

Identificação de geformas glaciais com o uso de imagens LANDSAT-7 ETM+ – Costa de fiordes da Patagônia Central, Chile

Rosemary Vieira¹

Núcleo de Pesquisas Antárticas e Climáticas - NUPAC IGEO/UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500, prédio 43136, salas 208 e 210
Porto Alegre – RS – Brasil
Cep. 91501-970
rosemary.vieira@ufrgs.br

Abstract. This work presents geomorphologic features visually identified and interpreted from Landsat 7 ETM+, of Penguin and Peel fjords adjacent subaerial zones, in the fjord coast of central Patagonia, Chile. Geomorphologic maps are made based on visual interpretation and 3D diagrams were elaborated by the combination of elevation data and satellite image, thus allowing better visualization. The glaciers retreat has produced modern geomorphologic surfaces such as moraines, glacier lineaments, drumlins, proglacial lakes, etc. The surficial distribution of subaerial glacial deposits shows evidences of topographic control on the glacier flow line and possible warm thermal basal conditions of the glaciers, such as drumlins fields, observed at the northern distal shoreline of Penguin fjord. The localizations of several kind of deposits and erosional features shows that many of glaciers which, nowadays, are confined in their valleys, possibly ranging over the fjords and still contribute the fjord basins with sediment through glaciofluvial flows.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, geomorphology, Chile, sensoriamento remoto, processamento de imagens, geomorfologia, Chile.

1. Introdução

Gelo é comumente encontrado em áreas remotas e as difíceis condições climáticas e de acessibilidade inerentes dessas áreas dificultam os estudos da criosfera diretamente. Por isso, a criosfera é um ramo científico no qual sistemas de sensoriamento contribuem significativamente como ferramenta científica (Bindschadler et al. 2001). Variações súbitas na topografia e no albedo produzem mudanças no brilho da imagem.

A deglaciação inevitavelmente produz respostas geomórficas na paisagem, pois atividades não glaciais, também conhecidas como paraglaciais (Curry e Ballantyne, 1992; Ballantyne, 2002), atuam quase que imediatamente no (re) trabalho dos sedimentos glacialígenicos mediante processos fluviais e de fluxos de detritos (Ballantyne, 2002).

Nas costas de fiordes da Patagônia norte e central, Chile, imagens de satélite do tipo Landsat ETM+ possibilitam identificar as geformas recentes de deglaciação nas zonas das cabeceiras e nos vales de fiordes (Glasser et al. 2005; Vieira, 2006).

A inacessibilidade de muitas das áreas glaciais e recém-deglaciadas dificultam a visão compreensiva da extensão da variação das geleiras usando métodos tradicionais de campo. Portanto, a construção de mapas geomorfológicos detalhados consome demasiado tempo, especialmente em áreas como as da costa de fiordes adjacente ao campo de gelo Patagônico Sul (CGPS), por sua topografia acidentada e densa vegetação.

Morainas preservadas e outras feições geomorfológicas marcam as extensões máximas das geleiras. Nas zonas adjacentes aos campos de gelo Norte e Sul as áreas recentemente deglaciadas exibem geformas ainda não afetadas definitivamente por atividades

paraglaciais e essas são identificadas pela combinação de bandas de imagens ETM+. O objetivo deste trabalho é mostrar as geoformas glaciais nas zonas de deglaciação do campo de gelo Patagônico Sul, junto às cabeceiras e aos vales de fiordes por meio de mapeamento geomorfológico, baseado na interpretação de dados de sensoriamento remoto. São produzidos também diagramas 3D de algumas áreas selecionadas para melhor visualização das feições geomorfológicas.

2. Área de estudo

A área de estudo cobre parte do domínio interno da costa de fiordes chilena, na Patagônia Central. Foram selecionadas duas áreas: fiorde Penguin e o sistema de fiordes Peel, que inclui também os fiordes Calvo e Amalia. As cabeceiras dos fiordes nessa zona são alimentadas por geleiras de maré que fluem do CGPS (Fig. 1).

