

ANÁLISE MORFOMÉTRICA DO SETOR NORTE DA BAÍA DO ALMIRANTADO, ILHA REI GEORGE, SHETLANDS DO SUL, ANTÁRTICA

Morphometric analysis of the northern Admiralty Bay, King George island, South Shetlands Archipelago, Antarctica

**Kátia Kellem da Rosa^{1,3},
 Claudio Wilson Mendes Jr.^{1,2}
 Rosemary Vieira^{1,3}
 Norberto Dani¹
 Jefferson Cardia Simões¹**

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Centro Polar e Climático, Departamento de Geografia
 Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, cep. 91501-970
 katiakellem@yahoo.com.br
 geoclaudio@yahoo.com.br
 rosenupac@yahoo.com.br
 norberto.dani@ufrgs.br
 jefferson.simoes@ufrgs.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Laboratório de Monitoramento da Criosfera
 Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, cep. 91501-970
 geoclaudio@yahoo.com.br

³Universidade Federal Fluminense
Polo Universitário de Campos dos Goytacazes, Departamento de Geografia
 Rua José do Patrocínio, 71, Centro, Campos dos Goytacazes, cep. 28010-385
 katiakellem@yahoo.com.br
 rosenupac@yahoo.com.br

RESUMO

O presente estudo apresenta resultados da análise morfométrica do setor norte da Baía do Almirantado, localizada na ilha Rei George, arquipélago das Shetlands do Sul, Antártica, com a utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG). Fotografias aéreas verticais foram processadas para a geração de um ortofotomosaico e de um Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 0,7 m no terreno. Com base no MDE gerado, foram elaborados mapas hipsométrico, de declividade e aspecto (escala 1:10.000), bem como modelos de sombreamento analítico e cenas perspectivas tridimensionais. O setor norte da baía do Almirantado compreende uma área de aproximadamente 103,9 km² e apresenta uma elevação média de 299,6 m e máxima de 703,4 m. Na área de estudo predominam terrenos com relevo ondulado, seguidos por relevos forte ondulado, suave ondulado e montanhoso, com predominância de vertentes com orientações sul e sudoeste. Feições geomorfológicas glaciais, incluindo *tors*, arêtes, canais fluvioglaciais, circos glaciais, e vales em forma de U, foram identificadas na área de estudo. A presença de áreas de maior declividade nas áreas rochosas recentemente expostas favorece o desenvolvimento de processos de fluxo de detritos. Os mapas morfométricos podem ser usados na reconstrução da evolução deste ambiente, e desta forma contribuir para o estudo da dinâmica glacial e das mudanças ambientais periglaciais observadas na área de estudo.

Palavras chaves: Geomorfologia glacial. Análise morfométrica. Admiralty Bay. King George Island

ABSTRACT

This paper presents the results of morphometric analysis of the northern Admiralty Bay, located at King George Island, South Shetlands Archipelago, Antarctica, using Geographical Information System techniques. Vertical aerial photographs at scale of 1:50.000 were processed in a Digital Photogrammetric Station, in order to generate an orthophotomosaic and a Digital Elevation Model (DEM) of the study area, with 0.7 m spatial resolution. We used this DEM to derive hypsometric, slope and aspect maps (at scale of 1:10.000), as well as hillshade models and perspective view scenes. The northern Admiralty Bay comprises about 103.9 km², while its mean area elevation is 299.6 m and the maximum one is 703.4 m. At study area predominates moderate terrain slopes (36%), followed by steep (23.8%), gentle (22.2%) and very steep areas (7%). Its hillsides are mainly southwestward (22.9%) and southward (22.6%) oriented. Glacial geomorphological features, including tors, aretes, glaciofluvial channels, glacial circles and U-shaped valleys, were identified. The presence of steep terrains in recently exposed rocky areas provides favorable conditions for the development of debris flow processes. The morphometric maps can be used for geomorphological reconstruction of this environment, and thus contribute to the study of glacial dynamics and periglacial environmental changes observed in the study area.

Keywords: Glacial geomorphology. Morphometric analysis. Baía do Almirantado. Ilha Rei George.

1 INTRODUÇÃO

Dados de Sensoriamento Remoto têm sido utilizados em análises geomorfológicas de ambientes glaciais. Associado à interpretação de imagens e fotografias aéreas, o Sistema de Informação Geográfica (SIG) é outro instrumental usado na análise geomorfológica (CLARK, 1997). Com o modelamento numérico do terreno, análises baseadas no SIG têm proporcionado o maior entendimento da evolução da paisagem glacial (NAPIERALSKI et al., 2007).

Modelos Digitais de Elevação (MDE) e análises automáticas do terreno são amplamente utilizadas na análise geomorfológica (WILSON; GALLANT, 2000; SMITH; CLARK, 2005). Vários parâmetros morfométricos, tais como hipsometria, declividade e orientação das vertentes, podem ser calculados a partir de um MDE (RAO, 2002). Além disso, esses modelos fornecem informações para a interpretação dos processos geomorfológicos atuantes em uma paisagem (ETZELMÜLLER; SULEBAK, 2000). Classificações automáticas de unidades geomorfológicas são principalmente baseadas nas características morfométricas (MILIAREISIS, 2001; ADEDIRAN et al., 2004).

