

VARIAÇÃO NO BALANÇO DE MASSA DE GELEIRAS ANDINAS ENTRE 1975 E 2000 USANDO MODELOS DIGITAIS DE ELEVÇÃO

Rafael R. RIBEIRO
Jorge ARIGONY NETO
Jefferson Cardia SIMÕES

RESUMO

A diferença entre a acumulação e a ablação glacial ocorrida em um determinado período é a melhor forma de investigar a influência das mudanças climáticas regionais sobre as massas de gelo e neve do planeta. Uma das formas de se obter essa informação é através da análise de modelos digitais de elevação (DEMs) obtidos em diferentes datas, onde as diferenças de altitude encontradas em áreas cobertas por gelo correspondem às variações no volume das geleiras. Neste estudo pretende-se avaliar o balanço de massa de duas geleiras andinas, usando DEMs obtidos em 1975 e 2000.

O método foi aplicado nas geleiras Laramkkota e Pacuni, ambas localizadas na Cordilheira Tres Cruces, Bolívia (67°22'-67°32'W e 16°47'-16°09'S). As geleiras bolivianas desempenham um importante papel no ciclo hidrológico da América do Sul, pois, o derretimento anual de suas massas de gelo, flui em direção ao Oceano Pacífico (Larakkota) e Oceano Atlântico (Pacuni), sendo a água de degelo desta geleira uma das nascentes do Rio Beni, um dos afluentes do Rio Madeira. Os DEMs foram obtidos a partir da interpolação de dados topográficos levantados em campo em 1975 (JORDAN, 1991) e pelo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) elaborado em 2000. Os DEMs apresentam acurácias de 4 metros (1975) e 34 metros (2000) em altitude.

A variação no volume foi calculada, subtraindo-se o DEM mais antigo do mais recente. Os valores encontrados representam a diferença média de altitude para toda a área de ablação das geleiras. As geleiras Laramkkota e Pacuni apresentaram respectivamente uma perda de -11.10^6m^3 e $-0,21^6\text{m}^3$ de seus volumes. A obtenção da variação do volume de gelo, através de mapas topográficos apresenta-se bastante útil no monitoramento do balanço de massa glacial, especialmente em áreas de difícil acesso e considerando uma escala de tempo decadal. Os dados obtidos corroboram a tendência de derretimento das geleiras tropicais (KASER, 2002).

INTRODUÇÃO

As geleiras desempenham um importante papel no sistema hidrológico e socioeconômico de muitas regiões montanhosas, através do abastecimento às comunidades locais de água para consumo, em pequenas centrais hidroelétricas, na agricultura, no turismo etc. Em algumas cidades andinas como La Paz, capital boliviana, 70% da água utilizada pela população provém das geleiras.

Mesmo representando apenas 4% da criosfera, entre 1988 e 1998, as geleiras de montanha contribuíram com 27% do aumento no nível médio dos mares (DYURGEROV, 2003). Portanto, além da importância socioeconômica, as geleiras de montanha são consideradas para o IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) excelentes indicadoras climáticas. Através do monitoramento dessas massas de gelo é possível obter informações sobre a variabilidade e mudanças no clima regional.

¹ Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas, Depto. Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – RRR.3@pop.com.br

²¹ Institut für Physische Geographie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Um dos métodos para investigar as influências climáticas sobre as massas de gelo e neve do planeta consiste no cálculo da diferença entre a acumulação (deposição de neve) e a ablação (derretimento) ocorrida em um determinado período (balanço de massa). Muitas geleiras de montanha localizam-se em áreas remotas, o que torna dispendioso o balanço de massa tradicional, realizado através de medidas no terreno. Uma alternativa para o monitoramento dessas áreas de difícil acesso é através da integração de dados obtidos em campo com dados de sensoriamento remoto (REINHARDT e RENTSCH, 1986). Neste caso, a comparação de dois modelos digitais de elevação (DEMs) de épocas distintas poderá fornecer informações sobre mudanças na espessura da geleira (diferenças de volume e elevação). Neste estudo pretende-se avaliar o balanço de massa entre 1975 e 2000 de duas geleiras situadas na Cordilheira Três Cruces, Bolívia ($67^{\circ}22'-67^{\circ}32'W$ e $16^{\circ}47'-16^{\circ}09'S$, Figura 1).

