coberta de gelo, e suas geleiras possuem uma área de cerca de 52,19 km<sup>2</sup> em formato circular, porém irregulares. Está localizado a 44°5'S-72°51'O, ao norte da região de Aisén do General Carlos Ibañez del Campo. Segundo Köppen (1936) o clima da região de Aisén é classificado como Cfc, de regiões oceânicas e marítimas da região e das regiões costeiras ocidentais do continente, onde o clima é temperado úmido sem estação seca com verão curto e ameno.



Figura 1. Localização das estações meteorológicas e do Monte Melimoyu. Imagens do Sentinel-2A MSI (RGB 432). Acesso em 05/12/2018.



Fonte. Elaboração própria com dados vetoriais do IBGE (2010), do Sentinel-2A (2017) ESA-USGS, e Explorador Climático (CR<sup>2</sup>).

As geleiras respondem às mudanças climáticas inerente às questões de balanço de energia e é fundamental a diferenciação entre esses fatores para a correta interpretação das alterações glaciais do passado e para a atribuição correta de mudanças atuais (ROE, 2011). Elas podem fornecer uma perspectiva de longo prazo para o estudo das variações climáticas (KLOK & OERLEMANS, 2004) e são considerados indicadores-chave para evidenciar as mudanças climáticas globais (OERLEMANS, 2001; HOELZLE et al., 2003; OERLEMANS, 2005; RABATEL *et al.*, 2013; PELLICCIOTTI *et al.*, 2014).

No entanto, não há uma série temporal de longa duração, que contemple todos os anos do período de análise (1950-2017), para compreender as possíveis tendências e eventos associados à variabilidade interanual nos dados de temperatura média superficial do ar e precipitação para áreas de específicas geleiras da Patagônia Norte, como o Monte Melimoyu (Figura 1).

A obtenção de uma série temporal de longa duração possibilitará o avanço de estudos ambientais em geleiras do Monte Melimoyu, pois as variáveis climáticas são um dos fatores que exercem maior influência no processo de ablação das geleiras (MASIOKAS *et al.*, 2008; PCC, 2013; PELLICCIOTTI *et al.*, 2014; MERNILD *et al.*, 2015). Uma análise detalhada sobre variabilidade nos dados meteorológicos, de décadas anteriores à 2000 é relevante para os estudos de geleiras, visto as mudanças climáticas no passado afetaram fortemente as áreas glaciais no mundo todo (IPCC, 2013), assim como as geleiras na região dos Andes, que também mostraram uma clara redução de área e volume nas décadas passadas (LÓPEZ & CASASSA, 2011).



## Materiais e Métodos

Foram utilizados dados de precipitação mensal (em mm) das estações meteorológicas de La Junta, por sua proximidade com o Monte Melimoyu e de Puerto Aysén Ad (Figura 1 e Tabela 1) por sua maior disponibilidade de dados mensais precipitação no período de 1950-2017, o que possibilitou realizar o cálculo da média anual e os testes estatísticos entre as séries. As informações das estações meteorológicas foram fornecidas gratuitamente pelo Explorador Climático (<http://explorador.cr2.cl/>). Esta é a plataforma online da *Dirección Meteorológico de Chile* (DMC), da *Dirección General de Aguas* (DGA), do Departamento de Geofísica da *Universidad de Chile* (DGF) e da *National Centers for Environmental Information - National Oceanic and Atmospheric Administration* (NCEI-NOAA).

Tabela 1. Dados de precipitação utilizados no trabalho.

Estação	Localização	Distância do Monte Melimoyu	Elevação	Período dos registros
La Junta	43°58'S – 72°25'O	35 km, NE	45 m	1981 – 2017
Puerto Aysén Ad.	45°23'S – 72°39'O	147 km, SE	10 m	1950 – 2017

Fonte. Explorador Climático (CR2) - Chile. Acesso em 05/04/2018.

A análise dos dados meteorológicos disponibilizados foi realizada no software Excel 2013 da Microsoft®. A correlação de *Pearson* ( $r$ ) foi aplicada para medir o coeficiente de correlação entre as amostras de precipitação das EM de La Junta e Puerto Aysén Ad, e utilizou-se da média dos valores para gerar a série completa dos dados para a região e para realizar as análises temporais. O teste de correlação de *Pearson* ( $r$ ) é uma medida numérica da força da correlação entre duas variáveis que representam dados quantitativos (TRIOLA, 2013), ou seja, mede o grau de relacionamento linear entre os valores de  $x$  e  $y$  em uma amostra e é calculado através da seguinte fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}$$

Para a análise das médias anuais de temperatura superficial do ar, foi utilizado o banco de dados de reanálise de temperatura da Universidade de Delaware, que contém registros mensais de 1948 a 2017, com grade resolução espacial de 0,5°x0,5°, conforme Matsuura e Willmott (2012). A reanálise foi construída a partir de dados de estações meteorológicas do Global Historical Climate Network (GHCN2) e do banco de dados dos autores. As médias mensais foram interpoladas em uma grade de 0,5° graus de latitude e longitude, com os nós das grades em 0,25°. Como resultado, tem-se uma grade global de 720x360 pontos de grade.

A reanálise foi criada de maneira que preenchesse os lapsos das estações (BURRUGHOUS, 2007). Quando havia falta de um dado mensal era feita uma interpolação espacial com as estações de coordenadas geográficas e regiões semelhantes para se computar um valor mensal. A reanálise final era composta de séries temporais com os valores mensais de temperatura para o período total (1948-2017) onde pode ser feito um recorte espacial para uma determinada área em estudo, como neste caso. A reanálise foi utilizada com os softwares Matworks® Matlab 2012R e Microsoft® Excel 2013.

Para compreender possíveis atrasos, as séries de precipitação mensal e temperatura foram cruzadas com os valores dos índices Índice Niño Oceânico (ONI) – ENOS (da NOAA), e o SAM (de Marshall, 2003) por meio da correlação cruzada, que é utilizada

para identificar lapsos em duas ou mais séries temporais, fixando uma série e correlacionando a outra série conforme o um intervalo (*lag*) pré-estabelecido de 12 meses. Assim, os valores das séries de temperatura e precipitação foram comparados com os valores dos índices ONI e SAM ocorridos doze meses antes e depois da posição inicial de cada unidade da série. Foi escolhido o período de um ano a fim de compreender algum lapso de comportamento da variabilidade do ENOS e SAM sem perder a influência dos menores ciclos de ambos os modos de variabilidade. Períodos superiores a 12 meses podem ocultar os ciclos de curta duração de ambos os modos de forma que os mesmos não sejam percebidos nas correlações.

Além das análises estatísticas das amostras, foram gerados gráficos de linhas de tendência para os dados de precipitação (acumulado) e temperatura superficial do ar (média) no período de análise.

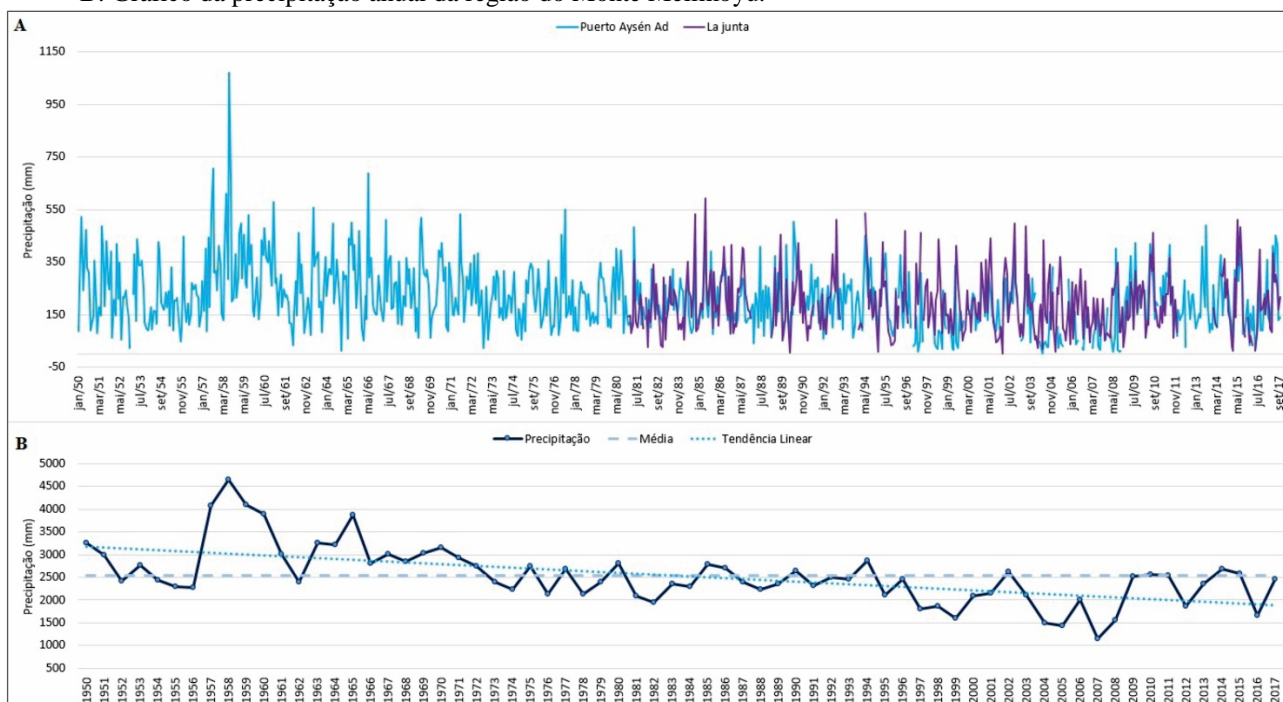
## Resultados e Discussões

### Precipitação

Os dados de precipitação das EM de La Junta e Aysén Ad, apesar da falta de dados em diversos anos mostram semelhança nos valores, nos anos em que existem registros. A EM de La Junta apresenta o valor médio de precipitação de 2269 mm para o período de 1981-2017, e a EM de Puerto Aysén Ad apresenta o valor médio de precipitação de 2628 mm para a série entre 1950-2017(Figura 2A).

O resultado da correlação de *Pearson* ( $r$ ) entre os dados das duas estações foi de 0,57 e utilizou-se dos dados de precipitação das EM para gerar uma série completa, com maior número de registros possível (Figura 2B). A série temporal completa apresenta uma precipitação média de 2539 mm, e uma tendência linear decrescente, o que representa uma diminuição de -18 mm por ano (Figura 2B).

Figura 2. A: Gráfico comparativo de precipitação das estações meteorológicas de La Junta e Aysén Ad. B: Gráfico da precipitação anual da região do Monte Melimoyu.



Fonte: Elaboração própria com a base de dados do Explorador Climático (CR)<sup>2</sup>, NOAA - <http://explorador.cr2.cl>. Acesso em 05/04/2018.

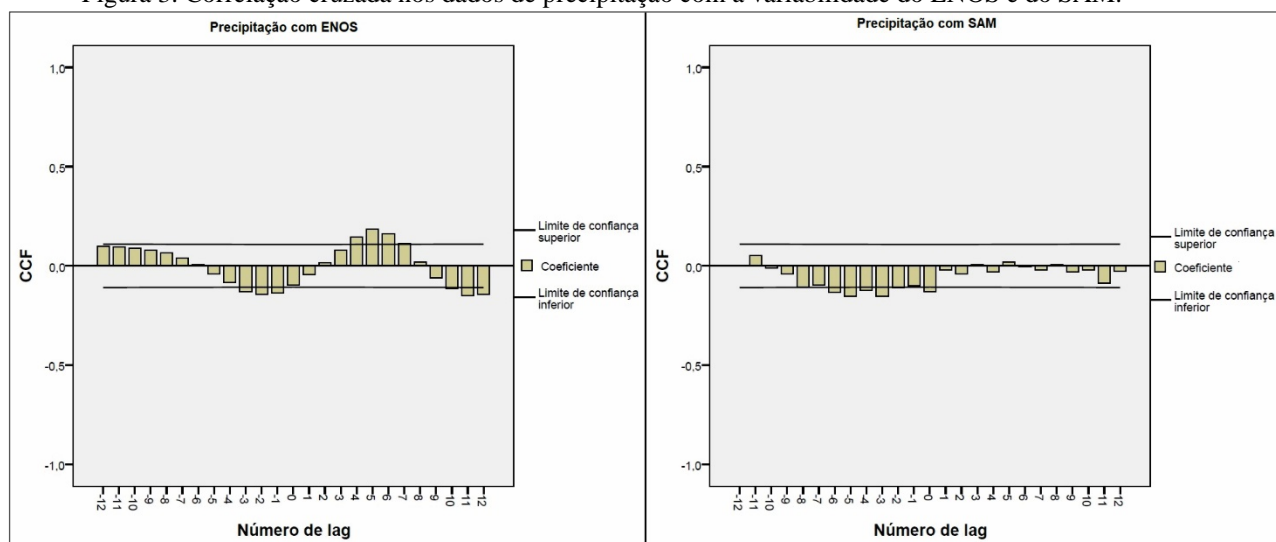
Os resultados vão ao encontro com outros autores na região ou proximidades. González (2004) evidencia uma tendência à diminuição na precipitação, ao analisar todas as estações meteorológicas na região da estação de Valdivia (39°38'S), no período 1961-2000. Esta apresentou -15 mm por ano entre 1961 e 2000.

Castañeda e González (2008), encontraram tendências à diminuição da precipitação na zona Ocidental da região da Patagônia (ênfase na Patagônia Argentina) no período 1950–1999 ao analisar dados de estações meteorológicas. Garreaud et al. (2017) encontrou um déficit entre 25% e 45% na precipitação líquida anual na região Central do Chile, junto à bacia hidrográfica de Aysén entre 2010 e 2015.

A influência do ENOS no clima da região Sul da América do Sul está associada, em sua fase quente, a uma migração norte das trilhas de tempestade durante o inverno devido à maior frequência de bloqueios sobre o Mar de Amundsen-Bellinghousen (Renwick & Revell, 1999; Pezza & Ambrizzi, 2003). Perez et al. (2018) afirma que durante o período de 2000 a 2016, houve cinco ocorrências de El Niño ou fase quente do ENOS (2002, 2004–2005, 2006–2007, 2009 e 2015–2016) e três ocorrências de La Niña (1999–2000, 2007–2008 e 2010–2011). Os períodos de máxima cobertura média de neve, encontrados para a bacia hidrográfica de Aysén, coincidem com os períodos de La Niña (PEREZ et al., 2018), com exceção do ano de 2005.

Contudo, não foram evidenciados estatisticamente efeitos diretos da variabilidade do ENOS e do SAM nos dados de precipitação na área de estudo, onde os testes de correlação cruzada mostram baixos valores de correlação entre os dados (Figura 3). O cruzamento dos dados de precipitação com o ENOS mostrou o valor máximo de 0,18 em um *lag* de 5 meses posteriores, e -0,14 em um *lag* de -2 meses anteriores ao evento, enquanto que, o cruzamento com o SAM mostrou um valor máximo de -0,15 nos *lag*'s de -3 e -5 meses anteriores ao evento (Figura 3).

Figura 3. Correlação cruzada nos dados de precipitação com a variabilidade do ENOS e do SAM.