O CGPS é o maior em zonas temperadas no hemisfério sul e a segunda maior massa de gelo no hemisfério depois da Antártica, com área em torno de 13.000 km² (Casassa et al. 2000). As geleiras se deslocam da cordilheira dos Andes para Este e Oeste, geralmente terminando com frentes desprendentes (*calving fronts*) em lagos (Leste) e em fiordes (Oeste) (Aniya et al. 1997; Cassasa et al. 2000).

O CGPS conecta-se com o oceano Pacífico através de uma complexa rede de canais e fiordes que. Essa rede de fiordes e canais adjacentes ao CGPS se estende aproximadamente desde 48° S (ao sul del golfo de Penas) até 52° S (ao norte do estreito de Magalhães).

Atualmente, retração generalizada é observada em 42 geleiras do CGPS (Aniya et al. 1997), enquanto quatro geleiras estavam em equilíbrio entre 1944 e 1986, duas avançaram no mesmo período (Pío XI e Moreno).

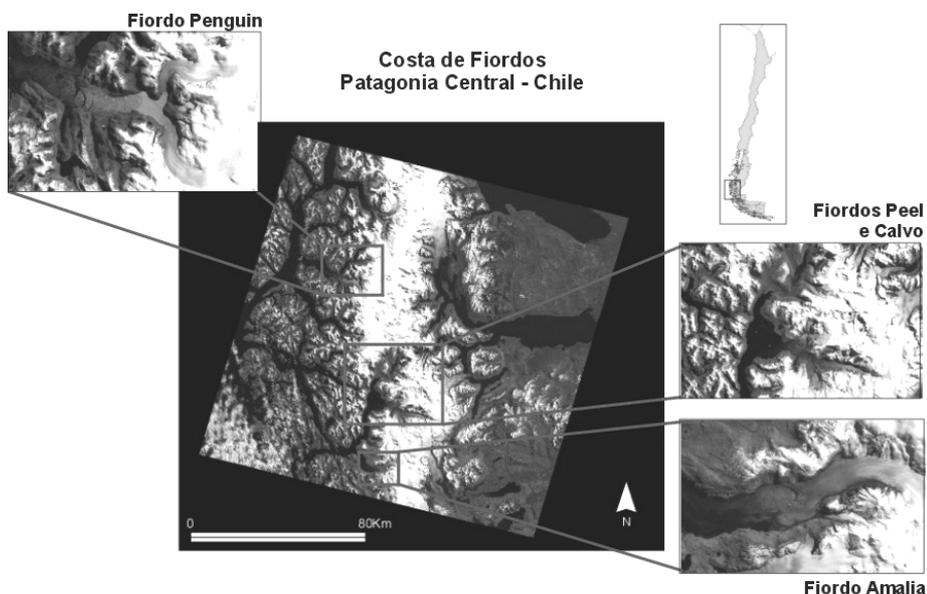


Figura 1 – Localização da área de estudo

3. Materiais e Métodos

Para esse estudo, foram obtidos os dados do sensor de alta resolução espectral *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo do satélite LANDSAT-7. A imagem possui resolução espacial de 30 m e sete bandas espectrais, adquiridas em 14-10-2001 (*Row*: 095; *Path*: 231; coordenadas centrais: Lat. -50.2836630°, Long. -73.4431891°).

A imagem original LANDSAT-7 ETM+ está georeferenciada sob o sistema de coordenada UTM / WGS 84. O programa ERDAS IMAGINE 8.7 foi utilizado para (re) amostragem e retificação geométrica da imagem. Um mínimo de 20 pontos de controle (GCPs) foram coletados de feições identificáveis em mapas de 1:50.000 (fiorde Penguin) e 1:70.000 (fiorde Peel) do *Instituto Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile* (SHOA), com transformação polinomial de primeiro-grau e (re) amostragem do vizinho mais próximo (*nearest neighbour resampling*). O erro RMS (*Root-Mean Square*) foi de 30 *pixels*.

