UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO GEOLOGIA MARINHA

DETERMINAÇÃO DAS VARIAÇÕES DAS GELEIRAS DA CORDILHEIRA TRES CRUCES (BOLÍVIA) ENTRE 1975−2004 PELA ANÁLISE DE IMAGENS DIGITAIS E DADOS CARTOGRÁFICOS

Rafael da Rocha Ribeiro

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jefferson Cardia Simões

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Edson Ramirez (UMSA)

BANCA EXAMINADORA:
Prof. Dr. Alberto Waingort Setzer (INPE)
Prof. Dr. Alexandre Lima Correia (USP)
Prof. Dr. Nelson Luiz Sambaqui Gruber (UFRGS)

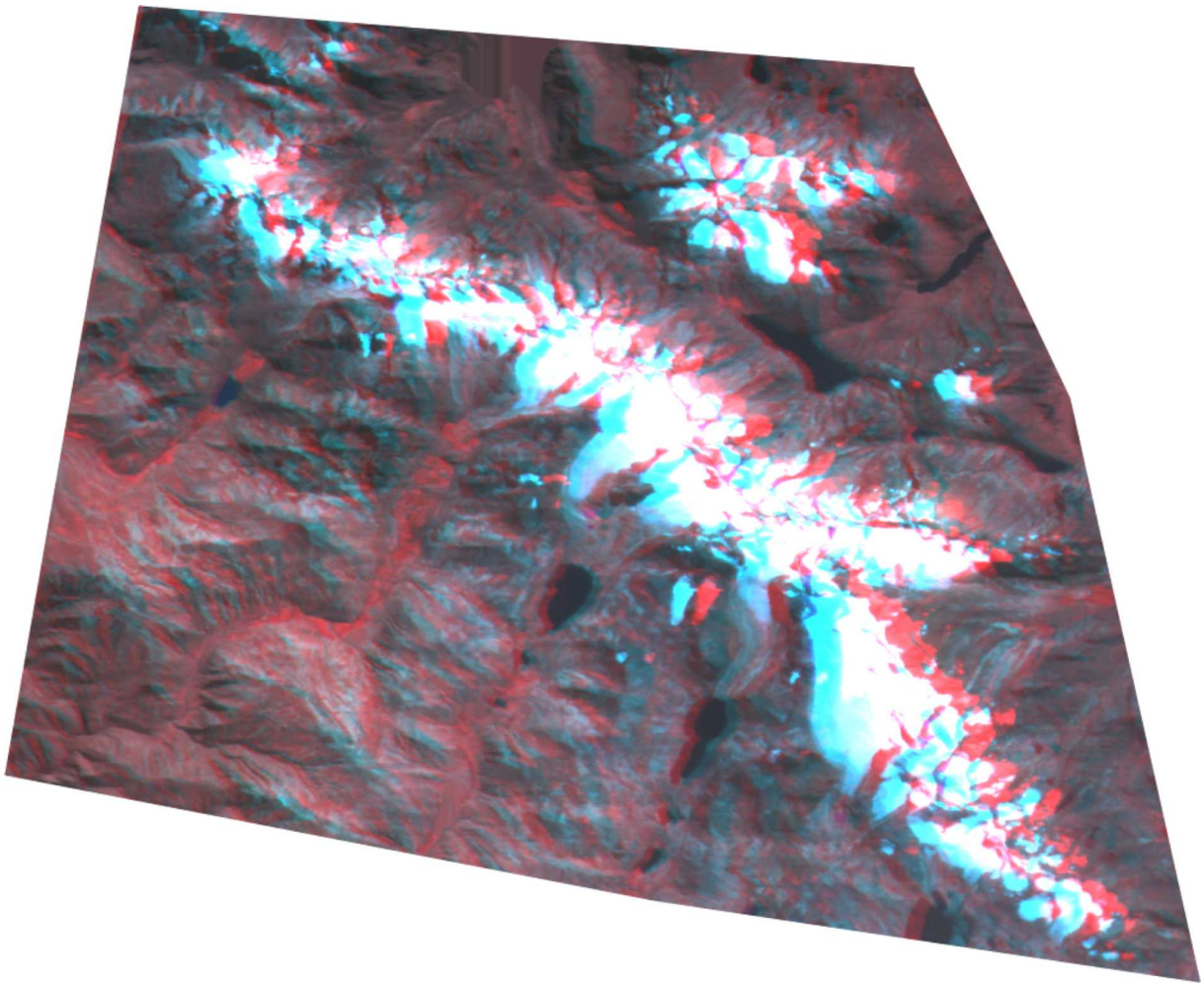
Dissertação de Mestrado apresentada como requisito
para obtenção do Título de Mestre em Geociências

Porto Alegre - 2007

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.



Anaglifo da cordilheira Tres Cruces,
imagem CBERS-2 maio de 2004

à Medina, Kátia & Sônia

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Jefferson Cardia Simões, por acreditar desde o início neste projeto, principalmente adquirindo livros específicos, mapas, imagens e disponibilizando a estrutura do NUPAC para a realização desta dissertação. Pela constante troca de idéias e paciência nas correções.

Ao co-orientador Edson Ramirez, pelos esclarecimentos sobre o tema, tornando disponíveis os dados de precipitação junto ao SENAMHI e pela acolhida na cidade de La Paz.

Aos colegas Jorge Arigony Neto pelas imagens ASTER e pelo incentivo deste a época do LAPAG no CECO; Cláudio Wilson; Ildo; Rose; Ulisses e Norberto Dani.

À UNESCO pelo apoio financeiro na participação do curso "*Taller Interandino de Glaciologia*", realizado na cidade de La Paz.

Especialmente *à* Ekkehard Jordan por ter gentilmente disponibilizado seus mapas topográficos.

RESUMO

Este estudo levantou, por técnicas de sensoriamento remoto, uma área piloto (cordilheira Tres Cruces, localizada entre 67º22'–67º32'W e 16º47'–16º09'S) da cobertura de gelo boliviana. Foram examinadas as antigas posições frontais de algumas geleiras dessa cordilheira, através da análise de imagens satelitais, dados cartográficos, e pelo cálculo de mudança na espessura do gelo (diferenças de volume e elevação). O monitoramento foi efetuado entre os anos de 1975 e 2004 (29 anos) nas geleiras: Jankho Loma, San Enrique, Laramkkota, Malla Chuma, Campanani, Jacha Pacuni e c5250. No geral, a partir de 1975, as frentes das geleiras diminuíram em todas as direções, as retrações máximas e mínimas das frentes de gelo foram de 437 m (Laramkkota) e 181 m (San Enrique). O recuo médio das 7 geleiras estudadas foi de aproximadamente 12 m a^{-1}. Nas áreas cobertas por gelo na cordilheira, em média, ocorreu uma redução de 18% em 29 anos, ou seja, aproximadamente - 0,009 km^2 a^{-1}. Neste período a geleira c5250 foi a que teve a maior perda relativa (cerca de 50% de sua área). Por outro lado, a geleira Campanani, de maior superfície, foi a que perdeu proporcionalmente menor área (6% do total). A linha de neve foi determinada para o ano de 2004 a 5.300 m de altitude, sendo utilizada para calcular a proporção entre a superfície da área de acumulação e a área total da geleira. Todas geleiras analisadas apresentavam uma proporção da área de acumulação maior do que 60% em 2004. A análise dos modelos digitais de elevação indicou redução geral no volume de gelo durante o período, apresentando uma perda média de aproximadamente 1,55 m equivalente água a^{-1}. A retração das massas glaciais da cordilheira Tres Cruces é consistente com o aquecimento atmosférico regional e com redução generalizada das geleiras nos Trópicos.

ABSTRACT

This study has surveyed, by remote sensing techniques, a pilot area of the Bolivian Andes ice cover, located at the Tres Cruces cordillera (67º22'–67º32'W e 16º47'–16º09'S). Analyses of satellite imagery, cartographic data and ice thickness changes estimation (differences of volume and elevation) have provided information on past front positions of some glaciers of this cordillera. Monitoring was carried out from 1975 to 2004 (29 years) for the following glaciers: Jankho Loma, San Enrique, Laramkkota, Malla Chuma, Campanani, Jacha Pacuni and c5250, including a total ice covered area of 13.7 km^2. Generally, from 1975 onwards, glaciers fronts have receded, maximum and minimum ice front retreats were 437 m (Laramkkota) and 181 m (San Enrique). The mean retreat for the 7 studied glaciers was approximately 12 m a^{-1}. In average, these glaciers lost 18% of their total areas along 29 years (i.e., a loss of approximately of 0.009 km^2 a^{-1}). In this period, the c5250 glacier (0.48 km^2 in 1975) was the one with the greatest relative loss (about 50% of its total area). On the other hand, the Campanani glacier, the largest one (4.26 km^2 in 1975), was the one that lost the smallest proportional area (6% of its total area). The snow line in 2004, determined at 5,300 m of altitude, was used to calculate the proportion between the accumulation and total areas in each glacier. All studied glaciers had, in 2004, an accumulation area proportion greater than 60%. Analyses of the elevation digital models (EDMs) point to a general reduction of the ice volume during the period, in average 1.55 m water equivalent a^{-1}. The ice masses retreat in the Tres Cruces Cordillera is concomitant to a regional atmospheric warming and with the general reduction of glaciers in the Tropics.

SUMÁRIO

Pág.

Capa..... i
Frontispício..... ii
Dedicatória..... iii
Agradecimentos..... iv
Resumo..... v
Abstract..... vi
Sumário..... vii
Lista de Figuras..... x
Lista de Tabelas..... xii
Lista de Abreviaturas..... xiii

Capítulo 1. Introdução

1.1. Introdução..... 01
1.2. Objetivo..... 03
1.3. Relevância do Estudo..... 03
1.4. Localização da área de estudo..... 04
1.5. A dinâmica das geleiras..... 04
1.6. A erosão glacial e as formas do relevo..... 09
1.7. As fácies superficiais das geleiras..... 11
1.8. Interpretação glaciológica a partir de imagens satelitais..... 12

Capítulo 2. As geleiras tropicais dos Andes Boliviano

2.1. Introdução..... 16
2.2. Delimitação dos trópicos..... 16
2.3. As geleiras nos trópicos..... 18
2.3.1. Distribuição..... 18
2.3.2. Características gerais..... 18
2.3.3. O balanço energético..... 19

2.3.4. Tipos de geleiras..... 22
2.4. A Bolívia no quadro climático da América do Sul..... 23
2.4.1. Circulação atmosférica..... 23
2.4.2. O clima boliviano..... 23
2.4.3. A variabilidade climática regional..... 24
2.5. A glaciação andina..... 27
2.5.1. Regimes glaciais nos Andes tropicais..... 27
2.5.2. A geologia dos Andes boliviano..... 29
2.5.3. As geleiras dos Andes boliviano..... 29
2.6. A Cordilheira Oriental..... 31
2.6.1. Características geomorfológicas..... 31
2.6.2. A cordilheira Tres Cruces..... 34

Capítulo 3. Materiais e Métodos

3.1. Introdução..... 36
3.2. Materiais..... 36
3.2.1. Aplicativos computacionais..... 36
3.2.2. Base de dados digitais..... 36
3.2.2.1. *Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*..... 36
3.2.2.2. *China-Brazil Earth-Resources Satellite*..... 37
3.2.2.3. *Landsat Thematic Mapper*..... 38
3.2.3. Base de dados cartográficos..... 39
3.2.4. Base de dados climatológicos..... 40
3.3. Métodos..... 41
3.3.1. Análise multitemporal dos dados orbitais e cartográficos..... 42
3.3.1.1. Tratamento e georreferenciamento das imagens satelitais..... 42
3.3.1.2. Determinação de mudanças na área, das posições das frentes e da altitude da linha de neve..... 44
3.3.1.3. Classificação das geleiras de acordo com as classes morfológicas utilizadas pelo *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS)..... 46
3.3.2. Determinação do volume e elevação das geleiras usando modelos digitais de elevação..... 46

3.3.2.1. Geração de modelos digitais de elevação através de dados cartográficos..... 47
3.3.2.2. Topografia da superfície glacial a partir das imagens ASTER..... 49
3.3.3. Cálculo da mudança de elevação..... 50
3.3.4. Determinação das variações na altitude da linha de neve e cálculo da proporção da área de acumulação (PAC) entre 1985 e 2004..... 50
3.3.5. Análise dos dados climáticos..... 51

Capítulo 4. Resultados e Discussões

4.1. Introdução..... 53
4.2. Delimitação das bacias de drenagem..... 53
4.3. Determinação da posição e altitude das frentes das geleiras..... 53
4.4. Determinação das áreas das bacias de drenagem..... 55
4.5. Determinação das variações na altitude da linha de neve e do cálculo da proporção da área de acumulação (PAC) para 2004..... 62
4.6. Mudanças no volume das geleiras..... 64
4.7. Morfologia das geleiras..... 67
4.7.1. Morfologia da geleira Jankho Loma..... 68
4.7.2. Morfologia da geleira San Enrique..... 70
4.7.3. Morfologia da geleira Malla Chuma..... 70
4.7.4. Morfologia da geleira Laramkkota..... 71
4.7.5. Morfologia da geleira Campanani..... 71
4.7.6. Morfologia da geleira Jacha Pacuni..... 71
4.7.7. Morfologia da geleira c5250..... 78
4.8. Análise climática na região de estudo..... 78
4.9. Discussão..... 81

Capítulo 5. Conclusões

5.1. Conclusões..... 85

Referências Bibliográficas..... 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Prováveis efeitos do derretimento das geleiras de montanha sobre o aumento do nível médio dos mares ao longo do século XX..... 02
Figura 1.2. Localização da área de estudo na América do Sul; e a localização da cordilheira Tres Cruces no contexto do território boliviano..... 05
Figura 1.3. Principais bacias hidrológicas da Bolívia..... 06
Figura 1.4. A dinâmica das geleiras de vale..... 07
Figura 1.5. A dinâmica de uma geleira de vale..... 08
Figura 1.6. As principais formas do relevo produzidas por geleiras de vale..... 10
Figura 1.7. Perfil longitudinal de uma geleira..... 12
Figura 1.8. Sistemas que compõem o sensoriamento remoto passivo..... 13
Figura 1.9. Curva de reflectância espectral da neve..... 13
Figura 1.10. Curvas de reflectância espectral para a neve e o gelo em diferentes estágios de formação 14
Figura 1.11. Reflectância espectral da neve entre 0,4 e 2,4 μm em função dos diferentes tamanhos dos grãos..... 15
Figura 1.12. Perfil longitudinal de uma geleira mostrando suas fácies superficiais identificadas conforme a resposta espectral..... 15
Figura 2.1. Os trópicos..... 17
Figura 2.2. Diferentes regimes glaciais encontrados nos trópicos..... 17
Figura 2.3. Esquema representando os principais processos que controlam o balanço enérgico das geleiras tropicais..... 21
Figura 2.4. Sistema de circulação geral da atmosfera na América do Sul..... 25
Figura 2.5. Média anual de precipitação e temperatura..... 26
Figura 2.6. As principais montanhas tropicais dos Andes..... 28
Figura 2.7. A altitude da linha de equilíbrio..... 28
Figura 2.8. As principais províncias estruturais dos Andes bolivianos..... 30
Figura 2.9. Localização dos principais grupos de montanha bolivianos com geleiras..... 32
Figura 2.10. Esquema morfoestratigráfico representando as 10 principais morainas identificadas na Cordilheira Oriental..... 34
Figura 2.11. Posição das morainas terminais, desde o Último Máximo Glacial..... 35
Figura 3.1. Os valores do Índice ENOS multivariado..... 40

Figura 3.2. Fluxograma do desenvolvimento dos trabalhos desta dissertação..... 41
Figura 3.3. A cordilheira Tres Cruces..... 45
Figura 3.4. Modelo digital de elevação para o ano de 1975..... 47
Figura 3.5. Modelo digital de elevação para o ano de 2004..... 49
Figura 3.6. Série temporal da temperatura do ar a 500 hPa entre 1975 e 2004..... 52
Figura 3.7. Precipitação anual entre 1975 e 2004..... 52
Figura 4.1. Imagem do satélite CBERS-2, banda 4, maio de 2004..... 54
Figura 4.2. Extensão das geleiras da cordilheira Tres Cruces em 1975, 1985, 1992, 2004..... 57
Figura 4.3. Variações da extensão das geleiras..... 58
Figura 4.4. Mudança de altitude do término das geleiras..... 58
Figura 4.5. Variações na área das geleiras da cordilheira Tres Cruces..... 60
Figura 4.6. Análise da bacia glacial da geleira c5250..... 60
Figura 4.7. Dificuldade de diferenciar as zonas de gelo sobreposto das fácies de neve na composição colorida da imagem CBERS-2..... 63
Figura 4.8. Perda do volume de gelo entre 1975 e 2004..... 65
Figura 4.9. Comparação dos perfis topográficos..... 66
Figura 4.10. Visada sudeste da cordilheira Tres Cruces..... 67
Figura 4.11. Mapa de declividade da cordilheira Tres Cruces..... 69
Figura 4.12. Perfil topográfico..... 69
Figura 4.13. Perfil topográfico..... 70
Figura 4.14. Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) das geleiras Jankho Loma, San Enrique e Malla Chuma..... 72
Figura 4.15. Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Laramkkota..... 73
Figura 4.16. Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Campanani..... 74
Figura 4.17. Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Jacha Pacuni..... 75
Figura 4.18. Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira c 5250..... 76
Figura 4.19. Temperaturas médias mensais no período entre 1975–2004..... 79
Figura 4.20. Média da participação mensal (1993–2004) na precipitação..... 79
Figura 4.21. Gráfico da temperatura mensal média e o Índice Multivariado de ENOS.... 80
Figura 4.22. Gráfico da precipitação mensal e Índice Multivariado de ENOS (entre 1993–2004)..... 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Distribuição das geleiras nos trópicos..... 18
Tabela 2.2. Dados para quatro geleiras tropicais..... 20
Tabela 2.3. Principais características das geleiras tropicais..... 22
Tabela 2.4. Principais montanhas com geleiras na Bolívia..... 33
Tabela 2.5. Datação liquinométrica dos principais grupos de morainas..... 35
Tabela 3.1. Os *softwares* utilizados no estudo e suas aplicações..... 37
Tabela 3.2. Características das bandas do satélite ASTER..... 37
Tabela 3.3. Características das bandas do satélite CBERS-2..... 38
Tabela 3.4. As bandas e características das imagens LANDSAT..... 39
Tabela 3.5. Cenas de trabalho e data de aquisição..... 42
Tabela 3.6. Diferentes composições utilizadas para as cenas de trabalho..... 44
Tabela 3.7. Parâmetros utilizados na classificação do GLIMS..... 48
Tabela 4.1. Precisão na determinação da posição do término das geleiras..... 55
Tabela 4.2. Mudanças no comprimento das geleiras entre 1975 e 2004..... 56
Tabela 4.3. Erros na determinação de áreas nas imagens satelitais usadas nesta dissertação..... 59
Tabela 4.4. Mudanças de área das geleiras..... 61
Tabela 4.5. Área total, de acumulação e de ablação de sete geleiras da cordilheira Tres Cruces em maio de 2004..... 63
Tabela 4.6. Estimativas das mudanças no volume..... 64
Tabela 4.7. Classificação morfológica de acordo com as características do GLIMS..... 77
Tabela 4.8. Anos em que a precipitação total ficou abaixo da média anual e aqueles em que a precipitação supera a média..... 81

LISTA DE ABREVIATURAS

ALE -Altitude da Linha de Equilíbrio

ASTER -*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CBERS -*China-Brazil Earth-Resources Satellite*

CCD -*Charge Clouped Device*

CIRES -*Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences*

ENOS -*El Nino-Oscilação do Sul*

EPT -Erro na Posição do Término

GLIMS -*Global Land Ice Measurements from Space*

IGM -Instituto Geográfico Militar da Bolívia

IME -Índice Multivariado de ENOS

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC -*Intergovernmental Panel on Climate Change*

LANDSAT -*Land satellite*

LAPAG -Laboratório de Pesquisas Antárticas e Glaciológicas

MDE -Modelo Digital de Elevação

MSS -*Multispectral Scanner Satellite*

NUPAC -Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas

NCAR -*National Center for Atmospheric Research*

NCEP -*National Centers for Environmental Prediction*

NOAA -*National Oceanic and Atmospheric Administration*

PAC -Proporção da Área de Acumulação

SENAMHI -Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia da Bolívia

SIG -Sistema de Informações Geográficas

TM -*Thematic Mapper*

USGS -*United States Geological Services*

UTM -*Universal Transversa de Mercator*

UMSA - *Universidad Mayor de San Andres*

UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*

UFRGS - *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

WGMS -*World Glacier Monitoring Service*

WGS 84 -*World Geodetic System 1984*

ZCIT -Zona de Convergência Intertropical

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

As geleiras desempenham um importante papel no sistema hidrológico e socioeconômico de muitos países. Elas são essenciais para abastecer as comunidades locais de água para o consumo; produzir energia em pequenas centrais hidroelétricas; suprir água para a agricultura; assim como são de grande valor paisagístico para o turismo. Em La Paz (Bolívia), por exemplo, 70% da água utilizada pela população provêm destas fontes (Ramirez *et al.*, 2006).

De maneira geral, durante o século XX, as geleiras perderam parte de suas massas (Dyurgerov e Meier*,* 2000). Segundo Church *et al.* (2001) este fenômeno decorre do aumento da temperatura média atmosférica, que, associada à expansão térmica das águas oceânicas, contribuiu para o aumento do nível dos mares no último século (figura 1). Projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC, 2001) indicam que mantidos os atuais índices de emissão de gases estufa, a temperatura média da Terra irá crescer entre 1,5 e 5,8ºC nos próximos 100 anos, aumentando o derretimento das geleiras e conseqüentemente o nível médio dos mares (entre 15 e 85 cm; IPCC, 2001), causando prejuízos econômicos na ordem de bilhões de dólares (Titus *et al.,* 1991).

As geleiras de montanha[1], mesmo constituindo apenas 1% do volume da criosfera, contribuíram com 25% do aumento do nível médio dos mares entre 1988 e 1998 (Dyurgerov e Meier, 2004). Portanto, além da relevância socioeconômica, essas geleiras são consideradas para o IPCC (2001) importantes controladoras do nível médio dos mares.

[1] *Qualquer geleira que é confinada pelas paredes de um vale de montanha, também chamada de geleira de vale (http://nsidc.org/cgi-bin/words/topic.pl).*

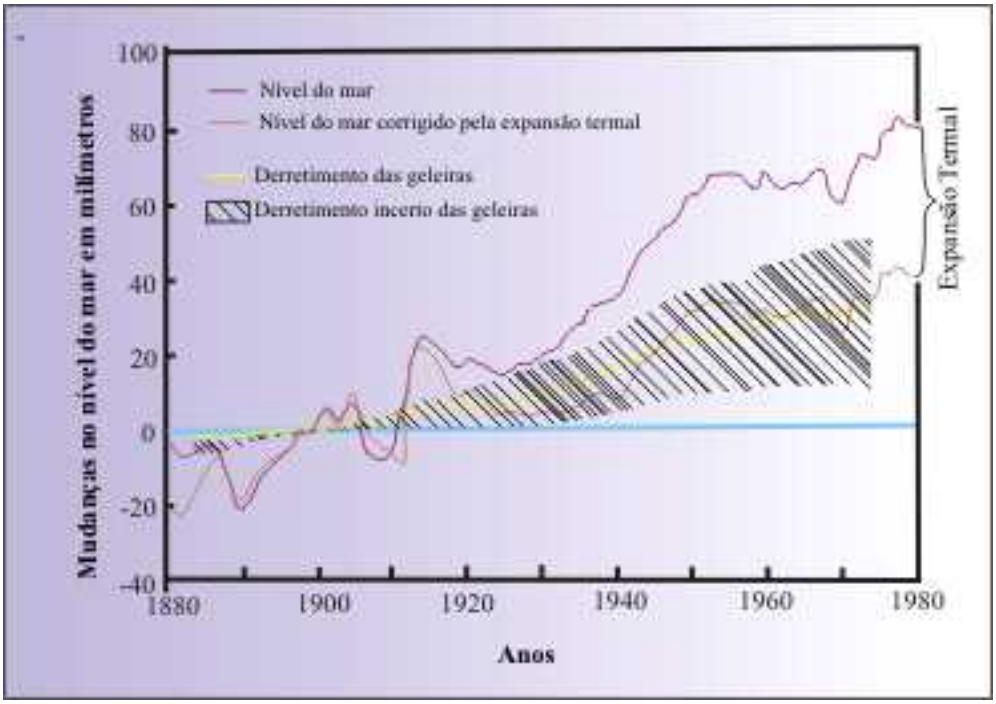


Figura 1 : Prováveis efeitos do derretimento das geleiras de montanha sobre o aumento do nível médio dos mares ao longo do século XX (adaptado de Meier, 1984).

Muitas geleiras localizam-se em áreas remotas, o que torna as medidas no terreno muito caras e de grande dificuldade logística. Uma alternativa a esses métodos resulta da integração de dados obtidos em campo com dados de sensoriamento remoto (Reinhardt e Rentcsh, 1986). Alguns desses métodos "alternativos" são: medições em diferentes épocas da extensão e altitude da parte frontal das geleiras, através de imagens satelitais; ou cálculo de mudanças na espessura do gelo utilizando modelos digitais de elevação (MDEs).

Neste estudo vamos considerar a geleira como um ente hidrológico, cuja massa muda em curto prazo (anos) em função das características do clima (Francou *et al.,* 2004a). Tanto o seu avanço como o recuo, além da perda ou ganho de volume, serão utilizados como parâmetros para o seu monitoramento. A análise será centrada na medida, em diferentes épocas, da superfície, extensão e volume glaciais.

1.2. Objetivo

O uso de imagens satelitais no estudo e interpretação de feições glaciais das geleiras sul-americanas foi primeiramente publicado em *USGS Satellite Image Atlas of Glaciers of the World-South America* (Williams e Ferrigno, 1998), no qual medidas como variações na velocidade, altitude da linha de neve, e frentes das geleiras não foram abordados para as massas glaciais bolivianas.

Os inventários existem para aproximadamente 40% de todas as geleiras do mundo (Meier e Bahr, 1996) e a inexistência de um referente às geleiras bolivianas foi, portanto o grande motivador desta dissertação.

Este estudo então propõe levantar por técnicas de sensoriamento remoto uma área piloto (cordilheira Tres Cruces) da cobertura de gelo boliviana. São examinadas as antigas posições frontais de algumas geleiras dessa cordilheira, através da análise de imagens satelitais, dados cartográficos, e pelo cálculo de mudança na espessura do gelo (diferenças de volume e elevação).

1.3. Relevância do Estudo

As águas de degelo das geleiras tropicais são utilizadas para o consumo, agricultura, hidroeletricidade, atividade mineradora e projetos agroindustriais, desempenhando um papel central no desenvolvimento socioeconômico de muitas regiões (Ramirez *et al.,* 2006). A crescente redução destas reservas de água doce causa grande preocupação, não só quanto à futura disponibilidade dos recursos hídricos, mas como isso poderá afetar as bacias hidrográficas alimentadas pelo escoamento das águas de degelo (por exemplo, a do Amazonas). A intensificação nos índices de escoamento afeta diretamente os componentes do balanço hídrico regional (Meier e Dyurgerov, 2002). Este estudo busca auxiliar na gestão dos recursos hídricos, ampliando o conhecimento do quão rápido e como os processos de deglaciação estão afetando os Andes boliviano.

1.4. Localização da área de estudo

O estudo foi realizado na cordilheira Tres Cruces (Quimsa Cruz em Aymara), Bolívia (entre 67º22' - 67º32'W e 16º47'- 16º09'S), a qual tem aproximadamente 35 km de comprimento e 10 km de largura. Está a cerca de 150 km ao sul da cidade de La Paz. Inicia a sudeste do rio La Paz, estendendo-se até a cidade de Ventillaque (figura 2).

Em 1975 sua superfície glacial foi estimada em 39 km², distribuídos em 156 geleiras (Jordan, 1988). Também são encontradas diversas lagunas, sendo as mais extensas: Huallatani, Laramkkota, Octa Kkota e Chatamarca. Quatro pequenas centrais hidroelétricas distribuem-se ao longo do rio Minguillas, onde suas nascentes formam-se pela água de derretimento de algumas geleiras da cordilheira. É uma região com relevo bastante acidentado, possuindo vários picos acima de 5.000 m de altitude. O mais elevado é chamado Jachancuncollo, com uma altitude de 5.900 m; o segundo mais alto é o Gigante Grande, com 5.807 m. A atividade de mineração da casserita é bastante intensa, nas minas de Caracoles, Malachuma, Argentina e Villoca.

No sistema hidrológico da América do Sul, as geleiras da cordilheira Tres Cruces desempenham um importante papel, onde a água de derretimento anual de suas massas de gelo tanto das vertentes de orientação oeste, como as de leste, flui em direção ao rio Bene, este é um dos afluentes do rio Madeira, sendo uma das nascentes do rio Amazonas (figura 3).

1.5. A dinâmica das geleiras

Segundo Paterson (1994), as geleiras são produtos do clima e da topografia e se formam pela precipitação direta de neve, gelo, chuva ou mesmo avalanchas de rocha. Para que esse material se acumule através do tempo, é necessária que a quantidade precipitada durante os meses úmidos seja superior à quantidade de material perdido por fusão ou evaporação (estes processos são conhecidos como ablação) durante os meses secos. A cada ano que passa, vai se acumulando uma massa de neve nova sobre a já existente, esta, por sua vez, vai sendo comprimida até se converter em gelo cristalino. Quando este gelo ultrapassa 60 m de espessura, seus níveis inferiores passam a ter comportamento visco-plástico deformando-se internamente e deslizando para baixo (figura 4).

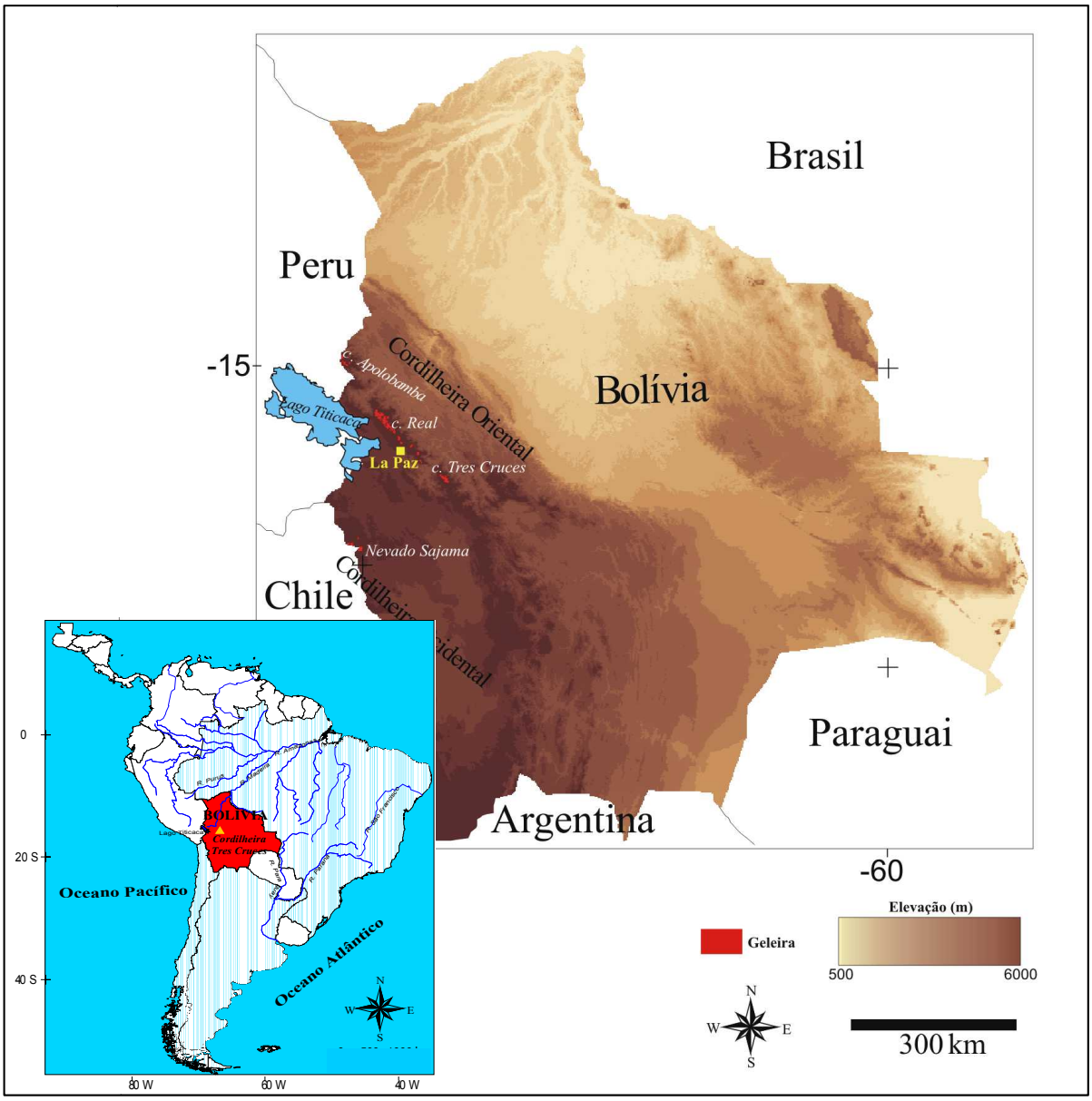


Figura 2 : Localização da área de estudo na América do Sul (esquerda); e a localização da cordilheira Tres Cruces no contexto do território boliviano (direita).

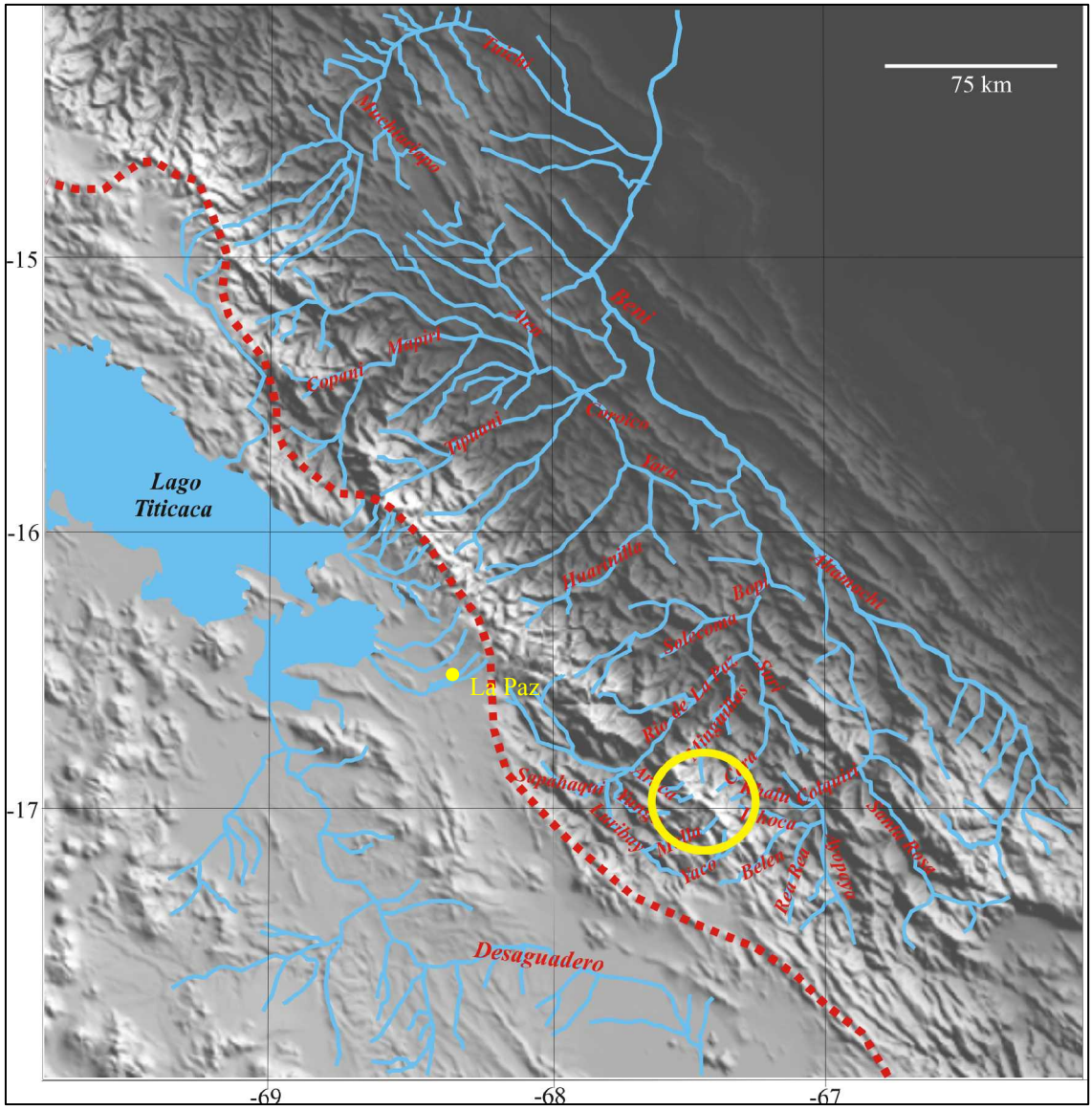


Figura 3 : Principais bacias hidrológicas da Bolívia; a linha pontilhada vermelha divide o sistema amazônico (para leste), do sistema Altiplano (para oeste) (Jordan, 1991), a cordilheira Tres Cruces está indicada pelo círculo amarelo.

