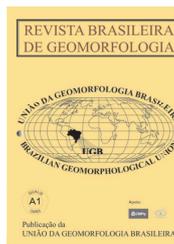


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 21, nº 2 (2020)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1771>



O USO DE MÉTODOS DE MAPEAMENTO AUTOMÁTICO DE RELEVO PARA ANÁLISE DE FORMAS GLACIAIS

THE USE OF AUTOMATIC RELIEF MAPPING METHODS FOR ANALYSIS OF GLACIAL FORMS

Carina Petsch

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima 1000, prédio 17, Santa Maria, Rio Grande do Sul. CEP: 97105-900, Brasil
ORCID: 0000-0002-1079-0080
E-mail: carinapetsch@gmail.com*

Luís Eduardo de Souza Robaina

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima 1000, prédio 17, Santa Maria, Rio Grande do Sul. CEP: 97105-900, Brasil
ORCID: 0000-0002-2390-6417
E-mail: lesrobaina@yahoo.com.br*

Romário Trentin

*Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima 1000, prédio 17, Santa Maria, Rio Grande do Sul. CEP: 97105-900, Brasil
ORCID: 0000-0002-0615-2801
E-mail: romario.trentin@gmail.com*

Kátia Kellem da Rosa

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970, Brasil
ORCID: 0000-0003-0977-9658
E-mail: katiakellem@gmail.com*

Anderson Ribeiro de Figueiredo

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970, Brasil
ORCID: 0000-0002-0228-249X
E-mail: anderson.figueiredo@ufrgs.br*

Jefferson Cardia Simões

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970, Brasil
ORCID: 0000-0001-5555-3401
E-mail: jefferson.simois@ufrgs.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
14/09/2019
Aceito (Accepted):
20/02/2020

Palavras-chave:

Classificação Automática; Geomorfologia Glacial; *Geomorphons*.

Keywords:

Automatic Classification; Glacial Geomorphology; *Geomorphons*.

Resumo:

O mapeamento geomorfológico de ambientes glaciais pode ser mais preciso com a aplicação da classificação digital gerada por Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Este artigo avalia o potencial da metodologia *geomorphon* para a identificação de tipos de formas de relevo em ambientes glaciais de montanha. São propostas novas nomenclaturas para a classificação obtida diretamente por *geomorphon* quando aplicado ao mapeamento geomorfológico glacial. O método será chamado de Classificação Digital Revisada por Elementos de *Geomorphon* (Revised Geomorphon Digital Classification – RGDC). Parâmetros morfométricos e hidrológicos, extraídos dos MDEs SRTMGL 1 e ALOS PALSAR, em um setor da Cordilheira Branca, Peru, foram utilizados na nova proposta de classificação. As classes identificadas foram interpretadas como formas de picos piramidais (*horns*), arestas (*arêtes*), arestas fortemente retrabalhadas pelo intemperismo, morainas de avanço, encostas, vales em circo (anfiteatro), vales em U e vales em

V. A classe de arestas é a mais facilmente identificada utilizando os *geomorphons*, o mesmo ocorrendo para classes de picos piramidais. Os resultados mostram o potencial do método automático de classificação digital de MDEs para o mapeamento de tipos de formas de relevo glacial. As morainas de maior amplitude topográfica foram facilmente identificadas devido à resolução espacial e acurácia vertical dos MDEs utilizados. O método *geomorphon* identifica mais tipos de relevo do que metodologias clássicas de identificação de formas de relevo por MDEs, 7 tipos de relevo, enquanto os métodos Dikau *et al.* (1995) e ITP só fornecem 3 tipos. Já o MDE do ALOS PALSAR, com maior resolução espacial, não apresenta diferença na identificação de formas de relevo. O mapeamento gerado pode melhorar a reconstrução da evolução geomorfológica, apoiando a interpretação paleoglaciológica e o entendimento da ocupação territorial ao longo do Holoceno.

Abstract:

Geomorphological mapping of glacial environments can be more accurate with the application of digital classification generated by Digital Elevation Models (MDEs). This paper evaluates the potential of *geomorphon* methodology for the identification of relief types in glacial mountain environments. New nomenclatures are proposed for the classification obtained directly by *geomorphon* when applied to glacial geomorphological mapping. The method is called Revised Geomorphon Digital Classification (RGDC). Morphometric and hydrological parameters, extracted from SRTMGL 1 and ALOS PALSAR MDEs, in a sector of the Cordillera Branca, Peru, were used in the new classification proposal. The identified classes were interpreted as horns, *arêtes*, *arêtes* strongly reworked by weathering, advancing moraines, slopes, cirque valleys (amphitheater), U-valleys and V-valleys. The class of *arêtes* is most easily identified using the *geomorphons*, same for horn classes. The results show the potential of the automatic method of digital classification of MDEs for the mapping of glacial relief shape types. Moraines with higher topographic amplitude were easily identified due to the spatial resolution and vertical accuracy of the DEMs used. The *geomorphon* identifies more relief types than classical methodologies for relief identification by MDEs, 7 relief types, while the Dikau *et al.* (1995) and ITP methods only provide 3 types. The ALOS PALSAR MDE, with higher spatial resolution, shows no difference in the identification of relief forms. The generated mapping can improve the reconstruction of geomorphological evolution, supporting paleoglaciological interpretation and understanding of territorial occupation along the Holocene.

1. Introdução

A Criosfera vem apresentando rápidas mudanças em relação à sua área ocupada pelo gelo, bem como em seu volume (RIBEIRO *et al.* 2007; RABATEL *et al.* 2013; SANCHES, 2013; ANA, 2014), principalmente

as geleiras tropicais, que são consideradas indicadoras de alta sensibilidade ao aquecimento atmosférico (IPCC, 2013). A análise das evidências geomorfológicas pode ser empregada em estudos de reconstrução do processo de deglaciação de geleiras e mantos de gelo (OTTO e SMITH, 2013). Essas informações são relevantes para

o entendimento da resposta das geleiras à variabilidade climática durante o Holoceno.

Ao longo dos últimos 15 anos, ocorreu ampla utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) no mapeamento geomorfológico glacial (EVANS *et al.* 2014; OJALA, 2016; PRINCIPATO *et al.* 2016; NORRIS *et al.* 2017). Alguns dos estudos se dedicaram a quantificar o padrão e as características das formas de relevo no ambiente glacial para entender sua formação e evolução (OJALA *et al.* 2015; PRINCIPATO *et al.* 2016; HILLIER *et al.* 2018).

As técnicas utilizadas no mapeamento geomorfológico apresentaram significativos avanços ao longo dos últimos anos (CHANDLER *et al.* 2018) e a classificação digital dos MDEs é aplicada por vários autores (DIKAU *et al.* 1991; DRAGUT e BLASCHKE, 2006; PIKE *et al.* 2009). Jasiewicz e Stepínski (2013) estabeleceram uma classificação de elementos de relevo utilizando um MDE pelo reconhecimento textural. A metodologia, chamada de *geomorphon*, é baseada no conceito de Padrões Ternários Locais (LTP) (LIAO, 2010) com a interpretação do arranjo espacial de tons de cinza para um dado arranjo espacial de elevação da região (JULESZ, 1981).

Com a geração de MDEs de alta resolução espacial e acurácia vertical, a classificação automática tem proporcionado condições para desenvolver os mapeamentos das feições de relevo com maior rapidez e precisão, os quais são considerados fatores relevantes quando se aplica um estudo a áreas de grandes dimensões ou com dificuldades de acesso. A classificação automática de MDEs também pode proporcionar avanços nas análises de mudanças espaço-temporais na superfície terrestre.

Os mapeamentos geomorfológicos de ambientes glaciais podem tornar-se mais precisos com a aplicação de classificação digital de MDEs e podem ser base para o conhecimento da deglaciação de ambientes de montanha. Pesquisas que envolvem a geomorfologia glacial da Cordilheira Branca são antigas, tendo sido desenvolvidas a partir do início do século XX (KINZL, 1935, 1942, 1949; KINZL e SCHNEIDER, 1950; CLAPPERTON, 1972, 1983; LLIBOUTRY, 1977), e a nova abordagem proposta neste artigo, a Classificação Digital Revisada por Elementos de *Geomorphon* (Revised Geomorphon Digital Classification- RGDC) pode proporcionar novas discussões sobre a classificação do relevo e a interpretação da evolução geomorfológica regional.

Ressalta-se que o método de *geomorphons* (JASIEWICZ e STEPÍŃSKI, 2013) ainda não é largamente utilizado para estudos envolvendo ambientes glaciais. A maioria das pesquisas é voltada para identificação de formas específicas e não consideram uma mesoescala de análise. Libohova *et al.* (2016) utilizaram a classificação relevo por *geomorphons* para interpretação e classificação do solo para paisagens a jusante de morainas terminais no Norte de Indiana (EUA). Sarasan *et al.* (2018) realizaram um estudo explorando a possibilidade de classificação automática de *drumlins* usando o método de *geomorphons*. Para tanto, foram feitos testes com variações na escala máxima de distância, o parâmetro L (*lookup distance*). Por sua vez, Allred e Luo (2016) utilizaram alguns métodos, entre eles o de *geomorphons*, para fazer a diferenciação entre vales glaciais e não glaciais em áreas nos Estados Unidos e Nova Zelândia.

