

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

FELIPE DE SOUZA SCHWARZ

**ALTERAÇÕES NOS AMBIENTES GLACIAIS E PROGLACIAIS
RESULTANTES DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO NAS NASCENTES DOS
RIOS TORO E ESTRECHO, EM ALTO DEL CARMEN, CHILE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

2018

PORTO ALEGRE

FICHA CATALOGRÁFICA

SCHWARZ, Felipe de Souza.

Alterações nos ambientes glaciais e proglaciais resultantes de atividades de mineração nas nascentes dos rios Toro e Estrecho, em Alto del Carmen, CHILE / Felipe de Souza Schwarz – Porto Alegre: UFRGS, 2018

[127 f.]

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Ênfase: Análise Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS – BR 2018.

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer

1. Mineração. 2. Ambientes andinos. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Geomorfologia glacial.

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

**ALTERAÇÕES NOS AMBIENTES GLACIAIS E PROGLACIAIS
RESULTANTES DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO NAS NASCENTES DOS
RIOS TORO E ESTRECHO, EM ALTO DEL CARMEN, CHILE**

FELIPE DE SOUZA SCHWARZ

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ulisses Franz Bremer (Orientador)

Prof. Dr. Rafael da Rocha Ribeiro

Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões

Profa. Dra. Kátia Kellem da Rosa

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Governo Federal pelo ensino de excelência e pelas oportunidades.

Aos docentes do Programa de Pós-graduação em Geografia (UFRGS) pelos ensinamentos.

Aos colaboradores do Instituto de Geociências (UFRGS) pelo serviço e assistência prestados.

Aos colegas do Programa de Pós-graduação em Geografia (UFRGS) pela camaradagem.

Ao professor Dr. Ulisses Franz Bremer pela orientação nesta pesquisa, incentivo e apoio.

Aos professores da banca do exame de qualificação, Dra. Kátia Kellem da Rosa e Dr. Rafael da Rocha Ribeiro por avaliarem e contribuírem para o êxito deste trabalho.

SCHWARZ, Felipe de Souza. 2018. **Alterações nos ambientes glaciais e proglaciais resultantes de atividades de mineração nas nascentes dos rios Toro e Estrecho, em Alto del Carmen, Chile**. Porto Alegre: UFRGS, Posgea. Dissertação de Mestrado, 127 p. Orientador: Ulisses Franz Bremer

RESUMO

O evidente estresse hídrico em escala global proporcionado pela utilização desmedida dos recursos naturais tem sido alvo de inúmeros debates entre membros da comunidade científica. Os ambientes glaciais representam uma importante fonte de recursos hídricos para a sociedade. Este trabalho analisou as alterações antrópicas resultantes da atividade de mineração nas nascentes dos rios Toro e Estrecho, na Região de Alto del Carmen, Chile. Por meio da utilização de dados de teledetecção dos sensores PALSAR-ALOS, OLI-LANDSAT 8 e dados do programa Google Earth, foram aplicadas técnicas de processamento utilizando os programas QGIS e SAGA na geração de produtos MDE, NDSI, NDWI e elaborados mapas temáticos, possibilitando identificar qualitativamente as principais feições geomorfológicas e intervenções antrópicas no ambiente, bem como, alterações na sua disposição espacial, obtendo indícios de mudanças no ambiente proglacial.

Palavras-chave: mineração, ambientes andinos, bacia hidrográfica do Huasco, geomorfologia glacial, sensoriamento remoto.

SCHWARZ, Felipe de Souza. 2018. **Glacial and proglacial environment changes resulting from mining activities at Toro and Estrecho rivers in Alto del Carmen, Chile**. Porto Alegre: UFRGS. Master of Science Thesis. Adviser: Prof. Ulisses F. Bremer.

ABSTRACT

The evident global-scale water stress provided by the unrestrained use of natural resources has been the subject of numerous debates among members of the scientific community. Glacial environments represent an important source of water resources for society. This work analyzed the anthropogenic changes resulting from the mining activity in the sources of the Toro and Estrecho rivers, in the Region of Alto del Carmen, Chile. Through the use of remote sensing data from the PALSAR-ALOS, OLI-LANDSAT 8 and Google Earth data, processing techniques were applied using the QGIS and SAGA programs to generate MDE, NDSI, NDWI and elaborate thematic maps, making it possible to qualitatively identify the main geomorphological features and anthropic interventions in the environment, as well as changes in their spatial disposition, obtaining indications of changes in the proglacial environment.

Keywords: mining, Andes, Huasco river basin, glacial geomorphology, remote sensing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	13
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 ÁREA DE ESTUDO.....	16
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	19
2. REVISÃO TEÓRICA	20
2.1 IMPACTOS DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM AMBIENTES GLACIAIS E PROGLACIAIS	20
2.2 ASPECTOS GEOLÓGICOS.....	22
2.2.1 <i>Geologia geral do Chile</i>	23
2.2.2 <i>Geologia regional da Bacia do Huasco</i>	24
2.2.3 <i>Geologia da área de estudo</i>	25
2.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE GEOMORFOLOGIA DO CHILE E REGIÃO DO ATACAMA	26
2.3.1 <i>Geomorfologia da Bacia do Huasco</i>	28
2.4 CLIMATOLOGIA NOS AMBIENTES ANDINOS	30
2.5 REVISÃO TEÓRICA SOBRE GLACIOLOGIA	34
2.5.1 <i>Revisão sobre Processos Glaciais</i>	35
2.5.2 <i>Classificação de geleiras</i>	37
2.5.3 <i>Considerações sobre processos de erosão glacial</i>	40
2.5.4 <i>Formas de relevo glaciais</i>	42
2.5.4.1 <i>Formas de relevo erosivas criadas pela glaciação alpina</i>	42
2.5.4.2 <i>Formas de relevo deposicionais criadas pela glaciação alpina</i>	45
2.5.4.3 <i>Formas de relevo erosivas e deposicionais criadas pela glaciação continental</i>	45
2.5.4.4 <i>Feições de erosão glacial classificadas a partir da escala</i>	47
2.5.4.5 <i>Feições de glaciação alpinas e continentais comparadas</i>	49
2.5.6 <i>Ambientes glaciais e periglaciais</i>	50
2.5.6.1 <i>Considerações sobre permafrost</i>	51
2.5.6.2 <i>Observações sobre geleiras de rocha</i>	53
2.6 A PAISAGEM GLACIAL ANDINA DA ÁREA DE ESTUDO	56
2.7 REVISÃO TEÓRICA SOBRE SENSORIAMENTO REMOTO DA CRIOSFERA	58
2.7.1 <i>Propriedades eletromagnéticas da neve e do gelo</i>	59
2.7.2 <i>Topografia de geleiras e ambientes glaciais</i>	62
2.8 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELA ATIVIDADE DE MINERAÇÃO A PARTIR DE TÉCNICAS DE TELEDETECÇÃO	64
3. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3.1 INTRODUÇÃO.....	66
3.2 MATERIAIS.....	66

3.2.1 Aplicações computacionais.....	66
3.2.2 Bases de dados digitais.....	67
3.2.2.1 ALOS PALSAR.....	67
3.2.2.2 LANDSAT 8.....	70
3.2.2.3 Dados do programa Google Earth PRO.....	71
3.2.3 Dados pré-existentes.....	72
3.3 MÉTODOS.....	72
3.3.1. <i>Análise de dados pré-existentes</i>	73
3.3.1.1 Dados do Inventário Nacional de Geleiras do Chile.....	73
3.3.2 <i>Obtenção e tratamento de dados orbitais</i>	74
3.3.2.1 Geração de modelo digital de elevação e mapas.....	74
3.3.2.2 Dados gerados a partir de produtos do Landsat 8.....	78
3.3.2.3 Série temporal do programa Google Earth PRO.....	82
3.3.3 <i>Elaboração de mapas temáticos</i>	83
3.3.3.1 Mapa temático de interpretação de feições geomorfológicas.....	83
3.3.3.2 Mapa de intervenções antrópicas na área de estudo.....	88
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	90
4.1 MAPAS TEMÁTICOS.....	90
4.2 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DA INTEPRETAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DA ÁREA DE ESTUDO.....	101
4.2.1 <i>Ambientes glaciais (stricto sensu) ou glaciogênicos</i>	101
4.2.1.1 Geleiras de rocha.....	101
4.2.1.2. Geleiras de anfiteatro e glaciaretos (geleiras de nicho).....	102
4.2.2 <i>Formas erosivas criadas pela glaciação alpina</i>	103
4.2.3 <i>Formas deposicionais criadas pela glaciação alpina</i>	104
4.2.4 <i>Formação de origem pós-glacial</i>	105
4.2.5 <i>Ambiente proglacial</i>	105
4.2.6 <i>Formações antrópicas</i>	106
4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO DE INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS.....	106
5. CONCLUSÕES.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
APÊNDICE.....	122
I. A PAISAGEM GLACIAL ANDINA (<i>LATO SENSU</i>).....	122
II. A IMPORTÂNCIA DAS GELEIRAS DE ROCHA NA PAISAGEM AMBIENTAL CHILENA.....	126

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO EM ESCALA 1:650.000	17
FIGURA 2 - RECORTE DA ÁREA DE ESTUDO (EXTRAÍDO DO PROGRAMA GOOGLE EARTH)	18
FIGURA 3 - MAPA HIPSOMÉTRICO DA BACIA DO HUASCO	29
FIGURA 4 - PRECIPITAÇÕES MÉDIAS ANUAIS DE DIFERENTES REGIÕES CLIMÁTICAS CHILENAS	31
FIGURA 5 - MAPA DEMONSTRATIVO DA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA III REGION (EXTRAÍDO DE DMC, 2001). ..	32
FIGURA 6 - MAPA DEMONSTRATIVO DA VARIAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DA III REGION (EXTRAÍDO DE DMC, 2001). ..	33
FIGURA 7 - DESENHO REPRESENTATIVO DE UMA GELEIRA VISTA ATRAVÉS DE UM CORTE LONGITUDINAL.....	37
FIGURA 8 - MODELO DE CIRCULAÇÃO HÍDRICA DE UMA GELEIRA DE ROCHA.	55
FIGURA 9 - DIFERENTES ASSINATURAS DE REFLECTÂNCIA ESPECTRAL	59
FIGURA 10 - REFLEXÃO DE NEVE, FIRN E GELO E NEVE CONTAMINADA	61
FIGURA 11 - REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DA NEVE ENTRE 0,4 E 2,4MM EM FUNÇÃO DOS DIFERENTES GRÃOS	61
FIGURA 12 - SISTEMAS DE VARREDURA DO ALOS/PALSAR (EXTRAÍDO DE ASF, 2018).	68
FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE A COBERTURA DE CENAS PROCESSADAS PELO SISTEMA RTC DA ASF, 2018.....	69
FIGURA 14 - COMPARAÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS DOS SENSORES DO LANDSAT 7 E 8 (USGS, 2018).	70
FIGURA 15 - ESTRUTURA METODOLÓGICA DO TRABALHO.	73
FIGURA 16 - ÁREA DE ESTUDO RECORTADA DA CENA ALOS/PALSAR	75
FIGURA 17 - MÁSCARA DE SOMBREAMENTO A PARTIR DO RECORTE DA CENA ALOS/PALSAR	76
FIGURA 18 - COMPOSIÇÃO DA DRENAGEM SIMULADA A PARTIR DO MDE/ALOS PALSAR.....	77
FIGURA 19 - COMPOSIÇÃO RGB (753) REALIZADA COM AS CENAS LANDSAT 8 APÓS PROCESSO DE FUSÃO	80
FIGURA 20 - IMAGEM DIGITAL RESULTANTE DO CÁLCULO NDSI APLICADA A MÁSCARA DE LIMIAR.....	81
FIGURA 21 - IMAGEM DIGITAL RESULTANTE DO CÁLCULO NDWI APLICADA A MÁSCARA DE LIMIAR	81
FIGURA 22 - MAPA HIPSOMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO, PRÓXIMA A ALTO DEL CARMEN, CHILE.	96
FIGURA 23 - MAPA DE CURVAS DE NÍVEL DA ÁREA DE ESTUDO, PRÓXIMA A ALTO DEL CARMEN, CHILE.	97
FIGURA 24 - MAPA DE DECLIVIDADE DA ÁREA DE ESTUDO, PRÓXIMA A ALTO DEL CARMEN, CHILE	98
FIGURA 25 - MAPA DE INTERPRETAÇÃO DE FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS NA ÁREA DE ESTUDO , CHILE.....	99
FIGURA 26 - MAPA DE INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NA ÁREA DE ESTUDO, NA CORDILHEIRA DOS ANDES, CHILE..	100
FIGURA 27 - RECORTE DA IMAGEM ORBITAL DO GEOEYE (EXTRAÍDO DO PROGRAMA GOOGLE EARTH, 2014)..	107

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS FEIXES DE VARREDURA DO SENSOR ALOS/PALSAR	68
--	----

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - INTERVENÇÕES DE ATIVIDADES DE MINERAÇÃO EM ÁREAS DE GELEIRA NO CHILE	21
QUADRO 2 - CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA ESQUEMÁTICA DAS GELEIRAS.	37
QUADRO 3 - CARACTERIZAÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS A PARTIR DA ESCALA DE PROCESSO	48
QUADRO 4 - FEIÇÕES DE GLACIAÇÃO ALPINA E CONTINENTAL COMPARADAS	49
QUADRO 5 - APLICATIVOS COMPUTACIONAIS E UTILIZAÇÃO	67
QUADRO 6 - RESOLUÇÃO ESPECTRAL DAS BANDAS DE IMAGEAMENTO DO SATÉLITE LANDSAT 8.....	71
QUADRO 7 - BANDAS LANDSAT 8 UTILIZADAS NA PESQUISA.	79
QUADRO 8 - METADADOS DA SÉRIE TEMPORAL UTILIZADA POR MEIO DO PROGRAMA GOOGLE EARTH PRO	82
QUADRO 9 - CRITÉRIOS DE IDENTIFICAÇÃO DAS FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS NO MAPEAMENTO	88
QUADRO 10 - CRITÉRIOS NA IDENTIFICAÇÃO DE INDÍCIOS DA INTERVENÇÃO ANTRÓPICA NA ÁREA DE ESTUDO	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
ASF	Alaska Satellite Facility
DGA	Dirección General de Aguas (Chile)
DMC	Dirección Meteorología de Chile
ENAP	Compania Nacional do Petróleo do Chile
GLIMS	Global Land Ice Measurements from Space
GNU	Sistema operacional tipo Unix
GPS	Global Positioning System
InSAR	Radar Interferométrico de Abertura Sintética
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAROS	Organização Japonesa de Pesquisas e Observação
JAXA	Agência Aeroespacial de Exploração Japonesa
LIDAR	Light Detection and Ranging
MDE	modelo digital de elevação
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDSI	Índice de Neve por Diferença Normalizada
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada
NMM	Nível médio do mar
OLI	Operational Land Imager
PALSAR	Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar
RADAR	Radio Detection and Ranging
RGB	Red, Green, Blue
RTC	Radiometrically Terrain-Corrected
SAR	RADAR de Abertura Sintética
SCP	Semi-Automatic Classification Plugin
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería do Chile
SIG	sistema de informação geográfica
SINIA	Sistema Nacional de Informações Ambientais (Chile)
SMA	Superintendência do Meio Ambiente
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIRS	Thermal Infrared Sensor
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura
USGS	United States Geological Survey

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A criosfera armazenada em terra firme cerca de 75% da água doce do planeta (IPCC, 2008). A degradação de áreas de *permafrost* e terras estacionalmente congeladas vêm ocasionando mudanças nas características do solo e sistema de drenagem, alterando seu regime hídrico de forma irreversível (IPCC, 2014). As geleiras e os ambientes glaciais caracterizam uma importantíssima fonte de recurso hídrico para as comunidades adjacentes e um patrimônio ambiental inestimável para a humanidade. Intervenções oriundas das atividades antrópicas têm provocado significativa degradação dessas áreas em todo o mundo.

O avanço da fronteira agrícola e o crescimento industrial vêm contribuindo para a redução significativa da qualidade e quantidade dos reservatórios naturais de águas superficiais e subterrâneas em várias regiões do planeta. Estudiosos e ambientalistas apontam uma eminente crise dos recursos hídricos em escala global (ALCAMO *et al.*, 2003; ARNELL, 2004; IPCC, 2008 e GREENPEACE, 2011). Evidências desse estresse hídrico e degradação ambiental atearam o debate entre os núcleos da sociedade, configurando um novo cenário da ecologia política mundial. Inseridos nesse contexto, a comunidade científica e a população em geral, vêm questionando a implementação de projetos desenvolvimentistas de viés socioeconômico em que a premissa incorpora a exploração desmedida dos recursos naturais.

A atividade de mineração se caracteriza como uma das principais contribuintes para a degradação ambiental em áreas de geleiras. Diversos empreendimentos têm sido alvo da crítica ambiental, dada magnitude dos projetos e seus impactos aos recursos naturais. O perfil desenvolvimentista dessas empreitadas, alia-se aos interesses políticos e governamentais que visam melhorias socioeconômicas nas regiões envolvidas e negligenciam preservação do ambiente terrestre.

Conforme relatos da imprensa e entidades ambientais, áreas das geleiras e de ambiente proglacial foram afetadas por atividades de mineração em Alto del Carmen, Chile. Os ambientalistas afirmam que as geleiras teriam sido impactadas diretamente pelo projeto de mineração Pascua Lama, empreendimento da mineradora canadense Barrick Gold Corporation.

1.2 Definição do problema de pesquisa e justificativa

A demanda por estudos visando compreender a magnitude dos impactos ambientais da mineração na criosfera permanece escassamente atendida (BRENNING, 2008). A agenda ambiental necessita de trabalhos nessa temática para corroborar ações fundamentadas de repúdio à implementação de empreendimentos que venham a causar danos aos reservatórios superficiais e subterrâneos de água potável no planeta.

Do ponto de vista socioambiental, Araóz (2011); Arana (2011); Tabra & Aste (2011); Wagner & Giraud (2011); Romero (2011) e Lamberti (2011); dissertaram sobre os impactos ambientais e ecologia política da mineração na América Latina, destacando Romero (2011) sobre o projeto Pascua Lama na comuna de Alto del Carmen. Brenning (2008), Azócar e Brenning (2008), desenvolveram estudos que contribuíram para o entendimento das intervenções da mineração em áreas de geleiras no Chile (projeto Los Pelambres), possibilitando estimar os impactos ambientais da atividade a médio e longo prazo.

O final do século XX marca o cenário de um novo auge da mineração metálica na vasta geografia latino-americana. A transformação brusca da paisagem se tornou evidente por toda extensão da América Latina (ARAÓZ, 2011; ECHAVE, *et al.*, 2011). A rápida expansão do modelo econômico extrativista-exportador e dos grandes projetos de infraestrutura previstos pelo IIRSA (Iniciativa para a Integração da Infraestrutura Regional Sul-Americana) enalteceu uma “ilusão desenvolvimentista” na região. Os altos preços internacionais dos produtos primários (*commodities*) e seus reflexos nas balanças comerciais e no *superávit* fiscal são marcas de um enorme favorecimento das economias latino-americanas diante do presente cenário econômico. A atual dinâmica do capital, em sua fase de acumulação, tende a promover uma política neodesenvolvimentista, cujos governos latino-americanos, em sua maioria, aceitam os modelos de desenvolvimento hegemônicos, desprezando o debate acerca de seu caráter exploratório e seus impactos socioambientais (SVAMPA, 2011).

Svampa (2011) destaca que em meados dos anos noventa, sobretudo na faixa de extensão da Cordilheira dos Andes, originaram-se uma série de resistências, mobilizações campesinas e assembleias, que discutem as novas fronteiras de exclusão diante dos grandes

projetos mineiros que ameaçam afetar severamente as condições e qualidade de vida das populações envolvidas. As atividades de mineração em geleiras vêm sendo bastante repudiadas pela população. A mineração, nesses casos, influi imediatamente no abastecimento de água.

O projeto de mineração Pascua Lama sempre foi bastante polêmico, sendo rechaçado pelas entidades ambientais e população local. Entre muitos aspectos abordados pelos opositores do projeto, destaca-se a destruição de geleiras nas áreas de exploração. Vários manifestos foram publicados pelas agências ambientais denunciando a degradação ambiental provocada pelo projeto desde a década de 1970. As discussões ganharam proporção internacional levando ao embargo do projeto em 2013 e o encerramento definitivo pela corte de justiça chilena em janeiro de 2018.

Cumprido destacar o informe publicado pelo Greenpeace (2011) compilando uma série de impactos ambientais provocados pelas atividades da mineradora canadense Barrick Gold Corporation, declarando que a mineradora reduziu a superfície das geleiras entre 56 e 70%. Conforme relato, as principais geleiras afetadas seriam: Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco, Estrecho e Los Amarillos.

Segundo o Greenpeace (2011), as atividades da mineradora afetaram seriamente os ambientes glaciais em seus empreendimentos na América Latina. A agência alerta que a mineração impacta diretamente as geleiras durante a construção de estradas, atividades de perfuração, uso de explosivos e contaminação por poeira e rejeitos resultantes dos processos de prospecção. Essas intervenções aceleram o derretimento das estruturas glaciais e contaminam os recursos hídricos oriundos do ambiente glacial (GREENPEACE, 2011).

De acordo com o Greenpeace (2011), os empreendimentos Pascua Lama e Veladero estão localizados dentro da Reserva da Biosfera de San Guillermo da UNESCO, tendo sua área caracterizada como ambiente periglacial, o que impediria sua exploração de acordo com a legislação de proteção de geleiras vigente no Chile (GREENPEACE, 2011).

A população dessa região é de origem predominantemente indígena, composta de pequenos agricultores cuja produção é destinada à subsistência e à produção de *pisco*¹. A atividade de mineração a céu aberto, pode ser extremamente prejudicial ao povo local em virtude da provável contaminação da bacia do rio El Toro e Estrecho por produtos químicos (cianureto e metais pesados) utilizados no processo de extração de minérios. Alguns ambientalistas já apontam evidências dessa contaminação no ambiente fluvial como consequência da exploração mineral (GREENPEACE, 2011).

O tema abordado nessa dissertação é de relevância no entendimento sobre impactos ambientais resultantes da atividade de mineração nos Andes chilenos. Dada a escassez de estudos que conectem os temas mineração e criosfera, bem como, estabeleçam metodologias a partir do uso de teledetecção no mapeamento da alteração de condições naturais glaciológicas provocadas por esse tipo de atividade, essa abordagem permite viabilizar a produção de informações que possam auxiliar na conscientização do risco ambiental inerente da exploração indevida de recursos minerais.

1.3 Área de estudo

A área de estudo foi definida a partir da localização da área de lavra principal do projeto de mineração Pascua Lama, localizada nas nascentes dos rios Toro e Estrecho, na fronteira territorial entre Chile e Argentina. Dessa forma, foi traçado um polígono de aproximadamente 110 quilômetros quadrados que engloba a área de prospecção da mina, estradas de acesso e as geleiras Toro 1, Toro 2, Esperanza, Guanaco, Estrecho e Los Amarillos. A **figura 1** demonstra a localização da área de estudo e a **figura 2** o recorte extraído a partir de uma imagem do programa Google Earth.

Os rios Toro e Estrecho são tributários do rio Potrerillo, um dos principais afluentes do Rio del Carmen, na cidade de Alto del Carmen². A microbacia do Rio del Carmen, juntamente

¹ O *pisco* é o nome de duas variedades diferentes de aguardente de uva, produzidas respectivamente no Peru e no Chile. Ambas as variedades se baseiam fundamentalmente na destilação do mosto proveniente de uvas.

² **Alto del Carmen** é uma cidade localizada na *III Región del Atacama* (Divisão Administrativa) do Chile. A principal cidade desta região é a cidade litorânea de *Huasco*.

com a do Rio del Trânsito, fornece o aporte hídrico da bacia do Rio Huasco³, formando a principal bacia hidrográfica da região semiárida do Huasco no Chile (SINIA, 2017).

O balanço hídrico dos rios Toro e Estrecho é coordenado principalmente pela ação de degelo das geleiras. Seus fluxos permanecem geralmente congelados nos períodos estacionais (SINIA, 2017). As coordenadas geográficas das nascentes desses rios são:

- **Rio Estrecho:** 29°18'38.29"S e 70°01'58.63"W;
- **Rio Toro:** 29°20'15.61"S e 70° 2'31.01"W.

Dados do SRTM 3 (*Shuttle Radar Topography Mission*) demonstraram uma altitude digital de aproximadamente 6153 metros acima do NMM no ponto mais alto da macrobacia do Rio Huasco. As maiores altitudes se dão no domínio geomorfológico da Cordilheira dos Andes, configurando a área de nascentes (SINIA, 2017; USGS, 2018a).

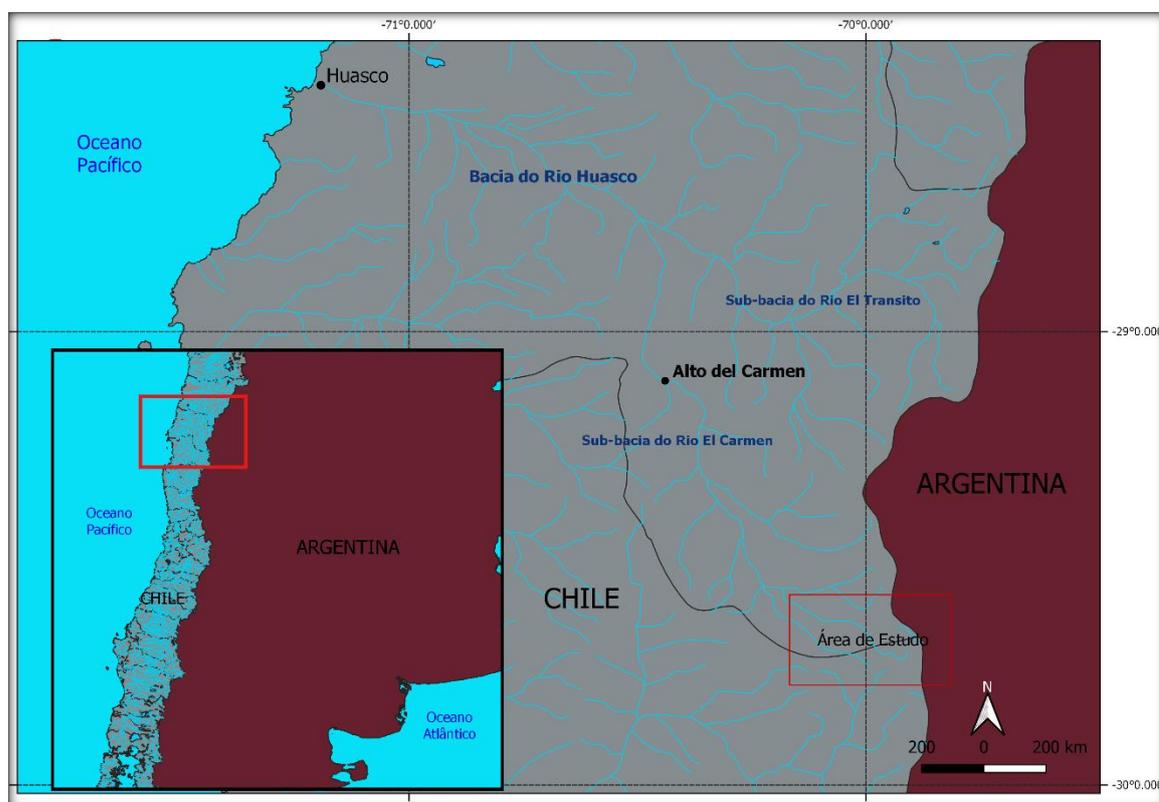


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo em escala 1:650.000

³ Vide figura 3 desta dissertação.

O Rio Huasco possui aproximadamente 80 quilômetros de extensão desde sua nascente até a foz no Oceano Pacífico. A área da bacia hidrográfica é de 9.850 km² de extensão (SINIA, 2017).

Conforme estudos de Vallon e Vincent (2005), a área das geleiras Toro 1 e 2, Esperanza somam aproximadamente 0,4 km². Conforme o Inventário de Geleiras do Chile da DGA (2008), as áreas mapeadas das geleiras Guanaco e Los Amarillos são de 0,81 km² e 0,34 km², respectivamente.

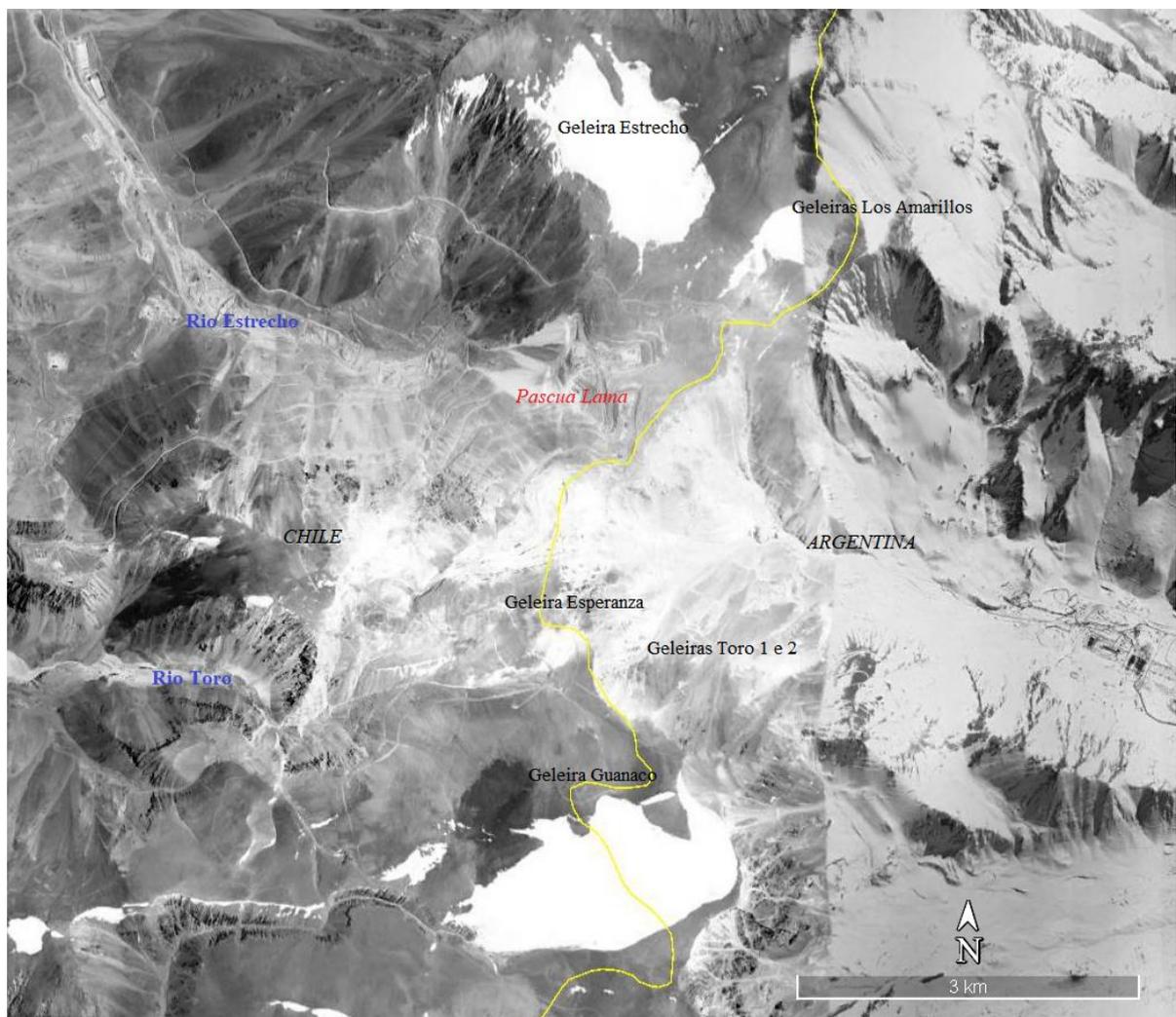


Figura 2 - Recorte da área de estudo (Extraído do programa Google Earth)

1.4 Objetivos da pesquisa

O **objetivo geral** é estimar alterações nos ambientes glaciais e proglaciais resultantes de atividades de mineração nas nascentes dos rios Toro e Estrecho, Região de Alto del Carmen, Chile, a partir do uso de ferramentas de teledetecção. Os **objetivos específicos** da pesquisa são:

- a) **Identificar qualitativamente**, a partir de dados de teledetecção e mapeamento, as principais feições geomorfológicas e alterações no ambiente glacial e proglacial, bem como alterações na sua disposição espacial, no intuito de obter indícios de mudanças ambientais como o retrabalhamento das feições, perda de características lineares naturais e extinção de conexões de canais glaciofluviais com a geleira;
- b) **Analisar**, a partir do resultado da combinação de diferentes metodologias de análise espacial e geomorfológica, as proporções da degradação ambiental e sua correlação com as atividades de mineração;
- c) **Contribuir** para o entendimento sobre intervenções antrópicas em ambientes glaciais e proglaciais.

2. Revisão teórica

2.1 Impactos de atividades de mineração em ambientes glaciais e proglaciais

A atividade de mineração acarreta grandes impactos no meio ambiente. Diversos desastres naturais estão relacionados diretamente a exploração de minérios devido a sua significativa alteração da paisagem natural. Riscos de movimentos de massa, contaminação da água e alterações nos ecossistemas locais, estão entre as principais resultantes da exploração desmedida de recursos minerais. No caso dos ambientes glaciais (glaciogênicos e proglaciais) e periglaciais, estes impactos são extremamente importantes, atingindo principalmente o abastecimento de recursos hídricos.

Conforme Brenning (2008), os efeitos ambientais a médio e longo prazo observados da atividade mineira em geleiras são: (i) alterações da geoquímica da geleira contribuindo para a produção de uma drenagem ácida e consequente contaminação do reservatório natural (mesmo após o encerramento das operações da mineradora); (ii) alterações da geotermia natural a partir da deposição de rejeitos de mina nas áreas de geleira e; (iii) desenvolvimento de novas áreas de *permafrost* a partir do rejeito depositado na área de geleiras, o que gera uma unidade de baixa estabilidade morfológica e que representa um risco potencial de deslizamentos de massa.

Brenning e Azócar (2008) observam ainda que a sobrecarga gerada do depósito de rejeito de mina em geleiras de rocha aumenta a velocidade de deslocamento (20cm dia^{-1}), valor muito maior do que os deslocamentos em condições naturais. O cenário apresentado pelos autores evidencia uma importante transformação do ambiente andino a partir das operações das mineradoras.

Brenning e Azócar (2010) estudaram os impactos resultantes das intervenções da atividade mineradora no Chile e o equivalente em água afetada pelos empreendimentos, compilando uma tabela com os quantitativos. O **quadro 1** demonstra as intervenções quantificadas de acordo com os projetos de mineração.

Operação de mineração	Área original de geleiras de rocha (km ²)	Área interferida (ou por intervir) de geleiras de rocha		Equivalente em água de geleiras rochosas interferidas ou por intervir (10 ⁶ m ³)		Início da intervenção	Declarado em estudo de impacto ambiental ou relatório de impacto
		Remoção ou depósito de lastro	Caminhos e sondagens	Remoção ou depósito de lastro	Caminhos e sondagens		
CODELCO Divisão Andina	2,6	1,32	0,78*	10-14	6-8	Anterior a 1990	Sim (EIA 2001)
Los Bronces	1,9	0,4	0,4	3-4	3-4	Anterior a 1990	Não
Los Pelambres	0,4	0,1	0,1	0,8 – 1,3	1-1,6	2002-2004	Não
Pascua Lama	0,3	0,03	-	0,2 – 0,4	-	Após 2013	Sim (EIA 2004 - 2006)
Pimentón	>1,6	-	0,06	-	0,4-0,6	Anterior a 1996	Não
CODELCO El Teniente	Não determinado	-	0,04	-	0,3-0,4	Anterior a 1997	Não
Catedral	2,3	-	0,03	-	0,2-0,3	1996-2001	Não
Cerro Casale	0,1	-	0,01	-	0,1	Anterior a 1999	Não

* Ocorreu descarte sobre a superfície de geleiras de rocha.