Para Paterson (1994), determinados fatores controlam esse mecanismo que recebe o nome de deformação interna: a densidade do gelo, a aceleração da gravidade, a espessura da geleira e a declividade do terreno. Outro mecanismo que influência na velocidade da geleira chama-se deslizamento basal, que consiste no derretimento e deslizamento do gelo sobre um filme de água, na interface gelo-rocha.

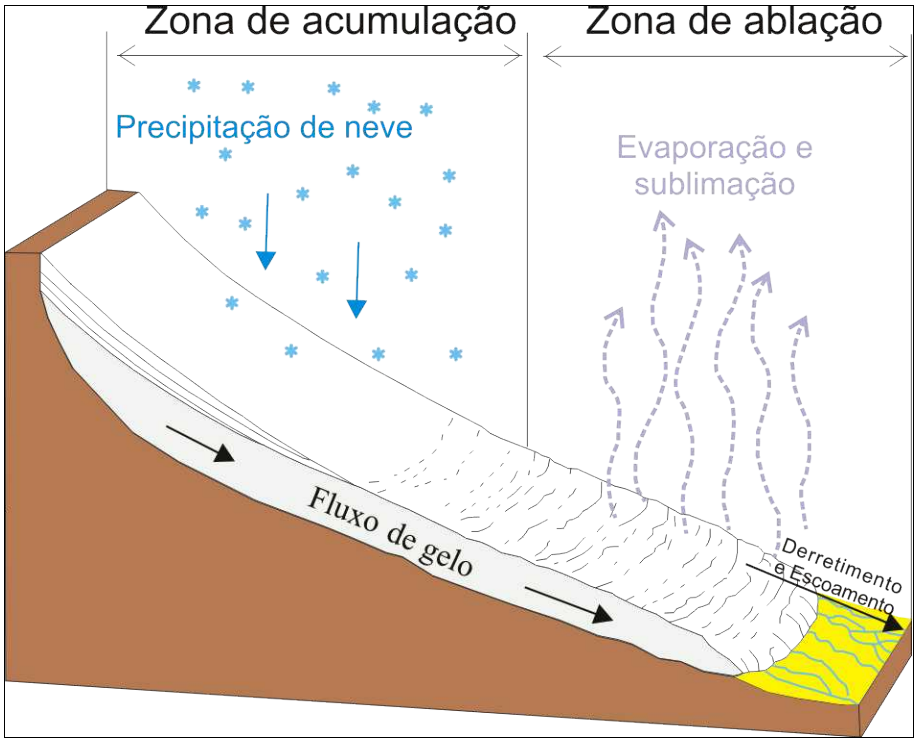


Figura 4 : A dinâmica das geleiras de vale (adaptado de Straller e Straller, 2003).

A dinâmica consiste em transferir o excesso de massa gerado em níveis superiores para inferiores. Uma geleira de vale (ver seção 2.3.4) tem maior velocidade nas áreas centrais e próximas a superfície, do que nas laterais e próximos ao substrato (figura 5), uma vez que quanto mais distante de uma superfície de contato (rocha) menor será o cisalhamento com esta (Paterson, 1994).

No conjunto, uma geleira é um sistema que tende a um estado equilíbrio (*steady-state*), onde a acumulação total nas partes superiores é igual à ablação na parte inferior (Menzies, 1995). O fluxo de gelo tende a manter-se constante longitudinalmente e na área transversal da geleira. Este equilíbrio se rompe ao variar o balanço anual de acumulação e ablação. Em caso de balanço positivo, o excesso de massa causa aumento da espessura e velocidade da geleira,

tendo como conseqüência avanço de sua frente, ao contrário, com a diminuição da espessura e velocidade, a geleira se retrai.

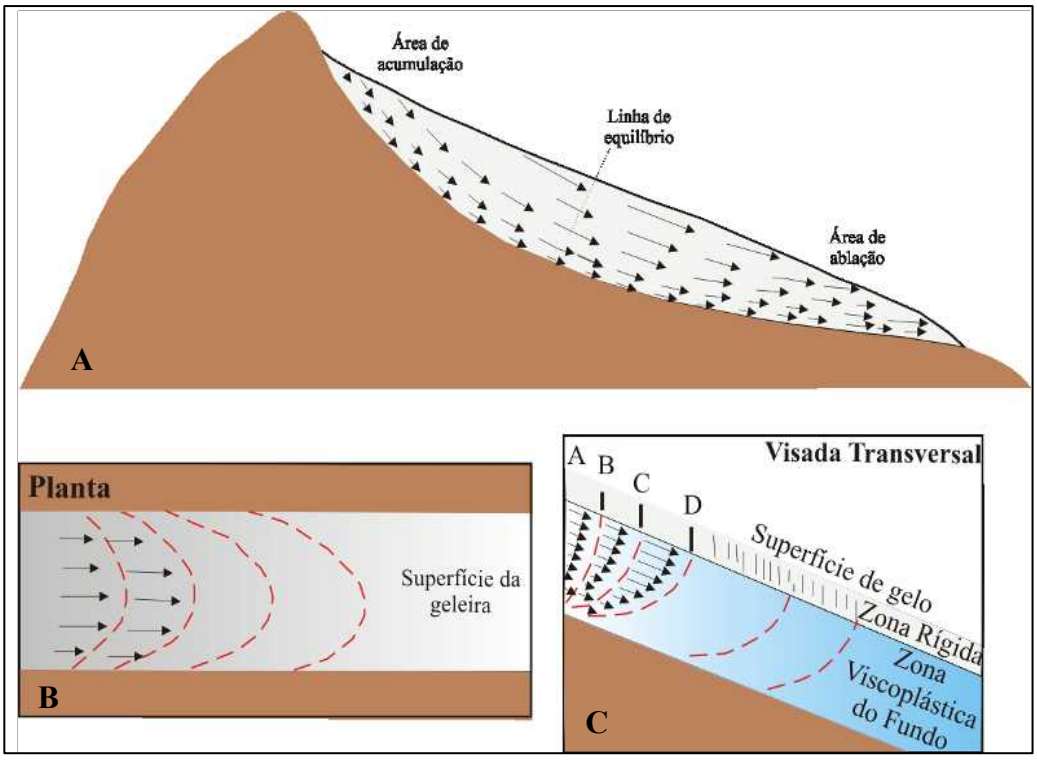


Figura 5 : A dinâmica de uma geleira de vale (ou de montanha). (A) A massa acumulada em níveis superiores é transferida para níveis inferiores. As setas identificam os vetores de velocidade do gelo; (B) Visão em planta da superfície da geleira, a deformação e velocidade do gelo é maior no centro do vale; (C) Corte transversal de uma geleira de vale. Note os diferentes tipos de comportamento mecânico do gelo e por conseqüência de dinâmica: A parte superior (50-60 m de profundidade) tem comportamento elástico e, portanto sofre fraturamento (fendas), a parte interna sofre deformação interna por fluência (*creep*) devido ao comportamento visco-plástico do gelo. Finalmente, no contato gelo-substrato, ocorre deslizamento basal, onde a geleira se move em bloco sobre um filme d'água e outros processos (adaptado de Paterson, 1994).

1.6. A erosão glacial e as formas do relevo

Os processos glaciais deixam importantes "registros" de sua atuação, tanto na modificação de formas do relevo existentes, como na deposição de material sedimentar. Através de sua identificação é possível reconstruir paleoambientes e identificar os limites máximos de atuação glacial (Clapperton, 1993).

As feições geradas pelas geleiras (figura 6), estão relacionadas com o seu tipo (*e.g.,* geleira de montanha, geleira de vale, etc.), o relevo e sua litologia. Quando a geleira ocupa uma reentrância, arredondada e individualizada, em uma montanha, escavando-a profundamente, cria uma feição conhecida como anfiteatro. Se as paredes de dois anfiteatros glaciais opostas se interceptam, se denominam arestas. Quando três ou mais anfiteatros desenvolvem-se juntos, forma-se um pico pontiagudo na intersecção de suas arestas, chamado de esporão. Devido a sua associação com pequenas geleiras, os anfiteatros são utilizados como indicadores de condições paleoclimáticas médias da atmosfera. Isto se aplica principalmente à orientação e a altitude da feição, que estaria relacionado com áreas de menor ablação (menos radiação solar), e aos padrões ou gradientes de precipitação (Clapperton, 1993).

O movimento da geleira vai escavando e ampliando constantemente o seu leito, de modo que quando o gelo desaparece, se origina um profundo vale glacial, cuja seção transversal tem uma forma de "U". As geleiras tributárias, também escavam vales em forma de "U", porém sua seção transversal é menor e seus fundos se encontram a grande altura com respeito ao nível que ocupa o fundo do vale principal, por isso recebe o nome de vale suspenso (Menzies, 1995).

De acordo com Menzies (1995), os escombros podem ser transportados pela geleira no seu interior ou arrastadas entre este e as paredes do vale na forma de moraina lateral. Quando se unem duas línguas glaciais, as morainas laterais entram em contato e dão lugar a uma moraina central, que se situa entre o gelo no centro do vale. No final da língua da geleira os escombros transportados se acumulam em uma moraina terminal. Estes depósitos tomam uma forma curvada cuja parte côncava aponta vale acima e seus extremos se unem com as morainas laterais de cada parede. À medida que o gelo retrocede, vai deixando atrás de sí acumulações de fragmentos. Se existe irregularidade na velocidade de retrocesso da frente da geleira, os depósitos são denominados morainas de retrocesso. Devido ao enfraquecimento

-que a glaciação proporciona nas paredes dos vales, é muito comum à ocorrência de deslizamento de terra.

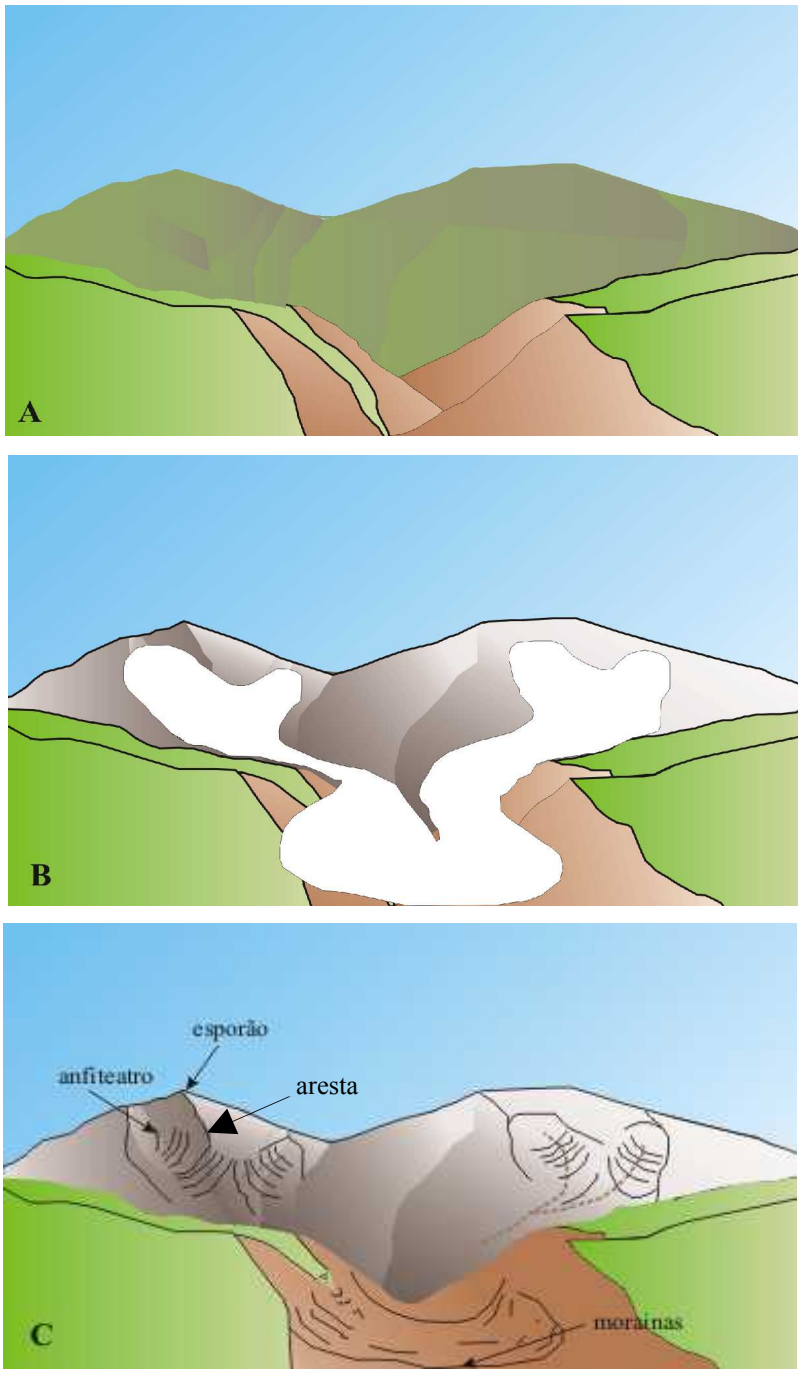


Figura 6 : As principais formas do relevo produzidas por geleiras de vale: A) antes da glaciação; B) glaciação em desenvolvimento e novas formas de relevo estão se desenvolvendo; C) desaparecimento do gelo (modificado de Strahler e Strahler, 2003).

1.7. As fácies superficiais das geleiras

O conceito de fácies glaciais foi primeiramente desenvolvido por Ahlmann (1935). Benson (1962 e 1967) e Müller (1962), a partir de obvervações de campo, propuseram um maior detalhamento a esta classificação. Especialmente quanto à classificação para as diferentes zonas de neve e gelo identificadas superficialmente nas áreas de acumulação e de ablação.

Sendo as geleiras massas de neve e gelo que se movem continuamente de uma área mais alta (acumulação) para outra mais baixa (ablação), é possível distinguir na superfície diferentes setores/fácies (figura 7). A parte menos elevada (área de ablação) contém fácies de gelo (que normalmente ficam expostas ao fluxo de calor sensível, nos meses secos), também é o local onde ocorre à perda de massa glacial, seja por derretimento, evaporação, desprendimento, erosão eólica ou avalanchas (Paterson, 1994).

No setor mais elevado (área de acumulação), normalmente a precipitação se dá na forma sólida e é o local onde ocorre ganho de massa glacial. Conforme Williams *et al.* (1991), esta área pode ser subdividida em 3 fácies da altitude menor para maior: de neve úmida, de percolação e de neve seca. A fácies de neve úmida entre a linha de neve e a linha de neve úmida, é aquela onde a neve está permanentemente saturada de água; já na fácies de percolação ocorre ainda derretimento na superfície, mas a água percola alguns metros e recongela, formando lentes, camadas e veios de gelo; a fácies de neve seca não apresenta derretimento superficial da neve, mesmo no verão. A altitude abaixo da qual ocorre derretimento é delimitada pela linha de neve seca. Entre a linha de neve e a linha de equilíbrio, ocorre a zona de gelo sobreposto, que é formada pelo derretimento e recongelamento da neve acumulada no ano (Paterson, 1994 e Simões, 2004).

As áreas de acumulação e ablação são separadas pela linha de equilíbrio. Esta é uma linha (ou faixa) na superfície de uma geleira na qual durante o período de um ano, a ablação é igual à acumulação. Devido às variações climáticas (precipitação de neve, quantidade de derretimento, temperatura atmosférica) a altitude da linha de equilíbrio no final do verão pode fornecer informações do comportamento da geleira, isto é, se o balanço de massa é positivo ou negativo. Se ao longo de alguns anos ocorre o aumento da temperatura e redução da precipitação, a altitude da linha de equilíbrio aumenta e a geleira se retrai, por outro lado, se a

linha de equilíbrio baixa, a geleira avança (Williams *et al*., 1991).

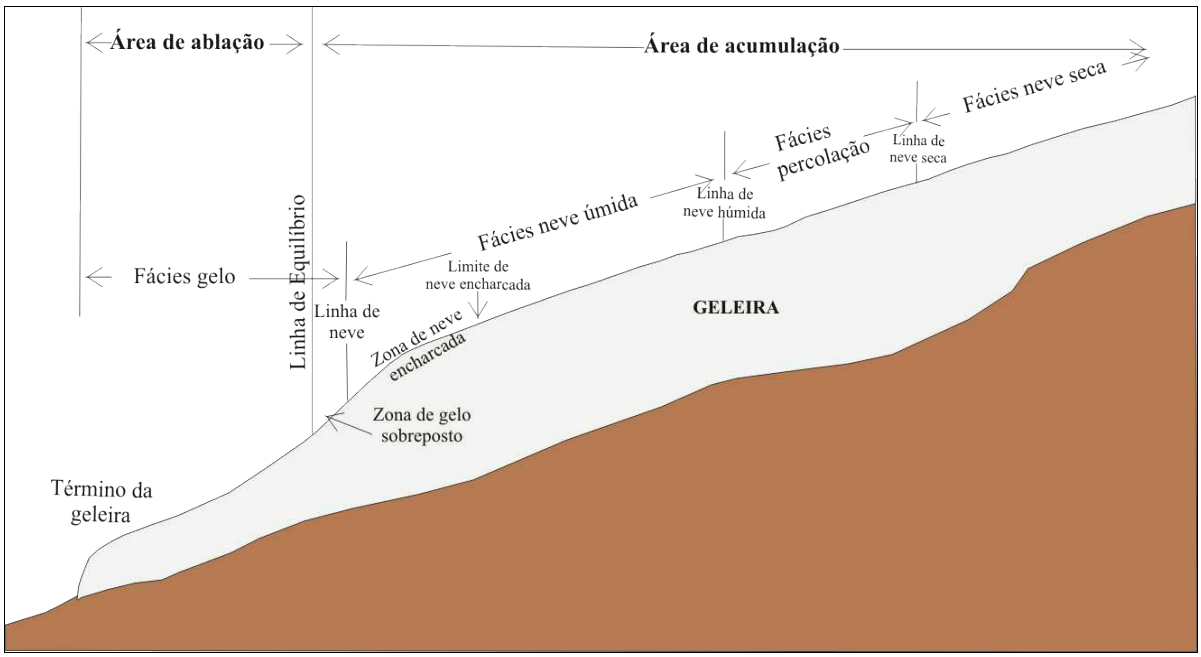


Figura 7 : Perfil longitudinal de uma geleira mostrando suas principais fácies superficiais (adaptado de Williams *et al*., 1991).

1.8. Interpretação glaciológica a partir de imagens satelitais

Em algumas regiões montanhosas, a determinação do balanço de massa por métodos tradicionais (*e.g.,* pelo levantamento topográfico de estacas enfiadas na superfície da geleira para medir a ablação ou acumulação anual em um ponto) é impraticável. Entretanto, com o uso de imagens satelitais, a interpretação e identificação de alvos glaciais tornam-se viáveis. O sensoriamento remoto constitui-se em uma excelente ferramenta para o estudo dessas regiões, pois fornece informações sobre um objeto ou área, sem necessariamente exigir trabalhos de campo (figura 8).

Na neve e no gelo a refletividade espectral (figura 9) é influenciada principalmente, pelos seguintes fatores: tamanho dos cristais de neve, presença de impurezas, derretimento e recongelamento das camadas superficiais, topografia do terreno e inclinação solar (Hall e Martinec, 1985). Diferentes respostas espectrais são identificadas na sua superfície devido a variações na quantidade de água livre, rugosidade superficial, espessura das camadas, tamanho e formato dos grãos. É possível desta maneira usar o sensoriamento remoto para distinguir diferentes fácies glaciais, entre si e de outros alvos (Williams *et al.,* 1991).

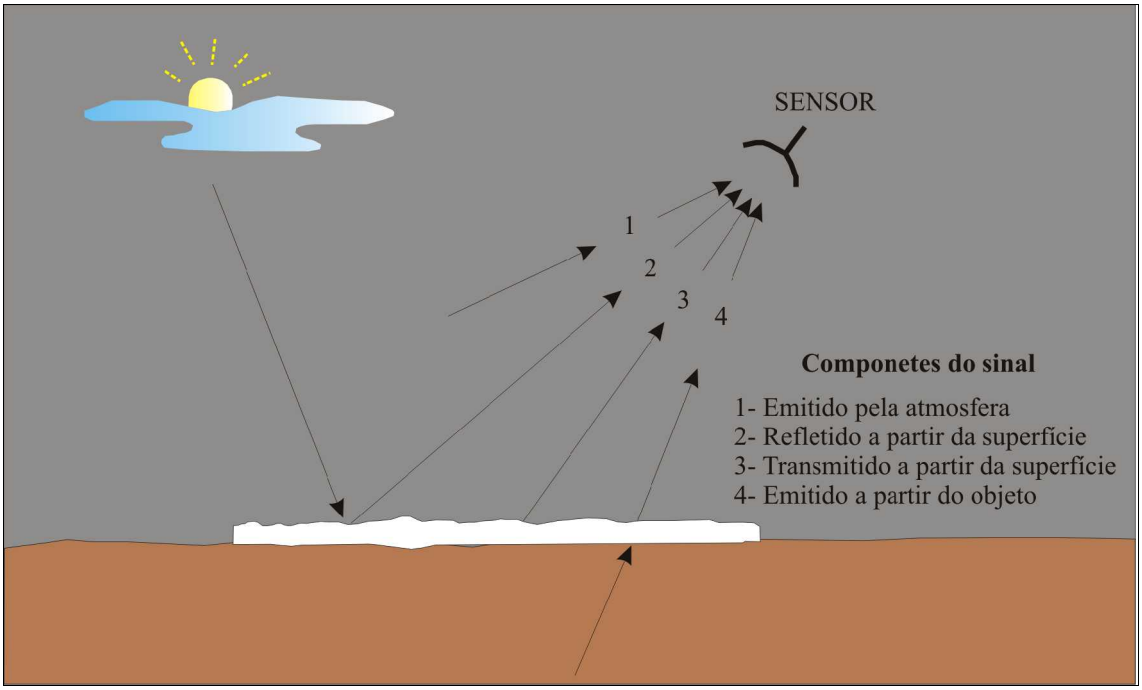


Figura 8 : Sistemas que compõem o sensoriamento remoto passivo (adaptado de Hall e Martinec, 1985).

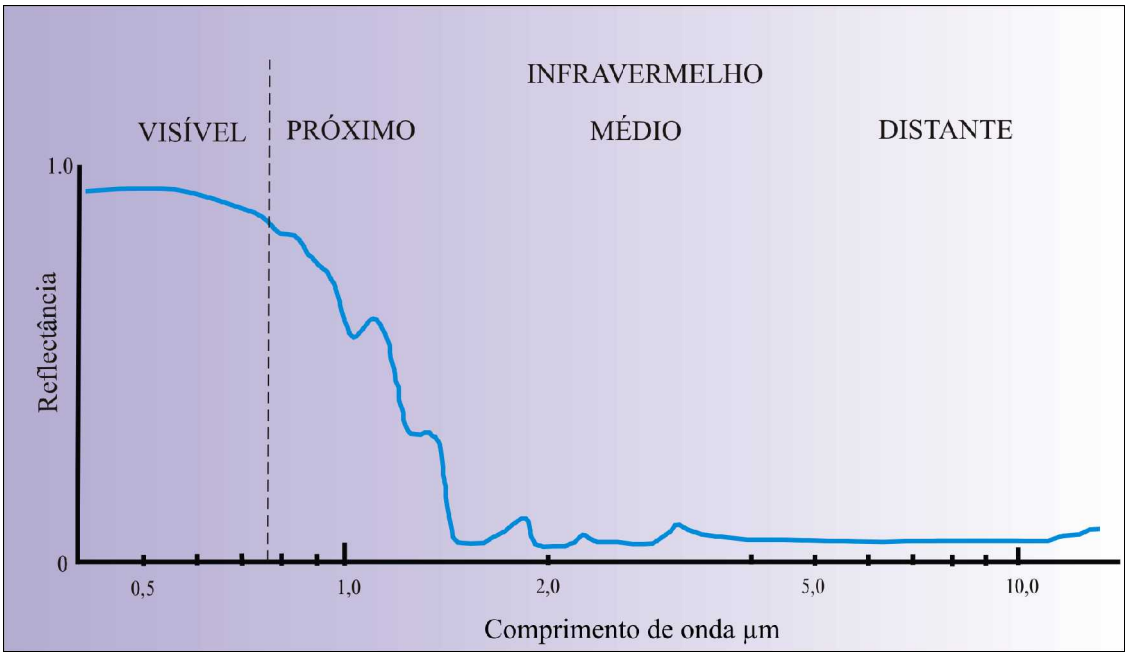


Figura 9 : Curva de reflectância espectral da neve (adaptado de Hall e Martinec, 1985).

Uma geleira idealizada, para os estudos de suas fácies superficiais através de imagens satelitais, seria aquela em que uma nova precipitação de neve não ocorresse após o início do processo de ablação. Porém, nem sempre é possível encontrar esta situação ideal, uma vez que

a resposta espectral dos alvos glaciais pode ser mascarada por diversos fatores naturais, tais como: nova precipitação de neve, congelamento da água da chuva, contaminação por poeira, avalanchas, etc. (Hall e Martinec, 1985).

O gelo possui reflectância relativamente baixa (comparando com a neve) nos comprimentos de onda do espectro do visível (0,4 – 0,7 μm), porém a presença de neve recentemente depositada sobre as camadas superiores eleva consideravelmente esses valores (figura 10), esta possui comportamento espectral oposto ao gelo nesta faixa do espectro. Na região do visível a reflectância da neve praticamente não é influenciada pelo tamanho dos grãos (figura 11), porém é susceptível a impurezas. Nos comprimentos de onda do infravermelho próximo e médio (0,7 – 3,0 μm), a reflectância é sensitível ao tamanho do grão (quanto maior seu diâmetro mais baixo será sua reflectância) e não às impurezas (Dozier *et al.,* 1981).

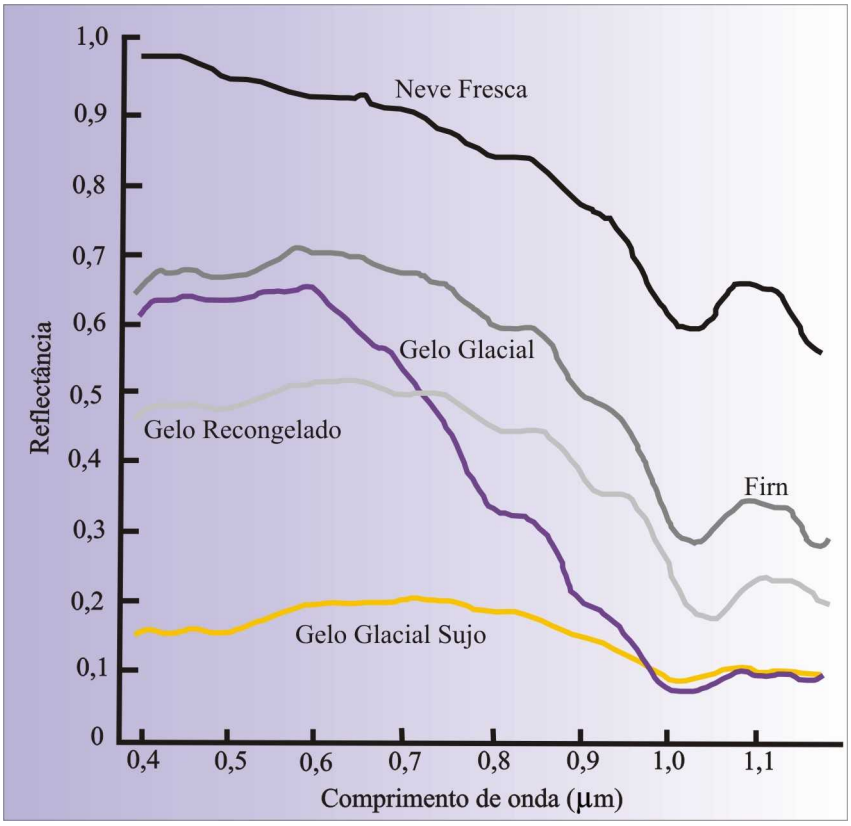


Figura 10 : Curvas de reflectância espectral para a neve e o gelo em diferentes estágios de formação (adaptado de Zeng *et al.,* 1984).

Três zonas superficiais glaciais, com comportamentos espectrais diferentes, foram identificadas por Williams *et al*. (1991) através da análise de imagens multiespectrais. São

elas: as fácies de neve (incluem as fácies de neve úmida, percolação e neve seca), a fácies de gelo e uma zona intermediária entre estas, a zona de neve encharcada (figura 12).

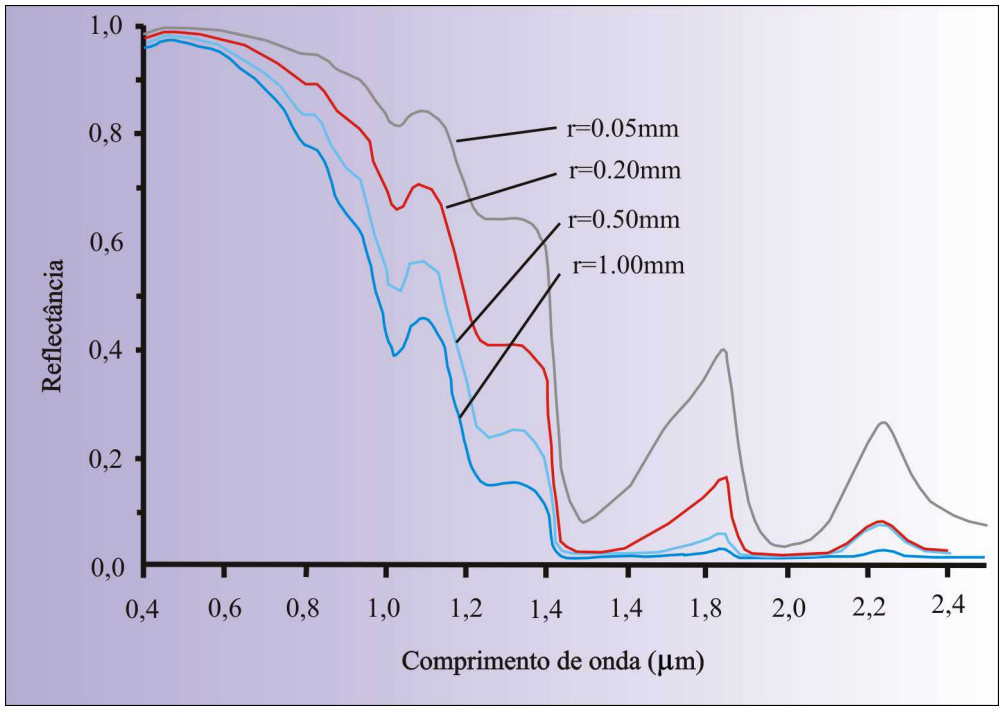


Figura 11 : Reflectância espectral da neve entre 0,4 e 2,4 µm em função dos diferentes tamanhos dos grãos, r = raio (adaptado de Nolin e Dozier, 1993).

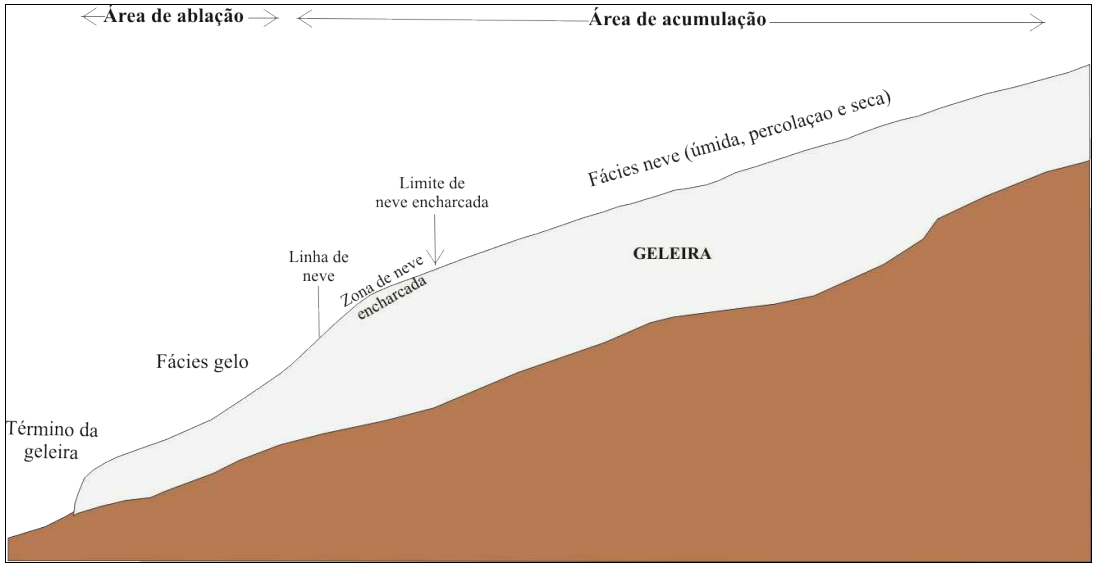


Figura 12 : Perfil longitudinal de uma geleira mostrando suas fácies superficiais identificadas conforme a resposta espectral (adaptado de Williams *et al.,* 1991).

Capítulo 2

AS GELEIRAS TROPICAIS DOS ANDES BOLIVIANO

2.1. Introdução

Neste capítulo será detalhado o ambiente em que estão inseridas as geleiras bolivianas. Após uma introdução sobre a cobertura de gelo atual nos trópicos, serão apresentadas as principais características do clima e das massas de gelo dos Andes boliviano.

2.2. Delimitação dos trópicos

Pode-se definir os trópicos (figura 13) como uma região onde a dinâmica de circulação atmosférica e das condições energéticas apresentam elevada homogeneidade termal. Por esse motivo, a amplitude térmica anual é menor do que a variação diurna de temperatura (Clapperton, 1993).

Diferentemente do que ocorre nas regiões temperadas nas quais durante o inverno toda a superfície da geleira encontra-se abaixo do ponto de congelamento, nos trópicos o comportamento linear da temperatura faz com que a isoterma atmosférica de 0,1°C permaneça praticamente na mesma altitude, permitindo a ocorrência de ablação na frente das geleiras ao longo de todo ano. Nestas latitudes, todas as massas de gelo estão no ponto de fusão, sendo classificadas, do ponto de vista termal, como geleiras mornas. (figura 14) (Kaser, 1995).

Nesta região, as condições de umidade e precipitação (responsável pela acumulação) estão diretamente relacionadas com a oscilação da posição do sol ao longo do ano. Com um atraso de poucas semanas em relação a esta variação solar, a posição da Zona de Convergência Intertropical (ou o Equador meteorológico) atinge uma vez ao ano sua latitude máxima em um hemisfério, ocasionando uma estação úmida e uma estação seca bem distinta entre esses dois pontos de mudança (Kaser e Osmaston, 2002).