Este estudo tem como objetivo a análise morfométrica do ambiente glacial localizado no setor norte da baía do Almirantado, a partir de um Modelo Digital de Elevação gerado por Fotogrametria e analisado posteriormente em um SIG.

2 ÁREA DE ESTUDO

O ambiente glacial do setor norte da baía do Almirantado localiza-se na ilha Rei George, arquipélago das Shetlands do Sul, a oeste da região setentrional da península Antártica (Figura 1). O setor norte da baía do Almirantado é dividido pelas enseadas Martel (área de 17 km²) e Mackellar (13 km²). Essas enseadas caracterizam-se por terminações glaciares do tipo geleira de maré, separadas por pontais. As geleiras de maré possuem gradiente superficial acentuado, fluxo relativamente rápido e muitas fraturas. Algumas geleiras possuem frente terrestre, como, por exemplo, a Wanda, Professor e Dragão (Figura 2).

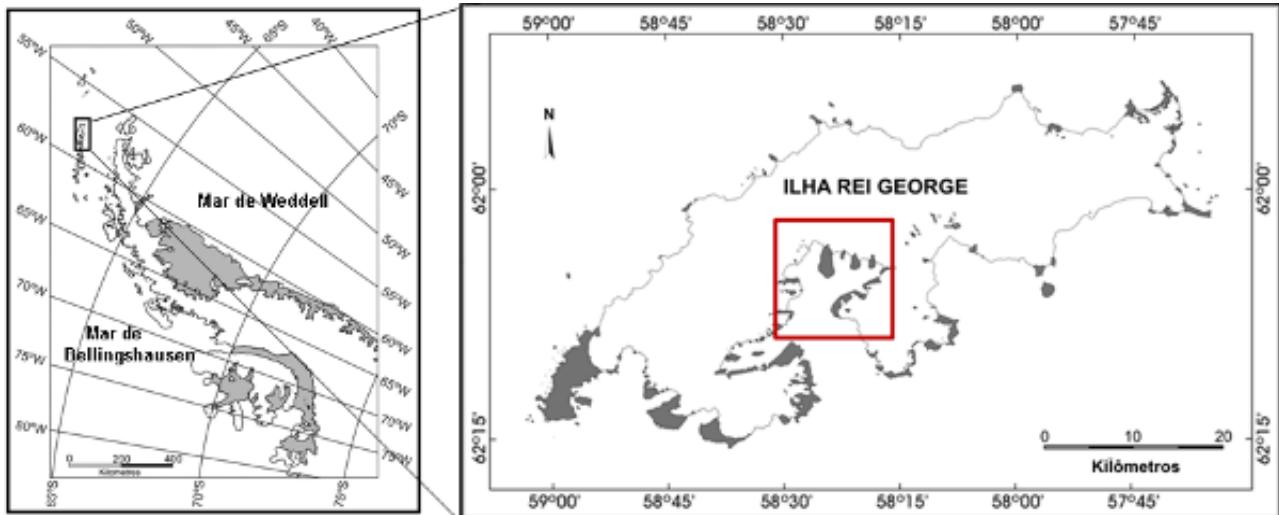


Figura 1: Localização da área de estudo (retângulo em vermelho) na ilha rei George, nas Shetlands do Sul, a oeste da região setentrional da península Antártica.

As geleiras da área de estudo são sensíveis a variabilidade climática e têm sofrido retração de suas frentes e diminuição de sua espessura (SIMÕES et al., 2004; THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2007). Como resultado do processo de retração dessas geleiras ambientes de deglaciação se formaram com a presença de variados depósitos subaéreos e lagunas proglaciais. Ainda observam-se processos paraglaciais nestes ambientes. Nesta ampla área proglacial observaram-se rápidas mudanças morfológicas e a exposição de geoformas (ROSA et al., 2010).

Evidências estruturais apóiam a idéia da presença de falhas e zonas de deformação na ilha Rei George (BIRKENMAJER, 1980). De acordo com Gruber (1989) o alinhamento NE-SW das enseadas Martel e Mackellar, associado aos escarpamentos rochosos dos vales esculpidos por ação glacial, evidenciam o condicionamento tectônico dessas feições. Esses vales glaciais, profundamente escavados, possuem profundidades de aproximadamente 200 m (GRUBER, 1989). De acordo com esse autor, a presença de falhamentos resultou em uma erosão diferencial por processos glaciais.

A área de estudo localiza-se na Área Antártica Especialmente Gerenciada (AAEG) da baía do Almirantado, delimitada pela Foreign & Commonwealth Office (1997), destinada ao monitoramento ambiental. Desta forma, esta área tem sido o palco de diversos projetos científicos nacionais e internacionais.