O objetivo deste artigo é avaliar a potencialidade da metodologia de *geomorphons* (JASIEWICZ e STEPÍŃSKI, 2013) para a identificação de tipos de formas de relevo em ambientes glaciais de montanha. A análise foi aplicada em uma área da Cordilheira Branca, Peru.

2. Caracterização da Área

A Cordilheira Branca (Figura 1) é a cadeia montanhosa de maior extensão e maior altitude do Peru. Segundo a Autoridad Nacional Del Agua (ANA, 2014) do Peru, essa cordilheira abrange catorze bacias glaciais que partem do Nevado Caullaraju (extremo meridional) até o nevado Pelagatos (extremo setentrional). Apresenta cerca de 210 km de extensão e a maior altitude pode ser encontrada no nevado Huascarán (6.701 m). O divisor de águas da Cordilheira Branca, entre as vertentes continentais do Pacífico e do Atlântico, dá origem a três importantes bacias hidrográficas da região: do rio Santa, do rio Marañón e do rio Pativilca.

A Cordilheira Branca é orientada no sentido noroeste, com seus picos nevados isolados por falhas leste/oeste, cujo flanco ocidental é estruturado por espigões posicionados como contrafortes na base dos picos nevados. Os espigões são interrompidos por terraços aluviais do rio Santa e, por vezes, pelos leques de ejeção de cursos de aluviões antigos ou modernos que se sobrepuseram aos terraços aluviais.

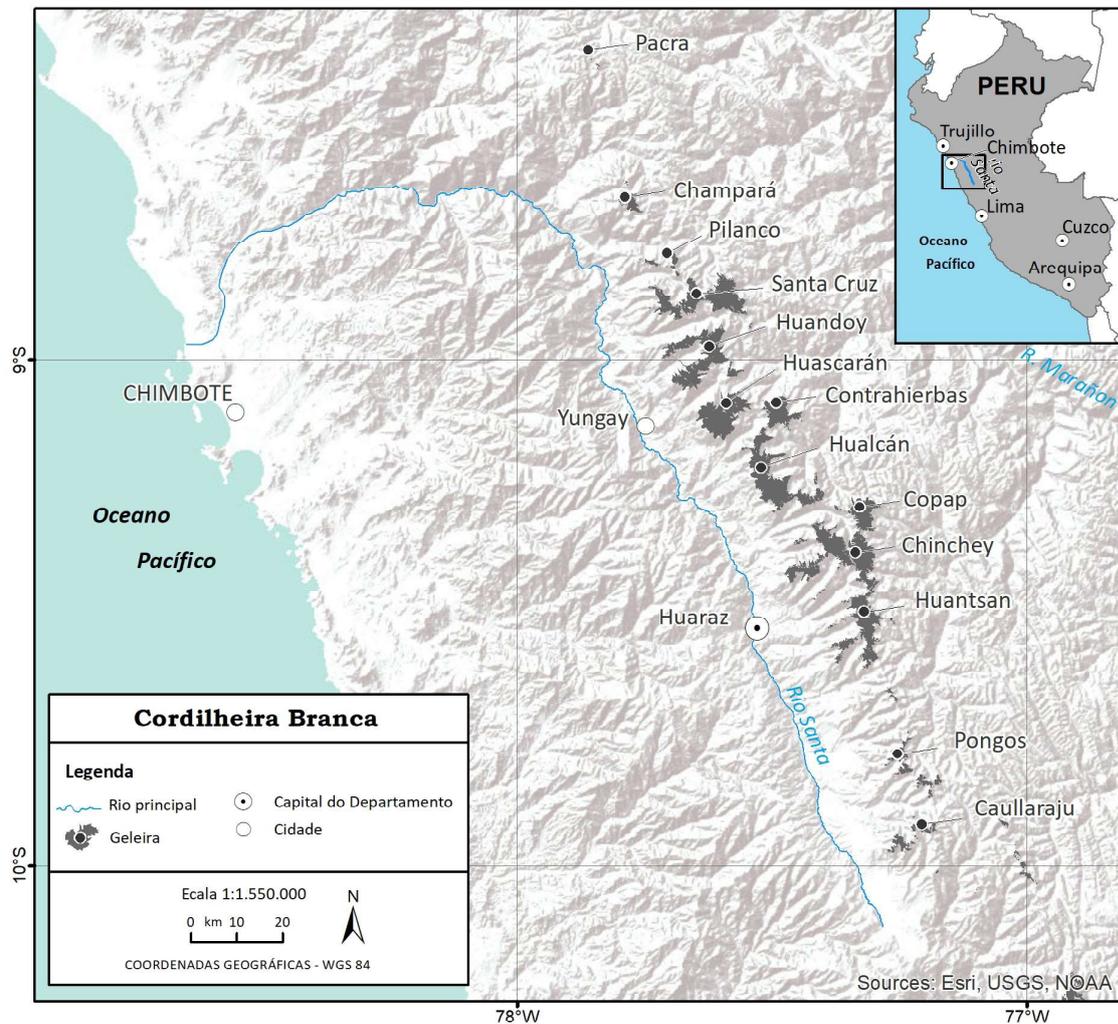


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo (cartografia dos autores).

3. Materiais e Métodos

3.1 Dados

A metodologia de *geomorphons* (JASIEWICZ e STEPIŃSKI, 2013) foi aplicada nos MDEs: Shuttle Radar Topography Mission (SRTMGL 1) e o ALOS PALSAR (Tabela 1).

A partir do MDE SRTMGL 1 foram extraídos os seguintes parâmetros morfométricos e hidrológicos que auxiliam na delimitação das formas de relevo glaciais: (I) declividade para as formas de planícies glaciofluviais; (II) áreas de depressões para classificação das formas de picos; (III) distância do talvegue – buffer de 500 m – para delimitação de formas morânicas; (IV) delimitação de bacias hidrográficas e fluxo de drenagem para classificação das formas de vales em circo; (V)

perímetro e área das bacias para delimitação dos vales em circo; (VI) fator LS (comprimento e declividade da rampa) para classificação das formas de encostas e vales em U e em V; (VII) hipsometria e declividade para método de Dikau *et al.* (1995); e (VIII) índice de Posição Topográfica.

As áreas de depressões foram obtidas através da subtração do MDE SRTMGL1 com interpolação dos dados de altitude e o MDE SRTM sem preenchimento. A área interpolada foi denominada depressão. Para a delimitação das bacias com vales em circo, foi aplicado um índice de circularidade da bacia utilizando a equação:

$$I_c = 12,57 A/P^2 \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo A= área e P=perímetro da bacia.

Tabela 1: Dados das imagens utilizadas para extração de atributos do relevô.

Sensor	Banda	Resolução espacial	Acurácia vertical	Fonte
SRTMGL 1	C	30 metros	16 m (ARRAS <i>et al.</i> , 2017)	https://earthexplorer.usgs.gov/
ALOS PALSAR modo FBD	L	12,5 metros	Variável	https://vertex.daac.asf.alaska.edu/

3.2 Mapeamento dos elementos de *geomorphons* e método de reclassificação das formas de relevô

A metodologia utilizada na classificação de *geomorphons* foi baseada em Jasiewicz e Stepínski (2013). Ressalta-se que o processamento do MDE é feito em ambiente *online* utilizando o aplicativo <http://sil.uc.edu/geom/app>. Os autores (JASIEWICZ e STEPÍNSKI, 2013) utilizaram a similaridade textural do MDE que

apresentou a variação de níveis de cinza em relação às células vizinhas. Para esse cálculo, os perfis foram definidos para as direções principais da célula central “lookup distance” L extraída do MDE. As formas de relevô classificadas foram (Figura 02): plano (flat), pico (peak), crista (ridge), ressaltos (shoulder), espigão ou crista secundária (spur), encosta (slope), escavado (hollow), base de encosta (footslope), vales (valley), e fosso (pit).