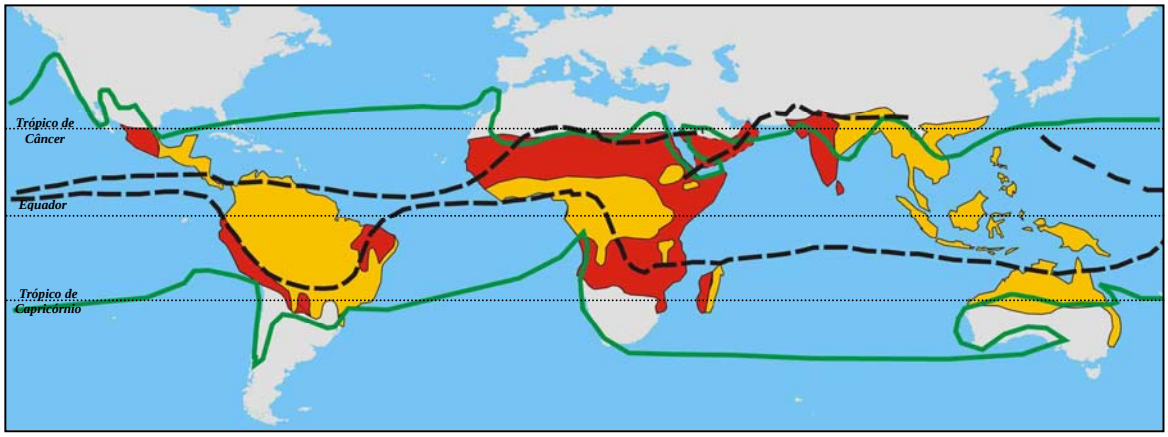


Figura 13 : Os trópicos: em amarelo estão as áreas que apresentam precipitação elevada durante todo o ano; em vermelho, as áreas que apresentam uma estação úmida e outra seca durante o ano; a linha pontilhada identifica a oscilação sazonal da Zona de Convergência Intertropical e a linha contínua delimita a zona tropical do ponto de vista termal (adaptado de Kaser e Osmaston, 2002).

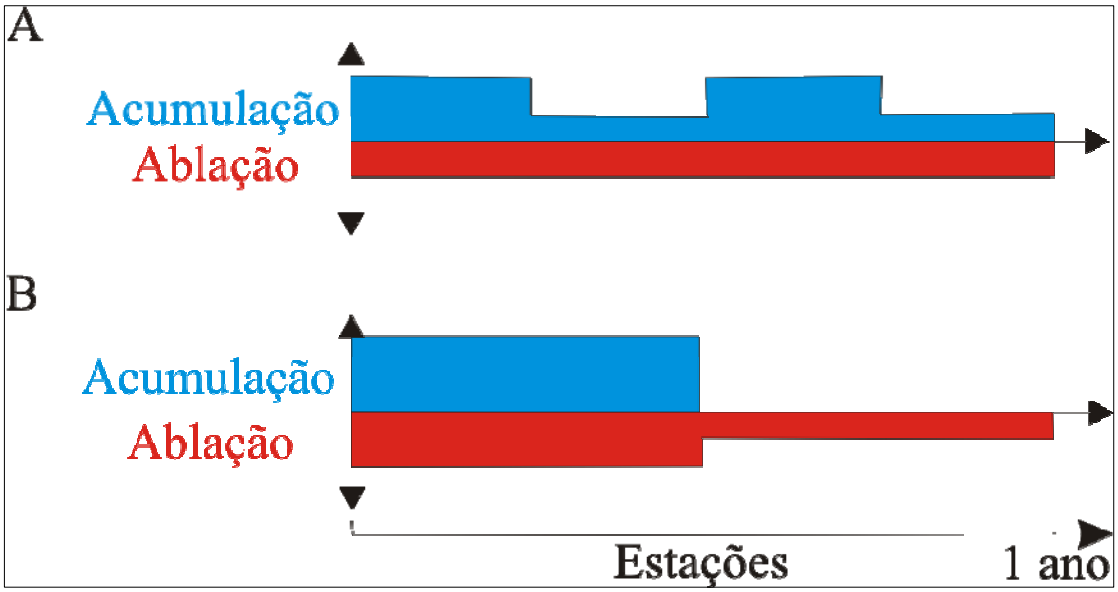


Figura 14 : Diferentes regimes glaciais encontrados nos trópicos. Figura (a) mostra a situação nas regiões que apresentam precipitação durante todo o ano, e (b) situação nas regiões que apresentam uma estação úmida e outra seca. (adaptado de Kaser *et al.*, 1996).

2.3. As geleiras nos trópicos

2.3.1. Distribuição

Geleiras tropicais existem no Irian Jaya (sudeste asiático), no leste africano e na América do Sul (entre a Bolívia e a Venezuela), veja tabela 1. Elas correspondem a 0,15% da área do planeta coberta por massas de gelo, ou 4% das geleiras de montanha (Jordan, 1991). Destas últimas, os Andes têm aproximadamente 99% das situadas nos trópicos (Kaser, 1999).

Dos 2.500 km² de massa glacial situadas na América do Sul, 70% localizam-se no Peru. Destas 600 km² (Georges, 2004) constituem a cordilheira Blanca, que é a cadeia de montanhas tropical mais extensa no mundo (200 km). Também no Peru encontra-se a calota de gelo Quelccaya (14°00' S – 70°46' W), que vem a ser a maior massa de gelo dos trópicos, com 17 km de comprimento, ocupando uma área de 54 km² (Arnao e Hastenrath, 1998).

Tabela 1 : Distribuição das geleiras nos trópicos (Fonte: Kaser, 1999).

Região		**Área (km²)**	**% do total da área**
África	Kilimanjaro	3,3	0,12
	Rwenzori	1,7	0,06
	Mount Kenya	0,4	0,01
Irian Jaya	Total	3,0	0,11
América do Sul	Colômbia	108,5	3,92
	Venezuela	2,7	0,10
	Equador	112,0	4,08
	Peru	1972,0	71,28
	Bolívia	562,0	20,32
Total		2766,4	100,00

2.3.2. Características gerais

A morfologia das massas de gelo subequatoriais causou perplexidade aos primeiros viajantes que por lá chegaram. Ao contrário das geleiras Alpinas, não formavam grandes línguas que fluíam pelas paredes dos vales, com tamanho reduzido, mais pareciam pequenas calotas de gelo, que apenas cobriam os picos montanhosos (Francou, 2004). Segundo Kaser *et al*., (1990), este comportamento da parte terminal das geleiras ocorre devido à contínua ablação anual, diferentemente do que é encontrado nas latitudes médias.

Outra diferença apontada por Kaser *et al.* (1990) foi o tempo de resposta das geleiras às condições meteorológicas. Nos trópicos, a quantidade de geleiras que se encontra inteiramente dentro das áreas de ablação (geleiras com menos de 1 km²) é superior ao número de geleiras nestas mesmas condições nas latitudes médias, conseqüentemente, irão desaparecer mais rapidamente do que estas. Francou *et al.* (2004a) afirmam que, durante 11 anos de observações, a geleira Chacaltaya (0,05 km²) perdeu 5 vezes mais quantidade de água do que a geleira Zongo (2,1 km²). Em determinadas anos, Zongo chegou a apresentar índices positivos no balanço de massa, ao contrário de Chacaltaya, que se apresentou sempre deficitária. Isto pôde ser relacionado com a diferença de superfície entre as geleiras, pois a Chacaltaya tem toda sua superfície glacial na zona de ablação.

O *World Glacier Monitoring Service* (WGMS, 2006), no seu *site* oficial (http://www.geo.unizh.ch/wgms/mbb/mb04/sum04.html), publicou o balanço de massa de quatro geleiras tropicais para o ano 2003/2004 (tabela 2). Ali é possível constatar valores negativos para todas geleiras analisadas. Destas, a de maior área (Zongo) foi a que apresentou as menores perdas de massa.

2.3.3. O balanço energético

O balanço energético (figura 15) mede os processos chave que controlam a ablação sobre uma geleira (fusão + sublimação). Para Francou (2004a), o cálculo do balanço de energia permite constatar a importância relativa de cada parte do fluxo energético (radiativos, condutivos e turbulentos) sobre o degelo de uma geleira, bem como separar as variáveis meteorológicas que o influenciam.

Para Kaser e Osmaston (2002), o balanço de massa das geleiras de baixa latitude é controlado, principalmente, pela umidade do ar, e a duração das respectivas estações. Durante a estação úmida, a presença das nuvens tem um papel fundamental, reduzindo a disponibilidade de ondas curtas e aumentando a refletividade do albedo (com as precipitações). Fazendo com que a sublimação seja enfraquecida, tornando o derretimento altamente efetivo.

Tabela 2 : Dados referentes ao período 2003/2004, para quatro geleiras tropicais (Fonte: WGMS, 2006).

Nome da Geleira	**País**	**Localização**	**Coordenadas**		**Altitude Máxima (m)**	**Altitude Mínima (m)**	**Comprimento (m)**	**Área (km²)**	**Balanço de massa em 2003/2004 (mm eq. d' água)**
Chacaltaya	Bolívia	Andes Tropicais	16,35° S	68,12° W	5.360	5.140	220	0,04	-1.822
Charquini Sur	Bolívia	Andes Tropicais	16,17° S	68,09° W	5.360	5.140	220	0,39	-1.486
Zongo	Bolívia	Andes Tropicais	16,25° S	68,17° W	6.000	4.800	1.200	2,10	-523
Antizana 15 Alpha	Equador	Andes Tropicais	0,47° S	78,15° W	5.760	4.800	960	0,66	-572

Ao contrário da estação anterior em que o balanço de ondas longas se encontra praticamente em equilíbrio, a estação seca vai apresentar índices negativos, e é a sublimação que consome a maior parte da energia disponível.

Na Bolívia um balanço de massa negativo normalmente é mais freqüente entre dezembro e janeiro, ou seja, na estação úmida (Francou *et al.*, 2000). Já no inverno, o balanço de massa quase sempre é equilibrado, sendo a sublimação dominante (este processo que consome 8 vezes mais energia do que a fusão), não se produz um forte derretimento (Wagnon *et al.*,1999). Esta variação sazonal no balanço de massa é fortemente controlada pela ablação total no verão austral. Logo, para compreender o avanço ou recuo das geleiras tropicais é necessário considerar a variabilidade da acumulação e ablação nos meses de verão.

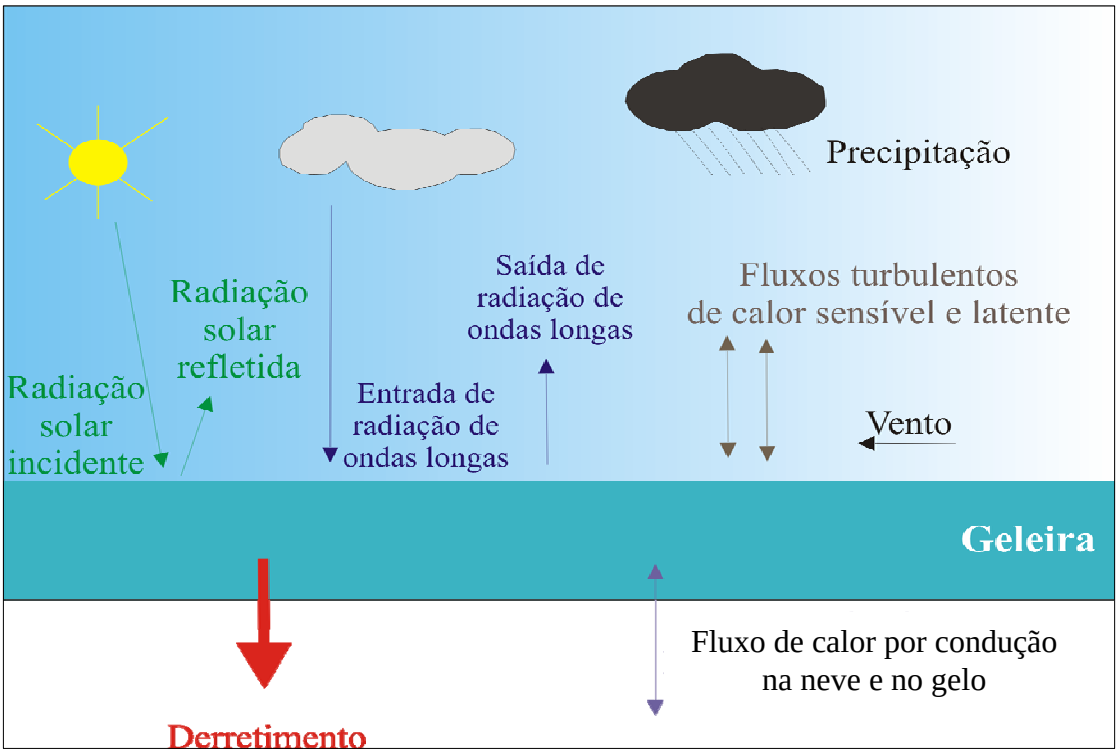


Figura 15 : Esquema representando os principais processos que controlam o balanço enérgico das geleiras tropicais (adaptado de Francou *et al.*, 2004a).

2.3.4. Tipos de geleiras

Existe atualmente uma grande diversidade de geleiras nos trópicos (Benn *et al.,* 2005); incluindo por exemplo: 1) calotas de gelo de platôs (*e.g.,* Irian Jaya); 2) geleira de cratera, com geleiras de descarga no entorno (*e.g.,* Equador e Bolíva); 3) geleiras de nicho e de anfiteatro (*e.g.,* Monte Kenya); 4) geleiras de vale (Andes); 5) Manto de gelo (Andes). A tabela 3 descreve as principais características dessas massas glaciais.

Tabela 3 : Principais características das geleiras tropicais (Simões, 2004).

Tipo	Característica
Calota de gelo	Uma geleira com forma de domo (perfil semi-parabólico), geralmente cobrindo um planalto.
Geleira de cratera	Uma geleira que ocupa uma depressão, rodeada por um cordão montanhoso, e perde massa por meio do calor geotermal dos cones e crateras que o contêm.
Geleira de descarga	Uma geleira de vale que drena uma geleira de cratera ou uma calota de gelo, e flui através de um desfiladeiro entre montanhas periféricas.
Geleira de nicho	Uma geleira pequena que ocupa um recesso estreito e irregular na vertente da montanha.
Geleira de anfiteatro	Uma geleira que ocupa uma reentrância, arredondada e individualizada, em um lado de uma montanha, escavando-a profundamente. No momento que a geleira de anfiteatro flui além da sua reentrância, forma uma geleira de vale.
Geleira de vale	Uma geleira que é confinada entre as paredes de um vale e termina em uma língua estreita. Várias geleiras de vale podem coalescer, formando um tronco principal, ou seja, uma geleira de vale composta (geleira tronco), onde as morainas mediais indicam os limites de cada unidade.
Campo de gelo	Geleira que cobre área extensa, com superfície plana ou ondulada. A cobertura de gelo não é espessa o suficiente para cobrir montanhas ou formar uma calota.

2.4. A Bolívia no quadro climático da América do Sul

2.4.1. Circulação atmosférica

As massas de ar, em seu deslocamento, transportam umidade de um lugar ao outro. Na América do Sul, suas movimentações estão relacionadas com à presença de anticlones sobre o Atlântico e Pacífico Sul (figura 16), além de um centro de baixa pressão que, no verão, propicia a convergência do ar na baixa troposfera e é conhecido como "Baixa do Chaco" (Espinoza, 2002).

Sobre o continente sul-americano, a máxima expansão da ZCIT, onde as massas de ar acumuladas deslocam-se em direção às latitudes maiores, ocorre nos meses de verão. Nesta mesma época do ano, formada pela intensa convecção e transporte de umidade da região amazônica e do ar frio vindo do sul até uma região central do oceano Atlântico Sul, origina-se uma outra zona de convergência conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (Vuille *et al.*, 2000).

No interior do continente, nos meses de verão, existe uma grande célula de alta pressão (Alta da Bolívia), que forma-se pelo aquecimento do altiplano boliviano e a ascendência de ar associada à convecção na Amazônia (Satyamurty *et al.*, 1998). Trata-se de uma circulação anticlônica com o núcleo quente (Espinoza, 2002), localizada na alta troposfera. A advecção de massas de ar mais úmidas, desde o nordeste e leste da América do Sul, resulta em uma forte convecção sobre a parte ocidental da Amazônia, seguida da grande liberação de calor latente proporcionada pela condensação e precipitação. A Alta da Bolívia (AB) se forma, preferencialmente, durante os meses de dezembro e janeiro, diminuindo de intensidade em abril.

2.4.2. O clima boliviano

Os Andes tropicais bolivianos apresentam um clima com duas estações anuais bem definidas (figura 17). Os meses de verão (dezembro – março) são a estação úmida (70 – 80% da precipitação anual) devido à influência da ZCIT, que penetra mais ao sul e permite a

entrada das massas de ar úmidas vindas da bacia Amazônica e do oceano Atlântico (Ronchail *et al.*, 2002). Nesta época do ano, a direção dos ventos em torno dos 5.572 m (altura média da zona de ablação das geleiras bolivianas) é predominantemente de leste a sudeste. Portanto são os meses de verão que determinam as reservas de neve (Vuille *et al.*, 2000).

A presença da cordilheira tem influência direta na distribuição da precipitação (Johnson, 1976). Através de um fenômeno conhecido como "chuva de sombra", as áreas voltadas para a mesma direção da origem das massas de ar apresentam índices superiores de precipitação. Por exemplo, na Cordilheira Oriental o total da precipitação chega a ser 3 vezes maior do que na Cordilheira Ocidental (1.300 mm e 500 mm, respectivamente).

Na estação seca (inverno) a ZCIT desloca-se para o norte, o que permite que ventos secos, provenientes do flanco leste do anticlone do Pacífico, predominem na região. Nesta época do ano, julho e agosto, também pode ocorrer a entrada de massas de ar polar provenientes das regiões subantárticas, ocasionando escassas precipitações de neve. Este fenômeno é conhecido localmente como *suarazos* (Ronchail, 1995).

2.4.3. A variabilidade climática regional

Normalmente a superfície do oceano Pacífico oriental é fria. Porém, durante as fases positivas dos eventos ENOS (*El Nino- Oscilação do Sul*) alguns fatores podem modificar essa condição, aquecendo as águas e, por conseqüência, modificando o regime das chuvas e dos ventos na América do Sul. Na Bolívia a precipitação tende a diminuir nos verões de *El Niño;* já no ano seguinte à ocorrência deste evento, a estação chuvosa geralmente apresenta anomalias positivas de precipitação. Essas variações térmicas do oceano Pacífico oriental afetam diretamente o balanço de massa das geleiras tropicais (Wagnon *et al.*, 2001). Durante os eventos *El Niño*, a temperatura da troposfera andina aumenta e, aliada ao déficit de precipitação que acompanha esse fenômeno, ocorre uma importante perda de massa das geleiras (Mendoza *et al.*, 2004).

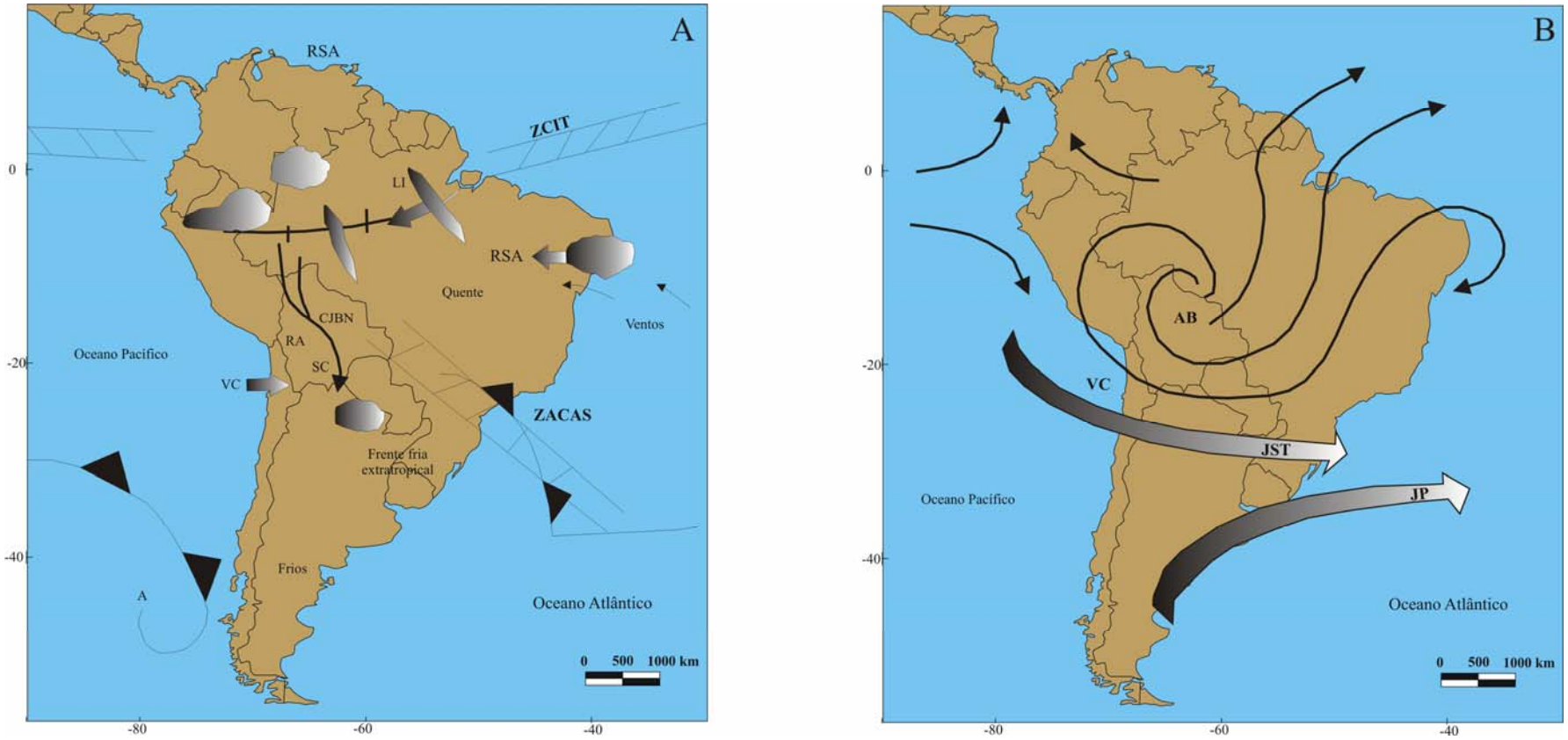


Figura 16 : Sistema de circulação geral da atmosfera na América do Sul. (A) na baixa troposfera, onde: A- centro de alta pressão; CJBN- corrente de jato baixa; LI- linha de instabilidade; RA- região árida; RSA- região semi-árida; VC- vórtex ciclônico; ZCIT- zona de convergência intertropical; ZACAS- zona de convergência do Atlântico Sul. (B) na alta troposfera, onde: VC- vórtez ciclônico; AB- alta boliviana, JST- Jato subtropical;. JP- Jato polar (adaptado de Satyamurty *et al.*, 1998).

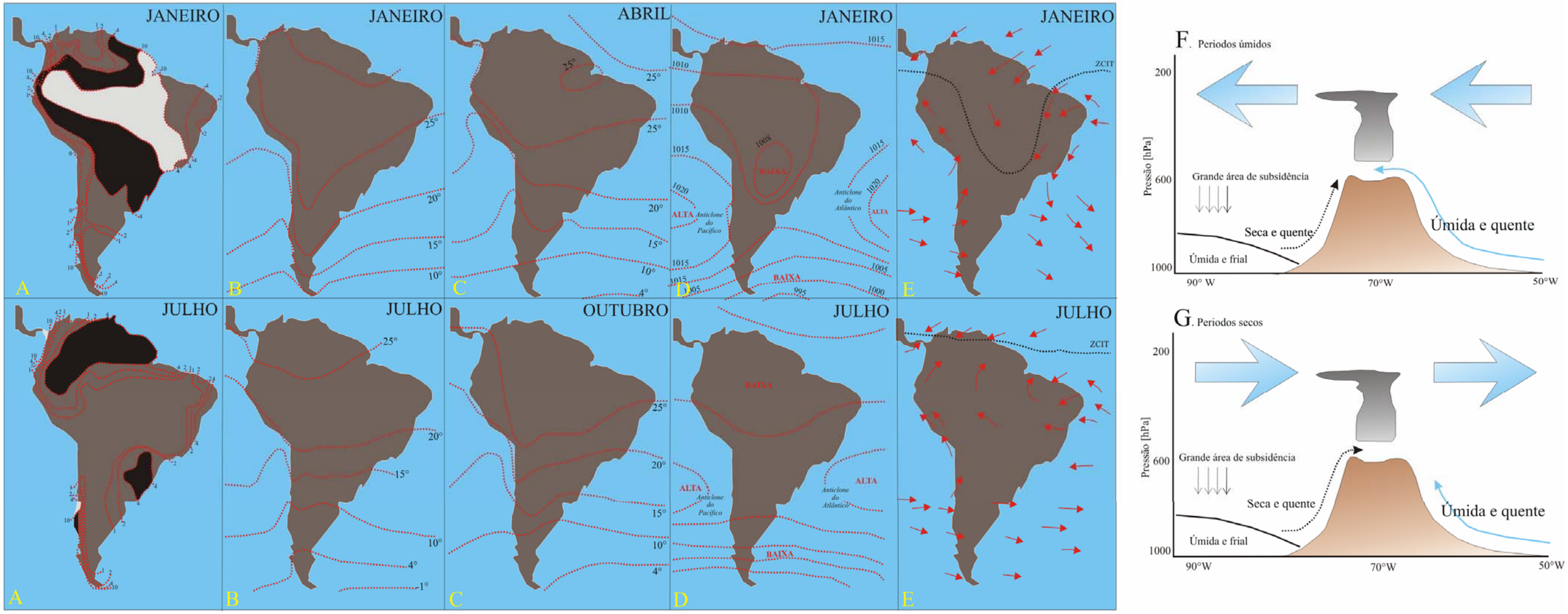


Figura 17: (A) Média anual de precipitação em janeiro e julho, marcada por grandes contrastes, durante os meses de verão (dezembro – março) ocorre quase 80% do volume anual; (B) Temperatura média para janeiro e julho; (C) Temperatura média para abril e outubro; (D) Média da pressão atmosférica ao nível do mar para os meses de janeiro e julho; (E) média dos fluxos de ar para os meses de janeiro e julho. (adaptado de Clapperton, 1993). O Periódico bloqueio da circulação de leste pelos ventos de oeste: (F) Situação nos meses úmidos; (G) Situação nos meses secos. (adaptado de Aceituno e Montecinos, 1993).

2.5. A glaciação andina

2.5.1. Regimes glaciais nos Andes tropicais

A distribuição das geleiras é controlada, fundamentalmente, por dois fatores: a altitude e a precipitação. No primeiro fator, as altas montanhas “barram” a umidade conduzida pelas massas de ar, proporcionando condições para a formação de geleiras. Já o segundo fator é determinante como controlador da altitude da linhas de equilíbrio – ALE (*Equilibrium Line Altitude*), pois as geleiras só vão existir onde a ALE se encontrar abaixo das cristas das montanhas (Clapperton, 1993).

Nas montanhas andinas (entre 5.000 e 6.000 m) a precipitação anual de neve normalmente atinge 1.200 a 1.500 mm de água, resultando numa acumulação de 2 a 3 m de neve a cada ano (Hastenrath, 1967). Nessas regiões a precipitação é controlada, principalmente, por ventos vindos de leste, que tem origem sobre o oceano Atlântico e misturam-se com as massas de ar de origem amazônica. As geleiras estão distribuídas, predominantemente, entre 12°S e 23°S (figura 18), em uma área soerguida tectonicamente acima dos 5.000 m e que “intercepta” as massas de ar vindas da Amazônia. Resulta daí um gradiente negativo de precipitação de NE para SW. No norte da Bolívia, a ALE encontram-se entre 5.300 m e 5.800 m. Já no sul deste país, mesmo em áreas acima dos 6.000 m, podem ser livres de gelo devido à aridez (figura 19a) (Hastenrath, 1967).

Se comparada com a região anterior, a área entre 12°N e 12°S apresenta poucas geleiras, mesmo apresentando alta precipitação (~1500 mm a^{-1}). Isto se deve ao reduzido número de montanhas acima dos 5.000 m, a ALE regional encontra-se entre 4.800 e 5.000 m (figura 19b) e aumenta de leste para oeste (Hastenrath, 1967).

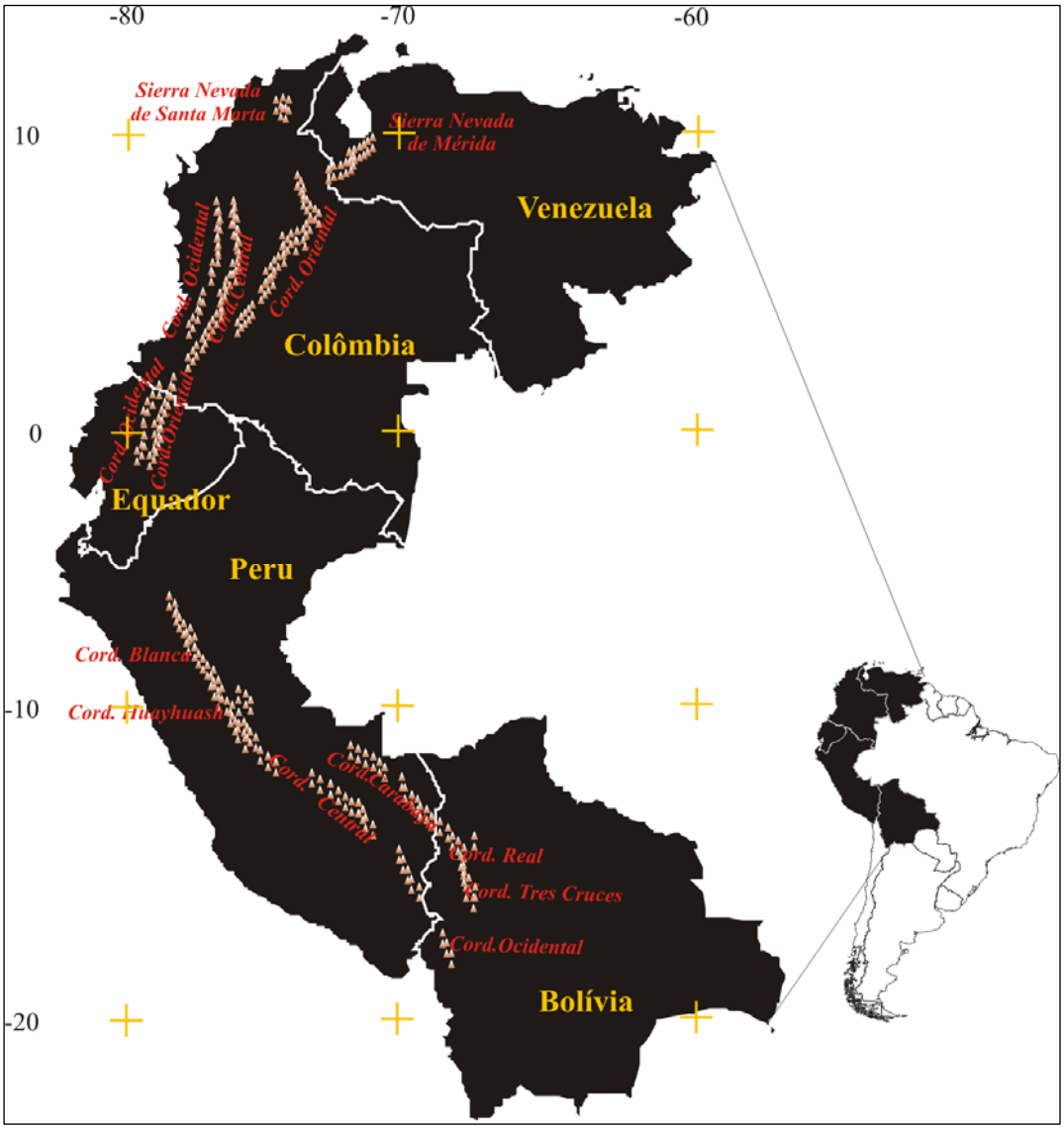


Figura 18 : As principais montanhas tropicais dos Andes (adaptado de Williams e Ferrigno, 1998).

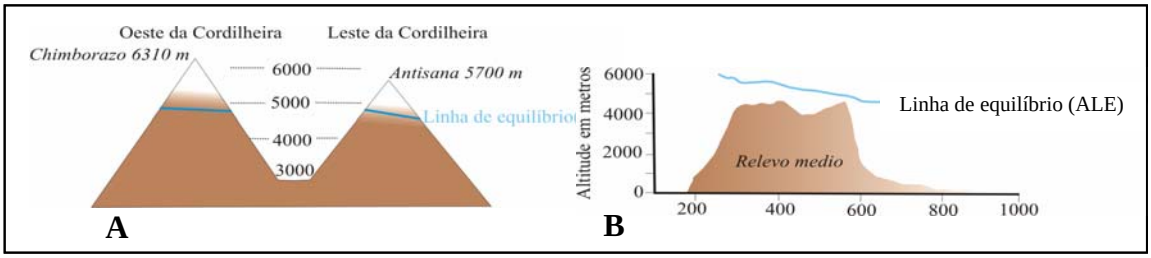


Figura 19 : (A) A altitude da linha de equilíbrio no Equador (como em todos os Andes Tropical), aumenta de leste para oeste, demonstrando que a precipitação tem origem no domínio Atlântico/Amazônico; (B) nos Andes boliviano (18°S), mesmo em áreas acima dos 5.000 m, podem não existir geleiras devido à aridez regional. (adaptado de Clapperton, 1993).

2.5.2. A geologia dos Andes boliviano

A cordilheira andina boliviana estende-se ao longo da borda oeste do cinturão da placa sul-americana, abrangendo aproximadamente 414.574 km², ou seja, 38% da área do território nacional (Montes de Oca, 1995). Conforme Cordani *et al.* (2000), os picos mais elevados são normalmente formados por: vulcões situados sobre a cadeia deformada, como o Sajama (6.520 m); rochas metamórficas ou graníticas levantadas por blocos inversos, como o Nevado Illimani (6.414) e o Nevado Illampu (6.436 m); e blocos de sedimentos soerguidos, como a cordilheira Apolobamba (Nevado Cololo, 5.975 m). Nesta região é possível diferenciar 4 províncias estruturais (figura 20).

A Cordilheira Ocidental pode ser considerada como uma sucessão descontínua de vulcões e serras, formada por numerosos cones e fluxos de lavas de idades terciária e quaternária. A Cordilheira Oriental (onde localiza-se a cordilheira Tres Cruces) corresponde ao denominado bloco paleozóico, onde afloram rochas sedimentares desta era e ígneas mesozóicas e cenozóicas.. Ao leste da Cordilheira Oriental, formada por grandes alinhamentos anticlinais, existe um conjunto de serras paralelas que recebem o nome de Subandino, que atingem entre 500 e 2.000 m de altitude (Kley *et al.*, 1997).

2.5.3. As geleiras dos Andes boliviano

Na Bolívia as geleiras estão restritas a cotas altimétricas mais elevadas. No sul do país (entre 23° e 32°S), mesmo acima dos 5.000 m, a altitude da linha de equilíbrio é muito alta para as geleiras se desenvolverem. Portanto, não ocorre acumulação da neve ao longo do ano. As massas de gelo sobrevivem apenas sobre alguns cones vulcânicos, acima dos 6.000 m, como os Nevados Payachata, Nevado Sajama e Cerro Quimsachata.

As duas principais cadeias de montanha que abrigam as geleiras bolivianas são: A) Cordilheira Ocidental, que é formada por vulcões extintos com geleiras de cratera e pequenos cumes isolados cobertos por gelo; B) Cordilheira Oriental, com aproximadamente 600 km² de geleiras. A Cordilheira Oriental pode ser dividida em 4 partes: Apolobamba, Real, Muñecas e Tres Cruces (tabela 4 e figura 21).