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados meteorológicos e do ENOS, da NOAA, e do SAM de Marshall, 2003 - <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>.

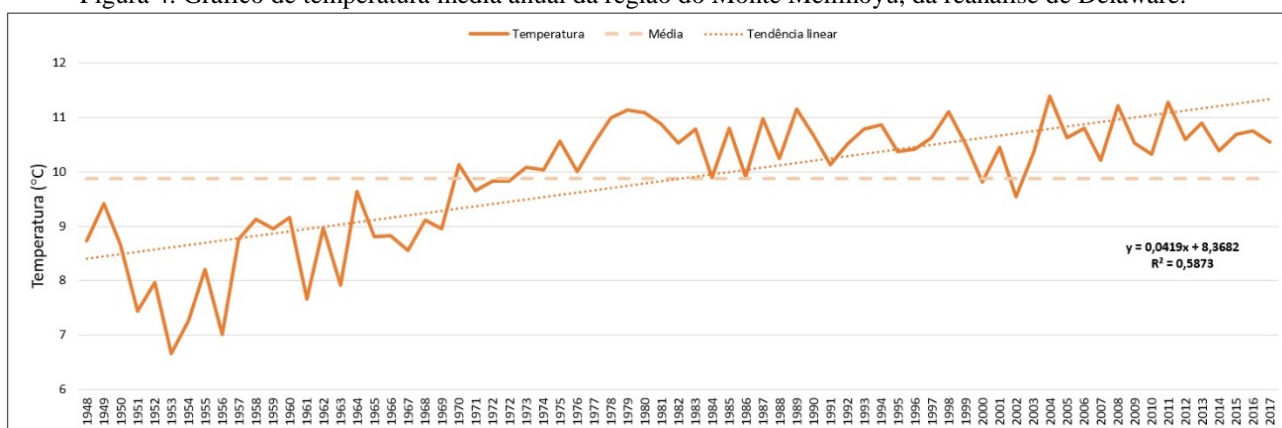
Cai et al. (2014) ressalta que os eventos de El Niño estão associados frequentemente com incrementos na precipitação, em escalas regionais, podendo também aumentar a temperatura do ar, que juntos podem ter um efeito de altitude pronunciado na cobertura de neve durante a primavera e o outono. Neste sentido, um aumento na temperatura do ar faz a isoterma de 0°C ascender para maiores elevações, resultando em uma maior proporção de precipitação líquida ao invés de neve (MERNILD et al., 2008; MALMROS et al. 2018).

Dados de reanálises também sugerem que o fluxo de oeste diminuiu principalmente sobre a Patagônia Norte-Central durante as últimas quatro décadas, causando uma tendência de seca a oeste dos Andes (GARREAUD et al., 2013). A tendência observada nos dados de precipitação (para as recentes décadas) na região pode impactar o ciclo da água de importantes rios e a vegetação, assim como destaca Perez et al. (2018) ao considerar a tendência de diminuição da cobertura de neve na bacia hidrográfica de Aysén no período 2000-2016.

### Temperatura

Os resultados da reanálise apresentam uma variabilidade entre as médias anuais, apresentando valores mais baixos e mais elevados que a média de 9,87°C para o período de 1948-2017 (Figura 4). No início do período, a média de temperatura subiu de 8,51°C entre 1948 e 1970, para 10,44°C entre 1970 e 1990 (Figura 4). Seguiu um aumento para 10,52°C na década de 1990, alcançando a média de 10,58°C entre 2000 e 2017 (Figura 4). A série de dados de reanálise mostrou uma constante tendência de aquecimento durante todo o período (1948 e 2017), que representa um aumento de 0,04°C por ano.

Figura 4. Gráfico de temperatura média anual da região do Monte Melimoyu, da reanálise de Delaware.



Fonte. Elaboração própria com a base de Dados de Delaware. Disponível em: <http://climate.geog.udel.edu/>. Acesso em 13/12/2018.

Segundo Masiokas *et al.* (2008) as temperaturas na região noroeste da Patagônia experimentaram uma variabilidade interanual acentuada e padrões distintos de baixa frequência (escala decenal) dentro dessa tendência de longo prazo. Os autores apontam ainda que as temperaturas mais elevadas da estação quente ocorreram em 1943 com temperaturas mais quentes entre 1950 e o início dos anos 1960, e novamente entre o final das décadas de 1970 e 1990 (com uma anomalia média de + 0,82° C).

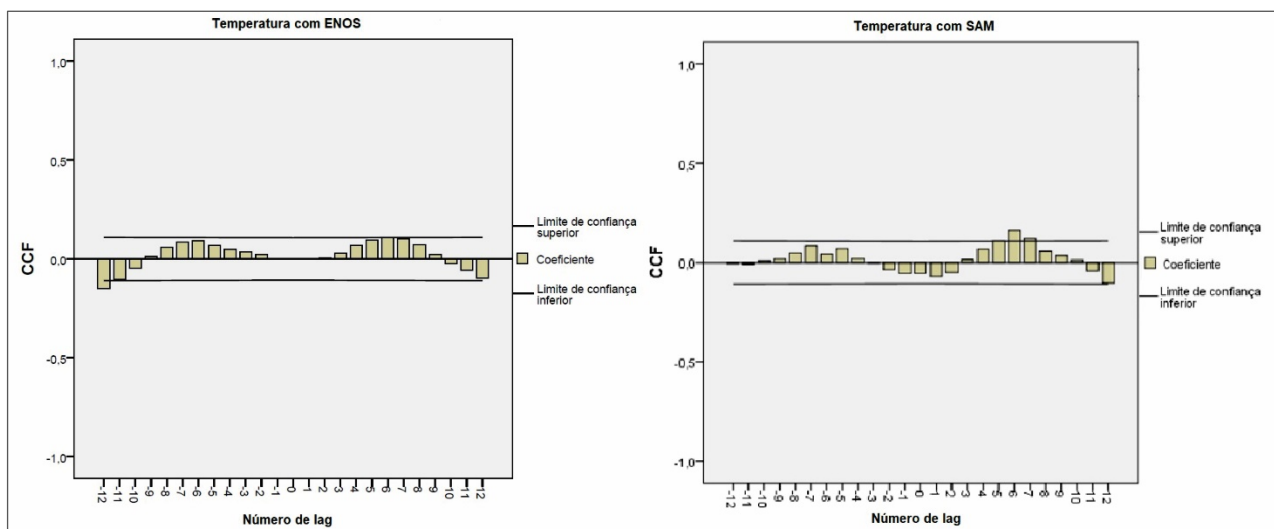
Rivera & Casassa (1999), ao avaliar o aquecimento para a temperatura mínima média de verão de 1,58°C na estação de Punta Arenas, para o período de 1960 – 1992 apontado por Rosenbluth et al. (1997), concluíram que a Patagônia passou por um aumento na temperatura atmosférica nas três décadas anteriores (1960 – 1990), o que corrobora com os dados apresentados pela série de reanálise na região (Figura 4).

Dados da estação de radiossonda de Puerto Montt (41°26'S) indicaram um aquecimento troposférico entre 0,019°C e 0,031°C por ano para o período de 1961-2000, que está provavelmente relacionado a uma intensificação do efeito estufa (González 2004). O aumento das temperaturas na região favorece o derretimento das camadas de gelo, forçando o processo de ablação das geleiras, assim como ressaltam Masiokas et al. (2008) e Pellicciotti et al. (2014).

Assim como nos dados de precipitação, não foram evidenciados estatisticamente efeitos diretos da variabilidade do ENOS e do SAM na temperatura da área de estudo, onde os testes de correlação cruzada mostram baixos valores de correlação entre os dados

(Figura 5). O cruzamento dos dados de temperatura com o ENOS mostrou o valor máximo de 0,109 em um *lag* de 6 meses posteriores, e -0,15 em um *lag* de -12 meses anteriores ao evento, enquanto que, o cruzamento com o SAM mostrou um valor máximo de -0,16 nos *lag* de 6 meses posteriores ao evento (Figura 5).

Figura 5. Correlação cruzada nos dados de temperatura com a variabilidade do ENOS e do SAM.



Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados meteorológicos e do ENOS, da NOAA, e do SAM de Marshall, 2003 - <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html>.

## Conclusões

A aplicação da metodologia aos dados das EM e de reanálise possibilitaram a compreensão da variabilidade do Melimoyu, tanto de precipitação quanto de temperatura. Contudo, foi possível analisar as principais características que possibilitaram a comparação dos valores e os testes de correlação entre os dados.

As Estações Meteorológicas mostraram uma descontinuidade temporal nos registros em vários anos do período de análise, o que gerou a necessidade de utilizar os dados de reanálise de Delaware, para obter uma melhor compreensão dos reais padrões no comportamento da atmosfera da região. Esta ausência é comum em locais como estes de difícil acesso logístico, mas mesmo assim, o Chile apresenta uma malha de dados consideravelmente grande, disponibilizada gratuitamente via *web* e atualizada diariamente pelas instituições que a compõe.

O valor moderado da correlação de 0,57 pode ser atribuído a distância de 160 km entre as duas estações (Figura 1), o que influencia diretamente nos dados entre os valores de precipitação e a falta de dados em anos dispersos. Contudo, a obtenção de uma série completa de dados no período de estudo é de suma importância para este trabalho, bem como para trabalhos futuros que envolvam inventário de regiões montanhosas cobertas por geleiras, em especial, regiões com uma alta variação entre a sazonalidade dos dados.

Caracteriza-se o comportamento climático em uma longa série temporal, agora disponíveis para diversas análises. Outros testes estatísticos, como testes de significância e confiabilidade podem auxiliar na produção de uma série temporal mais elaborada e confiável de dados de temperatura e precipitação, o que deve preencher os anos faltantes para obter uma melhor representação das condições climáticas na região.

No caso deste trabalho, a maior disponibilidade de dados de precipitação na região do Monte Melimoyu, incluindo estações meteorológicas com medições diárias, e séries completas para o período de 1950 a 2017, possibilitou os testes de correlação e a utilização destas séries no trabalho desenvolvido. Com isso, foi possível obter uma série



temporal da precipitação anual para a região, a partir das medições realizadas in situ. Diferente disto, a região não dispõe de séries completas de temperatura superficial do ar para o mesmo período, o que necessitou buscar recursos dos dados de reanálise de Delaware, para serem utilizados como bases para estudos futuros.

Os baixos valores resultantes dos testes de correlação cruzada, entre os dados meteorológicos com a variabilidade do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e do Southern Annular Mode (SAM), não mostraram exercer efeitos diretos aos dados obtidos pelas EM e por reanálise. O fator local na análise destes dados pode ser uma variável de grande influência para as baixas taxas de correlação entre os dados amostrados, visto que em pequenas áreas, as chances de eventos de teleconexões induzir alterações nas médias de precipitação e temperatura são muito remotas. Então, acredita-se que a variabilidade destes eventos pode estar relacionada indiretamente com os dados meteorológicos da área de estudo e que outras variáveis devem ser levadas em consideração para análises futuras, como a taxa de acumulação de neve, pressão e temperatura atmosférica.

Os resultados mostram ainda uma clara necessidade de uma continuidade nos estudos de variabilidade meteorológica, para melhor compreender os impactos futuros das tendências apresentadas para estes ambientes. A disponibilização destas séries temporais e dos resultados obtidos pelas análises em meios digitais, podem ser extremamente úteis para trabalhos futuros, que venham utilizar destas informações para novas análises na região da Patagônia Norte chilena.

### **Agradecimentos**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado acadêmico, fundamental para a realização deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelos apoios financeiros para a realização das pesquisas científicas. Ao Centro Polar e Climático (CPC), pelo apoio tecnológico e estrutural e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) – UFRGS.

### **Referências**

- ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. *Mon. Weather Rev.* 116. 505–524. 1988.
- ARAVENA, J. C; LUCKMAN, B. H. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology.* 29: 2106–2120. 2009.
- BARRY, R. G; CHORLEY R. J. *Atmosfera, tempo e clima. 9º ed.* Porto Alegre. Bookman. 512. 2013.
- BURROUGHS, W. J. *Climate Change: A Multidisciplinary Approach.* Cambridge. University Press: Cambridge, 2ªed. UK. 378 pp. 2007.
- CAI, W; BORLACE, S; LENGAINNE, M; VAN RENSCH, P; COLLINS, M; VECCHI, G; TIMMERMANN, A; SANTOSO, A; MCPHADEN, M; WU, L; ENGLAND, M; WANG, G; GUILYARDI, E; JIN, F. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nat. Clim. Chang.* 4. 111–116. 2014.
- CASTAÑEDA. M; GONZÁLEZ. M. 2008 .Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in southern South America. *Atmósfera.* 21(3). 303-317. 2008

DGA. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Informaciones de los datos pluviométricos. Disponível em: <http://www.dga.cl/acercadeladga/Paginas/default.aspx>.

ESA. U.S. Geological Survey. Sentinel-2A. 17 de março de 2017. 43°49'51.39"S, 73°04'24.36"W. Informações disponíveis em: <https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/10880/1207546/>.

GARREAUD, R. D; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, ROSA.; MARENGO, JOSÉ. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 281: 180–195. 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>

GARREAUD, R. D; LOPEZ, P; MINVIELLE, M; ROJAS, M. Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *J. Clim.* 1. 215-230. 2013. DOI: [doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1](http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1)

GARREAUD, R. D; ALVAREZ-GARRETON, C; BARICHIVICH, J; BOISIER, P. J; CHRISTIE, D; GALLEGUILLOS, M; LEQUESNE, C; MCPHEE, J; ZAMBRANO-BIGIARINI, M. The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21. 6307–6327. 2017.

GONZÁLEZ, F. B. Cambios climáticos en la Región de Los Lagos y respuestas recientes del Glaciar Casa Pangué (41°08'S). Trabalho de conclusão de curso. Santiago. 2004. Universidade do Chile, Departamento de Geografia. 114p.

IPCC. Climate change 2013: The physical science basis T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535.

JABERALANSAR, Z; TARKESH, M; BASSIRI, M. Spatial downscaling of climate variables using three statistical methods in Central Iran. *Journal of Mountain Science*. 15. 606-617. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11629-016-4289-4>

KILADIS, G. N; DIAZ, H. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation. *J. Climate*. 2. 1069–1090. 1989.

KLOK, E. J; OERLEMANS, J. Modelled climate sensitivity of the mass balance of Morteratschgletscher and its dependence on albedo parameterization. *International Journal of Climatol-ogy*. 24: 231–245. 2004.

KÖPPEN, W; GEIGER, R. Classificação climática de Köppen. 1936. Disponível em: [https://portais.ufg.br/up/68/o/Classificacao\\_Climatica\\_Koppen.pdf](https://portais.ufg.br/up/68/o/Classificacao_Climatica_Koppen.pdf).

LÓPEZ, P; CASASSA, G. Recent acceleration of ice loss in the Northern Patagonia Icefield based on an updated decennial evolution. *The Cryosphere Discuss*. 5. 3323–3381. 2011. Doi:10.5194/tcd-5-3323-2011

MALMROS, J. K; MERNILD, S. H; WILSON, R; TAGESSON, T; FENSHOLT, R. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sens. Environ*. 209. 240–252. 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2018.02.072.