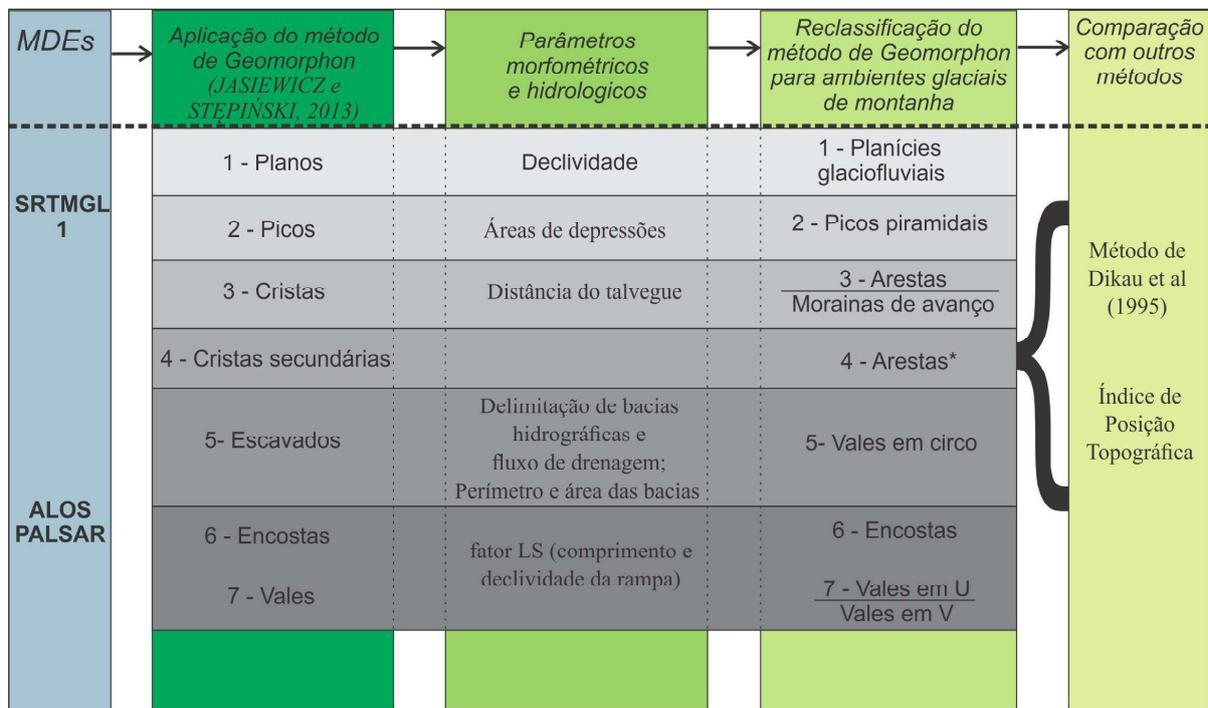


Figura 2 - Fluxograma descreve a metodologia utilizada para realização desta pesquisa. A partir dos MDEs foram gerados os elementos dos geomorphon, e a partir de elementos morfométricos e hidrológicos foi realizada uma reclassificação. Elaborado pelos autores.

A partir dos elementos de relevô apresentados pelo método *geomorphon* (JASIEWICZ e STEPÍNSKI, 2013) foi criada a metodologia de reclassificação por árvore de decisão (RGDC). As formas de relevô classificadas no método de *geomorphon* como “planas” correspondem às áreas de planícies glaciofluviais; as formas de relevô de pico correspondem às áreas de picos

piramidais; as áreas de cristas são contínuas e se subdividem em arestas e morainas; as cristas secundárias correspondem a arestas¹; as encostas permanecem como áreas de encostas (paredes de vales) no relevô glacial; as áreas de escavado correspondem às formas de relevô de vales em circo e as de vales podem ser em U (vales mais encaixados) e em V (vales mais amplos) (Figura 03).

¹ Arestas mais intemperizadas em relação à classe “cristas do *geomorphon*”.

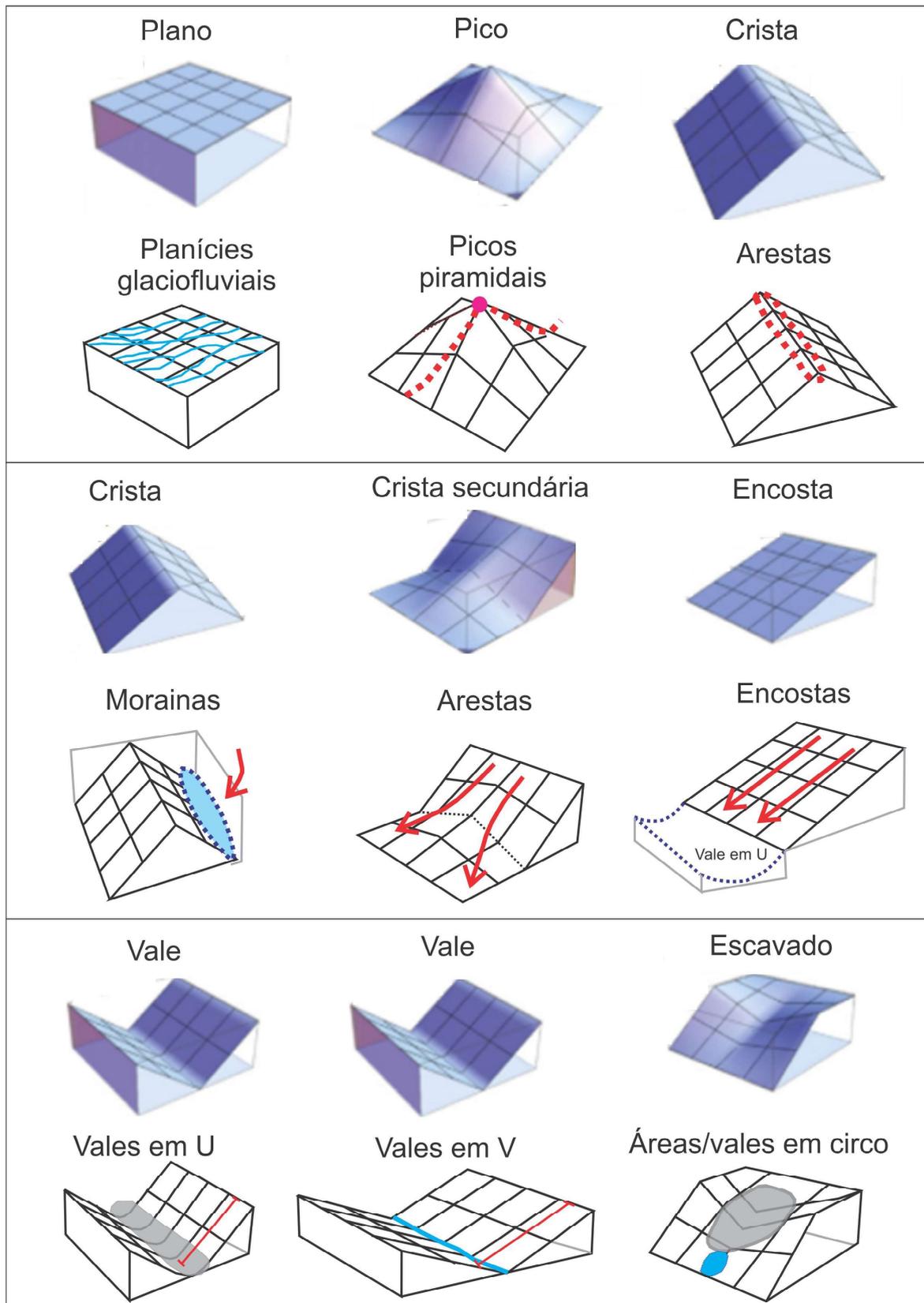


Figura 3 - Adaptação das formas de relevo do geomorphons para formas de relevo glacial. "Plano" foi adaptada para a forma de planícies glaciofluviais; picos foram classificados como picos piramidais; cristas foram adaptadas para arestas e morainas; cristas secundárias foram adaptadas para arestas*; encostas permanecem como tais formas; os vales foram divididos em vales em U e V; e por fim, os escavados foram adaptados para vales em circo. Elaborado pelos autores com base em Jasiewicz e Stepiński (2013).

3.3 Mapeamento geomorfométrico por outros métodos

A abordagem de Dikau *et al.* (1995) é baseada na curvatura da superfície para a classificação do terreno em cristas, vales e encostas. O método foi adaptado para aplicação nesta pesquisa segundo os critérios de declividade e gradiente altimétrico. As classes de declividade foram definidas de acordo com os valores que se adequaram melhor à representação do relevo (0 -8, 8-20, 20-50 e 50-80%), enquanto as classes de gradiente altimétrico foram classificadas com intervalos de 500 m, entre 3000 e 6000 metros de altitude.

O Índice de Posição Topográfica (IPT) proposto por Weiss (2001), é baseado em um algoritmo que calcula a diferença entre a elevação de um ponto central (Z0) e a média da elevação (Z) ao seu redor com raio (R). Os valores obtidos variaram entre -2 e 2 e as classes mapeadas foram de cristas, vales e encostas.

3.4 Avaliação de precisão

Para avaliar a precisão dos métodos RGDC (Dikau *et al.* 1995), e IPT, foi gerada uma matriz de confusão. Foram determinados os valores percentuais em que a classificação semiautomática gerada a partir destes métodos corresponde ao mapeamento gerado a partir da análise visual.

3. Resultados

3.1 Proposta de nomenclatura de classes de relevo dos elementos de *geomorphons*

A relação entre os elementos de *geomorphon* e o relevo glacial de montanhas foi obtida a partir de uma reclassificação do método original e aplicado para as formas de relevo glacial.

A utilização dos elementos de *geomorphon* de declividade, fator topográfico, polígono de depressão e índice de circularidade resultou na classificação das formas que podem ser aplicadas no mapeamento do relevo glacial (Tabela 2).

Utilizando a delimitação automática de bacias e a aplicação do índice de circularidade, foi possível identificar as áreas de vales em circo. O método de *geomorphon* apresentou dificuldades para classificar essa forma, delimitando as seguintes classes: 35% de áreas de encostas, 28% de escavados e 22% de vales, 10% de cristas secundárias e 5% de arestas e picos piramidais. Nesse exemplo, em específico, o índice de circularidade foi de 0.73 e um lago próximo ao exutório da bacia.

Tabela 2: Formas de relevo obtidas com o RGDC. Salienta-se que somente as formas de encostas e cristas secundárias são delimitadas com precisão pelo método original, sem alterações necessárias.