Estudos geomorfológicos relacionados com a área de estudo foram realizados por Francelino et al. (2004), Schaefer et al. (2004) e Rosa et al. (2010). Braun et al. (2001) elaborou um MDE da ilha Rei George, com 100 m resolução espacial. Mendes Júnior et al. (2010) gerou um MDE e um mapa topográfico na escala 1:5.000 para a península Keller. Assim, constatou-se que não havia um MDE preciso e com alta resolução espacial que compreendesse todo o setor norte da baía do Almirantado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O MDE do setor norte da baía do Almirantado foi elaborado a partir de uma estação fotogramétrica digital, com o uso de fotografias aéreas do *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de La Armada del Chile* (SHOA). Foram utilizadas fotografias verticais pancromáticas no formato 23 x 23 cm, na escala 1:50.000 (n° 302714, 302715, 302716 e 302740 e 302741 – linhas de voo n° 15 e 16), tomadas por câmera fotogramétrica modelo RC10, com distância focal de 88,10 mm, durante uma missão de voo executada pelo SHOA em janeiro de 2003, sobre a Península Antártica.

As orientações, interna e externa das fotografias, bem como a geração automática do MDE, foram realizadas no sistema LPSTM (*Leica Photogrammetry Suite*). Os dados foram georreferenciados ao sistema de projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 21S, com o elipsóide de referência *World Geodetic System 1984* (WGS84).

As coordenadas dos pontos de controle planimétricos foram obtidas da ortofotografia da península Keller (MENDES JÚNIOR et al., 2010), com resolução espacial de 0,63 m, bem como de uma imagem fusionada e ortoretificada Quickbird, com resolução espacial de 0,61 m, adquirida por esse satélite em 26/10/2006. Os pontos de controle altimétricos usados na orientação do bloco de fotografias foram locados ao longo da linha de costa da baía do Almirantado e aos mesmos foi atribuída uma cota zero arbitrária. Essa metodologia foi proposta por Mendes Júnior et al. (2010), para a geração do MDE da península Keller, na escala 1:5.000, com o objetivo de resolver o problema da falta de pontos de controle altimétricos, que são necessários para a aerotriangulação das fotografias. Segundo esses autores, o MDE da península Keller apresentou resultados compatíveis com dados altimétricos de mapas topográficos locais. Com o uso dos pontos de controle altimétricos obtidos por essa metodologia e de pontos planimétricos obtidos das imagens, foi realizada a aerotriangulação do bloco de fotografias. Os valores dos parâmetros de orientação externa das fotografias aéreas usadas neste estudo estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de orientação externa calculados para as fotografias aéreas.

Número da fotografia	Centro perspectivo (UTM 21 S – WGS84)			Ângulos de rotação (graus)		
	X	Y	Z	ω	ϕ	κ
302714	430102,690	3119524,545	4432,145	1,91886	1,27964	-142,38012
302715	277070,647	3117571,914	4433,760	-1,04366	0,67910	-139,77902
302716	423550,640	3115612,317	4448,930	-1,54382	1,59059	-145,51691
302740	432698,372	3111615,921	8195,487	-1,55274	0,45953	-145,41320
302741	428710,218	3108834,396	8239,537	-0,18177	-0,06647	-145,38567

O MDE foi gerado pela ferramenta *DTM Extraction* do aplicativo LPSTM e interpolado pelo método *Triangular Irregular Network* (TIN), com uma resolução de 0,7 m no terreno, compatível com a resolução espacial e escala das fotografias usadas neste estudo e com a densidade dos pontos cotados.

Os pontos cotados da estação fotogramétrica apresentaram baixa concentração nas áreas dos campos de gelo (à montante das geleiras). Para a geração de um MDE mais preciso nessas áreas, foram utilizados pontos cotados extraídos do MDE do estudo de Braun et al. (2001). Esses pontos foram então armazenados no programa ArcGISTM (ESRI, Inc.), utilizado para a interpolação de um MDE da área de estudo, com resolução de 0,7 m, com o uso do método TIN. Desse modelo foram derivados vários produtos de análise do relevo, tais como mapas hipsométrico, de declividade e aspecto, modelos de sombreamento analítico e perspectivos tridimensionais. Esse MDE foi utilizado no LPSTM para a geração de ortofotos, que foram utilizadas para a elaboração de um ortofotomosaico da área de estudo (Figura 2).

O mapa hipsométrico do setor norte da baía do Almirantado (Figura 3) foi elaborado a partir do fatiamento do MDE em 16 classes, sendo cada classe com amplitude de 50 m. O mapa de declividade (Figura 4) foi elaborado com seis classes temáticas, definidas com os mesmos valores percentuais utilizados em estudo de Francelino et al. (2004) e Mendes Júnior et al. (2010). No mapa de aspecto (Figura 5) as classes foram definidas pelo ângulo azimutal de orientação das vertentes. As áreas absolutas e relativas de cada classe dos mapas hipsométrico, de declividade e orientação das vertentes (drenagens) foram quantificados no programa ArcGISTM.