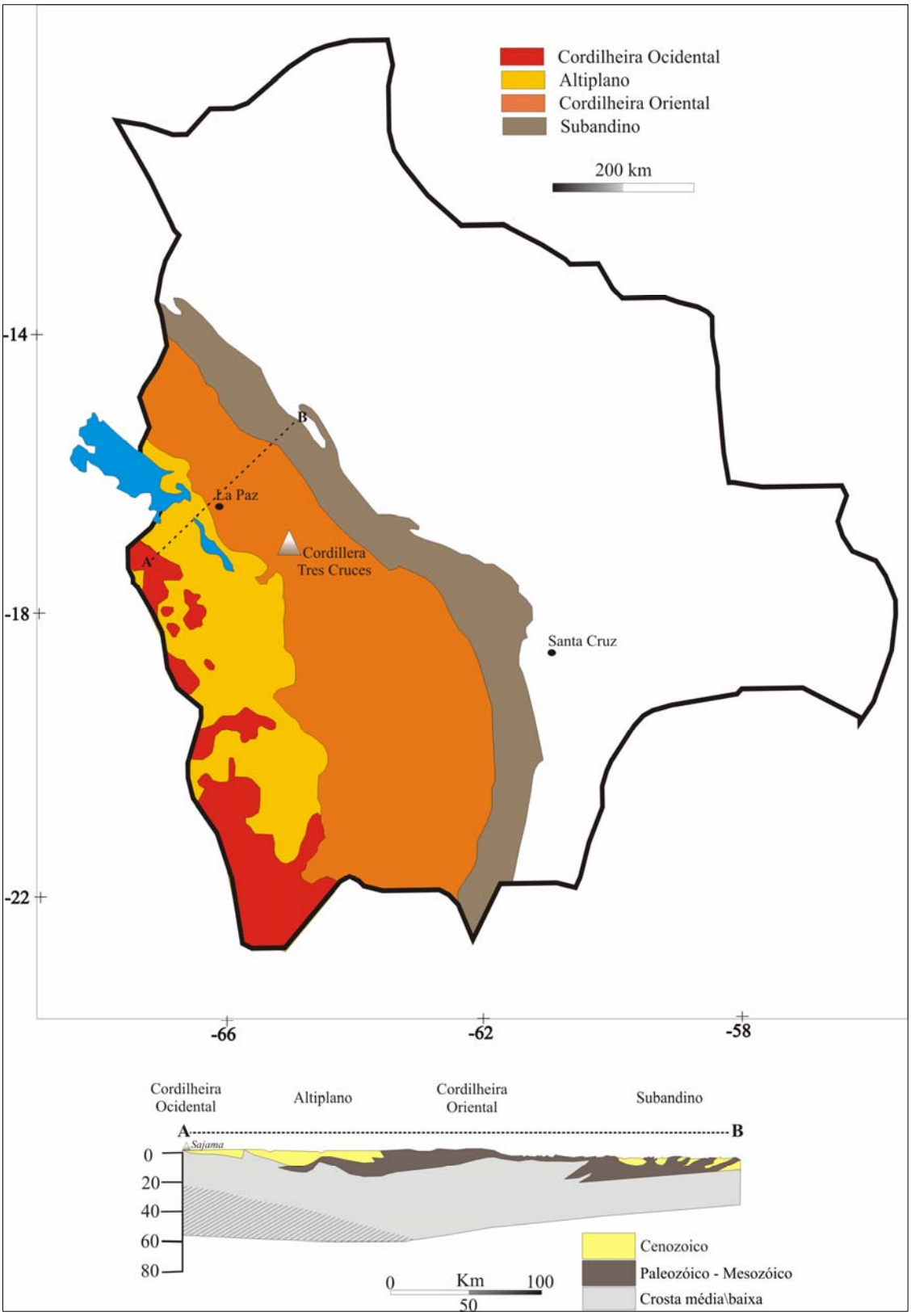


Figura 20 : Localização das principais províncias estruturais dos Andes boliviano (A), a linha branca indica a localização do perfil geológico (B) (adaptado de Montes de Oca, 1995; Cordani *et al.*, 2000).

Durante a última Idade de Gelo (*Ice Age*), a cobertura glacial da região cobria área muito maior do que no presente, e um grande número de montanhas e vulcões, hoje sem geleiras, as tinham. Entretanto, devido ao soerguimento tectônico (as montanhas só atingiram suas posições atuais no meio do Quaternário), permaneceram documentadas nos depósitos glaciais apenas as duas últimas glaciações do Pleistoceno (Troll e Finsterwalder, 1935). A ocorrência de morainas terminais, abaixo dos 4.500 m de altitude na Cordilheria Oriental, ou 3.500 m na Cordilheira Ocidental, junto com as análises dos testemunhos de gelo do Nevado Illimani (Ramirez *et al*., 2003), indicam uma temperatura média no Pleistoceno muito mais baixa do que a atual.

2.6. A Cordilheira Oriental

2.6.1. Características geomorfológicas

Numerosos grupos de morainas destacam-se na morfologia atual da Cordilheira Oriental. Rabatel (2005), através de análise liquinométrica em 13 sítios nesta cordilheira, desde o vale de Ichu Kota (o sítio mais ao norte, ~16°S) e a cordilheira Tres Cruces (mais ao Sul, ~17°S), encontrou uma resposta homogênea das geleiras às flutuações climáticas recentes, desde a sua fase máxima na Pequena Idade do Gelo (*Little Ice Age* ao redor de 1.660 D.C.), até o final do século XX. Ele identificou 10 grupos de morainas (figura 22), começando por aquelas mais afastadas das frentes atuais (que atestam a extensão máxima das geleiras durante a Pequena Idade do Gelo), até as mais próximas das suas frentes, sendo respectivamente numeradas de 1 (mais antiga) até 10 (mais recente).

Neste mesmo estudo foi possível identificar as morainas que se desenvolveram durante o máximo da Pequena Idade do Gelo (segunda metade do século XVII) e praticamente permaneceram nessa posição até a metade do século XVIII. Entre 1730 e 1740, deu-se início a retração contínua das geleiras que persiste até os dias atuais.

Segundo esses estudos paleoclimáticos, no período da máxima extensão das geleiras, o total de precipitação anual era 20 a 30% maior do que atualmente, e a temperatura do ar era aproximadamente 0,4 – 0,6 °C mais baixa. A partir da metade do século XVIII, o recuo

glacial esteve associado à queda na precipitação. No final do século XIX e início do XX, a retração glacial acelerou-se, sendo relacionada a numerosos e intensos eventos *El Niño.*

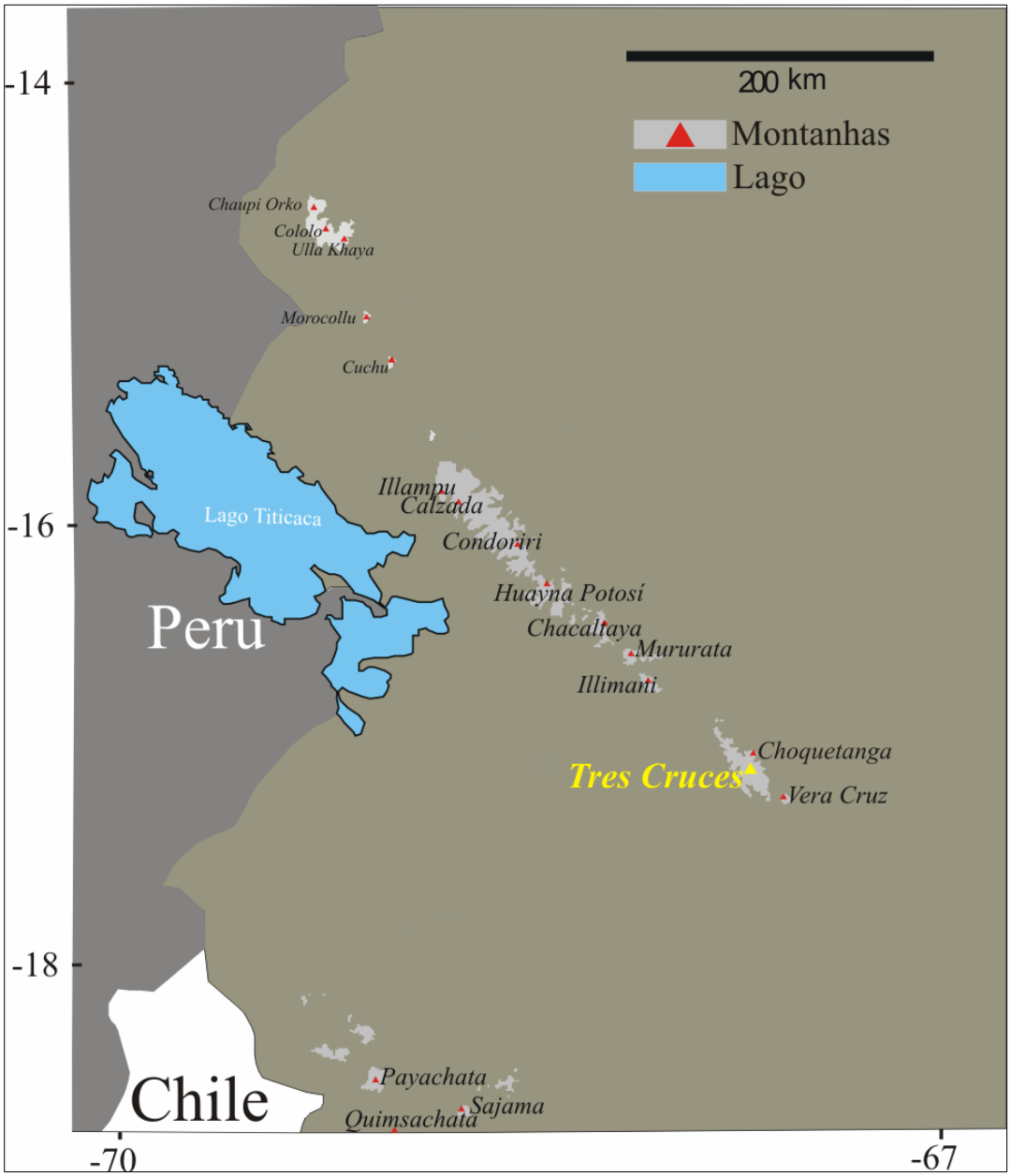


Figura 21 : Localização dos principais grupos de montanha bolivianos com geleiras (adaptado de Jordan, 1991).

Tabela 4 : Principais montanhas com geleiras na Bolívia (Fonte: Jordan, 1998).

Cordilheira	*Grupo de montanhas*	*Latitude (sul)*	*Longitude (oeste)*	*Maior elevação (m)*	*Menor elevação (m)*
Oriental	**Cordilheira Apolobamba**	14°37'- 15°04'	68°58'- 69°14'	6.059	4.311
	Chaupi Orko	14°40'	69°10'	6.059	4.365
	Cololo	14°50'	69°06'	5.774	4.311
	Ulla Khaya	15°00'	69°03'	5.669	4.390
	Cordilheira de Muñecas	15°20' – 15°38'	68°33' – 68°55'	5.237	4.390
	Morocullu	15°20'	68°55'	5.156	4.828
	Cuchu	15°38'	68°33'	5.237	4.886
	Cordilheira Real	15°45' – 16°40'	67°40' – 68°34'	6.436	4.420
	Illampu – Ancohuma	15°50'	68°30'	6.436	4.438
	Calzada-Chiaroco-Chachacomani	16°00'	68°20'	6.127	4.676
	Nigruni-Condoriri	16°08'	68°15'	5.752	4.420
	Saltuni-Huayna Potosi	16°15'	68°08'	6.088	4.804
	Zongo – Cumbre – Chacaltaya	16°18'	68°05'	5.519	4.578
	Hamputuri-Taquesi	16°26'	67°52'	5.548	4.723
	Mururata	16°30'	67°47'	5.836	4.592
	Illimani	16°38'	67°44'	6.414	4.499
	Cordilheira Tres Cruces (Quimsa Cruz)	16°47' – 16°09'	67°22' – 67°32'	5.760	4.708
	Choquetanga	16°54'	67°22'	5.541	4.812
	High region of Tres Cruces	16°56'	67°24'	5.760	4.853
	Nevado Santa Vera Cruz	17°03' – 17°04'	67°13' – 67°14'	5.560	4.853
Ocidental	**Nevado Sajama**	18°06'	68°53'	6.542	5.100
	Nevado Payachata	18°09'	69°09'	6.222	5.500
	Cerro Quimsachata	18°23'	69°03'	6.032	5.500

2.6.2. A cordilheira Tres Cruces

O primeiro levantamento topográfico preciso da cordilheira foi realizado por Ekkehard Jordan, na década de 90 através de técnicas de aerofotorestituição ele determinou a distribuição das geleiras e morainas ao longo do Holoceno (Jordan, 1991). Ele identificou as morainas depositadas desde a última glaciação até o século XX, determinando a área glacial da cordilheira (38.284 km²), correspondendo a 8,5% de toda cobertura glacial boliviana (Jordan 1998).

Em estudo mais recente, Rabatel (2005) seleciou quatro geleiras de orientação sudoeste, tendo por critério o ótimo estado de preservação de suas morainas, além da relativa proximidade às vias de acesso. Utilizando o líquen da espécie *Rhizocarpon geographicum*, determinou a máxima extensão dessas morainas na Pequena Idade Glacial (tabela 5), concluindo que as geleiras eram consideravelmente maiores e atingiam elevações muito mais baixas do que nos dias atuais (figura 23).

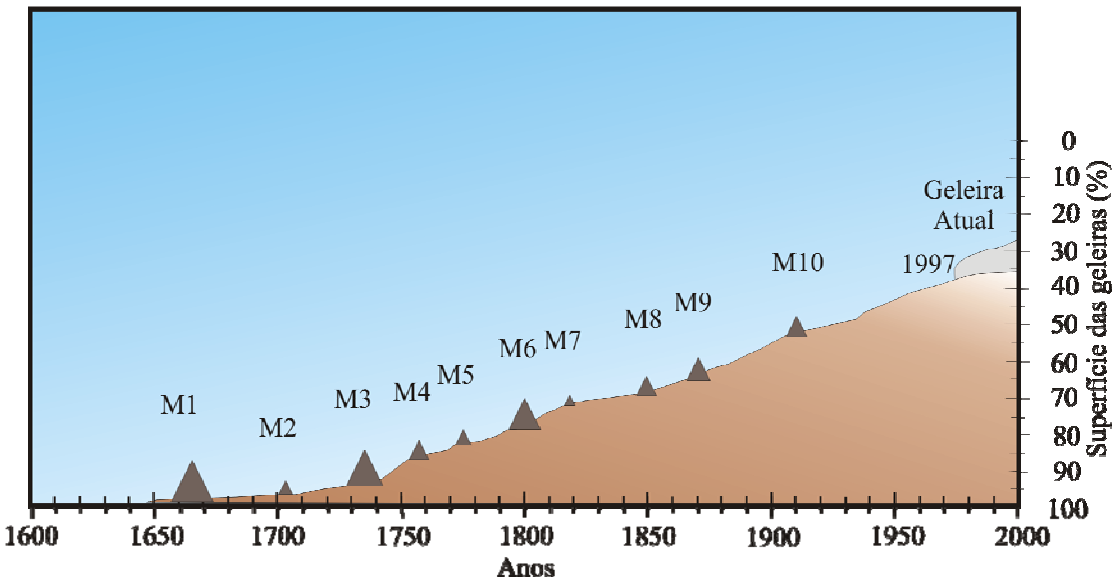


Figura 22 : Esquema morfoestratigráfico representando as 10 principais morainas identificadas na Cordilheira Oriental e cuja formação iniciou na Pequena Idade do Gelo (M 1, a mais antiga) (adaptado de Rabatel, 2005).

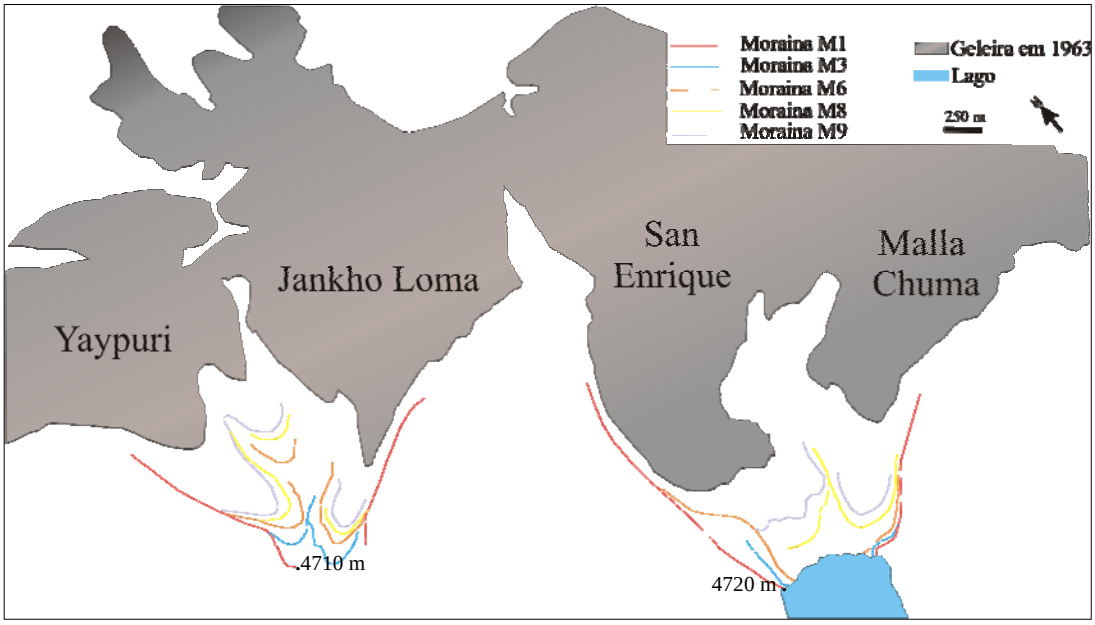


Figura 23 : Posição das morainas terminais, desde o Último Máximo Glacial (aproximadamente 18.000 anos antes do presente) (M1) no setor sudoeste da cordilheira Tres Cruces (adaptado de Rabatel, 2005).

Tabela 5 : Datação liquinométrica dos principais grupos de morainas da cordilheira Tres Cruces (Fonte: Rabatel, 2005).

	Geleiras da cordilhera Tres Cruces			
Moraina	**Malla Chuma**	**San Enrique**	**Jankho Loma**	**Yaypuri**
1	1665±14	1665±19	1665±14	1659±14
2	1702±12	1702±12		1703±12
3	1736±12	1736±12	1735±12	1735±12
4	1756±10	1756±10		1749±10
5	1770±10	1770±10		1768±10
6	1799±10	1799±10	1804±10	1795±10
7	1816±10	1813±10		1815±10
8	1849±9	1845±9	1854±9	1844±9
9	1864±9	1865±9	1873±9	1871±9
10	1908±9		1910±9	1909±9

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Usando imagens satelitais multitemporais juntamente com informações topográficas de antigos mapas da cordilheira Tres Cruces, será possível integrar esses dados em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O objetivo é desenvolver um banco de dados que possibilite a quantificação da variação de altitude, volume, área e extensão das sete geleiras mais representativas desta cordilheira nos últimos 29 anos (1975−2004).

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e os passos que se seguiram até a obtenção dos resultados.

3.2. Materiais

3.2.1. Aplicativos computacionais

Para obter sucesso na análise dos dados e assim aferir com precisão as variações geométricas das geleiras, foi necessária a utilização de diversos s*oftwares* de processamento digital de imagens obtidas através de sensoriamento remoto (tabela 6).

3.2.2. Base de dados digitais

3.2.2.1. *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

O sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) foi lançado em 2000, a bordo do satélite Terra, levando 3 instrumentos: uma Câmera Visível e Infravermelho Próximo (*Visible – Near InfraRed*) com 4 bandas multiespectrais (3 no nadir e 1 na traseira (*back nadir)); uma* Câmera Infravermelha Média

(S*hort - Wave InfraRed*) com 6 bandas e 30 metros de resolução; e uma Câmara Infravermelho Termal (*Thermal InfraRed)* com 5 bandas e 90 metros de resolução (ERSDAC, 1999).

Tabela 6 : Os *softwares* utilizados no estudo e suas aplicações.

Software	**Aplicação**
ERDAS™	Georeferenciamento das imagens satelitais e construção do MDE baseado na imagem ASTER.
Arcview™	Vetorização das frentes das geleiras e digitalização das cotas topográficas.
Arc-Info ™	Interpolação e geração do MDE dos dados topográficos de 1975.

Neste estudo foi utilizada uma imagem deste sensor obtida no dia 29 de maio de 2004, adquirida junto ao Instituto de Geografia Física da Universidade de Freiburg, onde procurou-se privilegiar as bandas de maior resolução espacial (tabela 7).

Tabela 7 : Características das bandas do satélite ASTER utilizadas no estudo.

Câmera	**Banda/ Nome**	**Intervalo Espectral (µm)**	**Resolução Espacial (m)**	**Visada**	**Largura da faixa Imageada (km)**
VNIR	1	0,52 – 0,60 µm	15	Nadir	60
	2	0,63 – 0,69 µm	15	Nadir	60
	3	0,78 – 0,86 µm	15	Nadir	60
				Traseira*	60

**Esta configuração do satélite permite a geração de mapas digitais de elevação com a imagem estérea, sendo obtida apenas na banda 3.*

3.2.2.2. *China-Brazil Earth-Resources Satellite*

O programa *China-Brazil Earth-Resources Satellite* (CBERS) nasceu da parceria entre o Brasil e a China no segmento de tecnologia científica espacial. O lançamento do satélite

CBERS-2 ocorreu em 21 de outubro de 2003, transportando três sensores: uma Câmera Imageadora de Alta Resolução (*Hight Resolution CCD Câmaras*); o Imageador por Varredura de Média Resolução (*Infra – Red Multispectral Scanner*) e a Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (*Wide Field Imager*). Sua órbita é hélio-sincrona a uma altitude de 778 km e faz cerca de 14 revoluções por dia, conseguindo obter a cobertura completa da Terra a cada 26 dias. Foi empregada uma imagem deste satélite, do sensor CCD (tabela 8), adquirida em 19 de maio de 2004 junto ao site http://www.dgi.inpe.br/.

Tabela 8 : Características das bandas do satélite CBERS-2 utilizadas no estudo.

Câmera	Banda/Nome	Intervalo Espectral (µm)	Resolução Espacial (m)	Largura da faixa imageada (km)
CCD	2	0,52 – 0,59 µm	20	113
	3	0,63 – 0,69 µm	20	113
	4	0,77 – 0,89 µm	20	113

3.2.2.3. *Landsat Thematic Mapper*

A série de satélites *Landsat* entrou em operação no ano de 1972, com o lançamento do *Landsat-1*, que transportava a câmera *Multispectral Scanner Satellite* (MSS) com 4 bandas espectrais e resolução espacial de 80 m. O satélite mais recente da série foi lançado em 1999, o *Landsat-7*, que foi desativado em 2003 por problemas técnicos (www.dgi.inpe.br). Atualmente, o único satélite da série a continuar suas operações é o *Landsat-5*, que, além de levar a bordo o sensor MSS, transporta também o *Thematic Mapper* (TM). A grande vantagem deste sensor, em relação ao MSS, é o seu avanço quanto à resolução espacial (30 m).

Duas imagens do satélite *Landsat-5* adquiridas junto ao *Global Land Cover Facility* foram utilizadas neste estudo (tabela 9). Trata-se de produtos distribuídos pela Universidade de Maryland-Estados Unidos da América, de maneira livre na rede mundial de computação em http://glcf.umiacs.umd.edu/data.

Tabela 9 : As bandas e características das imagens *Landsat* utilizadas no estudo.

Câmara	**Banda/ Nome**	**Intervalo Espectral (µm)**	**Resolução Espacial (m)**	**Largura da faixa Imageada (km)**
MSS	4	0,50 − 0,60 µm	80	185
	5	0,60 − 0,70 µm	80	185
	6	0,70 − 0,80 µm	80	185
	7	0,80 − 1,10 µm	80	185
TM	2	0,50 − 0,60 µm	30	185
	3	0,63 − 0,69 µm	30	185
	4	0,76 − 0,90 µm	30	185
	5	1,55 − 1,75 µm	30	185

3.2.3. Base de dados cartográficos

As informações topográficas foram obtidas através do mapa *Verbreitung Von Gletschern und neuzeitlichen Moränen in der Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz) (Ostkordillere)* escala 1:70.000, produzido pelo *Institute for Photogrammetry and Engineering Surveying and the Geographic Institute of the University of Hanover.* O mesmo é *b*aseado em pontos de controle adquiridos em 1975, pelo Instituto Geográfico Militar (IGM) da Bolívia, La Paz publicado em Jordan (1991), disponível como malha de coordenadas na projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM).

3.2.4. Base de dados climatológicos

Devido às escassas informações climáticas disponíveis para a área de estudo, optou-se por utilizar a série de dados de reanálises do NCEP-NCAR, obtidos do NOAA-CIRES *Climate Diagnostic Center, Boulder,* Colorado, EUA (www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/). Trata-se de um modelo climático planetário, gerado a partir de informações obtidas por estações meteorológicas e sensores satelitais. Sua aplicação, extremamente útil para áreas sem dados ou com dados incompletos, homogeniza as informações que possui em áreas de 2,5° por 2,5°. Os resultados em cada ponto da rede estão disponíveis para cada 6 horas, ou como média mensais. Variáveis que dependem da altitude, por exemplo, temperatura e direção do vento são disponíveis para 17 níveis de pressão.

Como foram discutidos no capítulo 2, os eventos ENOS influenciam diretamente o balanço de massa das geleiras bolivianas. Logo, qualquer análise a respeito da retração ou avanço destas massas glaciais deve privilegiar o estudo desta variabilidade climática. Este fenômeno é monitorado pelo Índice Multivariado de ENOS (IME, figura 24), o qual considera diversas variáveis atmosféricas e oceânicas, tais como: componentes do vento em superfície, pressão atmosférica, temperatura da superfície do mar,temperatura superficial do ar, etc.(http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/).

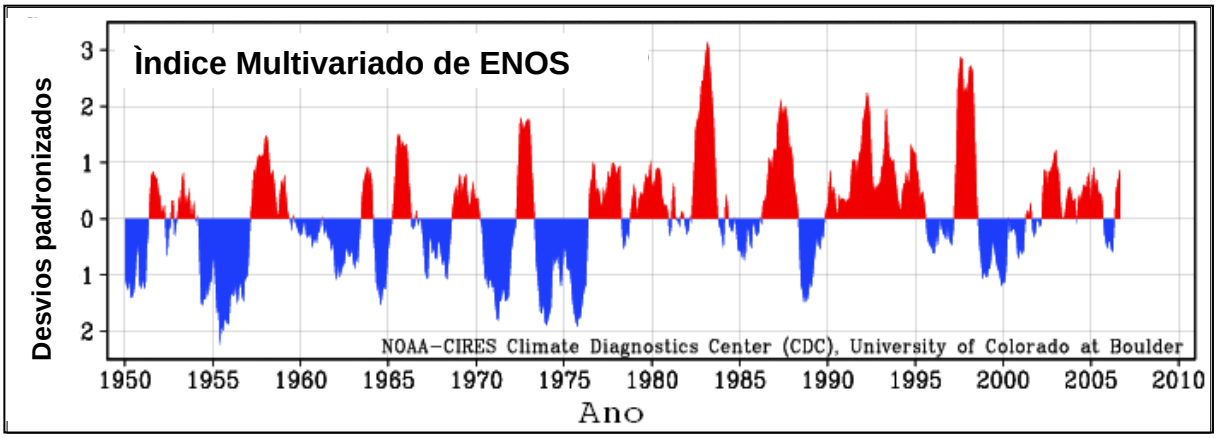


Figura 24 : Série temporal do Índice Multivariado de ENOS. **V**alores positivos representam a fase aquecida, o *El Niño*, enquanto os negativos representam à fase fria, *La Nina*. (Fonte: http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/).

3.3. Métodos

O trabalho foi desenvolvido em 3 etapas principais: 1) Análise multitemporal dos dados orbitais e cartográficos; 2) Determinação do volume e elevação das geleiras usando modelos digitais de elevação; 3) Análise dos dados climáticos. A figura 25 apresenta o fluxograma com as etapas de processamento e análise dos produtos obtidos.

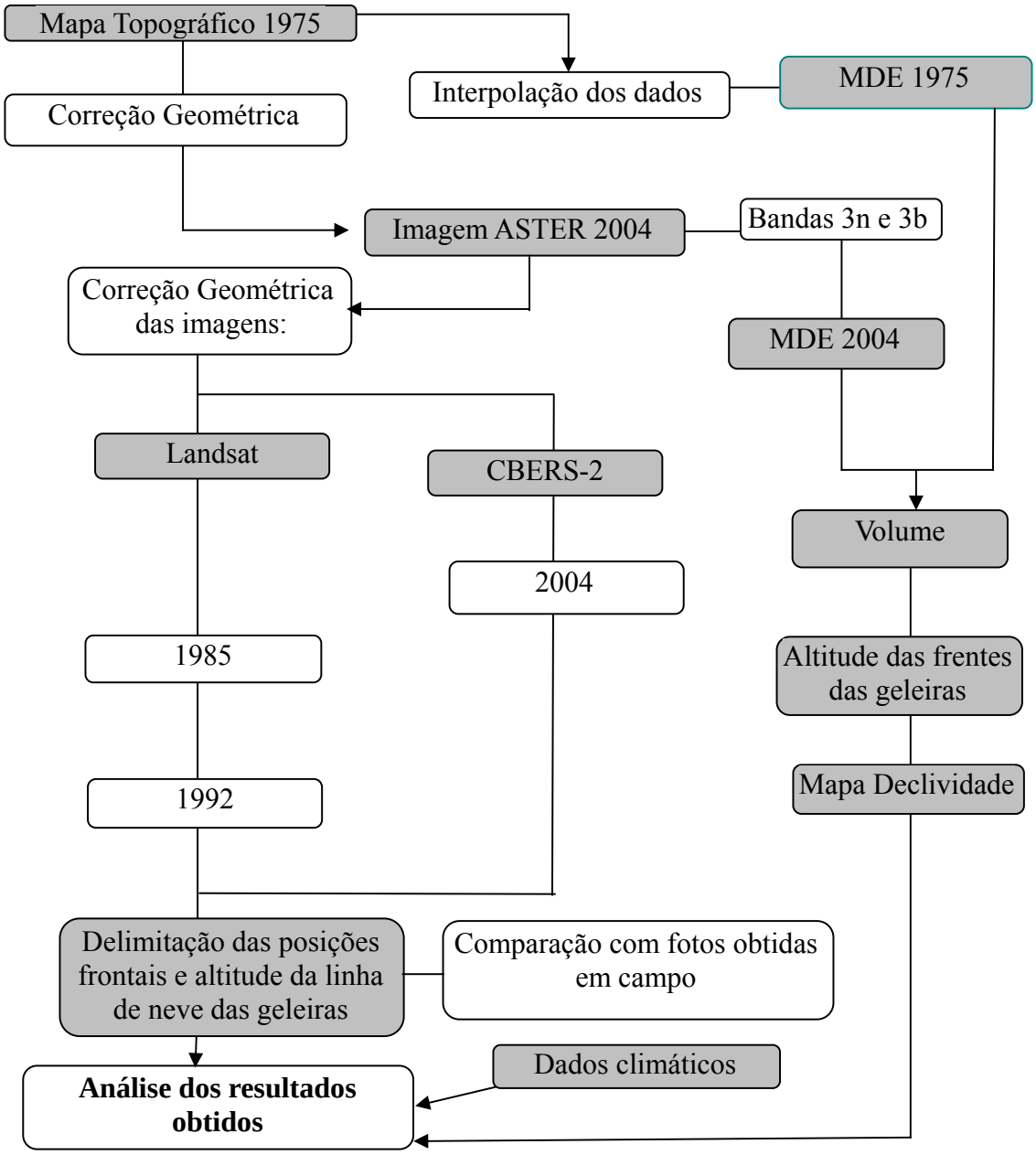


Figura 25 : Fluxograma do desenvolvimento dos trabalhos desta dissertação apresentando os dados utilizados e os resultados obtidos.

3.3.1. Análise multitemporal dos dados orbitais e cartográficos

3.3.1.1. Tratamento e georreferenciamento das imagens satelitais

A fim de comparar as variações frontais e produzir um mapa das mudanças espaço-temporais, as imagens satelitais foram analizadas usando um SIG e registradas em uma base cartográfica comum. As quatro imagens satelitais usadas nesta dissertação (Tabela 10) foram adquiridas no final da estação seca (maio, junho, julho e agosto), quando o pacote superficial de neve encontra-se no seu mínimo anual, o que facilita a identificação dos limites das geleiras. Até mesmo uma fina precipitação de neve sazonal poderia dificultar a correta delimitação das frentes das geleiras, especialmente quando as áreas do entorno têm características similares aos alvos glaciais.

Tabela 10 : Cenas de trabalho e data de aquisição.

Data	**Satélite**	**Camara**	**Largura da faixa Imageada (km)**
05/08/1985	Landsat-5	MSS	185
21/07/1992		TM	185
19/05/2004	CBERS-2	CCD	113
29/05/2004	ASTER	VNIR	60

Para georreferenciar imagens satelitais é fundamental uma rede de pontos com coordenadas conhecidas no terreno. O mapa topográfico mais confiável e numa escala adequada para a área de estudo foi o mapa *Verbreitung Von Gletschern und neuzeitlichen Moränen in der Cordillera Tres Cruces (Quimsa Cruz) (Ostkordillere)* na escala 1:70.000, publicado em 1991 utilizando fotografias aéreas de 1975. Deste mapa, foi possível extrair as coordenadas geográficas de alguns pontos conhecidos (pontos de controle), que tinham sua posição correspondente na imagem.

Esses pontos de controle foram identificados e posicionados de maneira interativa sobre a imagem, na forma de coordenadas (linha e coluna), usando o *software* ERDAS^{TM}. Conforme Crosta (1992), este procedimento é conhecido como georreferenciamento de imagem, e

consiste na identificação de, no mínimo, 6 a 10 pontos de controle em uma cena 1000 X 1000 pixels a partir do mapa correspondente. A transformação de coordenadas é então modelada, usando-se um único polinômio linear de baixa ordem, obtido através de ajuste pelo método dos mínimos quadrados em relação aos pontos de controle. Essa transformação é chamada de "afim" e irá corrigir distorções de escala, deslocamento e rotação existentes entre a imagem e o mapa. Após uma análise dos erros para cada ponto de controle, aplica-se a transformação na imagem original. Resultando, então, uma nova imagem, corrigida segundo a projeção cartográfica do mapa a partir do qual foram obtidos os pontos de controle.

Devido à inexistência de pontos de controle confiáveis no interior das massas de gelo, optou-se por referenciar as imagens utilizando feições como lagos, picos de montanhas e rios. Primeiramente, a cena ASTER foi georreferenciada para o sistema de coordenadas UTM, zona 19S e sistema geodésico WGS 84, utilizando, como referência, o mapa topográfico de 1975. Este procedimento foi realizado pelo modo de reformatação *Resample* do ERDAS^{TM}, através de uma função linear e reamostragem pelo vizinho mais próximo, tendo como parâmetro um arquivo de correspondência de 20 pontos de controle. O erro médio quadrático (RMS) obtido a partir das correções geométricas produzidas foi 1,33 ASTER *pixels* (ou 19,5 m).

Posteriormente, as imagens CBERS-2 e *Landsat-5* foram georreferenciadas, tendo como "base" a imagem ASTER. Optou-se por esse procedimento devido a excelente resolução espacial da imagem ASTER (15 m), o que facilitou a identificação de pontos de controle entre as imagens. Este procedimento tornou a identificação de feições correspondentes entre imagens mais confiáveis do que fazer do mapa para a imagem. Foram utilizados os mesmos procedimentos metodológicos aplicados no georreferenciamento da imagem ASTER. Na imagem CBERS-2 o RMS encontrado foi de 1,88 CCD *pixels* (37,6 m). Já as imagens *Landsat-5* de 1985 e 1992 apresentaram, respectivamente, RMS de 1,5 MSS *pixel* (120 m) e 1,7 TM *pixel* (51 m).