Embora a Patagônia Central seja uma área de elevada umidade e nebulosidade, a imagem está livre de cobertura de nuvens. Para a interpretação da geomorfologia glacial foi utilizada a combinação de bandas 1, 4 e 5, de resolução espacial de 30 m. Essa combinação provê melhor contraste entre gelo, rocha e vegetação, possibilitando desta maneira boa cobertura da área subaérea em torno do campo de gelo e dos fiordes (Glasser et al. (2005). Além disso, nessas áreas os processos de denudação não atuaram ainda efetivamente sobre as geoformas devido aos recentes processos de deglaciação. A identificação das geoformas e seu mapeamento foram baseadas em Glasser e Jansson (2005), Glasser et al. (2005), Smith et al. (2006) e em Gustavsson et al. (2006). As geoformas glaciais identificadas nas imagens foram digitalizadas em tela com o *software* ARCVIEW 3.2.

Utilizando o *software* GLOBAL MAPPER 6 foi possível criar diagramas em 3D reproduzindo parte da morfologia subaérea. A interpolação e elaboração de dados de elevação foram feitas mediante o método Topogrid do *software* ArcInfo 8.0.2.

4. Resultados

Geleiras de maré que fluem do CGPS ocupam as cabeceiras dos fiordes na área de estudo (Figura 1), estando a maioria confinada dentro dos vales.

Para a cabeceira do fiorde Penguin, que está dividida em dois braços, fluem pelo menos duas geleiras (Figuras 1, 2 e 5). O mesmo ocorre nas cabeceiras do fiorde Peel (Fig. 3).

Com relação ao fiorde Calvo, parte da geleira de mesmo nome desce diretamente para o fiorde na forma de cascata de gelo, enquanto várias outras geleiras drenam o campo de gelo através de suas paredes laterais (Figuras 1 e 3).

Algumas das geleiras de vale que alcançam as cabeceiras do fiorde Peel e a geleira Amalia são cobertas em extensões variadas por detritos supraglaciais, os quais apresentam as mesmas características espectrais das áreas adjacentes. O delineamento das áreas cobertas por detritos foi feito manualmente. Os limites das línguas de gelo cobertas podem ser formados por uma moraina lateral ou pelas paredes laterais dos vales, porém essas não foram discriminadas nesse trabalho (Figuras 2 e 3).

Diversas geoformas são observadas nas zonas proglaciais subaéreas, refletindo as flutuações das geleiras, possivelmente durante o Holoceno. Foram identificados alguns tipos principais de geoformas glaciais (Figuras 2 e 3).

Drumlin – geoforma linear, oval formada abaixo do manto de gelo e orientada na direção do fluxo da geleira.

Lineamentos glaciais – geralmente tendem a ser paralelos a direção do fluxo da geleira. Formados sobre a rocha por erosão glacial ou por acumulação de sedimentos.

Cordões morânicos – formados paralelamente a margem do gelo.

Morainas terminais – geoforma proeminente, localizada transversalmente no vale, com relevo positivo. Pode ser linear, curva ou sinuosa.

Morainas laterais – localizadas ao longo das laterais das geleiras de vale.

Lagoas proglaciais – podem ser represadas por morainas (*moraine-dammed lake*), pelo gelo glacial (*ice-dammed lake*) ou ainda distribuídas ao longo do vale glacial (*Paternoster Lakes*).

Superfícies de abrasão – produzida pela ação abrasiva do sedimento carregado pela geleira sobre a superfície da rocha.

Morainas frontais são encontradas nas zonas proglaciais das atuais geleiras de base terrestre, ao longo dos vales circundantes dos fiordes e também em pontos onde não existem línguas glaciais. Grande parte dos arcos morânicos identificados já possuem cobertura vegetal, o que pode representar uma antiguidade desses depósitos ou também uma resposta à elevada umidade na costa de fiordes. Os cordões morânicos, muitos deles separados por lagoas proglaciais, se estendem em alguns pontos por mais de 5 km da linha de costa até as partes frontais das geleiras (Figuras 2, 3 e 7). Por outro lado, o fluxo contínuo de sedimentos das geleiras tributárias que sofreram retração desenvolveu zonas fluviais e fluviodeltáicas, como as identificadas na Figura 3 e Figura 6.

Campos de *drumlins* são observados principalmente na margem norte do fiorde Penguin, em sua parte distal, ocupando uma área aproximada de 17 km², e com cerca de 7 km de extensão da linha de costa até o arco morânico (Figura 2 e Figura 4). Pela localização do campo de *drumlins* infere-se um fluxo do norte, possivelmente de base termal úmida, coalescente nesse setor do fiorde. Tal inferência baseia-se no consenso de que geoformas como *drumlins* e *flutes* são indicativos das condições basais e da direção do fluxo da geleira (Kleman, 1994).

Extensas áreas com lineamentos glaciais sobre superfícies rochosas são visíveis nas imagens de satélite, e estão concentradas ao longo do eixo dos fiordes principais e tributários. Tais feições geomorfológicas são geralmente associadas aos processos de abrasão das rochas e estão alinhadas com a rota das descargas mais importantes do gelo. Os exemplos mais notáveis são vistos nos fiordes Peel e Calvo. A direção desses alinhamentos e a localização dos depósitos morânicos na Figura 3 indicam que o fluxo de gelo convergia para a baía Chubretovich.

Frente às geleiras que são drenadas para as cabeceiras dos fiordes, Penguin, Peel e Calvo se formam os *sikussaks*, uma massa aparentemente sólida de *icebergs*, *berg bits* e de gelo marinho (Syvitski et al. 1996) (Figuras 2 e 3; Figura 5).

Os *sikussaks* parecem formar-se onde as irregularidades topográficas do fiorde (*pinning points*) os *sills* submarinos capturam os *icebergs* desprendidos das geleiras, dificultando dessa maneira a circulação deles ao longo dos fiordes e alterando o padrão de sedimentação. O fiorde Calvo, devido a sua configuração e a confluência de muitas geleiras é dominado em quase toda sua extensão por *sikussaks*. Por outro lado, a cabeceira do fiorde Amalia se diferencia dos outros pela presença de atividade subglacial, identificada mediante as plumas de água de fusão no setor sul da parte frontal da geleira (Figura 3 e Figura 8).

Figura 2. Mapa geomorfológico da área de entorno do fiorde Penguin. O retângulo e o quadrado correspondem às Figuras 4 e 5, respectivamente.

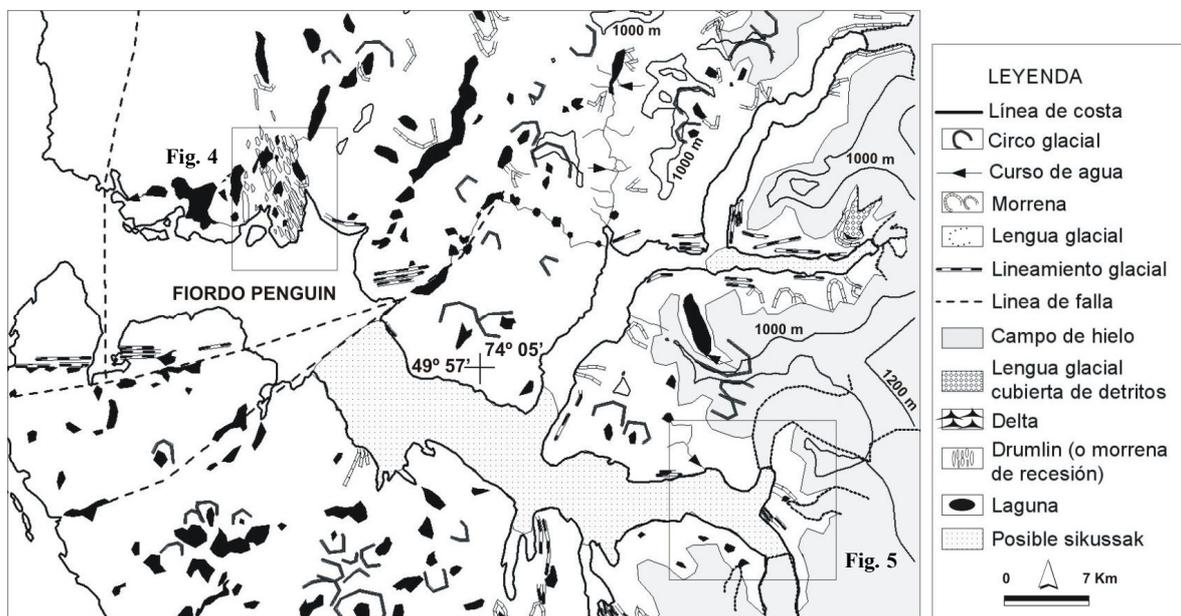


Figura 3. Mapa geomorfológico da área de entorno do fiordo Peel. Os quadrado correspondem às Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