- MARENGO, J. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *Int. J. Climatol.* 12. 853–863. 1992.
- MARSHALL, G. J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate.* 16: 4134–4143. 2003. Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C4134:TITSAM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C4134:TITSAM%3E2.0.CO;2)
- MASIOKAS, M. H; VILLALBA, R; LUCKMAN, B; LASCANO, M; DELGADO, S; STEPANEK, P. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global and Planetary Change.* 60. 85–100. 2008.
- MATSUURA, K; WILLMOTT, C. J. Terrestrial Air Temperature: 1900-2010 Gridded Monthly Time Series. Disponível em: <[http://climate.geog.udel.edu/~climate/html\\_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html](http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html)>. Acesso em 13/12/2018.
- MERNILD, S. H; LISTON, G. E; KANE, D. L; KNUDSEN, N. T; HASHOLT, B. Snow, runoff, and mass balance modeling for the entire Mittivakkat Glacier (1998–2006), Ammassalik Island, SE Greenland. *Geogr. Tidsskr.-Dan. J. Geogr.* 108. 121–136. 2008.
- MERNILD, S. H; BECKERMAN, A; Y de, C. J; HANNA, E; MALMROS, J; WILSON, R; ZEMP, M. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the Sub-Antarctic islands. *Global and Planetary Change.* 133. 109–119. 2015.
- MONTECINOS, A; ACEITUNO, P. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *J. Clim.* 16. 281-296. 2003.
- OERLEMANS, J. Glacier and Climate Change. *Amsterdam, Balkema.* 148 p. 2001.
- OERLEMANS, J. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science.* 308(5722): 675–677. 2005.
- PELLICCIOTTI, F; RAGETTLI, S; CARENZO, M; MCPHEE, J. Changes of Glaciers in the Andes of Chile and Priorities for Future Work. *Science of the Total Environment.* 493. 1197–1210. 2014.
- PÉREZ, T; MATTAR, C; FUSTER, R. Decrease in Snow Cover over the Aysén River Catchment in Patagonia, Chile. *Water.* 2018. 10(5). 619. 1-16. DOI: 10.3390/w10050619
- PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T. Variability of Southern Hemisphere cyclone and anticyclone behavior: further analysis. *J. Clim.* 16(7). 1075-1083. 2003.
- RABATEL, A; FRANCOU, B; SORUCO, A; GOMEZ, J; CÁCERES, 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; MÉNÉGOZ, M; RAMIREZ, E; RIBSTEIN, P; SUAREZ, W; VILLACIS, M; WAGNON, P. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere.* 7. 81–102. 2013.
- REBOITA, M. S; GAN, M; ROCHA, R; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia.* 25(2): 185–204. 2010.



- REBOITA, M. S; KRUSCHE, N; DA ROCHA, R. P; AMBRIZZI, T. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terra e Didática*. 8(1). 34–50. 2012.
- RENWICK, J. A; REVELL, M. J. Blocking over the south pacific and rossby wave propagation. *Mon. Weather Rev.* 127. 2233-2247. 1999.
- RIVERA, A; CASASSA, G. Volume changes on Pio XI glacier, Patagonia: 1975-1995. *Global and Planetary Change*. 22(1). 233-244. 1999.
- ROE, G. H. What do glaciers tell us about climate variability and climate change? *Journal of Glaciology*. 57. 567-578. 2011. Doi: doi.org/10.3189/002214311796905640
- ROSENBLİTH, B; FUENZALIDA, H. A; ACEITUNO, P. Recent temperature variations in southern South America. *Int. J. Climatol.* 17(1). 67-85. 1997.
- ROPELEWSKI, C; HALPERT, M. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115, 1606–1626. 1987. doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115%3C1606:GARSPP%3E2.0.CO;2
- SCHAEFER, M; MACHGUTH, M. H; FALVEY, M; CASASSA, G. Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. *Journal of Geophysical Research*. 118. 571–88. 2013.
- TRIOLA, M. F. Introdução à estatística: atualização da tecnologia. Rio de Janeiro. LTC, 2013.

### 3.3 Artigo 3: Respostas das geleiras do Monte Melimoyu (44°5'S – 72°51'O), Chile, às tendências mais secas e quentes na Patagônia Norte para as últimas décadas

Confirmação da submissão:

27/12/2018

Gmail - [ANPEGE] Agradecimento pela Submissão



Filipe Daros Idalino <filipe.daros.idalino@gmail.com>

#### [ANPEGE] Agradecimento pela Submissão

1 mensagem

Manoel Martins de Santana Filho <manoelsantanaprof@gmail.com>  
Para: Mr Filipe Daros Idalino <filipe.daros.idalino@gmail.com>

27 de dezembro de 2018 16:30

Mr Filipe Daros Idalino,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "RESPOSTAS DAS GELEIRAS DO MONTE MELIMOYU (44°5'S – 72°51'O), CHILE, ÀS TENDÊNCIAS MAIS SECAS E QUENTES DA PATAGÔNIA NORTE PARA AS ÚLTIMAS DÉCADAS" para Revista da ANPEGE. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/author/submission/9208>

Login: filipeidalino

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este email. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.

Manoel Martins de Santana Filho  
Revista da ANPEGE  
Prof. Manoel Martins de Santana Filho  
Editor da Revista da ANPEGE  
<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege>

REVISTA DA **ANPEGE**

ISSN 1679-748X

Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Geografia

ANPEGE

CAPA SOBRE PÁGINA DO USUÁRIO PESQUISA ATUAL ANTERIORES INDEXADORES

Capa > Usuário > Autor > Submissões > #9208 > **Resumo**

### #9208 Sinopse

RESUMO	AVALIAÇÃO	EDIÇÃO
<b>Submissão</b>		
Autores	Filipe Daros Idalino, Kátia Kellem da Rosa, Jefferson Cardia Simões	
Título	RESPOSTAS DAS GELEIRAS DO MONTE MELIMOYU (44°5'S – 72°51'O), CHILE, ÀS TENDÊNCIAS MAIS SECAS E QUENTES DA PATAGÔNIA NORTE PARA AS ÚLTIMAS DÉCADAS	
Documento original	<a href="#">9208_28732-1-SM.DOCX</a> 2018-12-27	
Docs. sup.	Nenhum(a) <a href="#">INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR</a>	
Submetido por	Mr Filipe Daros Idalino	
Data de submissão	dezembro 27, 2018 - 02:30	
Seção	Artigos	
Editor	Nenhum(a) designado(a)	

Situação	
Situação	Aguardando designação
Iniciado	2018-12-27
Última alteração	2018-12-27

IDIOMA  
Turkçe 繁體中文

[Ajuda do sistema](#)

USUÁRIO  
Logado como:  
**filipeidalino**

- Meus periódicos
- Perfil
- Sair do sistema

AUTOR  
Submissões

- Ativo (1)
- Arquivo (0)
- Nova submissão

CONTEÚDO DA REVISTA  
Pesquisa

Escopo da Busca  
Todos

URL do manuscrito:

<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/author/submission/9208>

## **Respostas das geleiras do Monte Melimoyu, Chile, às tendências mais secas e quentes da Patagônia Norte para as últimas décadas**

### **Resumo**

Este artigo investiga variações de área nas geleiras no Monte Melimoyu (44°S, 72°O) entre 1970 e 2017, e sua relação com a variabilidade climática entre 1950 e 2017. Dados do Sentinel-2A, do ASTER-GDEM2, e do GLIMS foram utilizados na análise em SIG. No período de 1950-2017 foi observado o aumento de 0,04°C na temperatura do ar e a precipitação decaiu em 18 mm por ano. A área das geleiras diminuiu de 80,97 km<sup>2</sup> em 1970 para 52,14 km<sup>2</sup> em 2017, representando 35,6% de área, com destaques para a retração de geleiras no Oeste, Sudoeste, Norte e Nordeste com perdas entre 65% e 44% e variação de elevação da linha de frente, entre 74 m e 570 m. Essas geleiras são semelhantes em tamanho, altitude e de declividade do setor frontal e as variações identificadas podem estar relacionadas às tendências mais quentes e secas para no período analisado.

**Palavras-chave:** Mudança climática; Variação glacial; Análise multi-temporal; Patagônia Norte chilena.

## **Response of Mount Melimoyu glaciers, Chile, to dryer and warming climatic trends for Northern Patagonian region in last decades**

### **Abstract**

This article investigates the variation of area in glaciers on Mount Melimoyu (44°S, 72°W) between 1970-2017, and the annual climate variability between 1950-2017. Data of Sentinel-2A, ASTER-GDEM v.2 and GLIMS were used in GIS analyze. In the period between 1950-2017 was observed an increase of 0.04°C in air temperature and the precipitation dropped in about 18 mm by year. The glaciers area reduce of 80.97 km<sup>2</sup> in 1970 to 52.14 km<sup>2</sup> in 2017, representing 35,6% of area, with emphasis to glaciers in West, Southwest, North and Northeast sectors, with losses between 65% and 44% and variation of outline elevation, between 74 m and 570 m. These glaciers are similar in size, elevation and slope of the front sector, and the variations identified can be related to warm, and dryer trends for the region in the period analyzed.

**Keywords:** Climate change; Glacier fluctuations; Multi-temporal analysis; Northern Chilean Patagonian.

## **Reponses des glaciers du Mont Melimoyu, au Chili, les tendances les plus seches et les plus chaudes de la Patagonie du Nord des dernieres decennies**

### **Resume**

Cet article se porte sur l'investigation des variations de la superficie des glaciers du Mont Melimoyu (44°S, 72°O) pour la période 1970-2017 en considérant avec la variabilité climatique pour la période 1950-2017. Données de Sentinel-2A, ASTER-GDEM v.2 et GLIMS ont été utilisés dans analyse et GIS.

Dans la période entre 1950 et 2017 a été observé une augmentation de 0,04°C de la température de l'air et les précipitations ont diminué de l'ordre de 18 mm par an. La superficie a diminué de 80,97 km<sup>2</sup> en 1970 à 52,14 km<sup>2</sup> en 2017, représentant 35,6% de la superficie, en soulignant les glaciers de l'ouest, du sud-ouest, du nord et du nord-est, avec une perte entre 65% et 44% et une plus grande variation de l'élévation de la ligne de front entre 74 m et 570 m. Les glaciers sont de taille similaire, en valeurs d'altitude et de pente du secteur frontal et les variations identifiées peut être liée aux tendances les plus chaudes et les plus sèches pour la région au cours de la période analysée.

**Mots-clés :** Changement climatique; Les fluctuations des glaciers; Analyse multi-temporelle; Au nord de Patagonien chilien.

### **Introdução**

Na região Chilena e Argentina dos Andes são observadas mudanças nas geleiras, como balanço negativo de massa, com a retração glacial e diminuição de volume (Rignot *et al.*, 2003; Francou *et al.*, 2003; Coudrain *et al.*, 2005; Casassa *et al.*, 2007; Rabatel *et al.*, 2013; Pellicciotti *et al.*, 2014; Mernild *et al.*, 2015; IPCC, 2016). As geleiras na Patagônia Norte estão retraindo (Rignot *et al.*, 2003; Aniya, 2007; Möller *et al.*, 2007; Masiokas *et al.*, 2008; Lopez *et al.*, 2010, Garreaud *et al.*, 2013; Malmros *et al.*, 2016). É relevante a investigação das mudanças nas geleiras, pois estas trazem consequências para os 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 & Giering, 2017).

Schaefer *et al.* (2013) usou um modelo de balanço de massa de geleira para avaliar o passado e futuro balanço de massa superficial do campo de gelo da Patagônia Norte e evidenciou que a acumulação aumentou de 1990 para 2011 em relação a 1975–1990, enquanto as perdas de massa dobraram em 2000–2009, em comparação com 1975–2000. Masiokas *et al.* (2008) atribuíram a recessão de geleiras da região Norte da Patagônia, em 39°S e 43°S, à uma tendência para condições mais secas e mais quentes detectadas durante o período de 1912–2002.

Embora o clima seja o fator preponderante no regime térmico também há influência da topografia, que por sua vez também influencia no padrão local de precipitação (Sanches, 2013). A declividade no setor frontal das geleiras pode ser um fator determinante no processo de ablação, o que pode influenciar em uma maior velocidade de deslizamento basal (Paterson, 1999).

O Monte Melimoyu, apresentou uma perda de área total de 35,61% na cobertura de gelo do total de 80,97 km<sup>2</sup> em 1970, com 52,14 km<sup>2</sup> em 2017. As geleiras mostraram uma contínua tendência à retração, com uma maior perda de área no período de 1970-1986, cerca 23,04% do total da área em 1970 (Idalino *et al.*, 2019). As tendências de diminuição da precipitação média anual podem explicar as recentes variações nestas geleiras (Idalino *et al.*, 2019).

No entanto, muito pouco ainda se sabe sobre todas as variáveis do ambiente, como a variabilidade climática influencia no processo da perda de área e a variação na elevação da linha de frente nas geleiras do Monte Melimoyu. Esta investigação é de relevante interesse científico para o estudo da Criosfera,

em específico as geleiras localizadas nesta área da patagônia onde há escassez de cobertura espacial e temporal de dados que possibilitam o entendimento do comportamento destas.

Este artigo objetiva investigar a relação da variação da elevação de linha de frente da área das geleiras no Monte Melimoyu ( $44^{\circ}5'S$ ,  $72^{\circ}51'W$ ), com a variabilidade da precipitação média anual e temperatura média anual no período 1950-2017. O artigo analisa os contrastes entre as variações de elevação de linha de frente das geleiras a partir das diferenças de declividade.

### Área de estudo

O Monte Melimoyu, localizado a  $44^{\circ}5'S$  –  $72^{\circ}51'W$ , na região norte da Patagônia chilena, corresponde a um estrato vulcão com aproximadamente 9,65 km de diâmetro, com 52,14 km<sup>2</sup> de área glacial em 2017 (Idalino *et al.* 2019) e uma cratera do tipo caldeira coberta de gelo (Figura 1). Está situado a 21 km de distância da costa leste do Pacífico Sul, entre os rios Palena e Moraleda, onde o degelo escoar para os fiordes em contato com o oceano.

A Patagônia Norte, assim como a XI região administrativa do Chile, região de Aisén é caracterizada por uma paisagem complexa com muitos fiordes e lagos (Figura 1), que foram formados por erosão laminar glacial do manto de gelo da Patagônia durante o Quaternário.