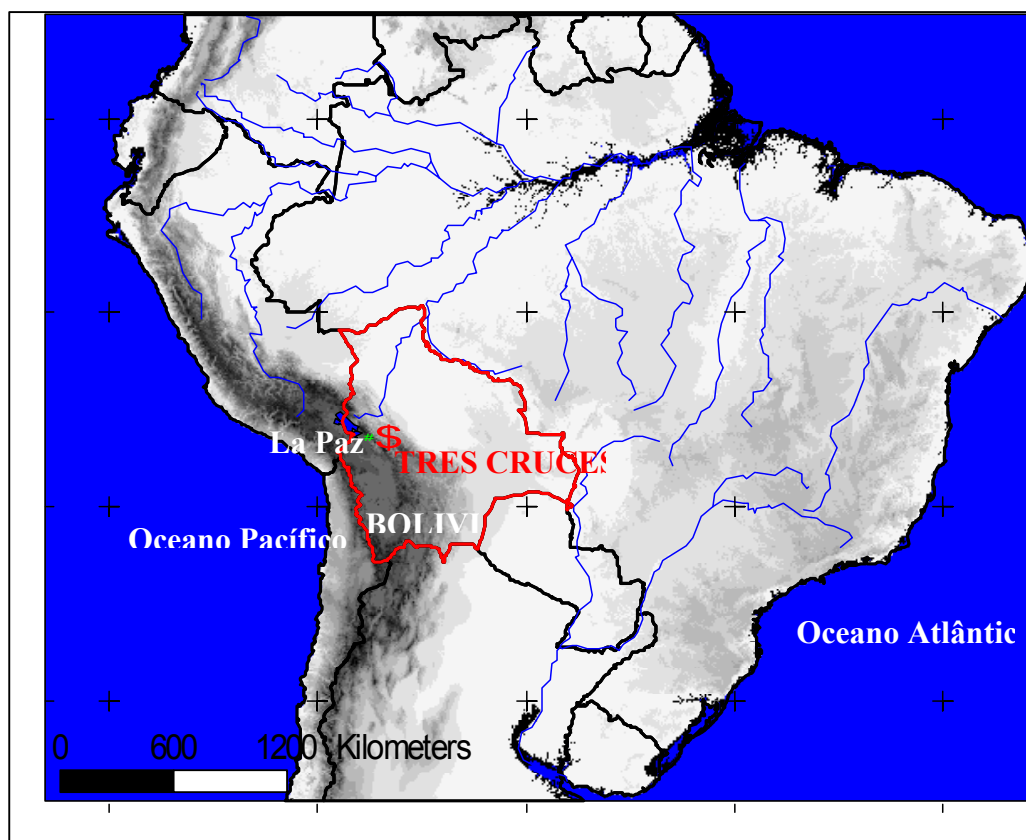


Figura 1 – Localização da Cordilheira Tres Cruces.

ÁREA DE ESTUDO:

O estudo foi realizado na Cordilheira Tres Cruces (Figura 2), onde a cobertura de gelo e neve estendia-se por aproximadamente 39,37 km² no ano de 1999. Diversas morainas terminais são encontradas em cotas abaixo dos 4500 m, indicando que durante o último máximo glacial as temperaturas foram muito menores que a atual (JORDAN, 1998). No ano de 1999 a linha de neve das geleiras situadas no setor sudoeste foi determinada entorno de 4900 m, ou seja, 400 metros acima das morainas terminais (RIBEIRO, SIMÕES e BREMER, 2005) o que indica que a superfície glacial se estendeu sobre uma área muito maior que a atual.

As geleiras bolivianas desempenham um importante papel no ciclo hidrológico da América do Sul, pois o derretimento anual de suas massas de gelo, flui em direção ao oceano Pacífico (Laramkkota) e oceano Atlântico (Pacuni), sendo a água de degelo desta geleira uma das nascentes do rio Beni, um dos afluentes do rio Madeira.

