



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbge



Mapeamento e análise da distribuição geográfica das geleiras de rocha com o uso de imagens de satélite, cordilheira Tres Cruces, Bolívia

Kátia Kellem da Rosa¹, Rosemary Vieira²; Guilherme Joaquim¹

¹Profa. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Polar e Climático, Departamento de Geografia, Programa de Pós Graduação em Geografia. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre-RS, Brasil, 91501-970, e-mail: katiakellem@gmail.com (autor correspondente). ²Universidade Federal Fluminense, Laboratório de Processos Sedimentares e Ambientais, Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/n. Campus da Praia Vermelha-Boa Viagem, Niterói/RJ, Brasil, 24210-346.

Artigo recebido em 28/05/2014 e aceito em 26/03/2015

RESUMO

O semiárido andino sul-americano é considerado uma das regiões onde ocorrem as maiores concentrações de geleiras de rocha do mundo. Neste contexto, o presente estudo apresenta o primeiro mapeamento destas feições morfológicas através de técnicas de Sensoriamento Remoto e geoprocessamento na cordilheira Três Cruces, localizada na Bolívia (entre 16° 44' e 17° 04' S e 67° 16' e 67° 33' O). Ao todo foram identificadas 64 geleiras de rocha, sendo diferenciadas conforme sua morfologia como: geleiras de rocha de fundo de vale (35 feições); geleiras de rocha de talude (25 feições) e geleiras de rocha inativas (4 feições). A partir da análise do modelo digital de elevação e de imagens de satélite da área de estudo, nos anos de 1985 e 2005, foi possível caracterizá-las através de parâmetros geométricos e topográficos. As áreas das geleiras de rochas apresentaram um aumento médio de 11% no período de análise, totalizando 13,9 km² em 2005. O espectro altitudinal de ocorrência das geleiras de rochas varia entre 4.080 m.s.n.m e 5.310 m.s.n.m, e a orientação das vertentes das feições identificadas tem como predomínio os sentidos oeste-sudoeste-sul, refletindo as condições topográficas e processos periglaciais.

Palavras-chave: Andes, geleiras de rocha; sensoriamento remoto; geomorfologia glacial.

Rock glaciers mapping and geographical distribution analysis from satellite images, cordillera Tres Cruces, Bolívia

ABSTRACT

The semiarid Andes are considered one of the regions with the highest rock glaciers concentration in the world. In this context, this study presents the first mapping of these morphological features using Remote Sensing and GIS applications in the Cordillera Tres Cruces, Bolivia (16° 44' - 17° 04' S and 67° 16' - 67° 33' O). 64 rock glaciers were identified, and classified according to their morphology: valley rock glaciers (35 features); slope rock glaciers (25 features) and inactive rock glaciers (4 features). The analysis of digital an elevation model and satellite images of the study area, for the period 1985-2005, it was possible to characterize them by the geometrical and topographical features. The area occupied by rock glaciers showed an increase of 11% during the analyzed period, totaling 13.9 km² in 2005. The altitudinal range of occurrence of rock glaciers ranges from 4080 m to 5310 m.s.n.m., and the orientation of the slopes is predominantly west-southwest-south, reflecting the topographic position and periglacial processes.

Keywords: Andes, rock glaciers, remote sensing, glacial geomorphology.

Introdução

Geleiras de rocha caracterizam-se por deformações internas do gelo ou do gelo intersticial, ou de lâminas de gelo entre os detritos rochosos (Payne, 1998). Os tipos mais comuns

são os derivados de talude, em ambiente periglacial, e os derivados de morainas (origem glacial).

Quanto à origem das geleiras de rochas, existem duas principais correntes: (1) modelo periglacial (Clark et al., 1998), onde o congelamento *in situ* da água da chuva e de fusão ocorre dentro dos interstícios de taludes pré-existentes

(2) modelo glacial, no qual a geleira é coberta por detritos rochosos, derivados das vertentes ou por

acumulação por fusão, tornando o gelo subjacente isolado (Ackert, 1998).

Geleiras de rocha são formas complexas de relevo que possuem grande potencial como reservatório de água congelada. Sabe-se que sua ocorrência é abundante em ambientes localizados em latitudes altas e em regiões de alta montanha (Brenning, 2005).

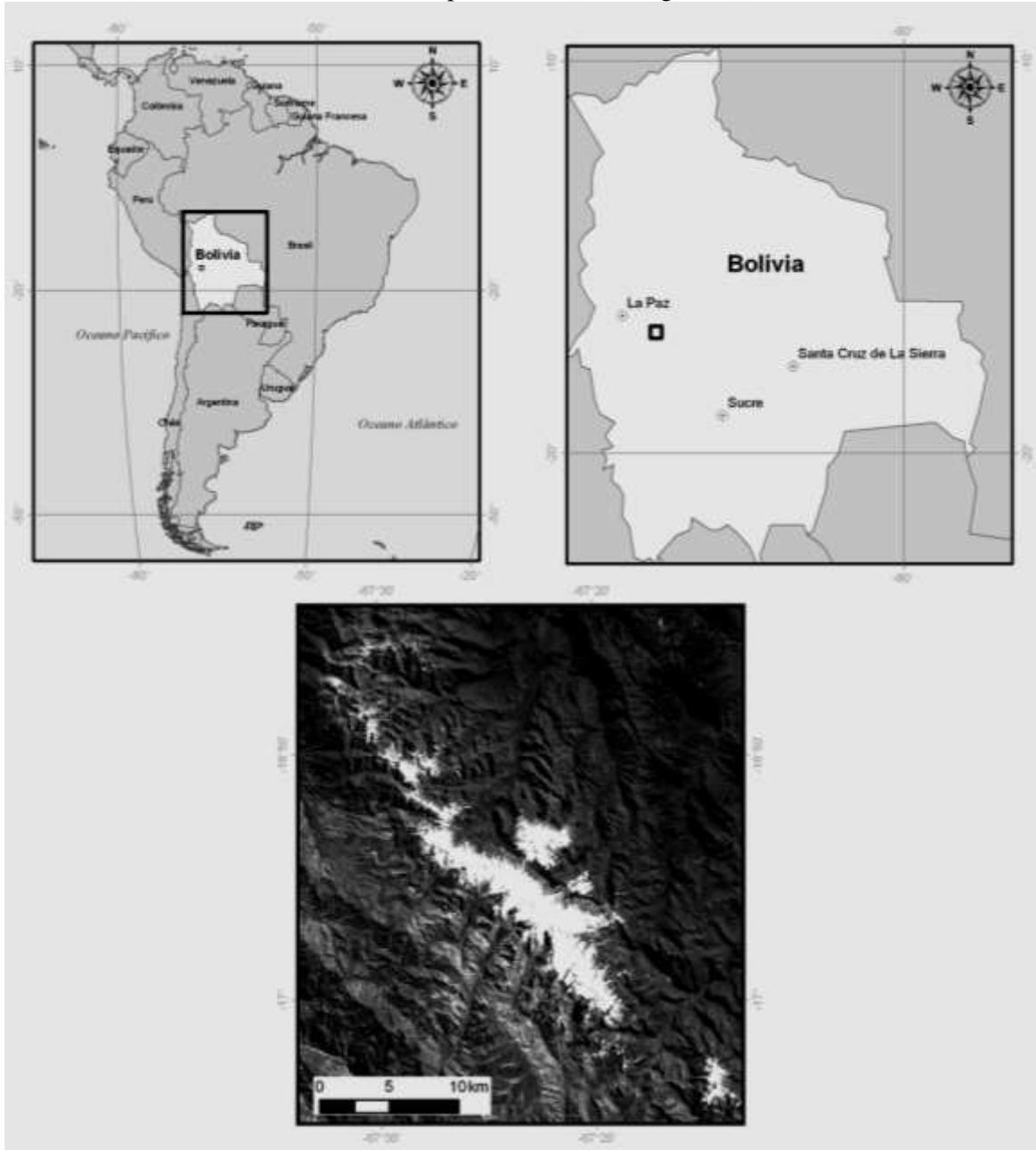


Figura 1. Mapa da área de estudo, na cordilheira Tres Cruces, Bolívia.

Na América do Sul, os Andes semi-áridos da Bolívia, Peru e Chile estão entre as áreas montanhosas com maior densidade e desenvolvimento de geleiras de rochas em todo o mundo, porém são uma das menos estudadas (Brenning, 2005, 2007). Destacam-se os trabalhos de Francou et al. (1999), Mohamed (2003) que

classificam as geleiras de rocha na Bolívia por meio de sensoriamento remoto.

Comparadas com as geleiras “típicas”, as geleiras de rocha permanecem menos estudadas, embora estudos iniciais sobre o tema datem das décadas iniciais do século XX. Devido às suas características peculiares e por serem

superficialmente similares às formações morânicas, avalanches de rocha, taludes ou outros depósitos de vertente, sua detecção em imagens satelitais é difícil. Desta maneira, sua presença e significado hidrológico são ainda amplamente negligenciados e até mesmo desconhecidos (Millar e Westfall, 2007).