Quadro 1 - Intervenções de atividades de mineração em áreas de geleira no Chile (Extraído e traduzido de Brenning e Azócar, 2010, p. 150)

O projeto Pascua Lama tinha pretensões de se tornar o primeiro empreendimento de mineração binacional e a maior jazida de ouro e prata do mundo. Entretanto, após o entrave das diversas contendas judiciais e administrativas, a SMA (Superintendência do Meio Ambiente Chilena) barrou definitivamente o projeto em janeiro de 2018, afirmando:

“[...]dada a natureza e envergadura das infrações cometidas pela empresa, chegou-se à convicção de que o fechamento total e definitivo, somado à imposição de uma multa em dinheiro, é a sanção mais adequada e proporcional neste caso”(PORTAL DE NOTÍCIAS E. M., 2018).

A decisão do órgão ambiental foi celebrada pelas comunidades indígenas locais que encabeçaram a luta contra o projeto. Conforme declaração do órgão ambiental chileno à imprensa, as sanções foram aplicadas por danos provocados a espécies de fauna e flora nativas, monitoramento incompleto de geleira e pelo despejo de águas ácidas em um rio próximo, que abastecia as comunidades da etnia *diguita*. A decisão ainda pode ser questionada no Tribunal Ambiental do Chile; contudo, a Barrick Gold já declarou que pretende continuar os planos de exploração mineral na área de maneira subterrânea, tendo em vista a decisão não revogar a resolução que permite a empresa explorar os minérios na região (PORTAL DE NOTÍCIAS E. M., 2018).

2.2 Aspectos geológicos

Para desenvolver a caracterização geológica, foi aplicado como referência o Mapa Geológico do Chile de 2003 em escala 1:1.000.000. O referido documento compila informações da formação geológica chilena a nível nacional, demonstrando a consolidação dos compartimentos através das eras geológicas. O mapa foi elaborado pelo *Servicio Nacional de Geología y Minería* (SERNAGEOMIN/Chile) com a colaboração de equipes técnicas locais.

2.2.1 Geologia geral do Chile

Os protólitos das poucas rochas metamórficas que afloram nas placas tectônicas da região conhecida como Norte Grande de Chile⁴ permanecem como as únicas unidades do Pré-cambriano no território chileno (CHILE, 2003).

Na Era Paleozóica, no período entre o Ordoviciano e o Siluriano, os afloramentos mais extensos são representados por rochas marinhas, vulcânicas e vulcanoclásticas localizados no interior da região de Antofagasta, fronteira com a Argentina. Estas rochas estão incluídas no complexo da grande bacia ordovícica do noroeste argentino e do sul da Bolívia (CHILE, 2013).

O setor costeiro tem seu esqueleto constituído basicamente de rochas do Devoniano ao Carbonífero, desde a fronteira com o Peru até 38°S – as latitudes maiores são representadas por rochas mais recentes do Permiano ao Jurássico (CHILE, 2003).

Rochas plutônicas representam o Carbonífero ao Triássico na forma de uma franja, abrangendo a área de estudo entre as latitudes 31°S e 27°40' em faixa contínua. A faixa carrega faces vulcânicas siliciosas. Os afloramentos se espalham para o norte sendo cobertos por rochas mesozóicas e cenozóicas chegando até 22°S. O Triássico ao Jurássico Inferior estão representados em depósitos sedimentares em *rift* no interior de bacias marinhas híbridas entre 37° e 26°S na zona costeira (CHILE, 2003).

As rochas vulcânicas, vulcanoclásticas e marinhas do Jurássico Médio ao Superior tem ampla distribuição, destacando-se o arco andesítico costeiro de 29°S na Cordilheira Central Principal (CHILE, 2003).

Rochas sedimentares marinhas da idade Titoniana ao Cretáceo Inferior representam depósitos de bacias na Cordilheira da Costa Central e nas bacias *atacameña* e *aconcagüina-neuquina* (CHILE, 2003).

⁴ Regionalização baseada em critérios naturais aplicada pela *Corporación de Fomento de la Producción* em 1950, conforme dados do censo chileno de 2012.

A cerca dos afloramentos do período da era Cenozóica do território chileno, pode se destacar que grande parte do norte do país se encontra coberta por intensos fluxos lávicos, fluxos piroclásticos ou cascalho cenozóico (associados à intensa erosão pela atividade tectônica na cordilheira andina). Durante o cenozóico, depositaram-se grandes espessuras de depósitos piroclásticos e sedimentares em bacias ao sul da latitude 33°S. Vulcões quaternários são distribuídos de forma descontínua em todo o país. No Altiplano, ao norte de 27°S, numerosos dispositivos vulcânicos se desenvolvem. Os depósitos sedimentares em latitudes mais ao sul estão associados às geleiras (CHILE, 2003).

2.2.2 Geologia regional da Bacia do Huasco

Considerando as informações obtidas através do Mapa Geológico do Chile (2003), foi efetuada uma análise dos afloramentos mais significativos para este estudo. Para melhor descrever a caracterização, optou-se por subdividi-la de acordo com os rios.

À foz do Rio Huasco podem ser encontrados dois depósitos eólicos do Pleistoceno-Holoceno ocorrendo a presença de areias finas e médias, com intercalações bioclásticas. Adjacentes a estes depósitos sedimentares, em direção ao interior do continente, ocorrem dois importantes afloramentos de rochas metamórficas do Devônico-Carbonífero. Em direção a montante do rio, imediatamente à margem, ocorre uma extensa presença de depósitos fluviais clásticos do Mioceno Superior-Plioceno – que se estende até o surgimento do Rio Huasco pelo encontro dos Rios del Transito e del Carmen na cidade de Vallenar. Ao longo do curso do Rio Huasco, ocorre o sistema de Falhas Atacama-El Romeral, que pertencem a Cordilheira de la Costa – formando importantes afloramentos de rochas intrusivas do Cretáceo Inferior. Entre os falhamentos se dá a presença de um afloramento de rochas vulcânicas do Jurássico, sendo representado por aglomerados basálticos e andesíticos (CHILE, 2003).

O Rio del Transito, a jusante, possui uma falha inversa basáltica vulcânica ao norte do Triássico-Jurássico Inferior seguida de uma espécie de escudo metamorfozido de rocha protólita do Pré-cambriano-Permiano. Após, em direção a montante, ocorre uma extensa faixa de norte a sul de rochas intrusivas do Carbonífero-Permiano que pode ser considerado representante da pré-cordilheira. A montante do Rio del Transito é formada por um importante afloramento do Permiano-Triássico de rochas intrusivas: granitos holoeucocráticos, pórfiros graníticos e biotita

granodiorito – ocorrendo falhamentos inversos ao longo de sua estrutura. Ao sul e sudeste desta grande estrutura granítica ocorrem grandes depósitos fluvioglaciais e glaciolacustres – incluindo morainas do Pleistoceno-Holoceno (CHILE, 2003).

O Rio del Carmen em sua jusante uma extensa sequencia sedimentar do Triássico Superior de arenitos, conglomerados, siltitos e calcários. O rio tem seu curso médio cerceando rochas intrusivas do Carbonífero-Permiano (pré-cordilheira). A montante se destaca por ser representada por inúmeros afloramentos de períodos diferentes da história geológica o que pode ser evidência significativa do intenso retrabalho da atividade tectônica da cordilheira andina (CHILE, 2003).

2.2.3 Geologia da área de estudo

O tipo de rocha de maior incidência na área de estudo é o **granito**. O afloramento rochoso predominante na área é do período entre o Permiano e o Triássico, representado por uma extensa faixa de norte a sul de granitos hololeucocráticos, pórfiros graníticos e granodioritos biotida (CHILE, 2003).

A faixa do Permiano-Triássico está enclausurada por duas faixas mais recentes a leste e oeste pertencentes ao Triássico, representada por granitos leucocráticos, monzo, sienogranitos de biotita e muscovita, granodioritos, biotita-dioritos e porfirinas hipabásicas (CHILE, 2003).

Uma estreita faixa bem mais moderna intersecta os afloramentos Permiano-Triássico e Triássico no compartimento a sul, pertencente ao período Oligoceno-Mioceno. Este afloramento está representado por sequências e centros vulcânicos de variação de intermediária à acida, compostos por afloramentos de rochas piroclásticas andesíticas e riolitos (CHILE, 2003).

O setor Permiano-Triássico da área de estudo, associado à depósitos graníticos, possui litotipos diversos, plutônicos, sub-vulcânicos e vulcânicos que se associam e hospedam mineralizações do tipo pórfiro, monzogranitos, etc. Os depósitos pórfiros hospedam mineralizações contendo metais preciosos como ouro e prata, e de base, como cobre, chumbo, zinco e molibdênio (MISAS, 2015). A jazida explorada no projeto Pascua Lama tem como

objetivo principal a extração do minério ouro. Considerando a configuração geológica da área de estudo e sua formação, é possível determinar o interesse econômico em sua exploração.

2.3. Considerações sobre geomorfologia do Chile e Região do Atacama

A geomorfologia no Chile se encontra representada por quatro unidades principais dispostas longitudinalmente: Cordilheira dos Andes, Depressão Intermediária ou Central, Cordilheira da Costa e Planícies costeiras (AZÓCAR, *et al.* 2006; CHILE, 2003).

A Cordilheira dos Andes no Norte do Chile se destaca pela presença do Altiplano, cujas rochas possuem origem vulcânica e se apresenta como grandes vales entalhados pelo fluxo glaciofluvial e recobertos de lava – impedindo o crescimento de vegetação neste setor (AZÓCAR *et al.* 2006). Outros elementos importantes são a Puna de Atacama e a Cordilheira de Domeyko, entre as quais se estende uma fossa tectônica com alturas médias de 4.000 metros, ocupada por bacias e salinas que impedem a passagem de cursos de água, acentuando assim a aridez característica da área (AZÓCAR *et al.* 2006).

Ainda neste setor, a Cordilheira dos Andes atua como uma verdadeira barreira climática, impedindo que os ventos úmidos vindos do pampa argentino cheguem ao território chileno, o que pode ser considerado um dos fatores contribuintes à existência do Deserto do Atacama (AZÓCAR *et al.* 2006). A cordilheira representa um fator de risco, devido à sua atividade vulcânica, bem como, pela formação de aluviões, erodindo a terra (AZÓCAR *et al.* 2006). A energia cinética da água determina a intensidade da erosão e depende do potencial energético, que é potencializado pela diferença de altura entre a área e o nível do mar ou o nível em que é depositado (AZÓCAR *et al.* 2006).

A Depressão intermediária ou central recebe os detritos da ação hidrológica e eólica (AZÓCAR *et al.* 2006). Este domínio detém a maior concentração populacional e grande parte da produção agrícola e industrial chilena – o que acarreta processos de contaminação e degradação industrial: o que representa uma das causas da desertificação/arenização (AZÓCAR *et al.* 2006). Nesta região está localizado o Deserto do Atacama (do Sul do Peru ao vale do Rio Copiapó), considerado, pela escassa vegetação ou nenhuma em algumas áreas, o deserto mais árido do planeta (AZÓCAR *et al.* 2006).

A Cordilheira da Costa representa uma barreira climática bloqueando a influência do Oceano Pacífico no clima regional – resultando em grandes variações térmicas (AZÓCAR *et al.* 2006). O domínio da Cordilheira da Costa possui importantes recursos minerais que contribuem significativamente para a emissão de gases, causando poluição e posterior degradação dos solos (AZÓCAR *et al.* 2006).

Segundo Azócar *et al.* 2006, as Planícies costeiras são de grande importância para povoamento no norte chileno, região em que estão localizados portos, cidades, centros pesqueiros e estradas; o que a partir do aumento do crescimento demográfico acarreta o uso indevido de terra e ocupação.

Griem (2017) esclarece que a morfologia deserto do Atacama depende dos fatores climáticos, geológicos e tectônicos e conforme o autor: devem-se destacar o fator climático e tectônico, por seu comportamento incomum.

A região do Atacama se localiza em uma área de variação entre o clima “desértico” para o “semidesértico”. Nas regiões de maior altitude, há um deserto frio, ocorrendo maiores taxas de precipitação em relação as áreas de menor altitude, pertencentes a um deserto quente. A vegetação é esparsa e só é densa na ocorrência de alguns oásis no deserto (GRIEM, 2017).

Quanto ao fator tectônico, em que pese a elevada altitude de algumas regiões, o sistema orogênico andino produziu e permanece ativo na evolução das montanhas – acarretando morfologias muito peculiares. No Atacama, é importante destacar a presente atividade vulcânica como fator de influência na formação da paisagem. Sobre a alta cordilheira, o autor ressalta a presença dos estratovulcões ativos e das grandes planícies formadas por material extrusivo e depositado horizontalmente (GRIEM, 2017).

Alguns elementos destacados por Griem (2017) que representam a geomorfologia no Atacama são: bacias endorreicas (fechadas, sem saídas); blocos extensos de detritos; rios de inclinação bastante significativa; e o fato da maioria dos vales não possuírem afluentes permanentes..

2.3.1 Geomorfologia da Bacia do Huasco

A Bacia do Huasco está concentrada na região do Atacama, sendo importante destacar que grande parte está representada na área da Cordilheira dos Andes e Pré-Cordilheira, seguida pela Cordilheira da Costa; a Depressão Central. A Planície Costeira tem pouca representatividade na área da Bacia. A região da cordilheira andina a qual forma a montante das sub-bacias del Transito e del Carmen não possui indicativos de atividade vulcânica do período presente (CHILE, 2003; GRIEM, 2017).

Conforme relatório da *Dirección General de Aguas - Chile* (2004) a morfologia do Rio Huasco, em geral, se caracteriza pela alternância sucessiva de cordões montanhosos e vales no sentido transversal. A presença destes cordões transversais e – em menor relevância – a existência de processos de erosão marinhos, atribuem à Cordilheira da Costa uma morfologia descontínua (CHILE, 2004).

De acordo com a DGA (2004), o vale do Rio Huasco pode ser dividido morfologicamente em dois setores:

- Curso superior: Da nascente até a desembocadura do Rio El Jilguero, a cinco quilômetros da cidade de Vallenar, trecho em que o rio escorre por uma espécie de entalhe entre os picos cordilheiranos, um canal relativamente estreito, confinado por altos cerros de rocha do Mesozóico.
- Curso inferior: a partir do rio El Jilguero até a sua foz no Oceano Pacífico, sendo que o canal do rio se expande e o vale é acompanhado por extensos depósitos fluviais quaternários. Perto de sua foz, ao norte da cidade de Huasco, o canal atinge cerca de dois quilômetros de largura.

Os principais tributários do Rio Huasco, Rio del Carmen e Rio del Transito também possuem morfologia similar, estando aprisionados por altas colinas rochosas e encostas íngremes; embora o canal do rio del Transito seja bastante esparsa no trecho entre a cidade de Conay até a Junta del Carmen. Em decorrência disso, surgem praias extensas nas áreas em que o rio apresenta maior presença de meandros (CHILE, 2004).

Em que pese o fator hipsométrico, a Bacia do Huasco é repleta de cristas descontínuas dos setores da Pré-cordilheira e Cordilheira dos Andes, tendo uma altimetria bastante variável da jusante a montante. A **figura 3** é uma representação hipsométrica a partir de dados digitais de elevação obtidos do SRTM 3/USGS, em escala 1:1.000.000 no qual foi destacado o curso principal da bacia e seus afluentes.

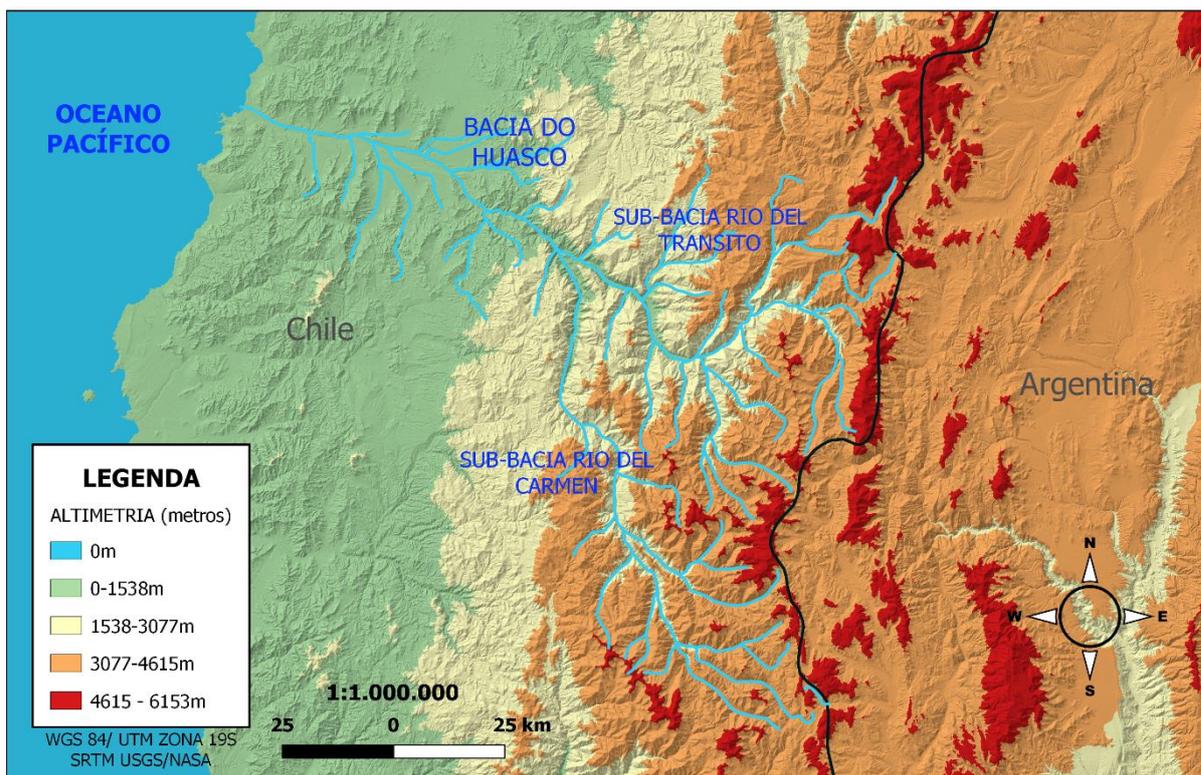


Figura 3 - Mapa Hipsométrico da bacia do Huasco

A geomorfologia da bacia do Huasco, mais precisamente, nos cursos superiores como o da sub-bacia do Rio del Carmen (no qual se localiza a área de estudo), representa um fator condicionante da glaciação alpina nesses setores. O fator altimétrico, associado à morfologia de vales nas encostas íngremes dos cursos superiores, formam setores de acumulação de material glaciogênico, possibilitando a formação das geleiras e canais glaciofluviais. A declividade é o principal agente geomorfológico dos processos erosivos dessas geleiras alpinas, representando um condicionante importante na alteração morfológica das encostas e vales. Essa condição é intensificada ainda pelos processos de derretimento da superfície de contato entre a geleira e a rocha, acelerando processos de abrasão.

2.4 Climatologia nos ambientes andinos

Clapperton (1994) afirma que o clima no Chile possui variações extremas considerando-se a latitude: árido nas latitudes tropicais e úmido em latitudes superiores. A precipitação é importante para o controle da linha de equilíbrio glacial, determinando a distribuição de geleiras. A **figura 4** demonstra as características da precipitação anual em diferentes regiões do Chile.

Clapperton (1994) observa a variação da linha de equilíbrio glacial de acordo com o incremento da latitude na geografia dos Andes chilenos - que varia de 6000 metros ao norte para 250 metros de altitude no sul. Segundo o autor, essa variação se deve aos efeitos ocasionados pelos três sistemas climáticos primários que afetam o Chile:

- a) No sul (entre as latitudes 56° e 42°S), um constante sistema de umidade de oeste acelera mudanças na quantidade de precipitação sazonalmente, trazendo precipitações excedentes a 5000mm nas estações no nível do mar (MILLER, 1976 *apud* CLAPPERTON, 1994). A alta precipitação anual explica a presença de grandes campos de gelo no sul do Chile, ocorrendo a presença inclusive de geleiras ao nível do mar (CLAPPERTON, 1994);
- b) Entre as latitudes 42° e 31°S, na zona climática que o autor classifica como do tipo mediterrâneo, a precipitação é trazida sazonalmente pelo movimento para o norte da frente polar e depressões ciclônicas associadas durante o inverno, nutrindo as geleiras e campos de neve onde altitude, topografia e exposição promovem locais de acumulação de gelo nessas altitudes (4000 metros de altitude). A neve é perdida durante o verão nessas montanhas devido a alta insolação e a baixa precipitação (250mm) (CLAPPERTON, 1994);
- c) Ao norte da latitude 32°S, a precipitação média anual cai para valores inferiores a 300mm, originando-se principalmente a partir de ocasionais sistemas de tempestades ciclônicas durante o inverno no Hemisfério Sul. Alguma precipitação pode vir no período de verão se tempestades convectivas em Puno-Altiplano se estenderem para oeste, mas oferece valores irrisórios de precipitação. O domínio por sistemas anticiclônicos na circulação atmosférica, radiação intensa e evaporação combinada com baixos totais de precipitação na região, mantém a linha de equilíbrio glacial acima de 6000 metros de altitude permanentemente (CLAPPERTON, 1994).

O clima da região da bacia do Huasco é caracterizado por apresentar máxima precipitação sazonal durante o inverno em seu setor mais árido, ocorrendo deficit hídrico por mais da metade do ano (DGA, 2004).

Considerando a variação altimétrica, a geomorfologia da área da Bacia do Huasco, bem como a influência oceânica; características climáticas importantes devem ser observadas nesta região, da jusante a montante da bacia.

A principal característica dos vales do Huasco, del Transito e del Carmen é a existência de um período livre de congelamento de 11 meses – de agosto a junho (DGA, 2004).

Nas imediações da cidade de Vallenar (capital da província de Huasco), o clima pode ser classificado como semiárido, porém as condições desérticas são amenizadas pelo aumento na precipitação provocado pela influência da massa de ar úmida da zona costeira – que se reflete num ligeiro decréscimo da amplitude térmica diária, que atinge 13°C e a anual que chega a 7°C (DMC, 2001).

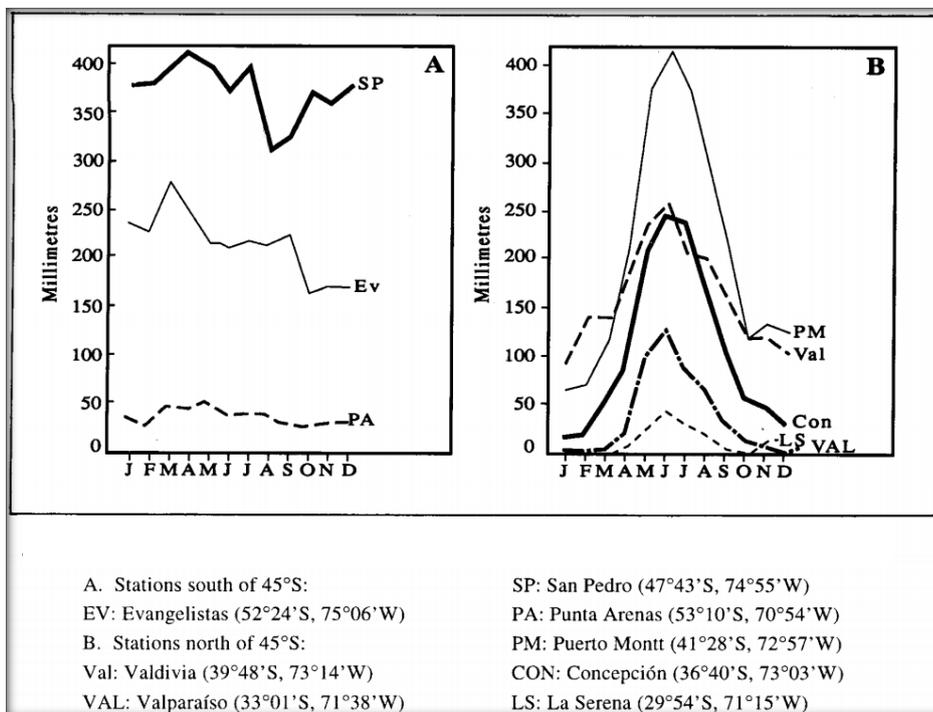


Figura 4 - Precipitações médias anuais selecionadas de estações como representativas de diferentes regiões climáticas chilenas (Miller, 1976 apud Clapperton, 1994) – Extraído de Clapperton, 1994, p. 372.

As taxas de precipitação se intensificam conforme aumenta o gradiente hipsométrico em direção à cordilheira andina (DGA, 2004). O mapa da **figura 5** demonstra a variação pluviométrica média anual.

As massas úmidas se formam nas frentes polares provenientes de sudoeste os Andes desempenham um papel de barreira climática – produzindo sua acumulação nos setores mais altos da cordilheira (DGA, 2004).

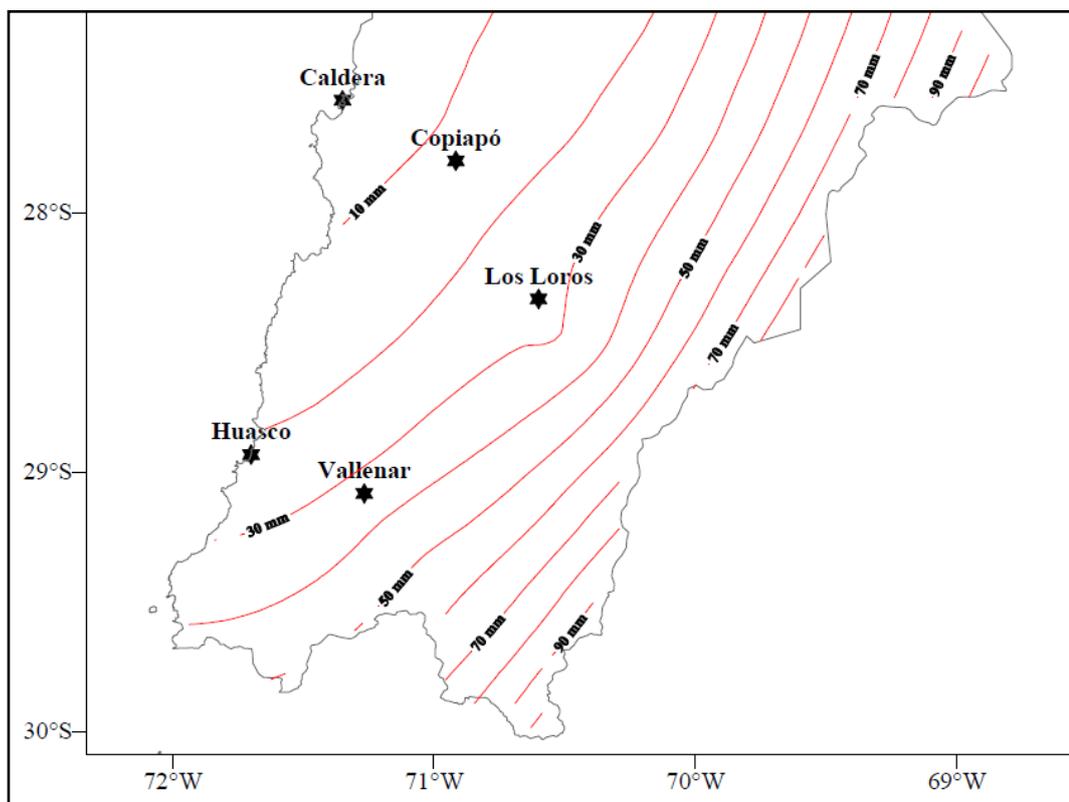


Figura 5 - Mapa demonstrativo da variação pluviométrica da III Region (extraído de DMC, 2001).

As temperaturas e a oscilação térmica diminuem na direção leste devido à combinação do efeito da altitude e o incremento da distância do oceano (DGA, 2004). O mapa da **figura 6** demonstra a partir de isotermas a variação térmica média anual da região.

Note-se que na região próxima à bacia do rio el Toro as isotermas demonstram uma média anual próxima de 10°C e, quanto às isolinhas demonstrativas de média pluviométrica, a região possui precipitação em torno de 90 mm/ano. Analisando os mapas representativos das figuras 5 e 6, pode-se observar a influência da variável orográfica, causando incremento nas

taxas de precipitação e também a significativa redução da média térmica nas proximidades da cordilheira andina ao longo de toda a região representada.

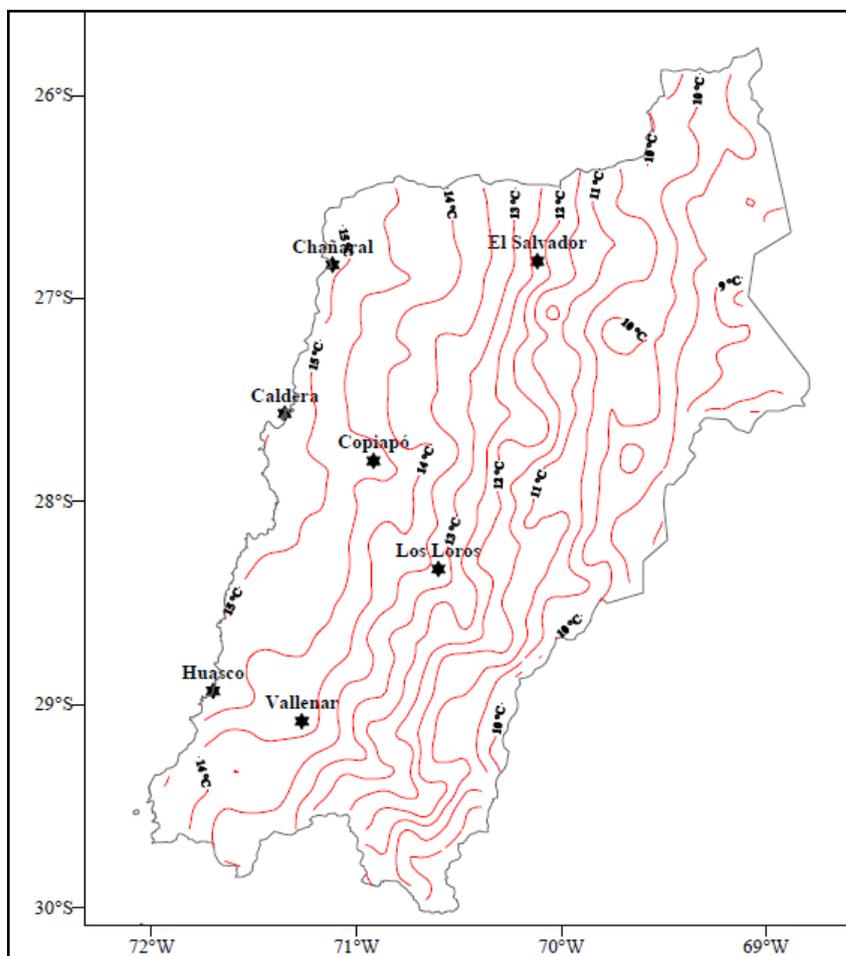


Figura 6 - Mapa demonstrativo da variação pluviométrica da III Region (extraído de DMC, 2001).

Vallon e Vincent (2005) afirmam que em “anos normais” (secos), as precipitações na área das nascentes do Rio Toro e Estrecho sempre ocorrem na forma sólida, considerando o fato de que a bacia se encontra inteiramente sobre os 4300 metros de altitude, concentrando cerca de 50 a 200mm de precipitação. Em anos de “El Niño”, se aproximam de 300mm de precipitação (VALLON; VINCENT, 2005).

De acordo com Clapperton (1994) as geleiras tendem a ser mais ausentes na região ao norte de 33°S, devido ao aumento da aridez. A presença de massas de gelo nessas áreas estão localizadas acima dos 5000 metros de altitude.

2.5 Revisão teórica sobre glaciologia

O termo criosfera refere-se coletivamente a todo o gelo e neve existente na superfície terrestre. Os principais componentes são a cobertura de neve, o gelo de água doce em lagos e rios, o gelo marinho, as geleiras de montanha (ou altitude), os mantos de gelo e o gelo no subsolo – *permafrost* (SIMÕES, 2004).

A criosfera armazena em terra firme cerca de 75% da água doce do planeta (IPCC, 2008). Segundo o IPCC (2008), a cobertura de neve vem diminuindo em praticamente todas as regiões do planeta.

O termo **geleira** refere-se a 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, formando-se onde a acumulação anual de neve é maior que a ablação (SIMÕES, 2004). “As geleiras não são lagos congelados ou gelo de água subterrânea, em vez disso, elas formam-se pela acumulação contínua de neve que recristaliza, sob a ação de seu próprio peso, em uma massa de gelo” (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 530).

As geleiras não são estacionárias, elas movem-se lentamente sob a pressão de seu grande peso e a atração da gravidade. Movem-se lentamente em padrões que lembram “correntes”, fundindo-se como tributários em grandes rios de gelo (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 530).

As projeções futuras sobre os recursos hídricos no Chile mostram uma situação muito restritiva a curto prazo, tendo em vista o aumento das atividades industriais e do consumo humano. Esta situação coloca em evidência a necessidade de monitoramento e gestão das áreas de geleiras (BÓRQUEZ *et al.*, 2006).

Um estudo elaborado pelo Departamento de Geografia da Universidade do Chile, o Instituto da Patagônia e o Centro de Estudos Científicos da Valdivia, concluiu que 87% de uma amostra de 100 geleiras chilenas apresentavam evidentes retrocessos (BÓRQUEZ *et al.*, 2006).

Rivera (2007) afirma que até o ano de 2007 foram inventariados cerca de 1835 geleiras, totalizando uma área coberta por gelo de 20.189,8 km² no Chile. Garín (1987) inventariou as

primeiras quatro regiões do norte do Chile, constatando 49 geleiras na III Região do Atacama. Estima-se que na zona norte e centro do país, haja predominância de geleiras de rocha, embora ainda não haja um inventário que contemple todas estas geleiras (BÓRQUEZ *et al.*, 2006).

2.5.1 Revisão sobre Processos Glaciais

A geleira é um corpo dinâmico. Sua movimentação é determinada por diversos fatores incluindo: a força da gravidade e o peso da massa de gelo, bem como fatores que atuam diretamente relacionados à dinâmica da massa de gelo. A massa é formada por gelo denso, resultante de processos de compactação, recristalização e crescimento que envolvem a neve e a água (CHRISTOPHERSON, 2012).

As geleiras são resultado da ação climática e topográfica: sua formação está associada à precipitação de água, gelo e neve, bem como processos de movimentação de massa como avalanches (CUFFEY; PATERSON, 2010).

A neve se acumula em depósitos de camadas, assemelhando-se ao processo de formação de rochas sedimentares (CHRISTOPHERSON, 2012).

A neve e o gelo são transformados, sob pressão, recristalizando-se como um tipo de rocha metamórfica – originando-se a geleira (CHRISTOPHERSON, 2012). O contributo fundamental para a geleira é a neve acumulada na área de acumulação – que ocorre via de regra nas áreas mais altas do corpo de gelo. Concomitante ao aprofundamento da neve em camadas, o crescimento da espessura, resulta no aumento do peso e da pressão sobre o gelo subjacente. O gelo recristaliza e consolida sob pressão – a neve em estado de transição para gelo de geleira é chamada de *firn* (com textura compacta e granular). O gelo denso de geleira se forma após a passagem de diversos anos, ocorrendo durante esse período processos metamórficos: sedimentos (neve e *firn*) são pressionados e recristalizados em uma rocha metamórfica densa - gelo de geleira (CHRISTOPHERSON, 2012).