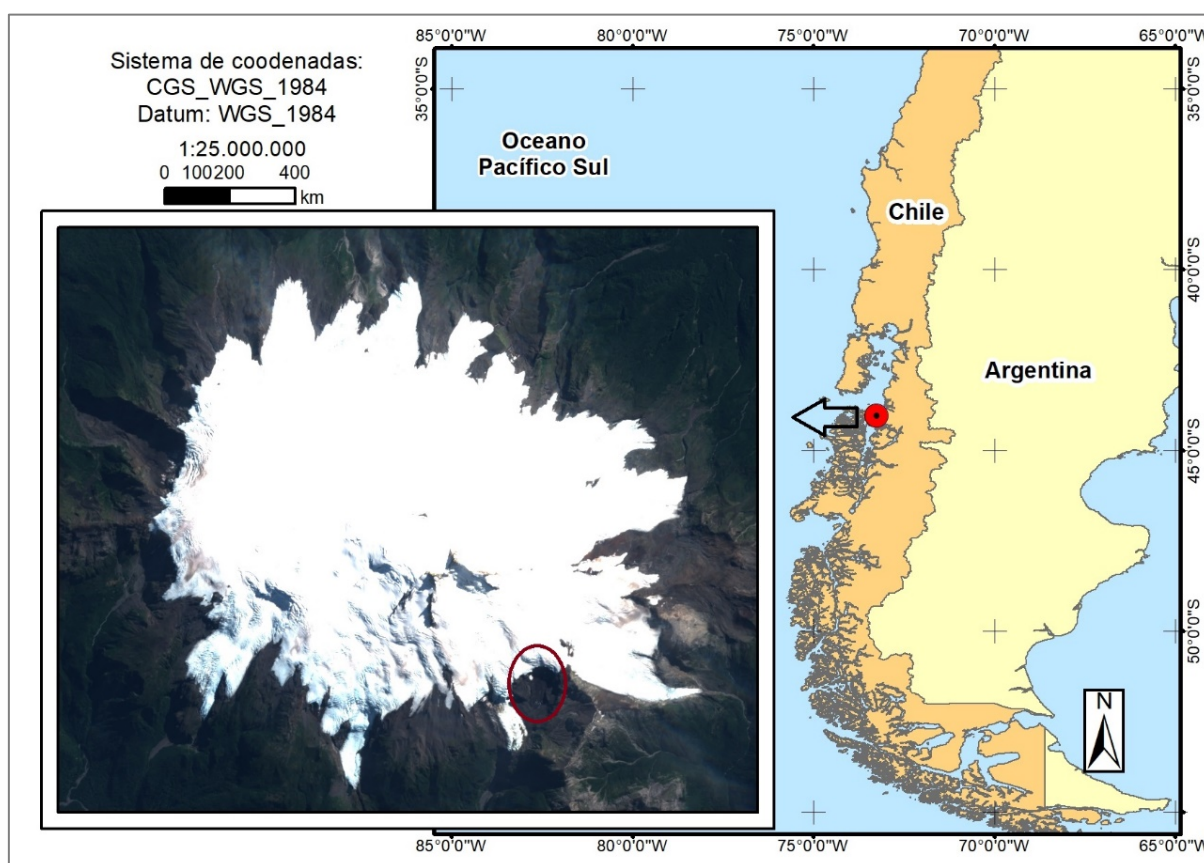


Figura 1. Localização do Monte Melimoyu. Geleira rochosa demarcada com a elipse em vermelho. Imagem do Sentinel-2A com RGB (4-3-2) cor-verdadeira.

A borda da cratera tem quatro picos rochosos e mostra uma abertura em direção ao NE, provavelmente gerada por fases explosivas freato-magmáticas. (Gonzalez-Ferran, 1995). As 16 geleiras do Monte Melimoyu são classificadas como geleiras de montanha, que se caracterizam por qualquer

geleira que flui entre as paredes de um vale de montanha, refletindo as principais feições da topografia subglacial (Simões, 2004; Christopherson & Birkeland, 2017). Por consequência da própria capacidade erosiva do seu corpo de gelo e também deposicional, na área está presente uma Geleira Rochosa (Figura 1), que foram reconhecidas pela estrutura de fluxo característica e cobertura superficial de detritos (Ferrando, 2017).

A América do Sul localiza-se entre 12°N e 55°S, abrange terras tanto em baixas quanto em médias latitudes, e possui uma geografia diversificada com a presença da Cordilheira dos Andes. A distribuição das terras sul-americanas em diferentes latitudes e com formas de relevo variadas proporcionam a atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a não homogeneidade climática desta região (Reboita *et al.* 2010).

Segundo Köppen (1936) o clima da região de Aisén é classificado como Cfc, de regiões oceânicas e marítimas e das regiões costeiras ocidentais do continente, onde o clima é temperado úmido sem estação seca com verão curto e ameno.

O centro-sul do Chile (onde se encontra a área de estudo) apresenta um ciclo anual de precipitação com valores máximos no inverno e mínimos no verão, apresentando maior homogeneidade ao longo do ano na parte mais austral (Reboita *et al.*, 2010). A ocorrência de precipitação nesta região é condicionada pela posição do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul, conhecido como ASPS (Aceituno, 1980). Este sistema é um centro de alta pressão semipermanente que deve sua existência ao movimento subsidente da célula de Hadley. No inverno, como o ASPS localiza-se mais ao norte (25°S – 90°W) do que no verão (33° S – 90° W), os ventos de oeste ao sul do ASPS atingem a Cordilheira dos Andes nas latitudes, sendo forçados a ascender. Neste processo, o escoamento é resfriado adiabaticamente e favorece a precipitação na região (Reboita *et al.*, 2010).

### **Materiais e métodos**

Para a execução da metodologia foram utilizados o MDE ASTER-GDEM v.2 (2011), uma cena do Sentinel-2A – MSI, LC1 (17/03/2017), dados de área das geleiras em formato *shapefile* do Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS, 2015), para os anos de 1970, 1986 e 2000, e de Idalino *et al.* (2019) para 2017 (Tabela 1).

Para as análises meteorológicas, foi utilizada a série de dados de precipitação média anual da região a partir dos dados das estações de La Junta (43°58'S - 72°25' O) e Puerto Aysén Ad. (45°23'S – 72°39'O) entre 1950–2017 (Tabela 1). As análises das médias anuais de temperatura superficial do ar foram realizadas com os dados de reanálise de Delaware, no período de 1948–2017.

<b>Dados</b>	<b>Escala / resolução espacial / medidas</b>	<b>Data / período</b>	<b>Fonte</b>
<b>ASTER-GDEM v.2</b>	30 metros	2011	NASA/METI – by: USGS
<b>Sentinel-2A, MSI - LC1</b>	10 metros	17/03/2017	ESA – by: USGS
<b>Área das geleiras em 1970, 1986 e 2000.</b>	30 metros	2015	glims.org/rgi
<b>Área de geleiras em 2017</b>	1:5.000	2018	Idalino <i>et al.</i> 2019
<b>Precipitação</b>	mm/ano	1950-2017	(CR) <sup>2</sup> - Chile
<b>Temperatura</b>	°C médias anuais	1948-2017	Delaware - GHCN2

Tabela 1. Dados utilizados no trabalho.

A detecção da variação da elevação da linha de frente foi estimada a partir dos valores das cotas de elevação mínima das geleiras (1970–2017) através da análise das linhas de frente de 1970, 1986, 2000 e 2017 e do ASTER-GDEM v2, o qual foi projetado para o sistema de projeção UTM, fuso 18S – Datum WGS 1984. O MDE, em formato *raster*, foi processado no software ArcGis, versão 10.3.1 (by ESRI®), para extrair as informações geomorfométricas das geleiras: a elevação, declividade e orientação.

O MDE foi classificado com intervalos de 200 metros de altitude, entre 175 metros (sendo a cota mínima de elevação) e 2399 metros (a cota máxima de elevação) para a caracterização dos percentuais envolvidos em cada classe. A declividade da superfície foi extraída com a classificação do MDE, aplicando a com a ferramenta de análise espacial *Slope*, do *Surface* ao *raster*, obtendo intervalos expressos em graus entre 0-3°, 3-8°, 8-20°, 20-45°, 45-70° e >70°.

Após o processamento e extração das informações, foi realizado o recorte do MDE com os dados de área das geleiras (em formato *shapefile*) do GLIMS para o ano de 1970 e de Idalino *et al.* (2019) para o ano de 2017. Os dados representam os limites das 16 geleiras (delimitados pelo GLIMS) e a delimitação das linhas de frente. O recorte foi aplicado com a área total em 1970 e de cada geleira para o período, e da área total em 2017 e de cada geleira para o período.

Foi realizada a reclassificação dos arquivos *raster* com a ferramenta de análises 3D *Reclassify*, do *Raster Reclass*. Esse procedimento permitiu a tabulação dos valores de elevação e declividade, para conversão destes em polígonos por meio da aplicação da ferramenta de conversão *Raster to Polygon*. Em formato *polígono*, foi possível extrair o valor da área total em km<sup>2</sup> para cada classe de elevação e declividade das geleiras, permitindo o cálculo de porcentagem (%) de área por classe.

## Resultados e discussões

### Variações geomorfológicas e dados meteorológicos

A área total coberta por gelo (16 geleiras) do Monte Melimoyu em 1970 era de 80,97 km<sup>2</sup> e de 52,14 km<sup>2</sup> em 2017 (Idalino *et al.*, 2019). As geleiras com maior perda percentual de área total foram as de número 10, 12, 4, 11 e 15, com 64,94%, 57,63%, 50%, 49,87% e 44,27% respectivamente (Tabela 2). As de menor perda percentual de área foram as de número 14, 2, 7, 8 e 5, com 28,71%, 28%, 25,37%, 23,09% e 19,72%, respectivamente (Tabela 2). As demais geleiras (3, 9, 6, 13, 1 e 16) apresentaram 39,12%, 37,78%, 36,89%, 34,29%, 32,45% e 31,66%, respectivamente (Tabela 2).

Geleira	Área (km <sup>2</sup> ) 1970	Área (km <sup>2</sup> ) 2017	Área total (%) restante entre 1970-2017	Perda total (%) entre 1970-2017
1	6,07	4,1	67,54	32,45
2	0,5	0,36	72	28
3	3,63	2,21	60,88	39,11
4	0,54	0,27	50	50
5	2,89	2,32	80,27	19,72
6	13,12	8,28	63,1	36,89
7	4,02	3	74,62	25,37
8	8,36	6,43	76,91	23,08
9	4,95	3,08	62,22	37,77
10	4,25	1,49	35,05	64,94
11	3,73	1,87	50,13	49,86
12	2,62	1,11	42,36	57,63
13	9,45	6,21	65,71	34,28
14	2,02	1,44	71,28	28,71
15	1,31	0,73	55,72	44,27
16	13,52	9,24	68,34	31,65

Tabela 2. Percentual da perda de área total das geleiras, entre 1970-2017.

Em relação ao total de área coberta por gelo em 1970, a geleira 13 mostrou área nos setores representados pelas classes de 175-200 m, 201-400 m (Figura 2) e na classe de 401-600 m, juntamente com as geleiras 6, 7 e 16 (Figura 2 e Tabela 3), apresentando alterações em 2017.

As geleiras 13 e 16 apresentaram área nos setores representados pelas classes de 601-800 m, enquanto que as geleiras 6 e 7 apresentaram área nos setores representados pelas classes de 801-1000 m (Figura 2). O comportamento de retração apresentado vai ao encontro dos resultados encontrados para outras áreas da Patagônia por Rignot *et al.* (2003), Aniya (2007), Möller *et al.* (2007), Masiokas *et al.* (2008), Lopez *et al.* (2010), Garreaud *et al.* (2013) e Schaefer *et al.* (2013).



Área total em 1970: 80,97 km <sup>2</sup>		
Classe	Área km <sup>2</sup>	%
175-200	0,03	0,03
201-400	0,52	0,64
401-600	1,9	2,34
<b>Total:</b>	<b>2,45</b>	<b>3,01</b>

Tabela 3. Classes de elevação com menor área coberta por geleiras em 1970.

As áreas presentes nessas classes representavam também as cotas mínimas de elevação em 1970, que mostraram variações ao longo do período de análise (Tabela 3 e Figuras 2 e 3).

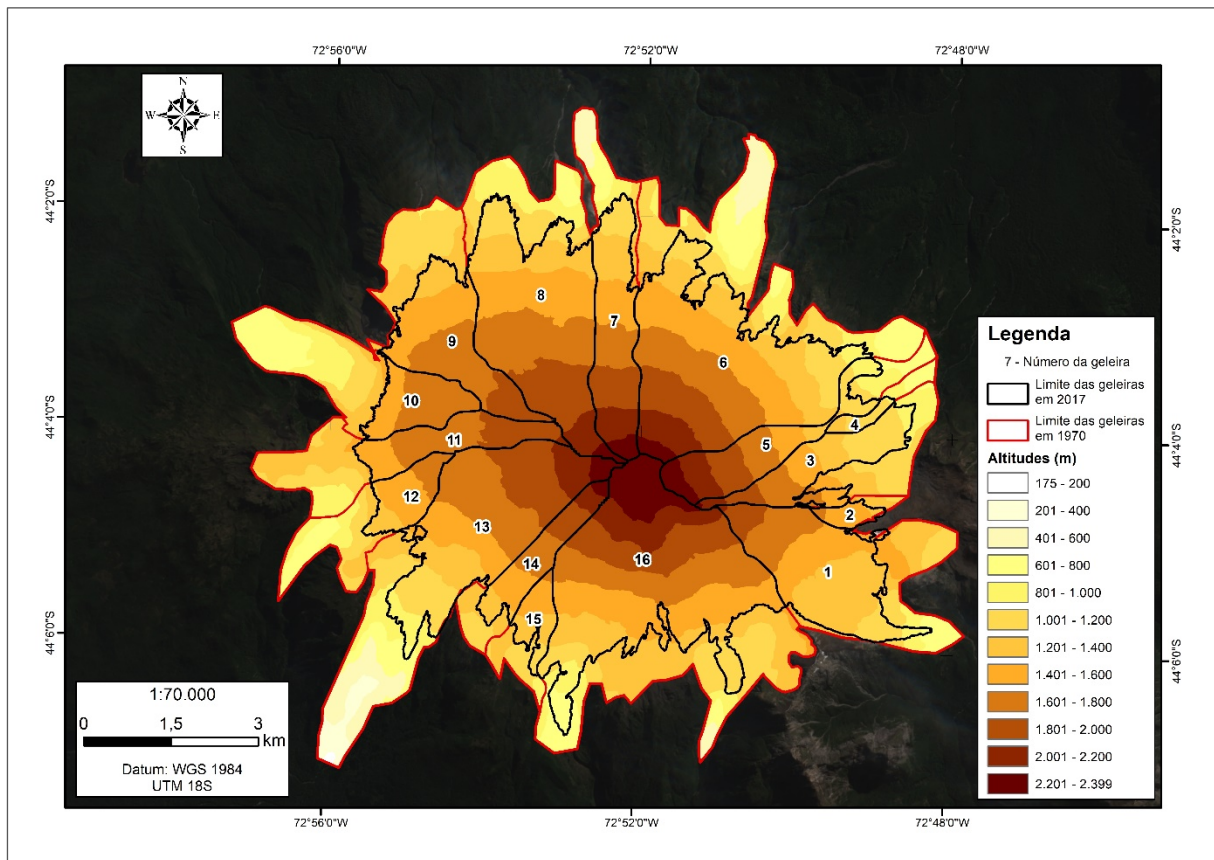


Figura 2. Geleiras e caracterização das classes de elevação do Monte Melimoyu em 1970 e 2017. Imagem do Sentinel-2A com RGB (4-3-2) cor-verdadeira.