<i>Geomorphon</i> original	RGDC	Critério adotado para delimitação
Plano	Planícies glaciofluviais	<i>Geomorphon</i> Plano Declividade < 3% Fator LS < 21
Pico	Picos piramidais	<i>Geomorphon</i> “pico” Área de depressão
Crista	Arestas	<i>Geomorphon</i> Crista
	Moraina de avanço	<i>Geomorphon</i> Crista Distância do talvegue – buffer de 500 m
Crista secundária	Arestas*(mais retrabalhadas)	<i>Geomorphon</i> “Crista secundária”
Encosta	Encostas	<i>Geomorphon</i> “Encosta”
Escavado	Áreas/vales em circo	<i>Geomorphon</i> “Escavado” Índice de circularidade da bacia Presença de lago (fluxo de água convergindo para o centro da bacia)
Vales	Vales em U	<i>Geomorphon</i> Vale LS >21
	Vales em V	<i>Geomorphon</i> Vale LS <21

As áreas de arestas e morainas são inseridas na classe de “cristas”. A crista morâinica de avanço (Figura 04) apresenta predominância de 75% de cristas, 20% de picos piramidais e 5% de encostas. Com a aplicação do buffer de 500 m na linha de talvegue, todas morainas foram incluídas na nova reclassificação

- RGDC. Para os picos piramidais, os *geomorphons* delimitaram essa área como sendo de picos, 97% para o caso do exemplo em questão, e 3% foi classificado como sendo de cristas. Aplicando um polígono de *depressão*, esses picos piramidais foram praticamente todos identificados.

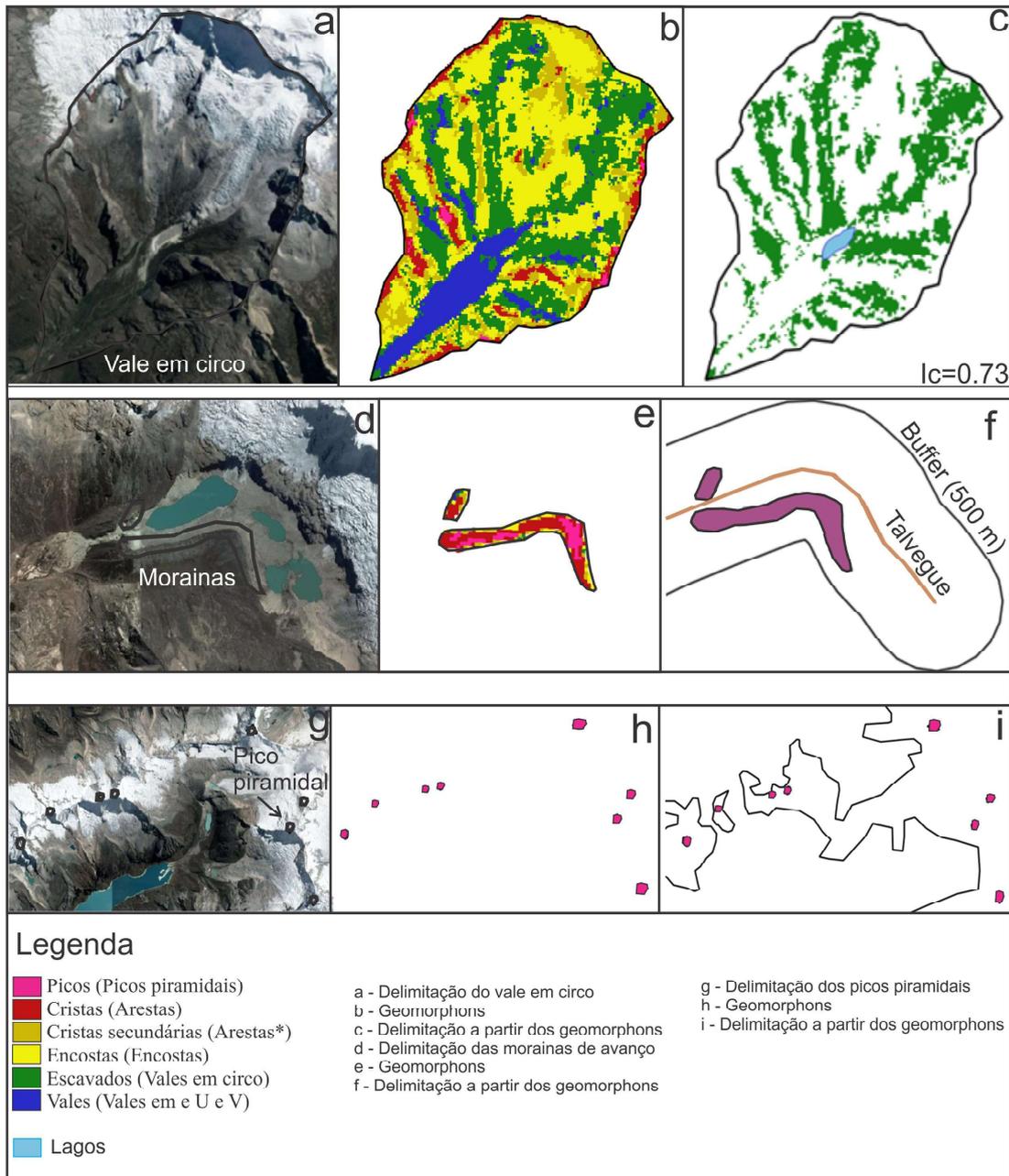


Figura 4 - a – Delimitação do vale; b – O método de geomorphon identificou encostas e escavados como as principais formas da bacia; c – Os parâmetros aplicados para identificação da forma de vale em circo demonstram fluxo convergindo para um lago e índice de circularidade da bacia em 0,73; d – Delimitação das morainas de avanço; e – Método do geomorphon delimitou as morainas como áreas de cristas; f – Buffer de 500 metros no talvegue permitiu individualizar as morainas em relação as arestas; g – Delimitação das áreas de picos piramidais; h – Método do geomorphon classificou os picos piramidais como picos; i – Áreas de depressão permitiram classificar as áreas de picos piramidais e diferenciá-las de outras áreas que foram erroneamente classificadas como picos. Elaborado pelos autores.

Para as áreas com encostas (Figura 05), o método de *geomorphon* demonstrou resultados satisfatórios, com 97% da classificação apontando para a classe “encosta”. Os outros 3% referem-se a áreas de escavados e cristas secundárias. Para dividir as áreas de encostas com processos glaciais predominantes daquelas que já possuem processos fluviais associados, foi aplicado um índice LS para definir o comprimento e a declividade das formas.

O método dos *geomorphons* também apresentou resultados satisfatórios na determinação dos vales glaciais, com 80% da área dentro da classe “vale”. O fator LS também foi utilizado para diferenciar os vales em U ($LS > 21$) dos vales em V ($LS < 21$). Este parâmetro morfométrico foi escolhido como forma de separação dessas feições, já que as encostas sob processos glaciais possuem menor comprimento de rampa e maior declive em relação à porção do vale fluvial.