A geleira é um sistema aberto, deste modo, cumpre destacar a importância de se considerar o *balanço de massa glacial*. O balanço de massa de uma geleira consiste nos ganhos e perdas líquidos do gelo de geleira, o qual determina se a geleira expande ou retrai;

considerando as entradas de neve e saídas de gelo, água de derretimento e vapor de água. A precipitação de neve e mais a umidade na zona de acumulação⁵ alimentam as partes mais elevadas da geleira. Esta área termina na linha de neve⁶, indicando até onde a acumulação de neve no inverno e gelo sobrevivem ao período de derretimento de verão. Em direção à parte de menor altitude, ela é desgastada por vários processos: derretimento na superfície – interna e basal, remoção do gelo por deflação (ação do vento); desprendimento de blocos de gelo; e sublimação (evaporação direta do estado sólido) – todas essas perdas de massa são chamadas de ablação⁷ (CHRISTOPHERSON, 2012).

A **figura 7** demonstra um recorte longitudinal de uma geleira considerando os processos associados aos movimentos desta.

As geleiras são sistemas que tendem a um *status* de equilíbrio. A linha de equilíbrio é a faixa na superfície da geleira na qual, durante o período de um ano, a ablação é igual à acumulação (SIMÕES, 2004). Uma geleira alcança um balanço líquido positivo de massa (cresce) durante períodos frios com precipitação adequada e um balanço líquido negativo de massa quando em períodos mais quentes a linha de equilíbrio migra à montante, ocorrendo a retração da geleira – diminui – (CHRISTOPHERSON, 2012).

⁵ Zona de acumulação: é a parte mais elevada de uma geleira onde anualmente ocorre ganho de massa; inclui processos de precipitação direta de neve, gelo ou chuva, condensação de gelo a partir de vapor de água, transporte de neve e gelo para uma geleira e avalanchas (SIMÕES, 2004, p. 120).

⁶ Linha de neve: A linha ou faixa que separa as áreas onde a neve caída desaparece no verão das páreas nas quais a neve permanece ao longo de todo o ano. A altitude da linha de neve é controlada pela temperatura atmosférica e pelo volume de neve precipitada - ou seja, depende de fatores tais como a latitude e a exposição da vertente da geleira aos raios solares (SIMÕES, 2004, p. 141).

⁷ Ablação considera-se todos os processos pelo qual a neve, o gelo ou a água são perdidos por uma geleira, pelo gelo flutuante ou pela cobertura de neve sazonal. Inclui derretimento, evaporação, desprendimento, erosão eólica e avalanchas. É também usado para expressar a quantidade perdida por esses processos. Área de ablação é a parte menos elevada de uma geleira onde anualmente ocorre a perda de massa (SIMÕES, 2004, p. 120).

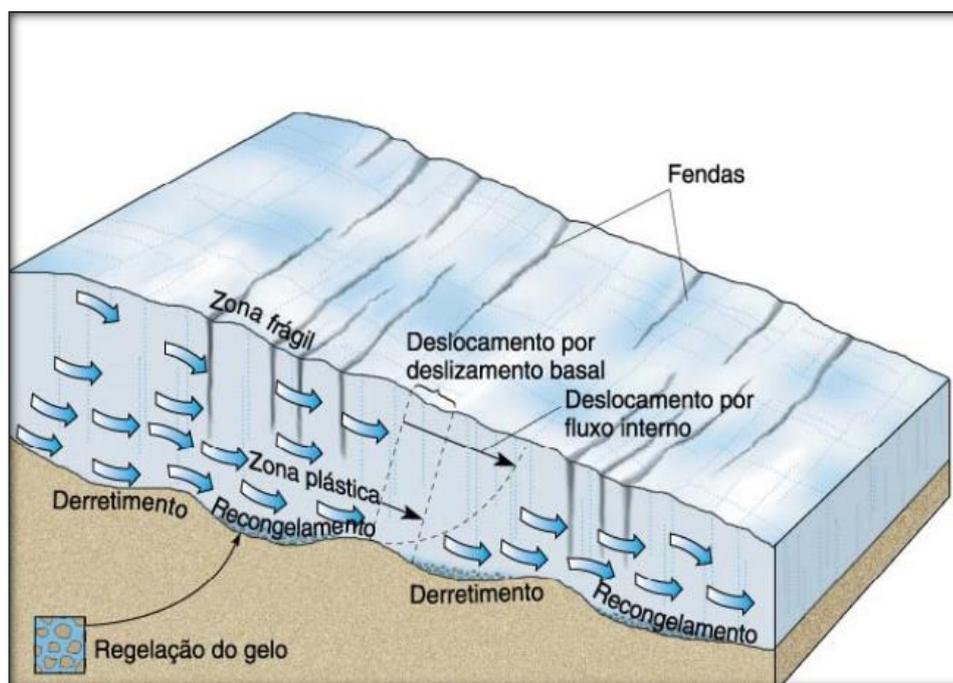


Figura 7 - Desenho representativo de uma geleira vista através de um corte longitudinal (Extraído de Christopherson, 2012)

2.5.2 Classificação de geleiras

Diversos autores propuseram formas de classificação para geleiras considerando fatores específicos. De acordo com Simões (2004) as geleiras se apresentam de diversas formas: mantos de gelo, plataformas de gelo, calota de gelo, geleiras de piemonte e vários tipos de geleira de montanha (geleira de vale, geleira de anfiteatro, etc).

Simões (2004, p. 126) apresenta ainda uma esquematização da classificação morfológica simplificada do trabalho de Benn e Evans (1998), conforme pode ser observado no **quadro 2**.

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, flanco de gelo, geleira de nicho, franja de gelo
Geleiras marinhas	Plataformas de gelo, colina de gelo

Quadro 2 - Classificação morfológica esquemática das geleiras (Extraído de SIMÕES, 2004).

As geleiras localizadas na área de estudo definida para esta dissertação são controladas pela topografia subglacial. Dentre os tipos classificados nesta pesquisa, podem ser encontradas as geleiras de montanha, sendo elas predominantemente de anfiteatro. Ocorre ainda a presença de “glaciaretas” ou geleiras de nicho, e as geleiras de rocha.

Hubbard e Glasser (2005) consideraram o tamanho das geleiras, observando que as massas de gelo de maior superfície (maior que 30.000 km²) são chamadas de *mantos de gelo*. As *calotas de gelo* possuem morfologia similar, todavia possuem tamanho inferior a 30.000 km² de superfície. Conforme os autores, em geral, qualquer geleira que termine no mar pode ser chamada de *geleira de maré*, tendo como contraponto as *geleiras de piemonte*, que terminam em terra firme. Também apontaram geleiras de menor tamanho, como as clássicas geleiras de vale alpinas e geleiras de anfiteatro. Algumas geleiras de vale muito pequenas são conhecidas como “*glacietes*”. Considerando essa metodologia de classificação, as geleiras localizadas na área de estudo são do tipo piemonte, pois terminam em terra firme, não possuindo qualquer relação direta com o oceano.

Os “*glacietes*” também são chamados de *geleiras de nicho*⁸. Conforme o glossário do Centro de Estudos Científicos de Valdivia (2018), os “*glacietes*” consistem nas menores massas de gelo, entretanto não há uma definição exata do tamanho considerado. Podem ser encontrados nas vertentes das montanhas, depressões e áreas de deposição de avalanches de neve. As geleiras de nicho podem não evidenciar fluxo e ainda serem causadas por acumulações de neve que duram menos que dois anos. Podem ser praticamente inativas. Em anos muito secos, essas massas tendem a desaparecer, serem cobertas por material rochoso ou serem significativamente reduzidas. Esta é uma forma comum de geleira na área de estudo.

Hubbard e Glasser (2005) apontaram a importância da classificação de propriedades térmicas das geleiras nos estudos glaciológicos, considerando o gelo que está no ponto de fusão (denominado “temperado” ou “quente”) e o gelo que está com temperaturas abaixo do ponto de fusão (denominado “frio”). Conforme os autores, três importantes classificações foram derivadas com base nessa distinção:

⁸ Para Simões (2004), as *geleiras de nicho* são pequenas geleiras que ocupam um recesso estreito e irregular na vertente da montanha.

- a) Massas de gelo de alta polaridade são caracterizadas por gelo perene e predominantemente frio;
- b) Massas de gelo temperadas são caracterizadas pelo gelo que se torna onipresente quente pelo menos parte do ano;
- c) Massas de gelo sub-polares ou politermais que se encaixam entre esses dois extremos, experimentando o derretimento em algum momento, ou durante todo o ano, mas que não afeta toda a massa de gelo.

Simões (2004, p. 126) citou a classificação também chamada de Lagally-Ahlmann, nominada em homenagem aos trabalhos destes pesquisadores nas décadas de 1930 e 1940, a qual distingue entre geleiras nas quais toda a massa de gelo está no ponto de fusão (*geleira temperada ou morna*) e aquelas que estão totalmente abaixo daquele ponto (de fusão) – *geleiras frias*.

O autor ainda observou que existem geleiras onde a maioria do gelo é frio, mas parte deste está no ponto de fusão (*transicional, subpolar ou sub-ártica*). A classificação Lagally-Ahlmann é bastante criticada pelo fato de que parte significativa de geleiras existentes são multitermais (SIMÕES, 2004, p.126).

Simões (2004) ressaltou quanto a essa crítica que, atualmente, é mais usual se referir às características termiais na base da geleira, ou seja, na interface gelo-rocha. Deste modo, geleiras de base fria (ou seca) e base morna (ou úmida) e que exibem processos dinâmicos e erosionais diferentes – ainda que mesmo essa classificação apresente problemas, tendo em vista que várias geleiras (em especial àquelas encontradas em climas subpolares), apresentem uma parte da interface congelada e outra parte em ponto de fusão.

O ponto de fusão do gelo depende de diversos fatores, há de se considerar a presença de partículas sólidas, sais e principalmente a pressão do peso sobre o gelo subjacente (SIMÕES, 2004, p. 126).

As massas de gelo presentes nas geleiras ocorrentes na área de estudo possuem características politermais. O fato de estarem localizadas em áreas sub-polares e que, embora estejam presentes em elevadas altitudes em relação ao NMM, não as impedem de experimentar períodos de derretimento em períodos mais quentes. A água de degelo abastece as nascentes dos rios Toro e Estrecho, que permanecem a maior parte do tempo congelados, devido a temperatura.

2.5.3 Considerações sobre processos de erosão glacial

As geleiras erodem a superfície terrestre como um grande processo de escavação: arrastando detritos de um local a outro para deposição (CHRISTOPHERSON, 2012). O processo de **ablação** é considerado o mecanismo pelo qual a neve, o gelo ou a água, são perdidos por uma geleira, pelo gelo flutuante ou pela cobertura de neve sazonal (SIMÕES, 2004, p. 120).

O carregamento dos detritos ocorre na superfície e também internamente (englacialmente) embutidos na geleira. Evidências revelam que pedaços de rocha são congelados nas camadas da geleira durante o processo (remoção glacial, *glacial plucking* ou *quarrying*), sendo que uma vez incorporados ao corpo da geleira, raspam a paisagem a medida que se movem – processo conhecido como **abrasão** (CHRISTOPHERSON, 2012; GLASSER; BENNETT, 2004).

Para Glasser e Bennett (2004), o entendimento do processo de erosão glacial é essencial para entender a evolução das paisagens glaciais e seu papel na reconstrução temporal das massas de gelo.

A erosão e a deposição glacial produzem formas de relevo distintas que diferenciam significativamente a paisagem terrestre antes e depois do gelo – geleiras alpinas e continentais geram suas próprias paisagens típicas (CHRISTOPHERSON, 2012).

O processo de remoção glacial (*plucking* ou *quarrying*) envolve dois processos separadamente: (1) o faturamento ou quebra da base rochosa abaixo da geleira; e (2) o arrastamento desta rocha fraturada ou esmagada (GLASSER; BENNETT, 2014). A fratura de

rocha pode ocorrer onde uma geleira que flui sobre a base rochosa cria diferenças de pressão na rocha subjacente, ocasionando campos de tensão diferencial que podem ser suficientes para induzir o fraturamento basal (MORLAND; BOULTON, 1975; MORLAND; MORRIS, 1977 *apud* GLASSER; BENNETT, 2014).

Glasser e Bennett (2004, p. 46) citam os estudos de Röthlisberger e Iken (1981); Walder e Hallet (1985) e Iverson (1991), quanto à premissa de que as “flutuações na pressão basal da água também pode ajudar a propagar fraturas rochosas embaixo de uma geleira”. Conforme citado pelos autores Glasser e Brennett (2004, p. 46), o experimento de Brepson (1979), evidenciou a partir da simulação de um deslizamento do gelo temperado sobre um obstáculo no laboratório, que: grandes cavidades se formam à facie anterior do obstáculo auxiliando o processo de *quarrying*.

Estudos de modelagem indicam que baixas pressões basais efetivas (0,1 a 1Mpa) e altas velocidades de deslizamento são as condições glaciológicas necessárias para a extração (*plucking* ou *quarrying*), tendo em vista que estas condições favorecem a extensa separação da interface gelo/rocha (formação de cavidades subglaciais) e também concentra tensões em pontos específicos, como os cantos das bordas rochosas – aonde o gelo está em contato direto com a base rochosa (IVERSON, 1991; HALLET, 1996 *apud* GLASSER; BENNETT, 2004).

Quanto aos processos de abrasão, Glasser e Bennett (2004, p. 47) citam duas escolas de pensamento:

- a) A primeira diz que os clastos (sedimentos oriundos do processo erosivo) são cercados por água pressurizada e atuam reduzindo o atrito com a base rochosa subglacial – esse modelo prevê que a abrasão é maior proporcionalmente à fusão basal e que a abrasão é independente da pressão normal efetiva (i. e., o papel da espessura da geleira na pressão normal da massa de gelo) sendo que alojamento e abrasão se tornam processos independentes (HALLET, 1979; 1981 *apud* GLASSER; BENNETT, 2004);
- b) A segunda é que os clastos abrasivos estão em contato direto com a base rochosa sem estarem envolvidos por essa “cobertura de água”, tendo em vista que a base

subglacial é permeável ou ainda por que considera a possibilidade de existir uma cavidade na região proximal ou distal ao lado do clasto, no qual pode ocorrer a presença de água ou gases (BOULTON, 1974; 1979; HINDMARSH, 1996 *apud* GLASSER; BENNETT, 2004).

Conforme Christopherson (2012, p. 540) os processos de abrasão e raspagem produzem uma superfície lisa de rocha exposta, a qual brilha pelo “polimento glacial” quando a geleira retrai. As rochas maiores na geleira agem como “formões”, sulcando a superfície subjacente e produzindo “estrias” glaciais paralelas à direção de fluxo.

Glasser e Bennett (2014) apontam como processo importante a erosão glacial causada pela água de degelo sob as camadas de gelo e a geleira resultante de processos mecânicos e químicos. A eficácia da água de degelo como agente de erosão depende:

- a) Da suscetibilidade do leito rochoso envolvido, em especial da presença de fraquezas estruturais ou a suscetibilidade a ataques químicos;
- b) O regime de descarga, em particular a velocidade da água e o nível de fluxo turbulento;
- c) A quantidade de sedimento envolvida no transporte.

2.5.4 Formas de relevo glaciais

Christopherson (2012) divide as formas de relevo glaciais em: (i) formas de relevo erosivas criadas pela glaciação alpina; (ii) formas de relevo deposicionais glaciais criadas pela glaciação alpina; (iii) formas de relevo erosivas e deposicionais causadas pela glaciação continental. Na área de estudo, as formas de relevo glaciais presentes se limitam àquelas produzidas pela glaciação alpina, sejam erosionais ou deposicionais.

2.5.4.1 Formas de relevo erosivas criadas pela glaciação alpina

Este tópico compilou observações sobre as formas de relevo erosivas criadas pela glaciação alpina, considerando os períodos de morfogênese, conforme expresso por Christopherson (2012) e outros autores. Conforme segue:

- a) **Pré-glacial:** Geleiras que se formam a partir de feições pré-glaciais são comumente chamadas de **geleiras de vale**. As **geleiras de vale** se caracterizam como um rio de gelo confinado dentro de um vale que originalmente foi formado pela ação de um curso d'água que existia antes da glaciação. São confinadas entre as paredes do vale e terminam numa língua estreita. Várias geleiras de vale podem coalescer, formando um tronco principal, ou seja, uma geleira de vale composta (*geleira tronco*) aonde as morainas mediais indicam os limites de cada unidade. Este tipo de geleira varia em extensão, possuindo cerca de 100 metros a 100 quilômetros. As geleiras de vale fluem lentamente para baixo erodindo a superfície sob sua massa de gelo e esculpindo-a significativamente. Parte dos detritos oriundos deste processo são transportados pela geleira para um local diferente e outra parte dos detritos são carregadas dentro ou ao longo de sua base (dentro das camadas basais ou na própria interface gelo-rocha. A maioria das geleiras alpinas originam-se de um campo de neve de montanha que é confinado numa reentrância em forma de bacia – essa forma de relevo erosivo escavada na cabeceira de um vale é chamada de **anfiteatro ou circo**. A geleira que se forma nessa área é chamada de **geleira de anfiteatro**. Várias geleiras de anfiteatro podem alimentar conjuntamente uma geleira de vale. A parte terminal de uma geleira de vale, em forma de leque é chamada de **geleira de piemonte**. As geleiras de piemonte podem ocupar uma extensa área na base de uma montanha. Algumas geleiras terminam no mar, geralmente em fiordes – são chamadas de **geleiras de maré**. A frente desses corpos são em forma de falésia de gelo, de onde se separam os **icebergs**⁹ (CHRISTOPHERSON, 2012; SIMÕES, 2004).
- b) **Glacial (feições formadas na glaciação subsequente):** A modificação da paisagem anterior ocorre devido aos processos erosivos e de transporte que removem grande parte do *regolito*¹⁰ e o solo que cobriam a paisagem de vales escavados por cursos d'água. Quando as paredes do “circo” são erodidas, cristas afiadas são formadas, dividindo bacias de circos adjacentes. Essas arestas também são chamadas de **arête**.

⁹ *Iceberg*: gelo flutuante formado quando as geleiras chegam a um oceano, baía ou fiorde. São instáveis pois seus centros de gravidade mudam com o derretimento e as quebras adicionais (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 532).

¹⁰ *Regolito*: substrato rochoso intemperizado (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 542).

As arestas tornam-se **serrilhas** (as cristas serrilhadas das montanhas glaciadas). Dois circos erosivos podem reduzir as arestas a uma depressão em forma de sela, também chamado de **colo**. Um **esporão**¹¹ é o resultado quando várias geleiras de anfiteatro escavam um cume individual de montanha por todos os lados. Um **bergschrand**¹² é formado quando uma fenda ou uma fissura larga se abre ao longo da parede da cabeceira de uma geleira, se tornando visível principalmente no verão quando a cobertura de neve desaparece (CHRISTOPHERSON, 2012).

- c) **Pós-glacial paisagens formadas em momentos de clima mais quente (i. e. após a retração do gelo)**: Christopherson (2012) observa que os vales glaciados anteriormente em forma de “V” estão muito modificados, apresentando-se em forma de “U”. O intemperismo físico resultante do ciclo congelamento-descongelamento enfraqueceu a rocha ao longo dos penhascos íngremes, onde ela caiu para formar **encostas de tálus** nos lados do vale. O gelo em retração deixa para trás as rochas transportadas como **erráticos**. Nos circos onde as geleiras de vale se originaram, formam-se pequenos lagos de montanha chamados de **tarns**. Um circo contém lagos pequenos de forma circular e que apresentam-se em “degraus” - chamados de **lagos paternoster**. Acredita-se que os **lagos paternoster** tenham se formados a partir de processos de resistência diferenciada das rochas aos processos glaciais ou pelo represamento por depósitos glaciais. Os vales escavados por geleiras tributárias são apartados bem acima do assoalho do vale quando a geleira primária erode o assoalho do vale muito profundamente – são chamados **vales suspensos** (locais de ocorrências de cascatas). **Fiordes** se formam a partir da retração de uma geleira que havia formado calhas glaciais que intersectavam o oceano e foram preenchidas após a inundação.

Os períodos de morfogênese das estruturas de relevo presentes na paisagem da área de estudo foram utilizados para auxiliar na interpretação das geoformas mapeadas, bem como, na

¹¹ De acordo com Simões (2004, p. 130), um esporão é uma projeção horizontal submersa de gelo a partir de um *iceberg*, falésia de gelo, paredão de gelo ou placa de gelo. Portanto, o esporão referido por Christopherson (2012, p. 542) se refere a forma de relevo em cume esculpida pela ação erosiva de diversas geleiras de anfiteatro por todos os lados.

¹² *Bergschrand*: é chamada a fenda existente na cabeceira de uma **geleira de anfiteatro** ou de uma **geleira de vale**. Ela separa o gelo de geleira da parede rochosa (ou do flanco de gelo fixo à parede). Quando o flanco de gelo não existe, o vão é conhecido como *randkluft* (SIMÕES, 2004, p. 123).

geração dos *subsets* do mapa geomorfológico. A área de estudo apresenta uma complexa configuração desses estágios em sua caracterização.

2.5.4.2 Formas de relevo deposicionais criadas pela glaciação alpina

As geleiras escavam formas de relevo com a quantidade de material transportado durante o processo (CHRISTOPHERSON, 2012). Os tópicos abaixo representam um resumo das formações abordadas por Christopherson (2012):

- a) **Drift glacial**: Termo geral para todos os depósitos glaciais não selecionados como selecionados. Os sedimentos depositados pela água de degelo glacial selecionados são chamados de **drift estratificado** e os não selecionados e não estratificados são chamados de **till** (CHRISTOPHERSON, 2012).

- b) **Morainas**: A deposição de sedimentos glaciais produz uma forma de terreno específica chamada de moraina. **Morainas laterais** se formam ao longo de cada lado de uma geleira. Com a união de duas geleiras com morainas laterais pode se formar uma **moraina medial ou central**. Depósitos de **till** espalhados por uma superfície são chamados de **moraina basal ou planície de till**. Detritos soltos na extensão máxima da geleira são chamados de **moraina terminal**. No caso de morainas formadas em pontos em que uma geleira estabeleceu um novo equilíbrio entre crescimento e ablação, estas são chamadas de **morainas frontais**.

As transformações antrópicas impostas à paisagem glacial da área de estudo impedem classificar com precisão as formas deposicionais encontradas. A alteração desses depósitos impede que as morainas estejam consolidadas de maneira clara, devendo-se então utilizar o termo *drift glacial*.

2.5.4.3 Formas de relevo erosivas e deposicionais criadas pela glaciação continental

De acordo com Christopherson (2012), as geleiras continentais se formam sob condições diferentes do processo de formação de geleiras alpinas – em paisagens abertas e amplas. São caracterizadas por enormes mantos de gelo que avançaram e retraíram, que durante

o processo, construíram feições erosivas e deposicionais semelhantes às produzidas pela glaciação alpina. Morainas laterais e mediais não são encontradas nos processos de glaciação continental.

O recuo de geleiras continentais formam feições deposicionais como **planícies de till**, que podem estar localizadas anteriormente às morainas frontais (CHRISTOPHERSON, 2012).

Além de **depósitos morânicos** podem ser encontradas as **planícies de lavagem glacial** que exibem canais de corrente que são alimentados por água de degelo, entrelaçados e sobrecarregados com material selecionado (CHRISTOPHERSON, 2012).

Cristas sinuosas extensas e estreitas de areia grossa e cascalho, contínuas ou descontínuas, que podem estar ramificadas ou não, são chamadas de **eskers**. Os **eskers** se formam ao longo de canais de corrente de água de degelo que fluem embaixo de uma geleira, em um túnel de gelo, ou entre as paredes de gelo – quando a geleira retrai, o **esker** de lados íngremes é deixado para trás em um padrão paralelo ao movimento da geleira. (CHRISTOPHERSON, 2012).

Outras formações de lavagem a serem citadas são os **ketles**¹³ e **kames**¹⁴. Cumpre mencionar ainda as **rochas moutonné**¹⁵ e os **drumlins**¹⁶ (CHRISTOPHERSON, 2012).

Algumas formas de deposição e erosão resultantes da glaciação continental são comuns também nas áreas de glaciação alpina. As formas de rochas moutonné, planícies de *till* e depósitos morânicos podem ser localizadas com facilidade. O item 2.5.4.5 traz a discussão sobre as diferenças dessas formações nas formas de glaciação continental e alpina.

¹³ *Kettle*: Buraco de lados/fácies íngremes deixado após o derretimento de grandes blocos de gelo após a retração glacial. Frequentemente são preenchidos por água, formando lagos (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 546).

¹⁴ *Kame*: Pequenas colinas, calombos ou montículos de areia e cascalho de seleção baixa que são depositados pela água, gelo, gelo em fendas ou em entalhes traçados pelo gelo de superfície (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 546).

¹⁵ *Rocha moutonnée*: Colinas alongadas assimétricas de substrato rochoso exposto. Um dos lados é levemente inclinado a montante, tendo em vista o alisamento pela ação glacial; o outro (a jusante), é abrupto e íngreme, por ter pedaços de rocha arrancados pela geleira (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 547).

¹⁶ *Drumlin*: É chamado o depósito de *till* que foi alongado na direção do movimento do gelo continental, com um fim abrupto a montante e cônico a jusante (CHRISTOPHERSON, 2012, p. 547).

2.5.4.4 Feições de erosão glacial classificadas a partir da escala

Glasser e Bennett (2004) ofereceram uma classificação das feições oriundas de erosão glacial baseadas na escala de ação do processo erosivo. O **quadro 3** é uma compilação dos estudos apresentados por Glasser e Bennett (2004) na caracterização de feições formadas por processos erosivos a partir da escala de processo:

FEIÇÕES DE EROSÃO GLACIAL DE MICRO-ESCALA (Dimensões inferiores a 1 metro)	
Forma	Morfologia
“ <i>Striae</i> ” (Estrias)	São sulcos ou arranhões em uma superfície de rocha produzida pelo processo de abrasão glacial, resultante do arrasto de detritos ou clastos no gelo basal sobre a superfície rochosa. As estrias individuais geralmente não têm mais do que alguns milímetros de profundidade, mas podem ter vários metros de continuidade.
“ <i>Micro crags and tails</i> ” (Micro rochedos e caudas)	São pequenas caudas de rocha que estão preferencialmente protegidos da abrasão glacial, abrigados por grãos resistentes ou cristais minerais na superfície da rocha basal.
“ <i>Bedrock gouges and cracks</i> ” (Sulcos e rachaduras na rocha)	Esta categoria compreende uma família de pequenas fissuras, goivas e entalhes criados nas superfícies rochosas. Uma variedade de diferentes morfologias foram registradas, diferenciando-se em forma de linhas de fratura simples ou rachaduras em leito rochoso a maiores fissuras em forma de crescente em que pequenos fragmentos de rocha foram fisicamente removidos da rocha basal.
“ <i>P-forms and S-forms</i> ” (Formas de “p” e “s” em depressões e redes de micro-canais)	Depressões esculpidas de paredes lisas e canais entalhados no leito rochoso.
FEIÇÕES DE EROSÃO GLACIAL DE MESO-ESCALA (Dimensões entre 1 metro e 1 quilômetro)	
Forma	Morfologia
“ <i>Streamlined bedrock features</i> ”	Também conhecido como “ <i>drumlins</i> ” ou “ <i>whalebacks</i> ”. Podem ser definidos como colinas rochosas que tiveram seu formato suavizado e arredondado por todas arestas por uma geleira. Formas rochosas individuais podem ser suavizadas e levemente alongadas em direção ao fluxo de gelo, embora os atributos estruturais da rocha basal podem afetar drasticamente as morfologia. Tendem a ter altura e comprimento relativamente proporcionais (1 a 2 metros de altura em relação a 1,5 a 3 metros de comprimento).
“ <i>Stoss and Lee Forms</i> ”	Em contraste com as “ <i>Streamline bed rock features</i> ”, dominadas pela ação abrasiva do gelo, essas formas possuem superfícies raspadas e arestadas. Possuem perfis acentuadamente assimétricos, com inclinações abruptas no lado de cima do gelo (“ <i>stoss</i> ”) e declives íngremes na parte abaixo do gelo (“ <i>lee</i> ”). São comumente encontradas em áreas de montanhas rochosas, ocorrendo aglomerações em uma faixa de dezenas ou centenas de metros de tamanho.
“ <i>Rock grooves and rock basins</i> ”	Semelhantes a morfologia das <i>striae</i> , exceto pelo seu maior tamanho e profundidade. Variam de dezenas de metros a centenas de comprimento e podem ter vários metros de largura. A profundidade é de aproximadamente 1 metro. Se apresentam como depressões esculpidas de paredes lisas e canais cortados no leito rochoso.

“Subglacial meltwater channels”	Canais laterais íngremes entalhados em rocha ou <i>till</i> ¹⁷ formados a partir de processos de escoamento de água de degelo, cuja orientação do canal pode ser contrastante com a topografia local. Os canais podem ter um longo perfil convexo irregular.
“Ice-marginal channels”	Em contraponto aos canais subglaciais de degelo, este tipo de canal tem fluxo paralelo às margens da geleira. Estes canais começam e terminam abruptamente e são frequentemente associados a outros tipos de relevos glaciais deposicionais.
FEIÇÕES DE EROSÃO GLACIAL DE MACRO-ESCALA (Dimensões superiores a 1 quilômetro)	
Forma	Morfologia
“Regions of areal scour”	Estão entre as paisagens mais comuns encontradas em paisagens decorrentes de erosão glacial. Áreas de baixo relevo em forma de bacias de arestas suavizadas, tomando a forma de <i>moutonnés roches</i> ¹⁸ e <i>whalebacks</i> . As superfícies rochosas podem conter <i>striae</i> , goivas e rachaduras. A morfologia é controlada por processos pré-glaciais de intemperismo e padrões de junção do leito de rocha.
“Glacial troughs”	São feições lineares profundas escavadas no relevo que representam os efeitos da erosão glacial, onde o fluxo de gelo é confinado pela topografia e canalizado ao longo de calhas ou vales.
“Cirques”	São formações em grandes cavidades rochosas que se abrem para encostas e são delimitadas por uma facie de declive íngreme e de topo arqueado.
“Giant stoss and lee forms”	Grandes colinas rochosas altas ou esporões com faces desgastadas e extraídas pelo processo erosivo. A morfologia é controlada características de intemperismo.
“Tunnel valleys”	São depressões grandes, alongadas e superdimensionadas entalhadas em rocha ou sedimento glaciogênico.

Quadro 3 - Caracterização de feições erosivas a partir da escala de processo (Traduzido e extraído de Glasser e Bennett, 2004, p. 48-66).

A escala como método para diferenciação de formas pela erosão glacial é uma ferramenta importante para o mapeamento geomorfológico. Na área de estudo, diversos itens de todas as escalas podem estar evidenciados totalmente ou em parte. Essa definição de classificação, utilizada de maneira associada aos estados de morfogênese geomorfológica, permitem uma avaliação mais precisa das estruturas presentes na área de estudo e seu papel diante da impactação da atividade de mineração. A escala também permite diferir, entre as formas que estariam mais evidentes em cada tipo de mapeamento. No caso da área de estudo, o mapeamento foi executado em meso-escala, sendo mais evidente a presença de unidades geomorfológicas desse porte. Entretanto, formas de micro-escala podem estar evidenciadas, ainda que sua interpretação exija ferramentas de teledetecção de alta resolução e cenas adquiridas com total percentual de visibilidade.

¹⁷ *Till*: Descreve os depósitos diretos de gelo deixados como detritos não estratificados e não selecionados (CHRISTOPHERSON, 2012).

¹⁸ *Moutonnée roche*: Também chamado de “*sheepback*” são formações rochosas decorrentes da passagem de uma geleira (BENN; EVANS, 2010).

2.5.4.5 Feições de glaciação alpinas e continentais comparadas

Este tópico transcreve as comparações propostas por Christopherson (2012), que foram compiladas em uma tabela produzida a partir dos estudos de Leet, Judson e Kauffman (1978, p. 317 *apud* CHRISTOPHERSON, 2012, p. 546). O método comparativo é expresso nesse trabalho conforme o **quadro 4** :

Feições de glaciação alpina e continental comparadas		
<i>Feições e formas de relevo</i>	Geleiras alpinas	Geleiras continentais
Formação Erosiva		
Estrias, polimento, etc.	COMUM	COMUM
Circos	COMUM	<i>AUSENTE</i>
Esporões, arestas, colos	COMUM	<i>AUSENTE</i>
Vales em forma de “U”, esporões truncados, vales suspensos	COMUM	Raro
Fiordes	COMUM	<i>AUSENTE</i>
Rocha <i>moutonnée</i>	COMUM	COMUM
Formação Depositional		
<i>Till</i>	COMUM	COMUM
Morainas terminais	COMUM	COMUM
Morainas recessionais	COMUM	COMUM
Morainas basais	COMUM	COMUM
Morainas laterais	COMUM	<i>AUSENTE</i>
Morainas mediais	COMUM, facilmente destruídas	<i>AUSENTE</i>
<i>Drumlins</i>	Raro ou <i>AUSENTE</i>	Localmente COMUM
<i>Erráticos</i>	COMUM	COMUM
<i>Drift</i> estratificado	COMUM	COMUM
<i>Kettles</i>	COMUM	COMUM
<i>Eskers</i> , preenchimento de fendas	Raro	COMUM
<i>Kames</i>	COMUM	COMUM
Terraços de <i>kames</i>	COMUM	Presente em terreno acidentado

Quadro 4 - Feições de glaciação alpina e continental comparadas (Extraído de Christopherson (2012, p. 546).

A diferenciação entre as feições de glaciação alpina e continental apresenta papel importante na caracterização geomorfológica. Muitas dessas feições se assemelham virtualmente entre si. A tabela, desse modo, tem utilidade na definição da forma na interpretação, possibilitando diferenciar formas que se assemelham visualmente em imagens satelitais mas não podem estar presentes naquele ambiente.

2.5.6 Ambientes glaciais e periglaciais

Conforme Assine e Vessely (2008), **ambientes glaciais** (*latu sensu*) são locais onde o gelo e as águas de degelo são os principais agentes de transporte e deposição sedimentar. Englobam tanto ambientes em contato direto com o gelo – **ambientes glaciogênicos ou glaciais** (*stricto sensu*); quanto ambientes adjacentes e influenciados diretamente por geleiras – **ambientes proglaciais**. Os **ambientes periglaciais** são excluídos dos ambientes glaciais pois, ainda que sejam caracterizados por climas frios e solos frequentemente congelados (*permafrost*) – não estão necessariamente próximos às geleiras (ASSINE; VESSELY, 2008).

De acordo com Assine e Vessely (2008), os **ambientes glaciogênicos** são caracterizados por sedimentos em contato direto pela geleira e seus depósitos ocorrem de acordo com a ação do gelo ou de águas de degelo. De acordo com sua posição no corpo da geleira, podem ser subdivididos em:

- a) **Subglacial**: localizados na base da geleira;
- b) **Supraglacial**: localizados sobre a geleira – ou superfície do gelo;
- c) **Englacial**: dentro do corpo da geleira.

Os **ambientes proglaciais** consistem na área que engloba tanto a zona de contato com a margem da geleira (*ice-contact zone*) quanto áreas adjacentes que estejam influenciadas pela ação direta do gelo ou da água de degelo, como no ambiente flúvio-glacial (ASSINE; VESSELY, 2008). Nos ambientes glácio-lacustres e glácio-marinhos, a geleira e os *icebergs* atuam como fonte de material sedimentar para depósitos além dos domínios da geleira (ASSINE; VESSELY, 2008).

Os **ambientes periglaciais** ocupam mais de 20% da superfície exposta da Terra e incluem feições formadas em condições não glaciais (CHRISTOPHERSON, 2012). De acordo com o autor, estes ambientes são encontrados principalmente em áreas de clima de tundra (polares e subárticos). Os **ambientes periglaciais** tem como característica importante a existência de processos de congelamento e existência de gelo no solo – incluindo o *permafrost*.

O termo **periglacial** descreve processos de clima frio, formas de relevo e feições topográficas que existem ao longo das margens das geleiras, no passado e no presente (CHRISTOPHERSON, 2012). **Solos estruturados** formam-se no ambiente periglacial onde o congelamento e descongelamento do solo cria formas poligonais em círculos, polígonos, redes, listras e degraus (CHRISTOPHERSON, 2012).