As linhas de frente mostraram variações de elevação ao longo do período de análise (Tabela 3 e Figuras 2 e 3). A maior variação da cota mínima de elevação está associada às geleiras 10, 11, 13, 7 e 12, com um aumento de 74 m, 570 m, 528 m, 477 m e 468 m, respectivamente (Figura 3). As menores variações da cota mínima de elevação foram apresentadas pelas geleiras 5, 14, 2, 3 e 1, com um aumento de 192 m, 178 m, 146 m, 128 m e 98 m, respectivamente (Figura 3).

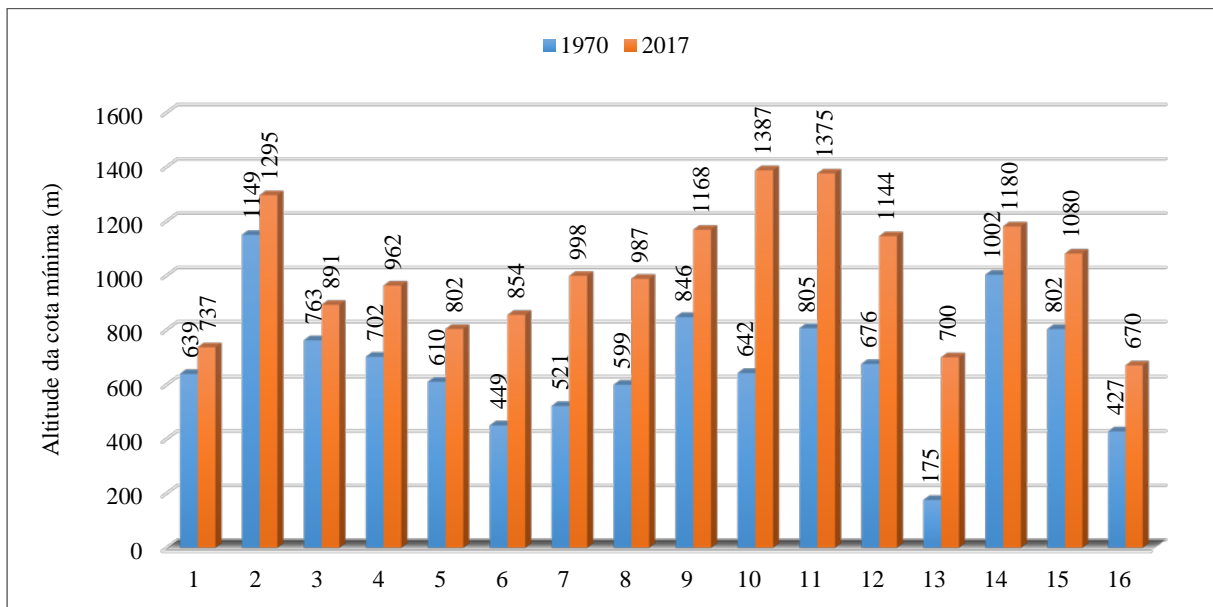


Figura 3. Variação da elevação da linha de frente das geleiras.

As variações das cotas mínimas de elevação são produto do processo de retração frontal experimentado por todas as geleiras entre 1970–2017, apresentado por Idalino *et al.* (2019), o que resultou na perda de área total nestas classes, não restando mais áreas de geleiras nas classes de elevações de 175-200 m, 201-400 m e 401-600 m em 2017 (Figuras 2 e 3).

Os dados de reanálise de Delaware mostraram uma temperatura média de 9,87°C para o período de 1948-2017, e uma tendência positiva nos dados para o período (Figura 4).

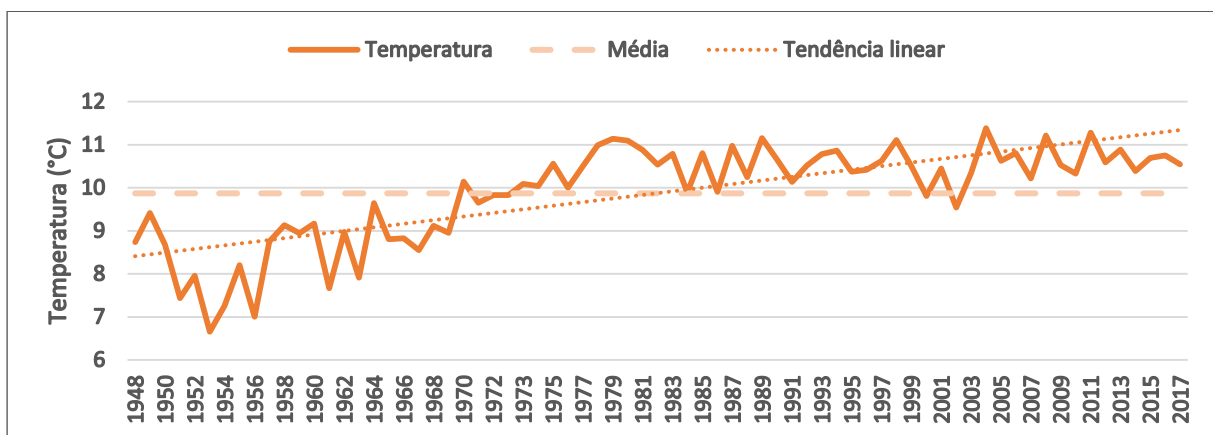


Figura 4. Gráfico de médias anuais da temperatura superficial do ar, a partir dos dados de reanálise de Delaware. Disponível em: <http://climate.geog.udel.edu/>. Acesso em 13/12/2018

Verifica-se um aumento maior nos valores de temperatura média na década de 1950 e 1970, com 6,65°C em 1953 e 9,13°C em 1958, 9,65°C em 1971 e 11,13°C em 1979, o que representou a maior variação nas médias de temperatura de toda a série histórica (Figura 4). No início da década de 1980, as médias voltam a apresentar valores mais baixos de temperatura média, chegando a 9,88°C no ano de 1994 (Figura 4). Também há uma grande variabilidade nos anos seguintes, chegando até 10,97°C em 1987, 11,15°C em 1989, 10,13°C em 1991 e 11,11°C em 1998, o ano mais quente da década de 1990. Os valores de média mais baixa e mais alta da série temporal são apresentados nos anos iniciais da década de 2000, pelos anos de 2002, com 9,54°C, e de 2004, com 11,38°C, respectivamente (Figura 4).

A série temporal de dados de precipitação média anual para o período é de 2539 mm. Há uma tendência contínua de diminuição nos valores de precipitação total na região (Figura 5). As EM apresentam valores precipitação média anual semelhantes, com uma tendência decrescente em todo o período de análise.

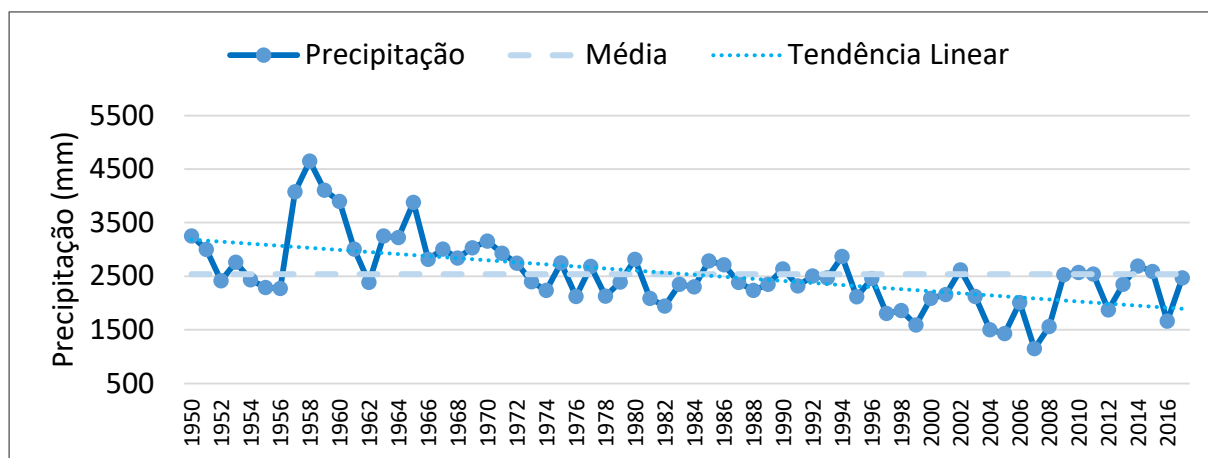


Figura 5. Gráfico da precipitação média anual com dados das EM de La Junta e Puerto Aysén Ad. Fonte: Explorador Climático (CR)<sup>2</sup> - <http://explorador.cr2.cl>. Acesso em 05/04/2018.

Observa-se baixos valores de precipitação na década de 1970 (quando comparados com os valores nos anos de iniciais do período, onde em 1958 obteve-se uma precipitação de 4647 mm) e início da década de 1980, chegando a 2234 mm no ano de 1974, e 1944 mm no ano de 1982 (Figura 5). Um aumento significativo de precipitação foi verificado no ano 1985 com 2787 mm, logo após isso, uma redução nos anos finais da década, chegando 2353 mm em 1989 (Figura 5).

As décadas de 1990 e 2000 apresentaram altas variabilidades na precipitação, com uma diminuição de cerca de 1273 mm entre 1994 e 1999, e 1469 mm entre 2002 e 2007 (Figura 5), em um intervalo de tempo de 5 anos para nos dois casos, a apresentou em 2007 o ano mais seco da região, com 1151 mm (Figura 5).

Nos anos iniciais do período de análise, as geleiras mostravam menores valores de elevação nos setores frontais, bem como áreas em locais de maiores declividades (Figuras 2, 3 e 4). A análise da variabilidade meteorológica destas décadas iniciais do período de estudo é relevante, pois o processo de retração (exceto as geleiras 1 e 2) foi mais acentuado no período de 1970-1986 (Figura 6) o que deve ter sido uma clara resposta às condições mais quentes e secas apresentadas pelas séries temporais de temperatura e precipitação (Figuras 4, 5 e 6). No período entre 1986 e 2000, o comportamento de retração das geleiras foi menos pronunciado (Figura 6), o que pode estar ligado à menor variabilidade nos dados meteorológicos (Figuras 4 e 5).

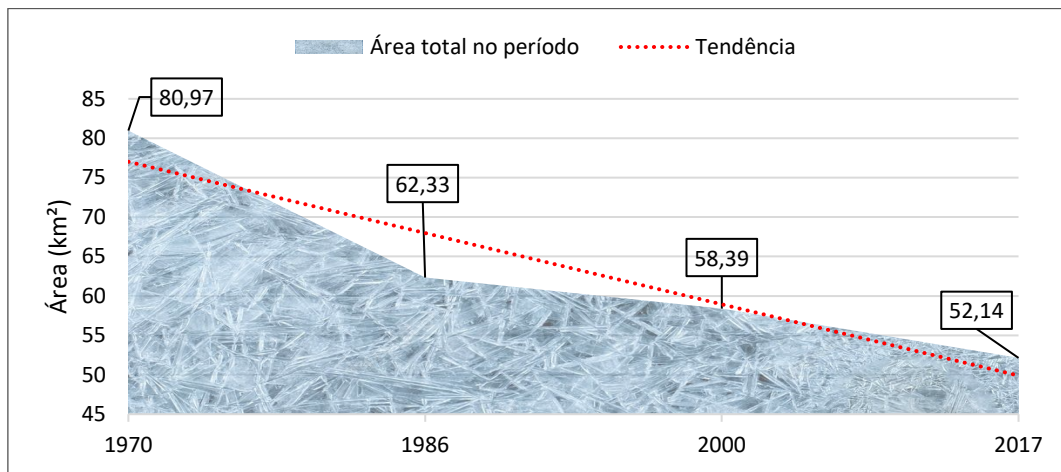


Figura 6. Gráfico de área total por período de análise. Fonte: GLIMS, 2015 e Idalino *et al.* (2019).

O comportamento de retração das geleiras pode estar relacionado à tendência dos dados de precipitação e temperatura dos anos e décadas anteriores a esta, entre outros aspectos. As geleiras também podem estar refletindo, entre outros fatores concomitantes, às anomalias registradas para os anos de 1970 e 1979 com aumento significativo nos valores de temperatura média superficial e aos mais baixos valores de precipitações anuais no ano de 1974 e 1981, quando analisado o período 1970-2017. As geleiras 1 e 2, as quais possuem altos valores de elevação máxima e pouca declividade, comparada as demais, mostraram ter maior perda de área total no período seguinte, entre 1986 e 2000.

Os estudos existentes indicam que a variável climática é uma das que exerce maior influência no comportamento das geleiras, onde o aumento das temperaturas favorece o derretimento das camadas de gelo, forçando o processo de ablação das geleiras na Patagônia Norte (Pellicciotti *et al.*, 2014; Masiokas *et al.*, 2008). Porém, além da tendência a aumento das temperaturas regional verificado, outros fatores, como a diferença dos índices de precipitação, podem influenciar na resposta da dinâmica de balanço de massa das geleiras.

O regime termal de uma geleira influencia na dinâmica da água de degelo, tanto na deformação do gelo e na lubrificação do fundo quanto nos sedimentos e desenvolvimento de formas de relevo erosionais e deposicionais, assim como na sua resposta à variabilidade climática (Hambrey, 1994). De certa forma, com a diminuição da altitude, a temperatura aumenta e a precipitação tende a se tornar cada vez mais líquida e a dinâmica das geleiras, incluindo o regime termal, pode ser influenciada por essa condição climática, causando aumento de ablação e por consequência, a retração das linhas de frente e a diminuição de área total das geleiras.

A tendência de perda de área das geleiras do Monte Melimoyu possui relação com as tendências de aumento de temperatura superficial do ar média anual e de diminuição de precipitação média anual na região nas últimas décadas (Figura 07).

Os resultados vão ao encontro a Masiokas *et al.* (2008), que atribuíram à recessão de geleiras da região Norte da Patagônia, no setor entre 39°S e 43°S, a uma tendência para condições mais secas e mais quentes detectadas durante o período 1912–2002. Bertrand *et al.*, (2012) também apontaram que as flutuações da geleira Gualas, no Campo de Gelo da Patagônia Norte, foram principalmente controladas por mudanças na precipitação. González (2004) registrou o aumento da elevação da linha de equilíbrio

nas geleiras nas últimas décadas na Região dos Lagos (39° a 42°S) nas últimas décadas e relacionou ao aquecimento troposférico e à redução das precipitações regionais, por diminuir a área de acumulação destas.

### Variação da declividade e o impacto nas geleiras

Em termos de declividade, as classes que continham maior número de área total em 1970 foram as de 8-20° e 20-45°, com 36,78 km<sup>2</sup> e 32,34 km<sup>2</sup>, totalizando 45,42% e 39,93% da área total glacial de 80,97 km<sup>2</sup> (Idalino *et al.*, 2019) (Figura 7).

Em 2017, as áreas das classes de 8-20° e de 20-45° somam 27,61 km<sup>2</sup> e 19,16 km<sup>2</sup>, totalizando 52,95% e 36,75% da área total glacial de 52,14 km<sup>2</sup> (Idalino *et al.*, 2019), continuando como sendo as classes de maior área total para o período (Figura 7).