Quanto aos aspectos climáticos (KASER, 2002), a região é marcada por duas estações anuais bem distintas. No verão, sofre influência da circulação intertropical, ocorrendo precipitação devido as massas de ar úmido vindas da Amazônia. No inverno, massas de ar seco vindas de sudoeste predominam e com isso, os índices de precipitação diminuem consideravelmente. Logo são os meses de verão que determinam o comportamento da geleira (reserva e perda de massa)

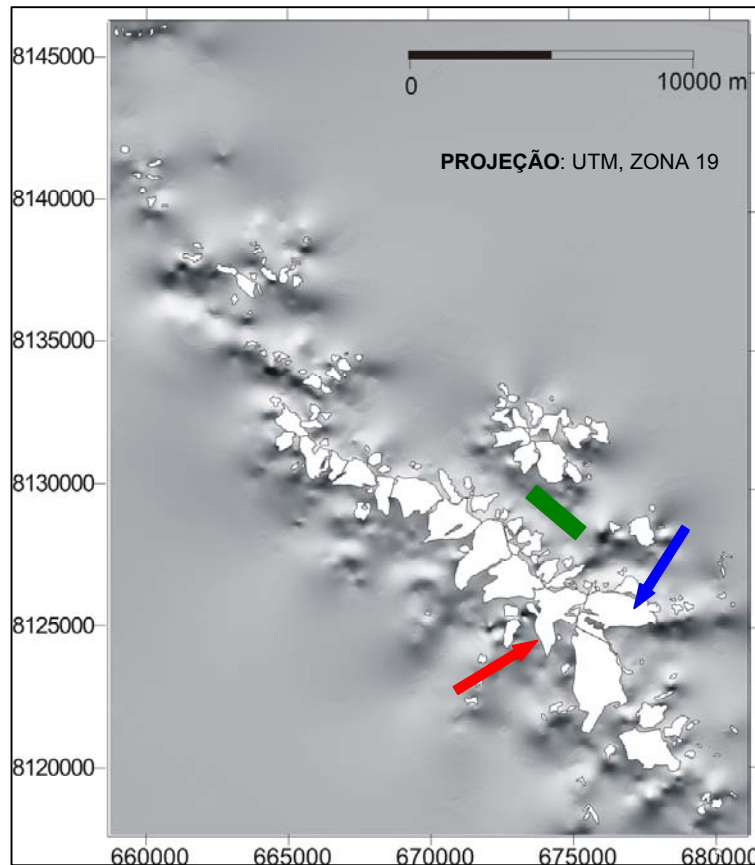


Figura 2 – Localização da área de estudo e das geleiras Laramkkota (seta vermelha) e Pacuni (seta azul) e área "teste"(retângulo verde).

DADOS:

Dados de Campo

Levantamento topográfico foi realizado no ano de 1975 pelo Institut für Photogrammetrie und Ingenieur-Vermessungen e Geographisches Institut da Universidade de Hannover, disponibilizados como grade de coordenadas UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator) em JORDAN (1991).

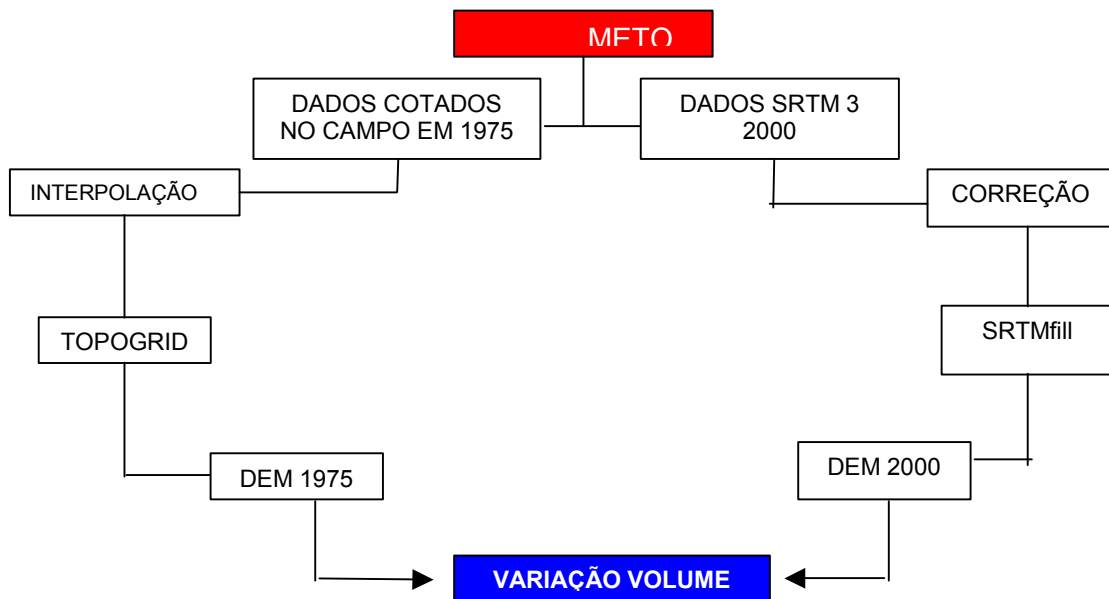
Dados de Sensoriamento Remoto

Em fevereiro de 2000, com o objetivo de gerar um modelo digital de elevação entre as latitudes de 60°N e 57°S, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) e o NIMA (National Imaging and Mapping Agency) realizaram a SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Nesta missão, a nave Endeavour foi equipada com um sensor SAR (Radar de Abertura Sintética) interferométrico, operando nas bandas C e X. Os produtos

resultantes consistem em modelos digitais de elevação com resolução de 30 metros (SRTM 1) e 90 metros (SRTM 3). Os dados estão disponíveis em coordenadas geográficas, datum WGS84 e altitudes em metros. Os DEMs podem ser obtidos gratuitamente pelo site [ftp //edcsgs9. cr.usgs.gov/pub/data/srtm/south_america/](http://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/south_america/).

MÉTODOS:

Para quantificar a variação de volume das geleiras foi escolhido o método cartográfico/geodésico (Fluxograma 1). O método baseia-se na análise de modelos digitais de elevação (DEMs) obtidos em diferentes datas, onde as diferenças de altitude encontradas em áreas cobertas por gelo correspondem às variações no volume das geleiras.



Fluxograma 1. Metodologia utilizada na obtenção dos DEMs e cálculo da variação do volume.

Construção do DEM 1975

DEM é uma representação da superfície do terreno por meio digital, e pode ser utilizado para os mais diferentes fins, tais como: construção de perfis, cálculos de volume, geração de imagens tridimensionais, mapas de declividade, mapas de orientação, construção de ortho-imagens e ortho-fotos. Em glaciologia, é útil na análise de mudanças na geometria da geleira como o tamanho, a declividade e a orientação.

Existem diferentes formas de se obter um modelo digital de elevação, os mais usados são: as grades regulares e retangulares (GRID) e as redes irregulares triangulares (TIN). Segundo ROSIM, (1996), a grade regular é formada por um retículo (célula) com espaçamento uniforme da horizontal e na vertical, embora entre as duas coordenadas o espaçamento possa ser diferente, cada cruzamento do reticulado define um ponto de grade. Onde o valor de profundidade de cada um desses pontos é determinado por um processo de interpolação a partir dos pontos cotados. Já na triangulação o modelo é gerado interligando-se as amostras três a três. Esse tipo de triangulação garante que os ângulos formados pelas arestas do triângulo sejam o mais eqüiangulares possível.

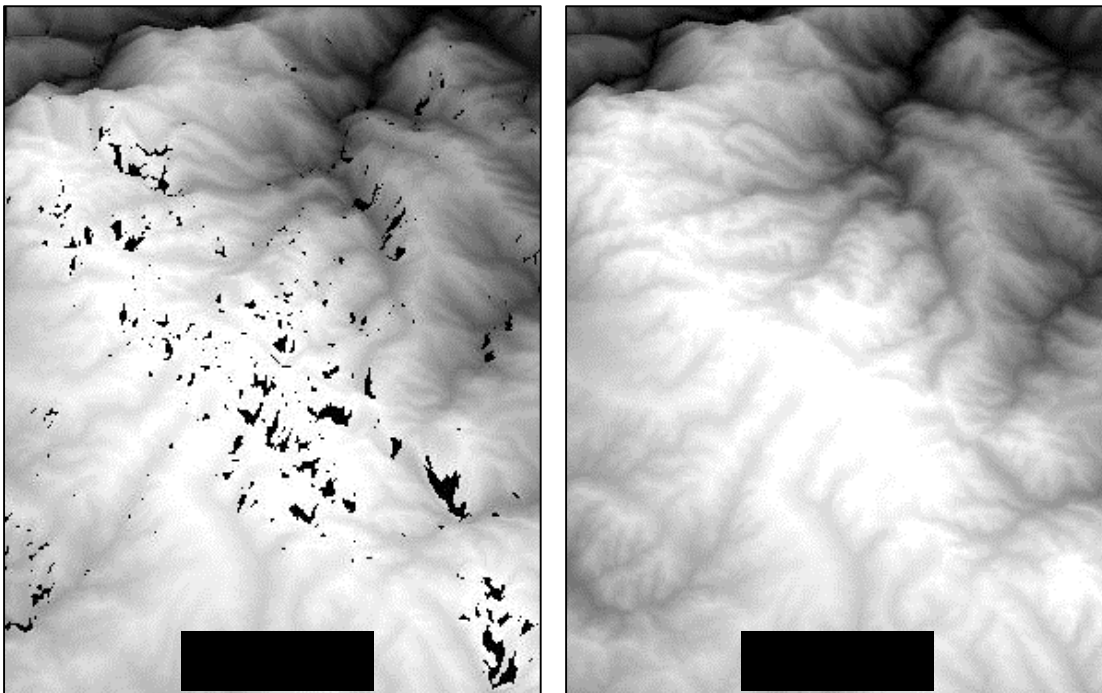
Diferentes métodos (algoritmos de interpolação) podem ser utilizados para se obter o DEM, cuja qualidade final vai estar diretamente relacionada com a densidade e a distribuição dos pontos de referência utilizados na geração do modelo. Devido a esse fator é importante saber qual método de interpolação induz ao menor erro. Para BURROUGH E MC DONNEL

(1998), quando os dados são abundantes, a maioria dos métodos de interpolação produz bons resultados, no caso de dados esparsos, dependendo do método escolhido, pode apresentar limitações na representação da variabilidade espacial, pois desconsideram a descontinuidade do fenômeno que se quer observar.

Os dados topográficos coletados em campo em 1975 foram utilizados para “criar” um *grid* de elevação com 20 metros de resolução para cada geleira. Devido às diferenças encontradas nos métodos de interpolação, duas tentativas (Triangulated Irregular Network e TOPOGRID) foram realizadas. Dentre elas a que apresentou menores erros foi o TOPOGRID (*Arc-Info 8.0.1*) com um erro médio de - 4 metros. A verificação de cada modelo foi feita através da utilização de pontos de controle (levantados em campo), que não entraram como amostras na interpolação. O método escolhido fornece a possibilidade de utilizar a drenagem e outros corpos d’água, suavizando e aumentando a precisão dos modelos gerados.

Correção do DEM SRTM 3

Os DEMs SRTM podem apresentar precisões de 7 metros na posição vertical e 90 metros na posição horizontal (SMITH E SANDWELL, 2003). Porém é necessário que sejam corrigidos, uma vez que podem ocorrer “erros” nos dados originais, principalmente em áreas junto à costa, terrenos íngremes e lagos. Nesse estudo foi utilizado o *Software SRTMfill* para estipular valores as áreas que não apresentavam cotas de altitude, a partir das elevações das áreas vizinhas. (Figuras 3 e 4).



Figuras 3 e 4 – DEMs SRTM: A figura da esquerda mostra o modelo antes das correções, com várias áreas (em preto) sem cotas de altitude. Na direita o modelo já corrigido, e utilizado no estudo, com um erro médio de 34 metros na vertical.

Diferenças entre o DEM 1975 e o DEM SRTM3

ANDREASSEN (1999) afirma que na determinação de mudanças de volume a partir de DEMs, estes devem possuir: idênticos grids, cobrirem as mesmas áreas e possuírem as mesmas coordenadas no plano horizontal. Além de incluir também no resultado final erros inerentes as operações tais como: erros nos dados originais, as interpolações, as

conversões de dados para o mesmo sistema de coordenadas, a acurácia dos pontos de controle, etc.

A fim de se estabelecer um erro “padrão” uma área teste (Figura 2, retângulo verde) foi escolhida. Nesta área, onde não se esperava encontrar nenhuma mudança de altitude (área rochosa), os DEMs foram subtraídos. Determinando-se assim uma diferença “padrão” entre os DEMs.

Cálculo do Volume

A mudança de volume para cada geleira foi calculada pela fórmula de PATERSON, 1994:

$$V = (A \cdot h) \cdot 0.9 \text{ g/cm}^3$$

V= volume de gelo

A= área de ablação da geleira

h= mudança média de altitude

0.9 g/cm³ = densidade do gelo

A primeira estimativa de perda de volume foi calculada sobre as áreas de acumulação e ablação das geleiras (Figura 5), porém nas áreas de acumulação a variação, ficou muito próxima ao zero. Optou-se neste estudo em excluir tais áreas, pois as diferenças encontradas não são significativas comparadas a acurácia dos dados originais (RIVERA e CASASSA, 2004). Portanto, somente as áreas de ablação das geleiras, foram consideradas. As diferenças observadas nessas áreas superam os erros estimados entre os DEMs.

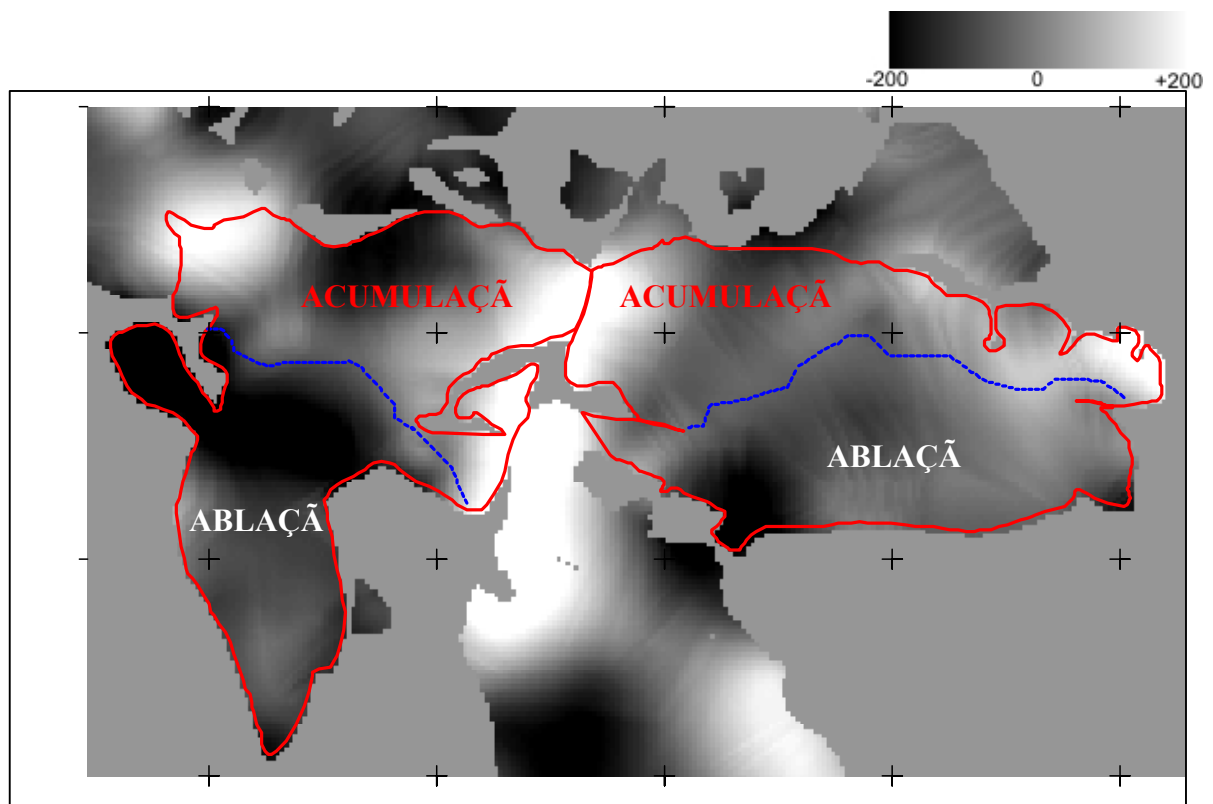


Figura 5. A estimativa de perda de volume foi desenvolvida sobre as áreas de ablação, os valores só foram considerados se superassem os erros estimados entre os DEMs.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 apresenta as estimativas de mudanças de volume resultantes da comparação entre os DEMs.

Tabela 1. Valores correspondentes à perda de Volume de gelo.

	Laramkkota	Pacunanni
Área (km ²)	0,22	0,12
Valores médios de diferença (m)	-64	-8
Área de calibração em km ²	0,08	
Valores médios de diferença (m)	-6	
Mudança média de altitude na área de estudo (m)	-58	-2
Correspondente em volume de gelo (10 ⁶ m ³)	- 11,50	- 0,21

O objetivo deste estudo foi analisar mudanças verticais que ocorreram sobre a superfície das geleiras. Valores negativos foram encontrados na comparação entre os DEMs principalmente na parte frontal das geleiras, logo, correspondendo a perdas de gelo.

Na área de acumulação da geleira Pacuni (Figura 6), de orientação sudeste, a variação entre 1975 e 2000 ficou muito próxima ao zero. Já na geleira Laramkkota (figura 7), localizada no setor sudoeste, constatou-se uma perda de $-11,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$ de volume de gelo.

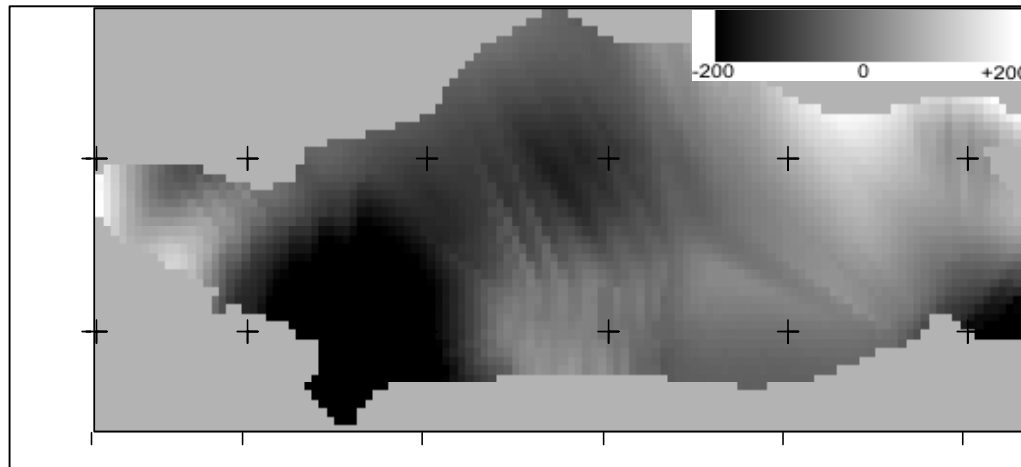


Figura 6. Mudanças de elevação em metros na área de ablação da geleira Pacuni entre 1975 e 2000.