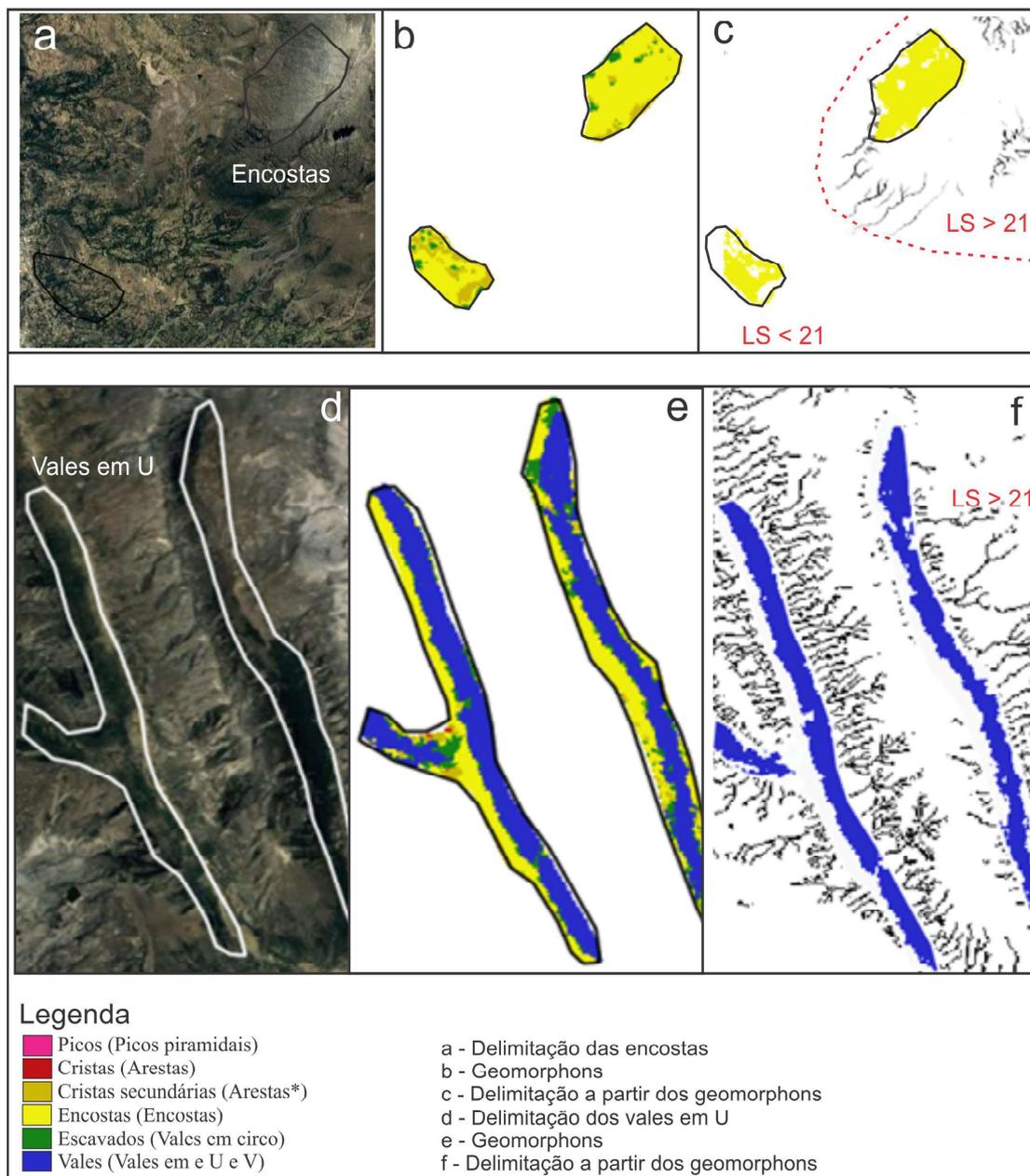


Figura 5 - a – indica a encosta delimitada através de interpretação visual; b – resultado obtido com o método geomorphon; c – indica o método utilizado para separar encostas dos vales em V dos vales em U; d – corresponde à delimitação visual dos vales em “U”; e – refere-se ao resultado obtido com o método geomorphon; f – demonstra o resultado obtido com o método de distinção entre os vales em U e em V. Utilizando o fator topográfico LS foi possível distinguir as encostas quanto ao seu comprimento e declividade e, assim, diferenciar os elementos de relevo do tipo vales. Elaborado pelos autores.

Para toda a área da Cordilheira Branca, obteve-se uma diferença entre a porcentagem de formas determinadas pelos elementos de *geomorphons* e as formas reclassificadas propostas (Figura 06). A classe de vales em circo foi uma das que mais apresentou confusão na delimitação, com as seguintes classes de *geomorphons*, aproximadamente: 0,6% de picos, 6,5% de cristas, 14,7% de cristas secundárias, 31,7%

de encostas, 35,3% de escavados e 10,9% de vales. A classe de vales também apresentou problemas, sendo composta de 0,1% de picos, 1,1% de cristas, 5,1% de cristas secundárias, 28,2% de encostas, 13,8% de escavados e 51,3% de vales. A classe de picos piramidais e arestas foi representada, pelo método de *geomorphon*, em sua maioria, com as seguintes formas: 88,2% de picos e 90% de cristas.

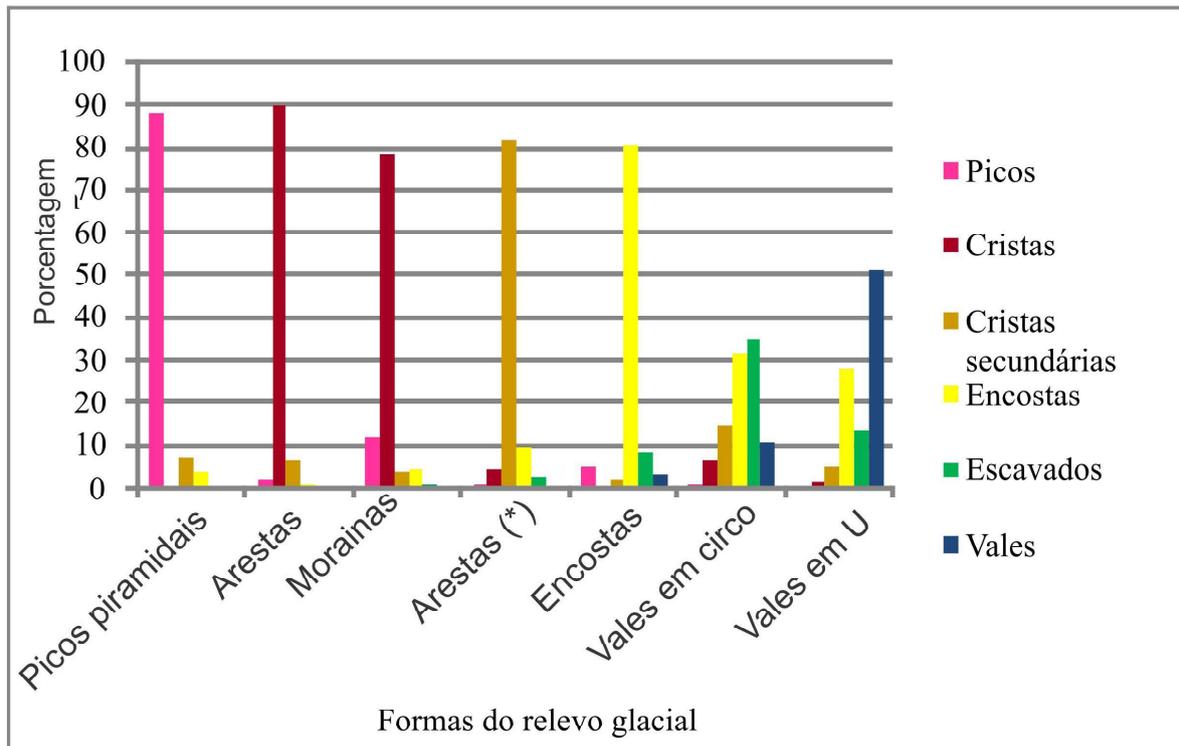


Figura 6 - Porcentagem de elementos de relevo geomorfon dentro de cada classe da RGDC. As formas que apresentaram maior confusão foram os vales em circo e em U. Elaborado pelos autores.

3.2 Comparação com outros métodos de mapeamento de formas de relevo

Os resultados para a primeira área teste (bacia glacial com as formas glaciais de vales em U, picos piramidais, arestas, vales em circo, encostas e arestas*) (Figura 07) mostram melhor precisão no método RGDC.

O método proposto por Dikau *et al.* (1995) identificou 3 classes de formas de relevo, com as cristas ocupando 15% da área, as encostas ocupando 71% e os vales 14% da porção de teste. O método de identificação das formas de relevo pelo Índice de Posição Topográfica classificou 11% da área como sendo de cristas, 65% de

encostas e 24% de vales. O RGDC relevo indica que a classe de vales em U corresponde a 10% da área, possui declividade entre 0-4%, com altitude entre 3500 e 4500 m; os picos piramidais e arestas correspondem a 1% e 9% da área, com declividade acima de 54% e 40%, respectivamente, e altitude acima de 5000 m; as áreas de escavado ocupam 21% da área, possuem declividade entre 0-4%, com altitude entre 4500 e 5000 m; as encostas correspondem a 42% da área, com declividade entre 0-30% e a altitude acima de 4500 m; as arestas* ocupam 17% da área teste e possuem declividade entre 30-40%, com altitude acima de 5000 metros.

O método de Dikau *et al.* (1995) permitiu delimitar com melhor precisão (93%) o vale em U principal, porém os vales das geleiras tributárias não foram classificados. As áreas de cristas foram classificadas com precisão de 75%, mas o método não identificou as cristas das geleiras tributárias e algumas áreas de encostas foram identificadas erroneamente. Para o caso das encostas, a precisão foi de 62%, já que foram delimitadas erroneamente áreas de cristas secundárias e escavados dentro dessa classe.

O método do IPT classificou as áreas de vale com

precisão de 72%, identificando vales em U das geleiras tributárias, porém classificando alguns escavados como sendo pertencentes a essa forma. As cristas foram delimitadas com precisão de 95%, alcançando melhor precisão que o método RGDC. Para as encostas, apesar de o ITP ter classificado escavados e cristas secundárias como pertencentes a essa classe, apresentou acurácia de 74%. Para o RGDC, as classes foram de picos piramidais, arestas, morainas, arestas*, encostas, vales em circo e vales em U, e apresentaram acurácia de 98%, 94%, 100%, 88%, 91%, 75% e 87%, respectivamente.