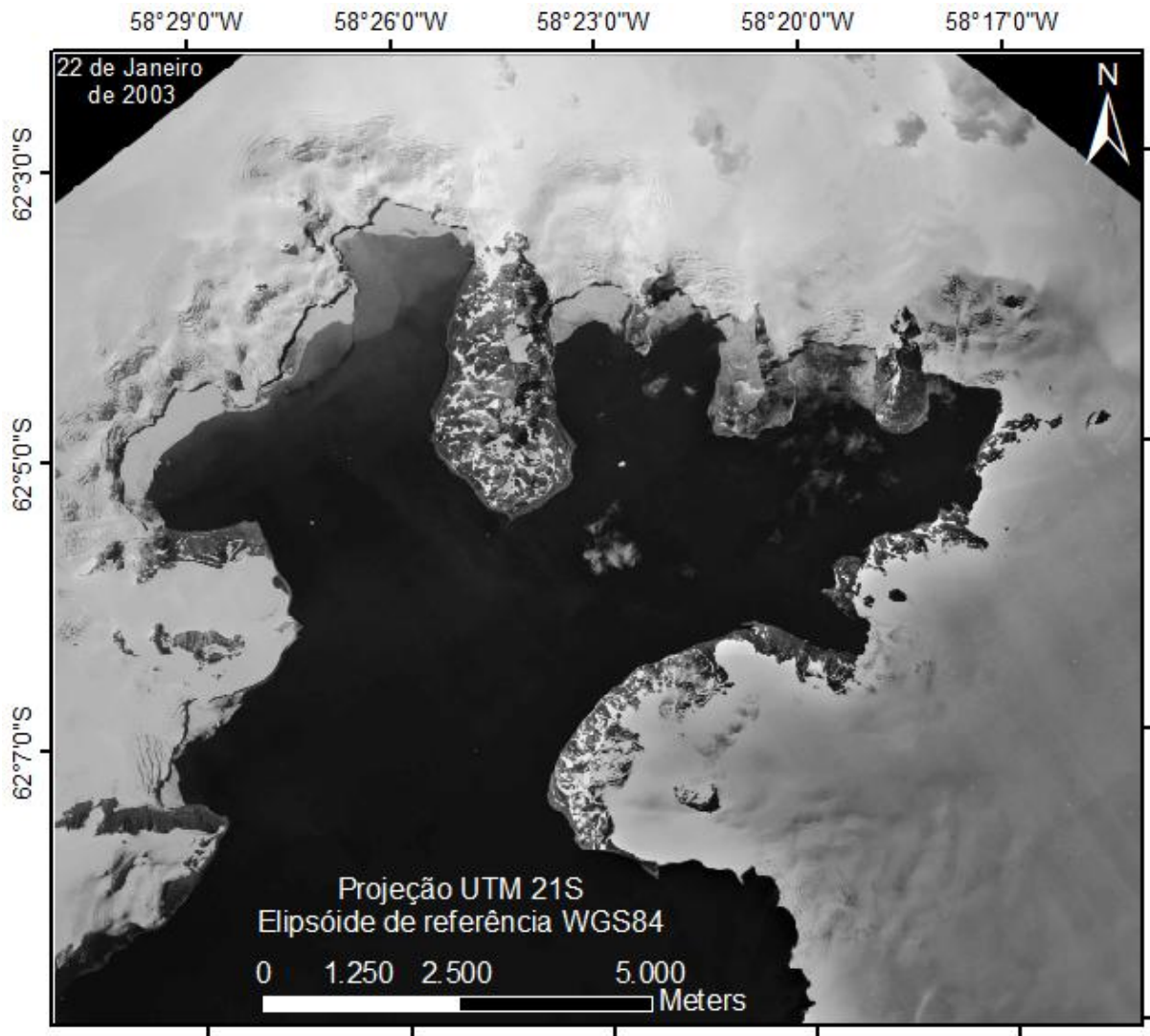


Figura 2: Ortofotomosaico do setor norte da baía do Almirantado, gerado em uma estação fotogramétrica a partir das fotografias aéreas verticais do SHOA (22 de janeiro de 2003). As toponímias foram baseadas em Braun et al. (2001).

4 RESULTADOS

De acordo com dados do ortofotomosaico produzido neste estudo, o setor norte da baía do Almirantado possui uma área continental de aproximadamente 103,9 km². Dados calculados do MDE indicaram que a elevação média do terreno é de 299,6 m e a máxima de 703,4 m (Tabela 2).

O mapa de declividade (Figura 4) indicou que a área de estudo possui um relevo predominantemente ondulado (36%), seguido de áreas com relevo forte ondulado (23,8%), suave ondulado (22,2%) e montanhoso (7%), devido à extensão significativa de áreas cobertas por geleiras (Tabela 3). As zonas frontais de geleiras de maré apresentam as maiores declividades.