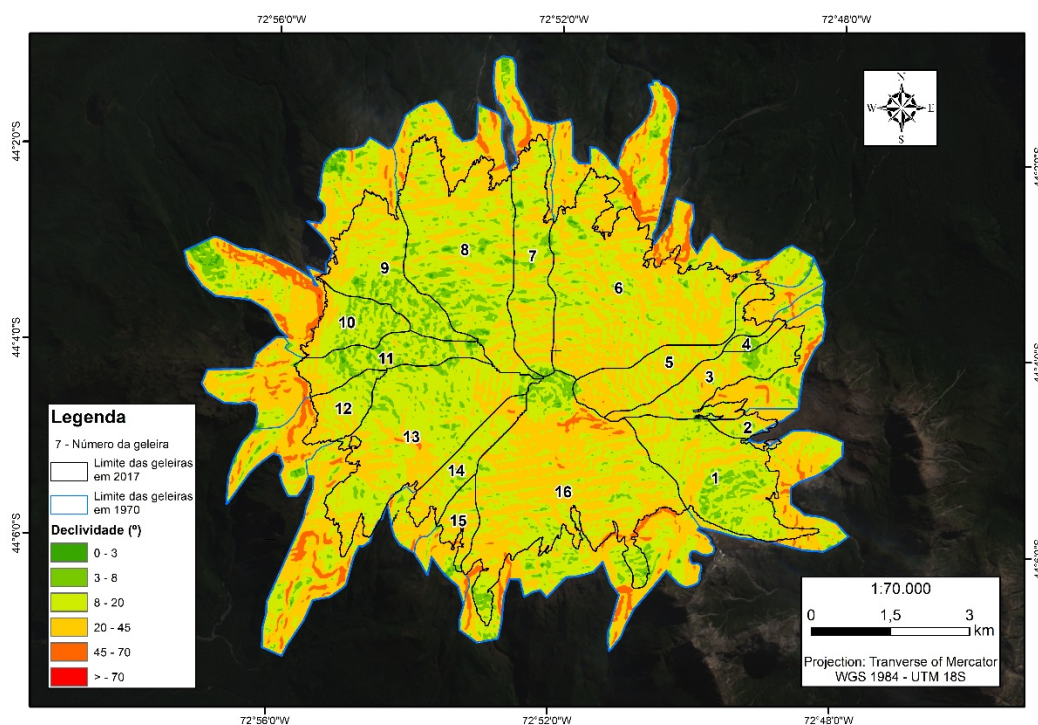


Figura 7. Declividade das geleiras no Monte Melimoyu em 1970 e 2017. Imagem do Sentinel-2A com RGB (4-3-2) cor-verdadeira.

Em 2017, as classes de 0-3°, de 3-8° e de 45-70° apresentam as menores áreas coberta por gelo, com 0,5 km<sup>2</sup> (0,95%), 4,57 km<sup>2</sup> (8,76%) e 0,28 km<sup>2</sup> (0,55%) de área total. Nenhuma geleira apresentou valores de área na classe de >70° no ano de 2017 (Figura 7 e Tabela 5).

Já em 1970, as classes de 0-3°, de 3-8° e de 45-70° de declividade apresentavam os menores valores de área total de 2,44 km<sup>2</sup>, 6,19 km<sup>2</sup> e 3,20 km<sup>2</sup>, respectivamente, seguidas da classe de >70°, com 0,014 km<sup>2</sup> de área total, representando 3,01%, 7,65%, 3,95% e 0,017% do total de área coberta por gelo apresentado em 1970, (Figura 7 e Tabela 5).



Geleira	Declividade em 1970			Declividade em 2017			Variação da mínima	Variação da média	Variação da máxima
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima			
<b>Id</b>							1970-2017	1970-2017	1970-2017
<b>1</b>	0,53	18,78	61,33	0,53	15,66	49,73	0	-3,12	-11,6
<b>2</b>	2,25	20,53	43,81	2,25	18,2	39,41	0	-2,33	-4,4
<b>3</b>	0,37	20,39	60,05	0,37	18,45	48,32	0	-1,94	-11,73
<b>4</b>	0,37	16,62	56,14	0,37	14,33	38,34	0	-2,29	-17,8
<b>5</b>	0,75	21,62	53,09	0,75	20,98	49,01	0	-0,64	-4,08
<b>6</b>	0,37	22,91	72,83	0,37	19,99	49,89	0	-2,92	-22,94
<b>7</b>	0,1	19,54	70,97	0,37	17,22	46,73	-0,27	-2,32	-24,24
<b>8</b>	0,1	18,07	64,04	0,1	16,01	50,65	0	-2,06	-13,39
<b>9</b>	0,1	17,35	66,92	0,75	15,05	50,87	-0,65	-2,3	-16,05
<b>10</b>	0,1	22,14	72,13	0,37	13,83	68,73	-0,27	-8,31	-3,4
<b>11</b>	0	20,25	70,39	0,1	12,32	33,13	-0,1	-7,93	-37,26
<b>12</b>	0,37	23,71	68,29	1,12	17,01	39,79	-0,75	-6,7	-28,5
<b>13</b>	0,37	20,45	68,69	0,53	16,54	54,8	-0,16	-3,91	-13,89
<b>14</b>	0,84	20,12	59,65	0,84	18,9	52,69	0	-1,22	-6,96
<b>15</b>	0,1	22,55	61,41	1,19	20,06	47,86	-1,09	-2,49	-13,55
<b>16</b>	0,37	22,08	67,64	0,53	21,2	64,37	-0,16	-0,88	-3,27

Tabela 5. Declividades mínimas, médias e máximas em 1970 e 2017.

As áreas com valores de declividade acima de 70° desapareceram em 2017 (Figura 7 e Tabela 5). Estas áreas configuram-se como áreas livres de gelo atualmente e considera-se que a morfologia do substrato rochoso em contato com o gelo controlava o padrão médio de declividade das geleiras. As geleiras de número 6, 7, 10 e 11 possuíam 0,009 km<sup>2</sup>, 0,0013 km<sup>2</sup>, 0,0027 km<sup>2</sup> e 0,0009 km<sup>2</sup> de área na classe de declividade >70°, e em 2017 os setores frontais destas se encontram nas classes de 20-45° e de 45-70°.

O contraste de perda de área total e elevação da linha de frente de algumas geleiras (como as de número 6, 10 e 13) no período mostra relação com a presença de setores de declividade máxima em seus ambientes proglaciais, formados entre 1970 a 2017 (Tabela 5).

A declividade frontal das geleiras em 1970 foi inferida pela declividade e topografia da área atualmente exposta pela retração entre 1970 e 2017 (área perdida entre o período). As geleiras 11, 6, 7, 15, 13, 9 e 8 possuem altos valores de declividade frontal em 1970. Estas também apresentaram altos valores de variação de linha de frente no período analisado. Considerando a influência do fator elevação máxima e dimensões das geleiras, juntamente com a declividade do setor frontal em 1970, a geleira 15 se destaca por baixos valores de elevação máxima, e, assim como as geleiras 11, 7, 9 e 8, apresenta pequenas dimensões. No entanto, a geleira 8 e 7 apresentou pouca perda percentual de área, o que pode

estar relacionada aos altos valores de elevação máxima (Idalino *et al.*, 2019). As geleiras 5 e 2 possuem baixos valores declividade frontal em 1970 e foram as que apresentaram baixa variação de elevação frontal e também baixa perda percentual de área no período 1970-2017.

A pouca perda percentual de área e variação da elevação da linha de frente das geleiras 14, 2, 3 e 1 no período pode estar relacionada com os valores menores de declividade frontal (em 1970). A geleira 4 apresenta alta perda percentual de área total, possivelmente relacionada à elevada linha de frente atual, baixa declividade máxima atual, baixos valores de elevação máxima e pequenas dimensões. A perda de área total da geleira 4 ocorreu principalmente no período 1970-1986 (Idalino *et al.*, 2019), quando provavelmente a variação de elevação da linha de frente foi maior.

Evidencia-se que a magnitude da resposta de cada geleira na área de estudo às forçantes pode ser modulada pelos fatores topográficos, como a declividade, a qual pode estar relacionada à declividade da topografia basal. Howat *et al.* (2002) destaca que esta importante interação a ser observada em análises de geleiras. A declividade proglacial obtida neste estudo, correspondente a área que se tornou livre de gelo entre 1970 a 2017, pode relevar as características desta topografia basal no setor próximo à frente da geleira (*snout*). Aniya & Enomoto (1986) ressaltam a relevância de entender a tipologia e topografia da zona de ablação no estudo dos diferentes comportamentos das geleiras na Patagônia Norte. Patterson (1999) relaciona a declividade basal como um condicionante para a velocidade basal da geleira, assim como o regime termal.

Avalanchas são especialmente condicionadas a terrenos íngremes. Este processo é responsável pelo transporte de camadas espessas de neve dessas áreas (Pellicciotti *et al.*, 2014; Kuhn *et al.*, 1999). A presença de área das geleiras em setores com declividade, principalmente as iguais ou maior que 70°, pode ter uma alta influencia no processo de retração experimentado pelas geleiras do Monte Melimoyu.

Ainda que o efeito de uma determinada flutuação climática no balanço de massa da geleira depende da distribuição área-altitude da geleira (Nesje & Dahl, 2000). Na análise comparativa entre a variação das elevações de linhas de frente e das classes de elevação, as geleiras 10 e 13 são algumas das que apresentaram maior retração frontal no período de 1970-2017 (Idalino *et al.*, 2019), podendo este processo estar diretamente ligado aos baixos valores de altitude apresentados no setor frontal.

Como a temperatura atmosférica decresce com a altitude, a neve depositada nas maiores altitudes tende a ter menores temperaturas do que as depositadas em altitudes mais baixas (Oerlemans, 2001). De certa forma, com a diminuição da altitude, a temperatura aumenta e a precipitação tende a se tornar cada vez mais líquida e a dinâmica das geleiras pode ser influenciada por essa condição climática, causando aumento de ablação e, por consequência, a retração das linhas de frente.

Ressalta-se que as diferenças existentes nos climas locais, tamanho, declividade, e de velocidade individual das geleiras pode explicar o comportamento diferente de cada geleira, assim como denotam Nesje (1992), Casassa *et al.* (1997), Harrison & Winchester (1998) e, especificamente para a área de estudo, Idalino *et al.* (2019).

Idalino *et al.* (2019) não encontraram relação da orientação solar N/S com um padrão de maior ou menor perda de área das geleiras por setor. No entanto, considera-se que o balanço de radiação de cada geleira e a redistribuição de neve pelo vento são fatores que podem ser estudados para as geleiras

do Monte Melimoyu. A cobertura sedimentar também pode ser considerada com um parâmetro condicionante para as respostas das geleiras. É comum encontrar geleiras que conseguem preservar suas características de área, por conta do isolamento térmico, muitas vezes relacionado com camadas de sedimentos. Segundo Ferrando (2017) relacionado por deposição sedimentar, algumas geleiras rochosas em regiões montanhosas podem apresentar uma cobertura de detritos às vezes tão uniforme que se tornam quase imperceptíveis quando próximas às encostas e a outras geleiras de rochas (Ferrando, 2017). A cobertura sedimentar pode ter efeito de transmissor térmico ou isolante térmico a partir de  $\pm 3$  m de espessura, dependendo da seleção granulométrica e da litologia (Ferrando, 2017).

A geleira rochosa (destacada na Figura 1), identificada por Ferrando (2017) e Idalino *et al.* (2019), aparentemente se encontra em um processo de isolamento térmico ocasionado pela cobertura de detritos, que deriva de uma geleira branca regenerada (Ferrando, 2017), o que deve estar mantendo a geleira livre das variações apresentadas.

### **Conclusões**

Ao analisar as médias dos dados de temperatura e precipitação no período 1950-2017 foram encontradas tendências de aumento nas médias de temperatura superficial anual e diminuição nas médias de precipitação média anual. Os dados de área total das geleiras apresentaram uma tendência contínua de diminuição de área percentual em todo o período. As tendências de condições mais secas e quentes analisadas no período podem estar diretamente relacionadas com o comportamento das geleiras analisadas. Estes resultados vão ao encontro de outros estudos na Patagonia por Masiokas *et al.* (2008), Schaefer *et al.* (2013) e Pellicciotti *et al.* (2014) sobre as variações das geleiras nas últimas décadas na região.

A maior variabilidade meteorológica para os anos iniciais do período pode ser um fator chave para explicar a retração mais acentuada entre 1970 e 1986, onde os dados mostraram um comportamento de aquecimento e de estiagem entre as décadas de 1950 e 1980. As condições menos variáveis nos dados meteorológicos das décadas seguintes, em contraste com as condições geomorfométricas de cada geleira, podem ter suavizado o processo de retração dos corpos de gelo.

Coincidindo com estes resultados, as geleiras possuíam, no início do período de análise, os mais baixos valores de elevação nos setores frontais, bem como áreas frontais em locais de alta declividade, de maneira que a combinação destes fatores pode explicar os contrastes entre as variações de elevação de linha de frente e de área de geleiras do Monte Melimoyu no período de análise. Desta forma, a intensidade da resposta de cada geleira na área de estudo às forçantes pode ser modulada pelos fatores topográficos, como a declividade, a qual pode estar relacionada à topografia basal.

Um maior detalhamento temporal e de mapeamento pode preencher as lacunas de informações sobre área, declividade do relevo, a influência da altitude, bem como a influência dos parâmetros de diferença de cobertura de detritos no comportamento das geleiras, e até mesmo na formação de geleiras rochosas e suas características. Uma análise dedicada ao balanço de massa e a detecção da variação de linha de neve, com dados em campo, pode auxiliar no entendimento do comportamento das geleiras e servir para relacionar estas variáveis ao balanço de energia.



Além destas variáveis, dados como as diferenças na altimetria e de espessura dos corpos de gelo, a elevação da linha de neve e o fator orientação, na determinação da redistribuição da neve, são importantes elementos de futura análise, podendo auxiliar nas análises das respostas das geleiras aos parâmetros analisados.

Os resultados possibilitaram a disponibilização de um banco de dados atualizados em SIG, contendo informações relevantes das características das geleiras do Monte Melimoyu. Os dados podem ser úteis, de forma a colaborar com monitoramentos futuros sobre as mudanças ambientais de geleiras da região.

### **Agradecimentos**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Ao Instituto Nacional da Ciência e Tecnologia (INCT) da Criosfera. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS). Ao Centro Polar e Climático (CPC) e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (POSGEA) – UFRGS.