A área de estudo permite distinguir apenas o ambiente glacial (*stricto sensu*) e o ambiente proglacial. Isso se deve a escala de mapeamento. A área de estudo está contida em uma área de influência direta das atividades de glaciação das geleiras, sendo, desse modo, muito difícil caracterizar o ambiente periglacial, partindo do pressuposto apresentado por Assine e Vessely (2008). Conforme abordado anteriormente, os autores diferem o ambiente periglacial pelo fato de ele não ter que estar, necessariamente associado, às geleiras. Deste modo, esta pesquisa considerou os ambientes localizados imediatamente às geleiras como sendo *ambientes proglaciais*.

2.5.6.1 Considerações sobre permafrost

O *permafrost* é definido como material litosférico (solo ou rocha) que permanece com temperaturas inferiores a 0°C por pelo menos dois anos (CHRISTOPHERSON, 2012). Simões (2004) ressalta que o *permafrost* ocorre até 600 metros de profundidade em solos ou parte da crosta terrestre constantemente congelada, excetuando-se a camada superficial onde é possível encontrar gelo subterrâneo.

Christopherson (2012) também aponta que há de ser considerado outros dois fatores além da temperatura do solo – rocha: (i) a presença de *permafrost* fóssil de condições prévias de idades do gelo e (ii) o efeito de isolamento da cobertura de neve ou da vegetação que inibe a perda de calor.

Conforme Stumm *et al.* (2015), a camada próxima à superfície se descongela durante a estação quente e é chamada de **camada ativa** – a definição é térmica e não visual: portanto é difícil identificar o *permafrost* apenas com uma avaliação visual. Para Christopherson (2012) a camada ativa está sujeita a ciclos congelamento-descongelamento diários e sazonais regulares – sendo que este derretimento cíclico afeta apenas os iniciais 10 centímetros de profundidade

no norte (Ilha Ellesmere, 78°N); até 2 metros nas margens meridionais (55°N) da região periglacial; e cerca de 15 metros no *permafrost* alpino das Montanhas Rochosas do Colorado (40°N).

De acordo com Christopherson (2012), a espessura e profundidade da camada ativa e da zona de *permafrost* se altera vagarosamente em resposta às mudanças climáticas, à medida que temperaturas mais altas degradam o *permafrost* (aumentando a espessura da camada ativa) e temperaturas mais baixas contribuem para o aumento do *permafrost* (reduzindo a camada ativa).

A superfície descongelada que pode ocorrer acima, abaixo ou dentro de um corpo de *permafrost* é chamada de **talik**. Os **taliks** ocorrem abaixo de lagos profundos e podem se estender até o substrato rochoso e aos solos não crióticos sob grandes lagos profundos – os **taliks** criam conexões entre a camada ativa e a água subterrânea, enquanto no *permafrost* contínuo a água subterrânea é essencialmente separada da água de superfície (CHRISTOPHERSON, 2012).

Dados sobre a existência de *permafrost* são escassos principalmente em regiões remotas e países em desenvolvimento, em virtude do dispendioso processo de escavação necessário para medir diretamente o *permafrost* (STUMM *et al.* 2015).

Para Stumm *et al.* (2015) é possível superar parcialmente os problemas associados à medição direta medindo e mapeando componentes de controle que estão diretamente relacionados à presença de *permafrost*: como **temperatura da superfície do solo** ou características geomorfológicas.

As áreas de *permafrost* que não são cobertas por geleiras são consideradas periglaciais, ocorrendo principalmente na Rússia (CHRISTOPHERSON, 2012).

Embora a caracterização dos ambientes glaciais (*lato sensu*) não tenha considerado a classificação em ambiente periglacial, a possibilidade da existência de *permafrost* na área de estudo deve ser considerada. Partindo dos postulados dos autores citados nesse item, pode-se dizer que a área de estudo oferece os “meios” para a existência de *permafrost* (temperatura do solo, características rochosas e sedimentares, regime climático, etc). Entretanto, a

confirmação dessa característica incidiria estudos detalhados sobre a temperatura do solo e escavações para confirmar sua existência no local.

2.5.6.2 Observações sobre geleiras de rocha

As geleiras de rocha são caracterizadas como a expressão geomorfológica de corpos rastejantes de base de gelo em áreas de *permafrost* de montanhas, atribuídas às condições periglaciais. As geleiras de rocha podem ocorrer em vertentes, anfiteatros ou vales (SIMÕES, 2004).

Conforme Ferrando (2003), as geleiras de rocha estão entre as formas mais enigmáticas produzidas em ambientes frios, inspirando um amplo espectro de pontos de vistas conflitivos sobre sua formação. Estas formas são como línguas de detritos angulares, cujo deslizamento é consequência da deformação do gelo intersticial e dos sedimentos congelados (FERRANDO, 2003).

De acordo com Stumm *et al.* (2015), o termo geleira de rocha é utilizado para descrever massas rastejantes de material sedimentar rico em gelo – ou seja, material de *permafrost* – nas encostas das montanhas. As geleiras de rochas tem estruturas de fluxo longitudinal ou transversal (cristas e sulcos) e uma aparência frontal bastante característica; bem como uma textura de superfície diferenciada das encostas adjacentes (STUMM *et al.* 2015).

Em áreas de clima continental, como as comumente encontradas na região hindu do Kush Himalayan (HKH), o gelo superficial interage com o *permafrost* e resulta em misturas complexas de neve soterrada, gelo de geleira e formações segregadas – em tais ambientes, um intervalo de transições podem ocorrer de geleiras politermais ou frias cobertas por detritos morrânicos e que sedimentos congelados em profundidade fluem (STUMM, *et al.* 2015).

Segundo Stumm *et al.* (2015) a ocorrência de geleiras de rocha é governada por dois fatores fundamentais: (i) o regime térmico do solo e (ii) a disponibilidade de gelo subsuperficial derivada de avalanches de neve ou geleiras formadas diretamente no solo. Outros requisitos importantes são a presença de suprimentos suficiente de detritos e a topografia íngreme (STUMM *et al.* 2015).

A gênese de geleiras de rocha pode estar fundamentada em duas origens: (a) origem glacial e (b) origem periglacial (FERRANDO, 2003). Ferrando (2003) aponta que alguns pesquisadores concluíram que as geleiras de rocha de origem periglacial consistem de detritos finos e grossos de rocha cimentada por gelo intersticial (WAHRHAFTIG; COX, 1959; CLARK *et al.* 1998; WHALLEY; PALMER, 1998 *apud* FERRANDO, 2003).

Ferrando (2003) ressalta que existe uma divergência acerca da origem das geleiras de rocha, afirmando que alguns autores defendem que a geleira possui origem exclusivamente glacial – sendo expressões exclusivas do *permafrost* alpino (HAEBERLI, 1985; HAEBERLI *et al.* 1988; FABRIKA-MARTIN *et al.* 1987; BARSCH 1971, 1977, 1987, 1988, 1996; BARSCH *et al.* 1979; CLARK *et al.* 1998; POTTER Jr. *et al.* 1998; *apud* FERRANDO, 2003).

Ainda que não haja consenso sobre a origem de geleiras de rocha, Ferrando (2003) presumiu que a geleira de rocha exista como uma geleira terminal num *continuum* de sistemas glaciais relacionados em que haja fluxo de detritos e gelo dentro do sistema – estando uma geleira descoberta num extremo do sistema; uma geleira coberta como intermediária e; uma geleira de rocha como extremo final (FERRANDO, 2003; FERRANDO *et al.* 2003).

Ferrando *et al.* (2003) cita Giardino *et al.* (1987 *apud* CLARK *et al.* 1998) e Potter Jr. *et al.* (1998) ao considerar que o termo geleira de rocha é mais “genérico” do que “genético” – tal que estas formações constituem esse amplo *continuum* geomorfológico.

Temperaturas permanentemente baixas em profundidade permitem a sobrevivência de geleiras de rocha e solo congelado por extensos períodos sempre que a espessura de cobertura sedimentar a espessura da capa ativa do *permafrost* (FERRANDO, 2003). A **figura 8** extraída de Ferrando (2003, p. 46) demonstra o fluxo de água ao longo da estrutura morfológica de uma geleira de rocha.

Ferrando (2003) apontou eventos principais na formação de geleiras de rocha cobertas a partir do trabalho de Whalley e Martin (1992):

- 1) Uma língua glacial delgada e desgastada é protegida do derretimento por uma cobertura rochosa de detritos;
- 2) Os detritos são resultados do intemperismo em escarpas rochosas íngremes, os quais precipitam constituindo taludes diretamente sobre a superfície do gelo;
- 3) O corpo delgado de gelo flui em baixas velocidades seguindo o fluxo glacial – as velocidades vão reduzindo com o tempo à medida que a espessura do gelo afina pela ablação;
- 4) O balanço entre o aporte de detritos e o aporte ou formação de gelo é crítico para a formação das geleiras de rocha;
- 5) Os níveis de deslizamento são baixos ou nulos quando o gelo está próximo da temperatura de derretimento. Abaixo de 0°C, o movimento se reduzirá ainda mais.

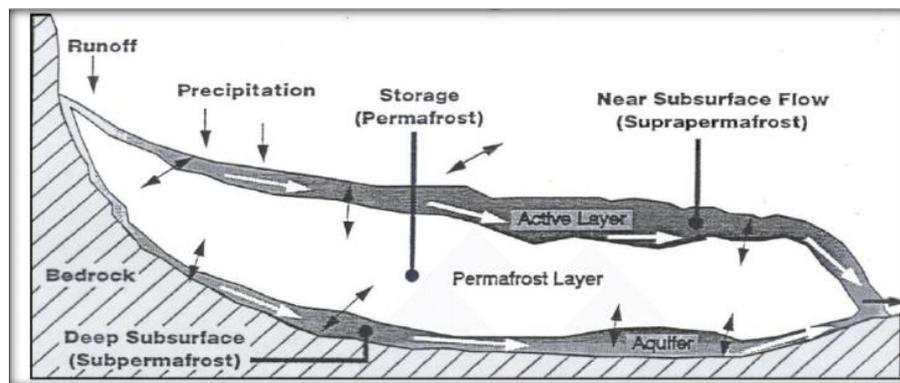


Figura 8 - Modelo de circulação hídrica no interior de uma geleira de rocha. São diferenciados a capa ativa, a cobertura do permafrost e o aquífero sub-permafrost segundo Giardino et al. (1992) e Haeberli, (1985)

O processo de formação de geleiras de rocha ocorre de uma variante do processo descrito acima, resultando da deformação de morainas com núcleo de gelo em terrenos de deglaciação recente, onde os blocos de gelo marginal estancados são cobertos por depósitos denudacionais antes que comecem a derreter. As morainas com núcleo de gelo podem derivar em geleiras de rocha a medida que o núcleo começa a fluir internamente, produto do estresse imposto pelo manto de detritos (FERRANDO, 2003).

A concentração de detritos na superfície da geleira de rocha influencia diretamente o processo de ablação e fluxo de gelo. Tal influência é resultado: (i) fusão propiciada pela camada fina de sedimentos sobre sua superfície (5 a 10mm) devido a sua alta condutividade térmica e (ii) redução do albedo comparado com o gelo descoberto (FERRANDO, 2003).

Conforme Ferrando (2003) o aumento da camada de sedimentos supraglacial desacelera a fusão do gelo e conseqüentemente reduz a ação da ablação. Os níveis de ablação também são alterados de acordo com a litologia dos detritos. Essa alteração está relacionada diretamente ao albedo e a condutividade térmica provocado pela litologia destes sedimentos.

A determinação da presença de geleiras de rocha na área de estudo possui estimada relevância considerando sua reação aos impactos da atividade de mineração. Os estudos de Brenning e Azócar (2008) relevaram os resultados importantes da interação entre geleiras de rocha e os rejeitos de prospecção das minas (ver item 2.1 desta monografia). As atividades de mineração podem ter removido totalmente ou parcialmente essas geoformas; ou ainda, utilizado a superfície dessas geleiras para depositar os rejeitos da operação, o que acarretaria mudanças irreversíveis à estabilidade física e geoquímica desses ambientes. Uma descrição detalhada desses processos pode ser encontrada no item II do **apêndice** nesta pesquisa.

2.6 A paisagem glacial andina da área de estudo

Este tópico visa discutir sumariamente os aspectos da paisagem glacial andina da área de estudo. No item I do **apêndice** dessa monografia se encontra um texto detalhado sobre a paisagem glacial andina *lato sensu*.

Diversos estudos se concentraram no inventário e estudo das geleiras do alto vale do Huasco em diferentes escalas. Podem ser citados os trabalhos de: Vallon e Vincent (2005) que se concentraram na escala local da sub-bacia do rio Toro; Nicholson *et al.* (2009) e Gascoin *et al.* (2010) no inventário e classificação de geleiras do alto vale do Huasco; Macdonnel *et al.* (2010) no balanço energético das superfícies das geleiras Guanaco e Toro 1 e o inventário da criosfera nas zonas áridas da Região do Atacama, produzido por Ulloa *et al.* (2017), mais ao norte.

Também podem ser citados os estudos de Brenning (2003; 2009); Brenning e Azócar (2009; 2010) e Herrera *et al.* (2010) que trataram indiretamente o tema a partir de análises de geleiras localizadas ao norte da região do alto vale do Huasco, bem como, inseriram discussões acerca da geomorfologia de geleiras de rocha e impactos da mineração nessas áreas. Ainda é importante destacar os trabalhos de Ferrando (2017); Andres e Ferrando (2018) e Soto *et al.* (2004) sobre geleiras rochosas no semiárido chileno; e os trabalhos de Clapperton (1994) e Ferrando (2002), que revisaram de maneira geral a glaciação quaternária nos Andes chilenos.

Conforme Nicholson *et al.* (2009), as geleiras do alto vale do Huasco, na região árida do Chile, não apresentam uma glaciação clássica de montanha: embora estejam localizadas em grandes altitudes, sua glaciação é limitada em extensão – dificultando a caracterização desses corpos de gelo. Pequenos corpos de gelo em formato de cone constituem um grande número de áreas de gelo perene e geleiras com superfície inferior a 0,1 km² de área, compreendendo um percentual de 18% de áreas glaciais e 3% de aporte hídrico armazenado como geleiras no vale do Huasco. As mudanças nas áreas das geleiras são compatíveis nos últimos cinquenta anos com as geleiras na área central do Chile, apesar de condições climáticas contrastantes (NICHOLSON *et al.* 2009).

No semiárido chileno, a criosfera é bastante importante devido ao fornecimento de água potável para a população local (NICHOLSON *et al.* 2009). Vallon e Vincent (2005) apontam que as geleiras Toro 1, Toro 2 e Esperanza, durante anos “normais” (predominantemente seco) as precipitações na área se dão em forma sólida, tendo em vista que a sub-bacia do El Toro se encontra acima de 4300 metros N.M.M., variando entre 50 e 200mm – e que nos anos de “El Niño” a precipitação ultrapassa 300mm. As geleiras podem propiciar cerca de 25 a 50 litros de água por segundo durante os seis meses de verão seco (VALLON; VINCENT, 2005).

Taillant (2013) destaca a importância das geleiras para as comunidades indígenas do Vale do Huasco (os povos indígenas Diaguita). Anteriormente aos grandes projetos de mineração, poucas pessoas da região conheciam estas áreas devido ao difícil acesso. Os povos indígenas diaguita contam que seus antepassados frequentavam as áreas como ponto de passagem para a Argentina. Para esses povos, essas terras são sagradas com cemitérios ancestrais dos indígenas (TAILLANT, 2013).

De acordo com Vallon e Vincent (2005) as geleiras da sub-bacia do El Toro desempenham um importante papel de apoio ao suprimento hídrico durante os verões secos (nos meses de inverno os fluxos são nulos). Os autores afirmam que a extrapolação da variação das superfícies de gelo observadas entre 1955 e 2005 tem uma virtude preditiva: estas geleiras devem desaparecer dentro de uma ou duas décadas - o que resultará na frequente interrupção do fluxo do rio El Toro durante os verões (VALLON; VINCENT, 2005).

2.7 Revisão teórica sobre sensoriamento remoto da criosfera

Atualmente é difícil de encontrar áreas da atividade e desenvolvimento humano que não encontre suporte a partir do Sensoriamento Remoto. As ciências naturais, físicas e sociais encontraram no Sensoriamento Remoto um ponto comum para interação e desenvolvimento (ESCALANTE-RAMÍREZ, 2012).

Sensoriamento Remoto é, em geral, a coleta de informações de um objeto sem fazer contato físico diretamente com ele. Em *stricto sensu*, é observar do alto um objeto de interesse, a partir de sensores acoplados em dispositivos aéreos ou satélites espaciais, sendo coletada a informação a partir da radiação eletromagnética, ou seja: luz visível, infravermelho, ultravioleta ou ondas de rádio (PELIKKA; REES, 2010).

O Sensoriamento Remoto é uma ferramenta importante aplicada na teledetecção de mudanças ambientais. O progresso tecnológico tem qualificado a utilização de seus produtos nesses diagnósticos, possibilitando o tratamento eficiente de imagens orbitais em estudos da criosfera. As técnicas de sensoriamento remoto promovem investigações complexas como a identificação morfológica e o balanço de massa de geleiras (WILLIAMS JR. *et al.*, 1991).

Vários parâmetros da geleira podem ser detectados a partir de dados de Sensoriamento Remoto terrestres, aéreos ou espaciais; como por exemplo: albedo, reflectância, temperatura de superfície da geleira e topografia, volume e velocidade da geleira (PELIKKA; REES, 2010).

2.7.1 Propriedades eletromagnéticas da neve e do gelo

Cada alvo possui uma identidade eletromagnética, sendo que, para a neve, a resposta espectral está diretamente relacionada com o teor de água livre em seu sistema de poros, tamanho e formato dos grãos, conteúdo de impurezas, espessura das camadas e rugosidade superficial (BREMER et. al, 2004).

A **figura 9** representa as diferentes assinaturas de reflectância espectral para os alvos água limpa, vegetação e solo seco, comparadas aos dos do sensor *Thematic Mapper* do LANDSAT.

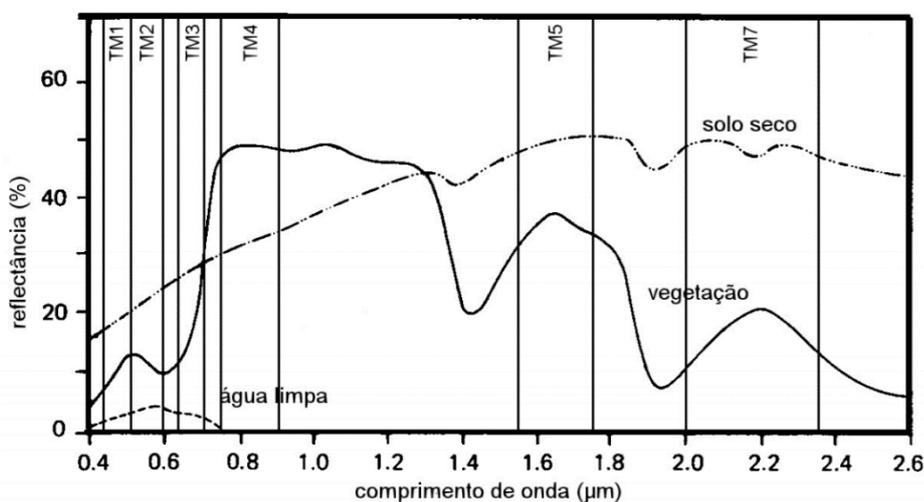


Figura 9 - Diferentes assinaturas de reflectância espectral (Extraído de Lillesand e Kiefer, 1994)

À exceção dos métodos de classificação manual, a maioria dos métodos de classificação digital de geleiras se baseiam na alta reflectância da neve e do gelo em relação a outras superfícies na banda do infravermelho próximo no espectro eletromagnético. As diferentes respostas espectrais podem representar as superfícies atingidas pela mineração, bem como, possibilitar o entendimento da morfodinâmica das geleiras em estudo. Esta região do espectro está coberta por vários sensores (ASTER, LANDSAT, Spot 4/5, CBERS) e os métodos de classificação multiespectral, com adaptações particulares, podem ser empregados neste tipo de estudo. Delimitações mais detalhadas quanto aos dados topográficos podem ser obtidas por meio de auxílio de modelos digitais de elevação (IANIGLA-CONICET, 2010).

Uma geleira idealizada para o estudo de suas fácies superficiais por meio de imagens satelitais e fotografias aéreas, seria aquela em que a neve não precipitasse após o início do processo de ablação; entretanto, essa situação ideal nem sempre está consolidada, tendo em vista que a resposta espectral de alvos glaciais pode ser mascarada por diversos fatores naturais: precipitações subsequentes, congelamento de água de origem pluvial, contaminação do alvo por poeira, avalanches, entre outros (HALL; MARTINEC, 1985; RIBEIRO *et al.*, 2013).

Considerando a variabilidade de interações não desejadas originadas a partir da resposta eletromagnética do alvo, é necessária uma seleção adequada de sensores apropriados para uma análise específica. Deve-se estar atento ainda a outros fatores como: comprimento de onda, resolução e frequência e o tempo de cobertura de solo (HALL; MARTINEC, 1985).

A área de uma geleira é o parâmetro mais simples de ser determinado, pois, geralmente, seu albedo é maior do que os das superfícies adjacentes. Em produtos de Sensoriamento Remoto, essas diferenças na interação com a radiação eletromagnética ficam registradas pelo contraste entre o brilho dos alvos (SANCHES, 2013).

A reflectância da neve na região do visível praticamente não é influenciada pelo tamanho dos grãos sendo, porém, suscetível às impurezas; nos comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio (0,7 – 3,0 μm) a reflectância é inversamente proporcional ao tamanho do grão – observado no gráfico da **figura 11** – e não às impurezas (DOZIER *et al.* 1981 *apud* RIBEIRO *et al.* 2013).

A reflectância do gelo é baixa nos comprimento de onda do espectro do visível (0,4 – 0,7 μm), porém a presença de neve depositada recentemente sobre as camadas superiores eleva consideravelmente esses valores – a neve possui comportamento inverso ao gelo no espectro do visível (RIBEIRO *et al.* 2013).

A **figura 10** demonstra as curvas de reflectância da neve e percentil de albedo, gelo “claro”, *firn*, *firn* “contaminado”, neve “muito contaminada” e gelo “contaminado”, extraído de PELIKKA e REES (2010, p. 44).

Pelikka e Rees (2010) obtiveram as curvas de reflectância demonstradas na figura 11, a partir de medições realizadas em Hintereisferner, Áustria, em 20 de setembro de 2002. Os autores observam que o pico na curvatura da neve no gráfico em 650 nanômetros é causada pelo *laser* operado na região do comprimento de onda do vermelho.

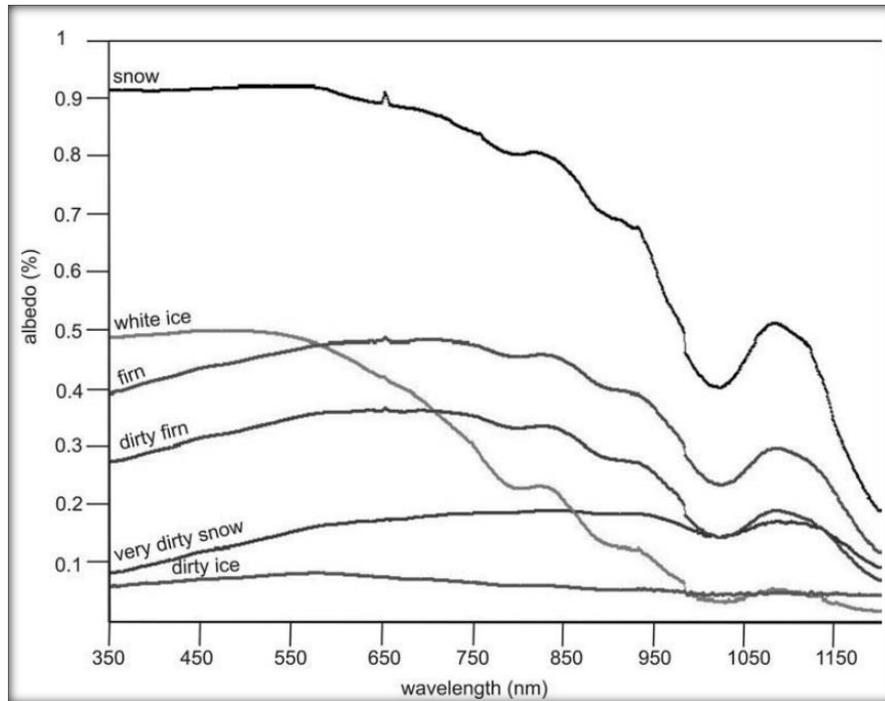


Figura 10 - Reflexão de neve, firn e gelo e neve contaminada (Extraído de Pelikka e Rees, 2010, p. 44).

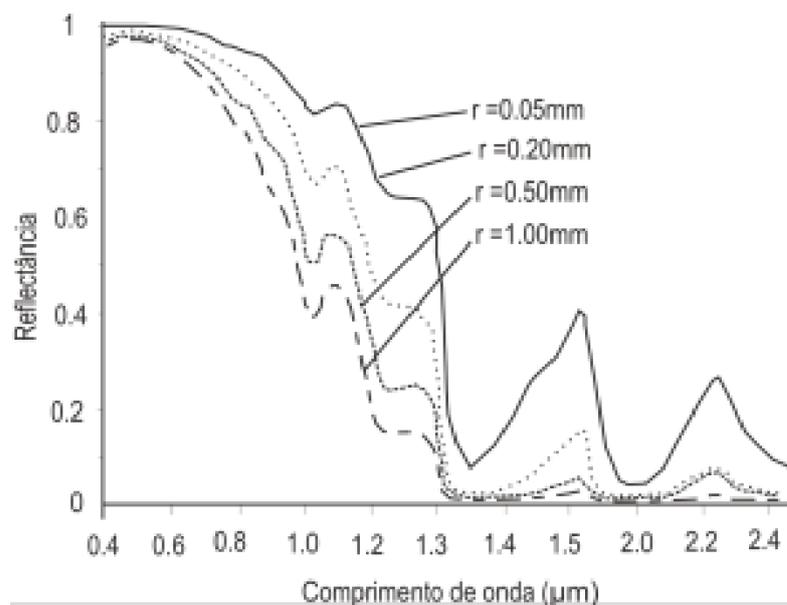


Figura 11 - Reflectância espectral da neve entre 0,4 e 2,4μm em função dos diferentes tamanhos de grãos, r = raio (Extraído de Ribeiro et al. 2013 adaptado de Nolin e Dozier, 1993).

Segundo Pelikka e Rees (2010) a reflectância diferencial dos tipos de superfície da geleira é uma das principais características visadas em mapeamento de geleiras utilizando dados obtidos através de sensores remotos óticos. As diferenças na reflectância, medidas em números digitais ou valores de brilho convertidos para valores de reflectância percentual, calculada em várias bandas de comprimentos de onda, auxiliam na delimitação da geleira a partir suas respostas e também na classificação da geleira nos vários tipos de superfície existentes (PELIKKA; REES, 2010).

2.7.2 Topografia de geleiras e ambientes glaciais

Conforme Pelikka e Rees (2010) o volume da geleira é o produto entre a área da geleira e sua espessura média; portanto, estudos de mudanças na massa da geleira devem considerar ambos os parâmetros. A espessura da geleira pode ser determinada se a topografia da geleira e a topografia da superfície do relevo forem medidos. Todavia, a topografia da superfície de relevo na base da geleira é conhecida somente em algumas geleiras no mundo com boa resolução espacial para o cálculo. Para geleiras em que não haja o dado topográfico do relevo base, mudanças relativas de volume (perda o ganho de massa – espessura) podem ser determinadas por meio de monitoramento temporal (PELIKKA; REES, 2010).

A topografia representa um importante parâmetro a ser analisado na morfologia das geleiras e pode ser mapeada por diversos métodos de detecção: fotografia terrestre e aérea, dados de radar aerotransportados, dados de radar de satélites orbitais (SAR), imagens de altíssima resolução espacial e dados de escaneamento a *laser*. Dentre eles, se destacam com maior acurácia os dados de levantamentos por escaneamento a *laser* (PELIKKA; REES, 2010).

A topografia pode ser estudada a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Um modelo digital de elevação pode ser definido como qualquer representação numérica ou digital da elevação do terreno dada em função da localização geográfica. Geralmente é dado em uma grade regular ou irregular de locais no solo enquanto métodos de interpolação geram elevações entre os pontos da grade. Um modelo digital de elevação (MDE) é portanto uma discreta aproximação da superfície real no momento da aquisição dos dados (RAAFLAUB; COLINS, 2006; JOKINEN; GEIST, 2010).

A obtenção de dados para geração de modelos digitais de elevação pode ocorrer de diversas formas: sensores óticos, aerofotogrametria, radar e *laser*. O RADAR (*Radio Detection and Ranging*) é um sistema de micro-ondas ativo composto de um transmissor e um receptor. O radar transmite um pulso de energia eletromagnética e aguarda a resposta do alvo (eco). Baseado no tempo de atraso do eco entre o pulso transmitido e recebido, é possível estimar a distância até o objeto visado. O uso de radares de imagens espaciais possibilita a visualização de grandes áreas com frequência, independentemente da luz do dia e condições meteorológicas. No intuito de obter uma considerável resolução, foram desenvolvidos os SAR's (radares de abertura sintética). A partir de técnicas avançadas de processamento de sinais (antenas sintéticas de grande abertura) são possíveis a obtenção de dados de resolução precisa e ampla preservação do sinal de transmissão (HØGDA; STORVOLD; LAUKNES, 2010).

Os radares de abertura sintética (SAR) foram originalmente desenvolvidos para produzir imagens bidimensionais a partir da refletividade do sinal de radar de uma cena alvejada. As informações referentes a fase de sinais interferométricos dos dados de SAR eram descartadas. Atualmente os dados interferométricos de SAR (InSAR) evoluíram como uma ferramenta útil em muitas aplicações a partir da utilização desses dados de fase do sinal refletido. Usando a informação de fase derivada de uma ou mais imagens SAR registradas simultaneamente, é possível recuperar informações complementares em comparação com imagens de amplitude, tais como estimativas de movimento de superfície e construção de modelos digitais de elevação (HØGDA; STORVOLD; LAUKNES, 2010).

Devido a disponibilidade diária, recursos de geração de imagens independente do tempo meteorológico e a habilidade de mensurar dados da superfície terrestre em resoluções altíssimas, o SAR tem muitas aplicações no campo da glaciologia. Conforme Høgda, Storvold e Lauknes (2010), dados InSAR podem ser utilizado para produção de MDE's e conseqüentemente, a partir de dados prévios de conhecimento da densidade da neve, estimar o balanço de massa da geleira. A partir do uso de dados de sinal da fase interferométrica e rastreamento de coerência de características da superfície, é possível estimar a velocidade do movimento de uma geleira. Dados de alterações de fácies glaciais podem ser obtidos ainda a partir da penetração do sinal de radar abaixo da superfície da geleira (HØGDA; STORVOLD; LAUKNES, 2010).

Modelos digitais de elevação construídos com base em dados de interferometria de radar possui acurácia reduzida devida a perda de coerência do dado obtido a partir do sistema *repeat-pass* do satélite. Essa perda é causada pela variação do movimento das geleiras entre as aquisições. De acordo com Joughin *et al.* (1996), Forsberg *et al.* (2000) e Rignot *et al.* (2001), a precisão alcançável é de 5 a 40 metros de elevação e 25 a 50 metros de resolução espacial. Esta precisão é reduzida em imageamento de superfícies ásperas e inclinadas e em geleiras de velocidade de deslocamento mais altas (JOUGHIN *et al.* 1996; FORSBERG *et al.* 2000; RIGNOT *et al.* 2001 *apud* HØGDA; STORVOLD; LAUKNES, 2010).

Melhor acurácia na geração de MDE's pode ser obtida a partir de dados InSAR gerados em sistema de coleta *across-track* (Dall *et al.* 2001, Høgda *et al.* 2007 *apud* HØGDA; STORVOLD; LAUKNES, 2010). O maior problema é que não existe atualmente sistema operacional InSAR via satélite. No entanto, existem vários radares aerotransportados que foram utilizados para fins de geração de modelos digitais de elevação em geleiras, destacando-se o projeto alemão DLR E-SAR e o dinamarquês EMISAR.

2.8 Avaliação de impactos ambientais causados pela atividade de mineração a partir de técnicas de teledeteção

Diversos autores utilizaram ferramentas de teledeteção para inferir impactos ambientais causados pela mineração. Palacios-Berrios (2006) estudou os impactos da atividade mineradora na região de Cajamarca nos Andes Peruanos por meio do uso de levantamento aerofotográfico e levantamento topográfico de campo. O estudo revelou importantes alterações ambientais a partir da teledeteção de mudanças na paisagem local, oriunda da construção de poços de exploração da mina Yanacocha e consequentes alterações topográficas relacionada às estruturas de exploração e deposição de rejeitos de rocha. De acordo com Palacios-Berrios (2006), a análise demonstrou uma alteração de aproximadamente 75% das características geográficas da região em sete anos (1993 a 2000), bem como, uma redução significativa dos recursos hídricos utilizado pela população adjacente.

Li, Zhao e Fan (2015) dissertaram sobre a potencialidade de imagens de alta resolução e suas aplicações no monitoramento de impactos ambientais da atividade de mineração. Segundo os autores, o uso de imagens de alta resolução representam a mais efetiva forma de

monitoramento de atividades de exploração de minérios, dada a capacidade de demonstrar de forma mais detalhada a superfície terrestre. Dentre os potenciais da utilização de imagens de alta-resolução, destaca-se a possibilidade de interpretar o *status* de empilhamento de resíduos sólidos, situação atual de exploração da mina (em exploração ou fechada). Também possibilita determinar explorações irregulares ou ilegais. Outras feições podem ser identificadas, como por exemplo, fissuras no solo e colapso de superfície em minas subterrâneas (LI; ZHAO; FAN, 2015).

No caso de minas a céu aberto, dados de satélite de média resolução podem ser eficazes em demonstrar a área de mineração propriamente dita, estruturas, tanques de rejeitos e pilha de resíduos sólidos em larga escala (LI; ZHAO; FAN, 2015).

Outros autores aplicaram dados LANDSAT para estudos de impactos de mineração em áreas de maior escala, podendo citar os trabalhos de Sirtoli (1999); Paull *et. al* (2006); Cardozo; Pimenta e Ribeiro (2016), entre outros.

3. Materiais e Métodos

3.1 Introdução

Diversas metodologias foram consideradas para a produção desta pesquisa. Desde as mais pretéritas às mais recentes, foram analisadas suas contribuições e viabilidade para este estudo. Os trabalhos de Garin (*op. cit.*); Ferrando e Ferrando *et al.* (*op. cit.*); Nicholson *et al.* (*op. cit.*); Gascoin *et al.* (*op. cit.*); Brenning e Azócar e Brenning (*op. cit.*); Soto *et al.* (*op. cit.*) e Stumm *et al.* (*op. cit.*), tiveram contribuição especial para a elaboração de uma metodologia híbrida na identificação de feições geomorfológicas glaciais e periglaciais na área de estudo.

A combinação entre produtos obtidos da utilização de dados de sensores remotos e dados secundários na produção de mapas temáticos contribuiu para inferir os impactos da atividade antrópica na área de estudo. Considerando os ambientes proglaciais e a disposição das feições mapeadas, bem como a intervenção antrópica neste ambiente, puderam ser apontados qualitativamente, indícios do impacto ambiental local a partir do retrabalhamento de feições naturais.

3.2 Materiais

3.2.1 Aplicações computacionais

Para a identificação das feições morfológicas foram utilizados diversos aplicativos computacionais. Optou-se pela utilização de ferramentas de plataformas *freeware* (*software* livre), de distribuição gratuita e código-fonte aberto. O **quadro 5** descreve os aplicativos e suas tarefas executadas.

Aplicações computacionais e utilização	
QGIS 2.18.23	Aplicativo computacional multiplataforma de sistema de informação geográfica (SIG) que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados.
SCP <i>Semi-Automatic Classification Plugin</i>	<i>Plugin</i> integrado ao QGIS para procedimentos de correção atmosférica DOS-1 aplicados aos dados LANDSAT 8.

SAGA GIS	Integrado ao QGIS. Composições RGB, tratamento de dados <i>raster</i> e geração de MDE
Orfeu ToolBox	Integrado ao QGIS. Procedimento de superimposição de <i>pixels</i> e <i>pansharpening</i> da composição LANDSAT multiespectral com a pancromática de resolução de 15 metros.
<i>Raster calculator QGIS</i>	Integrado ao QGIS. Cálculo de NDWI e NDSI.
Google Earth PRO	Utilização de mosaicos de alta resolução e série temporal para identificação de feições.

Quadro 5 - Aplicativos computacionais e utilização

3.2.2 Bases de dados digitais

3.2.2.1 ALOS PALSAR

O satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) foi lançado em 24 de janeiro de 2006 tendo operado até o ano de 2011. A plataforma ALOS é o resultado de um projeto conjunto entre a Agência Aeroespacial de Exploração Japonesa (JAXA) e a Organização Japonesa de Pesquisas e Observação (JAROS). Seu objetivo é proporcionar dados de observação da Terra que contribuam para o desenvolvimento sustentável, cartografia topográfica, vigilância do meio ambiente e mudanças climáticas em todo o planeta (JAXA, 2008; SILVA, 2009; Rocha *et al.* 2017; ASF, 2018).

O satélite ALOS possui três instrumentos: sendo dois óticos – PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) e AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared Radiometer type 2*) – e um radar polarimétrico de abertura sintética de banda larga PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) (ROCHA *et al.* 2017). O sensor PALSAR foi construído no intuito de contribuir na elaboração de mapas, observação regional precisa de cobertura do solo, monitoramento de desastres ambientais e pesquisas sobre a superfície (ASF, 2018).

O sensor PALSAR possui dois modos de feixe fino de varredura: polarização única (FBS) e polarização dupla (FBD). O sensor ainda tem o modo de polarização quádrupla (PLR) e o ScanSAR modo de feixe largo de varredura (WB1, WB2) o qual opera com perda considerável de resolução (ASF, 2018). A **figura 12** demonstra os sistemas de varredura e a **tabela 1** demonstra as especificações técnicas do sensor PALSAR.

O sensor PALSAR não é capaz de observar áreas acima de 87,8° N de latitude e 75,9° S quando o ângulo *off-nadir* é de 41,5 graus (ASF, 2018).

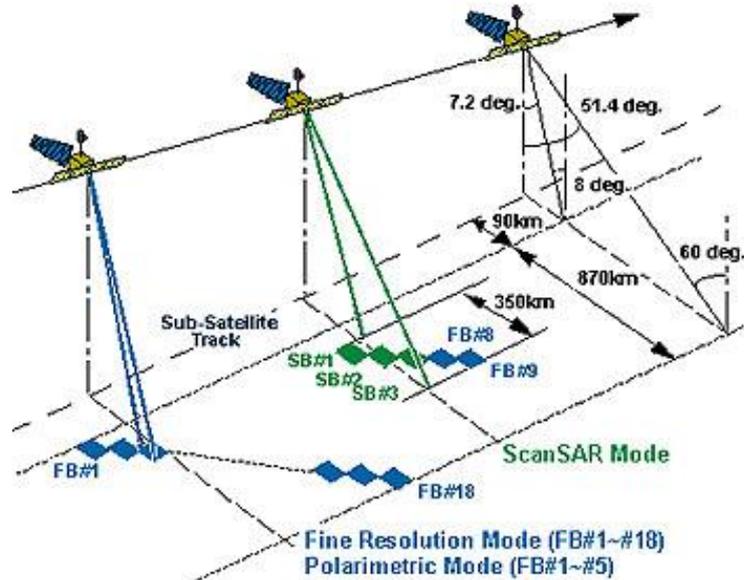


Figura 12 - Sistemas de varredura do ALOS/PALSAR (Extraído de ASF, 2018).

	PALSAR Beam Modes			
	Fine Resolution		ScansAR	Polarimetric
Beam Mode	FBS	FBD	WB1 WB2	PLR
Center Frequency	L-Band (1.27 GHz)			
Polarization	HH or VV	HH+HV or VV+VH	HH or VV	HH+HV+VV+VH
Spatial Resolution	10m	20m	100m	30m
Swath Width	70km	70km	250-350km	30km
Off-Nadir Angle	34.3° (default)		27.1° (default)	21.5° (default)

Tabela 1 - Especificações técnicas dos feixes de varredura do sensor ALOS/PALSAR (Extraído de ASF, 2018).

Até o ano de 2017, apenas dados do sinal dual (FBD) estavam disponíveis para *download* gratuito nas plataformas digitais. Atualmente, podem ser encontrados os dados de sinal único (FBS) disponível para *download* gratuito.

Rocha *et al.* (2017) testou a acurácia dos modelos digitais de elevação produzidos com dados FBD ALOS/PALSAR em comparação com levantamento de *laser* LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de resolução

espacial de um arco-segundo (aproximadamente 30 metros de resolução). Segundo Rocha *et al.* (2017) os dados ALOS/PALSAR foram os que mais se aproximaram quantitativamente (mediana de 0,87 metros) e qualitativamente (geometria de curvas de nível) do levantamento produzido pelos dados a partir de *laser* LIDAR.

Alganci, Besol e Sertel (2018) avaliaram a acurácia altimétrica e geométrica de diversas fontes de dados para MDE em diferentes superfícies geográficas, qualificando os dados do PALSAR como os de menor erro estatístico entre as fontes de dados disponibilizadas gratuitamente.

Em outubro de 2014, a *Alaska Satellite Facility* começou a liberar produtos ALOS/PALSAR no formato RTC (*Radiometrically terrain-corrected*), transformando os produtos de SAR acessíveis para a comunidade científica. O projeto corrigiu a radiometria e a geometria das imagens (ortorretificação) a partir de dados SRTM-GL1 de 30 metros de resolução para a América do Sul e utilização de simulações de MDE. O resultado foi a geração de produtos ALOS/PALSAR em 30 metros e 12,5 metros corrigidos (radiometria e geometria) para distribuição no formato GeoTIFF (ASF, 2018). A **figura 13** demonstra o andamento do processo de distribuição de produtos que passaram pelos procedimentos de ortorretificação e correção radiométrica de dados ALOS/PALSAR pela ASF no planeta, de acordo com o imageamento em *dual* e *single* polarização (FBD e FBS).

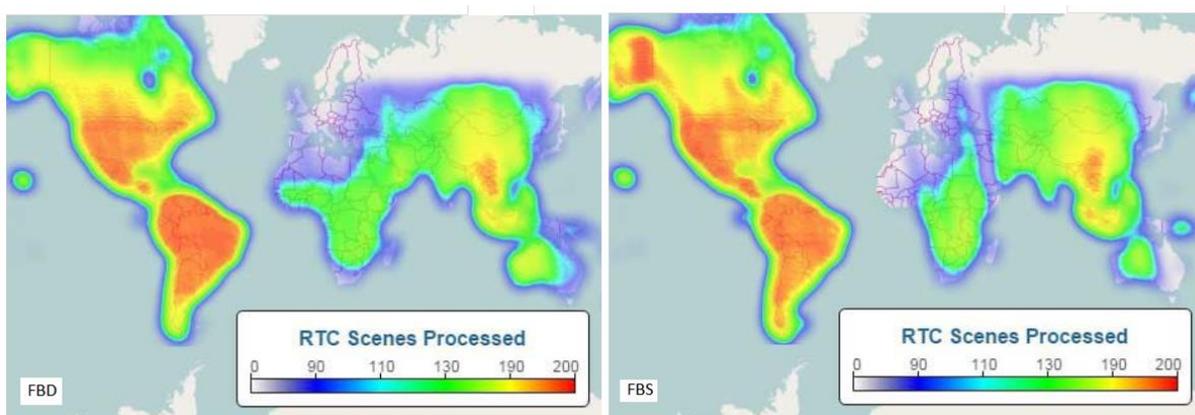


Figura 13 - Comparação entre a cobertura de cenas processadas pelo sistema RTC da ASF, 2018.

3.2.2.2 LANDSAT 8

O satélite LANDSAT 8 foi construído pela *Orbital Sciences Corporation* e seus instrumentos foram desenvolvidos pela *NASA (National Aeronautics and Space Administration)*. O satélite foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 e é uma continuidade da missão LANDSAT que iniciou em 1972. A plataforma transporta dois sensores: *Operational Land Imager (OLI)* e o *Thermal Infra-red Sensor (TIRS)* (USGS, 2018).

As bandas espectrais do sensor OLI proporcionam um aprimoramento dos instrumentos dos LANDSAT anteriores, com a adição de duas bandas espectrais adicionais: Banda 1 (azul) projetado para recursos hídricos e zona costeira e Banda 9 (infravermelho de ondas curtas) para detecção de nuvens *Cirrus*. O instrumento TIRS coleta duas bandas distintas para os comprimentos de onda cobertos por uma única banda nos sensores TM e ETM+ das plataformas antecessoras. Os sensores do LANDSAT 8 possuem desempenho radiométrico de sinal-ruído (SNR) aprimorados. Essa atualização permite uma melhor caracterização do cobertura terrestre (USGS, 2018).

A resolução da banda pancromática é de 15 metros (banda 8) e das bandas multiespectrais 1 a 7 e banda 9 é de 30 metros. As bandas termais (11 e 12) possuem resolução espacial de 100 metros. A **figura 14** demonstra a cobertura radiométrica das bandas dos sensores LANDSAT 8 e a comparação com a cobertura da plataforma LANDSAT 7. O **quadro 6** descreve as características de resolução radiométrica do LANDSAT 8 (USGS, 2018).

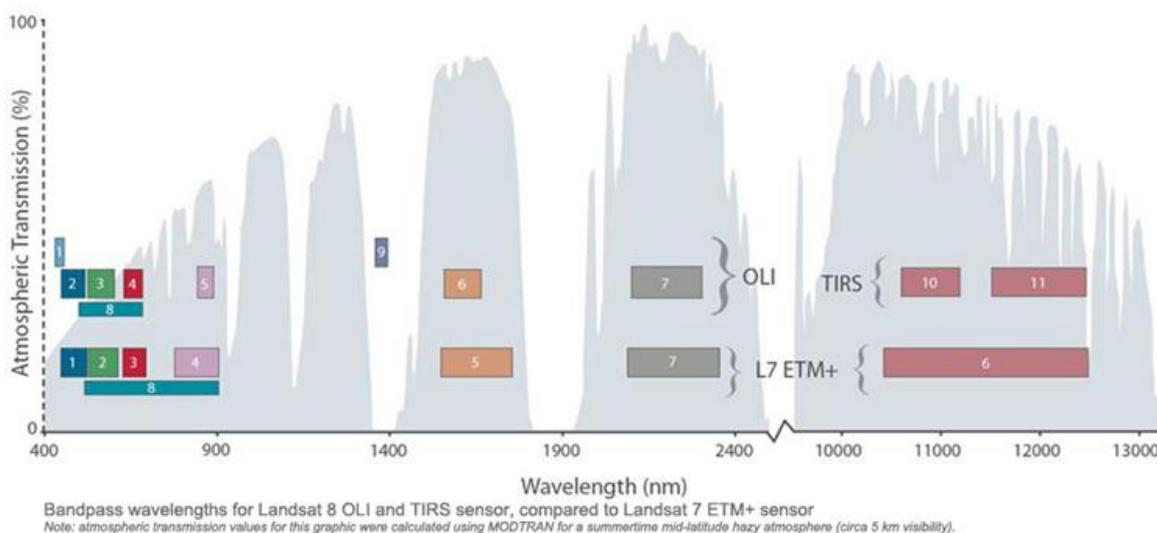


Figura 14 - Comparação das bandas espectrais dos sensores do LANDSAT 7 e 8 (USGS, 2018).

Bandas do Landsat 8	Comprimento de onda (μ)	Resolução (m)
Banda 1 – <i>Coastal aerosol</i>	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Vermelho	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Infravermelho próximo	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – Infravermelho médio	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – Infravermelho médio	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – <i>Cirrus</i>	1.36 – 1.38	30
Banda 10 – Infravermelho Termal	10.60 – 11.19	100
Banda 11 – Infravermelho termal	11.50 – 12.51	100

Quadro 6 - Resolução espectral das bandas de imageamento do satélite LANDSAT 8 (USGS,2018).

3.2.2.3 Dados do programa Google Earth PRO

O Google Earth é um software que combina imagens de satélite com características do terreno para fornecer uma renderização digital em três dimensões da superfície do planeta em uma interface considerada de fácil manipulação para o usuário final e vasto potencial de aplicação tanto para o mundo corporativo como para fins acadêmicos (LIMA, 2012).

O Google Earth utiliza uma compilação de imagens obtidas por diversos satélites nas mais diversas resoluções. Os dados são tratados e distribuídos pela plataforma eletrônica. Atualmente a versão PRO, que anteriormente era paga, se tornou gratuita para computadores. A versão PRO apresenta diversas funcionalidades úteis, como por exemplo, exportação dos dados de imagens pancromáticas dos mosaicos em alta resolução, ferramentas de mapeamento, exportação de dados vetoriais, geração de perfis de elevação, etc. (GOOGLE, 2018a).

A empresa Google tem aprimorado os dados disponibilizados no programa Google Earth PRO. Em 2016, foram incorporadas imagens de resolução superior obtidas do satélite LANDSAT 8 sensor OLI. A empresa também fornece imagens em altíssima resolução para algumas áreas fornecidas pelo acervo DigitalGlobe. Produtos da imageamento ótico aerofotogramétrico também são incorporados para o Google Earth em algumas cidades. O software dispõe de imagens de diversos sensores: LANDSAT, SENTINEL, IKONOS, QUICKBIRD, WORLDVIEW, GEOEYE, etc. Para os dados de elevação digital são utilizados produtos SRTM. Complexos processamentos digitais são aplicados ao mosaico do Google

Earth variando de acordo com o sensor e região, angariando maior precisão para as informações distribuídas (GOOGLE, 2018a).

Dentre os estudos possibilitados pelo Google Earth PRO, pode ser destacado o desenvolvido por Stumm *et al.* (2015), sobre o monitoramento de geleiras de rocha a partir da utilização da ferramenta de programação GNU R¹⁹ combinada com dados de imagens disponibilizados pelo Google Earth. A metodologia foi aplicada para o monitoramento de geleiras na região do Hindu Kush Himalayan (HKH), a partir da classificação visual de imagens de satélite compiladas pelo Google Earth nas amostras randômicas produzidas pelo GNU R. A partir dos processos de identificação visual aplicados manualmente para as geleiras de rocha foram produzidos dados vetoriais no formato .KML do Google Earth (STUMM *et al.* 2015).

3.2.3 Dados pré-existentes

Para auxiliar na interpretação de resultados e nas tarefas de mapeamento de feições geomorfológicas foram utilizados os dados do Inventário Nacional de Geleiras do Chile publicado pela *Direccion General de Aguas* (DGA/CHILE, 2008).

Não foram localizadas informações sobre as geleiras principais da área de estudo no inventário glacial do GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*). Deste modo, o inventário da DGA/CHILE foi utilizado.

3.3 Métodos

Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas fundamentais: (i) análise de dados pré-existentes; (ii) obtenção e tratamento de dados orbitais; (iii) elaboração de mapa temático de interpretação de feições geomorfológicas e intervenções antrópicas na área de estudo (iv) análise dos resultados obtidos. A **figura 15** demonstra a estrutura metodológica da pesquisa.

¹⁹ Conforme Stumm *et al.* (2015), GNU R ou simplesmente R é uma linguagem de *script* utilizada para manipulação e análise estatística de dados que possibilita criar distribuições randômicas amostrais. Esta ferramenta se mostrou como uma funcionalidade estratégica para mapeamentos de grande escala de paisagens glaciais.

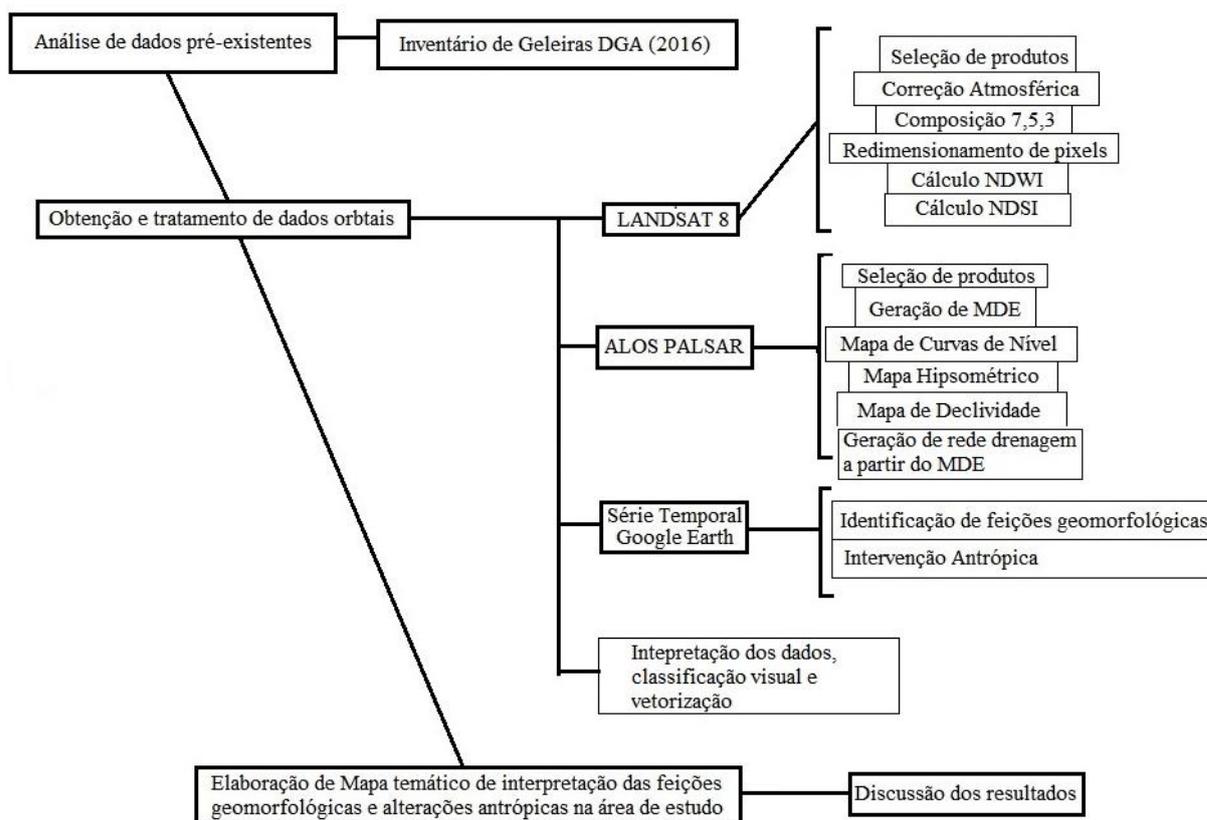


Figura 15 - Estrutura metodológica do trabalho.

3.3.1. Análise de dados pré-existentes

3.3.1.1 *Dados do Inventário Nacional de Geleiras do Chile*

A *Dirección General de Aguas* do Chile iniciou no ano de 2008 a produção de um inventário de geleiras em todo o território chileno. O inventário está disponível em texto no site da Biblioteca da DGA/CHILE e em informação geoespacial disponibilizada na plataforma *web* do *software ArcMap Online*. O site disponibiliza a localização geoespacial das geleiras inventariadas, bem como a área em quilômetros quadrados e forma de identificação

Na área de estudo, o inventário disponibiliza dados de geleiras localizadas a partir de fontes *Aster* e *Google Earth*. No site do inventário, é possível verificar quais geleiras foram nomeadas e o tipo de classificação conforme critérios do próprio inventário. Na área de estudo, o inventário identificou três tipos de geleira: *glaciarete*, *glaciar rocoso* e *glaciar de montaña*.

Os dados do inventário foram utilizados para identificar as geleiras da área de estudo (nomenclatura e localização) e como auxiliar na classificação por tipo de geleira. Na maioria dos casos as classificações foram coincidentes.

3.3.2 Obtenção e tratamento de dados orbitais

3.3.2.1 Geração de modelo digital de elevação e mapas

Para geração do modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo, foi utilizada uma cena obtida pelo sensor PALSAR da plataforma ALOS na banda L no modo single (FBS – *Fine Beam Single*), polaridade *HH*, resolução de 10 metros, faixa de imageamento de 70 quilômetros e ângulo 34,3 *off-nadir* de 13 de fevereiro de 2011. Dentre as opções encontradas no banco de dados, se tratava aquisição da cena adquirida em período de menor precipitação na área de estudo em relação as demais disponibilizadas.

A cena foi baixada diretamente do servidor da ASF (*Alaska Satellite Facility*) no formato GeoTiff, nível *High Resolution - Radiometrically Terrain-Corrected RTC*²⁰. Este nível de correção é o mais alto para o dado obtido. Conforme a ASF (2018), o dado obtido FBS (10 metros de resolução de *pixel*) quando corrigido no pela agência para a distribuição é redimensionado para 12,5 metros – mantendo a riqueza de detalhes na área de imageamento e na produção do MDE. Os dados fornecidos pela ASF estão projetados para o geóide WGS 84, sendo reprojetoado para o fuso 19 S para este trabalho. A **figura 16** demonstra o recorte da cena para a área de estudo.

²⁰ HR – RTC ALOS PALSAR: Alta resolução, correção radiométrica e de terreno – *vide* item 3.2.2.1 desta dissertação.

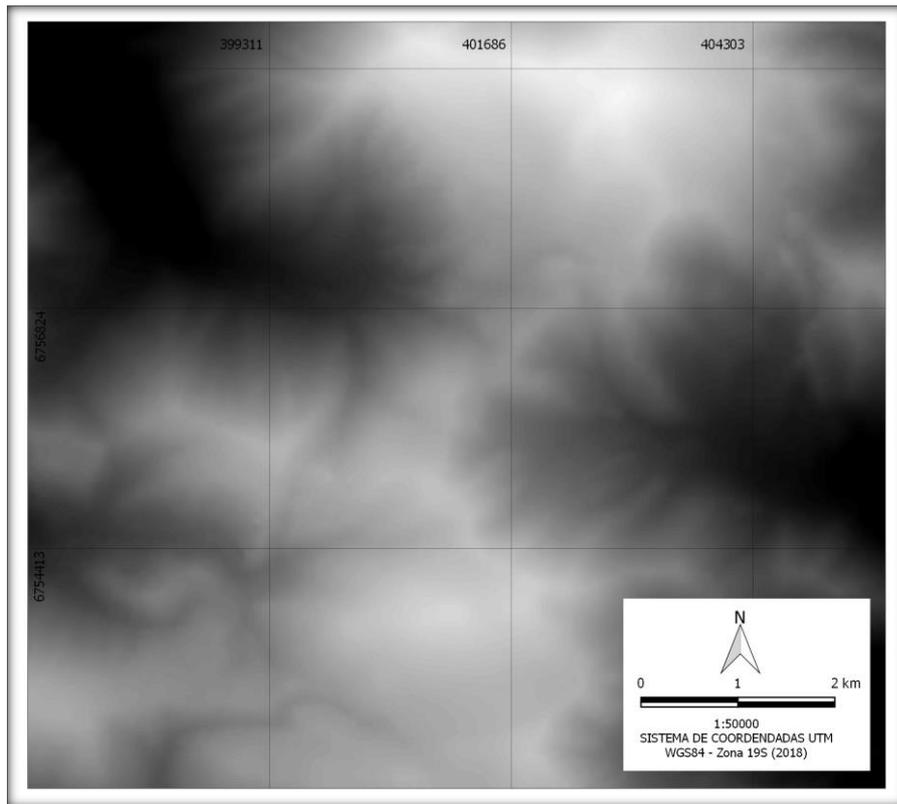


Figura 16 - Área de estudo recortada da cena ALOS/PALSAR

Dada a ausência de dados cartográficos e topográficos confiáveis, bem como de levantamento de campo (GPS), não foi possível realizar a conferência dos procedimentos de correção de terreno para a área de estudo recortada da cena de imageamento. Todavia, as formas de relevo se mostraram coerentes com os outros produtos utilizados.

Quanto aos dados radiométricos, não foram localizadas ausência de dados, *pixels* de valor negativo ou anômalos no recorte da área de estudo. Deste modo, não houve a necessidade de reclassificação dos *pixels*. O exibição dos dados do MDE no QGIS foi redimensionada para visualização em valores de mínimo e máximo de precisão real (i.e. sem estimativas de cortes de contagem cumulativa na exibição dos dados radiométricos).

Devido às características morfológicas do terreno, uma grande área de sombra resultante do direcionamento das micro-ondas do sensor PALSAR se formou no setor leste da área de estudo, dificultando a interpretação. A comparação com os dados disponibilizados no Google Earth auxiliou a interpretação geomorfológica nesses casos.

A partir do MDE foram produzidos os mapas de curvas de nível, hipsometria e declividade em escala 1:50.000. Ainda foi produzida uma máscara de sombreamento para melhor delineamento da morfologia do terreno, bem como, realizado o cálculo de simulação acumulada de fluxos de drenagem glacial – para auxiliar na interpretação visual de canais glaciofluviais.

O sombreamento foi gerado a partir da cena ALOS PALSAR recortada dimensionando um exagero de fator $Z=2$ através das ferramentas SAGA integradas ao QGIS. A escala de razão entre unidades verticais e horizontais foi igual a 1. Outros fatores determinados foi o azimute de insolação igual a 315 e a altitude de insolação igual a 45 unidades. A partir da geração da máscara de sombreamento foi aplicada uma transparência igual a 50%. A **figura 17** demonstra o resultado da geração da máscara de sombreamento.

A metodologia aplicada na simulação acumulada de fluxos de drenagem foi similar a utilizada por Andrada e Freitas (2015), com algumas adaptações. Para a realização desta etapa foi utilizada a ferramenta *rflow* do SAGA/QGIS sendo aplicadas as configurações padrões de sistema. O resultado da operação foi um dado *raster* de acumulação de fluxos a partir dos dados do MDE, do qual foram extraídos os valores superiores a zero para utilização da camada associada aos dados hipsométricos – auxiliando na interpretação de canais glaciofluviais vetorizada manualmente a partir dos produtos dos sensores óticos. A **figura 18** demonstra o resultado da operação.

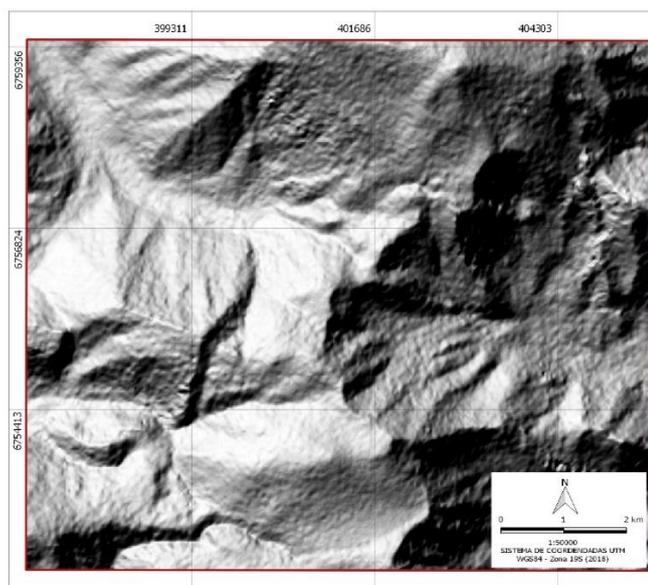


Figura 17 - Máscara de sombreamento desenvolvida no QGIS a partir do recorte da cena ALOS/PALSAR

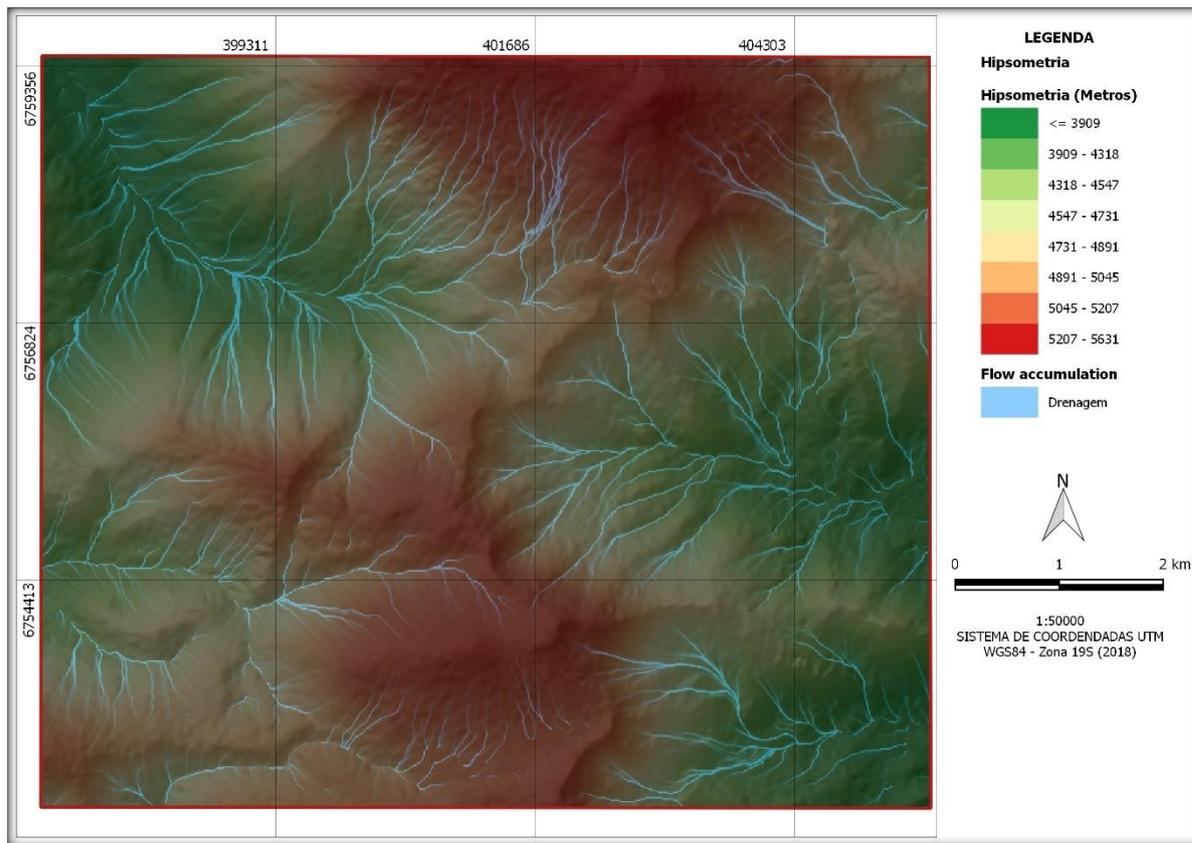


Figura 18 - Composição da drenagem simulada a partir do MDE/ALOS PALSAR comparada aos dados hipsométricos

O mapa de curvas de nível foi gerado em escala 1:50.000. O dado vetorial foi extraído a partir do MDE ALOS/PALSAR. O algoritmo utilizado foi o de extração de contornos vetoriais no SAGA/QGIS, sendo pré-determinada a extração de linhas equidistantes de intervalos de 50 metros. As camadas base utilizadas na representação foram a de hipsometria, sendo utilizadas 5 classes de cores por interpolação linear e representação contínua de tons de vermelho escuro para menores valores e clareamento até o branco nos valores maiores) e a máscara de sombreamento.

O mapa hipsométrico foi gerado a partir dos níveis digitais do MDE/ALOS PALSAR em escala 1:50000. Foram definidas 8 classes de cores por interpolação linear e representação contínua, de valor mínimo 3909 e máximo 5631. Foi utilizada uma palheta de cores que varia do verde escuro para valores mínimos, amarelo em valores médios e vermelho para os valores maiores. Para melhor representação das formas foi aplicada a máscara de sombreamento.

O mapa de declividade foi gerado a partir da ferramenta de cálculos de declividade do SAGA/QGIS utilizando os dados do MDE ALOS/PALSAR. Os critérios utilizados no cálculo foram o de geração de dados em percentual e a razão entre unidades verticais e horizontais foi igual a 1. Foram utilizadas 5 classes de intervalos iguais discretos representados de forma contínua variando entre tons de verde escuro (valores mínimos), amarelo (valores médios) e vermelho escuro (valores máximos). Essa representação facilitou a interpretação dos dados de declividade. O intervalo representado foi de valores menores a 8,9% até 89,9%. Foi aplicada a máscara de sombreamento, porém, com opacidade reduzida em relação aos mapas hipsométrico e de curvas de nível.

3.3.2.2 Dados gerados a partir de produtos do Landsat 8

Para auxiliar na interpretação das feições da área de estudo foram utilizados produtos obtidos do satélite LANDSAT 8. Foram geradas composições RGB e baseadas nos cálculos dos índices NDSI (Índice de Neve por Diferença Normalizada) e NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada).

Foi utilizada uma cena LANDSAT 8 nível L1T da coleção L1TP obtida do site da USGS *Earthdata* (earthexplorer.usgs.gov). Este nível de dado é fornecido para pronta utilização do usuário final, sendo resultante de processos de calibração radiométrica e ortorretificação a partir de modelos digitais de elevação, corrigindo as distorções de relevo inerentes ao processo de imageamento. O banco de dados *Earthdata* disponibiliza os metadados das operações de correção aplicadas à cena e de dados de aquisição em um arquivo em formato MTL. A data de aquisição da imagem utilizada foi 15/04/2014, sendo selecionada de acordo com o período ainda seco na área de estudo. Foi obtida uma cena com 0% de cobertura de nuvens em todos os quadrantes para facilitar a diferenciação entre áreas de cobertura de neve e nuvens.

Foi efetuada a correção atmosférica das bandas na cena LANDSAT 8 a partir do método DOS-1 (*Dark Object Subtraction*) proposto por Chávez (1989, *apud* SANCHEZ, *et al.* 2011). Conforme Sanchez *et al.* (2011), o DOS-1 é um método de correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência é estimada diretamente a partir dos números digitais da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. O procedimento foi executado pela

ferramenta SCP *Semi-Automatic Classification Plugin* do QGIS, a qual possibilita a utilização do DOS-1 especificamente alinhado aos metadados do LANDSAT 8.

A partir da correção atmosférica foi gerada uma composição RGB (753) utilizando as bandas espectrais do sensor OLI (*Operacional Land Imager*) do LANDSAT 8. Para ampliar a resolução espacial do dado, angariando um melhor nível de detalhe, foi realizada a fusão da composição RGB (753) com a banda 8 – pancromática (PAN) de resolução espacial de 15 metros. O **quadro 7** demonstra as características das bandas utilizadas.

Cena de trabalho LANDSAT 8 (15/04/2014)		
Banda espectral	Resolução Espacial	Canal da composição
Banda 3 – Verde 0.53 – 0.59 μ m	30 metros	B
Banda 5 – Infravermelho próximo 0.85 – 0.88 μ m		G
Banda 7 – Infravermelho médio 2.11 – 2.29 μ m		R
Banda 8 – Pancromática 0.50 – 0.68 μ m	15 metros	Fusão de imagens

Quadro 7 - Bandas LANDSAT 8 utilizadas na pesquisa.

O procedimento de fusão das imagens ocorreu em duas etapas executadas a partir do aplicativo *Orfeu ToolBox* no QGIS (OTB Team, 2018a; 2018b): (i) redimensionamento dos *pixels* da imagem resultante da composição RGB (753) para a extensão e resolução da banda PAN através da função *Superimpose Sensor*; (ii) mesclagem das cenas multiespectral com a pancromática por meio da função *pansharpening RCS*. A **figura 19** demonstra o resultado do processamento e composição.

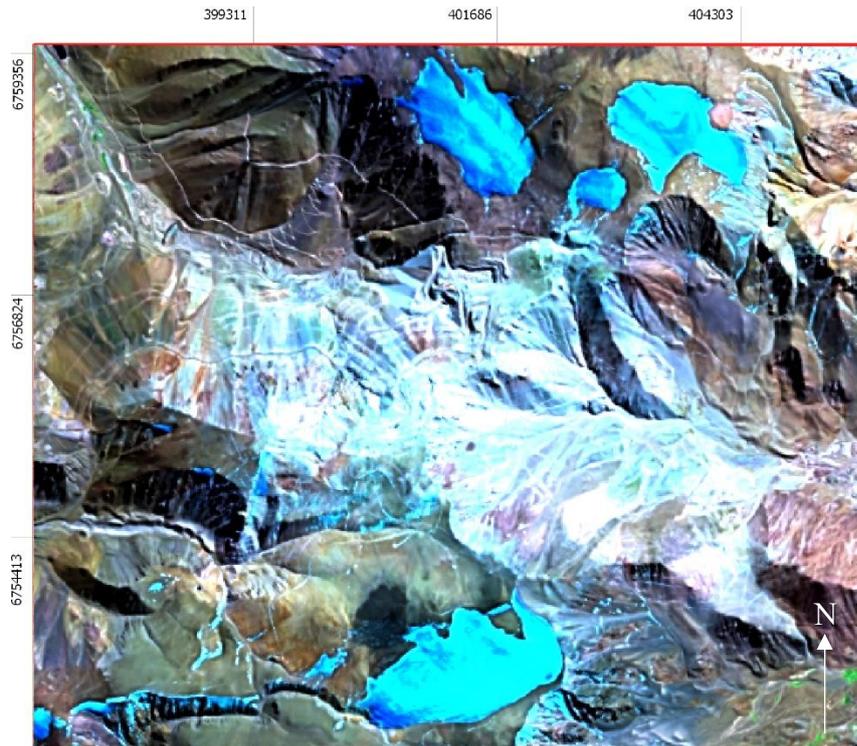


Figura 19 - Composição RGB (753) realizada com as cenas LANDSAT 8 após processo de fusão

Para obter melhor determinação da área de cobertura de neve foi utilizado o NDSI (Índice de Neve por Diferença Normalizada). Conforme Dozier (1989), o NDSI gera o realce da cobertura glacial, diferenciando-a dos demais alvos a partir da definição de um limiar. O NDSI foi gerado a partir da operação aritmética das bandas do LANDSAT 8 (*Raster Calculator for QGIS*) conforme equação 1:

$$NDSI = \frac{B3(VERDE) - B6(SWIR)}{B3(VERDE) + B6(SWIR)} \quad (1)$$

A partir do resultado da operação foi definido um limiar médio de acordo com os resultados gerados. A **figura 20** mostra a representação do resultado da operação.

Baseando-se na metodologia de Raj, Kumar e Remya (2013) para a identificação de ambientes glacio-lacustres, foi calculado o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada). Conforme McFetters (1996), o NDWI permite evidenciar a presença de corpos de água a partir da definição de um limiar. O NDWI foi gerado a partir da operação aritmética das bandas do LANDSAT 8 (*Raster Calculator for QGIS*) conforme equação 2:

$$NDWI = \frac{B3(VERDE) - B5(NIR)}{B3(VERDE) + B5(NIR)} \quad (2)$$

A partir do resultado da operação foi definido um limiar médio de acordo com os resultados gerados. A **figura 21** mostra a representação do resultado da operação.

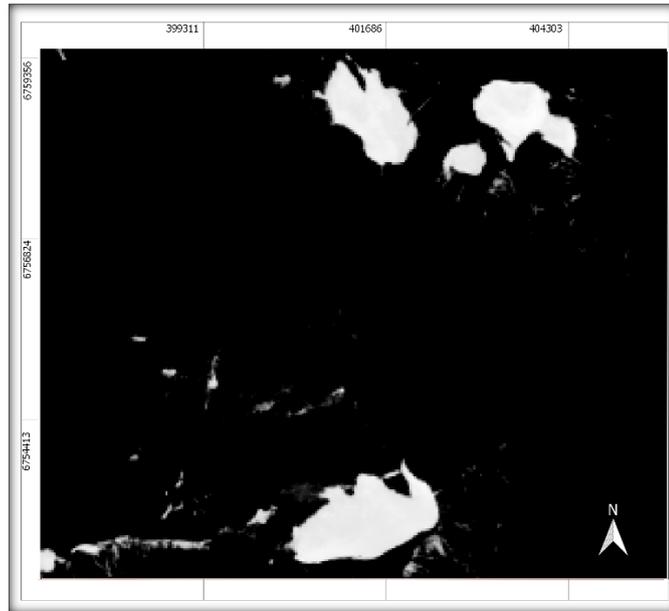


Figura 20 - Imagem digital resultante do cálculo NDSI aplicada a máscara de limiar

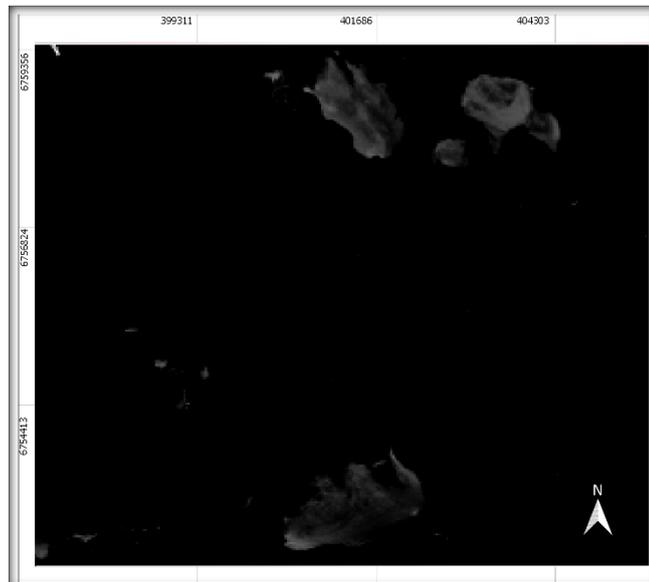


Figura 21 - Imagem digital resultante do cálculo NDWI aplicada a máscara de limiar

3.3.2.3 Série temporal do programa Google Earth PRO

Uma série temporal de mosaicos de imagens pancromáticas disponibilizado pelo programa *Google Earth PRO* gratuitamente foi utilizada para auxiliar na identificação de feições que não se mostraram claras após as etapas de processamento dos produtos LANDSAT 8. Algumas distorções radiométricas nos produtos finais foram provocadas pelo relevo acidentado da área de estudo. Grande parte estava relacionada a significativa quantidade de áreas de sombra projetadas pelas montanhas. Outro problema identificado, foi o efeito do retroespalhamento provocado pela resposta espectral dos alvos neve e solo exposto.

Considerando o objetivo de identificar com precisão as áreas de impacto da atividade mineradora no ambiente proglacial e periglacial da área de estudo, foi necessária a utilização de produtos com resolução espacial superior a do LANDSAT 8. A série temporal utilizada a partir do *Google Earth PRO* utiliza dados de diversos sensores de resolução espacial apropriada para a identificação desses alvos (GEOEYE, IKONOS, QUICKBIRD, SPOT, WORLDVIEW).

O **quadro 8** representa os metadados dos mosaicos utilizados através do *Google Earth PRO*. Embora a resolução temporal dos dados disponíveis seja pouco abrangente para trabalhos de geomorfologia, esta se mostrou suficiente para a estimar as alterações ambientais relacionada a exploração mineira. Os dados estão coerentes com a cronologia das atividades do projeto Pascua Lama.

Série temporal do Google Earth PRO e metadados			
Data de aquisição	Sensor	Resolução Espacial Máxima da cena	Fonte do metadado
25/03/2005	QUICKBIRD	0,63 metros	Digital Globe
02/12/2008	SPOT 5	2,5 metros	Google Earth/CNES
28/05/2012	WORLDVIEW2	0,52 metros	Digital Globe
14/12/2014	GEOEYE	0,53 metros	Digital Globe

Quadro 8 - Metadados da série temporal utilizada por meio da plataforma Google Earth PRO (DIGITAL GLOBE, 2018).

A interpretação de feições naturais foram realizadas utilizando a alta resolução dos dados e comparando com os produtos LANDSAT 8. Deste modo, foi possível identificar características do relevo que não puderam ser classificadas apenas com os produtos LANDSAT 8. As imagens de alta resolução permitiram realizar as tarefas de mapeamento: (i) identificação

de depósitos de *till*, morânicos e aluviais; (ii) classificação de morainas; (iii) diferenciação entre estruturas naturais e não naturais; (iv) reconhecimento de áreas de cobertura de gelo e características espaciais; (v) detecção de ambiente glacio-lacustre e; (vi) caracterização de processos erosivos e deposicionais. O reconhecimento de geleiras de rocha se baseou na metodologia proposta por Stumm *et al.* (2015), a qual compila um acervo de imagens de alta resolução que possibilita o reconhecimento de estruturas características desses corpos de gelo, bem como sua configuração espacial, a partir da interpretação visual de mosaicos do Google Earth. Os critérios de identificação das feições geomorfológicas estão detalhados no **quadro 9**.

O método de identificação de intervenções antrópicas relacionadas à mineração se baseou nos trabalhos de Palacios-Berrios (2006) e demais autores citados no item 2.8 deste trabalho. O recurso de série temporal do Google Earth foi acionado para exibir os mosaicos e simular uma evolução temporal. A partir das mudanças de caráter não natural identificadas nas imagens, foi possível correlacionar as transformações na paisagem com as estruturas utilizadas em operações de mineração a céu aberto. Deste modo, foram identificados os poços das minas, áreas de rejeitos e outras instalações (estações de tratamento e enriquecimento, barragem, etc).

3.3.3 Elaboração de mapas temáticos

3.3.3.1 Mapa temático de interpretação de feições geomorfológicas

O mapa temático de interpretação de feições geomorfológicas foi elaborado a partir da combinação dos resultados das análises dos dados gerados a partir dos produtos ALOS/PALSAR, LANDSAT 8 e Google Earth PRO. A representação cartográfica desses dados teve como objetivo o reconhecimento dos ambientes glacial e proglacial para compará-los com o mapeamento de intervenção antrópica, podendo assim obter uma dimensão qualitativa do impacto ambiental gerado pela atividade de mineração na área de estudo.

A metodologia de identificação de feições geomorfológicas no mapa está detalhada no **quadro 9**. Os *substets* utilizados no mapeamento foram baseados na sistemática utilizada por Christopherson (2012); Assine, Vessely (2008):

- a) Glacial: engloba as formas glaciais propriamente ditas;

- b) Formas erosivas: se refere as formas de relevo produzidas pela ação de processos erosivos glaciais alpinos;
- c) Formas deposicionais: enumera formas resultantes de processos deposicionais produzidos pelas ação glacial alpina;
- d) Pós-glacial: referente a formações posteriores ao período de glaciação (i. e. clima mais quente ou temperado), resultante de ciclos de congelamento-descongelamento;
- e) Proglacial: Formações em áreas que englobam tanto a zona de contato com a margem da geleira (*ice-contact zone*) quanto áreas adjacentes que estejam influenciadas pela ação direta do gelo ou da água de degelo;
- f) Formação antrópica: Formas interpretadas como não naturais e relativas ao processo de mineração²¹.

Foi utilizado como plano de fundo às áreas mapeadas a classificação hipsométrica produzida utilizando o MDE/ALOS PALSAR, de forma a possibilitar a associação dos processos genéticos com a morfologia do terreno.

A representação foi realizada em escala 1:50000. Deste modo, as formas de relevo identificadas podem ser relacionadas com as formações erosivas de meso-escala classificadas por Glasser e Bennett (2004)²².

Glacial: Geleira de Anfiteatro	
Processo Genético	Geleira controlada pela topografia sub-glacial e clima. Ocupa uma reentrância, arredondada e individualizada, em um lado de uma montanha, escavando-a profundamente (CHRISTOPHERSON, 2012; SIMÕES, 2004).
Característica granulométrica e morfoscópica superficial	Neve, gelo e <i>firn</i> .
Critério de identificação.	Forma arredondada individualizada de geleira. Determinação a partir da análise das respostas espectrais dos mosaicos Landsat 8, Série temporal Google Earth e dados do inventário de geleiras da DGA/Chile. Também foram considerados o MDE gerado, dados hipsométricos, curvas de nível e representação de declividade obtidos através de dados de radar ALOS/PALSAR.
Relevância	Importante. Representam 4 das 26 geleiras localizadas na área de estudo e somam a maior área em quilômetros quadrados de cobertura de gelo.

²¹ Sendo nesse caso registrado apenas o depósito de rejeitos de mina, tendo em vista que havia necessidade de diferenciar esse tipo de depósito dos depósitos naturais identificados.

²² Vide tópico 2.5.4.4 deste trabalho.

Simbologia de representação	Polígono. Cor branca. Contorno pontilhado.
Glacial: Geleira de Rocha	
Processo Genético	As geleiras de rocha são caracterizadas como a expressão geomorfológica de corpos rastejantes de base de gelo em áreas de <i>permafrost</i> de montanhas, atribuídas às condições periglaciais. As geleiras de rocha podem ocorrer em vertentes, anfiteatros ou vales (SIMÕES, 2004). De acordo com Stumm <i>et al.</i> (2015), o termo geleira de rocha é utilizado para descrever massas rastejantes de material sedimentar rico em gelo – ou seja, material de <i>permafrost</i> – nas encostas das montanhas.
Característica granulométrica e morfoscópica superficial	Gelo, <i>firm</i> , <i>till</i> .
Critério de identificação.	Formas que se apresentam línguas de detritos angulares, cujo deslizamento é consequência da deformação do gelo intersticial e dos sedimentos congelados (FERRANDO, 2003). As geleiras de rochas têm estruturas de fluxo longitudinal ou transversal (cristas e sulcos) e uma aparência frontal bastante característica; bem como uma textura de superfície diferenciada das encostas adjacentes (STUMM <i>et al.</i> 2015). Determinação a partir da análise das formas demonstradas a partir de imagens de alta resolução da série temporal Google Earth e dados do inventário de geleiras da DGA/Chile. Também foram considerados o MDE gerado, dados hipsométricos, curvas de nível e representação de declividade obtidos através de dados de radar ALOS/PALSAR.
Relevância	Importante.
Simbologia de representação	Polígono. Cor azul-escuro. Contorno pontilhado.
Glacial: Glaciaretos ou Geleiras de Nicho	
Processo Genético	Formação nos vales entalhados, fendas e cristas. São geleiras de pequenas dimensões que ocupam um recesso estreito e irregular na vertente da montanha (SIMÕES, 2004).
Característica granulométrica e morfoscópica superficial	Neve, gelo e <i>firm</i> .
Critério de identificação.	Geleiras de formato entalhado em áreas de vertentes de montanhas de pequenas dimensões (SIMÕES, 2004). Forma arredondada individualizada de geleira. Determinação a partir da análise das respostas espectrais dos mosaicos Landsat 8, Série temporal Google Earth e dados do inventário de geleiras da DGA/Chile. Também foram considerados o MDE gerado, dados hipsométricos, curvas de nível e representação de declividade obtidos através de dados de radar ALOS/PALSAR.
Relevância	Importante. Representam 20 das 26 geleiras identificadas.
Simbologia de representação	Polígono. Cor ciano. Contorno pontilhado.
Formas erosivas de glaciação alpina: Arêtes e serrilhas	
Processo Genético	Conforme Christopherson (2012), quando as paredes do “circo” são erodidas, cristas afiadas são formadas, dividindo bacias de circos adjacentes. Essas arestas também são chamadas de arête . As arestas tornam-se serrilhas (as cristas serrilhadas das montanhas glaciadas).
Característica morfoscópica superficial	Escarpas, cristas.

Critério de identificação.	Cristas identificadas a partir da análise das o MDE gerado, dados hipsométricos, curvas de nível e representação de declividade obtidos através de dados de radar ALOS/PALSAR. Análise complementar a partir da série temporal Google Earth.
Relevância	Importante. Presença significativa resultante de processos erosivos em circos e vales.
Simbologia de representação	Linhas de símbolos triangulares. Cor vermelha.
Formas erosivas de glaciação alpina: Esporões/Horns	
Processo Genético	Um esporão é o resultado quando várias geleiras de anfiteatro escavam um cume individual de montanha por todos os lados (CHRISTOPHERSON, 2012).
Característica morfoscóptica superficial	Forma de cume
Critério de identificação.	Cumes identificados a partir da análise do MDE gerado e representação de declividade obtidos através de dados de radar ALOS/PALSAR.
Relevância	Algumas ocorrências devido aos processos erosivos em circos.
Simbologia de representação	Pontos. Cor verde.
Formas erosivas de glaciação alpina: Formações de Rochas Moutonnée	
Processo Genético	Colinas alongadas assimétricas de substrato rochoso exposto. Um dos lados é levemente inclinado a montante, tendo em vista o alisamento pela ação glacial; o outro (a jusante), é abrupto e íngreme, por ter pedaços de rocha arrancados pela geleira (CHRISTOPHERSON, 2012). São formações rochosas decorrentes da passagem de uma geleira (BENN; EVANS, 2010).
Característica morfoscóptica superficial	Conforme Prest (1983), uma "superfície moutonnées de rôches" é uma superfície de base contínua que tem uma semelhança com as "linhas onduladas de cachos vistos em perucas", se diferenciando por esta disposição morfológica das formações <i>stoss</i> e <i>lee</i> .
Critério de identificação.	Formas localizadas possuem dimensões de aproximadamente 200 metros. Determinadas a partir da análise da série temporal Google Earth de alta resolução.
Relevância	Algumas ocorrências isoladas.
Simbologia de representação	Polígonos com preenchimento. Cor laranja escuro.
Formas deposicionais de glaciação alpina: Morainas	
Processo Genético	A deposição de sedimentos glaciais produz uma forma de terreno específica chamada de moraina. Morainas laterais se formam ao longo de cada lado de uma geleira. Com a união de duas geleiras com morainas laterais pode se formar uma moraina medial ou central. Detritos soltos na extensão máxima da geleira são chamados de moraina terminal. No caso de morainas formadas em pontos em que uma geleira estabeleceu um novo equilíbrio entre crescimento e ablação, estas são chamadas de morainas frontais. Morainas recessionais são formadas em depósitos originados de retração da geleira (CHRISTOPHERSON, 2012).
Característica granulométrica, morfoscóptica superficial e sedimentar	Depósitos de detritos, <i>till</i> .
Critério de identificação.	Foram consideradas morainas de avanço (frontais) e de recessão, as oriundas de processos ativos de glaciação. Morainas terminais foram chamadas as inativas em áreas terminais de ocorrência de processos glaciais pretéritos. Algumas dimensões contínuas de 50 a 200 metros; descontínuas até aproximadamente 600 metros. Determinadas a partir da análise da série temporal Google Earth de alta resolução.

Relevância	Algumas ocorrências. Dificil determinação em virtude de atividades antrópicas.
Simbologia de representação	Linhas com transecções verticais. Cores preta, laranja e azul.
Formas deposicionais de glaciação alpina: Depósitos de <i>till</i>, morânicos ou <i>drifts</i>	
Processo Genético	Termo geral para todos os depósitos glaciais não selecionados como selecionados. Os sedimentos depositados pela água de degelo glacial selecionados são chamados de drift estratificado e os não selecionados e não estratificados são chamados de till (CHRISTOPHERSON, 2012).
Característica granulométrica, morfoscópica superficial e sedimentar	Depósitos de detritos, <i>till</i> .
Critério de identificação.	Depósitos de sedimentos de origem glacial em geral em forma de leques aluviais depositados em encostas rochosas, vales e circos. Áreas de grandes dimensões. Dificil determinação em virtude da intensa ação antrópica. Determinadas a partir da análise da série temporal Google Earth de alta resolução.
Relevância	Importante.
Simbologia de representação	Polígonos com preenchimento. Cor marrom escuro.
Formas de relevo erosivas pós-glacial: Tarns	
Processo Genético	Nos circos onde as geleiras de vale se originaram, formam-se pequenos lagos de montanha chamados de tarns (CHRISTOPHERSON, 2012).
Característica morfoscópica	Lago proveniente de degelo entalhado em circos formado por ação sub-glacial.
Critério de identificação.	Foi localizado um único provável tarn de aproximadamente 50 metros de diâmetro no vale de um circo. Determinado a partir de uma imagem de 2005 presente na série temporal Google Earth de alta resolução. A forma também ficou evidenciada na cena resultante do cálculo do NDWI.
Relevância	Única ocorrência. Embora não haja área de mineração no entorno, não pode ser descartada a possibilidade de ser uma forma não natural.
Simbologia de representação	Polígono. Cor roxo.
Formas de ambiente pró-glacial: Depósitos aluviais	
Processo Genético	Depósitos sedimentares de origem aluvial de fundo de vale, depositados pela ação direta do gelo e da água de degelo transportados pela ação glaciofluvial (ASSINE; VESSELY, 2008).
Característica granulométrica, morfoscópica superficial e sedimentar	Sedimentos de melhor seleção transportados pela ação glaciofluvial.
Critério de identificação.	Identificados a partir da análise da série temporal Google Earth de alta resolução.
Relevância	Importante.
Simbologia de representação	Polígono com preenchimento. Cor amarela.
Formas de ambiente pró-glacial: Canais glaciofluviais	
Processo Genético	Canais de fluxo glacial e de água de degelo em depósitos sedimentares e entalhes nas vertentes, vales e circos (CHRISTOPHERSON, 2012).

Característica morfoscóptica	Canais fluviais
Critério de identificação.	Identificados a partir da análise da série temporal Google Earth de alta resolução. Considerado o MDE produzido a partir da cena do ALOS/PALSAR. Na área de fundo de vale e jusante de algumas vertentes, associado aos depósitos aluviais e <i>drifts</i> , formam canais entrelaçados. Os dados produzidos a partir geração simulada da rede de drenagem de fluxo acumulado auxiliaram no processo de reconhecimento destas feições.
Relevância	Importante.
Simbologia de representação	Linhas e polígono. Cor azul médio.

Quadro 9 - Critérios de identificação das feições geomorfológicas no mapeamento

3.3.3.2 Mapa de intervenções antrópicas na área de estudo

O mapa temático de interpretação de intervenções antrópicas na área de estudo foi elaborado a partir da combinação dos resultados das análises dos dados gerados a partir dos produtos ALOS/PALSAR, LANDSAT 8 e Google Earth PRO. A representação cartográfica desses dados teve como objetivo o reconhecimento do impacto da atividade mineira nos ambientes glaciais e proglaciais.

A vetorização das classes foi realizada utilizando como referência a imagem pancromática da banda 8 do LANDSAT 8. A imagem em tons de cinza facilitou a vetorização das estradas e demais alvos de interesse para avaliar o impacto ambiental. Determinados usos exigiram a utilização dos mosaicos do Google Earth PRO, tendo em vista o maior nível de detalhe.

Foram acrescentadas às representações das categorias mapeadas na área de estudo, informações sobre o ano de provável alteração, tendo em vista não terem sido detectadas em imagens de períodos anteriores utilizadas na série temporal. Deste modo, o ano que está plotado ao lado das categorias representa que a forma deve ter sido implantada posteriormente àquela data.

O mapa foi produzido em escala 1:50000, possibilitando a análise comparativa com o mapa de interpretação de feições geomorfológicas. Foi utilizado como plano de fundo às áreas mapeadas a classificação hipsométrica produzida utilizando o MDE/ALOS PALSAR, de forma a possibilitar a associação da localização das estruturas com a morfologia do terreno. O **quadro 10** demonstra os critérios utilizados.

Pontos de mineração	
Definição	Planta de mineração. Áreas em que estão instalados os poços de extração de material rochoso para ser processado. São áreas de escavação em degraus, construídas dessa forma para manter a estabilidade da vertente da área de prospecção, bem como facilitar o transporte e a operação.
Critério de identificação	Identificado pelo Google Earth nas imagens 28/05/2012 e 14/12/2014.
Relevância	Importante. As plantas de mineração estão localizadas em áreas de vertente e possuem uma área bastante significativa de escavação.
Simbologia de representação	Ponto na forma de hexágono, cor branca.
Estradas e caminhos	
Definição	Estradas e caminhos construídos sem pavimentação aparente. Provavelmente estão relacionados às atividades de mineração.
Critério de identificação	Identificado pela interpretação da banda pancromática do LANDSAT 8 (alta reflectância relacionada à acumulação de neve e presença de sedimentos) e Google Earth na imagem de 25/03/2005.
Relevância	Importante. Estão localizadas ao longo de toda área de estudo e representam significativas alterações das vertentes e áreas de depósitos naturais.
Simbologia de representação	Linha com contorno, cor branca.
Instalações	
Definição	Engloba todas as áreas construídas. Constituída de edificações, barragens, estações operacionais e tanques de água (provavelmente utilizados para enriquecimento dos minérios e armazenamento de água e produtos químicos).
Critério de identificação	Identificado pelo Google Earth nas imagens 28/05/2012 e 14/12/2014.
Relevância	Importante devido as suas dimensões e localização.
Simbologia de representação	Polígono com preenchimento, cor preta.
Depósitos de rejeitos	
Definição	Zonas de descarte de material rochoso não aproveitado no processo de mineração localizados nas adjacências dos pontos de mineração. Se diferenciam dos depósitos naturais apresentam-se de forma organizada e não natural.
Critério de identificação	Identificado pelo Google Earth na imagem de 14/12/2014. Há possibilidade desses depósitos serem mais antigos, mas só se tornam evidentes nessa cena.
Relevância	Importante devido ao impacto ambiental resultante da acumulação de rejeitos de rocha.
Simbologia de representação	Polígono com preenchimento, cor cinza.
Área de intervenção antrópica	
Definição	Foi vetorizado um polígono que engloba todas as estruturas de procedência não natural: estradas, edificações e pontos de mineração. Objetiva dimensionar a amplitude do impacto ambiental na área de estudo.
Critério de identificação	Identificado a partir da vetorização das estruturas de origem antrópica.
Relevância	Importante.
Simbologia de representação	Polígono com preenchimento e contorno, utilizada transparência da camada para contextualização.

Quadro 10 - Critérios na identificação de indícios da intervenção antrópica na área de estudo

4. Resultados e Discussões

4.1 Mapas temáticos

Por meio da geração de Modelo Digital de Elevação (MDE), foi possível produzir três mapas de mesoescala (1:50.000) representando a área de estudo: **(i) mapa hipsométrico**, **(ii) mapa de curvas de nível** e **(iii) mapa de declividade**.

O mapa hipsométrico (**figura 22**) fundamentou a compreensão das características morfológicas do relevo, permitindo a identificação de feições oriundas principalmente de processos de erosão glacial. A máscara de sombreamento teve um importante papel no auxílio do reconhecimento das formas e processos evidenciados pelo MDE.

O mapa de curvas de nível (**figura 23**) e o de declividade (**figura 24**) permitem, juntamente com o mapa hipsométrico, inferir a configuração das formas de relevo encontradas na área de estudo. Tendo se mostrado de grande utilidade na interpretação, associados a outros dados.

A combinação dos produtos do MDE e da interpretação dos dados LANDSAT 8 e Google Earth PRO, permitiram a confecção de dois mapas temáticos: **(i) Mapa de interpretação de feições geomorfológicas da área de estudo** e **(ii) Mapa de intervenções antrópicas na área de estudo**.

O mapa de interpretação de feições geomorfológicas (**figura 25**), é resultado a aplicação das metodologias de interpretação descritas no item 3.3.3.1 desta dissertação. A escala utilizada foi de 1:50.000 e se mostrou satisfatória para a abrangência delimitada no polígono da área de estudo.

O mapa de intervenções antrópicas na área de estudo (**figura 26**), é resultante da aplicação das metodologias de interpretação discutidas no item 3.3.3.2 desta dissertação. A escala utilizada na elaboração foi 1:50.000, possibilitando a análise em conjunto com o mapa de interpretação de feições geomorfológicas.

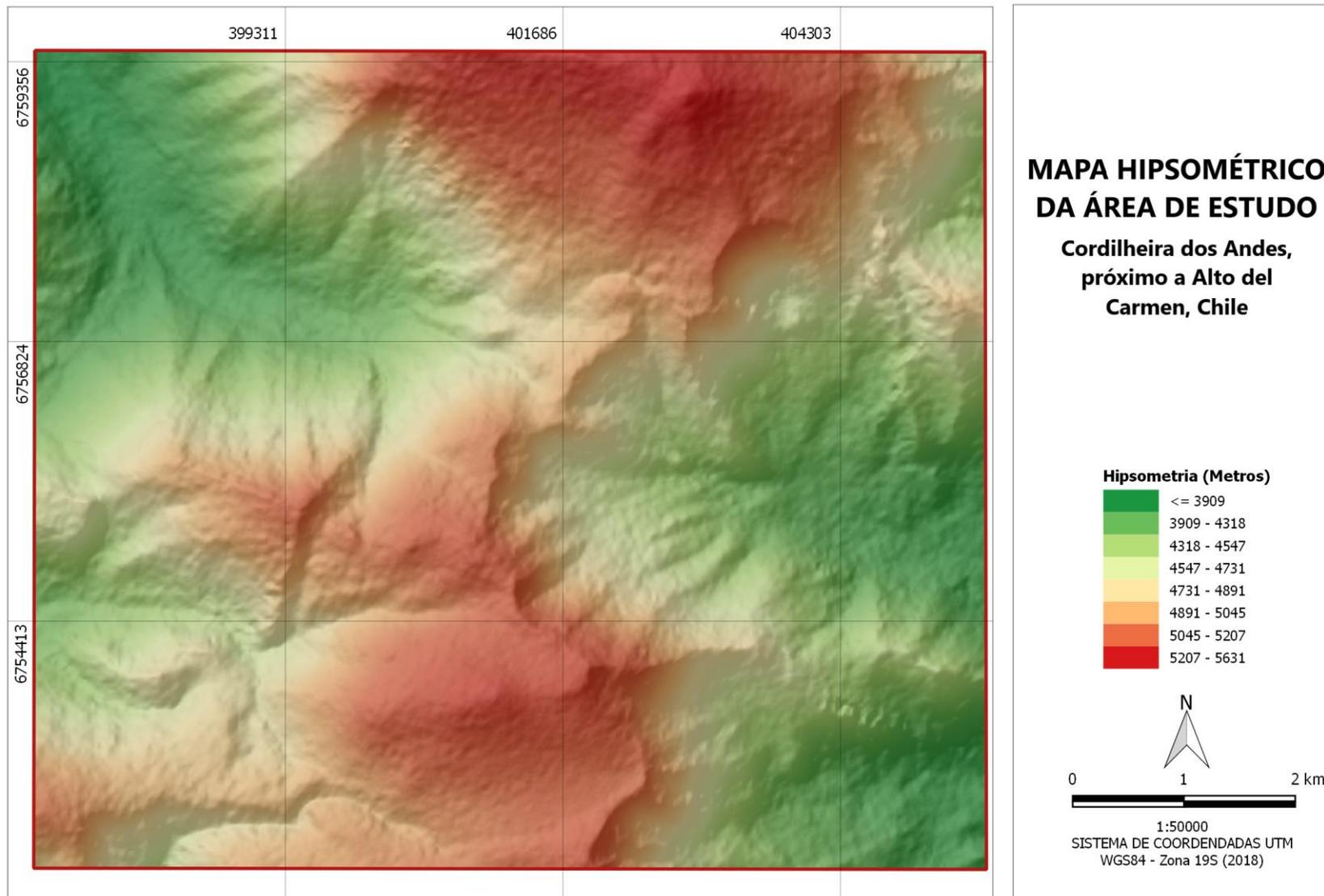


Figura 22 - Mapa hipsométrico da área de estudo, na cordilheira dos Andes, próxima a Alto del Carmen, Chile.

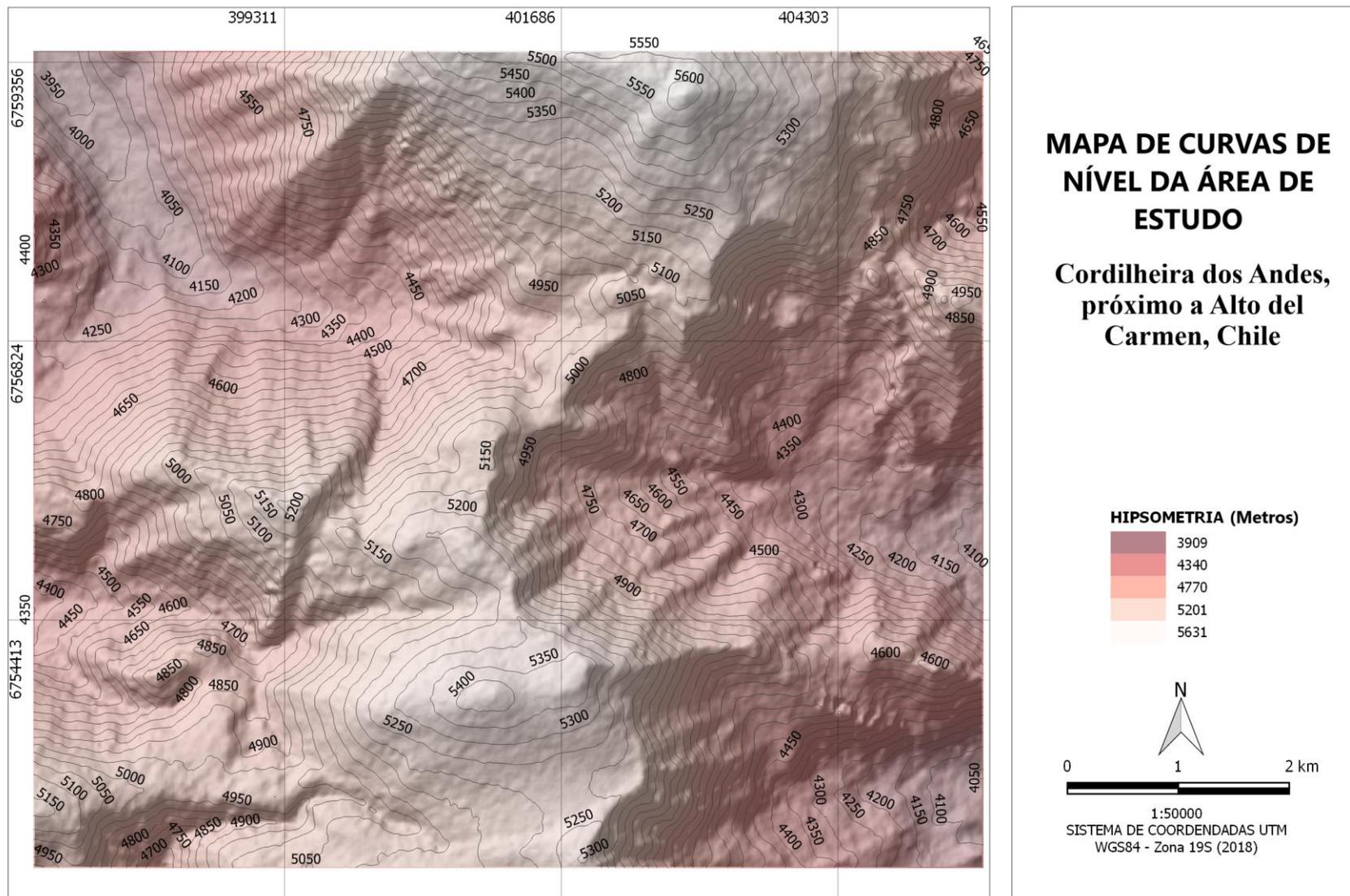


Figura 23 - Mapa de Curvas de Nível da área de estudo, na cordilheira dos Andes, próxima a Alto del Carmen, Chile.

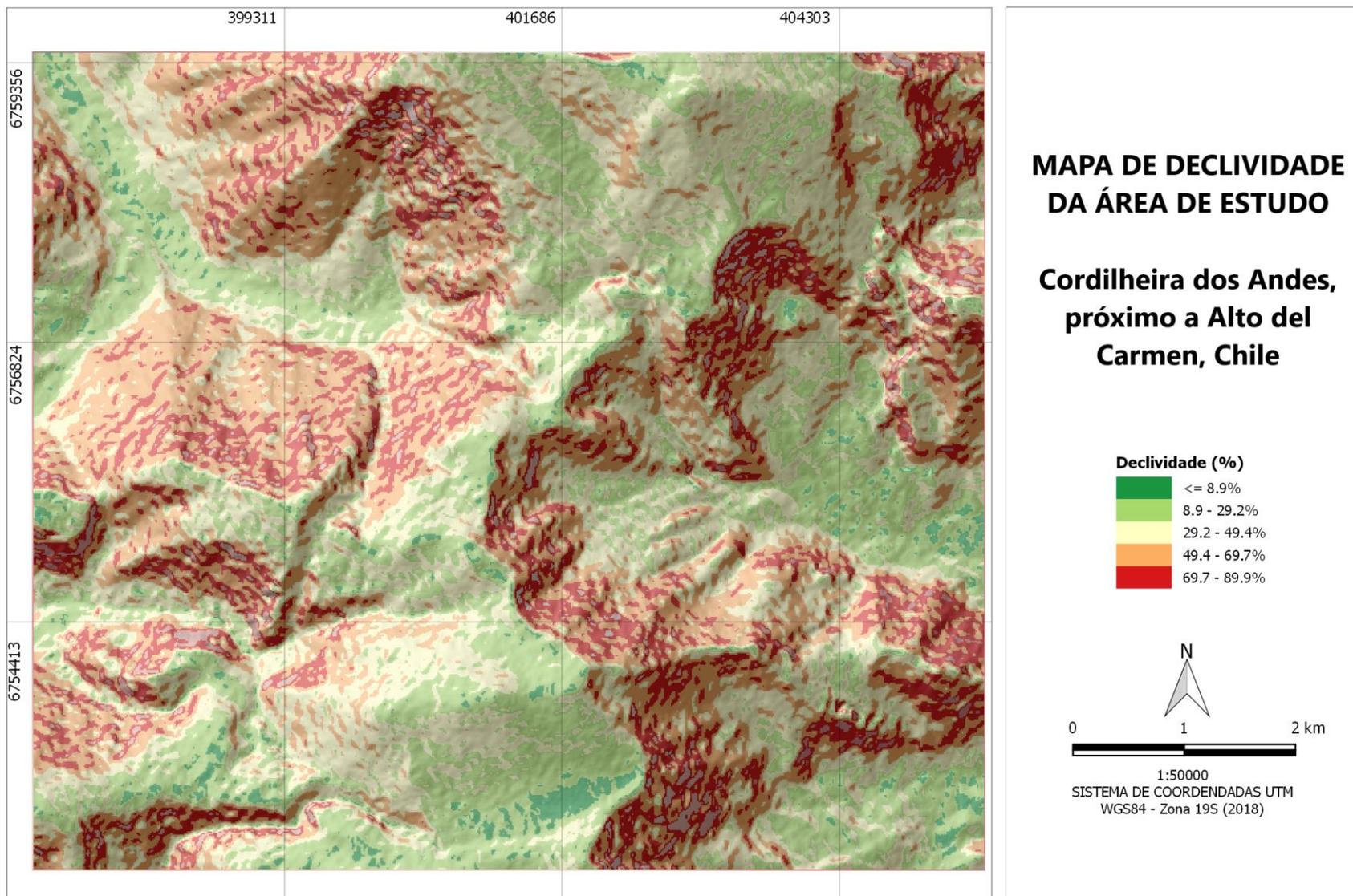


Figura 24 - Mapa de Declividade da área de estudo, na cordilheira dos Andes, próxima a Alto del Carmen, Chile

**MAPA DE INTEPRETAÇÃO DE FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS
NA ÁREA DE ESTUDO (Cordilheira dos Andes, próximo a Alto del Carmen, Chile)**

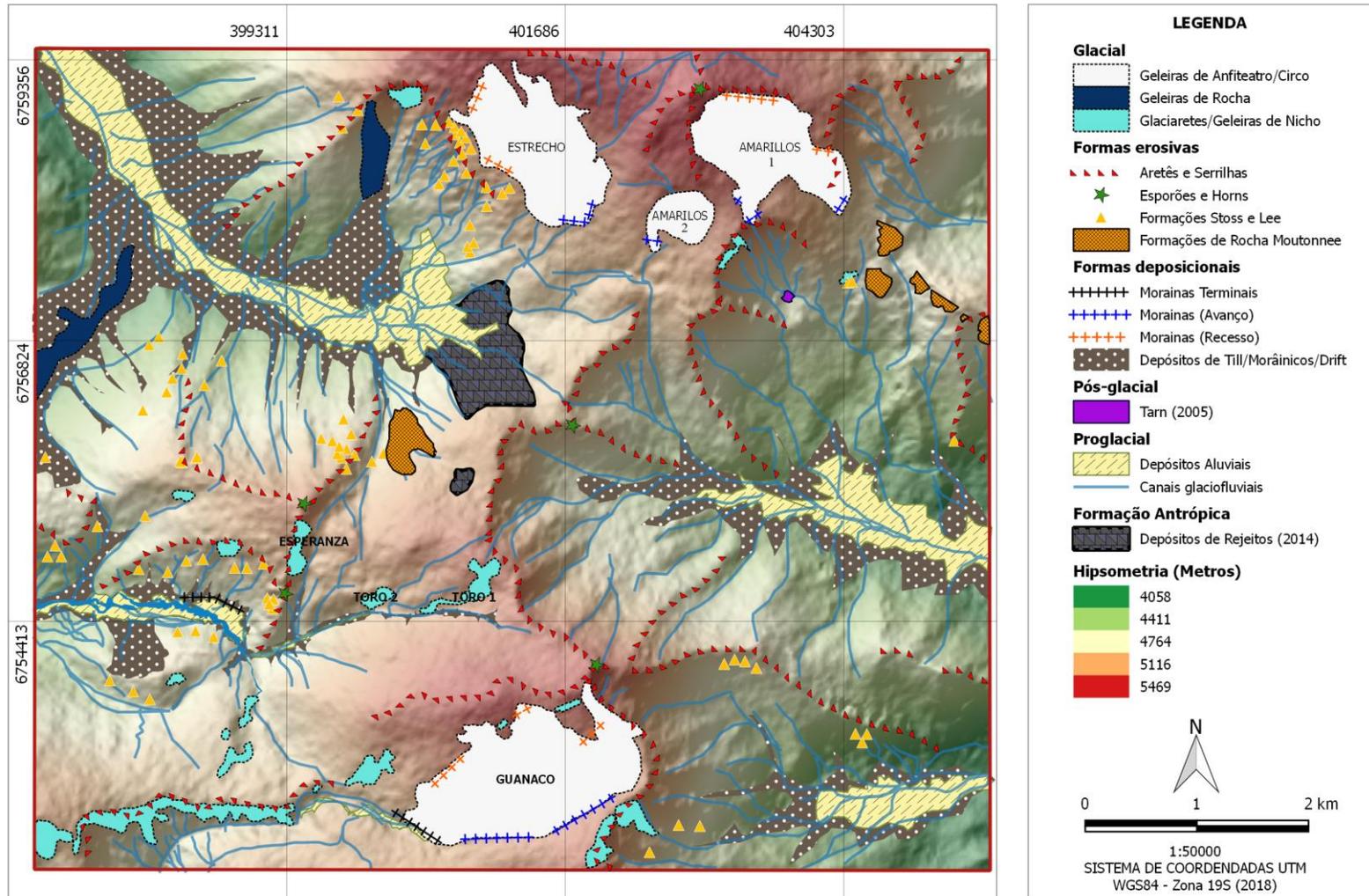


Figura 25 - Mapa de interpretação de feições geomorfológicas na área de estudo, na cordilheira dos Andes, próxima a Alto del Carmen, Chile.

**MAPA DE INTERVENÇÕES ANTRÓPICAS NA ÁREA DE ESTUDO
(Cordilheira dos Andes, próximo a Alto del Carmen, Chile)**

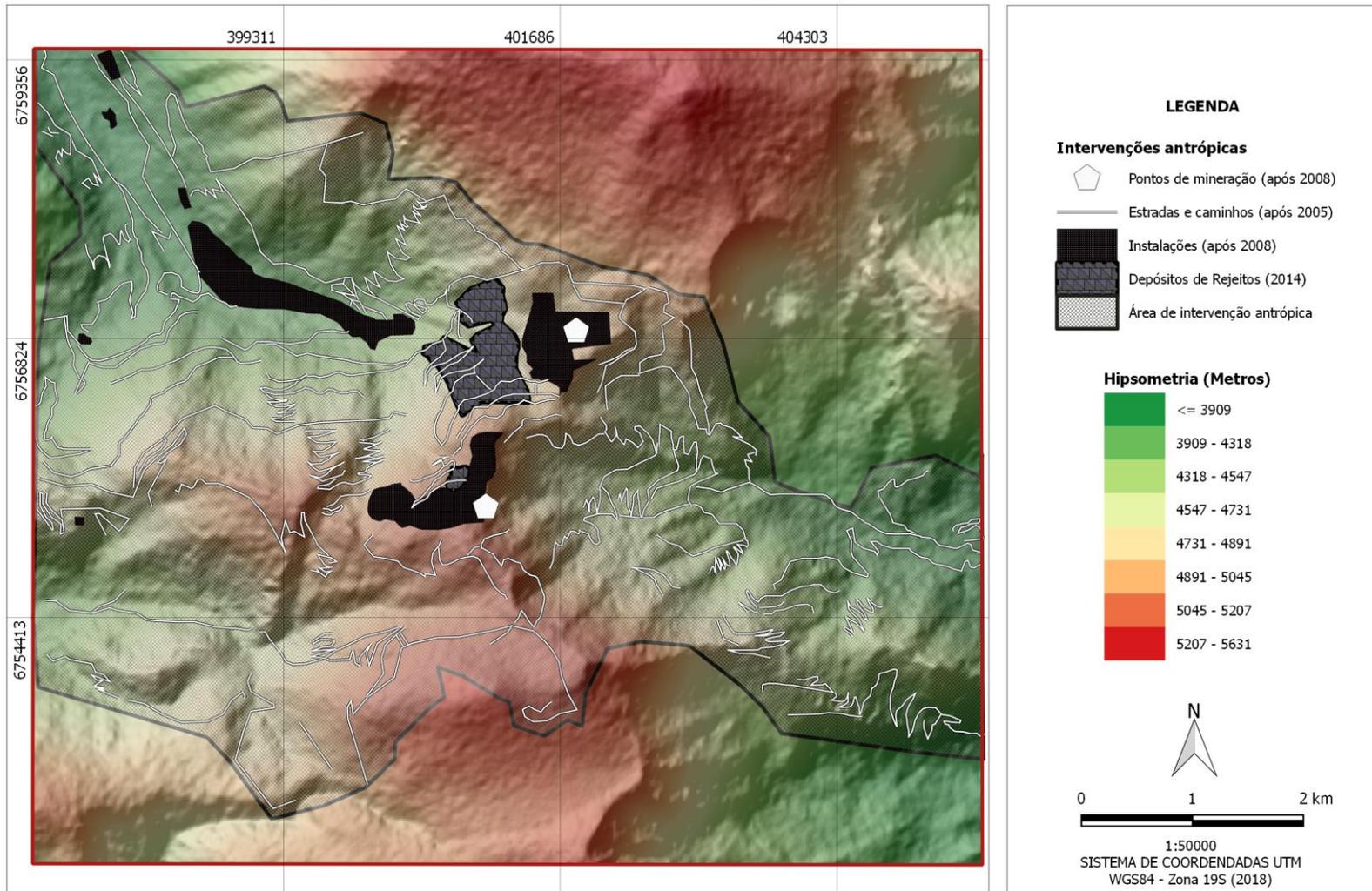


Figura 26 - Mapa de intervenções antrópicas na área de estudo, na cordilheira dos Andes, próxima a Alto del Carmen, Chile.

4.2 Discussão sobre os resultados da interpretação geomorfológica da área de estudo

A utilização de ferramentas de teledetecção para a interpretação de feições geomorfológicas para a área de estudo foi efetiva na elaboração de um mapeamento temático de mesoescala. A combinação dos produtos ALOS/PALSAR, LANDSAT 8 e da Série temporal do Google Earth PRO, possibilitou identificar as feições dos ambientes glaciais e proglaciais, bem como, inferir a configuração dessas formas de maneira qualitativa.

4.2.1 Ambientes glaciais (*stricto sensu*) ou glaciogênicos

As feições de origem glaciogênica foram subdivididas em geleiras de anfiteatro, glaciaretos e geleiras de rocha. Ao todo foram identificadas: (i) **duas** geleiras de rocha; (ii) **quatro** geleiras de anfiteatro e (iii) **vinte** glaciaretos ou geleiras de nicho.

4.2.1.1 Geleiras de rocha

A identificação das geleiras de rocha se mostrou um desafio dado a ausência de dados de levantamento de campo e sobre a temperatura do solo. A confirmação da interpretação dessas geoformas foi realizada através do cruzamento dos dados do Inventário Nacional de Geleiras da DGA/Chile (2008) com a interpretação dos mosaicos do Google Earth.

A imagem de alta resolução (0,53 metros) do sensor GEOEYE de 14/12/2014 disponibilizada pelo *software*, possibilitou a análise da morfologia que, no contexto do mapeamento, muito se assemelha aos depósitos de origem glacial. A diferenciação se deu pelo fato desses depósitos de configurarem na forma de leques na área de estudo.

Outros fatores que foram considerados na identificação são a topografia da localização dessas geleiras, bem como, do formato de “língua” consolidado na área terminal dessas formas glaciais. As geleiras de rocha normalmente se localizam em áreas de acumulação do gelo, *firn* e detritos no setor inferior de vales montanhosos. Deste modo, a visualização do contexto de localização dessas formas a partir do MDE possibilitou compreender as características de gênese dessas geleiras.

As duas geleiras de rocha identificadas aparentam ter um papel importante no aporte hídrico do rio Estrecho, devido a sua topografia e conexão de canais glaciofluviais com o rio.

4.2.1.2. Geleiras de anfiteatro e glaciaretas (geleiras de nicho)

A interpretação dos produtos gerados a partir do processamento digital dos dados LANDSAT 8 se mostraram bastante efetivos na identificação da área de cobertura de neve. A composição RGB demonstrou um significativo retroespalhamento da resposta espectral da imagem utilizada. Entretanto, a utilização dos índices normalizados NDSI e NDWI, bem como a aplicação de limiares facilitaram a identificação das áreas de limite de acumulação de materiais glaciais.

A presença de solo exposto de origem granítica também dificultou a definição a partir da cena LANDSAT 8. Deste modo, a utilização da banda 6 do infravermelho médio no cálculo do NDSI mostrou melhor efetividade na identificação das áreas de acumulação de neve/gelo. Para corroborar com a delimitação dessas áreas, os mosaicos do Google Earth foram aplicados.

A diferenciação entre geleira de anfiteatro e glaciarete se deu basicamente pelo formato e dimensões. As **geleiras de anfiteatro** apresentaram um formato bem definido, ocupando as reentrâncias das montanhas definidas a partir do uso do MDE. As geleiras denominadas Guanaco, Estrecho, Amarillo 1 e Amarillo 2 (conhecida como Los Amarillos) foram consideradas **geleiras de anfiteatro**.

A geleira **Guanaco** tem um importante papel no aporte hídrico das microbacias locais. Foi possível identificar, a partir dos dados de acumulação de fluxo de drenagem e hipsometria, que a geleira é responsável pelo aporte hídrico do Rio Toro e, principalmente, de uma drenagem secundária do rio Turbio, no lado argentino. A geleira Guanaco apresenta um processo de retração nos limites norte e noroeste, identificados a partir de morainas recesionais nessas áreas. Nos limites sul e sudeste apresenta um avanço, evidenciado pela presença de morainas de avanço e pela topografia. Cumpre destacar a presença de dois glaciaretas nesses limites, entalhados em vale, que provavelmente recebem a contribuição da geleira Guanaco.

A geleira **Estrecho**, localizada ao norte da área de estudo, tem um importante papel no aporte hídrico do rio Estrecho. A presença significativa de canais glaciofluviais conectando a geleira ao rio e o fator topográfico, são evidências dessa interação. Tal condição também ficou evidenciada a partir dos dados de acumulação de fluxo de drenagem simulado a partir do MDE. A geleira **Estrecho** aparenta um processo de retração nos limites noroeste e sudoeste evidenciado pela presença de morainas recSSIONAIS. O fluxo da geleira pode ser inferido como para sudeste considerando a presença de morainas de avanço somadas ao fator topográfico.

As geleiras **Los Amarillos**, localizada ao norte da área de estudo, aparentam processo de fluência em sentido sul e sudeste identificado por morainas de avanço. **Amarillo 2** fornece aporte hídrico para o rio Estrecho e para uma drenagem secundária do rio Turbio, no lado argentino. **Amarillo 1**, de maiores dimensões, fornece um aporte importante para o rio Turbio que resta evidenciado pela grande quantidade de canais glaciofluviais.

Os **glaciaretos** identificados na área de estudo se encontram em maior parte entalhados em vales nas montanhas. Os glaciaretos **Toro 1**, **Toro 2** e **Esperanza** fornecem um importante aporte hídrico para o rio Toro, identificado a partir da hipsometria e conexões dos canais glaciofluviais entre o rio e as geleiras.

4.2.2 Formas erosivas criadas pela glaciação alpina

As formas erosivas identificadas no mapa de interpretação geomorfológicas foram definidas principalmente pelos dados gerados a partir do MDE ALOS/PALSAR. Nos casos em que houve dificuldade na interpretação, os mosaicos do Google Earth foram de grande serventia.

As formas erosivas identificadas como **arêtes**, **serrilhas** e **esporões** se mostraram de fácil detecção a partir da geração de dados do MDE. O exagero vertical utilizado na máscara de sombreamento, a variação de maior amplitude nos dados das curvas de nível e os maiores percentuais de declividade, foram fundamentais para a interpretação das formas. Sobre essas formas, cumpre destacar a frequência dessas formações na área de estudo. A **serrilha** localizada no setor central da área de estudo marca a separação territorial entre Chile e Argentina, seccionando também as sub-bacias do rio Estrecho e Toro (lado chileno) e rio Turbio (lado argentino). Essa **serrilha** central configura ainda a forma erosiva de um circo de grandes

dimensões (vertente oeste), sugerindo existência de uma importante geleira de anfiteatro em períodos de glaciação anterior.

As formações **stoss/lee** e de **rochas moutonnée** foram identificadas a partir da análise dos mosaicos Google Earth. Essas formações se caracterizaram pela configuração com inclinações abruptas no lado de cima (“stoss”) e declives íngremes na parte abaixo do gelo (“lee”). A face superior dessas formas com característica “raspada” e a face inferior “arestada” sugere uma gênese em processos erosivos de glaciações anteriores, sendo esculpido de maneira subglacial pelas massas de gelo. A resistência desigual das formas rochosas na superfície de contato com as geleiras submeteu a forma ao processo de raspagem e fraturamento. Foram localizadas em áreas de vertentes, principalmente, sendo mais incidente em vertentes de percentual de maior declividade – um indício da ação abrasiva do gelo. As formas de rochas moutonnée foram diferenciadas das stoss/lee por apresentarem uma configuração semelhante a “franjas” distribuídas como “perucas” nas áreas de encosta.

4.2.3 Formas deposicionais criadas pela glaciação alpina

Essas formas se mostraram de difícil identificação durante o processo de interpretação devido a intensa alteração da paisagem natural pela construção de estradas e instalações da mineradora. Foram identificadas principalmente pelos dados resultantes do MDE e pelas imagens de alta resolução do Google Earth.

As **morainas** foram identificadas a partir da análise dos produtos Google Earth, prioritariamente. A ação antrópica provavelmente destruiu esse tipo de formação. Essas formas foram identificadas somente nas geleiras de anfiteatro, provavelmente pelo fato de não ter sido caracterizada a intervenção antrópica nesses locais; entretanto, uma moraina terminal foi considerada a sudoeste do glaciarete Esperanza.

Os depósitos de **till**, **morânicos** e **drift** foram evidenciados principalmente pelas imagens do Google Earth e considerando a morfologia do relevo baseada no MDE. Essas estruturas se configuraram na área de estudo em forma de leques depositados sobre as vertentes, preenchendo entalhes em forma de vales. Essas formações foram identificadas na área de estudo

principalmente associadas a canais glaciofluviais e em áreas de entrelaçamento desses canais, fator que contribuiu para essa caracterização no mapa geomorfológico.

4.2.4 Formação de origem pós-glacial

A única forma interpretada como sendo de origem pós-glacial foi um **tarn**, localizado no setor nordeste da área de estudo. Essa forma foi identificada a partir de uma cena QUICKBIRD de 0,63 metros de resolução espacial datada de 25/03/2005 por meio do mosaico do Google Earth. Essa forma também se mostrou na imagem resultante do cálculo do NDWI obtidos a partir de dados LANDSAT 8. O **tarn** se configurou num formado arredondado entalhado no vale de uma estrutura morfológica de circo, definido através do contexto possibilitado pelo MDE. Foi caracterizado como pós-glacial por estar em uma área que sugere a existência de uma geleira de anfiteatro em uma glaciação pretérita. Considerando o mapa de curvas de nível, esse **tarn** se localiza em uma área de terreno plano no circo entalhado na vertente, sendo compatível com o conceito de lago glacial.

4.2.5 Ambiente proglacial

Os ambientes proglaciais foram classificados devido a sua relação com os ambientes glaciogênicos. Foram interpretados principalmente a partir das imagens de alta resolução do Google Earth e dados do MDE.

Os **canais glaciofluviais** conectam as geleiras ao curso dos rios Estrecho e Toro (lado chileno) e à drenagem secundária do rio Turbio (lado argentino). A identificação desses canais se deu a partir da interpretação visual dos mosaicos do Google Earth e baseado nas estimativas do cálculo da acumulação de fluxo de drenagens e hipsometria gerados a partir do MDE. Os canais glaciofluviais entalhados nas vertentes e nos depósitos gerados pela erosão glacial tiveram maior confiabilidade na interpretação. No caso de canais glaciofluviais localizados na área considerada como depósito aluvial, esses podem ser considerados de menor confiabilidade na interpretação. Isso se deve ao fato de representar uma área com a constante presença de estradas e instalações relacionadas à mineradora. A identificação de construções de estradas e instalações demonstrou indícios da perda ou extinção parcial das conexões dos canais glaciofluviais com as geleiras.

Os **depósitos aluviais** foram considerados na área de influência dos rios Toro, Estrecho e Turbio. Sua interpretação se deu principalmente pela análise das cenas do Google Earth e pelo fator topográfico. Estes depósitos se diferenciam no aspecto visual dos depósitos gerados pela ação direta da erosão glacial por terem uma topografia mais plana e textura que sugere uma significativa presença de sedimentos de melhor seleção em relação aos oriundos dos processos glaciais e paraglaciais.

4.2.6 Formações antrópicas

Embora essa classificação de certa forma seja destoante do contexto de formas naturais do processo de interpretação geomorfológica, se tornou importante representá-la no mapa de feições geomorfológicas, pelo fato de não se encaixar em nenhuma outra forma de depósito identificada e não podendo ser considerada como rocha ou solo exposto.

Essa forma foi classificada como **depósito de rejeitos** originado pela atividade de mineração. Sua configuração espacial se dá imediatamente à localização da área de lavra da mina. Foi identificada a partir da cena GEOEYE de 0,53 metros de resolução espacial datada de 14/12/2014. A alta resolução da imagem permitiu diferenciar o depósito de rejeitos dos demais depósitos naturais mapeados. Esse depósito tem dimensões bem definidas ao longo da vertente adjacente e tem uma textura visual faixas longitudinais de montante para jusante.

A **figura 27** extraída da imagem de alta resolução do GEOEYE através do Google Earth demonstra a feição interpretada como sendo um depósito de rejeitos e a área de lavra da mina, do lado direito do depósito.

4.3 Discussão sobre os resultados da interpretação de intervenções antrópicas

Foram verificadas evidências da ação antrópica nos ambientes proglaciais a partir da utilização do mosaico de cenas de alta resolução do Google Earth e comparação dos dados de interpretação geomorfológica. O mapa de intervenções representa, desse modo, a localização dessas alterações da paisagem.

Foram identificados dois **pontos de mineração**. Essa classificação corresponde às áreas de lavra e prospecção de minérios. As feições se configuram como escavações em forma de bancadas ou degraus, conforme pode ser visualizado na **figura 27**. Essas áreas imprimem importantes alterações na morfologia do relevo, e nesse caso específico, estão entalhadas em áreas de vertentes de altitudes que variam entre 4950 e 5200 metros.



Figura 27 - Recorte da imagem orbital do GEOEYE (Extraído do programa Google Earth, 2014).

Estradas e caminhos foram identificados ao longo de quase toda a área de estudo. Esses vetores ligam os pontos de mineração e instalações da base de operações da mineradora. Foram construídos nas áreas de vertente e também de depósitos, incluindo os depósitos de rejeitos. Essas estradas são construídas a partir da utilização de caminhões e retroescavadeiras, bem como sendo utilizado o emprego de explosivos para transpor obstáculos rochosos. Essa movimentação de carga sedimentar dos processos de construção de estradas é depositada ao longo das vertentes subjacentes. A sinuosidade dessas construções sugere que esses caminhos

são constantemente esculpidos no terreno, considerando principalmente o retrabalhamento ocasionado pela precipitação de neve e aceleração dos processos glaciais e proglaciais inerentes do ambiente local. A localização identificada dessas construções no ambiente proglacial demonstra indícios da perda ou extinção parcial de conexões entre canais glaciofluviais.

As **instalações** identificadas na área de estudo são de diversos tipos. A maioria das áreas mapeadas sob essa classe representa edificações que compõem a planta operacional da mina. Dentre as instalações mapeadas, destacam-se os **tanques** de armazenamento de substâncias e a **barragem**. Os tanques estão provavelmente relacionados ao tratamento e enriquecimento do material prospectado da mina. A presença da barragem sugere o redirecionamento de recursos hídricos para a utilização nas atividades de lavra. Os tanques e a barragem estão localizados na área de nascente do rio Estrecho. A disposição espacial dessas instalações remete a perda ou extinção parcial de conexões glaciofluviais.

Os **depósitos de rejeito** representados no mapa de interpretação geomorfológica foram reproduzidos novamente no mapa de intervenções antrópicas. Esses depósitos estão diretamente relacionados à área de lavra da mina e estão localizados sobre as vertentes do vale do rio Estrecho. A deposição de rejeitos de rocha nessas áreas pode acarretar a contaminação da água da drenagem, conforme já explorado por outros autores.

A estabilidade dos **depósitos de rejeito** também é bastante questionável. Conforme outros trabalhos já citados nesta dissertação, esse componente possui uma velocidade de deslocamento superior aos depósitos naturais. As interações químicas dos rejeitos somada à ação erosiva dos canais glaciofluviais pode resultar em importantes movimentos de massa. Outro fator a ser considerado é a declividade. Conforme os dados produzidos a partir do MDE, essa área possui declividade acima de 50% na maioria da vertente – caracterizando a susceptibilidade a movimentos de massa.

A proximidade das instalações operacionais da mina em relação aos rejeitos também é um fator de risco. Os movimentos de massa podem ter consequências fatais para os trabalhadores nessas encostas. Cumpre destacar ainda a construção de estradas sobre a área de rejeitos. A compactação dos depósitos somadas ao congelamento do solo podem fornecer certa

estabilidade do terreno para construir estradas. Contudo, há de se ressaltar que a significativa declividade oferece grandes riscos de falha da superfície de equilíbrio das construções.

A partir da delimitação desses alvos, foi traçado um polígono que engloba toda a **área de intervenções antrópicas** registradas na área de estudo. Deste modo, é possível observar com clareza o impacto das atividades mineradoras no ambiente proglacial. Nos ambientes glaciais (*stricto sensu*), não foi possível identificar indícios de alterações das características naturais. Deste modo, pode-se inferir que as reduções das áreas de cobertura de neve e gelo apontadas pelas agências ambientais podem não estar relacionadas diretamente com as atividades de mineração. Tais processos de retração podem ter relação com outras variáveis independentes do fator mineração.

Considerando o avanço das estruturas operacionais da mina, bem como, da construção de estradas em áreas proglaciais que consolidam a nascente dos rios Toro e Estrecho, é possível inferir que essa configuração pode acarretar no prejuízo dos recursos hídricos aportados pelas geleiras à população local. Não pode ser descartado ainda, a contaminação da água considerando a utilização de componentes químicos e metais pesados no tratamento e enriquecimento de minérios.

5. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estimar alterações nos ambientes proglaciais e glaciais resultantes de atividades de mineração nas nascentes do Rio Toro e Estrecho, na região de Alto del Carmen, Chile, a partir do uso de ferramentas de teledetecção.

Uma das preocupações desta pesquisa foi a utilização de dados e *softwares* disponibilizados gratuitamente, no intuito de incentivar a pesquisa e explorar a viabilidade de estudos que tenham poucos recursos para sua execução. A seleção de produtos de nível alto de qualidade de pré-processamento também propiciou melhores estimativas dos impactos analisados.

A combinação do uso de dados de diferentes sensores possibilitou inferir a existência ou não, de evidências de mudanças impostas ao ambiente glacial (*stricto sensu*) e proglacial, resultantes das atividades de exploração mineral na área de estudo. A modelagem digital do terreno gerada a partir de dados do sensor ALOS/PALSAR, se consolidou como uma importante ferramenta para a compreensão desses ambientes, bem como possibilitou analisar, qualitativamente, a susceptibilidade dessas áreas a movimentos de massa relacionados à deposição de rejeitos de rocha nas áreas de encosta. Os dados LANDSAT 8 possibilitaram distinguir a área de cobertura de neve e gelo, bem como corroborar a identificação de outras morfologias na área de estudo. As imagens de alta resolução disponibilizadas gratuitamente pela plataforma Google Earth PRO, tiveram papel fundamental na diferenciação de formas que não puderam ser definidas nos produtos de outros sensores.

O mapeamento geomorfológico e de intervenções antrópicas, gerado a partir da interpretação dos dados de teledetecção, possibilitou dimensionar, qualitativamente, importantes alterações na paisagem da área de estudo. O uso de diferentes técnicas de estudo se mostrou eficaz em estimar essas alterações.

Estudos baseados em levantamento detalhado de campo, se tornam, desse modo, importantes para quantificar o impacto da exploração de minérios nessa região. Outras escalas de trabalho, mais amplas, podem também evidenciar um impacto mais expressivo na região, considerando o projeto Veladero de mineração, localizado na nascente do rio Turbio, a oeste do

Pascua Lama. A utilização de escalas maiores de recorte poderá evidenciar também o ambiente periglacial, o qual não foi possível delimitar com clareza dada a escala desta pesquisa.

As pretensões da empreiteira de retomar as atividades do projeto Pascua Lama, interrompidas definitivamente pelas autoridades no ano de 2018, devem ser monitoradas. A escala temporal mensurada nessa pesquisa foi capaz de demonstrar um importante impacto das atividades de mineração entre 2005 e 2014, que deve se amplificar caso a empresa retome o processo de prospecção de minérios.

Estudos hidrológicos podem determinar o impacto da redução do abastecimento providenciado por esses ambientes glaciais (*lato sensu*). Urge ainda a necessidade da avaliação de possível contaminação dos recursos hídricos provocados pelo uso de produtos químicos e metais pesados no tratamento e enriquecimento dos minerais nas nascentes dos rios Estrecho e Toro. A população nativa depende diretamente da utilização dos recursos hídricos disponibilizados pelos rios Estrecho e Toro, podendo a contaminação, ter consequências irreparáveis para essas populações. Conforme revelado por estudos em outras áreas de mineração, deve-se questionar os impactos prováveis da contaminação para os ecossistemas locais.

Referências bibliográficas

ALCAMO, J.; HENRICHS, T.; LEHNER, B; SIEBERT, S. 2003. Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability. *Journal–des Sciences Hydrologiques, Centre For Environmental Systems Research, University Of Kassel, Kassel, Germany*, v. 48, p.317-337, jun. 2003. Disponível em: <http://ncsp.undp.org/sites/default/files/2_Alcamo_Global_Water_Resources.pdf>. Acesso em: 01 dez 2016.

ALGANCI, Ugur; BESOL, Baris; SERTEL, Elif. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. *Isprs International Journal of Geo-information, Istambul*, v. 3, n. 7, p.111-127, mar. 2018.

ANDRADA, Rafael Rechia; FREITAS, Marcos Wellausen Dias de. Método aplicado em Modelos Digitais de Elevação para a delimitação semiautomática de bacias de drenagem glacial na Península Antártica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. Anais. João Pessoa: SBSR, 2015. p. 6920 - 6927.

ANDRES, H.; FERRANDO, F. J. A. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. 27.

ARANA, M. 2011. Minería y Territorio en el Perú: conflictos, resistencias y propuestas en tiempos de globalización. In: H Alimonda (coord.). *La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina*. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. Pp: 219-223.

ARÁOZ, H. M. 2011. El auge de la Minería transnacional en América Latina. De la ecología política del neoliberalismo a la anatomía política del colonialismo. In: H Alimonda (coord.). *La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina*. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. p. 135-181.

ARNELL, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change, School of Geography, University of Southampton, Southampton, UK*, n. 14, p.31-52, 2004. Disponível em: <<http://www.journals.elsevier.com/global-environmental-change>>. Acesso em: 5 dez. 2016

ASF. Alaska Satellite Facility. About ALOS Palsar. 2018. Disponível em: <<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar>>. Acesso em: 25 jul. 2018.

ASSINE, M. L.; VESELY, F. F. 2008. Ambientes Glaciais. In: A.J.P. Pedreira. (Org.). *Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil*. 1ed. São Paulo: Editora Beca, p. 24-51.

AZÓCAR, N. A. Geomorfología. 2006. Plataforma apresentada no seminário: "Construcción de un Modulo E-Learning; un ejemplo en desertificación". Elaborada pelo Departamento de Ciencias Geológicas da Universidad

Católica del Norte, Antofagasta, Chile, 2006. (Org.) ESPINOZA, I.; HEMPEL, H.. Disponível em: <<http://www.desertificacion.ucn.cl>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

AZÓCAR, G.; BRENNING, A. 2008. Intervenciones de glaciares rocosos em minera Los Pelambres, Region de Coquimbo, Chile. Waterloo: University of Waterloo. Disponível em <<http://wp.cedha.net/wpcontent/uploads/2012/10/Azocar-Brenning-2008-Pelambres.pdf> >. Acesso em: 30 nov. 2016.

BELL, R. C. 2013. Glacial systems and landforms: a virtual interactive experience. London: Anthen Press. 136p.

BENN, D. I.; EVANS, D. J. A. 2010. Glaciers and Glaciation. 2 ed. London: Hodder Education. 802p.

BENNETT, M. R.; GLASSER, N. F. 1996. Glacial Geology – Ice Sheets and Landforms. England: John Wiley & Sons Ltd. 364 p.

BÓRQUEZ, R.; LARRAÍN, S.; POLANCO, R.; URQUIDI, J. C. 2006. Glaciares Chilenos: Reservas Estratégicas de Agua Dulce para la sociedad, los ecosistemas y economías. Chile: Lom Ediciones, 2006. 125 p. CEDHA. Disponível em: <http://wp.cedha.net/wpcontent/uploads/2012/10/glaciares-chilenos-borquez-larrain-et-al_.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2016.

BREMER, U. F.; ARIGONY-NETO, J.; SIMÕES, J. C. 2004. Teledeteção de mudanças nas bacias de drenagem do gelo da ilha Rei George, Shetlands do Sul, Antártica, entre 1956 e 2000. Pesquisa Antártica Brasileira, Porto Alegre, v. 4, p.37-48, 2004.

BRENNING, A. 2003. La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago: Fundamentos y Primeros Resultados. Revista de Geografía, Norte Grande. 30.

BRENNING, A. 2008. The impact of mining on rock glaciers and glaciers: examples from Central Chile. In: B.S. Orlove, E. Wiegandt & B. Luckman (eds.). Darkening peaks: glacier retreat, science, and society. Berkeley: University of California Press. Chapter 14, p. 126-205.