O relevo do setor norte da baía do Almirantado é caracterizado pela predominância de vertentes com orientações sul (22,6%) e sudoeste (22,9%) conforme dados quantificados do mapa de aspecto (Figura 5). A morfologia de relevo na área de estudo pode ser observada no modelo de sombreamento analítico (Figura 6), onde se destacam as áreas de pendentes íngremes nas áreas costeiras das bacias de drenagens e áreas rochosas recentemente expostas. O padrão de falhamentos tectônicos descrito por Gruber (1989) e a erosão diferencial resultante exercem um forte controle sobre o sentido de fluxo das bacias de drenagem na área de estudo.

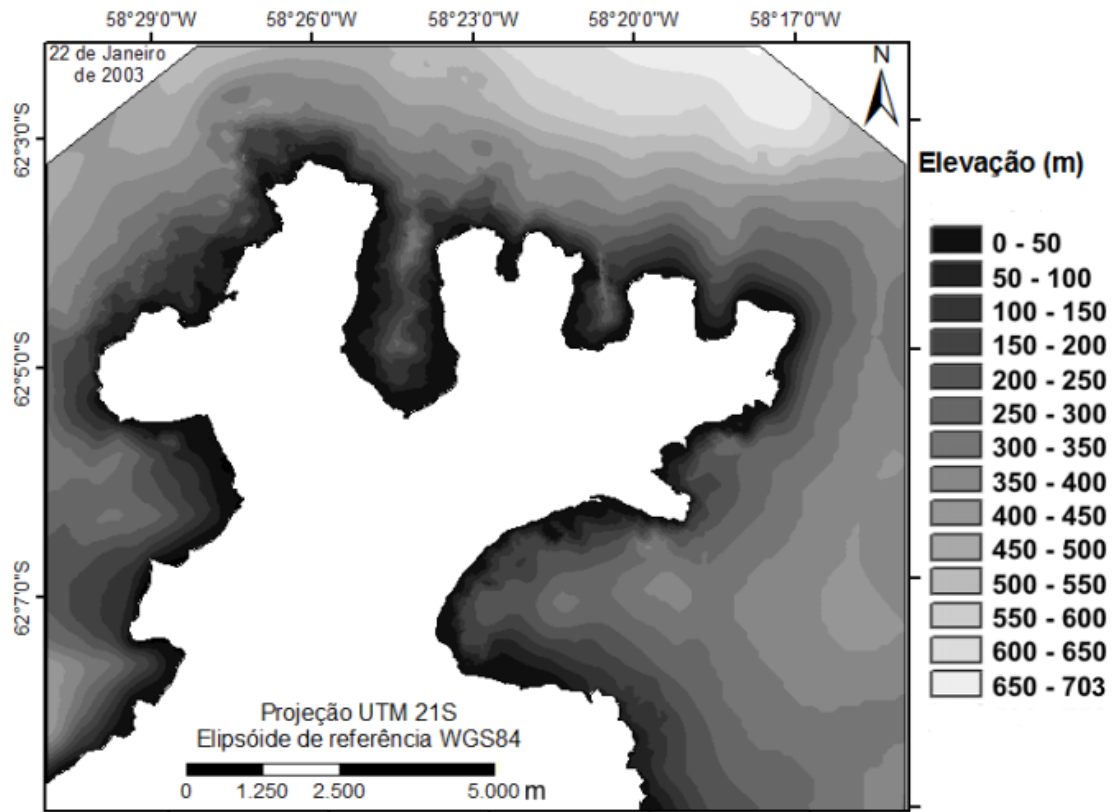


Figura 3: Mapa hipsométrico do setor norte da baía do Almirantado.