### **Referências**

- ACEITUNO, P. **Relación entre la posición del anticiclone subtropical y la precipitación en Chile.** Relatório do Projeto no E.551.791 do Departamento de Geofísica da Universidade do Chile. 14 p. 1980.
- ANIYA, M. Glacier variations of Hielo Patagónico Norte, Chile, for 1944/45-2004/05. **Bull. Glaciol. Res.** v. 24. p. 59–70, 2007.
- ANIYA, M; ENOMOTO, H. Glacier Variations and Their Causes in the Northern Patagonia Icefield, Chile, since 1944. **Arctic and Alpine Research**, v. 18, n. 3 p. 307-316, 1986. <https://doi.org/10.1080/00040851.1986.12004092>.
- ARENDT, A.; ECHELMAYER, K; HARRISON, W; LINGLE, G; VALENTINE, V. Rapid Wastage of Alaska Glaciers and their Contribution to Rising Sea Level. **Science**, v. 297. p. 382-386, 2002.
- BERTRAND, S.; HUGHEN, K. A; LAMY, F.; STUUT, J-B. W.; TORREJÓN, F.; LANGE, C, B. Precipitation as the main driver of Neoglacial fluctuations of Gualas glacier, Northern Patagonian Icefield. **Climate of the Past**. v. 8, p. 519–534, 2012.
- BISHOP, M; BARRY R; BUSH, A; COPLAND, L; DWYER, J; FOUNTAIN, F; HAEBERLI, W; HALL, D; KAAB, A; KARGEL, J. 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, 2004.
- CASASSA, G; BRECHER, H; RIVERA, A; ANIYA, M. A century-long recession record of Glacier O'Higgins, Chilean Patagonia. **Annals of Glaciology**. 24. p. 106 – 110, 1997.
- CASASSA, G; RIVERA, A; RIBSTEN, P; SCHNEIDER, C. Current Status of Andean Glaciers. Science Direct, **Global and Planetary Change**, v. 59, p. 1-9, 2007.
- CHRISTOPHERSON, R, W; BIEKERLAND, G, H. **Geossistemas, uma introdução à Geografia Física**, 9ª Ed. Bookman. 656 p. 2017.

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

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

DGA. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Informaciones de los datos pluviométricos. Disponível em: <http://www.dga.cl/acercadeladga/Paginas/default.aspx>.

ESA. U.S. Geological Survey. Sentinel-2A. 17 de março de 2017. 43°49'51.39"S, 73°04'24.36"W. Informações disponíveis em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/10880/1207546/>>.

FERRANDO, F. Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones. **Investigaciones Geográficas**, v. 54, p. 127-144, 2017.

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

GONZALEZ-FERRAN, O. **Volcanes de Chile**. Santiago: Instituto Geográfico Militar. 635p. 1995.

GONZÁLEZ, F, B. **Cambios climáticos en la Región de Los Lagos y respuestas recientes del Glaciar Casa Pangue (41°08'S)**. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Postgrado, Departamento de Geografía. Universidad de Chile, 131, 2004.

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

HAMBREY, M. Glacial Environments. **Londres, UCL Press**. 296 p. 1994.

HARRISON, S; WINCHESTER, V. Historical fluctuations of the Gualas and Reicher Glaciers, North Patagonian Icefield, Chile. **The Holocene**, v. 8, n. 4, p. 481-485, 1998.

HOWAT, I, M; JOUGHIN, I; SCAMBOS, T. A. Rapid changes in ice discharge from Greenland outlet glaciers. **Science**, v. 315, p. 1559-1561, 2007. doi:10.1126/science.1138478

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

IDALINO, F, D; ROSA, K, K; ACUÑA, F, F; VEETTIL, B, K; SIMÕES, J, C; SOUZA, JR, E. Recent glacier variations on Mount Melimoyu (44°50'S-72°51'W), Chilean Patagonia, using Sentinel-2 data. **Geocarto International**. s.n. p. 1-16. 2019.

IPCC. Climate change 2013. **Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013.

KARGEL, J; ABRAMS, M; BISHOP, M; BUSH, A; HAMILTON, G; et al. Multispectral Imaging Contributions to Global Land Ice Measurements from Space. **Remote Sensing of the Environment**, v. 99, p. 187-219, 2005.

KASER, G. Glacier–Climate Interaction at Low Latitudes. **Journal of Glaciology**. 47. 195–204, 2001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jglolacha.2009.12.009>.

KÖPPEN, W; GEIGER, R. Classificação climática de Köppen. 1936. Disponível em: [https://portais.ufg.br/up/68/o/Classifica\\_\\_\\_o\\_Clim\\_\\_tica\\_Koppen.pdf](https://portais.ufg.br/up/68/o/Classifica___o_Clim__tica_Koppen.pdf).

KUHN, M; DREISEITL, E; HOFINGER, S; MARKL, G; SPAN, N; KASER, G. Measurements and models of the mass balance of hintereisferner. **Geografiska Annaler**. 81(4). 659–670, 1999.

LOPEZ, P; NAJIB, K; CARRASCO, J; CASASSA, G. Analysis of meteorological data from NCEP/NCAR reanalysis, radiosonde data and surface stations, and its relation with glacier behaviour in Patagonia during the last 50 years. **Proceedings Fourth EGU Alexander von Humboldt Int. Conf.**, Santiago, Chile, EGU, v. 73, 2010.

MALMROS, J, K; MERNILD, S, H; WILSON, R. Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955-2013/14. **Journal of Glaciology**, v. 62, p. 391-401, 2016. DOI: 10.1017/jog.2016.43

MASIOKAS, M; VILLALBA, R; LUCKMAN, B; LASCANO, M; DELGADO, S; STEPANEK, P. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. **Global and Planetary Change**, v. 60, p. 85-100, 2008.

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

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

MERNILD, S, H; BECKERMAN, A, P; DE JC, Y; HANNA, E; MALMROS, J, K; WILSON, R; ZEMP, M. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the Sub-Antarctic islands. **Global and Planetary Change**. 133. 109–119, 2015.

MÖLLER, M; SCHNEIDER, C; KILIAN, R. Glacier change and climate forcing in recent decades at Gran Campo Nevado, southernmost Patagonia. **Annal of Glaciology**, 46. 136–144, 2007.

NASA/METI. U.S. Geological Survey. Advanced Spaceborn Thermal Emission Radiometric. Global Digital Elevation Model, version 2. 17 de outubro de 2011. 44°30'S, 72°30'W. Informações disponíveis em: <[https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4220/ASTGDEMv2\\_0S45W073/](https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4220/ASTGDEMv2_0S45W073/)>

NESJE, A; DAHL, S, O. Glaciers and Environmental Change. **Key issues in Environmental Change. Hodder Education**. 203 p. 2000.

PATERSON, W, S, B. The Physics of Glaciers. **Butterworth-Heinemann, third edition**. 1999.

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

RABATEL, A; FRANCOU, B; SORUCO, A; GOMEZ, J; CÁCERES, B; et al. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **The Cryosphere**. 7. 81–102, 2013.

REBOITA, M, S; GAN, M, A; DA ROCHA, R, P; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 25(2). p. 185–204, 2010.

RIGNOT, E; RIVERA, A; CASASSA, G. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. **Science**, v. 302, p. 434–437, 2003.

ROCHA, S, A; VIDELA, GIERING, Y. Caracterización Glaciológica de Chile. **Investigaciones Geográficas**, v. 53, p. 3-24, 2017. doi:10.5354/0719-5370.2017.41739.

- SANCHES, A. M. Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia. Dissertação. (Mestrado em Geociências). **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. 93p. 2013.
- SCHAEFER, M, MACHGUTH, M, H; FALVEY, M; CASASSA, G. Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. **Journal of Geophysical Research**. 118. p. 571–88. 2013.
- SIMÕES, J, C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**. v. 4, p. 119-154, 2004.
- VANDEKERKHOVE, E. The volcanic ash soils of Northern Chilean Patagonia (44°–48°S): Distribution, weathering and influence on river chemistry. **Universiteit Gent, Faculteit Wetenschappen: Gent**. 99p. 2014.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciaram uma perda de 35% (há 52,14 km<sup>2</sup> do total de 80,97 km<sup>2</sup> em 1970) na área superficial das geleiras do Monte Melimoyu no período 1970-2017. A taxa de retração evidenciada foi de 0,61 km<sup>2</sup>/ano. Todas as geleiras tiveram uma perda de área constante, com destaque para as geleiras 10, 12, 4, 11 e 15, localizadas nos setores Oeste, Sudoeste e Nordeste, com perdas de 65%, 58%, 50%, 50% e 44%, respectivamente.

Coincidindo com estes resultados, em 1970 havia geleiras com elevação da linha de frente média de 675 m e seu setor frontal apresentava-se com alta declividade média. As geleiras 10, 11, 13, 7 e 12, localizadas nos setores Oeste, Sudoeste e Norte, apresentaram as maiores variações de elevação da linha de frente, de 74 m, 570 m, 528 m, 477 m e 468 m, respectivamente.

Foram identificadas diferenças no padrão de retração entre as geleiras, e existem possíveis relações com características de elevação máxima e mínima no setor frontal, declividade e área total das mesmas. As maiores retrações foram evidenciadas nas faces Oeste e Noroeste, com perdas de 64,94%, 57,63 e 49,86%. Evidenciou-se também, que muitas das geleiras de menores dimensões, altos valores de declividade, e alta elevação da linha de frente, apresentaram as maiores perdas percentuais de área e variações da elevação da linha de frente no período. Em visto, a combinação desses fatores pode explicar os contrastes entre as variações de elevação de linha de frente e de área de geleiras do Monte Melimoyu no período de análise.

A escala de tempo de resposta de cada geleira na área de estudo às forçantes climáticas pode ser modulada pelos fatores topográficos, como a declividade, a qual pode estar relacionada à declividade da topografia basal. Diante da projeção de condições mais secas e quentes para as próximas décadas, algumas geleiras podem responder de forma diferente das outras. As geleiras 15, 10, 2, 12 poderão apresentar o menor tempo de resposta às variações climáticas, pois estas são as que possuem menores valores de elevação máxima, menores áreas totais, maiores valores de elevação da linha de frente e altos valores de declividade.

As geleiras 14 e 11, apesar dos altos valores de declividade, pequenas dimensões, possuem alta elevação máxima e não são as que possuem as menores elevações de linha

de frente. As geleiras 16 e 13 também possuem altos valores de elevação máxima, baixas elevações de linha de frente e maiores dimensões, comparada às demais, apesar do perfil mais íngreme, e podem responder às mudanças climáticas em uma escala diferente das demais. A geleira 14, apesar de ter apresentado baixa variação de elevação da linha de frente e valores de perdas totais de área, possivelmente relacionada à alta elevação máxima, pode evidenciar uma futura aceleração da retração e perda de massa, pois, atualmente, possui alta declividade, elevada linha de frente e pequenas dimensões, comparada às demais.

Um maior detalhamento temporal pode preencher as lacunas de informações sobre área, declividade do relevo, a influência da altitude, bem como a influência dos parâmetros de diferença de cobertura de detritos no comportamento das geleiras, e até mesmo na formação de geleiras rochosas e suas características. Uma análise dedicada ao balanço de massa e a detecção da variação de linha de neve, com dados em campo, pode auxiliar no entendimento do comportamento das geleiras e servir para relacionar estas variáveis ao balanço de energia.

Além destas variáveis, dados como as diferenças na altimetria e de espessura dos corpos de gelo, a elevação da linha de neve e o fator orientação, na determinação da redistribuição da neve, são importantes elementos de futura análise, podendo auxiliar nas análises das respostas das geleiras aos parâmetros analisados. Os contornos de geleiras obtidos por delineamento manual mostraram resultados comparáveis com os contornos de geleiras usando dados Sentinel-2A MSI na área de estudo, o que mostra uma maior precisão no mapeamento de geleiras usando dados do Sentinel-2A.

Para auxiliar na compreensão dos resultados, apresentados na variabilidade de área das geleiras e suas relações com as mudanças climáticas evidenciadas na região norte da Patagônia, entre 1950 e 2017, a aplicação da metodologia aos dados das estações meteorológicas e de reanálise possibilitaram, analisar as principais características de cada variável. Essa análise possibilitou a comparação dos valores e os testes de correlação entre os dados, preenchendo as lacunas encontradas nos estudos anteriores.

As estações meteorológicas mostraram uma descontinuidade temporal nos registros em vários anos do período de análise, o que gerou a necessidade de utilizar os dados de reanálise de Delaware, para obter uma melhor compreensão dos reais padrões no comportamento da atmosfera da região. Essa ausência é comum em locais como estes de

difícil acesso logístico, mas mesmo assim, o Chile apresenta uma malha de dados consideravelmente grande, disponibilizada gratuitamente via *web* e atualizada diariamente pelas instituições que a compõe.

A maior disponibilidade de dados de precipitação na região do Monte Melimoyu, incluindo estações meteorológicas com medições diárias, e séries completas para o período de 1950–2017 possibilitou os testes de correlação e a utilização destas séries no trabalho desenvolvido. O moderado valor de correlação encontrado entre as séries temporais, pode ser atribuído a longa distâncias entre as estações e descontinuidade nas séries temporais, o que influencia diretamente nos dados de precipitação.

Contudo, a obtenção de uma série completa de dados no período de estudo é importante para este trabalho e com isso, foi possível obter uma série temporal de dados anuais de precipitação para a região, a partir das medições realizadas *in situ*. Diferente disto, a região não dispõe de séries completas de médias de temperatura superficial do ar para o mesmo período, o que necessitou buscar os recursos nos dados de reanálise de Delaware, para serem utilizados como bases para estudos futuros.

A média de temperatura superficial do ar aumentou e a precipitação diminuiu no período de 1950-2017. As recentes variações das geleiras podem ser respostas diretamente relacionadas à essas variações climáticas na região nas últimas décadas. Estes resultados climáticos concordam com outros estudos na Patagônia, publicados por Masiokas *et al.* (2008), Schaefer *et al.* (2013) e Pellicciotti *et al.* (2014) sobre as variações das geleiras nas últimas décadas na região.

Os baixos valores resultantes dos testes de correlação cruzada, entre os dados meteorológicos com a variabilidade do El Niño Oscilação Sul (ENOS) e do Southern Annular Mode (SAM), não mostraram exercer efeitos diretos aos dados obtidos pelas EM e por reanálise. O fator local na análise destes dados pode ser uma variável de grande influência para as baixas taxas de correlação entre os dados amostrados, visto que em pequenas áreas, as chances de eventos de teleconexões induzir alterações nas médias de precipitação e temperatura são muito remotas. Então, acredita-se que a variabilidade destes eventos pode estar relacionada indiretamente com os dados meteorológicos da área de estudo e que outras variáveis devem ser levadas em consideração para análises futuras, como a taxa de acumulação de neve, pressão e temperatura atmosférica.

Os resultados das análises dos dados meteorológicos mostram ainda uma clara necessidade de uma continuidade nos estudos da variabilidade climática na região, para melhor compreender os impactos futuros das tendências identificadas. A disponibilização dessas séries temporais e dos resultados obtidos pelas análises em meios digitais, podem ser utilizados em trabalhos futuros na região da Patagônia Norte Chilena.