3.3.1.2. Determinação de mudanças na área, das posições das frentes e da altitude da linha de neve

As grandes variações da topografia e radiação resultam, normalmente, em características espectrais heterogêneas na cobertura de neve nas regiões montanhosas. Além disso, o contraste de iluminação próprio dessas áreas, associado às freqüentes nuvens e deposição superficial de neve, pode dificultar a identificação dos limites da massa de gelo. A exata delimitação do término de uma geleira é freqüentemente difícil, pois a língua das geleiras pode estar coberta por fragmentos rochosos, o que torna sua resposta espectral similar ao entorno.

Sendo a neve uma das substâncias naturais mais brilhantes na faixa de ondas do visível e do infravermelho próximo (0,52 – 0,89 μm), mas entre as mais escuras nas ondas curtas de infravermelho (1,55 – 1,75 μm), foram testadas diversas composições para tornar mais fácil a identificação dos alvos (tabela 11).

Tabela 11 : Diferentes composições utilizadas para as cenas de trabalho conforme a disponibilidade das bandas.

	Imagem 1985 Landsat - 5	**Imagem 1992 Landsat - 5**	**Imagem 2004 CBERS - 2**
Vermelho	MSS - 7	TM - 5	CCD - 4
Verde	MSS - 5	TM - 4	CCD - 3
Azul	MSS - 4	TM - 2	CCD - 2

Realizadas as composições coloridas, as margens das geleiras e a posição da linha de neve foram identificadas e vetorizadas manualmente no *software* Arcview^{TM} GIS 3.2. Uma fotografia aérea oblíqua de maio de 2004 foi utilizada para identificar áreas no término das geleiras com grande concentração de fragmentos rochosos (figura 26). Isto foi necessário, pois não foi realizado trabalho de campo. As informações topográficas de 1975, juntamente com a inspeção visual dessa fotografia aérea, foram usadas para delimitar as bacias glaciais. Após esses procedimentos, as mudanças nas posições frontais e na altitude da linha de neve das geleiras puderam ser calculadas pela sobreposição dos dados vetorizados de diferentes períodos sobre uma mesma base cartográfica.

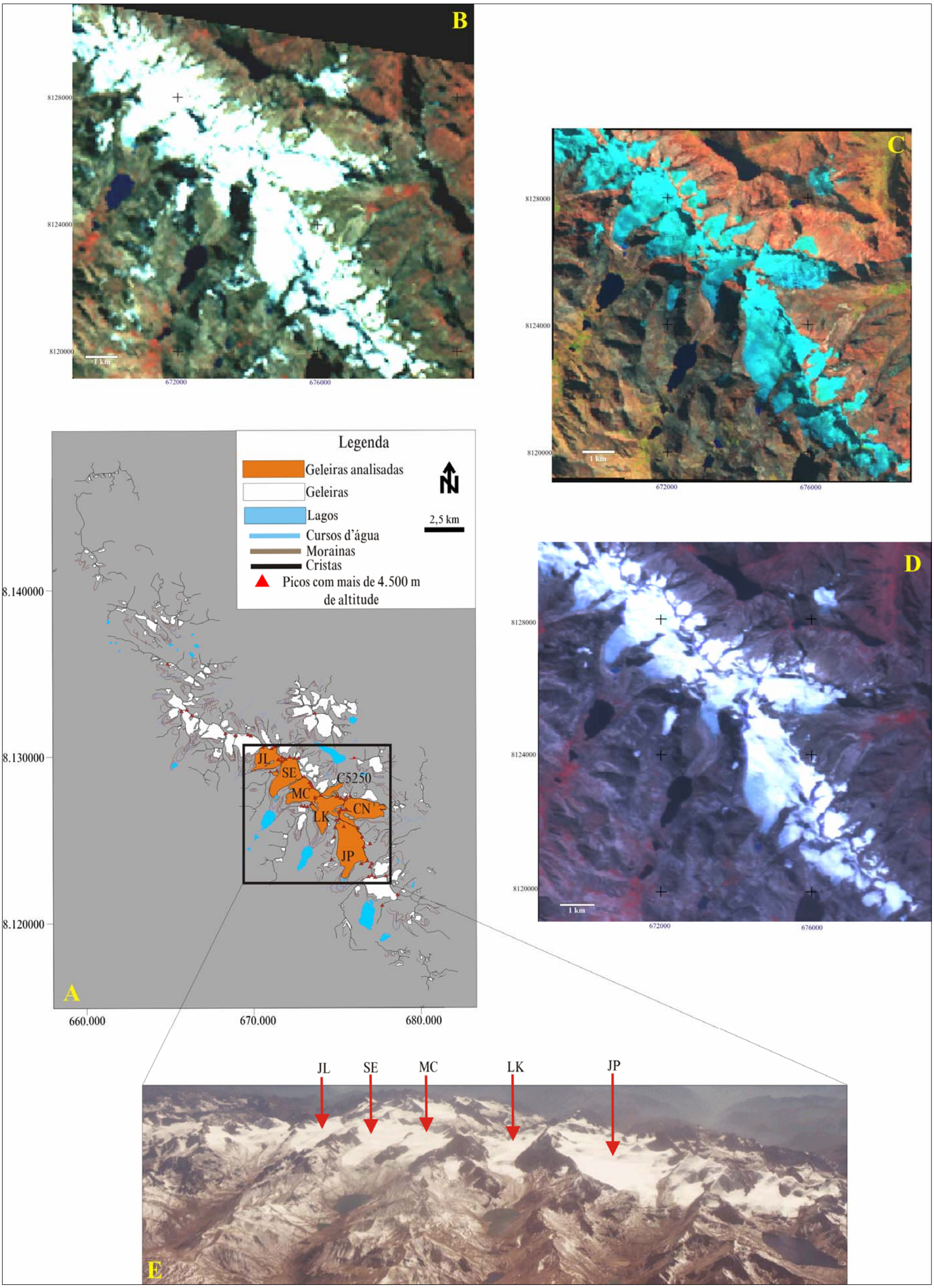


Figura 26 : A) a cordilheira Tres Cruces (adaptado de Jordan, 1991), em destaque as geleiras analizadas (JL = Jonkho Loma, SE = San Enrique, MC = Malla Chuma, LK = Laramkkota, JP = Jacha Pacuni, CN = Campanani e C5250); B) imagem Landsat-5 da cordilheira em 1985; C) imagem Landsat-5 da cordilheira em 1992; D) imagem CBERS-2 da cordilheira em 2004; E) fotografia aérea obliqua de maio de 2004 (www.bolivia2006.co.uk).

3.3.1.3. Classificação das geleiras de acordo com as classes morfológicas utilizadas pelo *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS)

Atualmente, variações nas posições frontais das frentes das geleiras dos Andes bolivianos são investigadas em pequenas áreas (*e.g.,* geleiras Zongo, Charquinni e Chacaltaya), por métodos topográficos e aerofotogramétricos (WGMS, 2006). Entretando, um amplo inventário glacial, como o proposto pelo projeto *Global Land Ice Measuments from Space* (GLIMS), ainda não foi aplicado para esta área. Este projeto provê, na rede mundial de computadores, um banco de dados geoespaciais com diversas informações sobre a geleira, obtidas a partir de imagens satelitais (www.glims.org.).

A metodologia proposta pelo GLIMS basea-se na observação de 9 parâmetros que descrevem as geleiras em termos morfológicos e dinâmicos (recuo/avanço da frente), além da presença de morainas (atuais ou pretéritas). A tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados nesta classificação os critérios empregados são descritos detalhadamente em Rau *et al.,* 2004.

3.3.2. Determinação do volume e elevação das geleiras usando modelos digitais de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) é uma representação da superfície por um ambiente digital, é útil em glaciologia na verificação de variações na geometria da geleira (*e.g.,* declividade, tamanho e orientação). Diferentes algoritmos de interpolação podem ser usados para obter um MDE. A qualidade do produto final depende da densidade e distribuição dos pontos de referência utilizados na geração do modelo. Portanto, é importante saber qual método de interpolação resulta em menores erros.

Para analisarmos as variações na geometria das geleiras, além da utilização de imagens satelitais de diferentes períodos, dois MDEs de épocas distintas (1975 e 2004) foram comparados.

3.3.2.1. Geração de modelos digitais de elevação através de dados cartográficos

A partir de pontos com cotas no mapa topográfico de 1975, estabelecido por métodos aerofotogramétricos tradicionais (aerotriangulação), foi possível "criar" uma grade de elevação com 20 metros de resolução. Foram testados dois métodos de interpolação: *Triangulated Irregular Network* e TOPOGRID (usando o *software* Arc-Info™ 8.0.1). O último resultou nos menores erros verticais (média de ± 6 m). Para verificar cada modelo, foram usados pontos de controle não empregados nos processos de interpolação.

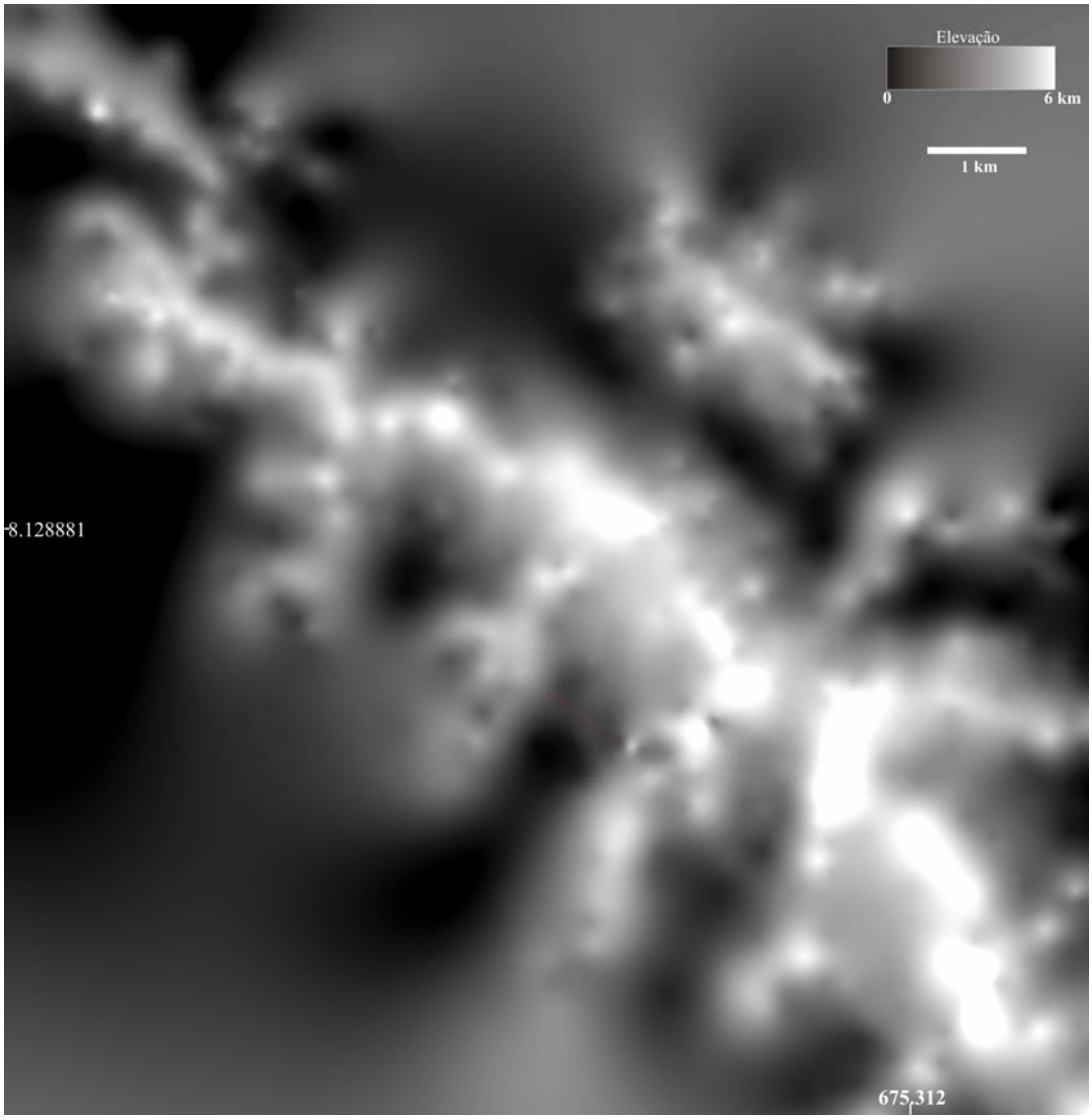


Figura 27 : Modelo digital de elevação para a cordilheira Tres Cruces ao ano de 1975.

Tabela 12 : Parâmetros utilizados na classificação do GLIMS.

	Digito 1	Dígito 2	Dígito 3	Dígito 4	Dígito 5	Dígito 6	Dígitos 7 e 8	Dígito 9
	Classificação Primária	**Forma**	**Característica da frente**	**Característica longitudinal**	**Origem da massa glacial**	**Dinâca atual**	**Tipo de moraina***	**Cobertura superficial da massa glacial**
0	Indefinida	Incerta ou mista	Normal ou mista	Incerta ou diversificada	Desconhecida	Incerto	Não possui	Gelo limpo
1	Manto de gelo	Composição de bacia glacial	Piemonte	Regular	Neve/ neve arrastada	Retração evidente	Terminal	Gelo levemente sujo
2	Campo de gelo	Bacia composta	Expandida	Geleira pendurada	Avalancha	Retração pequena	Lateral e/ou central	Gelo sujo
3	Calota de gelo	Bacia simples	Lóbulo	Cascateada	Gelo sobreposto	Estacionária	Empurrão	Gelo recoberto por sedimentos
4	Geleira de descarga	Geleira de anfiteatro	Desprendimento	Cascata de gelo		Avanço pequeno	Combinação de 1 e 2	
5	Geleira de vale	Nicho		Interrompida		Avanço evidente	Combinação de 1 e 3	
6	Geleira de montanha	Geleira de cratera				Possibilidade de *surge***	Combinação de 2 e 3	
7	Áreas glaciadas/ campo de neve	Flanco de gelo				*Surge*** conhecido	Combinação de 1,2,3	
8	Plataforma de gelo	Grupo de pequenas geleiras				Oscilação	Fragmentos	
9	Geleira de rocha	Gelo remanescente				Desprendimento seco	Incerto ou não listado	
10	Corrente de gelo		Desprendimento e piemonte					
11			Desprendimento e expandida					
12			Desprendimento e lóbulo					
13			Geleira tributária de plataforma de gelo					
14			Geleira de maré					
15			Desprendimento seco					
16			Confluente					

**Aceleração abrupta do fluxo de uma geleira, acompanhado pelo avanço rápido e brusco (alguns quilômetros) do término (Simões, 2004).*

***A classificação das morainas é subdivida em duas seções: o código 7 e 8 referem-se, respectivamente, aos tipos de moraina em contato com a geleira, e as morainas afastadas das frentes.*

3.3.2.2. Topografia da superfície glacial a partir das imagens ASTER

Na construção do MDE para 2004 (figura 28), foi utilizado o programa ERDAS^{TM} 8.7, com as bandas 3n (nadir) e 3b (traseira), nível 1b do sensor ASTER. A partir de imagens ASTERs, o procedimento para geração de MDEs é muito parecido com o georreferenciamento. A principal diferença é a atribuição de uma cota (Z) para cada ponto identificado além dos valores para X e Y em ambas as imagens. Foram encontrados 12 pontos em comum no terreno (*Ground Control Points* - GCPs), e três pontos de checagem (*Check Points*-Cps*)* entre as imagens, usando a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 19S e o W*orld Geodetic System* 1984 (WGS84), esses dados foram extraídos do mapa topográfico de 1975.

Automaticamente foram gerados 60 pontos em comum (*tie points)* entre duas as imagens. A seguir uma imagem epipolar foi gerada pela rotação e reamostragem das bandas, usada em combinação com os GCPs para geração de um MDE absoluto com 15 metros de resolução. A diferença entre o MDE/ASTER e os Cps foi de ± 9 m.

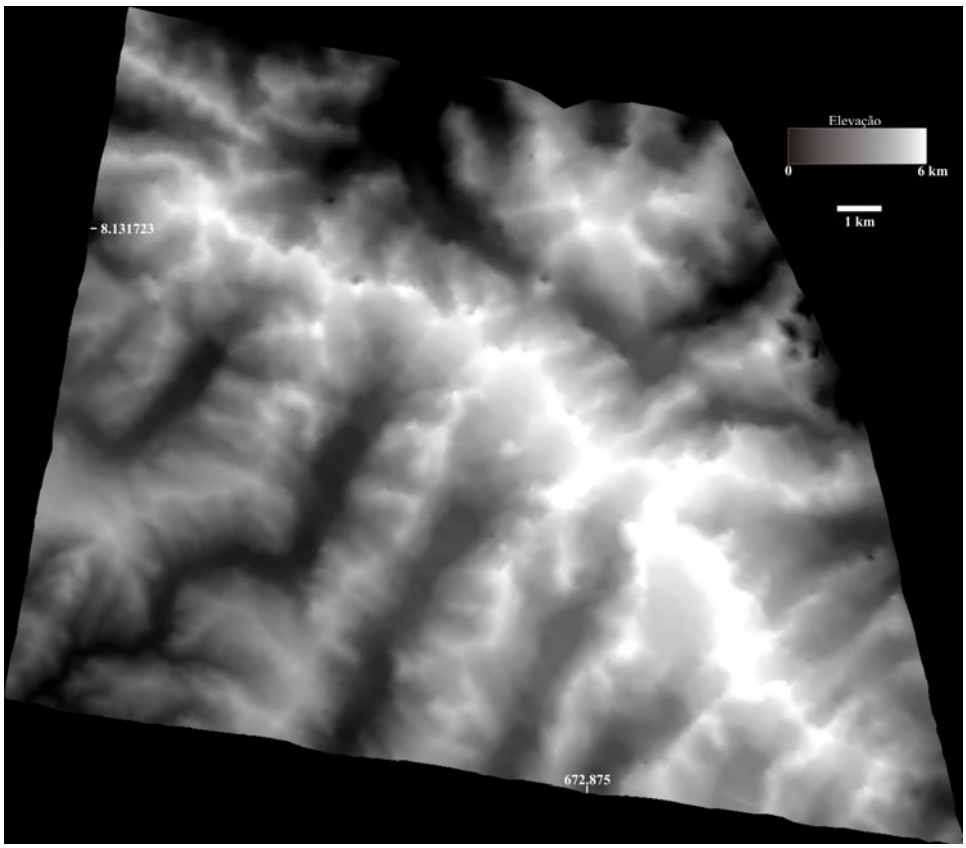


Figura 28 : Modelo digital de elevação para a cordilheira Tres Cruces referente ao ano de 2004.

3.3.3. Cálculo da mudança de elevação

Modificações do relevo sobre áreas glaciais correspondem à perda ou ganho de volume de gelo, os quais podem ser estimados pela integração de mudanças de elevação da superfície sobre a área coberta por gelo (Vignon *et al.,* 2003). A mudança de volume pode ser convertida em balanço de massa e, para isso, assume-se uma densidade constate do gelo em 900 kg m^{-3} (Andreassen *et al.,* 2002).

Andreassen (1999) afirma que, na determinação de mudanças de volume a partir de MDEs, esses devem possuir idênticas células, cobrir as mesmas áreas e possuir as mesmas coordenadas no plano horizontal. Devem ser considerados nos resultados finais, também, os erros inerentes às tais operações: erros nos dados originais, as interpolações, as conversões de dados para o mesmo sistema de coordenadas, a precisão dos pontos de controle, etc. Para encontrar um erro comum (*bias)* entre os MDEs, uma área teste foi escolhida. Nesta área os MDEs foram subtraídos, uma vez que não ocorreram modificações ao longo do ano (*e.g.,* afloramentos rochosos). Sendo determinada uma diferença "padrão" entre os MDEs.

A mudança de volume para cada geleira foi calculada usando a fórmula de Paterson (1994):

$$V = A.h.\ 0{,}9 g\ /cm^{-3}$$

onde

V = Volume do gelo

A = Área da geleira

h = Mudança média de altitude da área analisada

0,9 g $/cm^{-3}$ = Densidade média do gelo

3.3.4. Determinação das variações na altitude da linha de neve e cálculo da proporção da área de acumulação (PAC) entre 1985 e 2004

A alta reflectância da neve, que caracteriza a zona de acumulação, é separada da zona de baixa reflectância, onde o gelo está exposto (zona de ablação), pela linha de neve. Teoricamente nos Andes Centrais a altitude da linha de equilíbrio (ALE) coincide com a linha

de neve no fim do ano hidrológico (Klein e Isacks, 1999). A linha de equilíbrio é o lugar sobre a geleira onde a acumulação anual é igual à ablação anual. Quando o balanço de massa anual é negativo, a ALE aumenta, e quando é positivo a baixa, por isso pode ser um indicador da resposta da geleira às mudanças climáticas.

Klein e Isacks (1999) demonstraram que a ALE pode ser determinada com imagens satelitais, sendo o limite entre a cobertura de neve e o gelo exposto. Na geleira Zongo, localizada na Cordilheira Real (aproximadamente 120 km de distância da área de estudo), durante os anos de 1993 e 1994, a altitude da linha de neve próximo ao fim da estação de ablação coincidia com a altitude da linha de equilíbrio.

Logo, neste estudo, a altitude da linha de neve foi utilizada como uma estimativa da ALE. Essa foi empregada para calcular a proporção entre a superfície da área de acumulação e a área total da geleira. Para calcular a PAC foi utilizada a equação de Benn e Evans (1998). Onde Ac é a área de acumulação e Ab corresponde à área de ablação.

$$PAC = Ac / (Ac + Ab)$$

3.3.5. Análise dos dados climáticos

Devido à inexistência de uma estação meteorológica na cordilheira Tres Cruces, optou-se pela utilização dos dados reanalisados do NCEP-NCAR (figura 29). Sendo possível, através do *software* Panoplay™, extrair as informações desejadas. Foi realizada a reconstrução das séries temporais de temperatura e precipitação, para o período de 1975−2004 a 500 hPa (aproximadamente 5.572 m). Francou *et al*. (2004b) compararam os dados meteorológicos obtidos na *Estación ORE*- Zongo (5.100 m de altitude) com dados reanalisados do NCEP-NCAR para o nível de pressão de 500 hPa (esta estação encontra-se a 120 km do centro da cordilheira Tres Cruces). Eles achou uma boa correspondência entre os dados reanalisados e algumas variáveis medidas na estação meteorológica (temperatura e direção dos ventos), porém considerou insatisfatórios os resultados para a precipitação. Esses dados (precipitação) foram obtidos junto ao Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia da Bolívia (SENAMHI), na estação pluviométrica da geleira Chacaltaya, (localizada a cerca de 135 km da cordilheira Tres Cruces) (figura 30). As medições hidrológicas/glaciológicas desta geleira tiveram início somente em 1993.

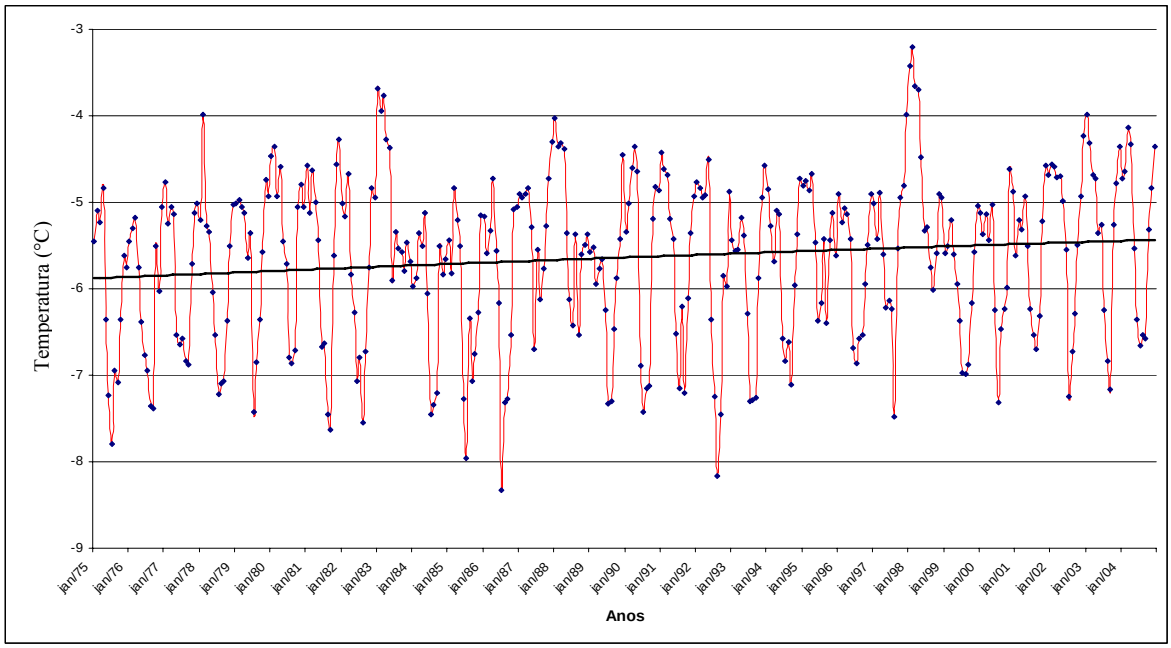


Figura 29 : Série temporal da temperatura do ar a 500 hPa para a região das Tres Cruces (linha vermelha) no período 1975 – 2004; a linha de tendência em preto.

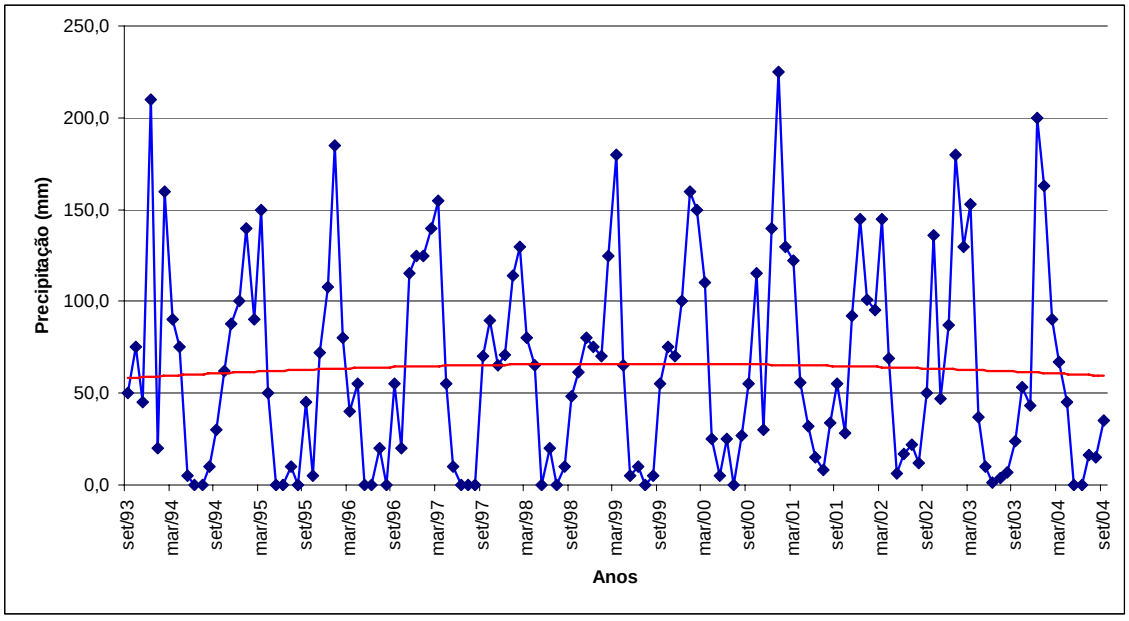


Figura 30 : Precipitação anual (linha azul) X tempo (Estação Chacaltaya 1993 – 2004); linha de tendência em vermelho.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta as características morfológicas e as dimensões das geleiras Campanani, c5250, Jacha Pacuni, Jankho Loma, Laramkkota, Malla Chuma e San Enrique na cordilheira Tres Cruces, conforme determinado pela análise de imagens digitais e dados cartográficos. Estas informações permitiram identificar variações na extensão e no volume dessas geleiras entre 1975 e 2004.

4.2. **Delimitação das bacias de drenagem**

A delineação precisa dos limites superiores das geleiras foi obtida pela integração das informações do mapa topográfico com os MDEs (figura 31). As composições coloridas possibilitaram mapear os limites inferiores das geleiras. No entanto, essa delimitação nem sempre foi precisa porque várias vezes a parte frontal da geleira estava coberta por sedimentos, resultando em uma resposta espectral similar ao terreno do entorno, portanto, mascarando assim a sua extensão real. As áreas claramente identificadas foram digitalizadas manualmente sobre as imagens já nas áreas em que existiam dúvidas, as geleiras eram comparadas com a fotografia aérea e só então delimitadas.

4.3. Determinação da posição e altitude das frentes das geleiras

Neste tópico são apresentados os resultados do monitoramento efetuado entre os anos de 1975 e 2004 (29 anos) nas geleiras, distribuídas de noroeste para sudeste com vertente para oeste: Jankho Loma, San Enrique, Laramkkota, Malla Chuma, Campanani. Duas geleiras com vertentes para leste também foram estudadas: Jacha Pacuni e c5250. Esta análise está baseada na interpretação de mapas topográficos, imagens satelitais e MDEs. A retração das geleiras bolivianas pôde ser observada sobrepondo diferentes vetores com as posições frontais (1975, 1985, 1992 e 2004) sobre uma mesma base cartográfica (figura 32).

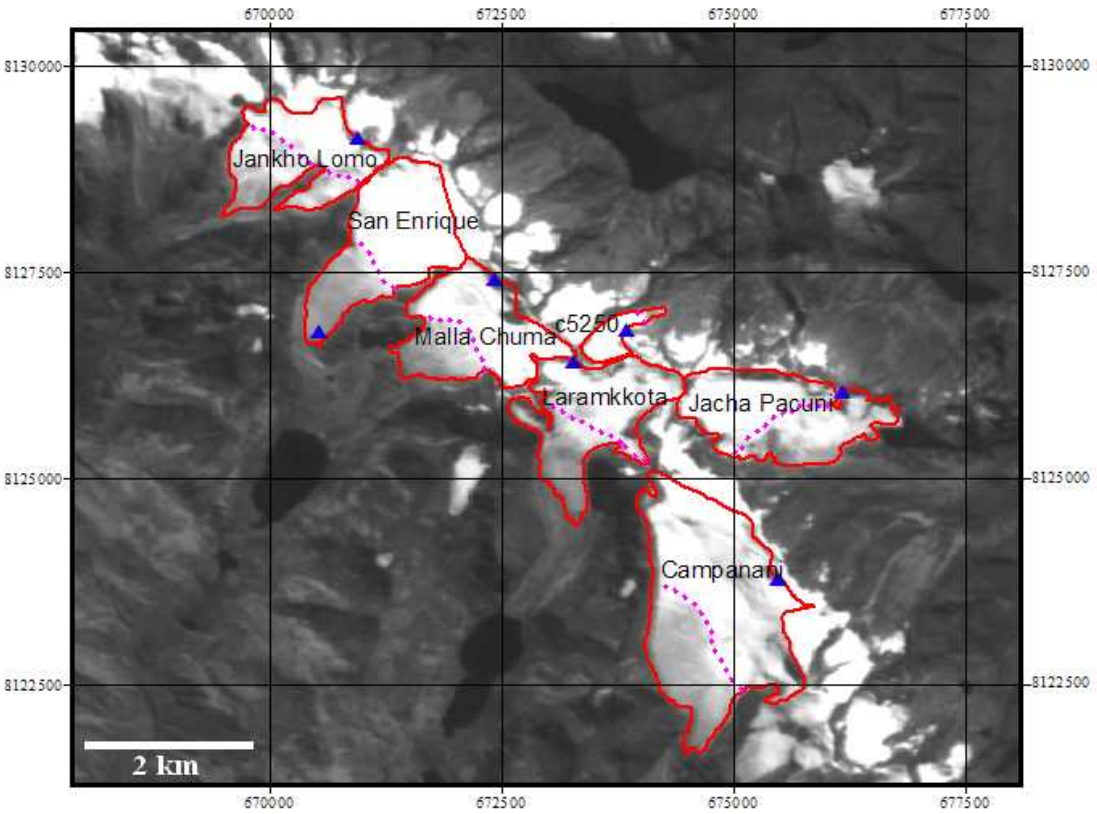


Figura 31 : Imagem do satélite CBERS-2, banda 4, maio de 2004. As bacias glaciais são apresentadas em vermelho e a linha de neve em roxo. O triângulo azul indica o ponto mais elevado e o qual foi utilizado como referência para calcular as variações frontais das geleiras.

Para determinar a precisão da posição do término das geleiras, os erros de medição (tabela 13) foram estimados usando o método de Hall *et al*. (2003), onde EPT é o "erro na posição do término":

EPT = {(resolução do *pixel* da imagem "base")²+(resolução do *pixel* da imagem analisada²)}^{½}+RMSE

Por exemplo, nos cálculos das incertezas, para a imagem CBERS-2 temos:

EPT = {(15)²+(20)²}^{½}+37,6 = ±73 m

Tabela 13 : Precisão na determinação da posição do término das geleiras da cordilheira Tres Cruces pelas imagens satelitais usadas nesta dissertação.

Imagem	Erro em metros
Landsat /MSS 1985	± 81
Landsat /TM 1992	± 90
CBERS-2/2004	± 73

No geral, a partir de 1975, as frentes das geleiras apresentaram significativas mudanças em todas as direções, de acordo com as análises o retrocesso médio destas geleiras foi de aproximadamente 12 m a^{-1} (tabela 14 e figuras 33 e 34). As observações tiveram de ficar restritas as médias de retração anual para um período relativamente longo (entre 1975–2004), devido aos erros inerentes da metodologia empregada muitas vezes serem maiores do que a própria retração, ficando impossibilitados os cálculos das variações de períodos mais curtos (*e.g.,* 1975–1985, 1985–1992 e 1992–2004).

4.4. Determinação das áreas das bacias de drenagem

As geleiras da cordilheira Tres Cruces são pequenas, variando entre 0,02 e 4,00 km^2 de área total (tabela 15). A comparação entre as imagens, tomadas no período 1975–2004, mostrou redução das áreas cobertas por gelo na cordilheira (figura 35). Em média ocorreu uma perda 18% da área das geleiras, ou seja, aproximadamente 0,009 km^2 a^{-1}. Ao longo destes 29 anos, a geleira c5250 (a menor entre aquelas estudadas nesta dissertação) foi a que teve a maior redução relativa (cerca de 50% de sua área). Por outro lado, a geleira Campanani, de maior superfície, foi a que perdeu menor área (6% do total) no período estudado.

Assim como no cálculo da retração das geleiras, a determinação de variações nas áreas por imagens satelitais não foi realizada para períodos curtos, devido à resolução dos dados. Os erros na determinação das áreas glacierizadas da cordilheira Tres Cruces foram estimados pela metodologia proposta por Hall *et al*. (2003):

Erro na determinação da área = (resolução do *píxel*)² x (2 x EPT / resolução do *píxel*)

Tabela 14 : Mudanças no comprimento das geleiras entre 1975 e 2004.