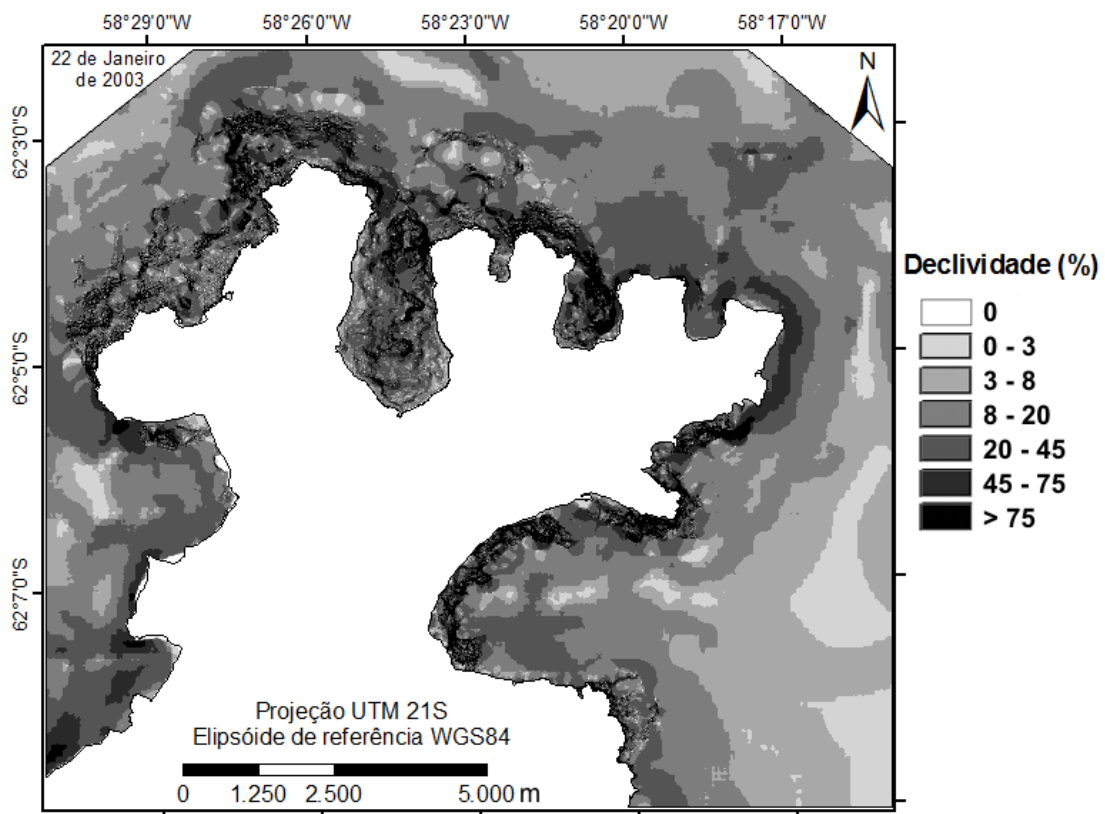


Figura 4: Mapa de declividade do setor norte da baía do Almirantado.

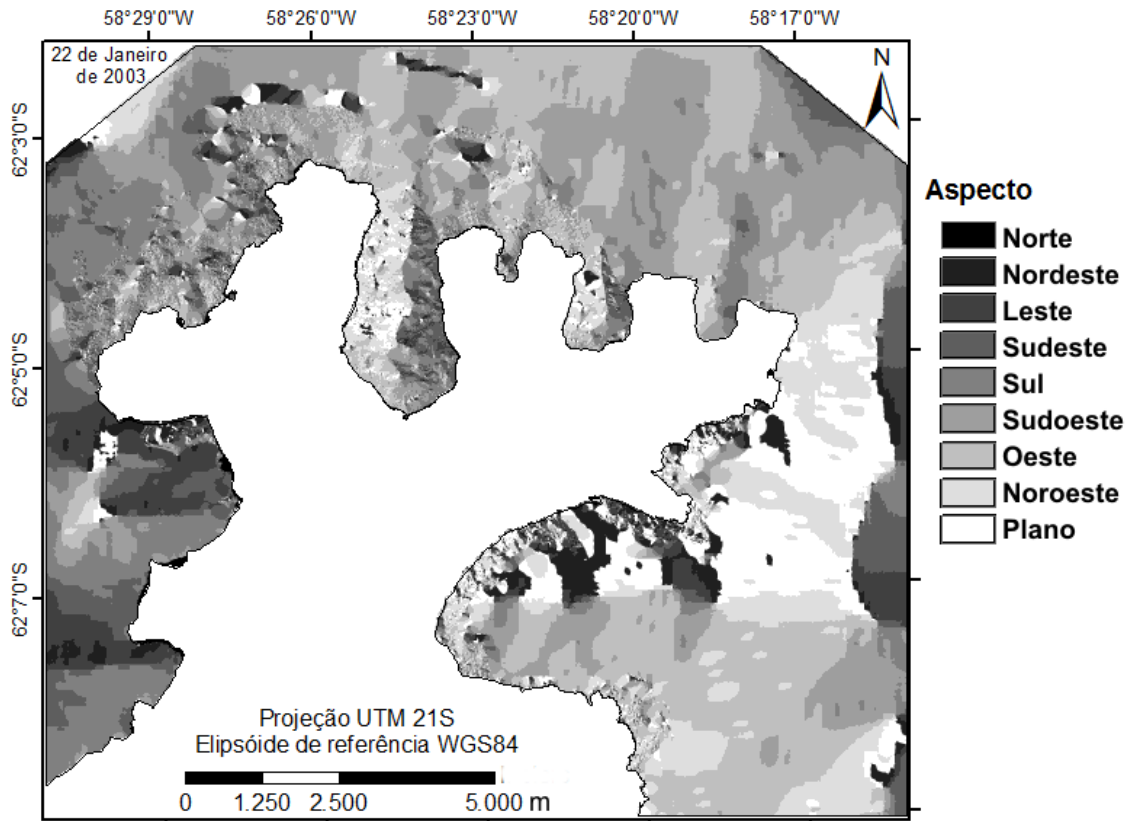


Figura 5: Mapa de aspecto do setor norte da baía do Almirantado.

Tabela 2: áreas absolutas e relativas e estatísticas das classes do mapa hipsométrico do setor norte da Baía do Almirantado.