Atualmente, as geleiras de rocha estão se tornando significantes dentro do contexto de mudanças climáticas. Enquanto as geleiras típicas estão retrocedendo em todas as partes do mundo, a água contida na geleira de rocha está protegida da elevação da temperatura do ar pelo manto de detritos que a cobre. Por esta razão, as geleiras de rocha estão se transformando em importantes reservatórios de água.

Essa importância se eleva na cordilheira dos Andes, que concentra mais de 99% das geleiras tropicais, e países andinos, como Bolívia e Peru, dependem em grande parte do abastecimento de água armazenada nas geleiras de montanha (Messerli, 2001).

Assim, embora haja uma relativa notoriedade da presença destas formas de relevo de mesoescala ao longo da cordilheira dos Andes, ainda não há estudos realizados sobre a quantificação, classificação e verificação da distribuição das geleiras de rocha na região andina boliviana.

Esse estudo propõe-se a realizar o mapeamento destas feições na referida região, com intuito de propiciar maior compreensão sobre geleiras de rocha localizadas em ambientes tropicais.

A cordilheira Tres Cruces (também conhecida como Quimsa Cruz, na língua indígena aymara) localiza-se na Bolívia, distante cerca de 70 km a sudeste da capital La Paz, entre as coordenadas geográficas 16° 44' - 17° 04' S e 67° 16' - 67° 33' O. (Figura 1). Caracteriza-se por altitudes que variam entre 4.800 m.s.n.m. e 5.700 m.s.n.m.; sua extensão é de aproximadamente 35 km de comprimento por 10 km de largura.

O clima nos Andes tropicais bolivianos apresenta duas estações anuais bem delimitadas. A estação úmida (\approx 80% da precipitação anual), durante os meses de dezembro a março (verão), possui forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que nesse período desloca-se em direção ao sul, propiciando a entrada de massas de ar mais úmidas provenientes da bacia Amazônica e do oceano Atlântico (Ronchail et al., 2002).

No período do verão austral, a nebulosidade aumenta e a radiação incidente de ondas longas é maior. O resultado é a maior quantidade de energia disponível na superfície que,

consequentemente, aumenta a ablação nas geleiras. Porém, o balanço de massa tende a se equilibrar durante o inverno, ou seja, para compreender a dinâmica das geleiras tropicais é imprescindível considerar a variabilidade entre a ablação e a acumulação nival (Francou et al., 2000).

Durante a estação seca, nos meses de julho a agosto (inverno), como consequência do deslocamento da ZCIT para o norte, os ventos secos, oriundos da porção leste do anticiclone do Pacífico, predominam na região. Nessa estação, ocasionalmente massas de ar polar, de origem subantárticas, avançam nessa porção dos Andes, reduzindo as precipitações de neve. Localmente o referido fenômeno é conhecido como *suarazos* (Ronchail et al., 2002).

Outro fator que influencia o regime de distribuição de chuvas é a presença da cordilheira (Johnson, 1980), uma vez que as áreas voltadas para a mesma direção da origem das massas de ar apresentam índices superiores de precipitação. Esse fenômeno também é denominado como “chuva de sombra”. Conforme exemplo de Ribeiro (2007), na Cordilheira Oriental o total da precipitação pode ser três vezes maior do que na Cordilheira Ocidental (1.300 mm e 500 mm, respectivamente).

Nas áreas montanhosas tropicais, como nos Andes bolivianos os processos periglaciais são diferentes daqueles em ambientes árticos e alpinos, pois os primeiros são caracterizados por pequenas variações sazonais de temperatura, elevado input de energia solar sobre a superfície por todo o ano, e ausência de cobertura de neve por longos períodos, o que produz consequências para o regime termal e albedo do solo. Além disso, a fraca sazonalidade e a aridez têm duas consequências: (1) os processos periglaciais e suas formas associadas estão diretamente associados ao gradiente altimétrico; (2) a distribuição dos processos periglaciais depende da disponibilidade de água no terreno. Portanto, a zona de permafrost nesta região é observada geralmente acima de 5400-5500m, estando a ocorrência das geleiras de rocha controladas principalmente pela topografia e pela orientação. Em tais condições, a resposta do permafrost à variabilidade climática pode ser diferente se comparada às latitudes (Francou et al., 1999).

A retração contínua das geleiras na área teve início a partir da primeira metade do século XVIII e, desde este período, o processo de recuo esteve associado à redução da precipitação (Rabatel, 2005). Na extensão máxima das geleiras (durante a Pequena Idade do Gelo), as precipitações na

região eram cerca de 30% maiores que atualmente, além da temperatura do ar ser aproximadamente 0,6°C mais baixa (Rabatel, 2005).

No período entre o final do século XIX e começo do século XX, a principal causa do recuo das geleiras foi o aumento de ocorrências e intensidade do fenômeno *El Niño* (Ribeiro, 2007).

Mais recentemente, Ribeiro (2007, 2013) analisou imagens de satélites e dados cartográficos com o objetivo de estimar a variação da espessura do gelo (diferenças de volume e elevação), em sete geleiras da cordilheira Tres Cruces, no período de 29 anos (1975 a 2004). Através deste levantamento foi possível determinar que, desde o ano de 1975, as geleiras tiveram suas frentes recuadas. A partir da análise de modelos digitais, concluiu que a média da redução geral do volume de gelo durante o período analisado foi de, aproximadamente, 1,55 meq. água a⁻¹. Em média, ocorreu uma perda de 18% da área das geleiras, aproximadamente 0,009 km².a⁻¹. Conforme o autor aponta, essa retração das massas de gelo na referida cordilheira é condizente com o aquecimento atmosférico regional e com a diminuição generalizada das geleiras nos trópicos.

O uso do Sensoriamento Remoto para o estudo dos ambientes glaciais torna-se importante para a caracterização de áreas de difícil acesso. Para o estudo das geleiras de rocha o emprego do Sensoriamento Remoto está sendo utilizado em média escala de análise espacial, com destaque para estudos da dinâmica das geleiras de rocha, modelamento de sua velocidade superficial e transporte de sedimentos, entre outras variáveis glaciológicas. Técnicas de interferometria e a utilização de séries multitemporais tem sido utilizado nas geleiras de montanha e na Antártica em diversos trabalhos (Rignot et al., 2002; De Matías et al., 2009).

Material e Métodos

O desenvolvimento metodológico do trabalho ocorreu basicamente em quatro etapas: (1) manipulação das imagens satelitais; (2) elaboração do modelo tridimensional da área de estudo; (3) identificação e classificação morfológica das geleiras de rocha; (4) análise das informações obtidas.

Softwares de SIG e imagens de satélite

Para realizar a análise dos dados espaciais da área de estudo, foram utilizados os seguintes

aplicativos computacionais: (1) ArcGis para o georreferenciamento das imagens de satélite, vetorização das geleiras de rocha, geração de curvas de nível, declividade e orientação das vertentes; manipulação do TIN e elaboração do modelo tridimensional; (2) ENVI 4.3, para o realce das imagens de satélite e fusão das imagens Landsat e CBERS. Foram utilizadas imagens espectrais de média resolução espacial do sensor *Thematic Mapper* (TM) do satélite Landsat-5, na série histórica disponível (1985 e 2005), e imagem do sensor *High Resolution Camera* (HRC) do satélite CBERS 2B.

As imagens do Landsat-TM têm uma resolução espacial de 30 metros, o que implica que objetos com dimensões menores do que 30 x 30 m não podem ser identificados (INPE, 2012).

De acordo com o INPE (2012) o sensor da câmera HRC opera numa única faixa espectral, que cobre o visível e parte do infravermelho próximo e produz imagens de uma faixa de 27 km de largura com uma resolução de 2,7 m, que permite a observação com grande detalhamento dos objetos da superfície. Como sua faixa de cobertura é de 27 km, são necessários cinco ciclos de 26 dias para que os 113 km padrão da CCD sejam cobertos pela HRC. Assim, a cada 130 dias será possível ter uma cobertura completa do país, para ser correlacionada com aquela obtida pela câmera CCD, que neste período terá coberto o país por cinco vezes. Os satélites CBERS-1, 2 e 2B são equipados com câmeras para observações ópticas de todo o globo terrestre, além de um sistema de coleta de dados ambientais. São sistemas únicos devido ao uso de câmeras que combinam características diversas para resolver a grande variedade de fenômenos que ocorrem em escalas temporais e espaciais típicas de nosso ecossistema.

Os satélites CBERS-1, 2 e 2B caracterizam-se por estarem em uma órbita síncrona com o Sol a uma altitude de 778 km, completando 14 revoluções da Terra por dia. Este tipo de órbita é tal que o satélite sempre cruza o Equador às 10h30 da manhã, hora local, provendo assim as mesmas condições de iluminação solar para tornar possível a comparação de imagens adquiridas em dias diferentes.