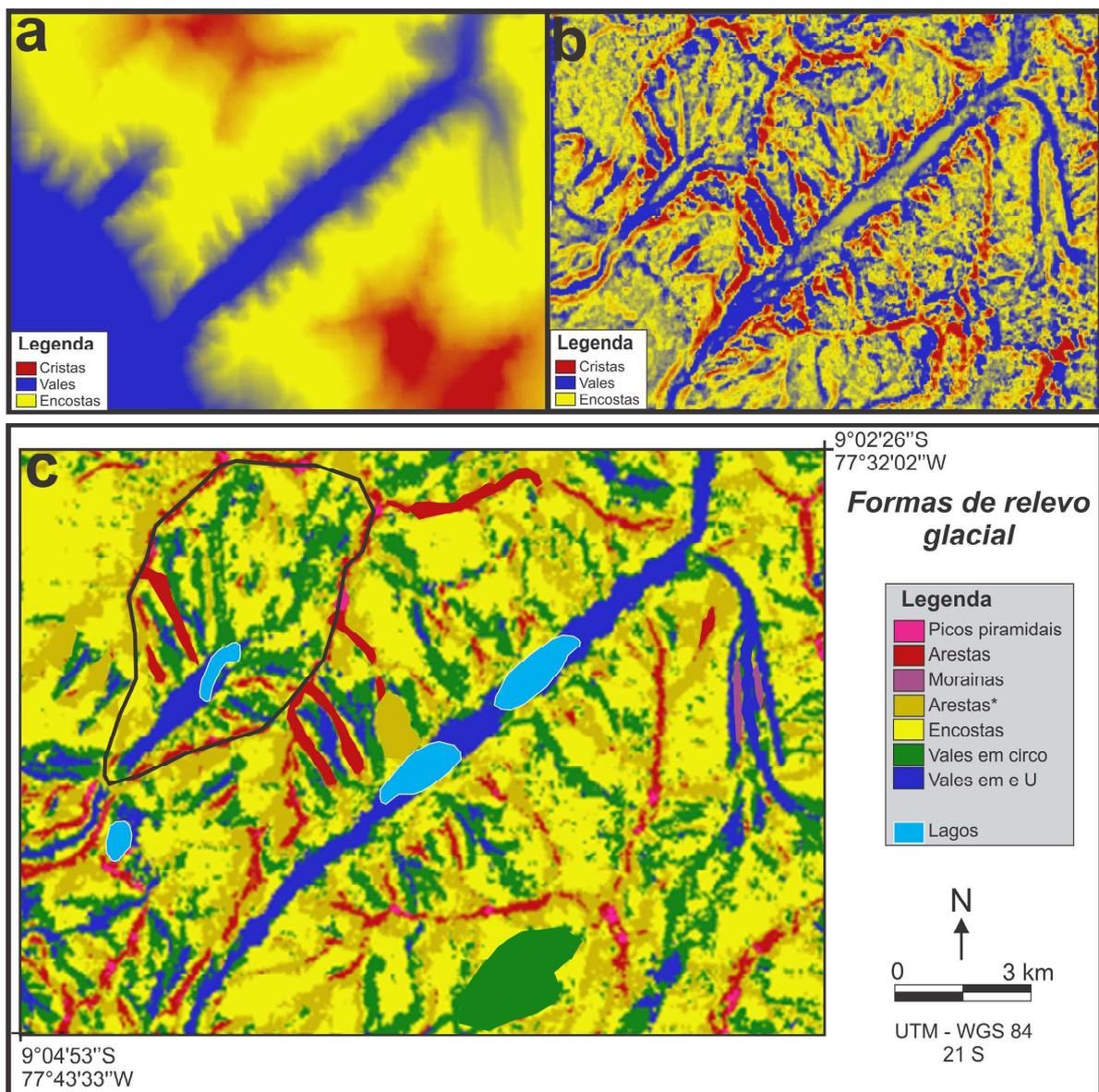


Figura 7 - Os métodos propostos por Dikau *et al.* (1995) (A) e o IPT (B) identificaram somente 3 classes de formas de relevo. O novo método proposto (C) identificou as classes de picos piramidais, arestas, morainas, arestas*, encostas, vales em circo e vales em U. No método de Dikau as cristas apresentaram forma tabular, enquanto o método do IPT classificou erroneamente áreas de vales nas porções de encostas e escavados. Elaborado pelos autores.

Na segunda área de teste (Figura 08), há a presença de um longo vale em U e de um vale em circo. A classificação, segundo o método de Dikau *et al.* (1995), identificou 13% como cristas, 60% como encostas e 27% como vales. O método do ITP identificou 16% da área como sendo da forma de cristas, 52% como sendo de encostas e 31% sendo de vales.

No novo método proposto, a classe de vales em U ocupa 8% da área, possui declividade entre 0-4% com altitude entre 3500-4000 m; os picos piramidais correspondem a 1%, têm declividade acima de 40% com altitude acima de 5000 metros; as arestas correspondem a 6%, possuem declividade acima de 30% com altitude acima de 5000 metros; as áreas de escavado ocupam 21% da área, possuem declividade entre 0-16% com altitude entre 4000 e 4500 m; as encostas ocupam 42%, têm declividade entre 0-30% com altitude entre 4000 e 5000 metros; as

arestas* correspondem a 22%, possuem declividade entre 30-40% com altitude entre 4000 e 5000 metros.

O método de Dikau *et al.* (1995) identificou os vales em U com precisão de 89%, apresentando problemas na classificação dos vales das geleiras tributárias, não identificando a maioria delas (Figura 08); para as áreas de cristas, a acurácia foi de 74%; para a área das encostas, a precisão foi de aproximadamente 71%, delimitando áreas de escavados e cristas secundárias erroneamente. O método de ITP classificou as áreas de vales com acurácia de 86%, permitindo a delimitação dos vales tributários; para a área de cristas a precisão foi de 89%, enquanto as encostas tiveram precisão de 82%. Para o RGDC, a acurácia para as classes de picos piramidais, arestas, morainas, arestas*, encostas, vales em circo e vales em U foi de 99%, 92%, 100%, 88%, 89%, 79% e 88%, respectivamente.

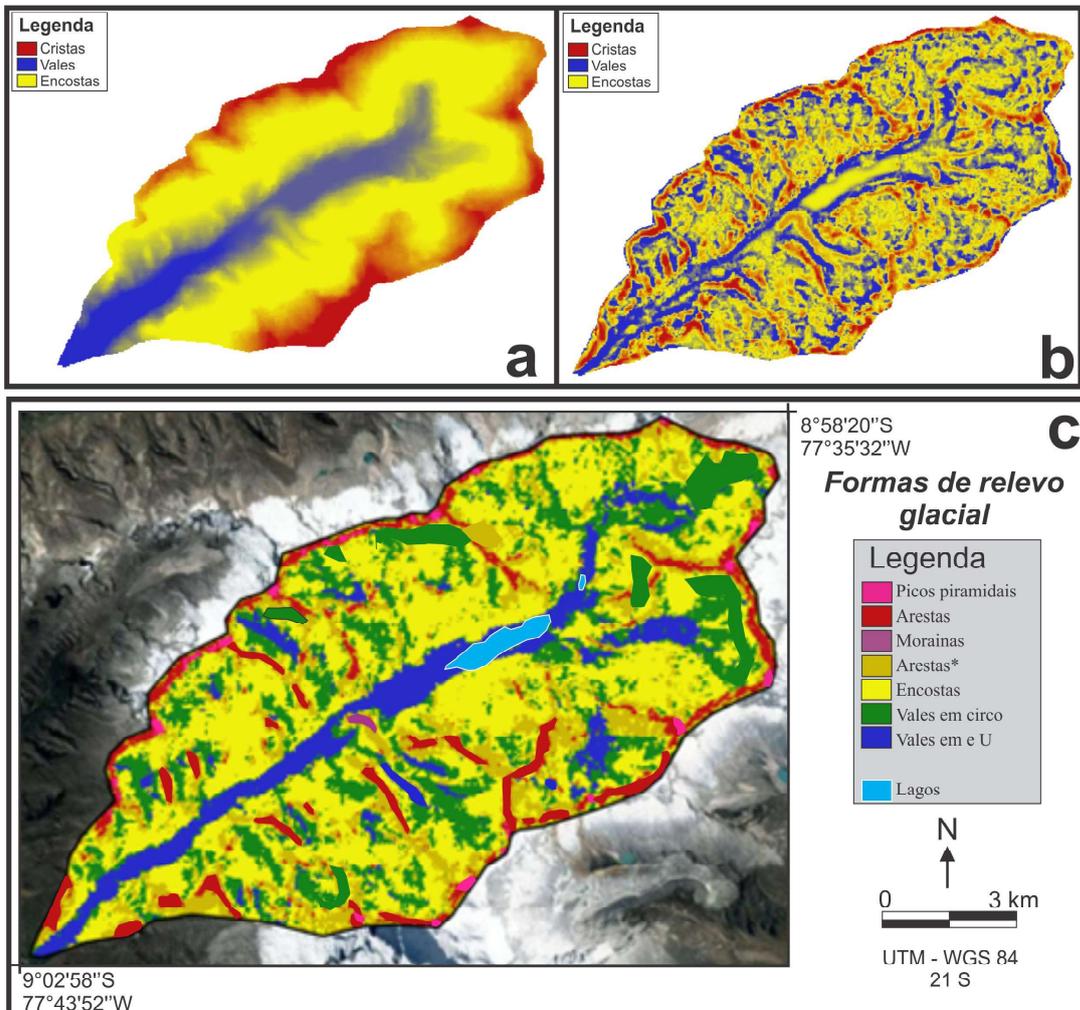


Figura 8 - Os métodos propostos por Dikau *et al.* (1995) (A) e o IPT (B) identificaram 3 classes de formas de relevo. O novo método proposto (C) identificou as classes de picos piramidais, arestas, morainas, arestas*, encostas, vales em circo e vales em U. Os métodos de Dikau e o IPT generalizaram toda a classe de encostas enquanto no novo método foram identificadas arestas* e vales em circo. Elaborado pelos autores.

3.3 Comparação entre as classificações geradas pelo MDE SRTMGL1 e pelo ALOS PALSAR

O MDE do SRTMGL1 (Figura 9) proporcionou classificação com maior homogeneidade, principalmente no que tange às áreas de vales e arestas, com precisão

de 88% e 85%, respectivamente. O ALOS PALSAR possui incoerências nas áreas de menor altitude, permitindo somente acurácia de 41% na identificação dos vales em U. Para as classes de arestas, a acurácia foi de 63%.