Setor norte da baía do Almirantado		
Elevação (m)	Área (km²)	Área (%)
0 - 50	7,846	7,6
50 - 100	6,128	5,9
100 - 150	6,454	6,2
150 - 200	7,947	7,6
200 - 250	8,995	8,7
250 - 300	11,874	11,4
300 - 350	14,616	14,1
350 - 400	16,518	15,9
400 - 450	7,612	7,3
450 - 500	5,278	5,1
500 - 550	3,184	3,1
550 - 600	2,101	2,0
600 - 650	3,220	3,1
650 - 703	2,110	2,0
Estatísticas (m)		
Mín. e Máx.	Média	Desvio-padrão
0 - 703,363	299,593	159,291

Tabela 3: Áreas absolutas e relativas e estatísticas das classes do mapa de declividade do setor norte da Baía do Almirantado.

Declividade		Setor norte da Baía do Almirantado	
Tipo de relevo	%	Área (km ²)	Área (%)
Plano	0 - 3	7,071	6,9
Suave Ondulado	3 - 8	23,039	22,2
Ondulado	8 - 20	37,411	36,0
Forte Ondulado	20 - 45	24,711	23,8
Montanhoso	45 - 75	7,244	6,9
Escarpado	> 75	4,407	4,2

Estatísticas (%)		
Mín. e Máx.	Média	Desvio-padrão
0 - 3664,725	12,001	22,543

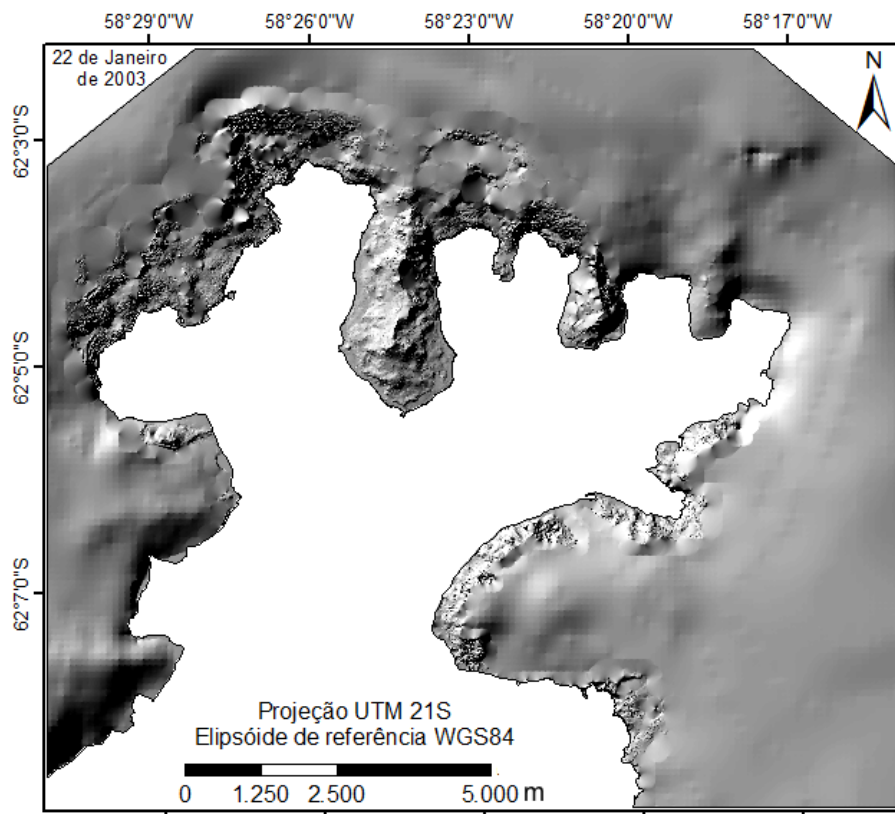


Figura 6: Mapa de sombreamento analítico para o setor norte da baía do Almirantado, iluminado com ângulo solar azimutal de 315° e zenital de 45°.

5 DISCUSSÕES

A presença de áreas de maior declividade nas áreas rochosas recentemente expostas evidenciando-se com o acentuado intemperismo favorece o desenvolvimento de processos de fluxo de detritos nas pendentes de encostas mais íngremes. De acordo com o mapa de declividade, as geleiras de maré da área de estudo apresentaram acentuada declividade em sua porção frontal. As geleiras Stenhouse, Goetel, Dobrowolski e principalmente a Ajax possuíam maior declividade no seu término (Figura 4). Essas acentuadas declividades estão relacionadas com a topografia do embasamento as quais podem acarretar no aumento da velocidade de fluxo do gelo.

O ortofotomosaico de alta resolução pode ser utilizado na análise geomorfológica da área de estudo, apoiando atividades de campo e o mapeamento temático. O MDE gerado neste estudo apresentou detalhamento topográfico suficiente para a identificação de geoformas erosivas e deposicionais glaciais e, dessa forma, é uma potencial fonte de informação geomorfológica.