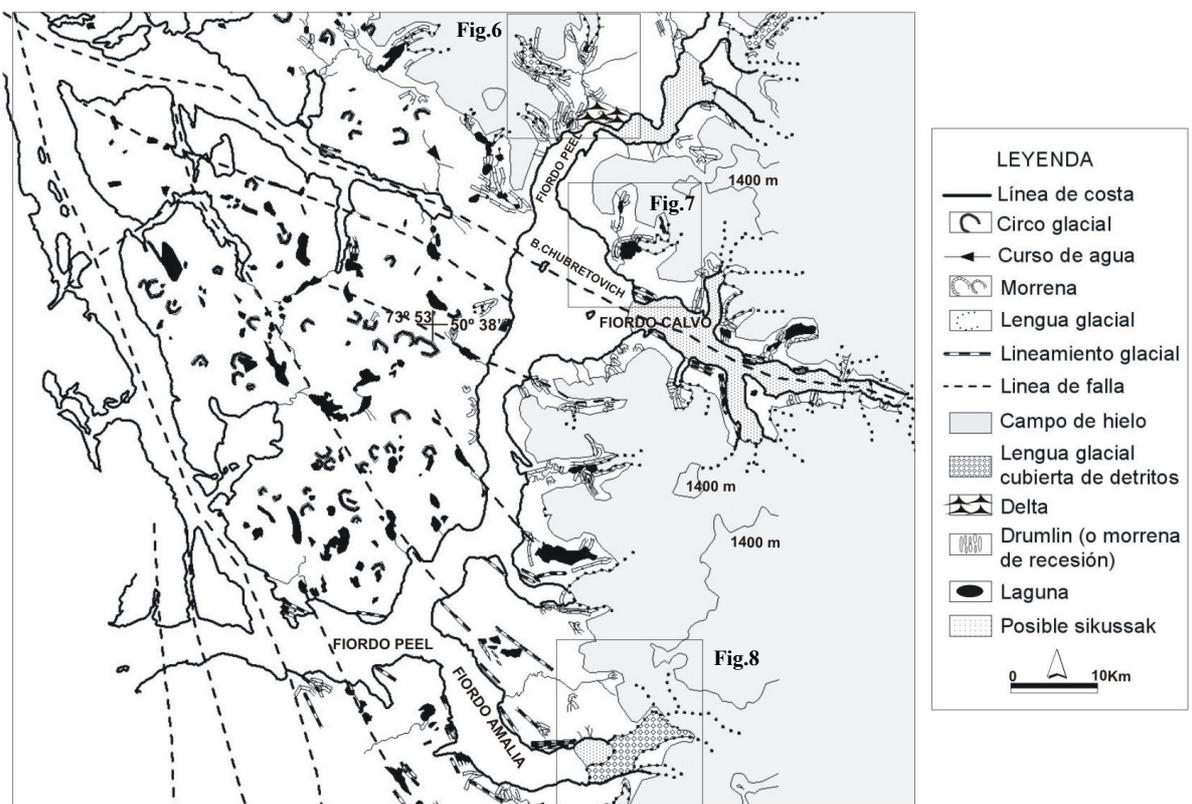


Figura 4 – Diagrama 3D, campo de *drumlins* em uma zona de delta na parte centro-distal do fiorde Penguin.
 Figura 5 – Diagrama 3D, cabeceira do fiorde Penguin com a formação de uma zona de *sikussaks*.
 Figura 6 – Diagrama 3D, zona de delta glaciofluvial na parte proximal do fiorde Peel.

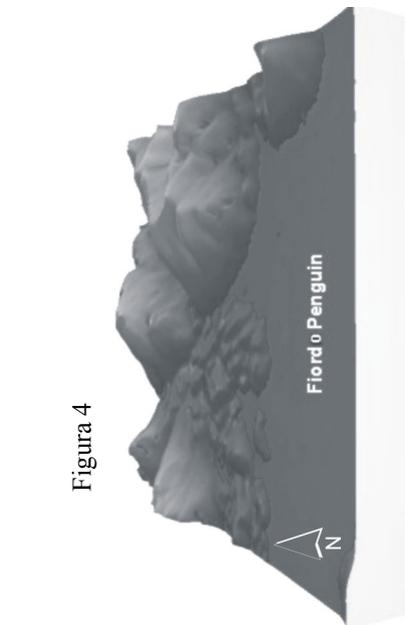


Figura 4



Figura 5

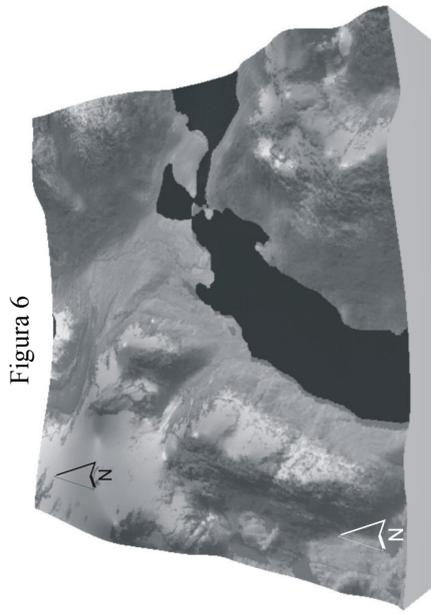


Figura 6

Figura 7 – Diagrama 3D, zona proglacial junto à baía Chubretovich, onde se observa uma laguna proglacial cercada em parte frontal por um arco morânico.
 Figura 8 – Diagrama 3D, frente da geleira de maré, no fiorde Amália, com grande quantidade de plumas de sedimentos o que pode representar atividade de fusão subglacial, isto é, na base submarina da geleira.