Geleira	Comprimento (metros)				Mudança de comprimento (metros)				Elevação (metros)*				Mudança de elevação (metros)			
	1975	1985	1992	2004	75-85	85-92	92-04	75-04	1975	1985	1992	2004	75-85	85-92	92-04	75-04
Jankho Loma	2021	1763	1736	1725	-258	-23	-11	-296	4895	4954	4964	4964	-59	-10	0	-69
San Enrique	300	236	221	119	-64	-15	-102	-181	4951	4996	5002	5053	-45	-6	-51	-102
Laramkkota	2360	2120	2020	1923	-240	-100	-97	-437	4883	4995	5006	5037	-112	-11	-31	-154
Malla Chuma	2024	1912	1827	1681	-112	-85	-146	-343	4945	4988	5027	5093	-43	-39	-66	-148
Campanani	2665	2393	2340	2288	-272	-53	-52	-377	4879	5078	5100	5113	-199	-22	-13	-234
Jacha Pacuni	1051	942	772	715	-109	-170	-57	-336	4917	4951	5001	5039	-34	-50	-38	-122
c5250	852	772	746	609	-80	-26	-137	-243	5172	5090	5080	5050	-82	-10	-30	-122

**Na determinação das variações médias de elevações da frente das geleiras, foi utilizado o MDE de 2004.*

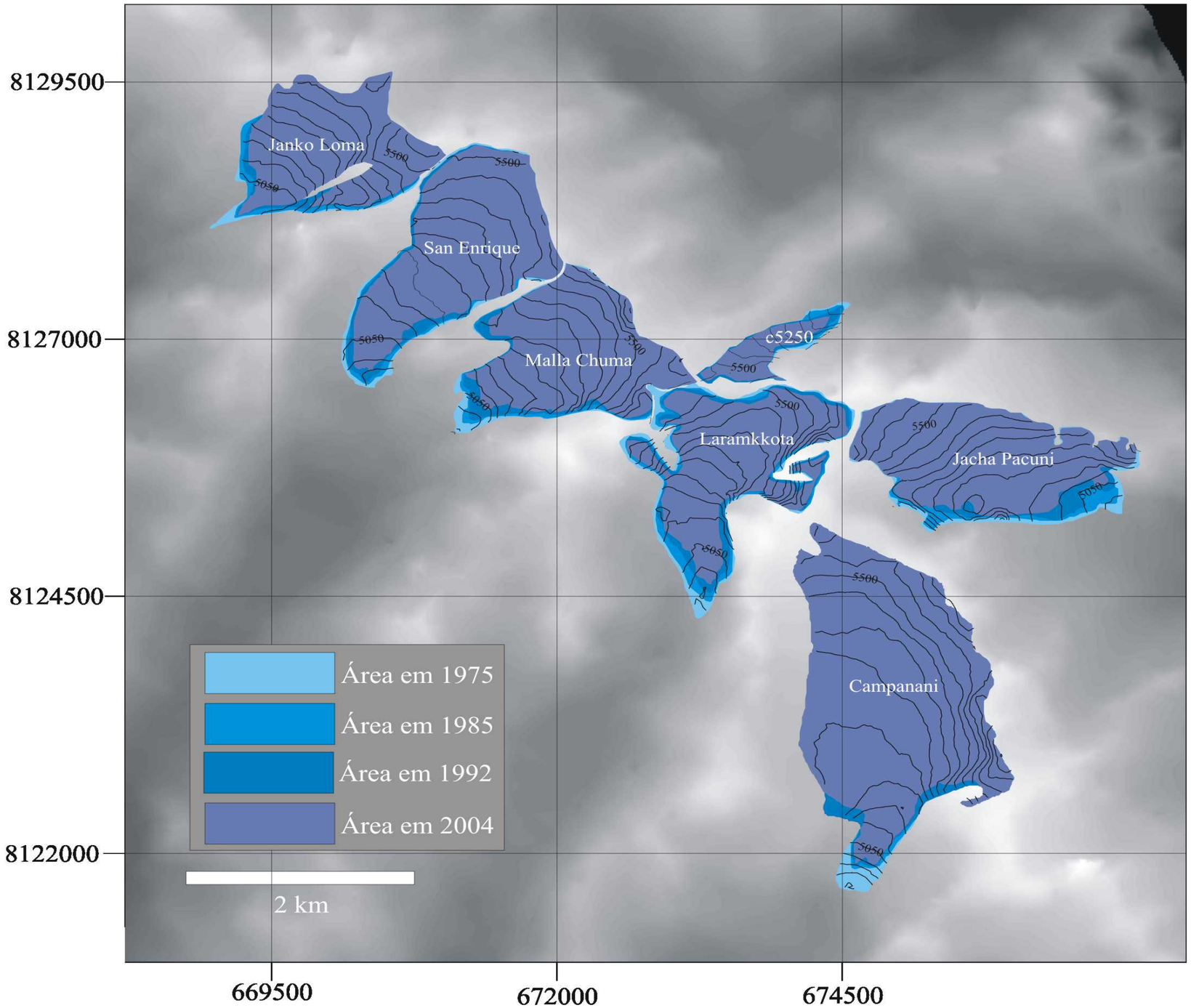


Figura 32 : Extensão das geleiras da cordilheira Tres Cruces em 1975, 1985, 1992 e 2004, sobrepostas ao MDE referente ao ano de 2004 (Intervalo das curvas de nível: 50 m).

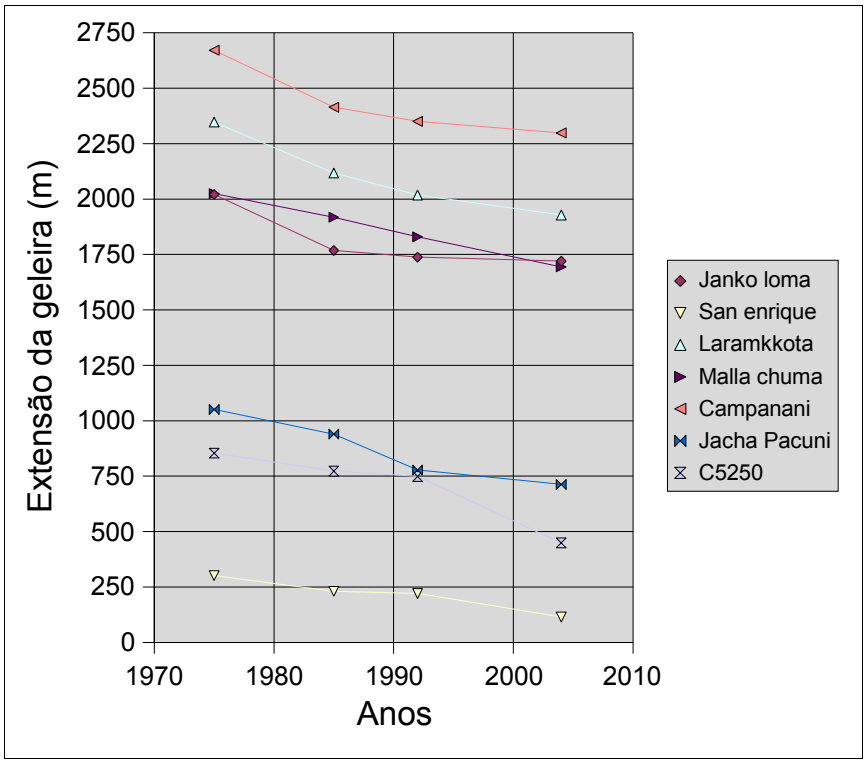


Figura 33 : Variações da extensão das geleiras na cordilheira Tres Cruces entre 1975 e 2004.

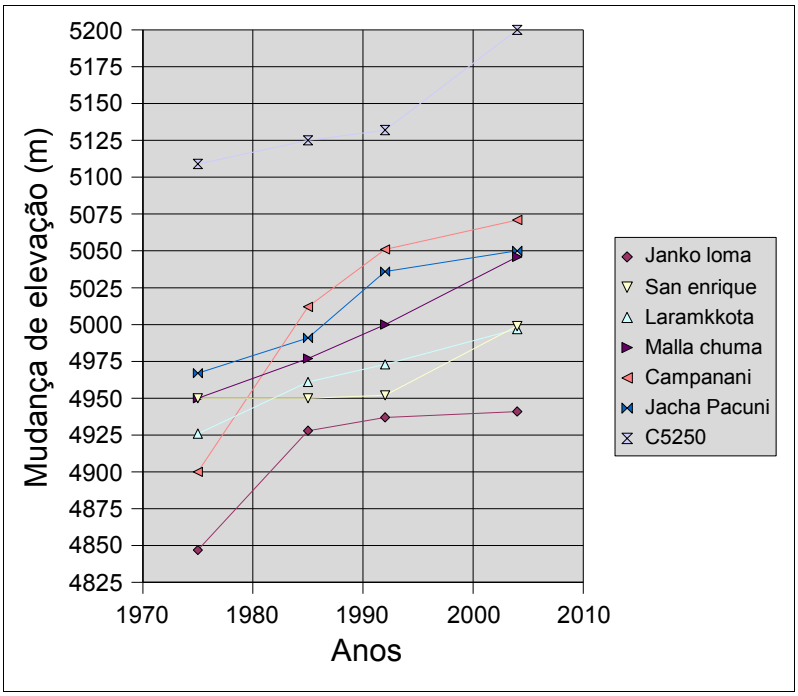


Figura 34 : Mudança de altitude do término das geleiras da cordilheira Tres Cruces entre 1975 e 2004.

Por exemplo, nos cálculos das incertezas, para a imagem CBERS-2 temos:

Erro na determinação da área = 20^2 x (2 x 73/20) = ± 0,0029 km²

Tabela 15 : Erros na determinação de áreas nas imagens satelitais usadas nesta dissertação.

Imagem	Erro em km²
Landsat/MSS 1985	± 0,0129
Landsat/TM 1992	± 0,0054
CBERS-2/2004	± 0,0029

Com 0,22 km² em 2004, a geleira c5250 pode ser considerada representativa para as massas de gelo da Cordilheira Oriental boliviana, pois 80% das geleiras possuem menos de 0,5 km^2 (Jordan, 1998). O seu comportamento provavelmente está relacionado a alteração no balanço energético porque, com a retração glacial, a absorção do fluxo de ondas longas nas zonas de contato entre o gelo e a rocha nas margens da geleira aumenta. Conseqüentemente, ocorre a intensificação do aporte de calor sensível entre os afloramentos rochosos e a massa glacial. Aumentando, portanto, o derretimento da geleira. O comportamento da geleira c5250 é muito similar àquele da geleira Chacaltaya, estudada por Ramirez *et al*. (2001), e que perdeu 40% da área entre 1992 e1998.

A geleira c5250 (figura 36) possui bacia composta, com um "eixo" principal e um pequeno "braço" que avança no sentido sudeste. Ao delimitar a bacia glacial para o ano de 1992, foi constatado o completo desaparecimento desta feição, porém em 2004 ela reaparece seguindo comportamento oposto ao observado na cordilheira. Ao que tudo indica, esta massa glacial de pequeno tamanho é independente, isto é, não recebe "alimentação" de outras geleiras, sendo extremamente dependente das variações da temperatura e precipitação. Por exemplo, em 1992 a cota altimétrica desta feição foi determinada em 5.340 m, e provavelmente toda a massa glacial encontrava-se em ablação. Desde que iniciaram as medições do balanço de massa da geleira Zongo (1991), o ano hidrológico 1991–1992 foi o segundo ano com maior déficit de massa da geleira (-1,09 m eq.água a^{-1}), sendo este também um ano de *El Niño* com temperaturas elevadas e baixas precipitações (Ribstein *et al.,* 1995; Soruco *et al.,* 2005). Devido a esses fatores nos cálculos referentes às variações de área desta geleira somente foram consideradas as informações referentes ao seu eixo principal.

As demais geleiras da cordilheira Tres Cruces (tabela 16) apresentaram comportamento semelhante a outras massas glaciais da América do Sul. Como a geleira Charquini (Rabatel, 2005), que teve perda anual de superfície de 0,006 km^2 entre 1983 e 1997 e a cordilheira Blanca (Georges, 2004), onde a perda total das áreas cobertas por gelo ficou próximo a 15% (entre 1987 e 1996).

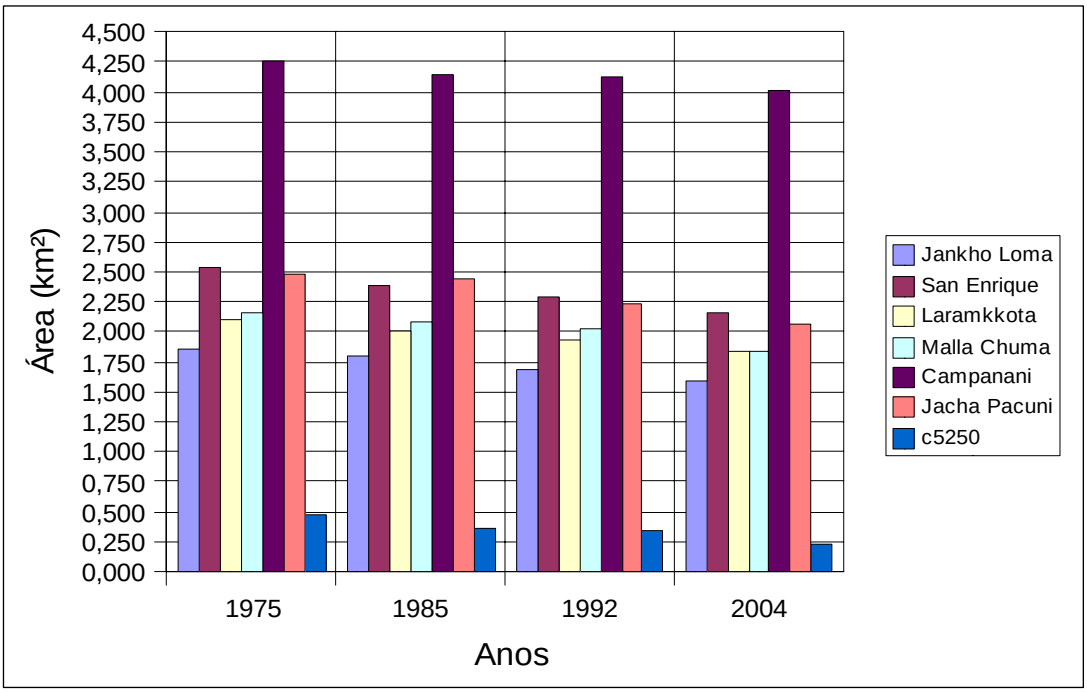


Figura 35 : Variações na área das geleiras Tres Cruces entre 1975 e 2004.

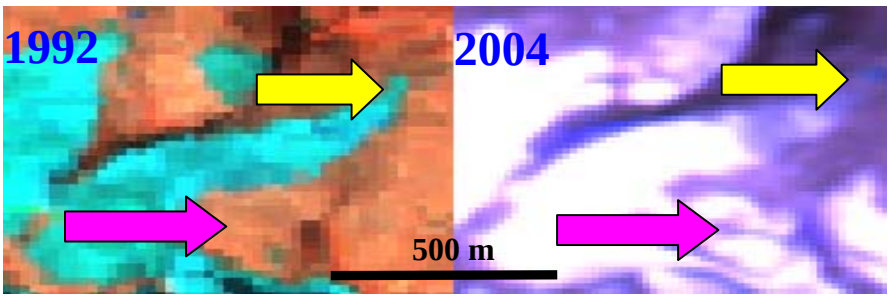


Figura 36 : Na análise da bacia glacial da geleira c5250 é possível observar que ocorreu retração de sua parte frontal entre 1992 (*Landsat*-5 bandas 5,4,2) e 2004 (CBERS-2 bandas 3,2,1) (setas amarelas), porém neste mesmo período o pequeno "braço" que se conectava ao eixo principal desapareceu, surgindo novamente na imagem de 2004 (setas roxas).

Tabela 16 : Mudanças de área das geleiras da cordilheira Tres Cruces entre 1975 e 2004.

Geleira	Área em km²				Variação de área em km²				Variação da área (%)				Variação da área-ano (km²)			
	1975	1985	1992	2004	75-85	85-92	92-04	75-04	75-85	85-92	92-04	75-04	75-85	85-92	92-04	75-04
Jankho Loma	1,848	1,795	1,678	1,592	-0,054	-0,116	-0,087	-0,257	-2,903	-6,297	-4,685	-13,885	-0,005	-0,017	-0,007	-0,009
San Enrique	2,531	2,380	2,297	2,160	-0,151	-0,082	-0,137	-0,371	-5,982	-3,249	-5,425	-14,656	-0,015	-0,012	-0,011	-0,013
Laramkkota	2,109	2,014	1,935	1,833	-0,095	-0,079	-0,103	-0,276	-4,483	-3,742	-4,869	-13,093	-0,009	-0,011	-0,009	-0,010
Malla Chuma	2,165	2,079	2,023	1,841	-0,086	-0,055	-0,182	-0,324	-3,973	-2,558	-8,420	-14,952	-0,009	-0,008	-0,015	-0,011
Campanani	4,267	4,149	4,120	4,010	-0,118	-0,029	-0,110	-0,256	-2,755	-0,686	-2,570	-6,011	-0,012	-0,004	-0,009	-0,009
Jacha Pacuni	2,471	2,437	2,238	2,070	-0,034	-0,199	-0,168	-0,402	-1,374	-8,071	-6,816	-16,261	-0,003	-0,028	-0,014	-0,014
c5250	0,483	0,365	0,336	0,227	-0,118	-0,029	-0,110	-0,256	-24,335	-6,061	-22,701	-53,097	-0,012	-0,004	-0,009	-0,009

4.5. Determinação das variações na altitude da linha de neve e do cálculo da proporção da área de acumulação (PAC) para 2004

A posição da linha de neve foi delimitada manualmente sobre cada uma das imagens satelitais (1985, 1992 e 2004), e sobreposta sobre o MDE de 1975. Não foi possível a obtenção desta informação para 1975, pois o mapa topográfico não apresenta a altitude da linha de neve.

Como as imagens foram adquiridas em diferentes épocas do ano, elas não puderam ser utilizadas para análises confiáveis do comportamento da linha de neve ao longo do tempo. Somente após sucessivos anos de medições, preferencialmente no mesmo dia e mês, é possível ter uma "idéia" dos valores para um balanço do comportamento da massa glacial. Além disso, o erro na determinação desta linha é muito difícil de ser estimado, pois sua posição pode ser afetada por uma recente queda de neve durante a estação seca, depende do RMSE das imagens e da resolução em que foi construído o MDE.

Devido a esses fatores, optou-se por determinar a posição da linha de neve apenas para 2004. Sendo esta delimitada sobre a imagem CBERS-2 banda 4 (figura 31 a 5.300 m de altitude), decidiu-se por esta configuração devido à saturação apresentada pela composição colorida (4,3,2), especialmente na diferenciação entre as zonas de gelo sobreposto das fácies de neve (figura 37). A banda 4 foi a que apresentou a menor saturação da neve das cenas de trabalho. A linha de neve foi então utilizada para calcular a proporção entre a superfície da área de acumulação e área total da geleira (tabela 17). Todas geleiras analisadas apresentaram a proporção da área de acumulação maior do que 60%, indicando um comportamento muito parecido com as geleiras Zongo (67%), Charquini (60%) e Chacaltaya (60%), as quais, Francou (2005) identificou a ALE a aproximadamente 5.250 m de altitude.

Tabela 17 : Área total, de acumulação e de ablação de sete geleiras da cordilheira Tres Cruces em maio de 2004. Note a proporção da área de acumulação (PAC).

Geleiras	Área Total (km²)	Área de Acumulação em km²	Área de Ablação (km²)	PAC (%)
Janko loma	1,50	0,95	0,55	63
San Enrique	2,10	1,40	0,70	67
Laramkkota	1,80	1,10	0,70	61
Malla Chuma	1,80	1,30	0,50	72
Campanani	4,00	2,80	1,20	70
Jacha Pacuni	2,00	1,23	0,77	62
C5250	0,22	0,19	0,03	86

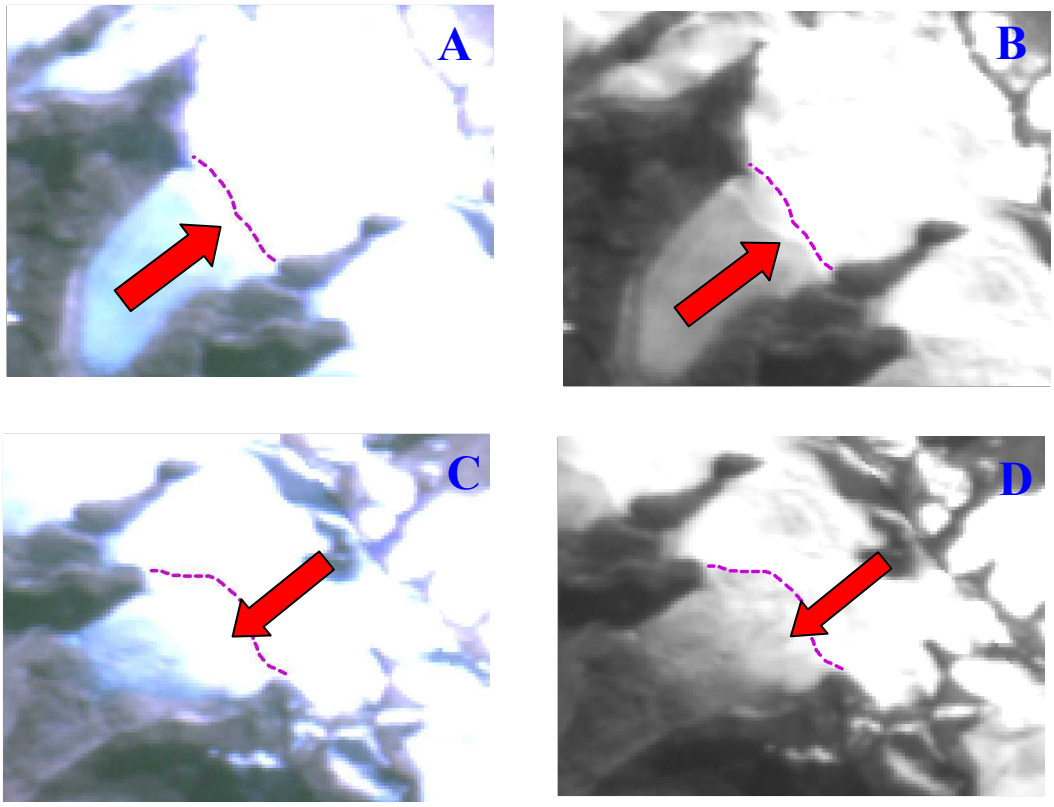


Figura 37 : As setas vermelhas demonstram a dificuldade de diferenciar as zonas de gelo sobreposto das fácies de neve na composição colorida da imagem CBERS-2 nas geleiras San Enrique (A e B) e Malla Chuma (C e D). A linha roxa indica a linha de neve, sendo esta empregada nos cálculos referentes ao PAC. As letras B e D demonstram a maior nitidez da banda 4 para esta aplicação.

4.6. Mudanças no volume das geleiras

Para determinar a perda ou ganho de gelo entre 1975 e 2004, os MDEs foram subtraídos entre si e a mudança no volume foi calculada sobre as áreas de acumulação e ablação das geleiras, utilizando como referência a área total em 2004.

A tabela 18 e figura 38 mostram que ocorreu redução no volume de gelo geral durante o período, principalmente na parte frontal das geleiras. Nesta análise foram consideradas somente as geleiras que apresentaram mudanças em áreas superiores aos erros da área de calibração e aos erros do MDEs. Assim, foram excluídas dessa análise as geleiras Malla Chuma, Campanani e Jacha Pacuni. A figura 39 mostra a orientação dos perfis topográficos.

Tabela 18 : Estimativas das mudanças no volume de geleiras da cordilheira Tres Cruces.

	Jankho Loma	San Enrique	Laramk kota	Malla Chuma	Campanani	Jacha Pacuni	c5250
Diferença (m)	-54	-65	-64	-9	-16	-20	-36
Área de calibração em (km^2)	0,08						
Valores médios de diferença na área de calibração (m)	- 6						
Erro do MDE 1975 (m) + Erro do MDE 2004 (m)	± 21						
Mudança média de altitude na área de estudo (m)	-48	-59	-58	-3	-10	-14	-30
Perda de volume em equivalente d'água (m eq.água a^{-1})	-1,49	-1,83	-1,80	-	-	-	-0,93

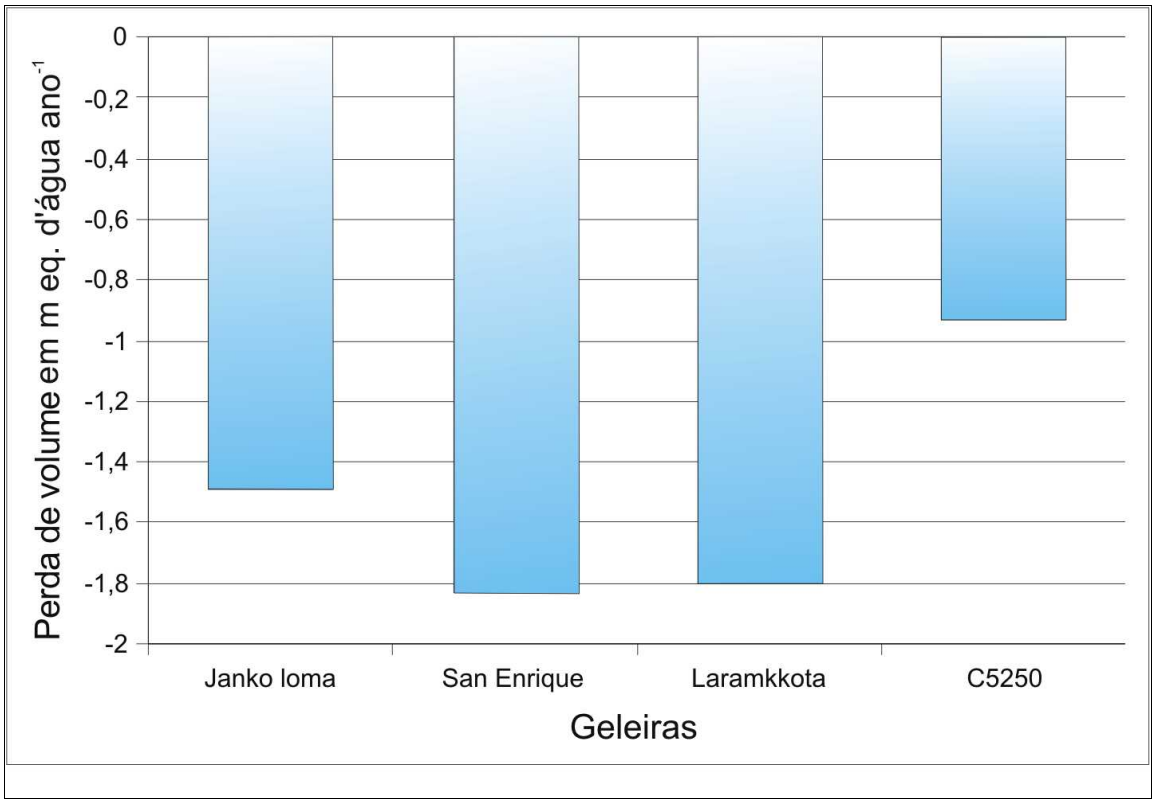


Figura 38 : Perda do volume de gelo entre 1975 e 2004 em 4 geleiras da cordilheira Tres Cruces.

As geleiras da cordilheira Tres Cruces apresentaram uma perda média de aproximadamente 1,55 m eq.água a^{-1} durante os 29 anos analisados. Seguindo comportamento muito semelhante às geleiras Chacaltaya (0,96 m eq.água a^{-1} entre 1992 e 1998) e Charquini (1,44 m eq.água a^{-1} entre 1983 e 1997) (Ramirez *et al*., 2001; Rabatel, 2005). Já no Equador a perda de volume foi um pouco mais elevada, sendo estimada em 3-4 m eq.água a^{-1} para a geleira Antizana 15 entre 1995 e 2002 (Jordan *et al.,* 2005).

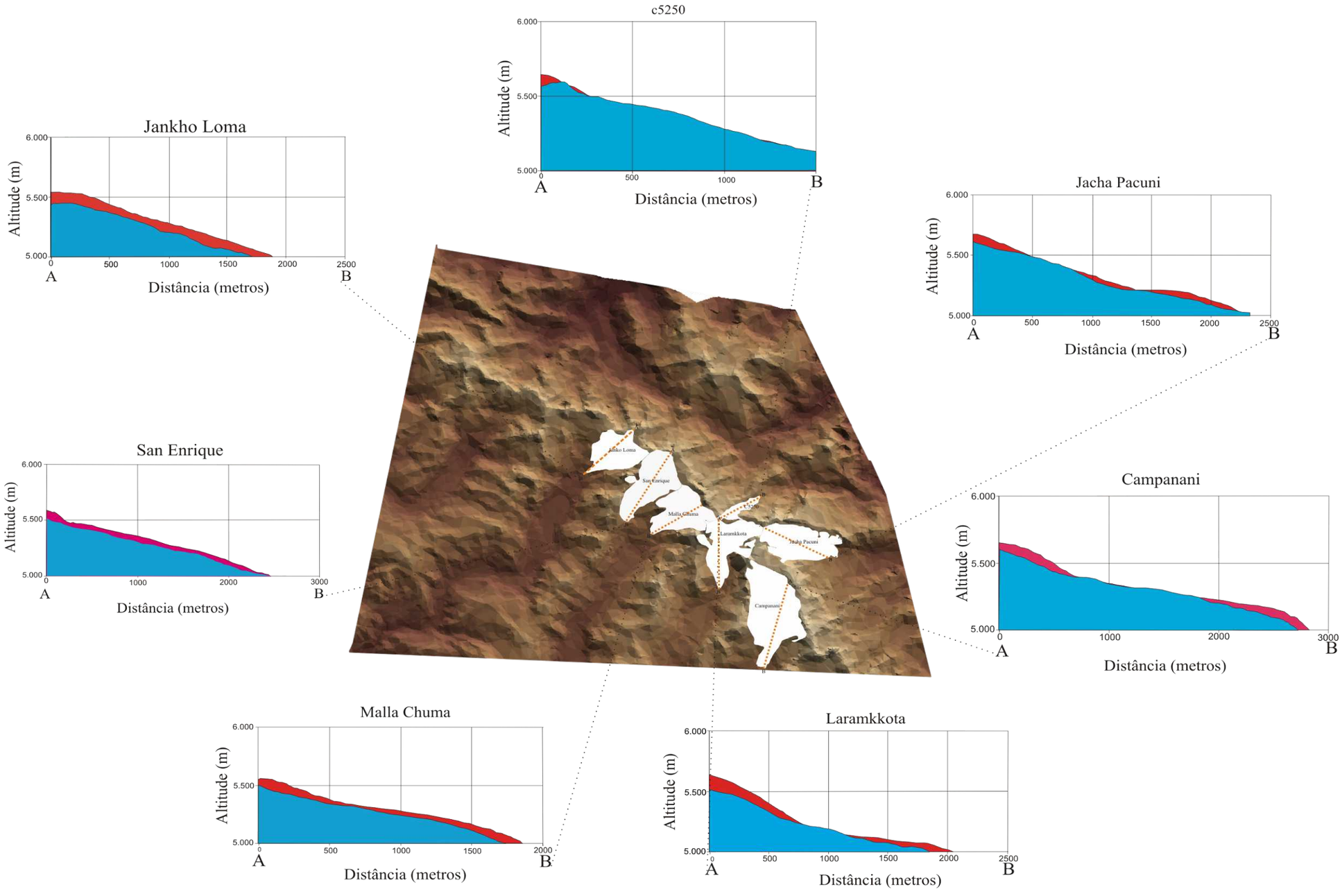


Figura 39 : Comparação dos perfis topográficos em 1975 (vermelho) e em 2004 (azul) de sete geleiras da cordilheira Tres Cruces. O MDE no centro da figura corresponde ao ano de 2004, as linhas laranja marcam os 7 transectos analisados.

4.7. Morfologia das geleiras

Existem 156 geleiras na cordilheira Tres Cruces (Jordan, 1998), assim, optou-se por analisar somente sete geleiras com exposição das vertentes diferentes e, portanto, em condições climáticas diversas (figura 40). Outro critério importante foi a extensão das massas de gelo, pois, devido à resolução espacial do satélite CBERS-2 (20 m), geleiras muito pequenas seriam de difícil delimitação. As imagens do CBERS-2 foram usadas na classificação morfológica das massas glaciais nesta dissertação, considerando a facilidade de obtenção, a resolução espacial (20m) e regularidade de aquisição (permitindo a cobertura completa da Terra a cada 26 dias).

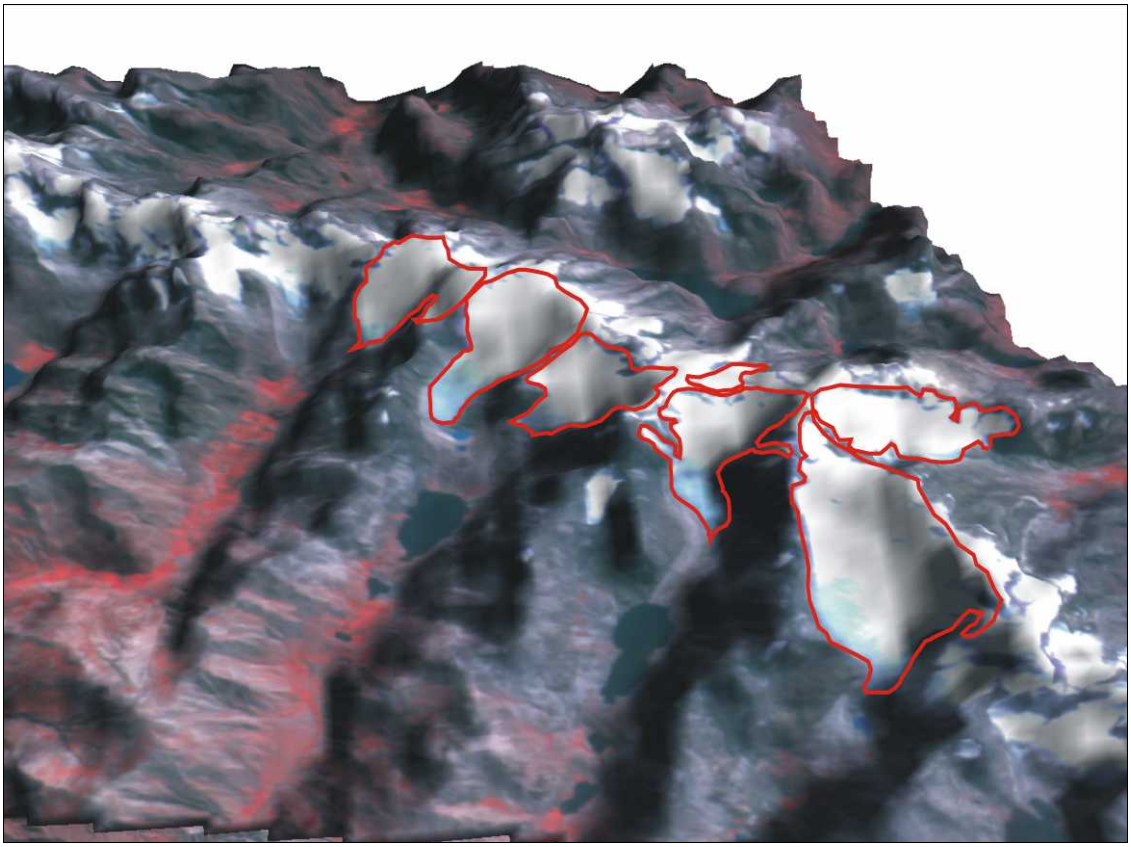


Figura 40 : Visada sudeste da cordilheira Tres Cruces, a imagem CBERS-2 (4,3,2) está sobreposta ao MDE/ASTER. Em vermelho estão os limites das geleiras analisadas.

Devido às mesmas características topográficas, onde as linhas de crista da cordilheira determinam as paredes dos vales e confinam a massa glacial, praticamente todas geleiras analisadas são geleiras de vale. As bacias glaciais são bem nítidas, e facilmente identificadas nas imagens satelitais, pois os numerosos picos montanhosos (normalmente acima de 5.500 metros de altitude) que circundam a área analisada comportam-se como verdadeiros divisores entre as geleiras (*e.g.*, nevado Atoroma, cordilheira San Enrique, cordilheira Bengala,

cordilheira San Pedro, cordilheira Sofia e Sacavón Gigante Grande).

Os controles climáticos são claramente identificados ao comparar a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (c5250), cerca de 100–270 m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul (figuras 41, 42 e 43). Este fenômeno estaria relacionado com a diferente exposição solar das vertentes. Onde durante a manhã as nuvens ainda se encontrariam em altitudes baixas, expondo às geleiras de orientação leste-norte à radiação direta do sol. Já no período da tarde, a nebulosidade estaria em sua posição mais elevada na troposfera, absorvendo grande parte da radiação, deixando as vertentes de orientação oeste-sul mais abrigadas (Jordan, 1985).