Os produtos de análise do relevo deste estudo podem auxiliar na investigação de mudanças morfométricas na paisagem glacial ao longo do tempo, tais como estimativas de erosão, mudanças morfológicas, balanço de massa glacial e mudanças volumétricas nas geleiras. Assim, podem contribuir no entendimento da dinâmica glacial e no monitoramento dos processos de retração e mudanças ambientais periglaciais observados na área de estudo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas de Fotogrametria e SIG foram eficientes na geração automática do MDE e na extração dos produtos de análise do relevo. A metodologia proposta possibilitou a caracterização geomorfométrica da área de estudo com a descrição detalhada das condições topográficas. O MDE gerado neste estudo, devido a sua resolução espacial, proporcionou um alto detalhamento topográfico do setor norte da baía do Almirantado, o qual foi suficiente para a identificação de geoformas erosivas e deposicionais glaciais. Nesse sentido, destaca-se que diante dos processos de retração glacial contatados na área de estudo, como efeito da variabilidade climática destes ambientes. Os produtos de análise do terreno gerados neste estudo foram uma importante base de dados para a análise geomorfológica glacial. Essa base de dados de análise do terreno possibilitou o mapeamento geomorfológico preciso e a reconstrução da evolução desses ambientes, e desta forma, contribui para o estudo da dinâmica glacial e mudanças ambientais perceptíveis na área de estudo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho teve apoio do INCT da Criosfera, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Proantar (Programa Antártico Brasileiro).

REFERÊNCIAS

- ADEDIRAN, A. O. et al. Computer-assisted discrimination of morphological units on northcentral Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 58, p. 357–370, 2004.
- BIRKENMAJER, K. Discovery of Pliocene glaciation on King George Island, South Shetland Islands (West Antarctica). *Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences*, **Ser. Sciences de la Terre**, 27, p. 59-67, 1980.
- BRAUN, M. et. al. An improved topographic database for King George Island: compilation, application and outlook. **Antarctic Science**, Oxford, v. 13, no. 1, p. 41-52, 2001.
- CHICHESTER, G. P. T.; FRANKLIN, S. E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 21, p. 251–264. 1998.
- CLARK, C. D. Reconstructing the evolutionary dynamics of former ice sheets using multi-temporal evidence, remote sensing and GIS. **Quaternary Science Reviews**, Oxford, 16, p. 1067-1092, 1997.
- ETZELMÜLLER, B.; SULEBAK, J. S. Developments in the use of digital elevation models in periglacial geomorphology and glaciology. **Physische Geographie**, Zurique, v. 41, p. 35-58, 2000.
- FOREIGN & COMMONWEALTH OFFICE. **List of Protected Areas in Antarctica**. London: Foreign & Commonwealth Office, 1997.

FRANCELINO, M. R. et al. Geoformas da Península Keller, Antártica Marítima: subsídios ao monitoramento ambiental. In: SCHAEFER, C. E. G. R. et al. **Ecosystemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima**. Viçosa: NEPUT, 2004. p. 15-25.

GRUBER, N. L. S. **Contribuição ao estudo da sedimentação glaciomarinha da Baía do Almirantado, Ilha Rei Jorge, Antártica**. 1989. 174 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. Geneva, 2007.

MENDES JÚNIOR, C. W. et al. Elaboração de um mapa topográfico na escala 1:5.000 para a Península Keller, ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 62, n. 3, p. 453-466, 2010.

MILIARESIS, G. C. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers and Geosciences**, New York, v. 27, p. 775-786, 2001.

NAPIERALSKI, J. et al. Glacial Geomorphology and Geographic Information Systems. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 85, p.1-22, 2007.

RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. et al. Weather and climate. In: RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. (Ed.). **The maritime Antarctic coastal ecosystem of Admiralty Bay**. Warsaw: Department of Antarctic Biology, Polish Academy of Sciences, 1993. p. 19-25.

RAO, D. P. Tropical ecology remote sensing application in geomorphology. **Tropical Ecology**, Veranasi, India, v. 43, no. 1, p. 49-59, 2002.

ROSA, K. K. et al. Geomorfologia e sedimentologia glacial aplicadas na reconstrução da evolução do ambiente de deglaciação da geleira Wanda, ilha Rei George, Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Rio de Janeiro, v. 11, p. 39-48, 2010.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Geologia e geotectônica da Península Keller, Antártica Marítima. In: _____. **Ecosystemas costeiros e monitoramento ambiental da Antártica Marítima**. Viçosa: NEPUT, 2004. p. 7-13.

SIMÕES, J. C. et al. Small cirque glaciers retreat on Keller Peninsula, Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. **Pesquisa Antártica Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 4, p. 49-56. 2004.

SMITH, M. J.; CLARK, C. D. **Earth surface processes and landforms**, Sussex, GB, v. 30, no. 7, p. 885-900, 2005.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain analysis, principles and applications**. Nova Jersey: John Wiley & SONS, 2000.

Data de submissão: 03.11.2012

Data de aceite: 19.03.2013

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.