BRENNING, A.; AZÓCAR, G. 2010. Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. Revista de Geografía, Norte Grande.

BRENNING, A.; BODIN, X.; AZÓCAR, G.; ROJAS, F. 2009. Importancia y monitoreo de glaciares rocosos en los Andes Chilenos. Conference: Congreso Geológico Chile.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; RIBEIRO, Rafael R.. Sensoriamento remoto aplicado na detecção de áreas degradadas pela mineração no sul do Brasil entre 1985 - 2011. Tecno-Lógica Unisc, Santa Cruz do Sul, v. 20, n. 2, p.97-102, dez. 2016.

CECS. Centro de Estudios Científicos de Valdivia (Org.). Glossário de Glaciologia. 2018. Disponível em: <http://www.glaciologia.cl/web/glaciologia_es/glosario.php?idPalabra=&init=>. Acesso em: 21 jan. 2018.

CENSO/CHILE. 2012. Santiago: Chile, 2012. Disponível em: <http://www.censo.cl/2012/08/resultados_preliminares_censo_2012.0.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2018.

CHILE. Subdirección Nacional de Geología. Servicio Nacional de Geología y Minería (Org.). MAPA GEOLOGICO DE CHILE: VERSION DIGITAL: PUBLICACION GEOLOGICA DIGITAL CD-ROM. Santiago: SNGM, 2003. 25 p. (4). Base Geológica escala 1:1.000.000.

CLAPPERTON, C. M. The quaternary glaciation of Chile: a review. Revista Chilena de Historia Natural, Santiago, v. 1, n. 67, p.369-383, mar. 1994.

COREMA. 2005 (CHILE). Informe de Comisión de Servicio a la III Región. Disponível em <http://olca.cl/oca/chile/region03/pascualama/informe_comision_servicio_a_III_region.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2016.

CPRM, 2016 (BRASIL). Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <sigep.cprm.gov.br/glossario/>. Acesso em: 11 dez. 2016.

CHRISTOPHERSON, R. W. Geosistemas: Uma Introdução à Geografia Física. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 728 p.

CUFFEY, K.; PATERSON, W. S. B. The Physics of Glaciers. 4. ed. New York: Academic Press, 2010. 704 p.

DGA, 2004 (CHILE). Dirección General de Aguas. Diagnostico y clasificacion de los cursos y cuerpos de agua segun objetivos de calidad: cuenca del rio Huasco. Santiago: DGA, 2004. 111 f. (1). Disponível em: <portal.mma.gob.cl>. Acesso em: 30 jan. 2018.

DGA, 2008 (CHILE). Dirección General de Aguas. Inventario Publico de Glaciares. 2008. Disponível em: <http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/Inventario_glaciares/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 20 ago. 2017.

DIGITAL GLOBE (Estados Unidos da América). Data Discovery. 2018. Disponível em: <<https://discover.digitalglobe.com/>>. Acesso em: 31 jul. 2018.

DMC, 2001 (CHILE). Dirección Meteorológica de Chile. **CLIMATOLOGÍA REGIONAL**. Santiago: Dmc/, 2001. 47 v. Disponível em: <<http://www.meteochile.cl>>. Acesso em: 23 fev. 2018.

DOZIER, J. (1989). Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote sensing of Environment*, 28, p. 9-22.

ECHAVE, J.; QUISPE, M.P.; PÉREZ, M. 2011. El escenario actual: tendencias, desafíos y posibilidades. In: ALIMONDA, H. (coord.). *La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina*. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. p. 235-252.

ESCALANTE-RAMÍREZ, B.; ESCALANTE-RAMÍREZ, B. (Ed.). *Remote Sensing: Advanced Techniques and Platforms*. Rijeka: Intech, 2012. 473 p.

FERRANDO, F. 2002. The Quaternary Glaciations in Chile: A General review. *Revista Geografica de Chile Terra Australis*. 47. 129-165.

FERRANDO, F. 2003. Aspectos conceptuales y genetico-evolutivos de los glaciares rocosos: análisis de caso en los andes semiáridos de Chile. *Revista Geográfica Terra Australis*, 48: p.43-74.

FERRANDO, F. 2017. Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile, análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones (About rock glaciers distribution in Chile: Situation analysis and new locations recognition). *Investigaciones Geográficas*. 57. 127-144.

GARIN, C. 1987. Inventario de Glaciares de los Andes Chilenos desde los 18° a los 32° de latitud sur. *Revista de Geografía Norte Grande*, Santiago, v. 14, p.35-48, 1987.

GASCOIN, S.; KINNARD, C.; PONCE, R.; LHERMITTE, S.; MACDONELL, S.; RABATEL, A. 2010. Glacier contribution to streamflow in two headwaters of the Huasco River, Dry Andes of Chile. Disponível em <<http://www.the-cryosphere.net/5/1099/2011/tc-5-1099-2011.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

GIARDINO, J.R.; VITEK, J.D.; DEMORETT, J.L. 1992. A model of water movement in rock glaciers and associated water characteristics. In *Periglacial Geomorphology; Proceedings of the 22nd Annual Binghamton Symposium in Geomorphology*, Dixon JC, Abrahams AD (eds). Elsevier Science BV: Amsterdam; 159-184.

GLASSER, N. F.; BENNETT, M. R. Glacial erosional landforms: origins and significance for palaeoglaciology. *Progress in Physical Geography*, UK, v. 1, n. 28, p.43-75, jan. 2004.

GOOGLE. GOOGLE EARTH. 2018a. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-BR/earth/>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

GOOGLE. GOOGLE EARTH Engine. 2018b. Disponível em: <earthengine.google.com>. Acesso em: 17 jul. 2018.

GREENPEACE (ARGENTINA). 2011. Barrick: Minería responsable de destruir los glaciares. Disponível e <<http://www.greenpeace.org/argentina/es/informes/barrick-responsable/>>. Acesso em 5 dez. 2016

GRIEM, W. 2017. Museo Virtual: Morfología de la Región de Atacama, Chile. Disponível em: <<http://www.geovirtual2.cl>>. Acesso em: 21 jan. 2018.

HAEBERLI, W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of Alpine rock glaciers. Mitt. VAW/ETH 77.

HALL, D.K.; MARTINEC, J. Remote Sensing of ice and snow. Londres, Nova Iorque. Champman & Hall, 1985, 189 p.

HAMBREY, M. 1994. Glacial Environments. L d UCL P 296 London: UCL Press. 296p.

HERRERA, F.; AZÓCAR, G.; BRENNING, A.; BODIN, X. (2010). Inventario de glaciares rocosos en los Andes semiáridos de Chile: Cuenca del Río Elqui.

HUBBARD, B.; GLASSER, N. Field Techniques in Glaciology and Glacial Geomorphology. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005. 413 p.

IANIGLA-CONICET (ARGENTINA). 2010. Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial: Fundamentos y Cronograma de Ejecución. Buenos Aires, 2010. 86 p. Disponível em: <<http://www.glaciares.org.ar>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

ICT-USP (BRASIL). 2016. Glossário glacial. Disponível em: <<http://www.igc.usp.br/glacial/glossario>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Sobre o CBERS. 2018. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

IPCC. 2008. Climate Change and Water: IPCC Technical Paper VI. Geneva: IPCC. Disponível em <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_technical_papers.shtml#UW-fSsqS5ti>. Acessado em 5 dez. 2016.

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: IPCC. Disponível em <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>>. Acessado em 8 ago. 2017.

JAXA. Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa. Tutorial: ALOS-Advanced Land Observing Satellite DAICHI. 2008. Disponível em: <http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_e.html>. Acesso em 30 jan. 2018.

JOAQUIM, G.; VIEIRA, R.; ROSA, K. K.; SIMÕES, J. C. Mapeamento das geleiras de rocha com o uso de imagens satelitais e geoprocessamento, Cordilheira Tres Cruces, Bolívia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, 2011, Curitiba. Anais. Curitiba: SBSR, 2011. p. 4194 - 4201.

JOKINEN, O.; GEIST, T. Accuracy aspects in topographical change detection of glacier surface. In: PELLIKKA, P.; REES, W. Gareth. Remote sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers. Londres: CRC PRESS/BALKEMA, 2010, p. 269-283

JORNAL E.M. (Brasil). Chile anuncia fechamento do projeto na mina de ouro Pascua Lama. Jornal Estado de Minas: E. M. INTERNACIONAL. Belo Horizonte, p. 1-2. jan. 2018. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/internacional/2018/01/18/interna_internacional,931930/chile-anuncia-fechamento-do-projeto-na-mina-de-ouro-pascua-lama.shtml>. Acesso em: 31 jan. 2018.

HØGDA, Kjell Arild; STORVOLD, Rune; LAUKNES, Tom Rune. SAR imaging of glaciers. In: PELLIKKA, P.; REES, W. Gareth. Remote sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers. Londres: CRC PRESS/BALKEMA, 2010. p. 153-178.

LAMBERTI, M. J. 2011. Una lucha a “cielo abierto”. El caso del Frente Amplio Opositor a Minera San Xavier. In: ALIMONDA, H. (coord.). La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. Pp: 303-331.

LI, Yue; ZHAO, Hongli; FAN, Jinghui. (2015). Application of Remote Sensing Technology in Mine Environment Monitoring. MATEC Web of Conferences. Beijing. p. 1 – 6.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. (1994) Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 750 p.

LIMA, Raphael Nunes de Souza. GOOGLE EARTH APLICADO A PESQUISA E ENSINO DA GEOMORFOLOGIA. Revista de Ensino de Geografia, Uberlândia, v. 3, n. 5, p.17-30, dez. 2012.

MATTHEWS, John A. et al. Glaciers and environmental change. New York: Arnold, 2000. 203 p.

MCFEETERS, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 17(7), p. 1425-1432.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Org.). Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. Brasília: UNB, 2012. 264 p.

MISAS, Carlos Mario Echeverri. Geologia e alteração hidrotermal nas rochas vulcânicas e plutônicas paleoproterozoicas na porção sul da província mineral do Tapajós (PA). 2015. 285 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geoquímica e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2015.

NICHOLSON, L.; MARIN, J.; LOPEZ, D.; RABATEL, A.; BOWN, F.; RIVERA, A. Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, Cambridge, v. 53, n. 50, p.111-118, jan. 2009. Disponível em: <<https://www.igsoc.org/annals/50/53/published.html>>. Acesso em: 20 jul. 17.

OTB Team. ORFEU TOOLBOX DEVELOPMENT TEAM (Paris). CNES. Applications: Superimpose Sensor. 2018a. Disponível em: <Superimpose Sensor>. Acesso em: 15 ago. 2018.

OTB Team. ORFEU TOOLBOX DEVELOPMENT TEAM (Paris). CNES. Applications: Superimpose Sensor. 2018b. Disponível em: <Superimpose Sensor>. Acesso em: 15 ago. 2018.

PALACIOS-BERRIOS, Hildebrando. Assessing Landscape Change in a Mining Area of the Peruvian Andes: A Case Study in The Yanacocha Mine, Cajamarca. 2006. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Filosofia, Departamento de Geografia, Universidade de Bergen, Bergen, 2006.

PAULL, David; BANKS, Glenn; BALLARD, Chris; GILLIESON, David. (2006). Monitoring the Environmental Impact of Mining in Remote Locations through Remotely Sensed Data. *Geocarto International*. 21. p. 33 - 42.

PELLIKKA, Petri; REES, W. Gareth. Remote sensing of glaciers: Techniques for topographic, spatial, and thematic mapping of glaciers. Londres: Crc Press/balkema, 2010. 330 p.

PREST, V.K. (1983). Canada's heritage of glacial features. *Miscellaneous Report*. N. 28, Geological Survey of Canada, p. 26-27.

RAAFLAUB, L.; COLLINS, M. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environmental Modelling & Software* 21(5), 2006, p. 710–732.

RAJ, Babu K. Govindha; KUMAR, Vinod K; REMYA, S. N. Remote sensing-based inventory of glacial lakes in Sikkim Himalaya: semi-automated approach using satellite data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, [s.l.], v. 4, n. 3, p.241-253, set. 2013. Informa UK Limited.

RIBEIRO, R. R. 2007. Determinação das variações das geleiras da Cordilheira Três Cruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos. 2007. 106 f. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2007.

RIBEIRO, R.R.; ARIGONY-NETO, J. ; BREMER, U.F.; SIMÕES, J.C.; RAMIREZ, E. Potential of CBERS-2B High Resolution Camera (HRC) in Snowcover Identification. Em: ARENAS, C e RAMÍREZ, J. (eds.). Glaciares, nieves y hielos de América Latina: Cambio climático y amenazas. INGEOMINAS 2010, p. 165-169.

RIBEIRO, R. R.; RAMIREZ, E.; SIMÕES, J. C.; ARIGONY-NETO, J.; JÚNIOR, C. W. M. Algoritmo para o mapeamento de geleiras a partir de dados de sensores remotos. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 5, n. 65, p.985-995, out. 2013.

RIVERA, A. 2007. Inventario de glaciares de Chile. Laboratorio de Glaciología CECS (2007). Disponível em: <http://www.glaciologia.cl/web/glaciologia_es/proyecto.php?idProyecto=221&init=>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

ROCHA, C. H. B.; VASCONCELOS, D.; SILVEIRA, F. J.; SOUZA, L.V. Comparação de modelos digitais de elevação obtidos a partir de diferentes bases de dados - curvas de nível e pontos cotados IBGE, LIDAR, SRTM e ALOS. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, p.1302-1306, 06 nov. 2017.

ROMERO, P. 2011. Minería, agroindustria y agricultura tradicional: Conflictos socioambientales en el semiárido chileno, el caso de la comuna de Alto del Carmen. In: H Alimonda (coord.). La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. P: 285-303.

SANCHES, A. M. Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia. 2013. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/prh-pb215/_arquivos/180acf209e4a2b77e75eb369cf7986da.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2017.

SANCHES, Ieda Del'Arco; ANDRADE, Ricardo Guimarães; QUARTAROLI, Carlos Fernando; RODRIGUES, Cristina Aparecida Gonçalves. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat5-TM para obtenção de reflectância de superfície e NDVI In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. Anais. São José dos Campos: INPE, 2011. p. 7564-7571.

SILVA, Daniel Luís Andrade. Geração e avaliação de produtos interferométricos dos dados ALOS/PALSAR FBD e PLR para classificação de cobertura da terra na Amazônia. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

SIMÕES, J. C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. Pesquisa Antártica Brasileira, Porto Alegre, v. 4, p. 119-154, 2004. Disponível em: <<ftp://ftp.cnpq.br/pub/doc/proantar/pab-12.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2016.

SINIA (Sistema Nacional de Informações Ambientais do Chile). Indicadores y Cuentas Ambientales. 2017. Disponível em: <<http://sinia.mma.gob.cl>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

SIRTOLI, Angelo Evaristo. Detecção da expansão de área de mineração através de técnicas de sensoriamento remoto. 1999. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Ciências Agrárias, UFPR, Curitiba, 1999.

SOTO, M.; FERRANDO, F. e VIERA, R. (2004). Características geomorfológicas de un sistema de glaciares rocosos y de su Cuenca de sustentación en Chile Semiárido. *Investig. Geogr. Chile*. 36. 1-16.

STUMM, D.; SCHMID, M.; GRUBER, S.; BARAL, P.; SHAHI, S.; SHRESTHA, T.; WESTER, P. Manual for Mapping Rock Glaciers in Google Earth. Kathmandu: International Centre For Integrated Mountain Development (ICIMOD), 2015. 38 p. Disponível em: <http://lib.icimod.org/record/31653/files/RockGlacier_Manual.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2017.

SVAMPA, M. 2011. Modelos de desarrollo, cuestión ambiental y giro eco-territorial. In: ALIMONDA, H. (coord.). *La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina*. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. p.181-215.

TABRA, M.; ASTE, J. 2011. Minería y Territorio en el Perú: casos, temas y propuestas In: ALIMONDA, H. (coord.). *La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina*. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. Pp: 223-235.

TAILLANT, J. D. *Barrick's Glaciers: Technical Report on the Impacts by Barrick Gold on Glaciers and Periglacial Environments at Pascua Lama and Veladero*. Córdoba: Cedha, 2013. (Of the Mining and Glaciers Series (Center for Human Rights and Environment CEDHA). Disponível em: <<http://center-hre.org/wp-content/uploads/2013/05/Los-Glaciares-de-Barrick-Gold-version-20-mayo-2013-ENGLISH-small.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ULLOA, C.; PIÑA, A. G.; MILANA, J. 2017. Inventario de la criósfera en zonas áridas, con caso de estudio en la región de Atacama, Chile.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. SRTM 3. 2018a. Disponível em: <dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/>. Acesso em: 15 jan. 2018.

USGS. UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landsat 8. 2018b. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/landsat-8>>. Acesso em: 08 jul. 2018.

VALLON, M.; VINCENT, C. Balance invernal 2005 de los glaciares Esperanza, Toro 1, Toro 2 y Guanaco. Universidad José Fourier, Observatorio de Las Ciencias del Universo de Grenoble, Grenoble, p.1-26, out. 2005. Disponível em: <<http://center-hre.org/wp-content/uploads/2012/12/vallon-balance-toro-1-2y-esperanz-ANEXO-III-B.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

WAGNER, L.S.; GIRAUD, M. 2011. El proyecto minero Potasio Río Colorado: conflicto socioambiental, impactos regionales y falta de integralidad en la evaluación ambiental In: ALIMONDA, H. (coord.). La Natureza Colonizada: Ecología Política e mineração na América Latina. 1. ed. Buenos Aires, Argentina: CICCUS. p. 257-285.

WILLIAMS JR., R.S.; HALL, D. K.; BENSON, C. S. 1991. Analysis of glacier facies using satellite techniques. *Journal of Glaciology*, 37, (125): 120-128.10.

APÊNDICE

I. A paisagem glacial andina (*lato sensu*)

Conforme Clapperton (1994), em larga escala, a topografia do Chile evoluiu conforme a maior parte da região andina: através de tectônica cenozoica tardia e atividade vulcânica. Processos denudacionais moldaram a morfologia do relevo em escala menor de acordo com a interação climática.

Entretanto, a sobreposição da borda continental por uma parte flutuante da placa de Nazca levantou esse segmento dos Andes acima de uma altitude média de 4000 metros, culminando no Cerro Aconcágua de altitude de 6960 metros (CLAPPERTON, 1994).

Nota-se a variação do clima nos Andes chilenos de árido nas regiões tropicais e úmido em regiões de latitude 50°S. O regime de precipitação controla a altura da linha de neve (linha de equilíbrio) regional e local – determinando a distribuição das geleiras modernas (CLAPPERTON, 1994).

Conforme Garin (1987), em geral, se considera uma geleira como sendo uma acumulação sobre a terra de gelo perene que flui lentamente devido ao seu próprio peso até alturas inferiores. O autor destaca que no estudo das geleiras andinas chilenas, esta definição é difícil de aplicar, pois nem sempre estas estão configurados dessa maneira. Destaca que a transformação da neve em gelo é rápida, não podendo se reconhecer com facilidade o gelo de congelamento permanente. A variabilidade climática, no que pese à presença de precipitação, é bastante significativa – especialmente nas áreas mais áridas (GARIN, 1987).

Evidências da glaciação do Quaternário podem ser encontradas na região central e norte dos Andes Chilenos (CLAPPERTON, 1994). De acordo com Ferrando (2002), as características morfológica dos campos glaciais situados nesta região variam de geleiras de calota a geleiras de vale. O autor destaca que é necessário considerar, em termos gerais, que essas geleiras tinham a mesma configuração geográfica e topográfica ao longo da grande extensão latitudinal do Chile durante o início do Quaternário (FERRANDO, 2002). Durante esse período, a modelagem glacial progressiva das morfologias preexistentes foi acompanhada pela atividade vulcânica, que construiu múltiplos relevos e gerou depósitos piroclásticos que interagiram especialmente com as glaciações (FERRANDO, 2002; CLAPPERTON, 1994).

Conforme Ferrando (2002), os estudos geomorfológicos da faixa costeira correspondentes a esse período não consideram a origem glaciogênica em sua morfologia. Segundo o autor, a formação do gelo nos pontos mais altos do Chile central, durante glaciações mais pretéritas, a partir de precipitação sólida, que teria sido mais abundante e frequente do que registrado nos invernos atualmente – constituindo pequenos centros glaciais durante o Quaternário, embora não haja provas físicas de sua existência (FERRANDO, 2002).

Nesse sentido, as glaciações quaternárias no Chile tinham um caráter andino, mas se diferenciando em relação às temperaturas predominantes de acordo com a latitude. As tendências latitudinais acompanharam mudanças no balanço de massa (líquido e sólido) e no volume das geleiras. Este fato representou alterações morfológicas evidentes: (i) de geleiras de anfiteatro para geleiras de vale e piemonte (mais setentrional) e (ii) para campos de gelo, geleiras de calota e de maré na região mais meridional (FERRANDO, 2002).

De acordo com Ferrando (2002), há antecedentes suficientes para confirmar a ocorrência de pelo menos três fases glaciais quaternárias no Chile continental. Conforme estudos utilizando datação com Carbono 14, estas fases consolidaram-se contemporaneamente à glaciação *wurminiana*. Evidências dessa glaciação se encontram nos arcos morânicos dos grandes lagos no sul chileno (FERRANDO, 2002).

Depósitos morânicos da glaciação de Riss foram reconhecidos desde o vale do rio Elqui, na região semiárida, até a fronteira norte da ilha de Chiloé. A magnitude do fenômeno pode ser reconhecida: (i) no interior dos vales fluviais do Aconcágua, Mapocho e Maipo, a oeste dos lagos Llanquihue e Rupanco; e (ii) no nível superior de erosão glacial no setor arquipélago da região dos fiordes chilenos (FERRANDO, 2002).

A mais antiga glaciação evidente no Chile é possivelmente a glaciação de Mindel. Embora não haja datação para depósitos dessa glaciação, a decomposição total dos depósitos de fragmentos rochosos e a presença de grandes blocos de rocha erráticos parecem pertencer a Mindel, tendo em vista não serem encontradas essas características em depósitos glaciogênicos mais recentes (FERRANDO, 2002).

Na região árida, as glaciações estavam confinadas em cumes altos, passando de geleiras de pequenos corpos em forma de língua na ponta de vulcões à geleiras de circo (FERRANDO, 2002). A magnitude da precipitação sólida e o conseqüente crescimento dos corpos de gelo aumentando de acordo com a latitude, transformou corpos de gelo em forma de língua em geleiras de vale. A morfologia dos altos Andes e a existência de gelo remanescente (gelo intersticial, geleiras de rocha e geleiras enterradas) são testemunho desses processos (PASKOFF, 1970 *apud* FERRANDO, 2002).

As margens de gelo do Último Máximo Glacial (UMG) deixam de aparecer nas regiões andinas a partir de 37°S, projetando-se sobre a Depressão Central e originando grandes lagos de margens morânicas. Esse processo mascara os rastros da ação de glaciações pretéritas, soterrando-os a partir de processos erosão glacio-fluvial e ação vulcânica (FERRANDO, 2002). O autor (*op. cit.*) observa que glaciações mais antigas teriam atingido a costa a partir de 41°35'S; e, no caso da última glaciação, a partir de 42°40'S.

Mais ao sul, a partir de 43°30'S, a intensidade das glaciações gerou um forte desmembramento territorial, incluindo a Cordilheira dos Andes. Os vales glaciais foram invadidos pelo mar (tanto pelo forte afundamento quanto pelas mudanças no nível médio do mar), configurando a região dos arquipélagos, fiordes e canais (FERRANDO, 2002).

No extremo sul, na região do Estreito de Magalhães, testemunhos das glaciações quaternárias são encontrados a leste, avançando sobre a Patagônia chileno-argentina (FERRANDO, 2002).

Brüggen (1950, *apud* Ferrando, 2002) apontou a importância das glaciações quaternárias para a morfologia dos Andes central e meridional, especificando que ao sul do Rio Aconcágua (32° 30'S) predomina a morfologia de vales de alta montanha. Conforme o autor, as formas superficiais do vale longitudinal da Depressão Central chilena são resultantes de processos de sedimentação glaciológica das geleiras e de atividades fluvioglaciais. Na região de Los Lagos é predominante a existência de lagos represados por sedimentos morânicos (dragados pelas geleiras durante a última glaciação) depositados em profundas bacias (FERRANDO, 2002).

Ferrando (2002) propôs uma regionalização glacial do Chile continental a partir de seus estudos. Segundo o autor, as regiões glaciais chilenas são:

- a) **Região Desértica:** Se estende entre a parte mais setentrional do país até 29°30'S, aproximadamente no limite sul da bacia do rio Huasco. A morfologia regional possui características morfológicas da Cordilheira dos Andes e da Depressão Central do deserto, nas quais predominam formas modeladas pela precipitação pluviométrica e seu escoamento superficial, além de morfologias vulcânicas em 4000 metros de altitude acima do nível médio do mar (cones vulcânicos, caldeiras, fluxo de lava e campos de material piroclástico). Nas encostas mais altas dos cumes vulcânicos (acima de 4500 metros N.M.M.), Ferrando (2002) cita Hollinworth e Guest (1967) e outros autores que apontaram a presença de depósitos morânicos que pertencem à última glaciação. A linha de neve permanente se situava a 5000 metros acima N.M.M. durante a última era glacial conforme pode-se inferir pela existência da geleira de circo no vulcão Tacora (17° 43 'S - 69° 45'W - 5.450 metros acima do N.M.M.) e no vulcão Toconce (22° 11 'S - 68° 04 'W - 5.419 metros acima do N.M.M.) conforme Brüggen (1950 *apud* Ferrando, 2002; Clapperton, 1994). Esta região tem sido muito impactada por períodos pluviométricos ou ciclos durante a última glaciação e as frentes glaciais não atingiram altitudes inferiores a 3900 metros N.M.M. É rara a existência de vales não dissecados no planalto riolítico a 4000 metros N.M.M., sendo representados por uma morfologia remanescente da origem glacial. Todos se mostram como *cânions* com muitas paredes escarpadas, que correspondem à erosão com base em fluxos concentrados e torrenciais com quantidade suficiente de carga sedimentar em movimento. Os grandes depósitos sedimentares glaciais que preencheram esta depressão intermediária servem de testemunho da preponderância e magnitude dos processos de escoamento associados derivados do platô altiplano e ainda fluem em menor magnitude.
- b) **Região semiárida:** Se estende de 29°30'S a 33°S e são conhecidas como região "Norte Chico". A Depressão Central é substituída por uma cadeia montanhosa de altitudes variáveis entre 1000 e 2000 metros N.M.M., caracterizada por vales profundos dissecados de leste a oeste, associados ao vulcanismo ausente nesta parte da Cordilheira dos Andes. Embora o coeficiente altimétrico seja inferior comparado a outros nos Andes, podem ser observadas ocorrências de picos de altitude

superior a 5000 e 6000 metros N.M.M. Ferrando (2002) cita Paskoff (1970), cujos estudos demonstraram que as bacias elevadas dos rios Elqui e Limari (29°40' – 31°10') foram afetados por uma forte glaciação em um passado recente. Estas glaciações teriam estabelecido fluxos de gelo que dissecavam o relevo acima de 3500 metros N.M.M. – esses fluxos convergiram como corpos em forma de língua com dezenas de quilômetros de extensão, findando em 3000 metros N.M.M. – estes depósitos estão relacionados com a última glaciação do hemisfério sul, possivelmente contemporânea de Würm ou Wisconsin. A presença de resquícios de glaciações anteriores nesta região ainda é um tema controverso (FERRANDO, 2002).

- c) **Região central:** Entre 33° e 38°30'S. Estudos sobre glaciações quaternárias nesta área são incipientes. Provavelmente estão relacionadas à processos mais antigos e mais fortes – considerando-se até a possibilidade de uma glaciação máxima. O autor aponta que se deve considerar que geleiras de calota podem ter se formado em uma glaciação mais antiga (talvez Mindel) e que estas tenham avançado pela Depressão Central. Ferrando (2002) cita estudos da ENAP (Companhia Nacional de Petróleo) que sugeriram a existência de depósitos morânicos, cuja morfologia se encontra muito alterada – o que se leva a inferir que os depósitos de morainas estejam enterrados por sedimentos espessos carregados pela ação fluvial
- d) **Região dos lagos piemonte:** Entre 38°30' e 41°20'S, a magnitude das glaciações quaternárias conduzem as frentes de gelo *wurminiano* para os depósitos da Depressão Central e piemonte, progressivamente com o aumento da latitude. Geleiras de vale se tornaram de piemonte – a glaciação interna passa a ser externa. Corpos de gelo em forma de língua estendem-se em forma de leques frontais, preservando sua capacidade no transporte de sedimentos e formando depressões subglaciais. Conforme Ferrando (2002), no início dos processos de abrasão destas margens (caracterizadas por morainas frontais e laterais), essas depressões começam a se encher de água de degelo oriunda de gelo adjacente, originando grandes lagos – característicos dessa região.
- e) **Região de canais e fiordes:** A partir de 41°20' S. Devido ao afundamento da Depressão Central, as margens do gelo anterior à glaciação *wurminiana* avançam progressivamente a oeste, acompanhando o aumento de latitude, transgredindo a fronteira continental. Segundo Ferrando (*op. cit.*), do ponto de vista morfológico e orográfico, a Faixa Costeira praticamente desaparece na foz do rio Maulin (um rio tributário do Lago Llaquihue) ao norte. No que diz respeito à glaciações mais antigas, considerando-se as condições de rocha polida nos múltiplos arquipélagos da metade ocidental do Chile (de 44°S ao Cabo de Hornos) e as rochas erráticas no terreno: acredita-se que durante as glaciações Mindel e Riss, um tipo de glaciação na forma de um campo de gelo, precipitou dos cumes em direção ao mar (esfolando a superfície de formas costeiras pré-existentes). Ferrando e Muñoz (1979, *apud* FERRANDO, 2002), observaram em investigações geomorfológicas realizadas na Região de Aysen (44° a 49°30'S), que processos glaciais mais antigos poliram a superfície rochosa existente nos flancos andinos ocidentais. O resultado desse trabalho é visível nas partes central e mais alta dos sítios insulares. Numa primeira fase, a ação glacial, devido a sua grande cobertura de gelo

teria ignorado linhas estruturais mais frágeis; e num segundo momento, com maior intercorrência de geleiras individuais (somadas ao trabalho tectônico), teriam facilitado a escavação do terreno dando origem a vales glaciais de perfis transversais abertos e menos profundos. Os flancos dessas formações seriam representados atualmente pelas encostas das ilhas que separam as fronteiras da glaciação anterior, que atualmente se revelam em fiordes e canais.

II. A importância das geleiras de rocha na paisagem ambiental chilena

Conforme Brenning *et al.* (2009), a cordilheira chilena é uma das zonas de maior riqueza em geleiras rochosas a nível mundial. Estas geleiras representam um fenômeno pouco conhecido até recentemente no Chile (BRENNING *et al.* 2009).

O monitoramento da dinâmica das geleiras rochosas é necessário para determinar sua reação às mudanças climáticas, sua estabilidade e sua contribuição para o ciclo hidrológico. Nos Alpes houve uma aceleração e, em alguns casos, o colapso das geleiras rochosas, possivelmente relacionado ao aquecimento do clima. No caso dos Andes, os dados sobre a dinâmica atual das geleiras rochosas ainda são escassos (BRENNING *et al.* 2009).

As geleiras rochosas são expressões geomorfológicas do *permafrost*, sendo representadas por aproximadamente 40 a 70% de volume de gelo e uma capa de detritos superficial (BRENNING, *et al.* 2009). De acordo com os autores, as geleiras de rocha no Chile existem principalmente em áreas de precipitação invernal entre as latitudes 27° e 35,25°S, sua distribuição é contínua ao norte da diagonal árida sul-americana em áreas de precipitações tropicais de verão e na Patagônia entre as latitudes 45° e 50°S aproximadamente.

De acordo com Brenning *et al.* 2009, esta interrupção na distribuição espacial de geleiras de rocha no Chile se atribui a uma combinação de fatores climáticos, topográficos e vulcânicos. O limite inferior da distribuição de geleiras de rocha no Chile central entre os 27 e 35°S está relacionado a altura da isoterma de temperatura média anual de 0°C. O limite superior latitudinal demonstra geleiras rochosas ativas na macrozona de Santiago em altitudes de temperaturas médias superiores a 0°C (até 4°C). Sua existência é atribuída a efeitos topográficos e climáticos locais além de uma reação retardada do *permafrost* de montanha ao aumento da temperatura média.

Segundo Brenning (2008), as geleiras e geleiras de rocha constituem os principais reservatórios de água no semiárido chileno, abastecendo regiões estratégicas como Santiago (Chile) e Mendoza (Argentina), além de fornecer suprimento de água para irrigação. As geleiras rochosas na região da Cordilheira de Santiago representam um importante papel no aporte de recursos hídricos e no transporte de sedimentos de alta montanha no semiárido chileno. A importância desses corpos de detritos e gelo nos sistemas geomorfológicos e hidrológicos é representada como exemplo no *Cajon de la Casa de Piedra*. A sub-bacia do rio Yeso está localizada perto do reservatório de El Yeso, que é de grande importância para o fornecimento de água de Santiago (BRENNING *et al.* 2003).

A importância das geleiras de rocha como reservatório varia entre diversas zonas de alta montanha no mundo, considerando sua disponibilidade e a magnitude da glaciação atual (BRENNING; AZÓCAR, 2010). Nas regiões montanhosas áridas e semiáridas da Cordilheira do Andes, a importância desses reservatórios é maior devido a presença de uma grande quantidade de geleiras de rocha de diversas formas e tamanhos. Os autores ressaltam que essa forma de geleira pode armazenar maiores quantidades de água do que as geleiras descobertas ou brancas (BRENNING, AZÓCAR, 2010).

A importância das geleiras de rocha além de sua capacidade como reservatório de água potável, são sua contribuição para a regulação do clima e seu conteúdo de informação sobre o passado geológico e climático. Essas paisagens também são importantes para o turismo local (BRENNING; AZÓCAR, 2010).

Apesar de as geleiras de rocha serem importantes reservatórios de água no semiárido chileno, representando uma alternativa para os meses secos de verão de mais de 20 milhões de metros cúbicos, são formações que se encontram ameaçadas pela atividade de mineração (BRENNING, *et al.* 2009). Brenning e Azócar (2010) distinguiram três tipos principais de intervenções em geleiras de rocha: (i) remoção completa ou parcial; (ii) construção de depósitos de rocha estéril de baixa seleção descartados sobre as geleiras de rocha e; (iii) construção de infraestrutura na área das geleiras, principalmente sobre o gelo.

De acordo com Brenning e Azócar (2010), o principal efeito da remoção de geleiras de rocha está na perda irreversível de um recurso hídrico não renovável. Também observa-se que são eliminados do sistema hidrológico, componentes importantes na manutenção dos rios durante os períodos de verão e nos anos de temperaturas mais quentes (BRENNING; AZÓCAR, 2010).

A deposição de rejeitos de rocha sobre as geleiras rochosas tem como consequência mudanças na sua dinâmica e assim na estabilidade da forma – a curto e médio prazo (BRENNING; AZÓCAR, 2010). A longo prazo (décadas e séculos), a possível degradação da camada de *permafrost* das geleiras de rocha por efeitos geotérmicos e geoquímicos (drenagem de rocha ácida) tem consequências incalculáveis para a estabilidade da formação glacial (BRENNING; AZÓCAR, 2010). Conforme os autores, o colapso de geleiras rochosas cobertas com rejeitos de mineração causa danos ambientais graves nas adjacências: podendo espalhar-se por grandes distâncias e provocar movimentos de massa que podem afetar ocupações humanas.

A construção de estradas e infraestruturas em áreas de geleiras de rocha também pode afetar o balanço energético do *permafrost* através da compactação e remoção vertical e horizontal do material resultando na degradação do solo congelado. Deve-se considerar ainda o dano que possível possa causar às estruturas construídas a partir de deslizamentos de massa provocados pela instabilidade estrutural do *permafrost* – arriscando a vida de trabalhadores no local (BRENNING; AZÓCAR, 2010).