A origem da massa glacial se dá pela queda direta de neve, ou pelo transporte de cristais de gelo trazidos pela ação eólica. Todas geleiras analisadas apresentam retração de suas partes terminais, isto fica evidente quando são comparadas as posições frontais ao longo do período de estudo. A presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante a glaciação do Pleistoceno (Jordan, 1998) as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente.

4.7.1. Morfologia da geleira Jankho Loma

Esta geleira é a nascente mais elevada do rio Atoroma Chuma, um dos afluentes do rio Araca. É uma geleira de vale (figura 44 e tabela 18), com uma superfície de 1,59 km^2, formada por duas línguas, ambas de orientação sul-oeste. Estas surgiram em decorrência da fragmentação que ocorreu na língua principal devido ao derretimento durante a década de 1990. Os pontos mais e menos elevados estão a 5.594 m e 4.964 m de altitude, respectivamente. As morainas de retração, a 4.661 m de altitude, indicam a máxima extensão durante o Quaternário, aproximadamente 303 m de diferença em relação aos dias atuais. Sua bacia possui forma simples, sem tributários. Quanto à parte frontal, ela é considerada coalescente, apresentando recessão de 296 m (entre 1975 e 2004), sendo determinada sobre a língua principal.

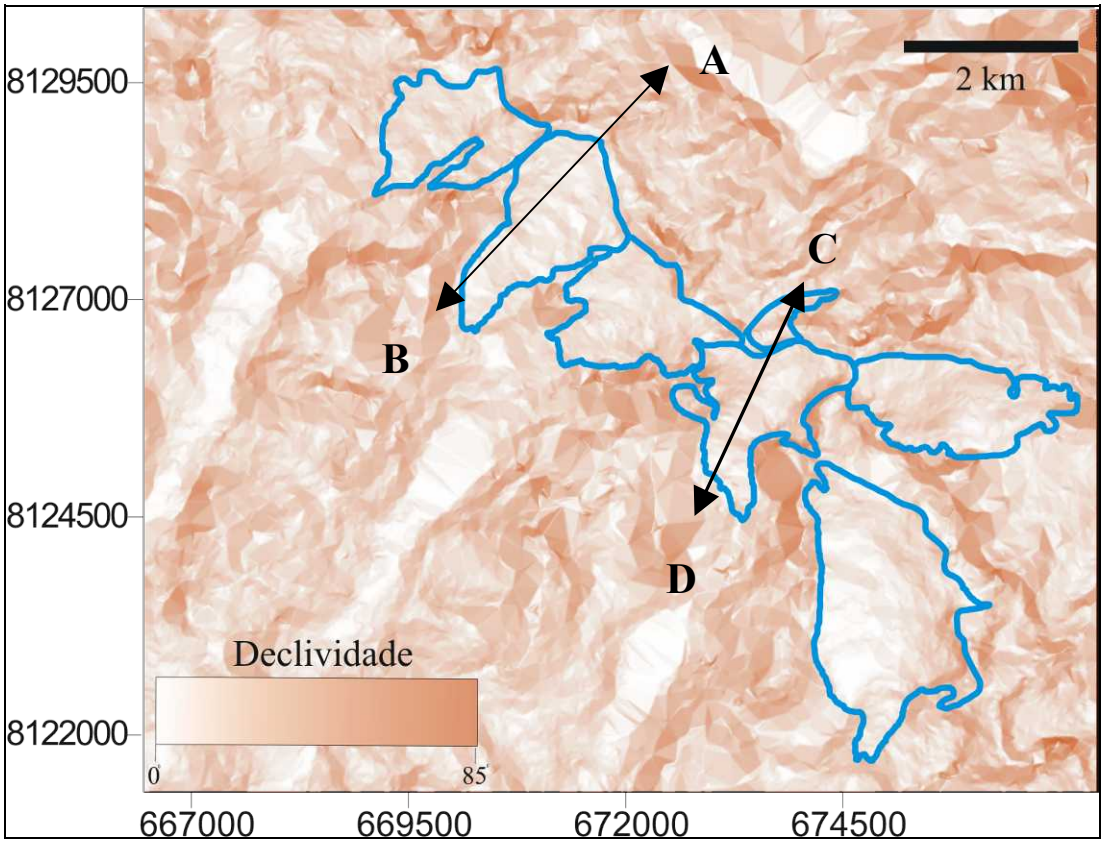


Figura 41 : Mapa de declividade da cordilheira Tres Cruces baseado no MDE/ASTER. A linha preta indica os perfis topográficos apresentados nas figuras 42 e 43.

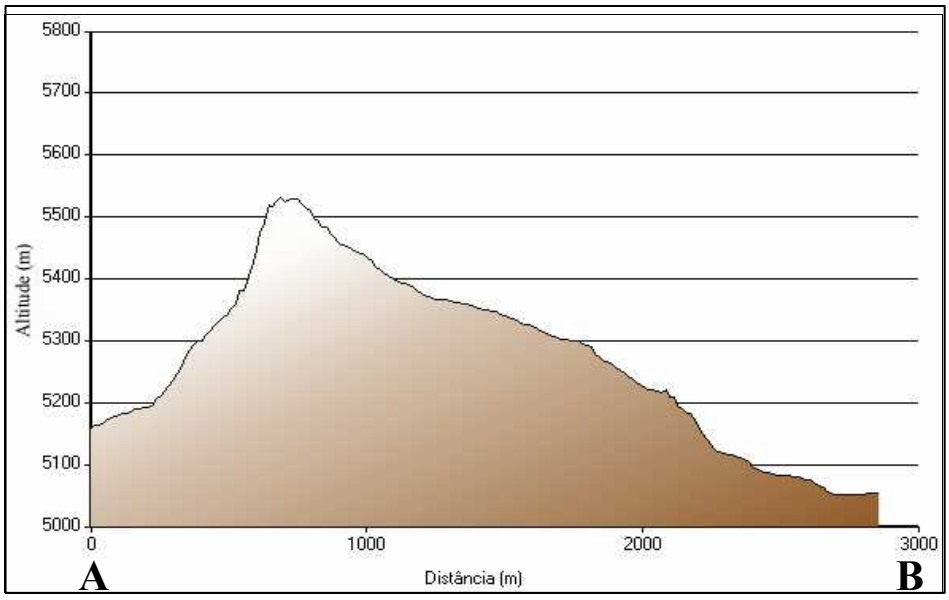


Figura 42 : Perfil topográfico demonstrando os maiores desníveis no setor norte-leste da cordilheira Tres Cruces.

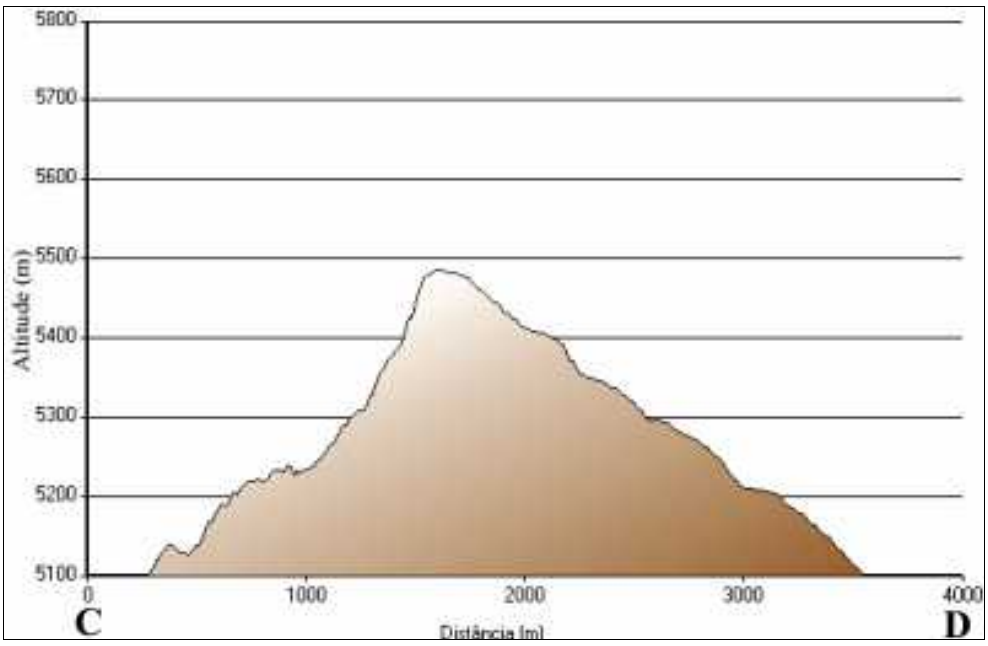


Figura 43 : Perfil topográfico demonstrando os maiores desníveis no setor norte-leste da cordilheira Tres Cruces.

4.7.2. Morfologia da geleira San Enrique

Tendo orientação sul-oeste, esta geleira de vale (figura 44 e tabela 18) com 2,16 km^2 de área, tem altitudes máximas e mínimas de 5.642 m e 5.053 m, respectivamente. Suas águas de degelo, juntamente com às da geleira ao lado (Malla Chuma), formam a lagoa Octa Kkota, esta é a nascente do rio Malla. No ano de 1975, sua língua tinha contato direto com um pequeno lago formado entre as morainas de retração. Este tipo de feição recebe o nome de lago proglacial, que forma-se pela retenção das águas de degelo pelas morainas terminais, que interrompem o fluxo d'água. Durante o Quaternário a altitude do término era 4.715 m, aproximadamente 338 m mais baixa do que no Presente.

4.7.3. Morfologia da geleira Malla Chuma

Esta geleira de vale (figura 44 e tabela 18), localizada na face sul-oeste da cordilheira Tres Cruces, possui altitude máxima e mínima, respectivamente, de 5.632 m (cordilheira Bengela) e 5.093 m. A área superficial é de 1,84 km^2 e seu término retraiu 343 m entre 1975 e 2004. Assim como a geleira San Enrique, suas águas de degelo acumulam-se na lagoa Octa Kkota. As morainas terminais indicam a máxima extensão desta massa glacial em 4.741 m altitude durante o Quaternário, cerca de 352 m mais baixa do que a posição atual.

4.7.4. Morfologia da geleira Laramkkota

Sua bacia possui forma composta (figura 45 e tabela 18) por ter dois "braços" que se unem a língua principal. A análise de seu perfil topográfico (figura 39) indica uma grande irregularidade subglacial na parte central, gerando uma grande tensão longitudinal na geleira e, por conseqüência, dando origem a fendas tranversais na direção do fluxo. Possui superfície de 1,83 km^2, com as elevações máximas e mínimas entre 5.713 m (cordilheira Sofia) e 5.037 m. Durante o Quaternário sua frente atingiu a altitude de 4.835 m. A geleira está na face sul-oeste da cordilheira, onde suas águas de degelo dão origem a lagoa Laramkkota, pertencendo à bacia hidrográfica do rio Yaco.

4.7.5. Morfologia da geleira Campanani

Com 4,00 km^2, é a geleira com maior área na cordilheira Tres Cruces. Assim como a San Enrique, a geleira Campanani também apresenta na sua parte frontal um pequeno lago originado pelo processo de retração glacial. Na imagem CBERS-2 (figura 46 e tabela 18) pode-se observar nítidas morainas terminais as quais atestam sua máxima extensão no Quaternário a 4.805 m de altitude, cerca de 308 m mais baixa do que a posição atual (5.113 m). Diferentemente das demais geleiras analisadas a Campanani pode ser considerada um campo de gelo, onde a cobertura glacial não é espessa o suficiente para cobrir montanhas ou formar uma calota.

4.7.6. Morfologia da geleira Jacha Pacuni

Suas águas de degelo são as nascentes do rio Khatu, este um dos afluentes do rio Colquiri. Ocupando uma grande área de acumulação da face leste (2,23 km²), esta geleira de vale, de orientação sul-leste possui forma composta, tendo as elevações máximas e mínimas em 5.665 e 5.039 m respectivamente (figura 47 e tabela 18). De acordo com as morainas de retração, durante o Quaternário a frente atingiu 4.794 m (245 m mais baixa que no presente).

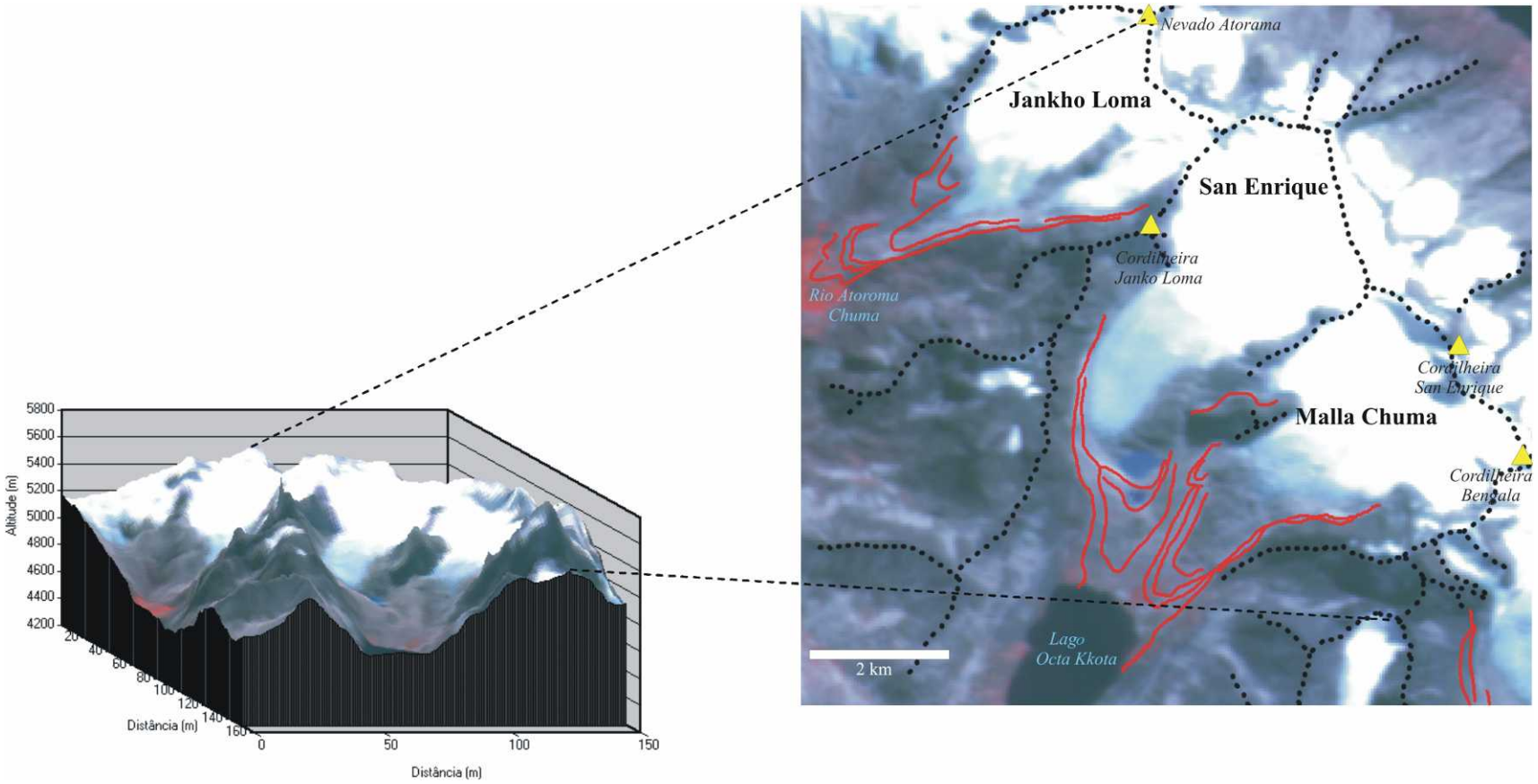


Figura 44 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) das geleiras Jankho Loma, San Enrique e Malla Chuma. Na direita, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, e a linha preta marca as cristas que circundam as bacias glaciais; à esquerda, o MDE/ASTER sobreposto à imagem CBERS.

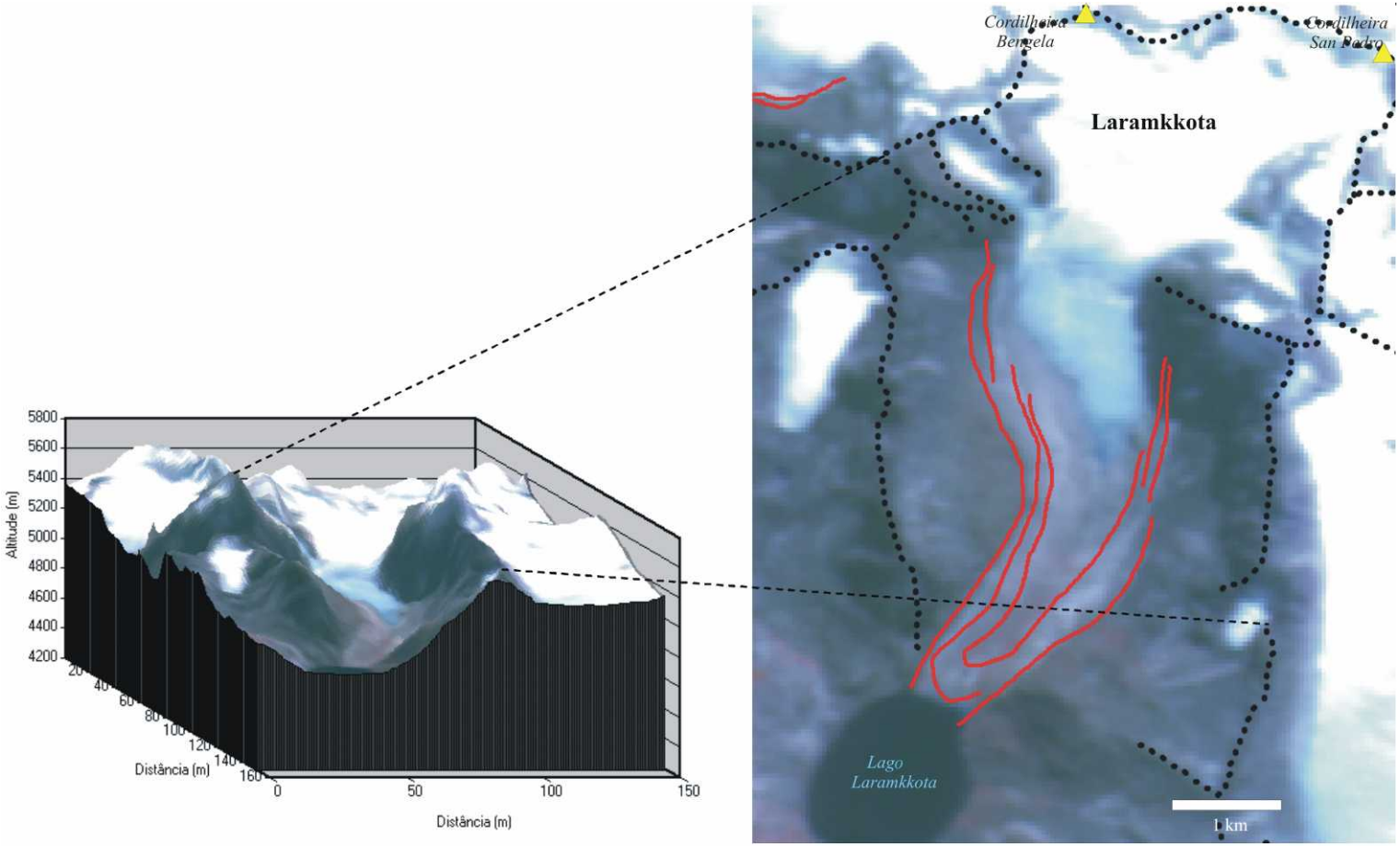


Figura 45 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Laramkkota. Na direita, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, e a linha preta marca as cristas que circundam as bacias glaciais; à esquerda, o MDE/ASTER sobreposto à imagem CBERS.

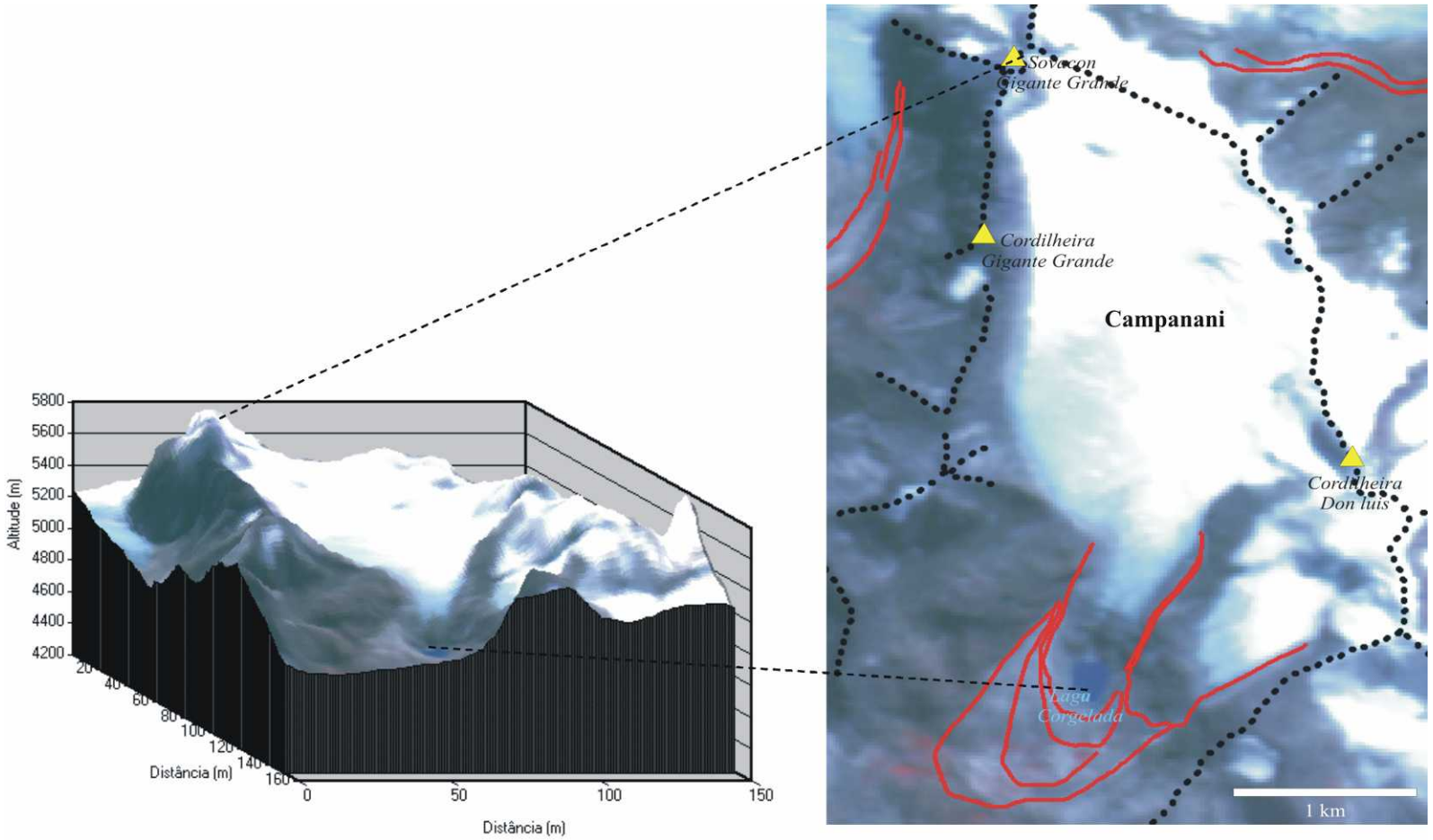


Figura 46 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Campanani. Na direita, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, e a linha preta marca as cristas que circundam as bacias glaciais; à esquerda, o MDE/ASTER sobreposto à imagem CBERS.

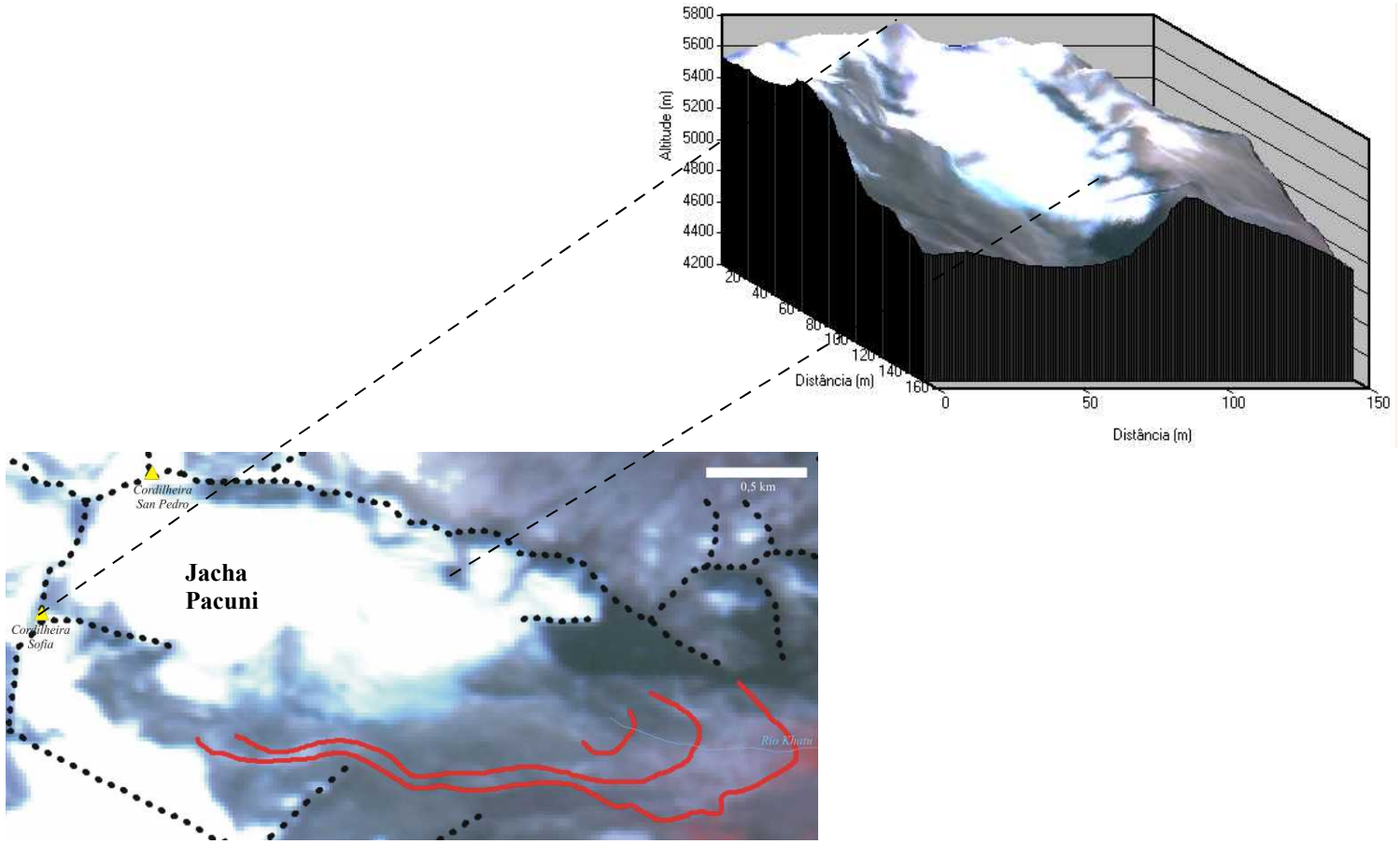


Figura 47 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira Jacha Pacuni. Na esquerda, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, e a linha preta marca as cristas que circundam as bacias de glaciais; à direita, o MDE/ASTER sobreposto à imagem CBERS.

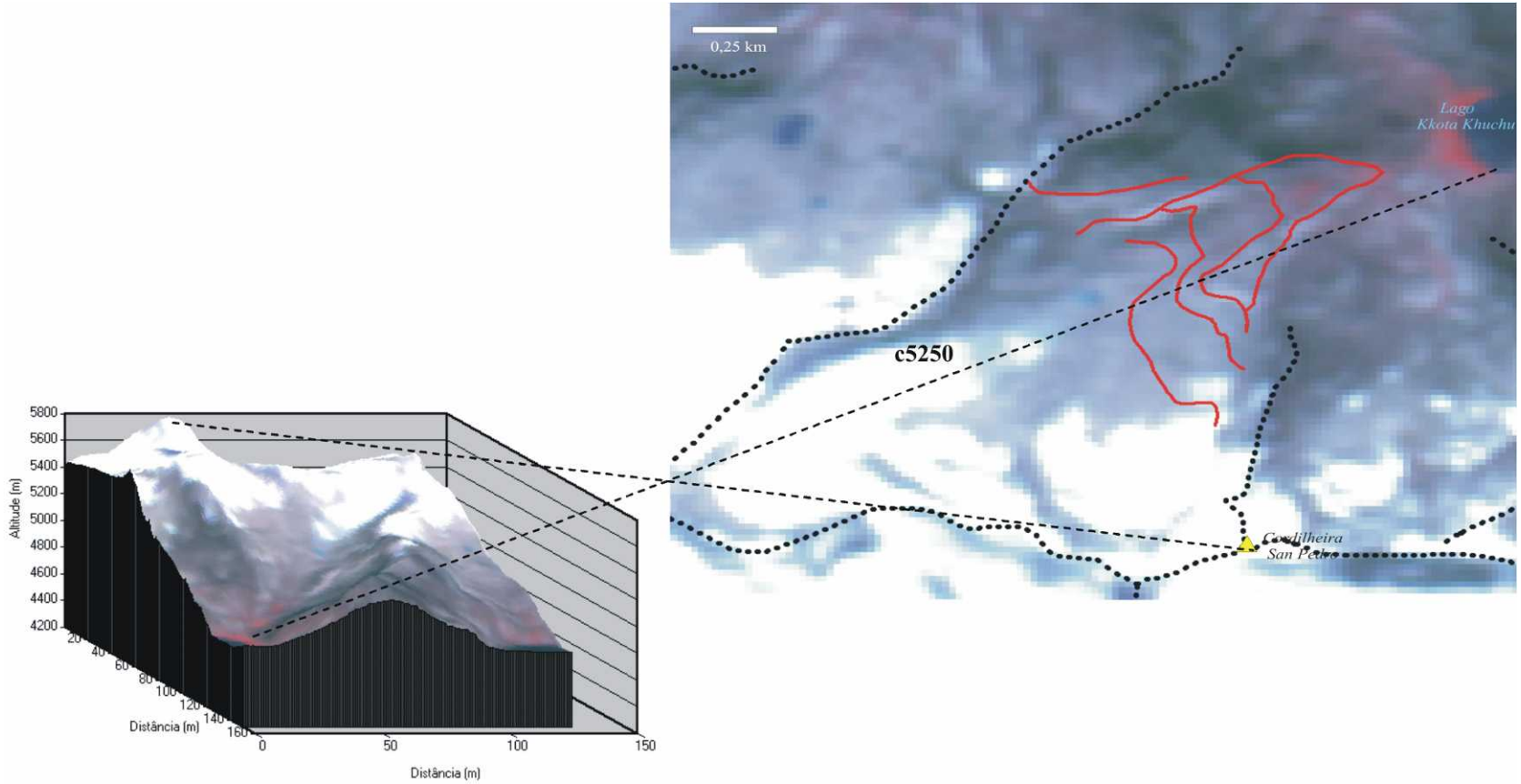


Figura 48 : Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) da geleira c 5250. Na direita, na imagem CBERS-2 (4, 3, 2), as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, e a linha preta marca as cristas que circundam as bacias glaciais; à esquerda, o MDE/ASTER sobreposto à imagem CBERS, a visada foi realizada de norte para o sul.

Tabela 18 : Classificação morfológica de acordo com as características do GLIMS (Rau *et al.,* 2004).

Classificação	**Classes**					
Nome da geleira	**Jankho Loma**	**San Enrique**	**Malla Chuma**	**Laramkkota**	**Campanani**	**c5250**
Classificação Primária	Geleira de vale	Geleira de vale	Geleira de vale	Geleira de vale	Campo de gelo	Geleira de vale
Forma	Bacia simples	Bacia simples	Bacia simples	Bacia composta	Bacia simples	Bacia composta
Característica Frontal	Coalescente	Normal	Normal ou mista	Normal	Normal	Normal
Característica Longitudinal	Regular	Regular	Regular	Cascateada	Regular	Regular
Dinâmica da língua de gelo	Retração pequena	Retração pequena	Retração pequena	Retração pequena	Retração pequena	Retração pequena
Tipo de moraina	Lateral e terminal	Lateral e terminal	Lateral e terminal	Lateral e terminal	Lateral e terminal	Lateral e terminal

4.7.7. Morfologia da geleira c5250

Esta pequena geleira de vale (0,33 km²) de orientação norte-leste, apresentou uma significativa perda de área (53%) ao longo dos 29 anos analisados (figura 48 e tabela 18). Além de seu tamanho reduzido e maior exposição solar (ver tópicos 4.3 e 4.4), a configuração geomorfológica da cordilheira Tres Cruces pode estar contribuindo para esse comportamento. Nas figuras 41 e 42 é possível constatar que as vertentes leste-norte apresentam pendentes um pouco mais acentuadas que o lado oposto (oeste-sul), tornando disponível uma menor área para a acumulação do gelo, podendo influenciar também numa maior velocidade da retração. A geleira c5250 tem suas elevações máximas e mínimas em 5.632 m e 5.050 m respectivamente, durante o Quaternário suas morainas de retração indicam que ela avançou até 4.796 m de altitude.

4.8. Análise climática na região de estudo

A análise da série temporal da temperatura média anual (figura 29), indica um aumento de aproximadamente 0,3°C ao longo dos 29 anos na região da cordilheira Tres Cruces. A região parece, então, seguir tendência próxima ao aumento da temperatura média planetária, que no mesmo período elevou-se 0,2°C (IPCC, 2001).

Caracterizam o período de estudo freqüentes eventos de *El Niño* e reduzidas condições de *La Niña* (figura 24). Os *El Niños* mais intensos da série analisada foram: 1982/83; 1986/87; 1991/92; 1997/98, e correspondem às temperaturas médias mais elevadas do período, exceção foi o período 1991–1992 onde as temperaturas mantiveram-se na média. Nos eventos *La Niña* ocorre o inverso, com as temperaturas apresentando tendências a valores menores.

Na figura 49 observa-se que as temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de junho, julho, agosto e setembro, já as mais elevadas nos meses de dezembro, janeiro e março. No período, a temperatura média foi -5,7 °C, a mínima registrada foi - 8 °C no mês de julho em 1985. Já a máxima registrada foi - 3,3 °C no mês de fevereiro do ano de 1998 (figura 51).