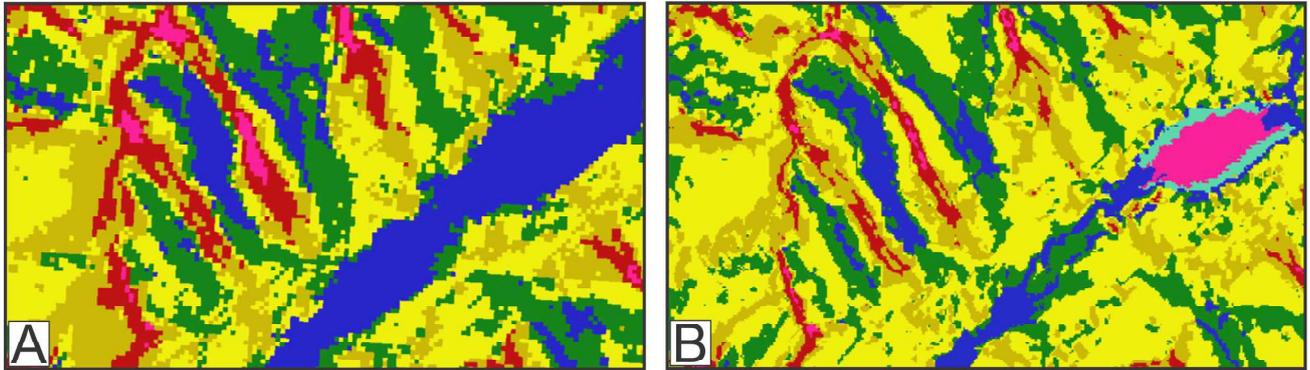


Figura 9 - A) indica o método de geomorphon obtido com o MDE SRTMGL 1, com escala espacial de 30 m; B) classificação de geomorphon obtido com o MDE ALOS PALSAR de escala espacial de 12,5 m. Apesar de haver maior detalhamento, ocorrem erros significativos para as classes de arestas e vales em U. Elaborado pelos autores.

4. Discussões

4.1 Reclassificação do Método de Geomorphons - RGDC

Os resultados evidenciam a dificuldade de identificação automática para a classe de áreas planas devido à resolução espacial dos MDE. Mesmo utilizando o MDE do ALOS PALSAR, não foi possível a identificação das áreas de planícies de lavagem glaciofluviais.

As áreas de picos piramidais corresponderam às elevações isoladas por depressões e piramidais, que são, basicamente, as maiores cotas de elevação da imagem SRTMGL 1. Delimitando as áreas de depressão, ou seja, aqueles valores de cotas que foram preenchidos por interpolação, obteve-se de forma satisfatória uma provável zona de picos. O método RGDC permitiu identificar praticamente todas as áreas de picos piramidais. As áreas de cristas delimitadas pelo *geomorphon* foram divididas em morainas e arestas. Quanto às arestas, estas se espacializam nas áreas de interflúvios, com predominância de cristas alongadas. O critério adotado para delimitação de distância do talvegue (no caso um buffer de 500 m) foi satisfatório para delimitar as morainas terminais, as quais se apresentam arqueadas e denotam o avanço do sistema glacial na área de estudo. As morainas mapeadas nesse estudo estão provavelmente associadas ao avanço durante a Pequena Idade do Gelo (RABATEL *et al.* 2006; JOMELLI *et al.* 2009).

Morainas de recessão caracterizam-se por suas menores dimensões (geralmente de 2–5 m de comprimento e 1–2 m de altura) em relação às terminais e sua identificação foi limitada pela resolução horizontal e acurácia vertical dos MDEs. Além disso, Iturrizaga (2018) destaca que as frentes das geleiras podem estar cobertas por sedimentos, o que pode mascarar os resultados obtidos por dados do MDE na classificação de formas de relevô glaciais.

As áreas de encosta e dos vales em U e V diferenciam-se justamente pela declividade e comprimento da vertente. As encostas glaciais encontram-se em áreas com maior declividade, erodidas e sujeitas a processos de movimentos de massa, enquanto as encostas de transição entre a área de montanha e a planície do rio Santa são zonas de colúvios, com declividade entre 0–8%. Todavia, os vales glaciais se apresentam mais entalhados e a erosão glacial pode ter acelerado o desenvolvimento e a dominância de encostas curtas e de alta declividade (FRANZMEIER *et al.*, 2004).

As áreas correspondentes a escavados (método original do *geomorphon*) são aquelas em que as geleiras promovem fraturamento, transporte e abrasão contínua das encostas. A maioria das encostas glaciais apresenta elevado número de vales em circo encaixados próximos aos divisores de drenagens. A abrasão glacial das paredes das encostas causa arrancamento e gera

pequenas áreas escavadas (menores que 2 km²) que podem evoluir para vales em circo, enquanto as porções mais baixas dos vales em circo apresentam depressões que, no MDE ALOS PALSAR, são classificadas como áreas escavadas. Essas feições de depressão são erodidas onde convergem as diversas massas de gelo que escoam pela vertente e são propícias para o acúmulo de água de degelo, formando lagos. Devido à alta diversidade de formas que podem ser encontradas dentro do vale em circo, a precisão da delimitação dessa feição não é alta.

Os vales em U e V são classificados como sendo da mesma classe “vale” no método dos *geomorphon*. O principal critério para distinção entre eles baseou-se no modelado das encostas, estabelecendo um limiar de diferenciação utilizando o fator LS (comprimento e declividade da vertente). Os vales em V se apresentam em áreas com as encostas com pouca declividade e grande extensão, enquanto os vales em U já se apresentam mais encaixados, com encostas com maior declividade e menor comprimento de encosta. A área da cordilheira Branca apresentou, de maneira geral, vales longos, retilíneos e extensos, com alinhamento NO-SE de suas cristas (longas e estreitas).

Avaliando quantitativamente, verifica-se que a classe de arestas foi a mais facilmente identificada utilizando os *geomorphons*, com cerca de 90% das suas áreas se encaixando na classe de crista; o mesmo ocorreu para classes de picos piramidais que possuem similaridade de 88% com picos. As arestas* residuais de processos erosivos foram classificadas como sendo da classe de crista secundária, com precisão de 91%. A área de encostas também identificou com precisão áreas de vertentes retrabalhadas por processos glaciais, com similaridade de 81% com o observado através da interpretação visual. As arestas* e as encostas não foram reclassificadas, porque no primeiro caso delimitaram com precisão aceitável as formas, e para o segundo caso, porque é uma forma que também pode apresentar outras classes inseridas, como escavados nas paredes das vertentes.

No método *geomorphon*, as áreas de morainas predominam como sendo classificadas como cristas (48%), porém também são confundidas com cristas secundárias e picos. Esse problema está ligado justamente ao tamanho da moraina e do MDE, contudo com o critério de proximidade do talvegue a delimitação automatizada garante 100% de precisão. Os vales em U têm, na sua maioria (72%), *geomorphons* do tipo vale,

contudo também ocorrem encostas e escavados. Nesse caso, ressalta-se que é difícil delimitar os limites do vale, assim como foi com a encosta, já que a transição para as encostas e escavados pode não ser tão clara. A classe que demonstra maiores dificuldades na delimitação foi a de vales em circo, que apresenta 33% de escavados e 31% de encostas. Ainda que as paredes desses vales sejam escavadas pela geleira, movimentos de massa podem preencher essas áreas, transformando-as em encostas, dificultando a delimitação automática.

Apesar dos resultados significantes encontrados com a delimitação automática das formas de relevo, ressalta-se que é necessária a interpretação visual pós-processamento, não só na comparação dos resultados, mas no estabelecimento dos parâmetros morfométricos e hidrológicos que foram utilizados na reclassificação.

4.2 Comparações entre os métodos de mapeamento digital de relevo

A metodologia de *geomorphon* forneceu detalhamento melhor da curvatura da superfície, possibilitando a identificação de 7 tipos de formas de relevo com picos piramidais, arestas, morainas, arestas*, encostas, vales em circo e vales em U em relação aos métodos de Dikau *et al.* (1995) e ITP, que mapearam somente 3 classes. Kramm *et al.* (2017), ao comparar os resultados de formas de relevo obtidas entre o método de Dikau, ITP e *geomorphon*, conseguiram melhores resultados para os dois últimos. Os resultados do RGDC possibilitaram extrair as morainas de avanço, o que constituiu um importante avanço para mapeamento de formas glaciais, já que pode auxiliar em estudos de reconstrução paleoglaciológica. Além disso, constata-se a relevância da obtenção da classe de vales em circo.

A principal contribuição do método de Dikau *et al.* (1995) foi a classificação dos vales em U com maior acurácia em relação aos demais métodos. Contudo, ele não permitiu identificar os vales em U de geleiras tributárias. Como pontos negativos, as cristas se apresentaram com aspecto de chapadas; também não se mostrou adequado para as áreas com grande variação de elevação, pois generalizou áreas de cristas, vales e encostas como sendo uma grande classe de vales.

O método do ITP permitiu acurácia praticamente igual ao método RGDC considerando a forma de cristas, sendo os dois métodos importantes para delimitar bacias glaciais. Quanto aos pontos negativos, para o

vale principal, algumas áreas foram delimitadas como sendo de encostas e houve uma superestimação das áreas de vales.