Modelo digital de elevação

Foram considerados dados do MDEs, com 30m de resolução espacial, provenientes do projeto nipoamericano ASTER-GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model*).

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) representam uma fonte de dados importante dos ambientes glaciais e suas aplicações abrangem diversos tipos de estudos e áreas do conhecimento. O sistema sensor óptico ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo do satélite Terra, com destacada qualidade geométrica dos seus MDE, e também integra dados altimétricos e multiespectrais. Desenvolvido pela NASA, o sistema ASTER consiste em três subsistemas de sensores: VNIR (Visible and Near Infrared), SWIR (*Shortwave Infrared*) e TIR (*Thermal Infrared*). As imagens ASTER cobrem uma região espectral larga com 14 bandas ou canais espectrais dando cobertura radiométrica desde o espectro visível até o espectro do infravermelho térmico, com alta resolução espacial, espectral e radiométrica.

Manipulação das imagens satelitais

A área de estudo foi recortada da imagem original e seu aprimoramento visual foi obtido através da manipulação de histograma e da fusão de imagens.

Embora as imagens do sensor HRC tenham uma resolução espacial muito superior quando comparadas às do TM, elas caracterizam-se por ter somente uma banda pancromática. Este fato dificulta a extração das informações que são pertinentes a este trabalho. Deste modo, viu-se a necessidade de fundir essas imagens para obter um produto de apoio na identificação, com maior acuidade visual.

As cenas do Landsat TM-5 foram adquiridas pelo sensor do satélite no mês de agosto dos anos de 1985 e 2005. O mês de aquisição influenciou a escolha dessas imagens, uma vez que corresponde ao final da estação seca na região. Isso significa que a cobertura nival, assim como as frentes das geleiras, estão no período de maior recuo. Além das imagens Landsat, foi utilizada uma cena proveniente do sensor HRC do satélite CBERS-2B. Essa imagem auxiliou na identificação das geleiras de rocha, tendo em vista sua resolução espacial de 2,7m. Para georeferenciar as imagens consideradas foi utilizada uma cena do satélite Landsat-7 do ano de 2000 já georreferenciada e ortoretificada pela NASA.

Para gerar o arquivo TIN, foi utilizada a ferramenta 3D *Analyst: Create/Modify TIN e Create TIN from Features*. Nessa janela foi selecionado o *shape* das curvas de nível gerado no processo anterior, para servir de base na geração do TIN. O produto resultante é formado por *layers*

que contém informações, que foram extraídas posteriormente, como declividade do terreno e orientação das vertentes.

A declividade representa a inclinação de determinado ponto da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Nesse caso, foi considerada a partir dos dados altimétricos extraídos do MDE. Nesse estudo está representada em graus ($^{\circ}$), podendo variar de 0 (superfície completamente plana) até 90 (máxima declividade).

A orientação das vertentes representa a direção da declividade superficial da vertente. Essa orientação é calculada para cada triângulo do TIN. Medida no sentido horário, cujas faces correspondem a intervalos de 45° . Iniciando no norte ($337,6-22,5^{\circ}$), nordeste ($22,6-67,5^{\circ}$), leste ($67,6-112,5^{\circ}$), sudeste ($112,6-157,5^{\circ}$), sul ($112,6-202,5^{\circ}$), sudoeste ($202,6-247,5^{\circ}$), oeste ($247,5-292,5^{\circ}$) e noroeste ($292,6^{\circ}-337,5$).

Classificação morfológicas das geleiras de rocha

A classificação das geleiras de rocha, quanto à morfologia, foi efetuada agrupando-as segundo três tipos: geleiras de rocha de fundo de vale, de talude e geleira de rocha inativa. Esta classificação adotada foi baseada nos estudos realizados no setor norte chileno da cordilheira dos Andes por Soto et al. (2004), ambiente de alta montanha com baixas precipitações.

As geleiras de rocha do tipo fundo de vale geralmente localizam-se entre vertentes em seções superiores de um vale. Sua feição visual normalmente é em forma de língua. Além disso, é comum apresentar ao longo de seu “corpo” sulcos e cordões longitudinais de detritos rochosos. A gênese das geleiras de rocha de fundo de vale geralmente é glacial, uma vez que, inicialmente, o aporte de gelo contido na estrutura está associado às geleiras de gelo do seu entorno (Figura 2).

As geleiras de rocha de talude localizam-se preferencialmente em seções inferiores das encostas de uma vertente. Quanto à gênese das geleiras de rocha de talude, são consideradas integrantes de um sistema periglacial e, portanto, apresentam pouca ocorrência de gelo superficial, sendo mais comum a acumulação apenas de neve sazonal em sua superfície (Figura 2).

As geleiras de rocha do tipo inativo estão localizadas em cotas altimétricas inferiores, caracterizando-se pela ausência de gelo intersticial, e de deslocamento e pela ocupação de vegetação rasteira superficial. Sua declividade é menos acentuada comparada aos dois outros tipos (Figura 2).

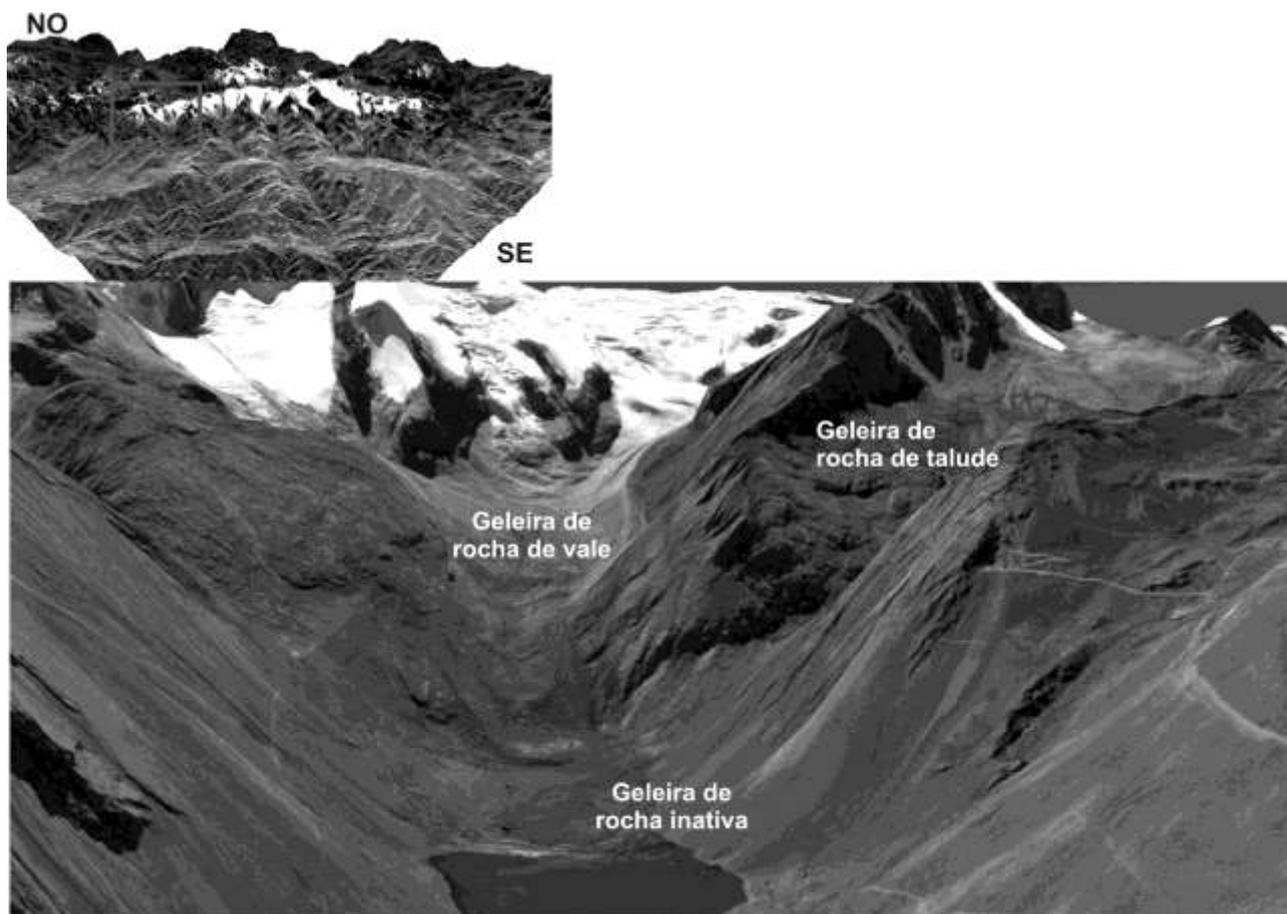


Figura 2. Exemplos de localização dos tipos de geleiras de rocha no modelo tridimensional da área de estudo.

Análise estatística dos dados morfológicos

Após vetorizar as feições identificadas nas imagens dos anos analisados, foi realizado o cálculo das áreas individuais das geleiras de rocha, com o objetivo de identificar se houve crescimento, redução ou se não ocorreu variação das áreas durante o período de 20 anos.

De acordo com os dados extraídos, foram considerados nove diferentes parâmetros topográficos e geográficos que podem influenciar a distribuição das geleiras de rocha: latitude, longitude, elevação máxima, elevação mínima, elevação média, relevo (diferença entre elevação máxima e elevação mínima), orientação e declividade da geleira. Dentre os parâmetros correlacionados, apenas latitude e longitude não apresentam características morfométricas, mas foram inseridos para auxiliar na análise da distribuição espacial das geleiras de rocha. A correlação de Pearson (medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas) foi utilizada para verificar a dependência entre esses parâmetros e foram considerados somente os índices de correlação com valores absolutos $\geq 0,4$, sendo as correlações significativas aquelas que

apresentaram índices $\geq 0,7$ e relativamente significativas as correlações com índices entre 0,4 e 0,7. Foram analisadas as categorias morfológicas de acordo com o número representativo de geleiras de rocha de cada tipo: (i) geleiras de rocha de fundo de vale e, (ii) geleiras de rocha de talude. As geleiras de rocha inativas não foram analisadas devido a sua pouca representatividade. Os dados foram analisados e representados graficamente com os *softwares* *Statistica* e *Grapher*.

Análise estatística dos dados morfológicos

De acordo com os dados extraídos, foram considerados nove diferentes parâmetros topográficos e geográficos que podem influenciar a distribuição das geleiras de rocha: latitude, longitude, elevação máxima, elevação mínima, elevação média, relevo (diferença entre elevação máxima e elevação mínima), orientação e declividade da geleira. Dentre os parâmetros correlacionados, apenas latitude e longitude não apresentam características morfométricas, mas foram inseridos para auxiliar na análise da distribuição espacial das geleiras de rocha. A correlação de Pearson (medida do grau de relação

linear entre duas variáveis quantitativas) foi utilizada para verificar a dependência entre esses parâmetros e foram considerados somente os índices de correlação com valores absolutos $\geq 0,4$, sendo as correlações significativas aquelas que apresentaram índices $\geq 0,7$ e relativamente significativas as correlações com índices entre 0,4 e 0,7. Foram analisadas as categorias morfológicas de acordo com o número representativo de geleiras de rocha de cada tipo: (i) geleiras de rocha de fundo de vale e, (ii) geleiras de rocha de talude. As geleiras de rocha inativas não foram analisadas devido a sua pouca representatividade. Os dados foram analisados e representados graficamente com os *softwares* Statistica e Grapher.

Resultados e Discussão

Ao todo foram identificadas na área de estudo 64 feições consideradas como geleiras de rocha, sendo que no ano de 1985, a soma das áreas das mesmas era de aproximadamente 12,3 km², e em 2005 observou-se um acréscimo na soma das áreas de, aproximadamente, 11% (Figura 3 e Tabela 1). Com relação à área ocupada, as geleiras de fundo de vale correspondiam, em 1985, a 10,01

km² (81,5% das áreas totais) e em 2005, a 11,5 km² (82,5% das áreas totais).

As geleiras de talude, em 1985 somavam 1,92 km² (15,6% das áreas totais) e em 2005, 2,07 km² (15% das áreas totais). As geleiras do tipo inativa diminuíram em área, de 0,36 km² (2,9% das áreas totais), em 1985 para 0,35 km² (2,5% das áreas totais) em 2005 (Tabela 2). Quanto à classificação morfológica, verifica-se que 55% das geleiras de rocha são de fundo de vale; 39% são do tipo talude e os 6% restantes são geleiras de rocha inativas. As geleiras de rocha do tipo fundo de vale possuem altitudes que variam de 4.470 m.s.n.m. a 5.310 m.s.n.m., sendo a altitude geral média de 4.922 m.s.n.m.

As geleiras do tipo talude possuem altitudes mínimas e máximas de 4.080 m.s.n.m. e 5.280 m.s.n.m., respectivamente, e a altitude geral média de 4.728 m.s.n.m.. Por último, as altitudes das geleiras do tipo inativa variam de 4.530 m.s.n.m. a 4.800 m.s.n.m., e a altitude média 4.641 m.s.n.m..

A correlação de Pearson (Figura 4) mostrou que, no conjunto, as correlações significativas foram entre: altitude média e altitude mínima e máxima (1,0 para ambas), altitude máxima e mínima (0,9) e relevo e área (0,7).

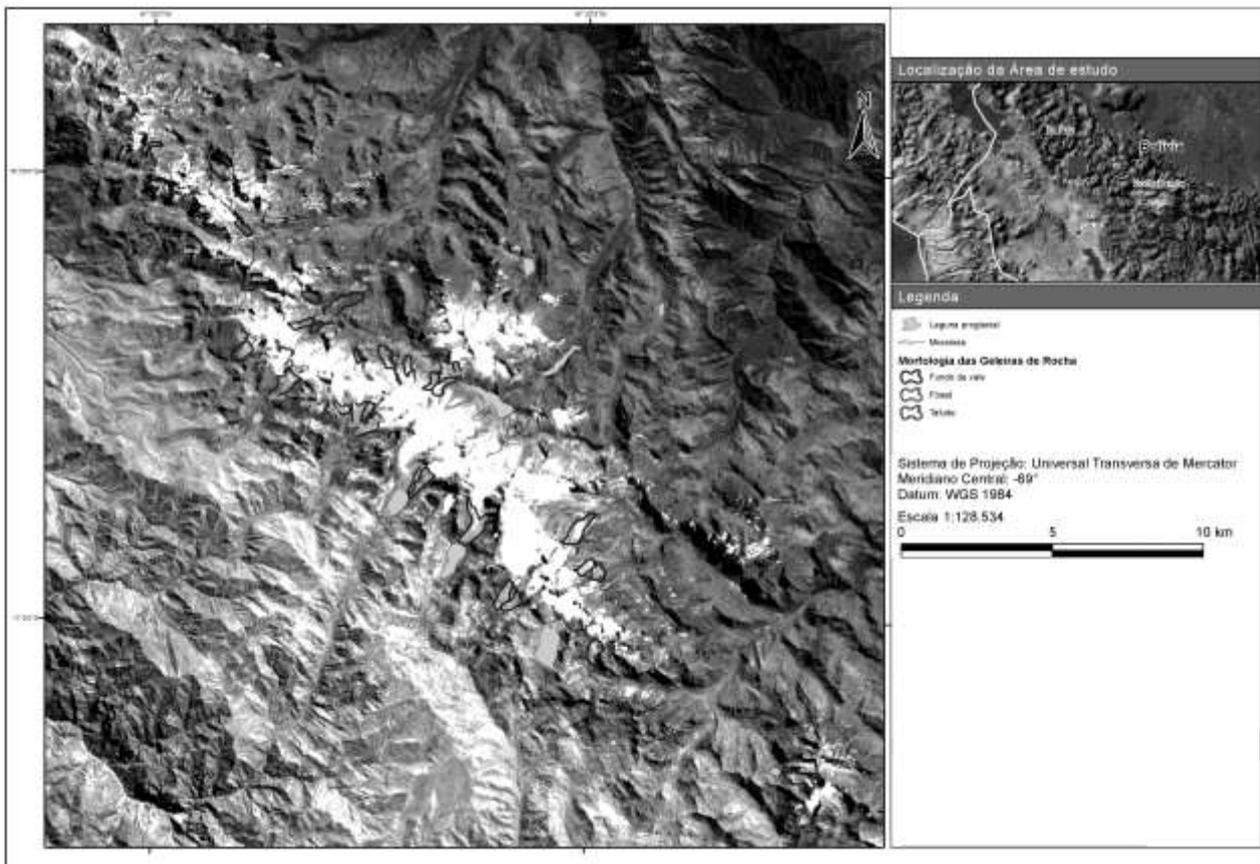


Figura 3. Mapa de localização das geleiras de rocha em 1985 e 2005.

No entanto, as correlações se tornam mais significativas com a separação morfológica das geleiras de rocha em geleiras de fundo de vale e de talude. Dentro da categoria geleira de rocha de fundo de vale as correlações significativas foram entre: altitude mínima e altitude média (0,9), altitude máxima e altitude média (0,9) e altitude máxima e relevo (0,7).

Dentro da categoria geleiras de rocha de talude, correlações significativas ocorreram entre altitude máxima e mínima (1), altitude máxima e média (1), altitude média e mínima (1) e relevo e área (0,7).

Pode ser observada na análise das correlações uma relação de dependência entre a variável área com relação à altitude (máxima e média) e com relação ao relevo (diminuição entre altitude máxima e mínima). Isso representa uma tendência de aumento da área das geleiras de rocha com a altitude. No entanto, essas correlações foram mais evidenciadas para as geleiras de rocha de talude do que para as geleiras de rocha de fundo de vale, que apresentaram correlações abaixo do limite mínimo. Os gráficos representados pelas figuras 4a-b também mostram essa tendência.

Em relação à orientação das vertentes das feições identificadas (Figura 5), o predomínio é nos sentidos oeste-sudoeste-sul (53% da área

total das geleiras de rocha). Essa característica indica que uma parte significativa das geleiras de rocha está exposta a maiores períodos de insolação e, teoricamente, com maior disponibilidade de material meteorizado para as geleiras de rocha, mas que podem conduzir a pouca atividade em função da exposição solar.

Com relação à variação da área das geleiras de rocha entre 1985 e 2005, observou-se que o aumento da área das geleiras de fundo de vale foi maior do que as de geleira de talude. Esses dados não invalidam a correlação, porque em dados absolutos, a área das geleiras de rocha de fundo de vale é maior do que as geleiras de talude, pois as primeiras possuem origem glacial e distribuem-se por um intervalo maior de altitude, devido a sua extensão; as segundas desenvolvem-se ao longo das vertentes rochosas.

Porém, a tendência de que a área das geleiras de talude aumente com a altitude comparada às de fundo de vale pode ser explicada pelo predomínio dos processos periglaciais e de meteorização das rochas em altitudes mais elevadas.

Correlações relativamente significativas entre parâmetros geográficos (latitude e longitude) e parâmetros morfométricos foram notadamente observados na categoria geleira de rocha de talude.

Tabela 1. Classificação morfológica das geleiras de rocha quanto à soma das áreas.

Código Identificação	Área 1985 (m²)	Área 2005 (m²)	Varição da área (m²)	Varição da área (%)
GR-01	324.429,1	467.311,8	142.882,8	31%
GR-02	336.954,3	476.949,5	139.995,2	29%
GR-03	413.090,3	464.955,6	51.865,3	11%
GR-04	328.721,3	330.949,9	2.228,6	1%
GR-05	382.026,1	460.217,5	78.191,4	17%
GR-06	542.472,7	891.469,1	348.996,4	39%
GR-07	311.703,6	454.195,9	142.492,2	31%
GR-08	190.360,7	241.542,7	51.182,0	21%
GR-09	392.634,6	506.810,4	114.175,8	23%
GR-10	192.575,7	220.652,4	28.076,8	13%

Tabela 2. Classificação morfológica das geleiras de rocha quanto à área ocupada.

Código Identificação	Área 1985 (m²)	Área 2005 (m²)	Variação da área (m²)	Variação da área (%)
GR-11	388.620,3	405.437,3	16.817,0	4%
GR-12	207.718,4	191.579,0	(16.139,4)	-8%
GR-13	56.714,8	94.065,6	37.350,8	40%
GR-14	120.767,7	124.935,7	4.168,0	3%
GR-15	230.986,6	334.303,7	103.317,2	31%
GR-16	20.057,9	20.057,9	0,0	0%
GR-17	82.768,9	82.768,9	0,0	0%
GR-18	636.354,0	708.535,5	72.181,5	10%
GR-19	34.994,5	131.913,3	96.918,8	73%
GR-20	62.307,9	63.849,5	1.541,7	2%
GR-21	205.187,2	451.427,7	246.240,4	55%
GR-33	38.167,8	41.807,6	3.639,7	9%
GR-34	6.685,8	11.801,6	5.115,8	43%
GR-35	20.014,7	25.061,7	5.047,0	20%
GR-36	15.086,3	15.086,3	0,0	0%
GR-37	121.478,8	45.401,2	(76.077,6)	-168%
GR-38	86.408,5	27.592,5	(58.816,0)	-213%
GR-39	153.826,4	206.633,4	52.807,0	26%
GR-40	42.032,9	20.754,7	(21.278,2)	-103%
GR-41	29.396,6	23.690,6	(5.706,0)	-24%
GR-42	72.663,2	72.075,4	(587,9)	-1%
GR-43	41.093,3	29.826,4	(11.266,9)	-38%
GR-44	280.699,4	158.183,9	(122.515,5)	-77%
GR-45	260.765,9	241.060,6	(19.705,2)	-8%
GR-46	392.201,3	248.513,0	(143.688,3)	-58%
GR-47	865.477,8	896.987,1	31.509,4	4%
GR-48	59.203,6	43.700,4	(15.503,1)	-35%
GR-49	47.937,1	50.651,6	2.714,4	5%
GR-50	43.579,6	52.070,7	8.491,2	16%
GR-51	55.082,0	41.023,8	(14.058,2)	-34%
GR-52	89.399,2	100.119,8	10.720,6	11%
GR-53	280.309,1	395.091,7	114.782,6	29%
GR-54	141.377,5	201.378,6	60.001,1	30%
GR-55	187.130,6	229.467,0	42.336,4	18%
GR-56	148.691,1	320.503,8	171.812,7	54%
GR-57	117.289,3	145.369,5	28.080,2	19%
GR-58	683.097,6	672.518,8	(10.578,8)	-2%
GR-59	418.301,3	308.860,3	(109.440,9)	-35%
GR-60	411.750,2	312.279,7	(99.470,5)	-32%
GR-61	171.715,99	167.701,01	(4.015,0)	-2%
GR-62	119.301,47	114.020,82	(5.280,6)	-5%
GR-63	35.889,84	40.463,99	4.574,1	11%
GR-64	28.884,46	29.334,00	449,5	2%

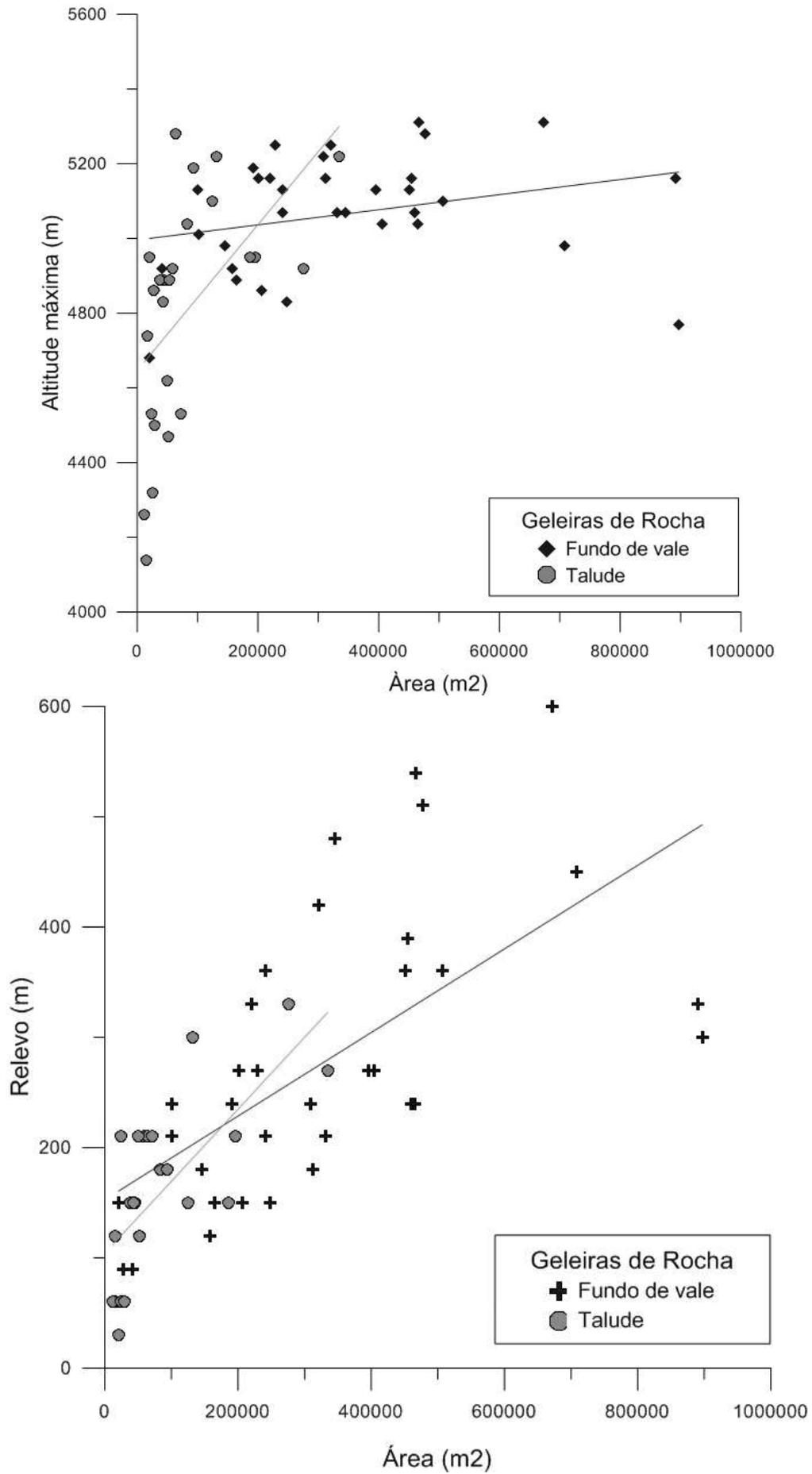


Figura 4. Diagramas de dispersão entre parâmetros morfométricos (linha de tendência linear): (a) área e altitude máxima; (b) área e relevo (diferença entre altitude máxima e mínima).

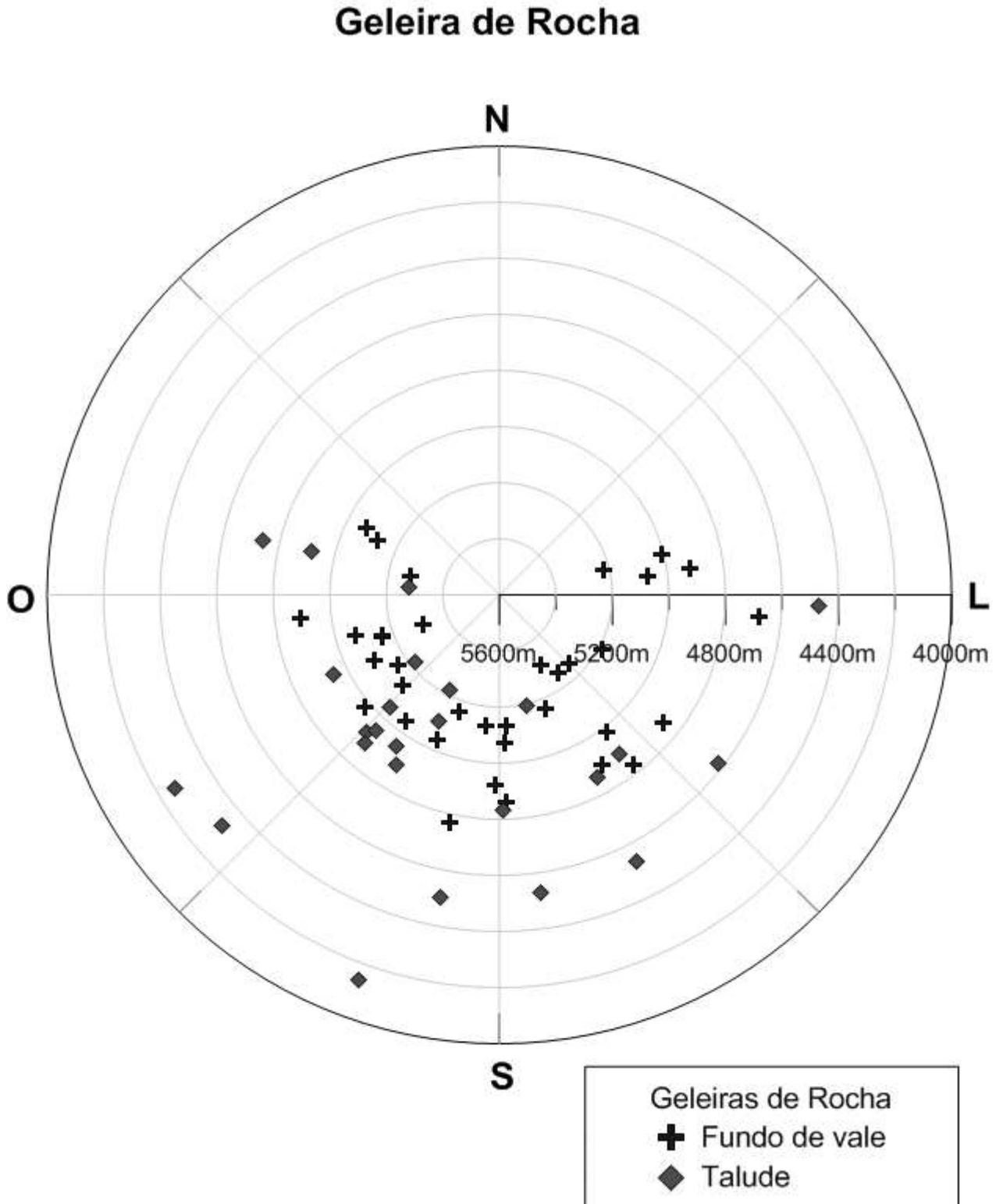


Figura 5. Diagrama polar comparando orientação e elevação das geleiras de rocha.

A partir delas pode-se inferir que as geleiras de rocha de talude se distribuem em altitudes mais elevadas conforme a diminuição da latitude, ou seja, em direção ao norte da cordilheira. Por outro lado, com relação à longitude, a tendência de

crescimento altitudinal é maior na direção oeste da cordilheira.

Eram esperadas relações de dependência mais significativas entre orientação e elevação das geleiras, em função da maior ou menor exposição

aos raios solares, o que influencia nos processos de meteorização em áreas de cordilheiras e, conseqüentemente, na ocorrência das geleiras de rocha mediante o fornecimento de material rochoso. Contudo, tanto para as geleiras de rocha de fundo de vale como para as de talude, as correlações apresentaram o índice mínimo de aceitação (0,4). As geleiras de fundo de vale e de talude se sobrepuseram em elevação nos diagramas polares (Figura 5).

Nas geleiras de rocha de talude e de fundo de vale houve, em média, um aumento de área mais significativo, respectivamente de 7 e 13%. Esse fato pode estar diretamente relacionado com a retração de área de várias geleiras típicas desta parte da cordilheira, o que aumentaria o aporte de material detrítico em comparação com o gelo glacial, elevando assim a área das geleiras de rocha de vale.

Esse fato é corroborado pelo aumento de área de algumas geleiras de rocha, nas porções mais a montante, locais que em 1985 ainda eram ocupados pelas frentes de geleiras típicas. Estudos em outras partes da cordilheira dos Andes na Bolívia, como na Cordilheira Real (Liu et al., 2013), mostram que as geleiras típicas sofreram uma redução em sua área de 27,8 a 79,5%. Segundo Ribeiro (2007, 2013), a retração das massas gelo (exposto) é condizente com o aquecimento atmosférico regional que vem sendo observado nos últimos anos.

Condições meteorológicas revelam contribuições para a diminuição das geleiras na região. A temperatura do ar elevou-se nos últimos 70 anos entre 1°N e 23°S e a precipitação diminuiu no período 1950-1994 (Vuille et al., 2003). Eventos de El Niño e La Niña são considerados como um dos fatores para mudanças verificadas na região, com conseqüente retração das geleiras (Liu et al., 2013).

Mais recentemente, Ribeiro (2007), analisou imagens de satélites e dados cartográficos com o objetivo de estimar a variação da espessura do gelo (diferenças de volume e elevação), em sete geleiras da cordilheira Tres Cruces, no período de 29 anos (1975 e 2004). Através deste levantamento, foi possível determinar que desde o ano de 1975, as geleiras tiveram suas frentes reduzidas em todas as direções, sendo que, a retração máxima nesse período foi de 437 m (geleira Laramkkota) e a mínima de 181 m (geleira San Enrique). A partir da análise de modelos digitais, conclui-se que, a média da redução geral do volume de gelo durante o período analisado, foi de aproximadamente 1,55 m² de água ao ano. Conforme o autor aponta, essa

retração das massas de gelo da referida cordilheira é consistente com o aquecimento atmosférico regional e com a diminuição generalizada das geleiras nos Trópicos.

Considera-se que as respostas das geleiras de rocha às mudanças climáticas são tênues e tardias, em escala temporal, o que não ocorre com as geleiras típicas, que apresentam respostas em escala de 10 anos. No entanto, pesquisas identificaram sinais de degradação em geleiras de rocha em alta montanha devido ao aquecimento ocorrido no último século (Assier et al., 1996).

Quanto à localização das geleiras de rocha, observa-se que a distribuição vertical destas formas ocorre em altitudes mínimas de 4.080 m.s.n.m. e máximas de 5.310 m.s.n.m. A elevação média das geleiras de rocha de fundo de vale são maiores (4.923 m.s.n.m.) que as geleiras de rocha de talude (4.729 m.s.n.m.). Isso pode ser explicado pelo fato das geleiras de rocha de fundo de vale representarem formas remanescentes de origem glacial: as geleiras típicas estão localizadas em maiores elevações do que as geleiras de rocha. As geleiras de rocha de talude se desenvolvem em altitudes mínimas mais baixas (4.080 m.s.n.m.) e isso pode estar associado à maior disponibilidade de material ao longo das vertentes, por atividades periglaciais, que atuam como uma camada protetora, insulando a estrutura de gelo interno. A origem glacial das geleiras de fundo de vale pode ser corroborada com a identificação de cordões morânicos.

Estudo recente mostra a situação atual das geleiras tropicais dos Andes (Rabatel et al., 2013), o qual revela que geleiras com altitudes máximas acima de 5.400 m.s.n.m perderam em torno de 0,6 m eq. água a⁻¹ nos últimos 35 anos, enquanto as geleiras com altitude máxima inferior a 5.400 m.s.n.m perderam em média 1,2 m eq. água a⁻¹, quer dizer, o dobro.

Dados sobre a elevação da temperatura na cordilheira dos Andes (Vuille et al., 2003) mostram uma elevação média de 0,09-0,15°C por década, entre 1950-1994. As altitudes mais baixas na parte Oeste da cordilheira sofreram maior aquecimento, enquanto que no setor Leste o aquecimento foi mais moderado (Vuille e Bradley, 2000). O mesmo ocorreu em áreas de maior altitude.

As geleiras da área de estudo estariam, portanto, dentro da faixa onde as geleiras típicas sofreram mais perda de sua massa de gelo, criando condições assim para o desenvolvimento das geleiras de rocha de fundo de vale.

As geleiras de rocha de talude, nas quais se assume que a infiltração da água de fusão da neve

através dos depósitos é afetada pela temperatura local incidindo na fusão ou no congelamento da massa de gelo intersticial (Soto et al., 2004), também tiveram sua área aumentada.

Em relação à orientação das vertentes das feições identificadas, o predomínio é nos sentidos oeste-sudoeste-sul (53% da área total das geleiras de rocha). Essa característica indica que uma parte significativa das geleiras de rocha está exposta a maiores períodos de insolação e, teoricamente, com maior disponibilidade de material meteorizado para as geleiras de rocha, mas que podem conduzir a pouca atividade em função da exposição solar.

É comum a correlação entre orientação e elevação das geleiras de rocha em muitas áreas montanhosas (Barsch, 1977). As geleiras de rocha de fundo de vale e de talude apresentaram, no entanto, baixos índices de correlação entre essas variáveis, como foi exemplificado no diagrama polar (Figura 5). Essa ausência de correlação pode ser devido a fatores que não estejam representados por parâmetros topográficos. Isso sugere que a elevação e orientação podem estar atreladas a outras variáveis externas, tais como suprimento de material detríticos, tipo de rocha e o clima. A ausência desta correlação também foi observada em geleiras de rocha nos Estados Unidos (Sollid e Sörbel, 1992; Janke, 2007; Johnson et al., 2007). Foi sugerido pelos pesquisadores que as geleiras de rocha nessas áreas estejam acima da elevação mínima na qual as geleiras se formam.

A localização na faixa tropical faz com que a presença de geleiras de rocha não seja comum, como em outras áreas montanhosas. Segundo Francou et al. (1999), a superfície da geleira de rocha recebe grandes quantidades de energia ao longo do ano devido à intensidade da radiação e ao albedo reduzido, além da reduzida cobertura de neve. Como consequência, os processos geocronológicos das geleiras de rocha estariam relacionados ao espectro altimétrico e à distribuição de água. Ainda, segundo estes autores, como consequências, as geleiras de rocha ocorreriam geralmente entre 5.400 e 5.500 m.s.n.m., estando controladas pela topografia e pela orientação das vertentes.

A importância hídrica que as geleiras de rocha possuem torna-se cada vez mais evidente no contexto atual, onde se constata uma redução significativa das áreas de geleiras de montanhas como consequência das mudanças climáticas. A água contida dentro das geleiras de rocha, em forma de gelo, possui uma relativa proteção das variações termais da baixa atmosfera, uma vez que a camada de detritos rochosos que cobrem a

superfície dessas geleiras atua como um isolante térmico, considera-se que o gelo representa entre 40 a 60% do volume total das geleiras de rocha. Desta forma, estas geleiras tornam-se importantes reservatórios de água, sobretudo nessas regiões de clima semiárido, onde a precipitação é relativamente baixa e possui uma distribuição irregular (Millar e Westfall, 2007).

No entanto, o grau de atividade de uma geleira de rocha é difícil de ser determinado, pois é estabelecido pela combinação de várias classes de observações, sendo as mais importantes: (1) evidências da morfologia superficial e da atividade frontal; (2) quantidade de gelo na massa de detritos e a profundidade desta; (3) variação do seu movimento e volume em vertentes, verificada por meio de técnicas topográficas, aerofotogramétricas e de sensoriamento remoto; (4) temperatura dos materiais congelados (Francou et al., 1999).

Conclusões

Mediante a análise das formas, dos dados geográficos e do modelo tridimensional do terreno, foi possível mapear 64 geleiras de rocha na cordilheira Tres Cruces em três categorias: geleiras de rocha de fundo de vale (35 feições), geleiras de rocha de talude (25 feições) e geleiras de rocha inativas (4 feições). Essa classificação poderá ser ampliada ou alterada com trabalhos de campos e a utilização de imagens de satélites de maior resolução.

Através da análise das informações obtidas pelas imagens de satélite é possível observar que as geleiras de rocha identificadas obtiveram um aumento geral de área durante o intervalo de anos considerado. Porém ao agrupá-las segundo sua morfologia, as do tipo fóssil mantiveram suas áreas estáveis, sem grandes variações (-1%) durante esses 20 anos. Já nas geleiras de rocha de talude e de fundo de vale houve, em média, um aumento de área mais significativo, respectivamente 7 e 13%.

Esse fato pode estar diretamente relacionado com a retração de área de algumas geleiras típicas desta Cordilheira. Fato corroborado, pelo o aumento de área de algumas geleiras de rocha, nas porções mais a montante, locais que em 1985 ainda eram ocupados pelas frentes de geleiras típicas. Segundo Rabatel (2005), essa retração das massas gelo (exposto) é consistente com o aquecimento atmosférico regional que vem sendo observado nos últimos anos. Foi possível observar que, entre 1985 e 2005, ocorreu um aumento médio de 11% nas áreas das geleiras de rocha.

Quanto à localização das geleiras de rocha, observa-se que em relação à distribuição vertical destas formas, elas ocorrem em altitudes mínimas de 4.080 m e máximas de 5.310 m. A elevação média das geleiras de rocha de fundo de vale são maiores (4.993 m) que as geleiras de rocha de talude (4.729 m). Isso pode ser explicado se as geleiras de rocha de fundo de vale sejam remanescentes glaciais: as geleiras típicas estão localizadas em maiores elevações do que as geleiras de rocha. As geleiras de rocha de talude se desenvolvem em altitudes mínimas mais baixas (4.080m) e isso pode estar associado à maior disponibilidade de material ao longo das vertentes, por atividades periglaciais, e que atua como uma camada protetora, insulando a estrutura de gelo interna.

Em relação à orientação das vertentes das feições identificadas, o predomínio é nos sentidos oeste-sudoeste-sul (53% da área total das geleiras de rocha). Essa característica pode indicar que uma parte significativa das geleiras de rocha está mais exposta à insolação e, portanto, com maior disponibilidade de material meteorizado para as geleiras de rocha, mas que podem conduzir a pouca atividade em função da exposição solar.

As geleiras de rocha de fundo de vale e de talude apresentaram, no entanto, baixos índices de correlação entre essas variáveis, como foi evidenciado. Essa ausência de correlação pode ser devido a fatores que não estejam representados por parâmetros topográficos. Isso sugere que a elevação e orientação podem estar acopladas com outras variáveis externas, tais como suprimento de material detríticos, tipo de rocha e o clima.

A localização na faixa tropical faz com que a presença de geleiras de rocha não seja comum, como em outras áreas montanhosas. A superfície da geleira de rocha recebe grandes quantidades de energia ao longo do ano devido à intensidade da radiação e ao albedo reduzido, além da reduzida cobertura de neve. Como consequência, os processos geocronológicos das geleiras de rocha estão relacionados ao espectro altimétrico e à distribuição de água. Ainda segundo o autor, como consequências, as geleiras de rocha ocorreriam geralmente entre 5400-5500 m de altitude, estando controladas pela topografia e pela orientação das vertentes.

As geleiras de rocha da cordilheira Tres Cruces se desenvolvem nesse espectro altimétrico e a influência da altitude na variação de suas áreas foi demonstrada pelos índices de correlação. Para certificar-se da influência ou não da orientação será necessária a extração, a partir das imagens de satélites, de dados de duração da insolação.

As geleiras de fundo de vale e de talude apresentaram tendências de elevação de suas áreas de acordo com o gradiente altimétrico, mostrando uma influência geográfica em sua distribuição e dinâmica, condicionando as atividades de *permafrost* a partir de determinada faixa altitudinal. Por outro lado, a relação entre orientação das geleiras e outras variáveis, em especial, o gradiente altimétrico e área, comum em várias áreas ocupadas por geleiras de rocha no planeta, não se verificou em Tres Cruces. Esse dado pode indicar que, embora a elevação seja um dos fatores mais importantes para mudanças em áreas glaciadas em áreas montanhosas, seus efeitos são mais complexos, porque a altitude também pode influenciar padrões regionais de precipitação e temperatura.

Uma vez que as geleiras típicas nesta área estão recuando, a água contida nas geleiras de rocha é protegida pelas rochas das mudanças termais em sua superfície, o que aumenta a importância desses corpos de gelo em um cenário de diminuição dos recursos hídricos. Portanto, aumentar o conhecimento sobre estas feições, que apesar de serem pouco conhecidas no meio científico possuem grande importância, tanto como potenciais reservatórios hídricos quanto registros paleoclimáticos do planeta. Fato que se torna mais relevante por encontrar-se em ambiente tropical, onde as alterações climáticas impactam geleiras típicas e de rochas de forma mais acelerada em comparação com o ambiente glacial antártico, por exemplo, onde há uma maior estabilidade climática.

As imagens do satélite CBERS 2B são valiosas para o estudo do ambiente e da caracterização das geleiras de rocha. As imagens HRC de alta resolução espacial permitem a identificação de áreas de interesse na morfologia das geleiras de rocha, assim como, juntamente com as imagens da série temporal do satélite Landsat permitem a quantificação, o mapeamento e a detecção de mudanças no ambiente glacial. O reinício da aquisição de dados pelo novo satélite CBERS (*China-Brazil Earth Resources Satellite*) 4A possibilitará a continuidade dos estudos comparativos usando a resolução espacial proporcionada pelo sensor. A seleção do sensor CBERS demonstrou-se mais adequado para o estudo das geleiras de rocha do que a Landsat devido a resolução espacial do sensor escolhido, entretanto a qualidade espectral das imagens Landsat 8 possibilitará também o desenvolvimento de metodologias de investigação da dinâmica temporal deste ambiente.

Considerando a potencialidade e necessidade de aprofundar pesquisas sobre as geleiras de rochas da cordilheira Tres Cruces sugere-se os seguintes estudos a serem realizados: (a) estudo sobre o volume e a potencialidade hídricas das geleiras de rocha; (b) monitoramento da velocidade de fluxo das geleiras de rocha; (c) refinar técnicas de geoprocessamento na identificação e classificação das geleiras de rochas.

Agradecimentos

Esse trabalho teve apoio do CNPq (Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) – projeto CNPq 480409/2008.0. Processamento e análise das imagens foram realizadas no Centro Polar e Climático/UFRGS – Instituto Nacional da Criosfera.

Referências

- Ackert, R.P. Jr., 1998. A rock glacier debris covered glacier system at Galena Creek, Absaroka Mountains, Wyoming. *Geografiska Annaler* 80, 267-276.
- Assier, A., Fabre, D., Evin, M., 1996. Propection e électrique sur les glaciers rocheux du cirque de Ste-Anne (Queyras, Alpes du Sud, France). *Permafrost and Periglacial Processes* 7, 53-67.
- Barsch, D., 1971. Rock glaciers and ice-cored moraines. *Geografiska Annaler* 53, 203-206.
- Barsch, D., 1977. Nature and importance of mass wasting by rock glaciers in alpine permafrost environments. *Earth Surface Processes* 2, 231-245.
- Barsch, D., 1988. Rock glaciers, in: Clark, M.J. (Ed.), *Advanced in Periglacial Geomorphology*. Willey, Chichester, pp. 69-90.
- Brenning, A., 2005. Geomorphological, hydrological, and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35 S). *Permafrost and Periglacial Processes* 16, 231-240.
- Brenning, A., Grasser, M., Friend, D.A., 2007. Statistical estimation and generalized additive modeling of rock glacier distribution in the San Juan Mountains, Colorado, USA. *Journal of Geophysical Research* 112. DOI: 10.1029/2006JF000528.
- Clark, D.H., Steig, C.J., Potter Jr., N., Gillsepie, A.R., 1998. Genetic variability of rock glaciers. *Geografiska Annaler* 80, 175-182.
- De Matías, J., De Sanjosé, J.J., López-Nicolás, G., Sagüés, C., Guerrero, J.J., 2009. Photogrammetric Methodology for the Production of Geomorphologic Maps: Application to the Veleta Rock Glacier (Sierra Nevada, Granada, Spain). *Remote Sensing* 1, 829-841.
- Francou, B., Fabre, D., Pouyaud, B., Jomelli, V., Arnaud, Y., 1999. Symptoms of Degradation in a Tropical Rock Glacier, Bolivian Andes. *Permafrost and Periglacial Processes* 10, 91-100.
- Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B., Mendoza, J., 2000. Glacier evolution in the tropical Andes during the last decades of the 20th century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador. *Ambio* 29, 416-422.
- Humlum, O., 1982. Rock glacier types of Disko, central west Greenland. *Norsk Geografisk Tidsskrift* 82, 59-66.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012. Câmeras Imageadoras CBERS-1, 2 e 2B. Disponível: http://www.cbbers.inpe.br/sobre_satelite/camera_s_imageadoras_cbbers1e2e2b.php. Acesso: 07 maio 2012.
- Janke, J.R., 2007. Colorado Front Range rock glacier: distribution and topographic characteristics. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 39, 74-83.
- Johnson, B.G., Thackray, G.D., Van Kirk, R., 2007. The effect of topography, latitude and lithology on rock glacier distribution in the Lemhi range, central Idaho, USA. *Geomorphology* 91, 38-50.
- Liu, T., Kinouchi, T., Ledezma, F., 2013. Characterization of recent glacier decline in the Cordillera Real by LANDSAT, ALOS, and ASTER data. *Remote Sensing of Environment* 137, 158-172.
- Messerli, B., 2001. The International Year of Mountains (IYM), the Mountain Research Initiative (MRI) and PAGES. *Editorial, Pages News* 9, 2.
- Millar, C.I., Westfall, R.D., 2007. Rock glaciers and related periglacial landforms in the Sierra Nevada, CA, USA; inventory, distribution and climatic relationships. *Quaternary International* 188, 90-104. DOI: 10.1016/j.quaint.2007.06.004.
- Mohamed, H.A., 2003. Discrimination of rock glaciers on Nevado Sajama, Bolivia, using remote sensing. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 35, 259.
- Payne, D., 1998. Climatic implications of rock glaciers in the arid Western Cordillera of the Central Andes. *Glacial and Geomorphology*

- rp03. Disponível: <http://ggg.qub.ac.uk/ggg>. Acesso: 08 out. 2014.
- Rabatel, A., 2005. Chronologie et interpretation paléoclimatique des fluctuations des glaciers dans les Andes de Bolivie (16°S) depuis le maximum du Petit Age Glaciaire (17ème siècle). Tese (doutorado). Grenoble.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Caceres, B., Ceballos, J.L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., Ginot, P., Maisincho, L., Mendoza, J., Menénegoz, M., Ramirez, E., Ribstein, P., Suarez, W., Villacis, M., Wagnon, P., 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere* 7, 81-102.
- Ribeiro, R.R., 2007. Determinação das variações das geleiras da Cordilheira Tres Cruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre, UFRGS.
- Ribeiro, R.R., Ramirez, E., Simões, J.C., Machaca, A., 2013. 46 years of environmental records from the Nevado Illimani glacier croup, Bolivia, using digital photogrammetry. *Annals of Glaciology* 54, 272-278.
- Rignot, E., Hallet, B., Fountain, A., 2002. Rock glacier surface motion in Beacon Valley, Antarctica, from synthetic-aperture radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 29, 1607.
- Roer, I., Kääb, A., Dikau, R., 2005. Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. *Zeitschrift für Geomorphologie* 49, 73-87.
- Ronchail, J., Cochonneau, G., Molinier, M., 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.
- Seligman, z., 2009. Rock Glacier Distribution, Activity and Movement, Northern Absaroka and Beartooth Ranges, MT, USA. Dissertação (Mestrado). Missoula, The University of Montana.
- Solid, J., Sörbel, L., 1992. Rock glaciers in Svalbard and Norway. *Permafrost and Periglacial Processes* 3, 215-220.
- Soto, M.V.S., Ferrando, F.J.A., Vieira, R., 2002. Características Geomorfológicas de un sistema de glaciares rocosos y de su cuenca de sustentación en Chile semi-árido. *Revista Investigaciones Geográficas* 36, 1-16.
- Vuille, M., Bradley, R.S., 2000. Mean annual temperature trends and their vertical structure in the Tropical Andes. *Geophysical Research Letters* 27, 3885-3888.
- Vuille, M., Bradley, R.S., Werner, M., Keimig, F., 2003. 20th century climate change in the tropical Andes: Observations and model results. *Climatic Change* 59, 75-99.
- Wahrhaftig, C., Cox, A., 1959. Rock glaciers in the Alaska Range. *Geological Society of America Bulletin* 70, 383-436.
- Washburn, A.L., 1979. *Geocryology*. Edward Arnold, London.
- Whalley, W.B., Martin, H.E., 1992. Rock Glaciers II Models and Mechanisms. *Progress in Physical Geography* 16, 127-186.