Estes resultados, que contribuem para os contínuos esforços de monitoramento da Criosfera nesta região, serão disponibilizados no site do Centro Polar e Climático ([www.centropolar.com](http://www.centropolar.com)) e no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Criosfera (<http://www.ufrgs.br/inctcriosfera/>) e podem ser utilizados para atualizar o GLIMS. Este trabalho fornece resultados da aplicação dos dados Sentinel-2A MSI e ASTER-GDEM v.2 para estes ambientes, que permitem o desenvolvimento de estudos comparativos em outras áreas, para uma melhor compreensão da resposta dinâmica das geleiras às mudanças climáticas regionais e globais.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEITUNO, P. **Relación entre la posición del anticiclone subtropical y la precipitación en Chile**. Relatório do Projeto no E.551.791 do Departamento de Geofísica da Universidade do Chile. 14 p. 1980.
- ANDERSON, B; MACKINTOSH, A; STUMM, D; GEORGE, L; KERR, T; WINTERBILLINGTON, A; FITZSIMONS, S. Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand. **Journal of Glaciology**, v. 56, n. 195, p. 114–128, 2010.
- 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. 2015.
- ARAVENA, J. C; LUCKMAN, B. H. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 14, p. 2106–2120, 2009.
- ARENDRT, A; ECHELMMEYER, K; HARRISON, W; LINGLE, G; VALENTINE, V. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level. **Science**, v. 297, n. 5580, p. 382–386, 2002.
- ARNALDS, O. **Andosols**. In: Chesworth, W. Ed. *Encyclopedia of Soil Science*. Berlin: Springer, 2012.
- BARCAZA, G; NUSSBAUMER, S; TAPIA, G; VALDÉS, J; GARCÍA, J; VIDELA, Y; ALBORNOZ, A; ARIAS, V. Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. **Annals of Glaciology**, v. 58, p. 166–180, 2017.
- BARRY, R. The Status of Research on Glaciers and Global Glacier Recession: A Review. **Progress in Physical Geography**, v. 30, p. 285–306. 2006.
- BARRY, R. G; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9º ed. Porto Alegre. *Bookman*, 2013. 512 p.
- BELL, R. C. **Glacial systems and landforms: A Virtual Interactive Experience**. London: Anthem Press, 2013. 136 p.
- BENN, D. I; EVANS, D. J.A. **Glaciers & Glaciation**. 2ª ed. Hodder Education, 2010. 802 p.

BEMHARDT, M; ZÄNGL, G; LISTON, G; STRASSER, U; MAUSER, W. Using wind fields from a high-resolution atmospheric model for simulating snow dynamics in mountainous terrain. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 7 p. 1064–1075. 2009.

BERNHARDT, M; SCHULZ, K. SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport. **Geophysical Research Letters**, 2010.

BERTRAND, S; HUGHEN, K. A; LAMY, F; STUUT, J-B. W; TORREJÓN, F; LANGE, C. B. Precipitation as the main driver of Neoglacial fluctuations of Gualas glacier, Northern Patagonian Icefield. **Climate of the Past**, v. 8, p. 519–534, 2012.

BISHOP, M; BARRY, R; BUSH, A; COPLAND, L; DWYER, J; FOUNTAIN, F; HAEBERLI, W; HALL, ; KAAB, A; KARGEL, J. 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, 2004.

CAI, Wenju. et al. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 2, p. 111–116, 2014.

CARRASCO, J. F; CASASSA, G; QUINTANA, J. Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. **Hydrological Sciences Journal**, v. 50, n. 6, p. 933–948, 2005.

CASASSA, G; BRECHER, H; RIVERA, A; ANIYA, M. A century-long recession record of Glaciar O'Higgins, Chilean Patagonia. **Annals of Glaciology**, v. 24, p. 106–110, 1997.

CASASSA, Gino. et al. Glaciers in South America. **Into the second century of worldwide glacier monitoring: prospects and strategies**, p. 125–146, 1998.

CASASSA, G; SEPÚLVEDA, V. F; SINCLAIR, R. M. **The Patagonian Icefields**. New York: Springer Science+Business Media, 2002. 194 p.

CASASSA, G; RIVERA, A; RIBSTEN, P; SCHNEIDER, C. Current status of Andean glaciers. **Global and Planetary Change**, v. 59, p. 1-9, 2007.

COOK, A. J. et al. Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. **Science**, v. 353, n. 6296, p. 283–286, 2016.

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

CHRISTOPHERSON, R. W; BIEKERLAND G. H. **Geossistemas, uma introdução à Geografia Física**. 9ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 2017. 656 p.

CUFFEY, K. M; PATERSON, W. S. **The physics of glaciers**. 4th ed. Academic Press, 2010. 704 p.

DADIC, R; MOTT, R; LEHNING, M; BURLANDO, P. Parameterization for wind-induced preferential deposition of snow. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 14, p. 1994–2006, 2010.

DGA. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Gobierno de Chile. Informaciones de los datos pluviométricos. Disponível em: <<http://www.dga.cl/acercadeladga/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 05/04/2018.

DYURGEROV, M. B; MEIER, M. F. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 4, p. 1406–1411, 2002.

ESA. U.S. Geological Survey. Sentinel-2A. 17 de março de 2017. 43°49'51.39"S, 73°04'24.36"W. Informações disponíveis em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/10880/1207546/>>.

FERRANDO, F. Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones. **Investigaciones Geográficas**, v. 54, p. 127–144, 2018.

FOREL, F. A. **Les variations périodiques des glaciers**. Discours préliminaire. Archives des Sciences Physiques et Naturelles, v. 34, p. 209–229, 1985.

FRANCOU, B. Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 1–12, 2003.

GARDNER, A. S; MOHOLDT, G; COGLEY, J; WOUTERS, B; ARENDT, A; WAHR, J; BERTHIER, E; HOCK, R; PFEFFER, W; KASER, G; LIGTENBERG, S; BOLCH, T; SHARP, M; HAGEN, J; BROEKE, VAN DEN. M; PAUL F. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. **Science**, v. 340, n. 6134, p. 852–857, 2013.

- GARREAUD, R; LOPEZ, P; MINVIELLE, M; ROJAS, M. Large-Scale Control on the Patagonian Climate. **Journal of Climate**, v.26, p. 215-230, 2013.
- GARREAUD, R; ALVAREZ-GARRETON, C; BARICHIVICH, J; BOISIER, P. J; CHRISTIE, D; GALLEGUILLOS, M; LEQUESNE, C; MCPHEE, J; ZAMBRANO-BIGIARINI, M. The 2010-2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 12, p. 6307–6327, 2017.
- GASCOIN, S; LHERMITTE, S; KINNARD, C; BORTELS, K; LISTON, G. Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. **Advances in Water Resources**, v. 55, p. 25–39, 2013.
- HAEBERLI, W; CIHLAR, J; BARRY, R. G. Glacier monitoring within the global climate observing system. **Annals of Glaciology**, v. 31, p. 241–246, 2000.
- HAEBERLI, W. Mountain Glaciers in Global Climate-related Observing Systems. In: HUBER, U. M; BUGMANN, H. K. M; REASONER, M. A. (eds) Global change and mountain regions. An overview of current knowledge. **Springer**, v. 23, 2005.
- HAMBREY, M. **Glacial Environments**. Londres: UCL Press, 1994. 296 p.
- HARRISON, S; WINCHESTER, V. Historical fluctuations of the Gualas and Reicher Glaciers, North Patagonian Icefield, Chile. **Holocene**, v. 8, n. 4, p. 481–485, 1998.
- HOELZLE, M; HAEBERLI, W; DISCHL, M; PESCHKE, W. Secular glacier mass balances derived from cumulative glacier length changes. **Global and Planetary Change**, v. 36, n. 4, p. 295–306, 2003.
- HUGGEL, C; KÄÄB, A; HAEBERLI, W; TEYSSEIRE, P; PAUL, F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 3, n. 2, p. 316–330, 2002.
- IPCC. Summary for policymakers. **Summary for policymakers**. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects**. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013.

- JABERALANSAR, Z; TARKESH, M; BASSIRI, M. Spatial downscaling of climate variables using three statistical methods in Central Iran. **Journal of Mountain Science**, v. 15, n. 3, p. 606–617, 2018.
- KARGEL, J. S; ABRAMS, M. J; BISHOP, M. P; BUSH, A; HAMILTON, G; JISKOOT, H; KÄÄB, A; KIEFFER, H. H; LEE, E. M; PAUL, F; RAU, F; RAUP, B; SHRODER, J. F; SOLTESZ, D; STAINFORTH, D; STEARNS, L; WESSELS, R. Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 99, p. 187–219, 2005.
- KASER, G. Glacier-climate interaction at low latitudes. **Journal of Glaciology**, v. 47, p. 195–204, 2001.
- KILADIS, G. N; DIAZ, H. F. Global Climatic Anomalies Associated with Extremes in the Southern Oscillation. **Journal of Climate**, v. 2, p. 1069-1090, 1989.
- KLOK, E. J; OERLEMANS J. Climate reconstructions derived from global glacier length records. **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 36, n. 4, p. 575–583. 2004.
- PEEL, M. C; FINLAYSON, B; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1633–1644, 2007.
- KÜHN, M; DREISEITL, E; HOFINGER, S; MARKL, G; SPAN, N; KASER, G. Measurements and models of the mass balance of Hintereisferner. **Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography**, v. 81, n. 4, p. 659-, 1999.
- LEHNING, M; LÖWE, H; RYSER, M; RADERSCHALL, N. Inhomogeneous precipitation distribution and snow transport in steep terrain. **Water Resources Research**, v. 44, n. 7, p. 1–19, 2008.
- LEPPÄRANTA, M; GRANBERG, H. 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, 2010. 340 p.
- MALMROS, J. K; MERNILD, S; WILSON, R; TAGESSON, T; FENSHOLT, R. Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). **Remote Sensing of Environment**, v. 209, p. 240–252, 2018.

- MARENGO, J. A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, v. 12, p. 853–863, 1992.
- MASIOKAS, M. H; VILLALBA, R; LUCKMAN, B; LASCANO, M; DELGADO, S; STEPANEK, P. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. **Global and Planetary Change**, v. 60, p. 85, 2008.
- MAZZALI, L. H; LANDRÒ, C; RUHOFF, A. Análise multitemporal de retração da geleira Upsala, patagônia entre 1984 e 2016. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis, 2017. 8 p. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/173864>>. Acesso em: 27/03/2018.
- MEIER, M. F. Contribution of small glaciers to global sea level. **Science**, v. 226, n. 4681, p. 1418–1421, 1984.
- MEIER, M. F; DYURGEROV, M. B; MCCABE, G. J. The health of glaciers: Recent changes in glacier regime. **Climatic Change**, v. 59, p. 123–135, 2003.
- MELIMOYU. Figura 2. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/6715352>>. Acesso em: 15/09/2017.
- MERNILD, S. H; BECKERMAN, A; Y de, C. J; HANNA, E; MALMROS, J; WILSON, R; ZEMP, M. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the sub-Antarctic islands. **Global and Planetary Change**, v. 133, p. 109–119, 2015.
- MILLER, A. The climate of Chile. In: Schwerdtfeger, W. (ed.) **Climates of Central and South America**. Amsterdam: Elsevier, p. 113–145. 1976.
- MOUGINOT, J; RIGNOT, E. Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984-2014. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 5, p. 1441–1449, 2015.
- NASA/METI. U.S. Geological Survey. Advanced Spaceborn Thermal Emission Radiometric. Global Digital Elevation Model, version 2. 17 de outubro de 2011. 44°30'S, 72°30'W. Informações disponíveis em: <[https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4220/ASTGDENV2\\_0S45W073/](https://earthexplorer.usgs.gov/metadata/4220/ASTGDENV2_0S45W073/)>.
- NESJE, A. **Topographical effects on the equilibrium-line altitude on glaciers**. *GeoJournal*. 27. 4: 383–397. 1992.
- NESJE, A; DAHL, S. O. **Glaciers and Environmental Change**. Key issues in Environmental Change. London: Hodder Education, 2000. 203 p.

- OERLEMANS, J. Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records. **Science**, v. 308, n. 5722, p. 675–677, 2005.
- PELLICCIOTTI, F; RAGETTLI, S; CARENZO, M; MCPHEE, J. Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. **Science of the Total Environment**, v. 493, n. 15, p. 1197–1210, 2014.
- PÉREZ, T; MATTAR, C; FUSTER, R. Decrease in snow cover over the Aysén river catchment in Patagonia, Chile. **Water (Switzerland)**, v. 10(5), n. 619, p. 1–16, 2018.
- RABATEL, A; FRANCOU, B; SORUCO, A; GOMEZ, J; CÁCERES, 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; MÉNÉGOZ, M; RAMIREZ, E; RIBSTEIN, P; SUAREZ, W; VILLACIS, M; WAGNON, P. Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **Cryosphere**, v. 7, n. 1, p. 81–102, 2013.
- RANDOLPH GLACIER INVENTORY. A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0: Technical Report, Global Land Ice Measurements from Space, Colorado, USA. 2017. <<https://doi.org/10.7265/N5-RGI-60>>. Acesso em: 20/10/2017.
- REBOITA, M. S; GAN, M; ROCHA, R; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.
- REBOITA, M. S; KRUSCHE, N; AMBRIZZI, T; ROCHA, R. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2012.
- RIGNOT, E; RIVERA, A; CASASSA, G. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to Sea Level Rise. **Science**, v. 302, n. 5644, p. 434–437, 2003.
- RIVERA, A; BROWN, F; MELLA, R; WENDT, J; CASASSA, G; ACUÑA, C; RIGNOT, E; CLAVERO, J; BROCK, B. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. **Annals of Glaciology**, v. 43, p. 111–122, 2006.
- RIVERA, A; BENHAM, T; CASASSA, G; BAMBER, J; DOWDESWELL, J. A. Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. **Global and Planetary Change**, v. 59, p. 126–137, 2007.

- RIVERA, A; BOWN, F; CARRIÓN, D; ZENTENO, P. Glacier responses to recent volcanic activity in Southern Chile. **Environmental Research Letters**, v. 7, (014036), p. 1–10, 2012.
- ROPELEWSKI, C; HALPERT, M. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Mon. Weather Rev**, v. 115, n. 8, p. 1606–1626, 1987.
- SEGOVIA ROCHA, A. A; VIDELA GIERING, Y. A. Caracterización Glaciológica de Chile. **Investigaciones Geográficas**, v. 53, n. 3, p. 3–24, 2017.
- ROSA, K. K; SARTORI, R. Z; MENDES JUNIOR. C. W; SIMÕES, J. C. Análise das mudanças ambientais da Geleira Viéville, Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 1, p. 61–71, 2015.
- SANCHES, Ana Maria. **Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia**. 2013. 92 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- SCHAEFER, M; MACHGUTH, H; FALVEY, M; CASASSA, G. Modeling past and future surface mass balance of the Northern Patagonia Icefield. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 118, n. 2, p. 571–588, 2013.
- SCHAEFER, M; MACHGUTH, H; FALVEY, M; CASASSA, G; RIGNOT, E. Quantifying mass balance process on the Southern Patagonia icefield, Chile. **Global and Planetary Chang**, v. 9, n. 1, p. 25–35, 2015.
- SIMÕES, J. C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, v. 4, p. 119, 2004.
- TACHIKAWA, T. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results. **Japan Space Systems**, v. 7, p. 1–30, 2011.
- VANDEKERKHOVE, E. **The volcanic ash soils of Northern Chilean Patagonia (44°–48°S): Distribution, weathering and influence on river chemistry**. 2014. 99 p. Tese (Van Master of Science in de Geologie), Universiteit Ghent, Faculteit Wetenschappen, 99p. 2014.



WILLIS, M. J; MELKONIAN, A. K; PRITCHARD, M. E; RAMAGE, J. M. Ice loss rates at the Northern Patagonian Icefield derived using a decade of satellite remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 184–198, 2012.

ZEMP, M; HOELZLE, M; HAEBERLI, W. Six decades of glacier mass-balance observations: a review of the worldwide monitoring network. **Annals of Glaciology**, v. 50, n. 50, p. 1, 2009.