

## Mudanças Investigadas nas Massas de Gelo dos Andes Tropicais

Rafael da Rocha Ribeiro, Jefferson Cardia Simões, Norberto Dani

Núcleo de Pesquisa Antárticas e Climáticas, Instituto de Geociências/UFRGS  
rrr.3@pop.com.br, jefferson.simo@ufrgs.br, norberto.dani@ufrgs.br

Jorge Arigony-Neto

Instituto de Ciências Humanas e da Informação/UFRGS  
jorgearigony@ufrgs.br

Edson Ramirez

Universidad Mayor de San Andrés, IHH, La Paz, Bolivia  
eramirez@accelerate.com

Recebido: 15/04/09 – revisado: 18/03/10 – aceito: 30/07/10

---

---

### RESUMO

Este estudo avaliou por técnicas de sensoriamento remoto, a cobertura de gelo nos Andes Bolianos em uma área piloto (cordilheira Três Cruces, localizada entre 67°22'–67°32'W e 16°47'–16°09'S). Foram examinadas as antigas posições frontais de algumas geleiras dessa cordilheira, pela 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 sete geleiras estudadas foi de aproximadamente 12m a<sup>-1</sup>. Nas áreas cobertas por gelo na cordilheira, em média, ocorreu uma redução de 18% em 29 anos, ou seja, aproximadamente - 0,009 km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>. 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 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<sup>-1</sup>. A retração das massas glaciais da cordilheira Tres Cruces é consistente com o aquecimento atmosférico regional e com a redução generalizada das geleiras nos Trópicos.

**Palavras-chave:** geleiras tropicais, sensoriamento remoto, mudanças climáticas.

---

---

### INTRODUÇÃO

As geleiras estão diminuindo em muitas partes do mundo (IPCC, 2007). Entender esse comportamento é necessário para o aperfeiçoamento de modelos climáticos de variações regionais e na avaliação da disponibilidade futura de água. 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 é a integração de dados obtidos em campo com dados de sensoriamento remoto (Reinhardt e Rentsch, 1986).

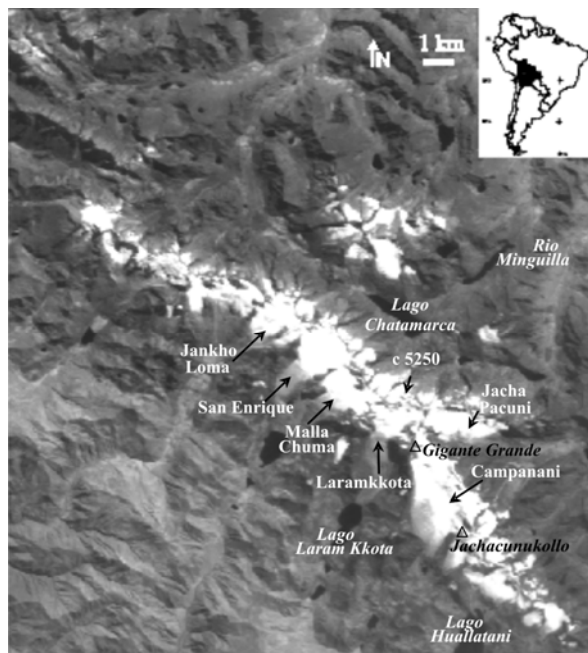
Variações nas posições frontais das geleiras da Cordilheira dos Andes são investigadas em

pequenas áreas, por métodos topográficos e aerofotogramétricos (WGMS, 2006). Entretanto, um amplo inventário glacial, como o proposto pelo projeto *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), ainda não foi aplicado na Bolívia.

A falta deste inventário referente às geleiras bolivianas foi, portanto, o grande motivador desta pesquisa. Na mesma foi construído um inventário com dados glaciais, usando um sistema de informações geográficas (SIG) para a Cordilheira Tres Cruces, Bolívia, afim de entender o padrão e a dinâmica das variações geométricas das geleiras, durante o período de 29 anos (1975–2004). Sete das mais representativas geleiras dessa Cordilheira foram analisadas usando imagens de satélites.

## ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na cordilheira Tres Cruces, Bolívia (entre  $67^{\circ} 22' - 67^{\circ} 32' W$  e  $16^{\circ} 47' - 16^{\circ} 09' S$ ), 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, tendo início a sudeste do rio La Paz, estendendo-se até a cidade de Ventillaque (figura 1). Em 1975 sua superfície glacial foi estimada em  $39 \text{ km}^2$ , distribuídos em 156 geleiras (Jordan, 1998). Também são encontradas diversas lagoas, sendo as mais extensas: Huallatani, Laramkkota, Octa Kkota e Chatamarca. Quatro pequenas centrais hidroelétricas distribuem-se ao longo do rio Minguilla, cujas nascentes formam-se pela água de derretimento de algumas geleiras da cordilheira.



**Figura 1 - Localização da Cordilheira Tres Cruces, satélite CBERS-2 CCD banda 3, adquirido em 19 de Maio de 2004.**

É uma região com relevo bastante acidentado, que possui vários picos acima de 5.000 m de altitude, sendo que o mais elevado é chamado Jachancuncollo, com 5.900 m de altitude; 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, uma vez que 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, portanto uma das nascentes do rio Amazonas.

Os Andes tropicais bolivianos apresentam um clima com duas estações anuais bem definidas. Os meses de verão (dezembro-março) correspondem a estação úmida (70–80% da precipitação anual) devido à influência da zona de convergência intertropical (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). Nessa 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). 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).

Normalmente a superfície do oceano Pacífico oriental é fria. Porém, durante as fases positivas dos eventos ENOS (*El Niño - 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 (Kaser *et al.*, 2002). Na Bolívia a precipitação tende a diminuir nos verões de *El Niño*; já no ano seguinte à ocorrência do 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 este fenômeno, ocorre uma importante perda de massa das geleiras (Mendoza *et al.*, 2004).

## DADOS UTILIZADOS

### Dados Topográficos

As informações topográficas foram obtidas 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 baseado 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 Transverse Mercator* (UTM).

### Base de dados digitais

*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 (*Short - 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).

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 1).

*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 (DGI/INPE). O lançamento do satélite CBERS-2 ocorreu em 21 de outubro de 2003, transportando três sensores: uma Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD); o Imageador por Varredura de Média Resolução (IRMSS) e a Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (WFI) Sua órbita é hélio-síncrona 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 (órbita 177, ponto 119, tabela 2), adquirida em 19 de maio de 2004 junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

**Tabela 1 - Características das bandas do satélite ASTER utilizadas no estudo.**

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

**Tabela 2 : 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              | 20                     | 113                            |
|        | 3           | 0,63 – 0,69              | 20                     | 113                            |
|        | 4           | 0,77 – 0,89              | 20                     | 113                            |

*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. 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 (05 de agosto de 1985 e 21 de julho de 1992, *Path 233, Row 72*, tabela 3).

**Tabela 3 - 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              | 80                     | 185                            |
|        | 5          | 0,60 – 0,70              | 80                     | 185                            |
|        | 6          | 0,70 – 0,80              | 80                     | 185                            |
|        | 7          | 0,80 – 1,10              | 80                     | 185                            |
| TM     | 2          | 0,50 – 0,60              | 30                     | 185                            |
|        | 3          | 0,63 – 0,69              | 30                     | 185                            |
|        | 4          | 0,76 – 0,90              | 30                     | 185                            |
|        | 5          | 1,55 – 1,75              | 30                     | 185                            |

**Base de dados climáticos**

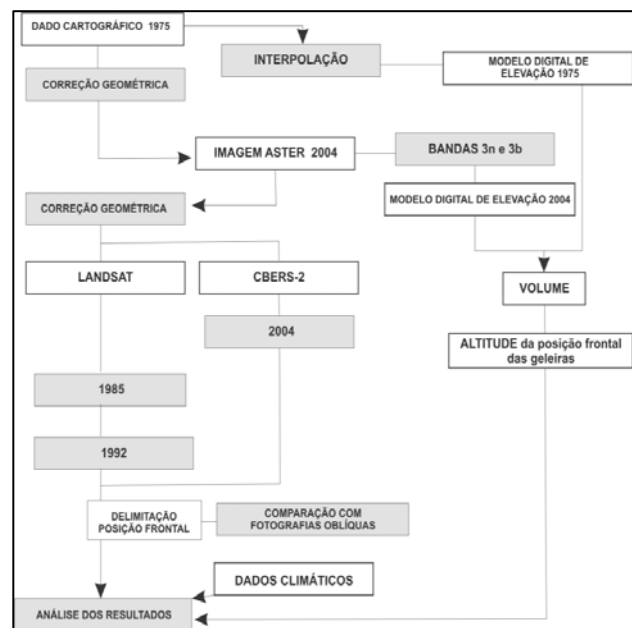
Devido às escassas informações climáticas disponíveis para a área de estudo, optou-se por utilizar a série de dados de reanálises do NCEP-NCAR, obtidos do *Earth System Research Laboratory* (ESRL). Trata-se de um modelo climático planetário, gerado a partir de informações obtidas por estações meteorológicas 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 o evento ENOS influencia diretamente o balanço de massa das geleiras bolivianas. Qualquer análise a respeito da retração

ou avanço das massas glaciais deve privilegiar o estudo dessa variabilidade climática. Esse fenômeno é monitorado pelo *Multivariate ENSO Index* (MEI), 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. (Wolter *et al.*, 1998). Os dados referentes ao MEI foram obtidos junto ao *Climate Diagnostic Center Earth* (CDC).

**METODOLOGIA**

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 2 apresenta o fluxograma com as etapas de processamento e análise dos produtos obtidos.



**Figura 2 - Fluxo de trabalho com as etapas de processamento e análise dos produtos obtidos**

**Análise multitemporal dos dados orbitais e cartográficos**

Para comparar as variações frontais e produzir um mapa das mudanças espaço-temporais,

as imagens foram analisadas usando um SIG e registradas em uma base cartográfica comum. As quatro imagens usadas foram adquiridas no final da estação seca (maio a agosto), quando o pacote superficial de neve encontra-se no seu mínimo anual, o que facilita a identificação dos limites das geleiras.

O mapa topográfico mais confiável e numa escala adequada para a área de estudo foi o *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.

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 através de uma função linear de 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 *pixels* (ou 19,5 m).

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

As grandes variações da topografia 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. Para tornar mais fácil a identificação dos alvos, foram testadas diversas composições (tabela 4).

**Tabela 4. Diferentes composições utilizadas para as cenas de trabalho conforme a disponibilidade das bandas.**

|          | Imagem<br>1985<br>Landsat - 5 | Imagem 1992<br>Landsat - 5 | Imagem<br>2004<br>CBERS - 2 |
|----------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Vermelho | MSS - 7                       | TM - 5                     | CCD - 4                     |
| Verde    | MSS - 5                       | TM - 4                     | CCD - 3                     |
| Azul     | MSS - 4                       | TM - 2                     | CCD - 2                     |

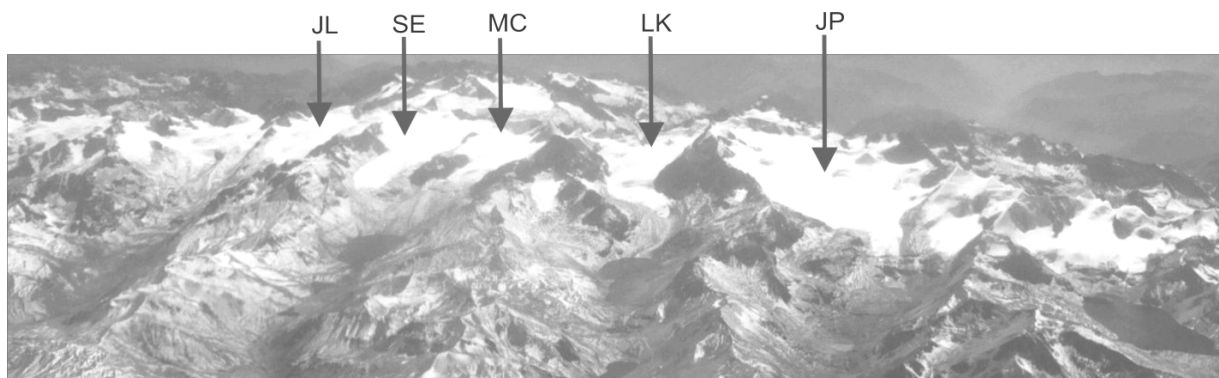
Realizadas as composições coloridas, as margens das geleiras foram identificadas e vetorizadas manualmente. Uma fotografia aérea oblíqua de maio de 2004 foi utilizada para identificar áreas no término das geleiras com grande concentração de fragmentos rochosos (figura 3). Isso foi necessário, pois não 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 das geleiras puderam ser calculadas, pela sobreposição dos dados vetorizados de diferentes períodos sobre uma mesma base cartográfica.

Para determinar a precisão da posição do término das geleiras, os erros de medição foram estimados usando o método de Hall *et al.* (2003), onde EPT é o "erro na posição do término":  $EPT = \{ (\text{resolução do pixel da imagem "base"})^2 + (\text{resolução do pixel da imagem analisada})^2 \}^{1/2} + RMSE$ .

#### **Determinação do volume e elevação das geleiras usando modelos digitais de elevação**

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, para interpolação foi utilizado o método TOPOGRID.

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.*, 1998). A mudança de volume pode ser convertida em balanço de massa e, para isso, assume-se uma densidade constante do gelo em 900 kg m<sup>-3</sup> (Andreassen *et al.*, 2002).



**Figura 3 - Fotografia aérea obtida do sudoeste da Cordilheira Tres Cruces, em destaque as geleiras analisadas (JL = Jonkho Loma, SE = San Enrique, MC = Malla Chuma, LK = Laramkkota, JP = Jacha Pacuni, CN = Campanani. Fotografia de Sarah Griffin obtida em junho de 2004.**

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 (neste caso, uma zona de afloramentos rochosos, onde provavelmente não ocorreram alterações morfológicas), nesta área os MDEs foram subtraídos. Sendo determinada uma diferença "padrão" entre os MDEs.

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

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

em que :V é o volume do gelo; A é a área da geleira; h é a mudança média de altitude da área analisada e  $0,9 \text{ g}^{-3} \text{ cm}$  é a densidade média do gelo.

As mudanças na superfície das geleiras, foram obtidas pela subtração do MDE mais antigo (1975), elaborado a partir da interpolação de cotas extraídas do mapa topográfico pelo MDE mais recente, gerado pelas imagens ASTER de 2004. Foram encontrados 12 pontos em comum no terreno (*Ground Control Points* - GCPs), e três pontos de checagem (*Check Points* - Cps) entre as imagens, extraídos do mapa topográfico de 1975 (Jordan, 1991). Automaticamente foram gerados 60 pontos em comum (*tie points*) entre as duas 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.

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.

#### **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. A reconstrução das séries temporais de temperatura e precipitação, foi realizada para o período de 1975–2004 a 500 hPa (aproximadamente 5.572 m). Francou *et al.* (2004) comparam 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 ao norte da cordilheira Tres Cruces). Os autores encontraram uma importante correspondência entre os dados reanalisados e algumas variáveis medidas na estação meteorológica (temperatura e direção dos ventos), porém não consideraram substancial os resultados para a precipitação.

Na área de estudo os dados de 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), logo as análises referentes a precipitação

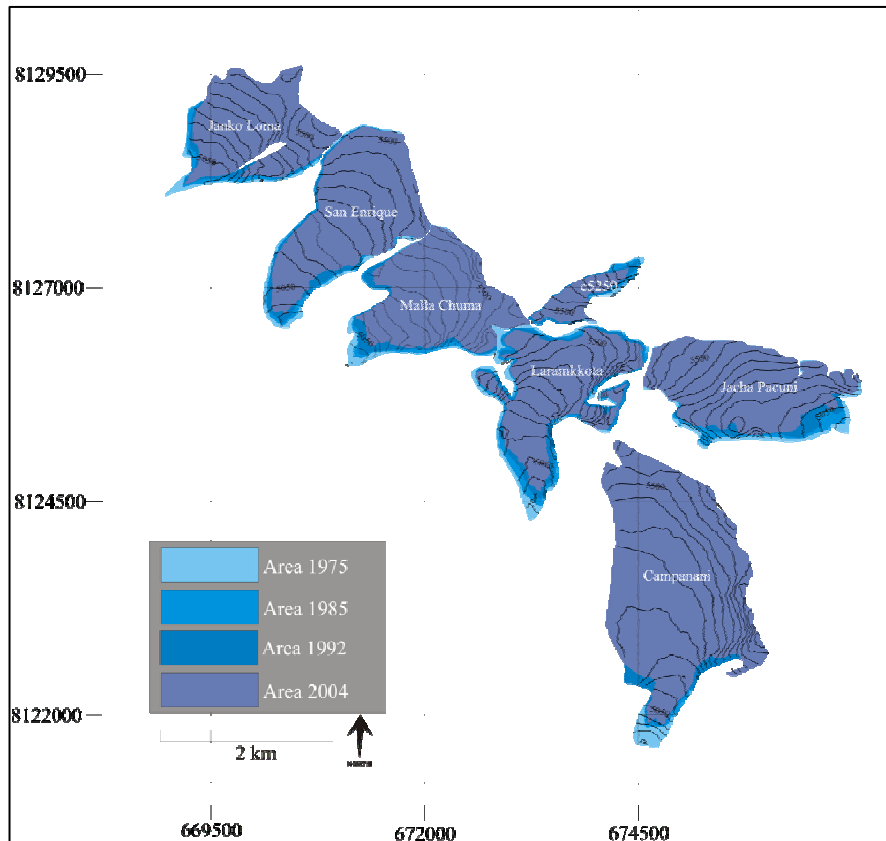


Figura 4 - Extensão das geleiras da Cordilheira Tres Cruces em 1975, 1985, 1992 e 2004. (Distancia das curvas de nível de 50 metros).

média podem não estar sendo corretamente estimadas para a região estudada. É importante destacar que as medições hidrológicas/glaciológicas nos Andes tropicais são bastante difíceis e envolvem uma grande logística, na Bolívia iniciaram em 1993 na geleira Chacaltaya.

## RESULTADOS

A partir de 1975, as frentes das geleiras apresentaram importantes mudanças em todas as direções. O retrocesso médio destas geleiras foi de aproximadamente  $12 \text{ m a}^{-1}$  (figuras 4, 5 e 6). As observações ficaram restritas as médias de retração anual para um período relativamente longo (1975–2004), uma vez que erros inerentes da metodologia empregada muitas vezes eram maiores do que a própria retração (tabela 5), não sendo possível portanto os cálculos das variações de períodos mais curtos (*e.g.*, 1975–1985, 1985–1992 e 1992–2004).

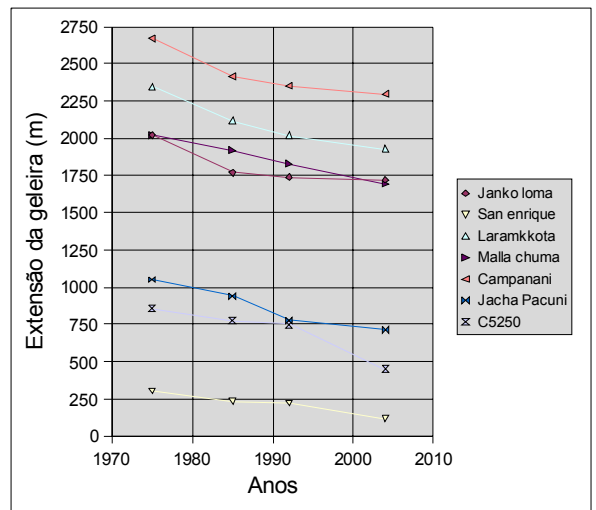


Figura 5 - Variação da extensão das geleiras da cordilheira Tres Cruces entre 1975 e 2004.

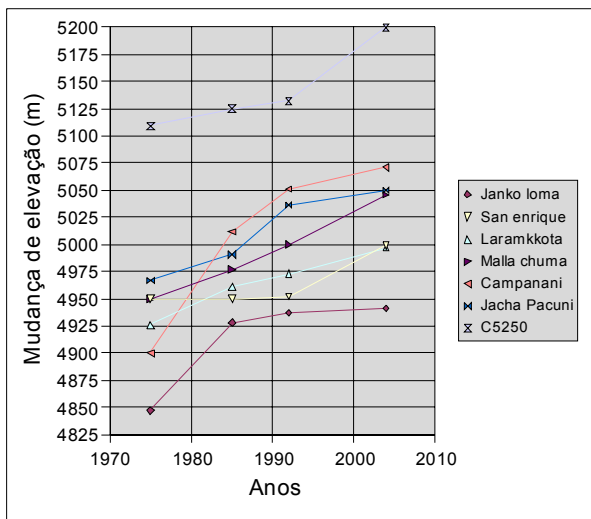


Figura 6 - Mudança de altitude do término das geleiras da cordilheira Tres Cruces entre 1975 e 2004.

Tabela 5 - Precisão na determinação da posição do término das geleiras da cordilheira Tres Cruces pelas imagens satelitais.

| Imagem           | Erro em km <sup>2</sup> |
|------------------|-------------------------|
| Landsat/MSS 1985 | ± 0,0129                |
| Landsat/TM 1992  | ± 0,0054                |
| CBERS-2/2004     | ± 0,0029                |

**Determinação de mudanças nas áreas das bacias glaciais**

Assim, como no cálculo da retração das geleiras, a determinação de variações nas áreas por imagens não foi realizada para períodos curtos devido à resolução dos dados. Os erros na determinação das áreas glacierizadas (tabela 6) da cordilheira Tres Cruces foram estimados pela metodologia proposta por Hall *et al.* (2003):

$$EDA = (RSL \text{ pixel})^2 \times (2 \times EPT / RSL \text{ dapixel})$$

onde o EDA é o erro na determinação da área, RSL é a resolução do pixel e EPT é a o erro da posição do término.

Tabela 6 - Erros na determinação de áreas na imagens satelitais.

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

As geleiras da cordilheira Tres Cruces são pequenas, variando entre 0,02 e 4,00 km<sup>2</sup> 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 de 18% da área das geleiras, ou seja, aproximadamente 0,009 km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>. Ao longo destes 29 anos, a geleira c5250 (a menor entre as estudadas) 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 (figura 7).

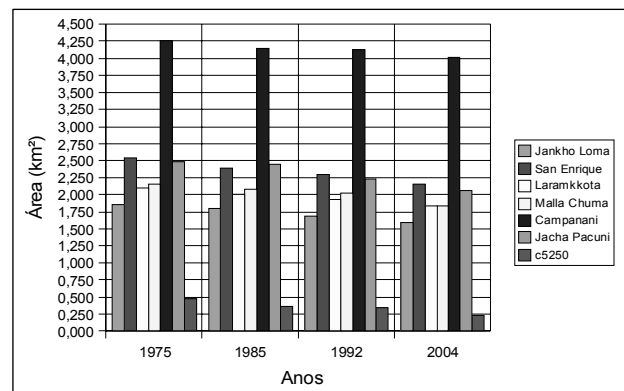


Figura 7 - Variações na área das geleiras Tres Cruces entre 1975 e 2004.

Com somente 0,22 km<sup>2</sup> 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<sup>2</sup> (Jordan, 1998). O seu comportamento provavelmente está relacionado à alteração no balanço energético; conforme Ramirez *et al.* (2001) 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 o derretimento da geleira. O comportamento da geleira c5250 é muito similar a

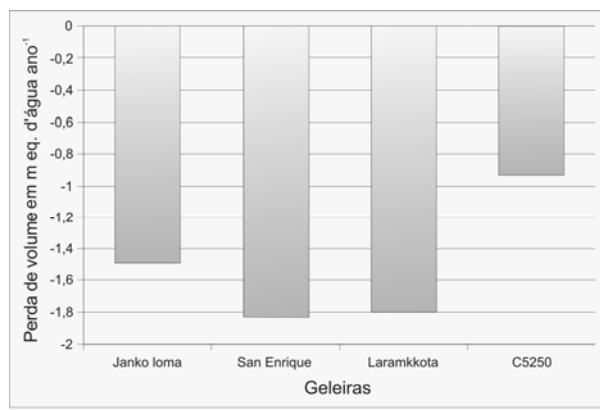


aquele da geleira Chacaltaya, estudada por Ramirez *et al.* (2001), e que perdeu 40% da área entre 1992 e 1998.

As demais geleiras da cordilheira Tres Cruces 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<sup>2</sup> entre 1983 e 1997 e a cordilheira Blanca (Georges, 2004), onde a perda total das áreas cobertas por gelo ficou próxima a 15% (entre 1987 e 1996).

### Mudanças no volume das geleiras

A figura 8 mostra que ocorreu redução geral no volume de gelo durante o período. Na análise foram consideradas somente as geleiras que apresentaram mudanças em áreas superiores aos erros da área de calibração ( $\pm 6$  m) e aos erros do MDEs ( $\pm 9$  m). Assim, foram excluídas dessa análise as geleiras Malla Chuma, Campanani e Jacha Pacuni.

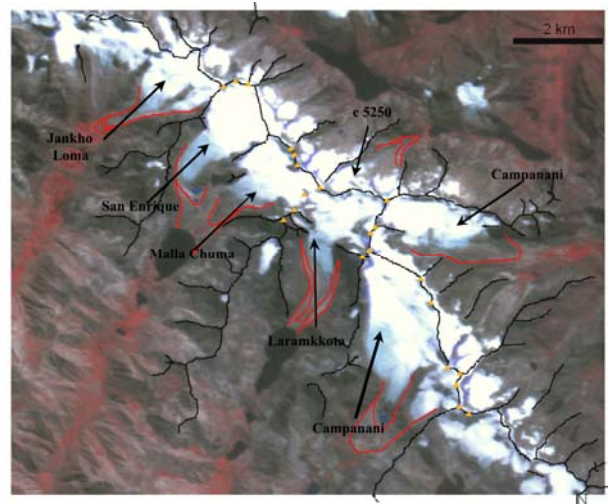


**Figura 8 - Perda do volume de gelo entre 1975 e 2004 em 4 geleiras da cordilheira Tres Cruces. Volume dado em metros equivalentes de água.**

As geleiras da cordilheira Tres Cruces apresentaram uma perda média de aproximadamente 1,55 m eq. água a<sup>-1</sup> durante os 29 anos analisados. Seguindo comportamento muito semelhante às geleiras Chacaltaya (0,96 m eq. água a<sup>-1</sup> entre 1992 e 1998) e Charquini (1,44 m eq. água a<sup>-1</sup> 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<sup>-1</sup> para a geleira Antizana 15 entre 1995 e 2002 (Jordan *et al.*, 2005).

### Morfologia das geleiras

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 de vale (tabela 7). As bacias glaciais são bem nítidas, e facilmente identificadas nas imagens (figura 9).



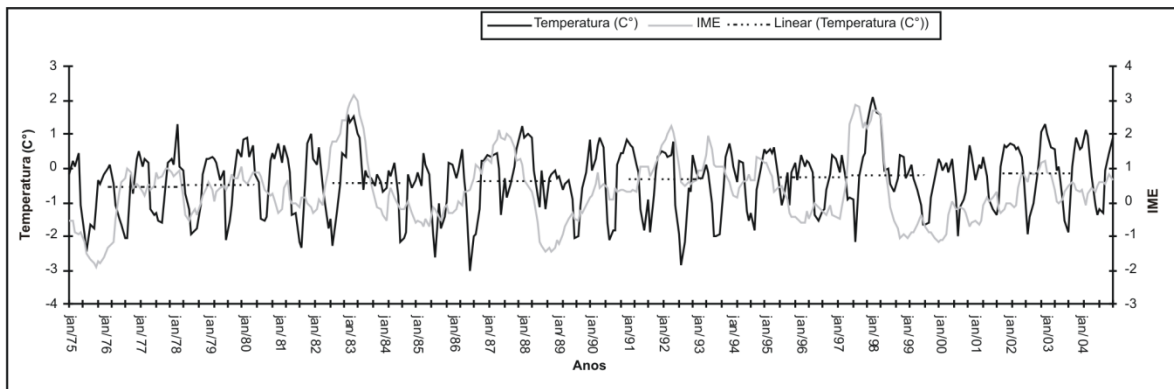
**Figura 9 - Imagem CBERS-2 (4, 3, 2) de maio de 2004, onde as linhas vermelhas indicam a posição das morainas, as linhas pretas marcam as cristas que circundam as bacias glaciais e os triângulos amarelos indicam picos com mais de 5.600 m.**

Os controles climáticos são claramente identificados ao comparar a altitude da frente da geleira de orientação leste-norte (c5250), cerca de 270m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul. Este fenômeno estaria relacionado com a diferente exposição solar das vertentes. Durante a manhã as nuvens ainda se encontrariam em altitudes baixas, expondo às geleiras de orientação leste-norte a 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).

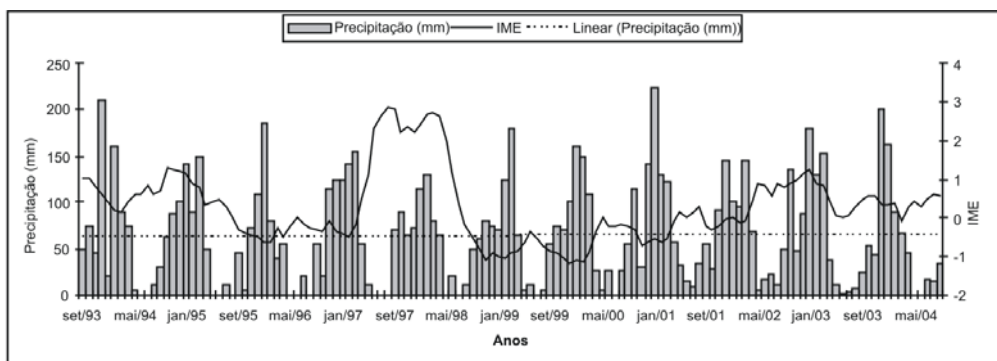
Todas geleiras analisadas apresentam retração de suas partes terminais. Isto fica evidente quando são comparadas as posições frontais ao longo do período de estudo. A presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante a glaciação do Pleistoceno (Jordan, 1998) as geleiras da cordilheira Tres Cruces ocuparam áreas mais amplas do que no presente.

**Tabela 7 - Classificação morfológica de acordo com as características do GLIMS (Rau *et al.*, 2005).**

| Geleira                     | Jankho Loma        | Pacunni            | San Enrique        | Malla Chuma        | Laramkkota         | Campanani          | c5250              |
|-----------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Classificação Primária      | Geleira de vale    | Geleira de vale    | Geleira de vale    | Geleira de vale    | Geleira de vale    | Campo de gelo      | Geleira de vale    |
| Forma                       | Bacia simples      | Bacia composta     | Bacia simples      | Bacia simples      | Bacia composta     | Bacia simples      | Bacia composta     |
| Característica Frontal      | Coalescente        | Coalescente        | Normal             | Normal ou mista    | Normal             | Normal             | Normal             |
| Característica Longitudinal | Regular            | Regular            | Regular            | Regular            | Cascadeada         | Regular            | Regular            |
| Dinâmica da língua de gelo  | Retração pequena   | 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 | Lateral e terminal |



**Figura 10 - Série temporal da temperatura do ar a 500 hPa para a região das Tres Cruces (linha preta) a linha cinza indica o Índice Multivariado de ENOS (IME), a linha de tendência da temperatura está tracejada.**



**Figura 11 - Gráfico da precipitação mensal (linhas cinza escuro e claro) e IME (entre 1993–2004) a linha azul corresponde ao índice IME e a linha azul à precipitação.**

### Análise Climática da região de estudo

Uma análise preliminar do padrão dos dados de temperatura apresenta uma tendência linear, onde a série temporal da temperatura média mensal (figura 10), 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, 2007).

Caracterizam o período de estudo freqüentes eventos de *El Niño* e reduzidas condições de *La Niña*. 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 11 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 registrada 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*.

## RESULTADOS

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 exposta à 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 as imagens foram adquiridas em meses diferentes, tornando imprecisa a utilização desses dados.

Outra limitação imposta pela metodologia (e.g. erros na precisão na determinação da posição do término das geleiras) foi à impossibilidade de “cruzar” os dados climáticos para identificar os períodos de maior ou menor retração glacial (e.g., 1975–1985, 1985–1992, 1992–2004). Uma vez que os erros inerentes da metodologia (georeferenciamento entre as imagens) são maiores do que as diferenças detectadas entre as imagens para períodos curtos.

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

Nos períodos aquecidos do Pacífico, o aumento da temperatura 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 (Francou *et al.*, 2004). Durante a *La Niña* de 1999–2000, as geleiras Antizana e Zongo apresentaram balanços de massa positivos, diferentemente da geleira Chacaltaya que neste mesmo período seguiu perdendo massa (WGMS, 2001). A retração das massas glaciais da cordilheira Tres Cruces é consistente com o aquecimento na região e que possivelmente está acompanhando processos de aquecimento atmosférico e da variabilidade climática regional.

A deglaciação generalizada das geleiras da Tres Cruces reduz de forma direta as reservas de água doce da região. Essas águas de degelo são essenciais para desenvolvimento socioeconômico local/regional, devido a sua aplicação na irrigação, no consumo, na mineração, etc. A cordilheira faz parte da dinâmica do ciclo hidrológico do rio Amazonas, onde essas geleiras constituem-se em nascentes de afluentes do rio Madeira

## 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, podem-se citar as geleiras do vulcão Cotopaxi, no Equador ( $0^{\circ}40'S$ ), que retraíram  $28 \text{ m a}^{-1}$  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 interpretação de fotografias aéreas e medições topográficas diretas de campo por Zapata *et al.* (2006) na cordilheira Blanca, identificou-se uma retração média de  $19,4 \text{ m a}^{-1}$ . No Peru, diferentemente do Equador, durante a fase negativa do ENSO a precipitação não mostra tendência clara de variação, alguns anos podem ser deficitários, outros podem apresentar excedente. Tudo indica que a influência dos ENSO na cordilheira Blanca está restrita somente às variações de temperatura (Francou *et al.*, 1995).

Taylor *et al.* (2006), em estudos realizados no leste africano, usando imagens de satélites sobre as massas de gelo do monte Rwenzori (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 ( $0,5^{\circ} \text{ C}$ ), nenhuma mudança significativa na precipitação foi detectada.

Na Colômbia, pesquisas elaboradas por métodos fotogramétricos e imagens de satélite identificaram retração entre  $11,3$  e  $16,6 \text{ m a}^{-1}$  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  $1^{\circ} \text{ C}$  nos últimos 25 anos na região, o que poderia influenciar a altitude da linha de equilíbrio, afetando diretamente o comportamento da geleira. Também constataram 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  $7-8 \text{ m a}^{-1}$ ).

As geleiras bolivianas Chacaltaya e Zongo (a aproximadamente  $140 \text{ km}$  da cordilheira Tres Cruces) recuaram respectivamente  $16$  e  $18 \text{ m a}^{-1}$  entre 1996 e 2000 (WGMS, 2001). Essas medidas foram obtidas através de topografia, por Ramirez *et*

*al.* (2001), os quais atribuíram 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.

Desde o início da década de 1980, pode-se constatar a tendência geral de retração das massas de gelo tropicais. Observa-se, como ponto em comum, o aumento da temperatura atmosférica média

## CONCLUSÃO

A partir de 1975, as frentes das geleiras na cordilheira Tres Cruces apresentaram substanciais mudanças em todas as direções, as variações máximas e mínimas foram  $-437 \text{ m}$  (Laramkkota) e  $-181 \text{ m}$  (San Enrique). De acordo com as análises, o retrocesso médio das geleiras desta cordilheira foi de aproximadamente  $12 \text{ m a}^{-1}$ .

As geleiras dessa cordilheira são pequenas, variando entre  $0,22$  e  $4,00 \text{ km}^2$  de área total. A comparação entre as imagens, tomadas no período 1975–2004, mostrou redução das áreas cobertas por gelo. Em média ocorreu perda de 18% da área das geleiras, ou seja, aproximadamente  $0,009 \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$ . Ao longo desses 29 anos, a geleira c5250 (a menor entre aquelas investigadas) 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  $0,22 \text{ km}^2$  em 2004, a geleira c5250 tem seu comportamento provavelmente relacionado à alteração no balanço energético, pois, com a retração glacial, a absorção de radiação solar 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. A análise dos MDEs mostra que ocorreu redução geral no volume de gelo durante o período, apresentando uma perda média de aproximadamente  $1,55 \text{ m eq. água a}^{-1}$  durante 29 anos analisados. A geleira San Enrique (com  $-1,49 \text{ m eq. água a}^{-1}$ ) e a geleira c5250 (com  $-0,93 \text{ m eq. água a}^{-1}$ ) tiveram, respectivamente, as maiores e menores perdas de volume de gelo no período.

Na análise geomorfológica da cordilheira, a presença de morainas de retração, em todas as bacias delimitadas, deixa claro que durante o

período Quaternário (Jordan, 1998) 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 270m mais elevada do que as geleiras de orientação oeste-sul. Este comportamento 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 possivelmente está acompanhando processos de aquecimento atmosférico e da variabilidade climática regional. Um aumento da temperatura próximo à superfície da geleira elevará 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 da temperatura 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.

Permanecendo a atual tendência de aquecimento da atmosfera regional, torna-se crítico o manejo dos recursos hídricos, com o desenvolvimento de estratégias para adaptar as populações locais a um cenário futuro com a escassez d'água.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que financiou este estudo através do projeto N° 4905287/2007-0; "Variações climáticas e mudanças nas geleiras formadoras das cabeceiras da bacia de drenagem do rio Madeira". Programa Sul-Americano de Apoio às Atividades de Cooperação em Ciência e Tecnologia (PROSUL). Somos gratos também aos revisores anônimos que aumentaram a qualidade deste artigo.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- 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.
- CDC - *Climate Diagnostic Center*. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/reanalysis/>>. Consultado em novembro de 2005.
- 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.
- ERSDAC, 1999. *ASTER User's Guide*. Part I(2). Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Tokyo, Japan.
- ESRL - *Earth System Research Laboratory*. Disponível em: <<http://www.cdc.noaa.gov/people/klaus.wolter/MEl/>>. Consultado em novembro de 2005.
- FRANCOU, B.; RIBSTEIN, P.; SEMIOND, H. e RODRIQUEZ, A. 1995. Balances de glaciers y clima en Bolivia y Peru: impactos de los eventos ENSO. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, 24: 661-670.
- FRANCOU, B. et al. 2004. 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.
- 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.
- IPCC 2007. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Summary for policymakers - Paris - February: 21 pp., 2007.
- JORDAN, E. 1985. Recent glacier distribution and present climate in the Central Andes of South America: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 21: 213-224.
- JORDAN, E. 1991. *Die Gletscher der Bolivianischen Anden*. Eine photogrammetrisch — kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage für klimatische Deutungen und Potential für 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.; UNGERRECHTS, 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. e OSMASTON, O. 2002. *Tropical Glaciers*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 210 p.
- 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: results of 12 years of studies glaciological 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.
- 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.; 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 Bolívia: Glaciar Chacaltaya (16°S). *Journal of Glaciology*, 47: 187-194.
- RAU, F., MAUZ, F., VOGT, S., KHALSA, J.S., e RAUP B. (2005): Illustrated GLIMS glacier classification manual. Glacier classification guidance for the GLIMS inventory. NSIDC: 36 p.
- REINHARDT, W. e RENTSCH, 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.
- 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.
- RONCHAIL, J. 1995. Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolívia. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24: 369-378.
- 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.
- 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.
- VIGNON, F.; ARNAUD, Y. e KASER, G. 2003. Quantification of glacier volume change using topographic and ASTER DEMs. *Proc.IGARSS.*, 4: 2605-2607.
- WAGNON, P.; RIBSTEIN, P.; FRANCOU, B. e SICART, J.E. 2001. Anomalous heat and mass budget of Glaciar Zongo, Bolívia, 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.
- WOLTER, K., e M. S. TIMLIN, 1998. Measuring the strength of ENSO events - how does 1997/98 rank? *Weather*, 53, 315-324
- ZAPATA, M.; COCHACHÍN, A.; GÓMEZ, J.; GALLAIRE, R. e POUYAUD, B. 2006. Evolución y Retroceso de seis glaciares en la Cordillera 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.

### ***Investigation of Changes in the Tropical Andes Ice Masses***

#### **ABSTRACT**

*Using remote sensing techniques, this study surveyed a pilot area of the Bolivian Andes ice cover, located at the Tres Cruces Cordillera (67°22'-67°32'W e 16°47'-16°09'S). Analyses of satellite imagery, cartographic data and estimates of ice thickness changes (differences in volume and elevation) have provided information on past front positions of some glaciers in 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<sup>2</sup>. Generally, from 1975 onwards, glacier fronts 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<sup>-1</sup>. On average, these glaciers lost 18% of their total areas over 29 years (i.e., a loss of approximately of 0.009 km<sup>2</sup> a<sup>-1</sup>). During this period, the c5250 glacier (0.48 km<sup>2</sup> in 1975) had the greatest relative loss (about 50% of its total area). On the other hand, the Campanani glacier, the largest one (4.26 km<sup>2</sup> in 1975), lost the smallest proportional area (6% of its total area). The snow line in 2004, determined at a 5,300 m altitude, was used to calculate the proportion between the accumulation and total areas in each glacier. All studied glaciers in 2004 had an accumulation area proportionally greater than 60%. Analyses of the elevation digital models (EDMs) point to a general reduction of the ice volume during the period, on average 1.55 m water equivalent a<sup>-1</sup>. The retreat of ice masses in Tres Cruces Cordillera is concomitant to regional atmospheric warming and to the general reduction of glaciers in the Tropics.*

*Key-Words: Tropical Glaciers, remote sensing, climate change.*