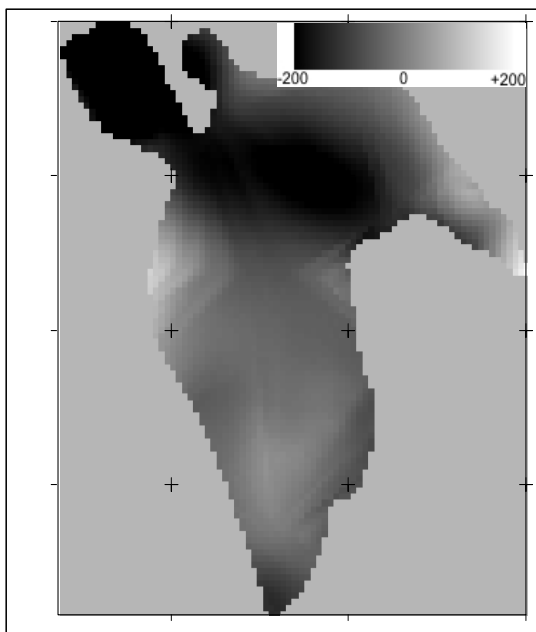


Figura 7 - Mudanças de elevação em metros na área de ablação da geleira Laramkkota entre 1975 e 2000.

CONCLUSÃO

A obtenção da variação do volume, através dos dados SRTM 3 e de mapas topográficos, apresenta-se bastante útil no monitoramento do balanço de massa especialmente numa escala decenal. O balanço de massa negativo, provavelmente está relacionado com um aquecimento atmosférico regional. Estes dados corroboram a tendência de derretimento das geleiras tropicais (KASER, 2002). A fim de confirmar os resultados estimados neste estudo, os autores recomendam a comparação com métodos tradicionais de balanço de massa de geleiras, baseados em levantamento de campo.

REFERÊNCIAS

- ANDREASSEN, L.M. Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: a case study of Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway, in the period 1940 - 1997. **Geografiska Annaler**. V 81 A, n.4, p 467-476, 1999.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 333 p.
- DYURGEROV, M. B. Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle. **J. hydrol.** v 282, p 164–176, 2003.
- JORDAN, E. Glaciers of Bolivia, in R. S. Williams, Jr., and J. G. Ferrigno (Org.). **Satellite image atlas of glaciers of the world; South America**, Heinrich-Heine-Universitt, p. 181-1108, 1998.
- JORDAN, E. Die **Gletscher Der Bolivianischen Anden**. Franz Steiner Verlag. Suttgart, 1991. 365p.
- KASER, G. AND H. OSMASTON. **Tropical Glaciers**. Cambridge University Press, Cambridge, 2002. 207p.
- PATERSON, W. S. B. **The physics of glaciers**. , 3rd edition: Pergamon Press, Oxford, 1994, 333 pp.
- RIBEIRO, R; SIMÕES, J; BREMER, U. Spatial Variations And Morphology Of Cordillera Tres Cruces Glaciers, Using Landsat Data In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 12. Goiânia **Anais**, São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 669-671. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.
- RIVERA, A. E CASASSA, G. Ice Elevation, Areal, and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield in **Arctic, Antarctic, and Alpine Research**, v. 36, n.4, p 379-389, 2004.

ROSIM, S., NAMIKAWA, L.M., Cálculo do Volume de Corte e Aterro Usando Modelagem Numérica de Terrenos, In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, Salvador **Anais**, São José dos Campos: INPE, 1996, p 741-742.

SMITH, B., AND D. SANDWELL, Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data, **Geophys. Res. Lett.**, v 30 n.9, 1467, doi: 10.1029/2002GL016643, 2003.

W.REINHARDT, H.RENTSCH. Determination of changes in volume and elevation of glaciers using digital elevation models for the Vernagtferner, Ötztal Alps, **Annals of Glaciology** , Austria, v 8, p.151-155, 1986.