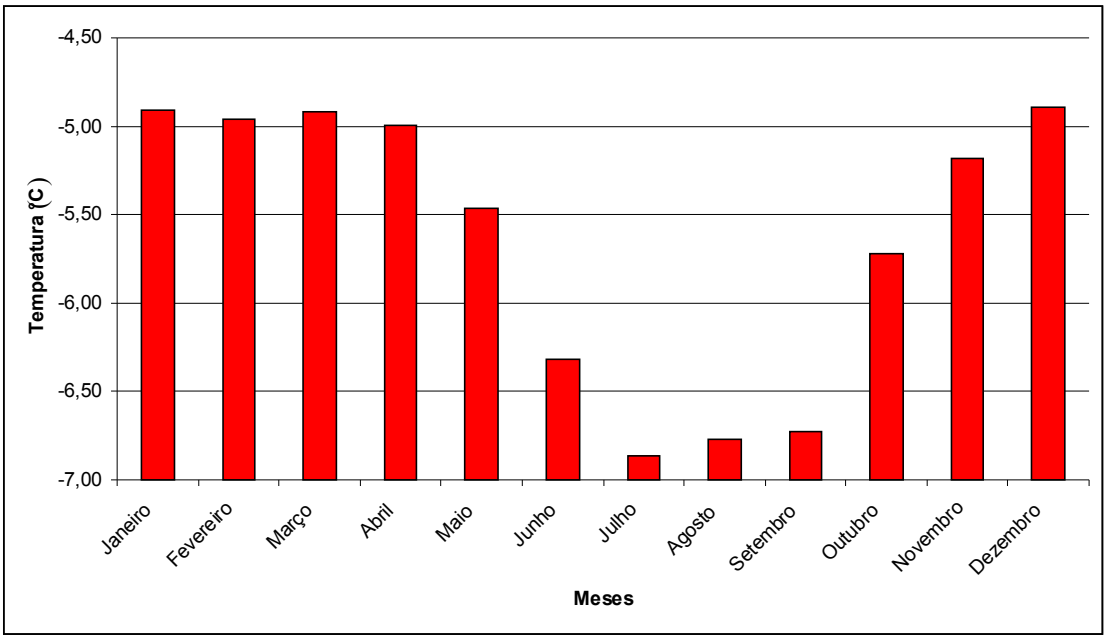


Figura 49 : Temperaturas médias mensais no período entre 1975–2004 conforme os dados NCEP-NCAR a 500 hPa.

Na estação Chacaltaya a precipitação média anual foi de 812 mm/a^{-1} (entre 1993 e 2004), onde os meses de setembro a abril contribuem com 82% deste índice (figura 50). É possível identificar uma estação úmida (entre outubro e março) e outra seca, entre os meses de maio a agosto (contribuindo com 4,3% dos índices totais de precipitação), os meses de transição entre uma estação e outra seriam setembro e abril. O mês mais representativo, com 18% de participação da precipitação média anual, é janeiro, ao contrário de maio, o mês mais seco, com apenas 0,88% de participação.

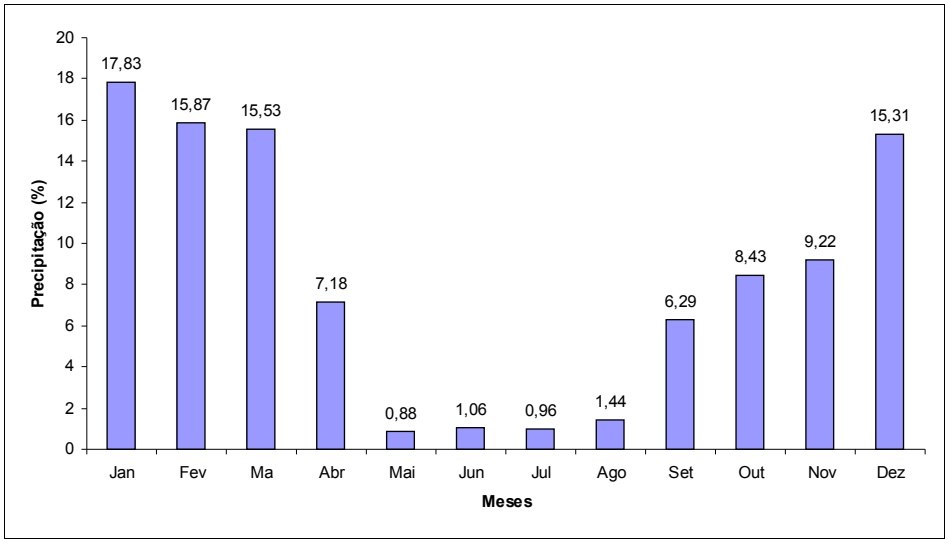


Figura 50 : Média da participação mensal (1993–2004) na precipitação.

Na tabela 19 são apresentados os valores médios de pluviosidade da estação Chacaltaya. Os anos de 1993–1994; 1994–1995; 1995–1996; 1997–1998 e 2003–2004, apresentam índices de precipitação abaixo da média e os anos 1996–1997; 1999–2000; 2000–2001; 2001–2002; 2002–2003 a situação foi inversa. O ano de 2000–2001 foi o de maior precipitação registrado no período, excedendo a média em 204 mm. Ao comparar esses dados com a ocorrência dos eventos *El Niño e La Niña*, observa-se que anos com baixa precipitação, correspondem àqueles com o fenômeno *El Niño* e anos com precipitação acima da média, ocorrem quando da *La Niña* (figura 52*)*.

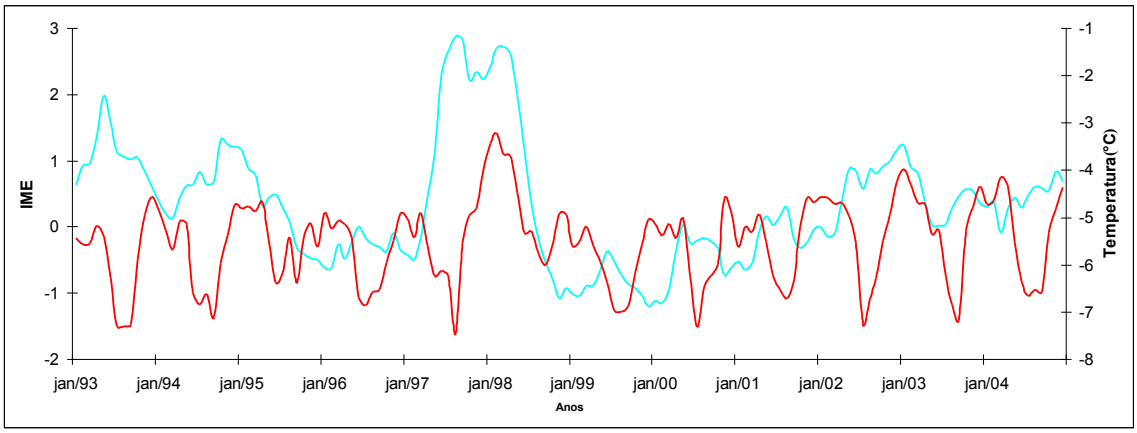


Figura 51 : Gráfico da temperatura mensal média e o Ìndice Multivariado de ENOS (IME), a linha verde corresponde ao índice IME e a linha vermelha a temperatura. Foram analisados os dados entre 1993–2004 para padronizar o período com as informações de precipitação.

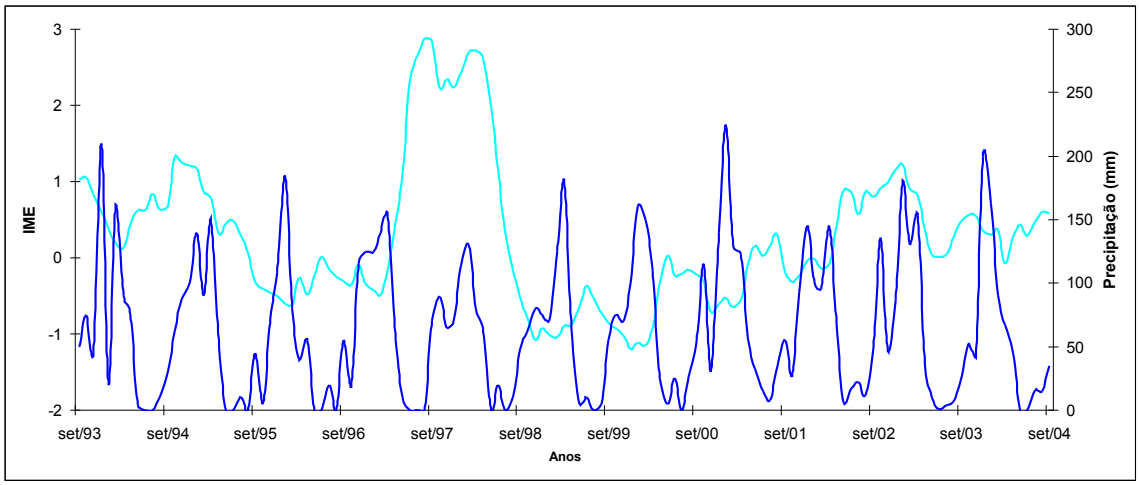


Figura 52 : Gráfico da precipitação mensal e IME (entre 1993–2004), a linha verde corresponde ao índice IME e a linha azul a precipitação.

Tabela 19 : Anos em que a precipitação total ficou abaixo da média anual (azul) e aqueles em que a precipitação superara a média (vermelho).

Ano hidrológico	Precipitação média (mm)
93-94	770
94-95	765
95-96	665
96-97	870
97-98	763
98-99	780
99-00	857
00-01	1017
01-02	837
02-03	866
03-04	751
Média	812

4.9. Discussão

A retração generalizada das geleiras na cordilheira Tres Cruces concorda com as observações de outras investigações nos trópicos da América do Sul e África. Como exemplo, pode-se citar as geleiras do vulcão Cotopaxi, no Equador (0°40'S), que retraíram 28 m a^{-1} entre 1982 e 1997. Jordan *et al.* (2005) obtiveram essas informações por métodos de restituição fotogramétricos, e justificam este comportamento regressivo das massas glaciais equatoriais como resultado do aumento da temperatura atmosférica, associado às condições climáticas no Pacífico, onde os períodos de aquecimento são marcados por déficit de precipitação durante os meses de fevereiro e março, reduzindo o albedo e aumentando as taxas de derretimento das geleiras.

Já no Peru (entre 1977–2005), baseado na revisão, interpretação de fotografias aéreas e medições topográficas diretas de campo por Zapata *et al.* (2006) que estudou geleiras na cordilheira Blanca, identificou uma retração média de 19,4 m a^{-1}. No Peru diferentemente do Equador, durante a fase negativa do ENOS a precipitação não mostra tendência clara de variação, alguns anos podem ser deficitários, outros podem apresentar excedente. Tudo indica que a influência dos ENOS na cordilheira Blanca está restrita somente às variações de

temperatura (Francou *et al.,* 1995).

Na Colômbia, pesquisas elaboradas por métodos fotogramétricos e imagens satelitais identificaram uma retração entre 11,3 e 16,6 m a^{-1} no período 1988–2003 nas geleiras da cordilheira Santa Isabel (Ceballos *et al.,* 2006). Os autores identificaram um aumento médio das temperaturas na ordem de 1 °C nos últimos 25 anos na região de estudo, o que poderia influenciar a altitude da linha de equilíbrio, afetando diretamente o comportamento da língua da geleira. Também constataram um aumento das temperaturas e diminuição das precipitações durante os eventos *El Niño*. Por outro lado, na *La Niña*, baixas temperaturas e aumento da acumulação de neve sobre a geleira, reduzem a radiação direta sobre a mesma, contribuindo para uma menor retração glacial (entre 7-8 m a^{-1}).

As geleiras bolivianas Chacaltaya e Zongo (a aproximadamente 140 km da cordilheira Tres Cruces) recuaram respectivamente 16 e 18 m a $^{-1}$ entre 1996 e 2000 (WGMS, 2001). Essas medidas foram obtidas através de topografia, por Ramirez *et al.* (2001), os quais atribuiram a retração das geleiras bolivianas a maior frequência e mudanças na evolução espaço-temporal dos eventos *El Niño* desde os meados da década de 1970, junto a um aquecimento geral da troposfera sobre os Andes tropicais.

Em estudos realizados no leste africano, Taylor *et al.* (2006), através de imagens satelitais sobre as massas de gelo do monte Rewenzori (Uganda), constataram uma perda de 48% de área entre 1987 e 2003. A provável causa é o aumento da temperatura do ar durante as últimas 4 décadas (0,5° C), nenhuma mudança significativa na precipitação foi detectada.

Desde o início da década de 1980, pode-se constatar uma tendência geral de retração no comportamento das massas de gelo tropicais. Observa-se como ponto em comum o aumento da temperatura atmosférica média, porém a precipitação não parece afetar todas as geleiras de mesma maneira (*e.g.,* no Peru e Uganda). Esta situação sugere que essas perdas deverão estar mais relacionadas com o aumento da temperatura atmosférica do que a redução da precipitação.

Estariam as geleiras bolivianas respondendo a um aquecimento regional ou mesmo global? Num primeiro momento parece que sim, pois o aumento da temperatura próximo à superfície elevaria a altitude da isoterma de 0°C, aumentando a superfície da geleira exposto a

chuva e, conseqüentemente, diminuindo a área de queda de neve. Uma informação mais precisa para esta análise poderia ser obtida pela determinação da variação da altitude da linha de neve ao longo dos anos, porém como foi discutido na seção 4.5, esta informação só foi obtida para o ano de 2004. Outra limitação imposta pela metodologia foi a impossibilidade de "cruzar" os dados climáticos para identificar os períodos de maior ou menor retração glacial (*e.g.,* 1975–1985, 1985–1992, 1992–2004).

Ao comparar a ocorrência dos eventos ENOS com a série temporal da temperatura média anual (figura 51), constata-se que as temperaturas máximas e mínimas normalmente ocorrem nos períodos de *El Niño* e *La Niña*, respectivamente. Exceção ao período compreendido entre 1992–1995, quando a erupção do Vulcão Pinatubo (em 1991) ocasionou a diminuição da temperatura média, que na região de estudo não acompanharam a ocorrência do *El Niño* (Francou *et al.,* 1995).

Nos períodos aquecidos do Pacífico, o aumento das temperaturas pode ser explicado pela diminuição da nebulosidade (e precipitação) que caracteriza o fenômeno nos Andes Boliviano (ver seção 2.4.2), intensificando o aporte de energia sobre a superfície glacial, uma vez que a neve, com elevado albedo, reflete aproximadamente 90% da radiação incidente sobre as áreas glacierizadas. Durante a *La Niña* de 1999 e 2000, as geleiras Antizana e Zongo apresentaram balanços de massa positivos, diferentemente da geleira Chacaltaya que neste mesmo período seguiu perdendo massa (WGMS, 2001). Logo, não é possível associar os avanços e recuos glaciais somente aos eventos ENOS, podendo a regularidade deste fenômeno (entre 1975–2004 as condições do Pacífico ficaram aquecidas por 19 anos), associado ao aquecimento regional, serem responsáveis pela redução do tamanho das geleiras. A retração das massas glaciais da cordilheira Tres Cruces é consistente com o aquecimento da região, que parece estar acompanhando processos de aquecimento atmosférico e da variabilidade climática regional.

A deglaciação generalizada das geleiras da Tres Cruces afeta de forma direta a redução das reservas de água doce da região onde estas águas de degelo são essenciais para desenvolvimento socioeconômico local, através de sua aplicação na irrigação, no consumo, na mineração, etc. A cordilheira faz parte da dinâmica do ciclo hidrológico do rio Amazonas, onde suas águas de fusão correspondem a uma das regiões mais elevadas da bacia deste rio. A retração das massas de gelo pode trazer conseqüências aos ecossistemas, relacionados aos

recursos hídricos.

Permanecendo as atuais tendências climáticas torna-se de extrema importância o manejo dos recursos hídricos, com o desenvolvimento de estratégias a fim de adaptar as populações locais a um cenário futuro com a escassez deste indispensável recurso.

Capítulo 5

CONCLUSÃO

5.1. Conclusões

Devido ao elevado número de geleiras existentes na cordilheira Tres Cruces, optou-se por analisar somente sete destas geleiras, que além de possuírem diferentes exposições das vertentes e, portanto, condições climáticas diversas, não poderiam ter tamanho muito reduzido. Pois, devido à resolução espacial das imagens satelitais empregadas (entre 80 e 20 m) geleiras muito pequenas seriam de difícil delimitação.

O monitoramento foi efetuado entre os anos de 1975 e 2004 (29 anos) nas geleiras, distribuídas de noroeste para sudeste com vertente para oeste: Jankho Loma, San Enrique, Laramkkota, Malla Chuma, Campanani, além de duas geleiras com vertentes para leste: Jacha Pacuni e c5250. A análise está baseada na interpretação de mapas topográficos, imagens satelitais e MDEs, onde estas informações permitiram identificar variações na extensão e no volume dessas geleiras.

A retração das geleiras bolivianas pode ser observada sobrepondo diferentes vetores com as posições frontais (1975, 1985, 1992 e 2004) sobre uma mesma base cartográfica. No geral, a partir de 1975, as frentes das geleiras apresentaram significativas mudanças em todas as direções, as variações máximas e mínimas foram - 437 m (Laramkkota) e - 181 m (San Enrique). De acordo com as análises o retrocesso médio das geleiras desta cordilheira foi de aproximadamente 12 m a^{-1}.

As geleiras da cordilheira Tres Cruces são pequenas, variando entre 0,22 e 4,00 km^2 de área total. A comparação entre as imagens, tomadas no período 1975–2004, mostrou redução das áreas cobertas por gelo na cordilheira. Em média ocorreu uma perda 18% da área das geleiras, ou seja, aproximadamente 0,009 km^2 a^{-1}. Ao longo destes 29 anos, a geleira c5250 (a menor entre aquelas estudadas nesta dissertação) foi a que teve a maior redução relativa

(perdeu cerca de 50% de sua área). Por outro lado, a geleira Campanani, de maior superfície, foi a que perdeu menor área (6% do total) no período estudado.

Com 0,22 km² em 2004, a geleira c5250 tem seu comportamento provavelmente relacionado à alteração no balanço energético pois, com a retração glacial, a absorção do fluxo de ondas longas nas zonas de contato entre o gelo e a rocha nas margens da geleira aumenta. Conseqüentemente, ocorre a intensificação do aporte de calor sensível entre os afloramentos rochosos e a massa glacial. Aumentando, portanto, o derretimento da geleira.

Como as imagens foram adquiridas em diferentes épocas do ano, elas não puderam ser utilizadas para análises confiáveis do comportamento da linha de neve ao longo do tempo. Por isso, optou-se por determinar a posição da linha de neve apenas para 2004 (5.250 m de altitude). A linha de neve foi então utilizada para calcular a proporção entre a superfície da área de acumulação e área total da geleira. Todas geleiras analisadas apresentaram a proporção da área de acumulação maior do que 60%.

A análise dos MDEs mostra que ocorreu redução geral no volume de gelo durante o período, apresentando uma perda média de aproximadamente 1,55 m eq. água a^{-1} durante os 29 anos analisados. A geleira San Enrique (com -1,49 m eq.água a^{-1}) e a geleira c5250 (com -0,93 m eq. água a^{-1}) tiveram, respectivamente, as maiores e menores perdas de volume de gelo no período. Nesta análise só foram consideradas as geleiras que apresentaram mudanças em áreas superiores aos erros da área de calibração e aos erros do MDEs ou seja, maiores do que 21 m. Ficando excluídas dessa análise as geleiras Malla Chuma, Campanani e Jacha Pacuni.

Na análise geomorfológica da cordilheira, a presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante Quaternário as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente. Os controles climáticos são também claramente identificados ao examinar-se a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (c5250), cerca de 100–270 m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul. Este fenômeno provavelmente está relacionado com a diferente exposição solar das vertentes.

A retração das massas glaciais da cordilheira Tres Cruces é consistente com o aquecimento na região e que parece estar acompanhando processos de aquecimento atmosférico e da variabilidade climática regional. Um aumento da temperatura próximo à

superfície da geleira elevaria a altitude da isoterma de 0°C, aumentando a parte da massa de gelo exposta à chuva e, conseqüentemente, diminuindo a área de acumulação de neve. Já nos períodos aquecidos do Pacífico Oriental (eventos *El Niño*), o aumento das temperaturas pode ser explicado pela diminuição da nebulosidade (e precipitação) que caracteriza o fenômeno nos Andes Boliviano intensificando o aporte de energia sobre a superfície glacial, uma vez que a neve, com elevado albedo, reflete aproximadamente 90% da radiação incidente sobre as áreas glacierizadas.

Permanecendo a atual tendência de aquecimento da atmosfera regional torna-se de extrema importância o manejo dos recursos hídricos, com o desenvolvimento de estratégias a fim de adaptar as populações locais a um cenário futuro com a escassez deste indispensável recurso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACEITUNO, P. e MONTECINOS, A. 1993. Circulation anomalies associated with dry and wet periods in the South American Altiplano, *Proceedings of the Fourth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography, Hobart, Australia*, 330−33.

AHLMANN, H. W. 1935. Contribution to the physics of glaciers. *Geogaphical Journal,* 86(2): 97−113.

ANDREASSEN, L.M. 1999. Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: a case study of Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway, for the period 1940−1997. *Geografiska Annaler*, 81(4): 464−476.

ANDREASSEN, L. M.; ELVEHY, H. e KJLLMOEN, B. 2002. Using aerial photography to study glacier changes in Norway. *Annals of Glaciology,* 34: 343−348.

ARNAO, B. M. e HASTENRATH, S. 1998. Glaciers of Peru. WILLIAMS, R. S., JR. e FERRIGNO, J. (ed.). *Satellite image atlas of glaciers of the world: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I-4* (Glaciers of South America), 206p.

BENN, D. e EVANS, D.J.A. 1998. *Glaciers and Glaciation*. London, Arnold, 734 p.

BENN, D.; OWEN, L.; OSMASTON, A.; SELTZER, G.; PORTER, S. e MARK, B. 2005. Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. *Quaternary International*, 138−139: 8-21.

BENSON, C. S. 1962. Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland ice sheet. *SIPRE Research Rep.v. 70.*

BENSON, C. S. 1967. Polar regions snow cover. In: OURA, H. (ed.). Physics of snow and ice. *International Conference on Low Temperature Science 1966*. Sapporo, Hokkaido University, 1(2): 1039−1063.

CDC - *Climate Diagnostic Center. Disponível em:*< www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/)>. Consultado em novembro de 2005.

CDC - *Climate Diagnostic Center. Disponível em:*<http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/)>. Consultado em novembro de 2005.

CEBALLOS, J. L.; EUSCÁTEGUI, C.; RAMÍREZ, J.; CAÑON, M.; HUGGEL, C.; HAEBERLI, W. e MACHGUTH, H. 2006. Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43: 194−201.

CHURCH, J.A.; GREGORY, J. M.; HUYBRECHTS, P.; KUHN, M.; LAMBECK, K.; NHUAN, M.T.; D. QIN e WOODWORTH, P.L. 2001. Changes in sea level. In: HOUGHTON, J. T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J; NOGUER, M. VAN DER LINDEN, P. J E XIAOU, D. (ed.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis.* Cambridge University Press, Cambridge, p. 639-694.

CLAPPERTON, C. M. 1993. *Quaternary geology and geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam, 779 p.

CORDANI, U.G.; TEIXEIRA, W.; SINARI,C.C.G. E BASEI, A.S. 2000. Crustal Evolution of the South American platform. In: CORDANI, U.G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, D. e CAMPOS, A. (ed.). *Tectonic Evolution of South America*. 31 International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 19−40.

CQCE - *Cambridge Quimsa Cruz Expediction 2006*. Disponível em: <www.bolivia2006.co.uk> Consultado em novembro de 2006.

CROSTA, A. P. 1992. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: IG/UNICAMP. 170 p.

DGI/INPE - *Divisão de geração de Imagens/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*. Disponível

em:<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Consultado em junho de 2004.

DOZIER, J.; SCHNEIDER, S. R. e MCGINNIS, D. F. Jr. 1981. Effect of grain size and snowpack water equivalence on visible and near-infrared satellite observations of snow. *Water Resources Research*, 17(4):1213−1221.

DYURGEROV, M. B. e MEIER, M. F. 2000. Twentieth century climate change: Evidence from small glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 1406−1411.

DYURGEROV, M. e MEIER, M. F. 2004. Glaciers and the study of climate and sea-level change. In: Bamber, J. L. e Payne, A. J. (ed.). *Mass balance of the Cryosphere: observations and modelling of contemporary and future changes*. Cambridge, Cambridge University Press, 579−622.

ERSDAC. 1999. *ASTER User's Guide*. Part I (2). Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Tokyo, Japan.

ESPINOZA, M. N. 2002. Estúdio de la Precipitacion em el Departamento de Puno Período Setiembre del 2000 a marzo del 2001. *Instituto Geofísico Del Peru*, 3:71−82.

ESRL – *Earth System Research Laboratory*. Disponível em:< http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEI/)>. Consultado em novembro de 2005.

FRANCOU, B. 2004. Andes del Ecuador: los glaciares en la época de los viajeros, siglos XVIII a XX. In: MESCLIER, E. (ed.) *Los Andes y el reto del espacio mundo: homenaje a Olivier Dollfus / Deler, J.* Institut Français d'Études Andines, 152p.

FRANCOU, B. 2005. Glaciares, indicadores del cambio climático em los Andes tropicales. *Cuarto Taller Interandino de Glaciologia, GNH, La Paz 1-11 de agosto 2005*.

FRANCOU, B.; RAMIREZ, E.; CÁCERES, B. e MENDOZA, J. 2000. Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador, *Ambio*, 29(7): 416−422.

FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; SEMIOND, H. e RODRIQUEZ, A. 1995. Balances de glaciares y clima em Bolivia y Peru: impactos de los eventos ENSO. *Bulletin de I'Institut Français d'Études Andines,* 24: 661−670.

FRANCOU, B. *et. al.* 2004a. Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1, *Great Ice, IRD, France*, 238p.

FRANCOU, B. *et. al*. 2004b. New evidence for an ENSO impact on low latitude glaciers: Antizana 15, Andes of Ecuador, 0°28'S. *Journal of Geophysical Research*, 109: 1029/2003JD004484.

GEORGES, C. 2004. 20th-century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca Peru. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research,* 36 (1): 100–107.

GLCF - *Global Land Cover Facility*. Disponível em: <http:\\glcf.umiacs.umd.edu/data>. Consultado em abril de 2005.

GLIMS - *Global Land Ice Measurement from Space***.** Disponível em: <http://www.glims.org>. Consultado de julho de 2006.

HALL, D. K.; BAYR, K. J.; SCHÜNER, W.; BINDSCHADLER, R. A. e CHIEN. J.Y.L. 2003. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893–2001). *Remote Sensing of Environment,* 86(44): 566−577.

HALL, D.K. e MARTINEC, J. 1985. *Remote Sensing of ice and snow*. Londres, Champman, 189 p.
HASTENRATH, S. 1967. Observations on the snowline in the Peruvian Andes. *Journal of Glaciology*, 6:541−550.

IPCC, 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 881 p.

JOHNSON, A. M. 1976. The Climate of Peru, Bolivia and Ecuador. In: Schwerdtfeger: World *Survey of Climatology*, Elsevier, Amsterdam, 12: 147−218.

JORDAN, E. 1985. Recente glacier distribution and present climate in the Central Andes of South America: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glzialgeologie*, 21: 213−224.

JORDAN, E. 1991. *Die Gletscher der Bolivianischen Anden*. Eine photogrammetrisch — kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage fur klimatische Deutungen und Potential fur die wirtschaftliche Nutzung. Franz Steiner Verlag. Tese (doutorado). Stuttgart, 365 p.

JORDAN, E. 1998. Glaciers of Bolívia. In: WILLIAMS, R., Jr. e FERRIGNO, J. (ed.) *Satellite image atlas of glaciers of the world: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I-5* (Glaciers of South America), 206 p.

JORDAN, E.; UNGERECHTS, L.; CÁCERES, B.; PEÑAFIEL, A. e FRANCOU, B. 2005. Estimation by photogrammetry of the glacier recession on the Cotopaxi Volcano (Ecuador) between 1956 and 1997. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*, 50(6): 949−961.

KASER, G. 1995. Some notes on the behaviour of tropical glaciers. *Bulletin de I'Institut Français d'Études Andines,* 24: 671−681.

KASER, G. 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change,* 22: 93–03.

KASER, G.; AMES, A. e ZAMORA, M. 1990. Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca. *Annals of Glaciology*, 14: 136−140.

KASER, G.; HASTENRATH, S. e AMES, A. 1996. Mass balance profiles on tropical glaciers. *Gletscherkd. Glazial. geol*., 32:75−81.

KASER, G. e OSMASTON, O. 2002. *Tropical Glaciers*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 210 p.

KLEIN, A. G. e ISACKS, B. L. 1999. Spectral mixture analysis of Landsat Thematic Mapper images applied to the detection of the transient snowline on tropical Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, 22: 139−154.

KLEY, J.; MÜLLER, J.; TAWACKOLI, S.; JACOBSHAGEN, V. e MANUTSOGLU, E. 1997. Pre-Andean and Andean-age deformation in the eastern Cordillera of southern Bolivia. *Journal of South American Earth Sciences,* 10(1): 1−19.

MEIER, M.F. 1984. Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, 226:1418−142.

MEIER, M. F. e BAHR, D. B. 1996. Counting glaciers: use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world. In: COLBECK, S. C. (ed.). *Glaciers, ice sheets, and volcanoes: a tribute to Mark F. Meier*. U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory (CRREL) Special Report, 96-27: 89−94.

MEIER, M. F. e DYURGEROV, M. 2002. How Alaska affects the world. *Science*, 297: 350−351.

MENDOZA, J.; FRANCOU, B,; GALLAIRE, R.; RAMIREZ, E.; POUYAUD, B,; RABATEL, A. e NORIEGA, L. 2004. Recent glacier shrinkage in the andes and consequences for water resources: resulsts of 12 years of studies glaciológicos in the cordillera real of bolívia. In: *II Simpósio Internacional sobre Balance de Masa de los Glaciares Andinos* - Huaraz, Ancash, Peru. Resumen de Exposiciones, 1:14−14.

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

MONTES DE OCA, I. 1995. Geography and climate of Bolívia. *Bulletin de I'Institut Français d'Études,* 24 (3): 357−368.

MÜLLER, F. 1962. Zonation in the accumulation area of the glaciers of Axel Heiberg Island, N.W.T. Canada.,

J*ournal of Glaciology*., 4 (33): 302−311.

NOLIN, A. W. e DOZIER, J. 1993. Estimating snow grain size using AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment,* 44(2–3): 231−238.

NSIDC – *National Snow and Ice Data Center*. Disponível em: *<http://nsidc.org/cgi-bin/words/topic.p>. Consultado em julho de 2006.*

PATERSON, W. 1994. *The Physics of Glaciers*. Oxford, Pergamon / Elsevier Science, 480 p.

RABATEL, A. 2005. *Chronologie et interprétation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle).* Tese (doutorado). Grenoble, 196 p.

RAMIREZ, E.; BERGER, T. e RAMALLO, C. 2006. Impact of climatic change on the water resource availabitlity in the Bolivian Cordillera, a case study: The Zongo and Tuni catchments. In: *Cambio Climático - Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana* - CONCORD, 2006, Mendoza. Resúmenes - Simposio sobre Cambio Climático: Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana, 1: 87−87.

RAMIREZ, E.; FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; DESCLOITRES, M.; GUÉRIN, R.; MENDOZA, J.; GALLAIRE, R.; POUYAUD, B. e JORDAN, E. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes: A case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology,* 47: 187−194.

RAMIREZ, E.; HOFFMANN, G.; TAUPIN, J.D.; FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; CAILLON, N.; FERRON, F. A.; PETIT, J.R.; LANDAIS, A. e SIMÕES, J. C. 2003. A new Andean deep ice core from Illimani (6350 m), Bolivia. *Earth and Planetary Science Letters,* 212: 337−350.

RAU, F.; MAUZ, F.; VOGT, S.; KHALSA, S. J. S. e RAUP, B. 2004. *Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual Glacier Classification Guidance for the GLIMS Glacier Inventory*. GLIMS Regional Center 'Antarctic Peninsula'. Alemanha, Institut für Physische Geographie, Freiburg, 36 p.

REINHARDT, W. e RENTCSH, H. 1986. Determination of changes in volume and elevation of glaciers using digital elevation models for the Vernagtferner, Otztal Alps, Austria. *Annals of Glaciology,* 8:151−158.

RIBSTEIN, P.; FRANCOU, B.; RIRIAU, E. e SARAVIA, R. 1995. Tropical climate and glacier hydrology. A case study in Bolivia. *Journal of Hydrology,* 165: 221−234.

RONCHAIL, J. 1995. Variabilidad interannual de las precipitaciones en Bolivia. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24: 369−378.

RONCHAIL, J.; COCHONNEAU, G.; MOLINIER, M. e GUYOT, J.L. 2002. Rainfall variability in the Amazon Basin and SSTs in the tropical Pacific and Atlantic oceans. *International Journal of Climatology*, 22:1663−1686.

SATYAMURTY, P., NOBRE, C. e DIAS, P. 1998: Tropics – South America. *Southern Hemisphere Meteorlogy*,. KAROLY, D. A. E VINCENT, D. A. (Eds), Meteorological Monograph 49, American Meteorological Society, Boston, USA, 119−139.

SIMÕES, J.C. 2004. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. *Pesquisa Antártica Brasileira,* 4: 119−154.

SORUCO, A.; BERGER, T.; MENDOZA,J.; RABATEL, A.; FRANCOU, B.; MACHACA, A.; ROJAS, F.; ALEXANDROVNA, T.; WAGNON, P.; CHAZARIN, J.P.; FUERTES, R.; NORIEGA, L.; RAMIREZ, E. e VADIVIESO, H. 2005. Glaciers Zongo – Chacaltaya – Charquini Sur – Bolivia 16°S. Mediciones Glaciológicas, Hidrológicas & Meteorológicas, Año Hidrológico 2003−2004. *Informe Great Ice*, Bolivia, IRD-IHH-SENMAHI-COBEE., 145 p.

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

TAYLOR, R. G.; MILEHAM, L.; TINDIMUGAYA, C.; MAJUGU, A.; MUWANGA, A. e NAKILEZA, B. 2006. Recent glacial recession in the Rwenzori Mountains of East Africa due to rising air temperature. *Geophysical Research Letters*, 33: 1029/2006GL025962.

TITUS, J.G.; PARK, R,; LEATHERMAN, S.; WEGGEL, R., GREENE, M., MAUSEL, P.; TREEHAN, M.; BROWN, C. e YOHE, G. 1991. Greenhouse Effect and Sea Level Rise: The Cost of Holding Back the Sea. *Coastal Management*, 19 (3):171−204.

TROLL, C. e FINSTERWALDER, R. 1935. The maps of the Cordillera Real and the valley of La Paz and the Pleistocene history of the Central Andes. *Petermanns Geographische Mitteilungen,* 81 (11): 393-399 e (12) 445−455.

VIGNON, F.; ARNAUD, Y. e KASER, G. 2003. Quantification of glacier volume change using topographic and ASTER DEMs. *Proc.IGARSS*., 4: 2605−2607.

VUILLE, M.; BRADLEY, R. e KEIMIG, F. 2000. Interannual climate variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. *Journal of Geophysical Research*, 105(12): 447−460.

WAGNON, P.; RIBSTEIN, P.; FRANCOU, B. e POUYAUD, B. 1999. Annual cycle of energy balance of Zongo Glacier, Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Geophysical Research,* 104(D4): 3907−3923.

WAGNON, P.; RIBSTEIN, P.; FRANCOU, B. e SICART, J.E. 2001. Anomalous heat and mass budget of Glaciar Zongo, Bolivia, during the 1997–98 El Niño year. *Journal of Glaciology*, 47: 21−28.

WGMS, 2001. *World Glacier Monitoring Service*. Glacier Mass Balance Bulletin 1998−1999 (vol 6). Haeberli, W.; HOELZLE, M. e FRAUENFELDER, R. (ed.). Association of Hydrological Sciences (IAHS)/United Nations Environment Programme (UNEP)/UNESCO/.

WGMS, 2006 - *The World glacier inventory. World Glacier Monitoring System*. Disponível em: <http://www.geo.unizh.ch/wgms/mbb/mb04/sum04.html> Consultado em setembro de 2006.

WILLIAMS, R. S., Jr. e FERRIGNO, J. 1998. *Satellite image atlas of glaciers of the world: U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-I* (Glaciers of South America), 206 p.

WILLIAMS, R. S., Jr., HALL, D. K. e BENSON, C. S. 1991. Analysis of glacier facies using satellite techniques. *Journal of Glaciology*, 37 (125): 120−128.

ZAPATA, M.; COCHACHÍN, A.; GÓMEZ, J.; GALLAIRE, R. e POUYAUD, B. 2006. Evolución y Retrocesso de seis glaciares en la Cordilhera Blanca 1948−2005 (Ancash – Peru). In: *Cambio Climático - Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana* - CONCORD, 2006, Mendoza. Resúmenes - Simposio sobre Cambio Climático: Organizando la Ciencia para la Cordillera Americana. 1: 101−101.

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

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo