Mapeamento das geleiras de rocha com o uso de imagens satelitais e geoprocessamento, Cordilheira Tres Cruces, Bolívia

Guilherme Joaquim[3]
Rosemary Vieira[1,2]
Kátia Kellem da Rosa[1]
Jefferson Cardia Simões[1]

Centro Polar e Climático – INCT da Criosfera[1]
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
90450-090 - Porto Alegre - RS, Brasil
katiakellem@gmail.com
jefferson.simoes@ufrgs.br

Universidade Federal Fluminense – Campus de Campos de Goytacazes[2]
Rua José do Patrocínio, 71, Campos de Goytacazes, 28010-385, RJ, Brasil
rosenupac@yahoo.com.br

Departamento de Geografia[3]
Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
90450-090 - Porto Alegre - RS, Brasil
gjoaquim@gmail.com

Abstract. The semi-arid Andean is considered one of the regions where there is highest concentration of rock glaciers in the world. In this context, this study presents the first mapping of these morphological features through Remote Sensing and GIS applications in the Cordillera Tres Cruces, Bolivia (between 16 º 44 ' - 17 º 04' S and 67º 16' - 67º 33' W). Altogether 64 rock glaciers were identified, and they were classified according to their morphology as valley rock glaciers (35 features); slope glaciers rock (25 features) and fossil rock glaciers (4 features). With the analysis of digital elevation model and satellite imagery of the area of study for the period 1985-2005, it was possible to characterize them by the geometrical and topographical features. The areas of the rock glaciers showed an average increase of 11% during the analysed period, totaling 13.9 km^2 in 2005. Of these, 11.5 km^2 (82.5%) corresponds to the valley rock glaciers, 2.07 km^2 (15%) slope rock glaciers and 0.36 km^2 (2.5%) to fossil rock glaciers. The altitudinal range of occurrence of rock glaciers ranges from 4080 m to 5310m, and the orientation of the slopes is predominantly west-southwest- south, reflecting the topographic position and periglacial processes.

Palavras-chave: remote sensing, rock glaciers, glacial goemorphology, sensoriamento remoto, geleira de rocha, geomorfologia glacial.

1. 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 não-glacial, e os derivados de morainas (origem glacial).

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 elevadas latitudes e em regiões de alta montanha (Brenning, 2005).

Embora haja uma relativa notoriedade da presença destas formas de relevo de mesoescala ao longo da cordilheira dos Andes, e mesmo reconhecendo o potencial hídrico destes corpos de gelo, ainda não há estudos realizados sobre a quantificação, classificação e verificação da distribuição das geleiras de rocha na região andina boliviana.

O presente trabalho tem como objetivo principal identificar, mapear e classificar a morfologia das geleiras de rocha na cordilheira Tres Cruces, Bolívia, através da utilização de ferramentas de Sensoriamento Remoto e geoprocessamento.

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 16º 44' - 17º 04' de latitude sul e 67º 16' - 67º 33' de longitude oeste. (Figura 1). Caracteriza-se por altitudes que variam entre 4.800 m a 5.700 m. e sua extensão é de aproximadamente 35 km de comprimento por 10 km de largura (Fig.1).

Segundo Ribeiro (2007), a morfologia atual da região é marcada por diversos grupos de morainas. Como demonstram os estudos paleoclimáticos realizados por Rabatel (2005); em diversos sítios desta cordilheira, foi possível identificar o impacto das variações climáticas nas geleiras, desde a Pequena Idade do Gelo (máxima extensão glacial), em meados do século XVII, até o final do século XX.

A retração contínua das geleiras teve início a partir da primeira metade do século XVIII e, neste período, o processo de recuo estava associado à redução da precipitação. Observa-se que, na máxima extensão das geleiras, as precipitações eram cerca de 30% maiores que atualmente, além da temperatura do ar aproximadamente 0,6°C mais baixa (Rabatel, 2005).

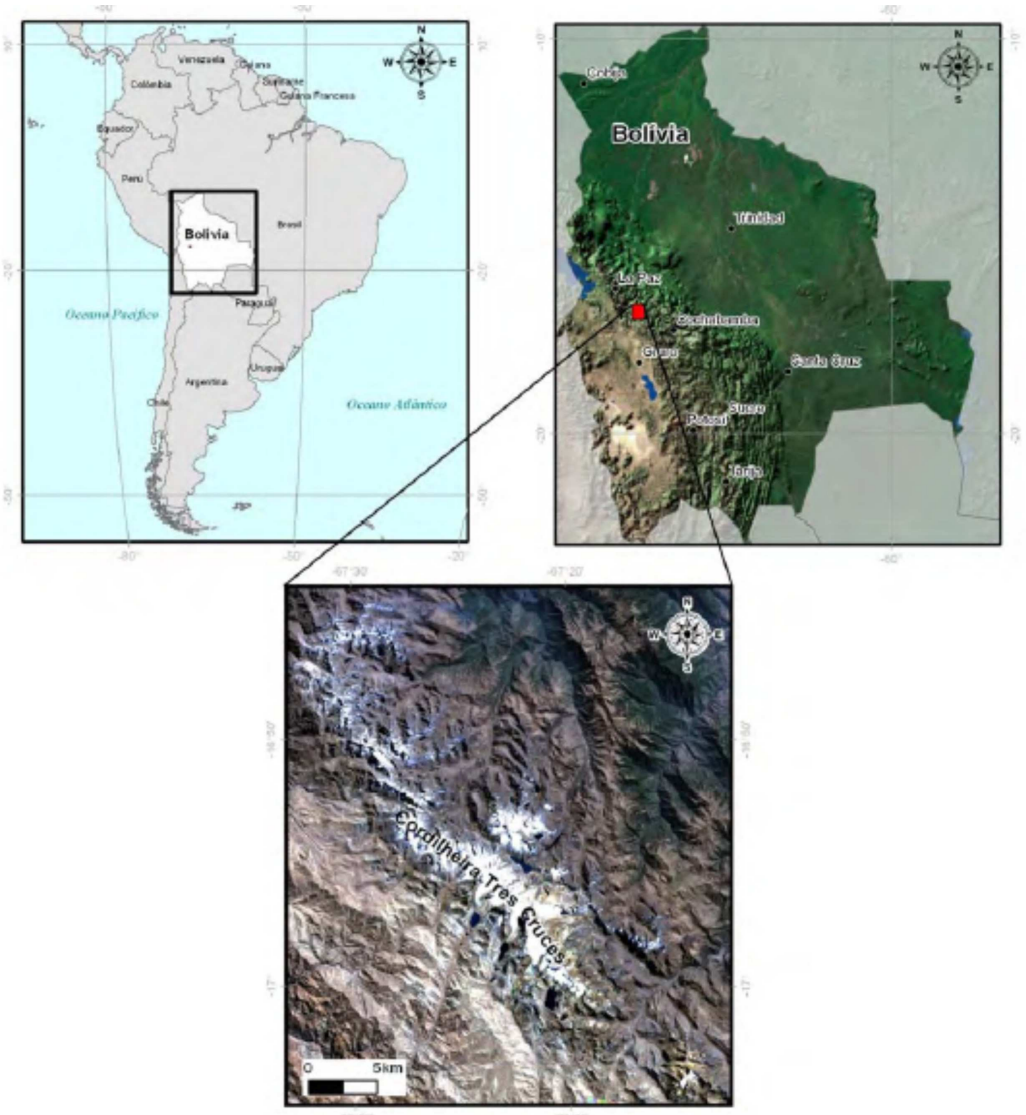


Figura 1 – Localização da área de estudo

2. Metodologia de trabalho

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

Para realizar a análise dos dados espaciais da área de estudo, foram utilizados os seguintes aplicativos computacionais: (1) ArcGis 9.3, 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 na fusão das imagens Landsat e CBERS.

Foram utilizadas imagens 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, considerando a sua elevada resolução espacial de 2,7m.

Para a elaboração do 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*).

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 a 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 ortorretificada pela NASA.

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.

Através do Modelo Digital de Elevação (MDE) foram extraídos dados de altitude e da Rede Irregular Triangular (TIN) foram extraídos os dados de orientação e declividade das vertentes.

Para realizar a identificação e vetorização das geleiras de rocha na área de estudo, foram utilizadas as imagens Landsat-5 TM dos anos de 1985 e 2005. Empregou-se também como apoio as imagens fusionadas com a cena do sensor HRC do satélite CBERS. De posse das imagens TM já compostas em bandas (3, 2, 1) a vetorização manual foi efetuada, primeiro para o ano de 1985 e após para 2005.

As geleiras de rocha foram vetorizadas em formato poligonal, além dos corpos d´água e morainas, em formato linear.

Foi realizado posteriormente 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.

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 fóssil. Esta classificação adotada foi baseada nos estudos realizados no setor norte chileno da cordilheira dos Andes por Soto *et al.* (2004) e pela utilização do modelo tridimensional da área de estudo.

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.

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.

As geleiras do tipo fóssil 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.

Na sequência é apresentado um fluxograma com as etapas descritas acima de forma mais detalhada (Fig. 2).

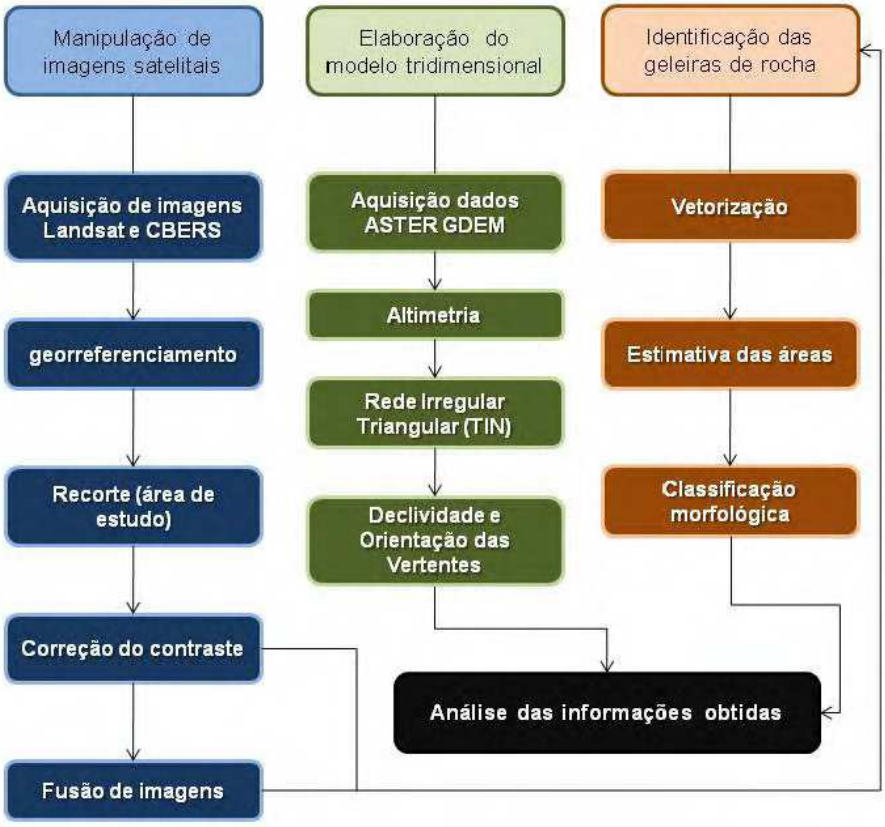


Figura 2 – Organograma descritivo do método utilizado no trabalho.

3. 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 km^2, e em 2005 observou-se um acréscimo na soma das áreas de aproximadamente 11% (Figs. 3 e 4a).

Com relação à área ocupada, as geleiras de fundo de vale correspondiam, em 1985, a 10,01 km^2 (81,5% das áreas totais) e em 2005, a 11,5 km^2 (82,5% das áreas totais). As geleiras de talude, em 1985 somavam 1,92 km^2 (15,6% das áreas totais) e em 2005, 2,07 km^2 (15% das áreas totais). As geleiras do tipo fóssil diminuíram em área, de 0,36 km^2 (2,9% das áreas totais), em 1985 para 0,35 km^2 (2,5% das áreas totais) em 2005.

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 fóssil (Fig. 3 e Fig. 4b).

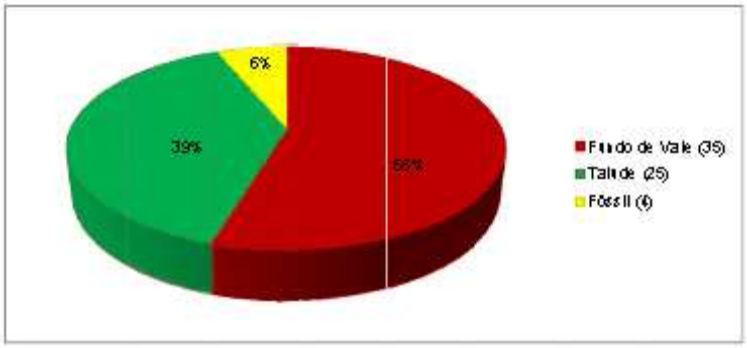
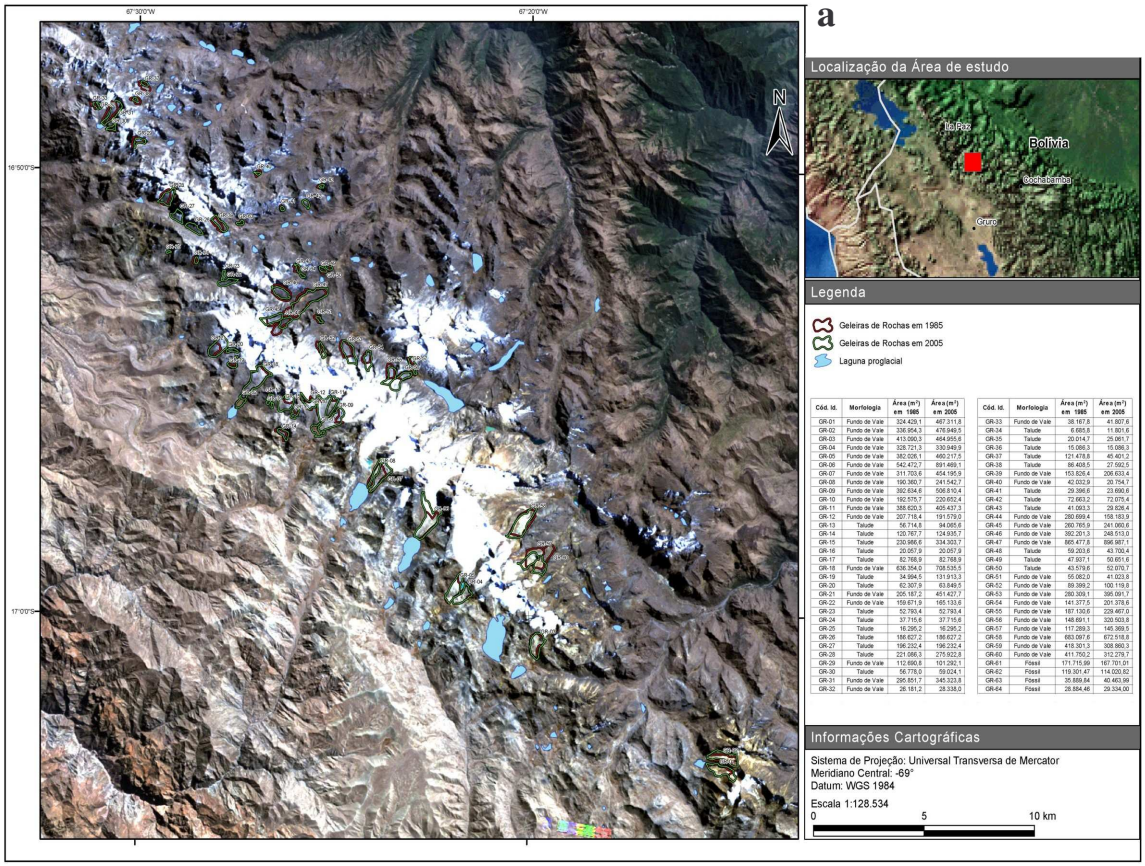


Figura 3 – Distribuição das geleiras de rocha segundo a morfologia.

As geleiras de rocha do tipo fundo de vale possuem altitudes que variam de 4.470 m a 5.310 m, sendo a altitude geral média de 4.922 m. As do tipo talude possuem altitudes mínimas e máximas de 4.080 m e 5.280 m respectivamente, e a altitude geral média de 4.728 m. Por último, as altitudes do tipo fóssil variam de 4.530 m a 4.800 m, e a altitude média 4.641 m (Fig. 5).



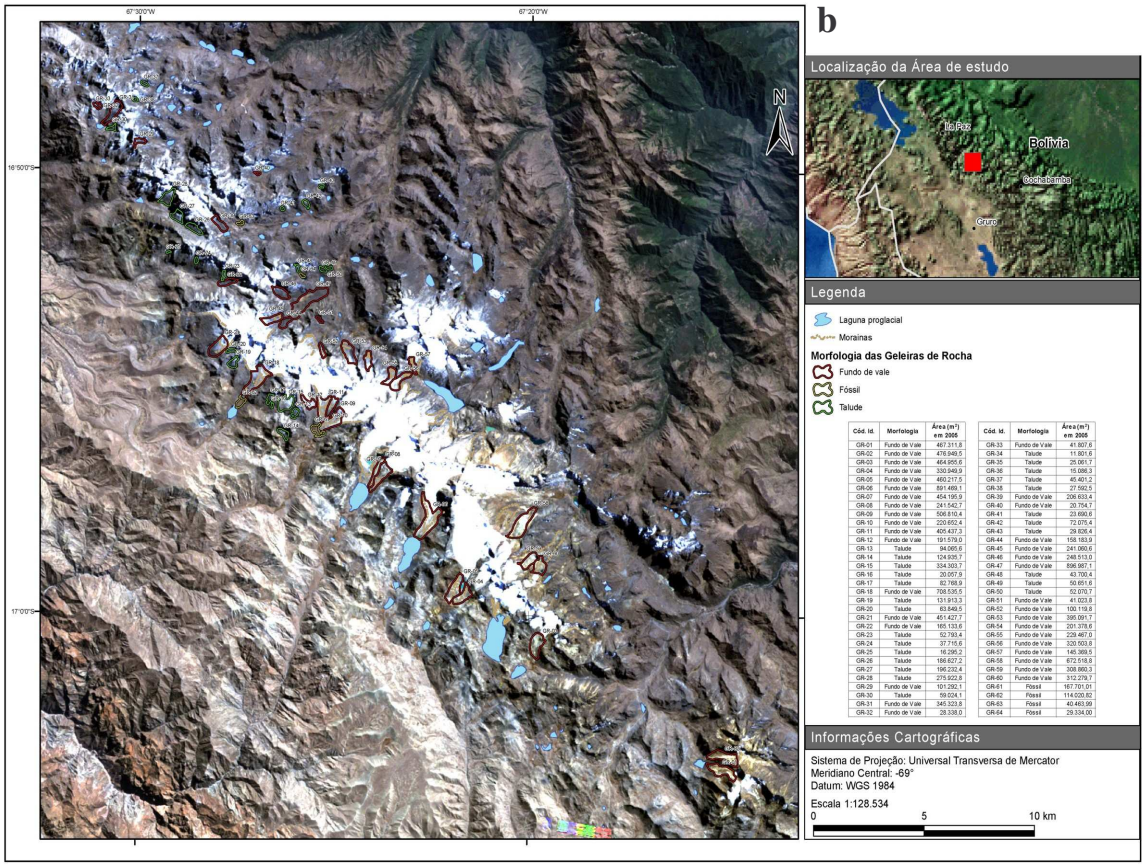


Figura 4 – Mapa de localização das geleiras de rocha em 1985 e 2005 (a). Mapa de classificação morfológica das geleiras de rocha (b).

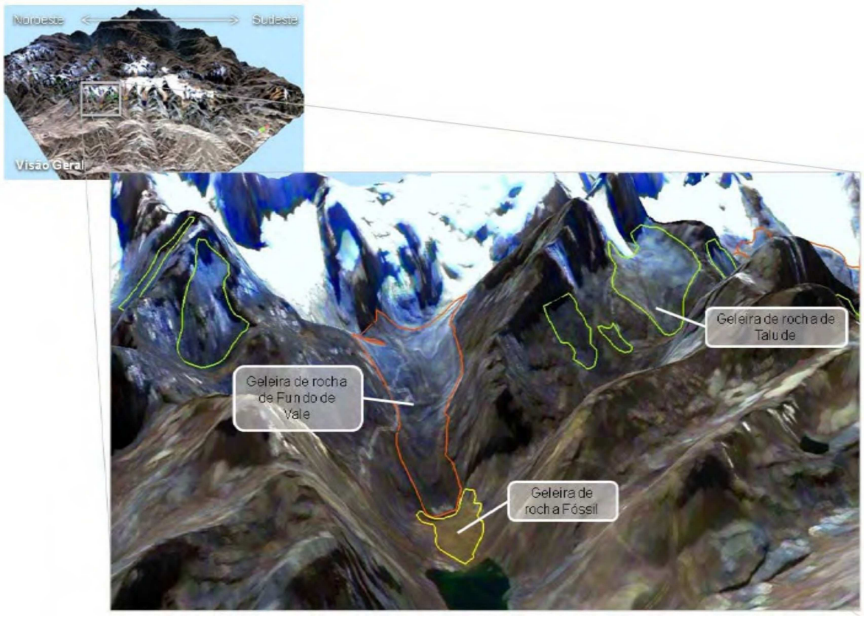


Figura 5 – Exemplos de localização de geleiras de rocha no modelo tridimensional da área de estudo.

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 de 7 e 13%. Esse fato pode estar diretamente relacionado com a retração de área de algumas geleiras típicas desta cordilheira. Fato 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. Segundo Ribeiro (2007), essa retração das massas gelo (exposto) é condizente com o aquecimento atmosférico regional que vem sendo observado nos últimos anos.

Quanto à localização das geleiras de rocha, observa-se que a distribuição vertical destas formas ocorre 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 (4.923 m) que as geleiras de rocha de talude (4.729 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 (4.080m) e isso pode estar associado à maior disponibilidade de material ao longo das vertentes, por atividades periglaciais, que atua 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 morâinicos.

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 o autor, como consequências, as geleiras de rocha ocorreriam geralmente entre 5.400 e 5.500 m de altitude, estando controladas pela topografia e pela orientação das vertentes.

4. Conclusões

Pode ser observado que a utilização de dados obtidos através do Sensoriamento Remoto, apesar de não substituir levantamentos realizados *in loco*, mostrou-se como uma alternativa efetiva na identificação indireta das geleiras de rocha. Além disso, apresentou-se como uma ferramenta de grande potencial na extração de informações geográficas através da integração dos dados em um SIG, como altitude, declividade e orientação das vertentes. 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 fóssil (4 feições). Obviamente essa classificação poderá ser ampliada ou alterada com trabalhos de campos e a utilização de imagens de satélites de maior resolução.

Espera-se que futuramente os dados obtidos nesse estudo possam integrar outras formas de publicações científicas, com o intuito de dar maior visibilidade e consequentemente inspirar mais pesquisas científicas sobre o assunto, e assim 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.

Agredecimentos

Esse trabalho é apoiado pelo CNPq (Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) - projeto CNPq 480409/2008.0. O processamento e análise das imagens foram realizadas no CPC (Centro Polar e Climático – INCT da Criosfera.

Citações e Referências

Brenning, A., **Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of central Chile: combining statistical modelling and field mapping**. 137 p. 2005. Tese (doutorado). Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlin. 2005.

Francou, B.; Fabre, D.; Pouyaud, B.; Jomelli, V.; Arnaud, Y. Symptoms of Degradation in a Tropical Rock Glacier, Bolivian Andes. **Permafrost and Periglacial Processes**, 10, p. 91-100. 1999.

Payne, D., 1998. **Climatic implications of rock glaciers in the arid Western Cordillera of the Central Andes. Glacial and Geomorphology**, rp03. Disponível em (http://ggg.qub.ac.uk/ggg). Acessado em 12 mar. 2008.

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

Ribeiro, R.R. **Determinação das variações das geleiras da Cordilheira Tres Cruces (Bolívia) entre 1975-2004 pela análise de imagens digitais e dados cartográficos**. Porto Alegre: UFRGS, 2007. 92 p Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

Soto, M.V.S.; Ferrando, F.J.A.; Vieira, R. Características Geomorfológicas de un sistema de glaciares rocosos y de su cuenca de sustentación en Chile semi-árido. **Revista Investigaciones Geográficas**, Santiago, 36, p. 1-16. 2004.

Simpósio Brasileiro de
Sensoriamento Remoto
XV SBSR
30 de abril a 05 de maio de 2011
Curitiba - PR
Estação Convention Center
ANAIS
Proceedings
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Secretaria do XV SBSR
Tel.: (12) 3208-6932 / 6450 / 6494
Fax: (12) 3208-6460 / 6449
E-mail: sbsr@dsr.inpe.br
http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011