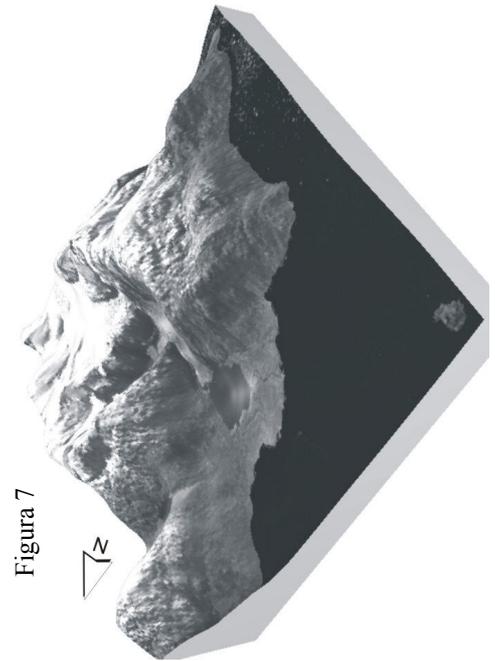


Figura 7

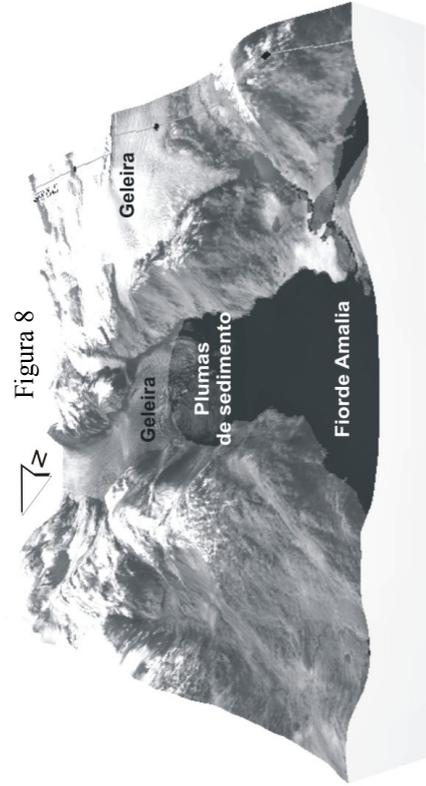


Figura 8

5. Discussão

A retração das geleiras ao longo do eixo principal dos fiordes está relacionada às mudanças no ambiente terminal, isto é, das geleiras com desprendimento de gelo (*calving glaciers*) para geleiras terrestres e as transições temporais entre essas duas etapas. Essas mudanças continuam a exercer uma importante influência sobre os fiordes da Patagônia Central.

Em primeiro lugar, geleiras subaéreas continuam enviando sedimentos terrígenos às bacias submarinas via sistemas de fluxos proglaciais. Por outro lado, áreas de abrasão de rochas, lineamentos glaciais, morainas e campos de *drumlins* indicam os limites e direção das geleiras subaéreas, inferidos como pertencentes a diferentes etapas da retração das geleiras que fluíam para o eixo principal dos fiordes, por meio de suas paredes laterais. Não são conhecidos estudos de datação nem de mapeamento de depósitos glaciogênicos subaéreos nessa zona. Além disso, são poucos os registros sísmicos submarinos nos eixos transversais dos fiordes, que poderiam complementar com informações sobre depósitos próximos às paredes laterais.

Mesmo assim, podia inferir-se, baseado nos registros acústicos submarinos (Araya, 1999; Vieira, 2006), um aporte também de sedimentos de origem paraglacial às espessas camadas de sedimentos capturados nas diversas bacias submarinas distribuídas ao longo dos fiordes.

Não obstante, a distribuição de depósitos glaciogênicos subaéreos indica evidências do controle topográfico sobre as linhas de fluxo e de condições térmicas basais úmidas das geleiras, como os campos de *drumlins* observados na margem distal norte do fiorde Penguin (Figura 2 e Figura 4). Ademais, indicam em alguns casos a direção do fluxo de gelo desde o interior de áreas que, hoje, possuem cobertura glacial restrita aos pontos mais elevados, como na margem norte do fiorde Penguin.

As áreas de rochas abrasadas pelo gelo indicam erosão glacial sob geleiras de base úmida (Sugden e John, 1976) (Figuras. 2 e 3). Nas áreas a leste do campo de gelo Patagônico Norte, Glasser e Jansson (2005) alegam que a presença de *drumlins* e *flutes* nesses tipos de corredores abrasados denota o fluxo rápido do gelo. Assim, como no norte, os lineamentos glaciais nas zonas subaéreas adjacentes aos fiordes da Patagônia Central mostram antigas linhas de fluxos. A diferença é que na última área as geleiras descem abruptamente ao nível de mar, formando geleiras de maré, ou dependendo da profundidade, línguas de gelo, enquanto que ao norte (Campo de Gelo Patagônico Norte) foi possível também a formação de geleiras de *piedmont* (Glasser et al. 2005).

Conclusão

A evolução da paisagem como resposta a retração das geleiras ao redor dos fiordes Penguin e Peel produziram modernas superfícies geomorfológicas observadas a partir de imagens Landsat 7 – ETM+. Geleiras ainda fluem pelas cabeceiras dos fiordes observados. No entanto, as geleiras tributárias em retração em seus respectivos vales alimentam as bacias dos fiordes via fluxos glaciofluviais. A localização de vários tipos de depósitos e feições erosivas evidencia que muitas das geleiras que hoje estão confinadas em seus respectivos vales possivelmente se projetavam sobre os fiordes. Fluxos proglaciais de cada geleira produziram zonas fluvio-deltáicas nas áreas distais dos vales tributários.

Uma paisagem paraglacial produziu influxo de sedimentos para os fiordes, incluindo os resultantes da erosão dos rios e das geleiras, o que pode explicar as camadas espessas de sedimentos nas bacias submarinas dos fiordes analisados. Futuros estudos de datação dos depósitos identificados darão mais precisão à escala temporal dos eventos glaciológicos.

Referências

- Araya–Vergara, J.F. Perfiles longitudinales de fiordos de Patagonia Central. **Ciencia y Tecnología del Mar**, n. 22, p. 3-29, 1999.
- Aniya, M.; Sato, H.; Naruse, R.; Skvarca, P.; Casassa, G. Recent variations in the Southern Patagonia Icefield, South America. **Arctic and Alpine Research**, n. 29, p. 1-12, 1997.
- Ballantyne, C.K. Paraglacial geomorphology. **Quaternary Science Reviews**, n. 21, p. 1935-2017, 2002.
- Bindschadler, R.; Dowdeswell, J.; Hallc, D.; Winther, J.G. Glaciological applications with Landsat-7 imagery: early assessments. *Remote Sensing of Environment*, n. 78 p. 163-179, 2001.
- Casassa, G.; Brecher, H.; Rivera, A.; Aniya, M. A century-long record of glacier O'Higgins, Patagonia. **Annals of Glaciology**, 24, p. 106-110, 1997.
- Casassa, G.; Rivera, A.; Aniya, M.; Naruse, R. Características glaciológicas del Campo de Hielo Patagónico Sur. **Annales del Instituto de la Patagonia**, Serie Ciencias Naturales, n. 28, p. 5-22, 2000.
- Glasser, N.F.; Jansson, K.N. Fast-flowing outlet glacier of the Last Glacial Maximum Patagonian Icefield. **Quaternary Research**, n. 63, p. 206-211, 2005.
- Glasser, N.F.; Jansson, K.N.; Harrison, S.; Rivera, A. Geomorphological evidence for variations of the North Patagonian Icefield during the Holocene. **Geomorphology**. n. 71, p. 263-277, 2005.
- Gustavsson, A.; Kolstrup, E.; Seijmonsbergen, A.C. A new symbol-and-GIS detailed geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. **Geomorphology**, no prelo, 2006.
- Kleman, J. Preservation of landforms under ice sheet and ice caps. **Geomorphology**, n. 9, p. 19-32, 1994.
- Rivera, A.; Aravena, J.; Casassa, G. Recent fluctuations of glacier Pío XI, Patagonia: discussion of glacial surge hypothesis. **Mountain Research and Development**, v.17 (4), p. 309-322, 1997.
- Sugden, D.E.; John, B. **Glaciers and Landscape**. Londres: Edward Arnold, 1976. 376 p.
- Syvitski, J.P.M.; Andrews, J.T.; Dowdeswell, J.A. Sediment deposition in an iceberg-dominated glacial marine environment, east Greenland: basin fill implications. **Global and Planetary Change**, n. 12, p. 251-270, 1996.
- Vieira, R. 2006. **Interpretação integrada de sísmica de alta-resolução e da morfologia submarina da costa de fiordes da Patagônia Central – Chile**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006, 165 p.