4.3 Implicações das resoluções dos Modelos Digitais de Elevação

A melhoria de resolução espacial com o uso do MDE do ALOS PALSAR não apresentou ganhos significativos na identificação de formas de relevô. Na área de vales em U, ocorrem classes classificadas erroneamente como sendo de escavados e cristas, devido à problemas na interpolação do MDE. Além disso, ocorrem áreas de confusão em vales de geleiras tributárias, sendo classificadas erroneamente como escavados. Também ocorrem problemas na delimitação de picos piramidais, porque o MDE tem valores de elevação errôneos para os pontos de maiores elevações devido a uma possível menor acurácia vertical quando comparado ao SRTMGL1.

Para outras áreas, com relevô sujeito a processos gerados por geleiras de montanhas, é necessário adaptar algumas classes, como o valor de corte no fator LS para diferenciação de encostas dos vales em U e em V. Para a classe de cristas que identificam as morainas, é necessário haver modificação no tamanho do buffer para delimitar a área de talvegue. Isso irá depender do grau de entalhamento dos vales.

5. Considerações Finais

Os resultados do novo método de identificação dos elementos do relevô proposto neste trabalho foram satisfatórios para a identificação de formas de relevô glaciais de macro e mesoescala e contribuem para a compreensão de fatores atuantes na modelação do relevô glacial de montanha. Essa nova abordagem pode proporcionar novas discussões sobre a interpretação da evolução geomorfológica em apoio à interpretação paleogeológica e ao entendimento da ocupação territorial ao longo do Holoceno na área da Cordilheira Branca.

O método RGDC apresentou acurácia maior que 85% para as classes de picos piramidais, arestas, morainas terminais, encostas e vales em U. O vale em circo foi a forma mais difícil de identificar, devido a sua complexidade e à heterogeneidade de classes existentes. Apesar de ser uma forma erosiva caracterizada por escavados, também apresenta encostas e um vale em U na porção mais baixa. A principal contribuição

do método é a identificação da forma de morainas de avanço, o que pode auxiliar em estudos de reconstrução de evolução das geleiras no passado.

Comparando com outros métodos, o de Dikau *et al.* (1995) apresentou potencial para representação das áreas de vale principal e o método de ITP tem potencial para o mapeamento de arestas. Contudo, em relação ao método RGDC, ele ainda é o que tem melhor resultado, já que além de apresentar alta acurácia apresentou uma maior diversidade de formas classificadas, sete em relação às três identificadas pelos outros métodos.

Comparando os MDEs, o ALOS PALSAR apresentou erros em altas e baixas elevações, classificando formas de picos piramidais e escavados dentro dos vales em U e escavados em áreas de picos piramidais e arestas. Dessa forma, ainda que o ALOS PALSAR possa proporcionar uma melhoria de escala e potencial para mapear morainas de recessão, que indicariam as recentes áreas de retração das geleiras, os erros na extração de outras formas de relevô foram discrepantes.

Referências Bibliográficas

- ALLRED, K. J.; LUO, W. Quantifying and predicting the glacial extent using valley morphometry and data-mining techniques. *Annals of GIS*, v. 22, n. 3, p. 203-214, 2016. DOI: 10.1080/19475683.2016.1195873
- ANA – AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA. **Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas**. Peru: ANA. Disponível em: <www.ana.gob.pe/media/981508/glaciares.pdf>. Acesso em 15 de maio de 2019.
- ARRAS, C.; MELIS, M.T.; AFRASINEI, G.-M.; BUTTAU, C.; CARLETTI, A.; GHIGLIERI, G. Evaluation and validation of SRTMGL1 and ASTER GDEM2 for two Maghreb regions (Biskra, Algeria and Medenine, Tunisia). In M. Ouessar, D. Gabriels, A. Tsunekawa, & S. Evett (Eds.), **Water and land security in drylands**. Springer. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-54021-4_24
- CHANDLER, B, M.P.; LOVELL, H.; BOSTON, C. M.; LUKAS, S.; BARRD, I. D.; BENEDIKTSSON, I. O.; BENN, D. I.; CLARK, C. D.; DARVILL, C. M.; EVANS, D. J. A.; EWERTOWSKI, M. W.; LOIBL, D.; MARGOLD, M.; OTTO, C.; ROBERTS, D. H.; STOKES, C. R.; STORRAR, R. D.; STROEVEN, A. P. Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 806–846, 2018. DOI: 10.1016/j.

earscirev.2018.07.015

CLAPPERTON, C. M. The Pleistocene moraine stages of west-central Peru. **Journal of Glaciology**, n. 11, p. 255–263, 1972. DOI: /10.3189/S0022143000022243

CLAPPERTON, C. M. The glaciation of the Andes. **Quaternary Science Review**, v. 2, p. 83–155, 1983. DOI: 10.1016/0277-3791(83)90005-7

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. Landform Classification of New Mexico by Computer. **Open File report 91-634**. U.S. Geological Survey, 1991.

DIKAU, R.; BRABB, E.; MARK, R.K.; PIKE, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico. **Zeitschrift Geomorphological Supplement**, n. 101, p. 109–126, 1995.

DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, n. 81, p. 330–344, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.04.013

EVANS, D. J.A.; YOUNG, N.J.P.; Ó COFAIGH, C. Glacial geomorphology of terrestrial terminating fast flow lobes/ice stream margins in the southwest Laurentide Ice Sheet. **Geomorphology**, n. 204, p. 86–113, 2014. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.07.031

FRANZMEIER, D. P.; STEINHARDT, G. C.; SCHHULZE, D. G. **Indiana Soil and Landscape Evaluation Manual**, Version 1.0 Purdue University, Agronomy Department, 2004, 72 p.

HILLIER, J.K.; BENEDIKTSSON, Í.Ö.; DOWLING, T.P.F.; SCHOMACKER, A. Production and preservation of the smallest drumlins. **GFF**, v. 140, n. 2, p. 136–152, 2018. DOI: 10.1080/11035897.2018.1457714

IPCC. Climate Change 2013: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Estados Unidos da América, 2013. 1535 p.

ITURRIZAGA, L. Glacial landform assemblages and pedestal moraines in the Cordillera Blanca (Peru). **Geomorphology**, n. 318, p. 283–302, 2018. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.06.012

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons a Pattern Recognition Approach to Classification and Mapping of Landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147–156, 2013. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.11.005

JULESZ, B. Textons, the elements of texture perception, and their interactions. **Nature**, n. 290, p. 91–97, 1981. DOI: doi.org/10.1038/290091a0

JOMELLI, V.; FAVIER, V.; RABATEL, A.; BRUNSTEIN, D.; HOFFMANN, G.; FRANCOU, B. Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and paleoclimatic implications: a review. **Review of Palaeobotany and Palynology**, n. 281, p. 269–282, 2009. DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.10.033

KRAMM, T.; HOFFMEISTER, D.; CURDT, C.; MALEKI, S.; KHORMALI, F.; KEHL, M. Accuracy Assessment of Landform Classification Approaches on Different Spatial Scales for the Iranian Loess Plateau. **SPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 11, p. 366, 2017. DOI: 10.3390/ijgi6110366.

KINZL, H. Gegenwärtige und eiszeitliche Vergletscherung in der Cordillera Blanca (Peru). **Deutschen Geographentages**, n. 1934, p. 41–56, 1935.

KINZL, H. Gletscher kundliche Begleitworte zur Karte der Cordillera Blanca. **Zeitschrift für Gletscherkunde**, n. 28, p.1–19, 1942.

KINZL, H. Die Vergletscherung der Südhälfte der Cordillera Blanca (Peru). **Zeitschrift Gletscherk Glazialgeol**, n. 1, p. 1–28, 1949.

KINZL, H.; SCHNEIDER, E. Cordillera Blanca (Peru) (Wagner). 1950.

LIAO, W. H. **Region Description Using Extended Local Ternary Patterns**. 20 International Conference on Pattern Recognition, p. 1003–1006, 2010.

LIBOHOVA, Z.; WINZELER, H. E.; LEE, B.; SCHOENEBERGER, P. J.; DATTA, J.; OWENS, P. R. Geomorphons: Landform and property predictions in a glacial moraine in Indiana landscapes. **Catena**, v. 142, p. 66–76, 2016. DOI: doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.002

LLIBOUTRY, L. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. **Journal of Glaciology**, n. 18, p. 255–273, 1977. DOI: 10.3189/S0022143000021341

NORRIS, S. L.; MARGOLD, M.; FROESE, D.G. Glacial landforms of northwest Saskatchewan. **Journal of Maps**, n. 13, p. 600–607. 2017. DOI: 10.1080/17445647.2017.1342212

OJALA, A.E.K.; PUTKINEN, N.; PALMU, J.P.; NENONEN,

- K. Characterization of De Geer moraines in Finland based on LiDAR DEM mapping. **GFF**, n. 137 (4), p. 304–318, 2015. DOI: 10.1080/11035897.2015.1050449
- OTTO, J. C.; SMITH, M. J. Geomorphological mapping. **British Society for Geomorphology**, v. 6, p. 1–10, 2013. ISSN 2047-0371
- PIKE, R. J.; EVANS, I.; HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Series Developments in Soil Science**, v. 33, Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 3-30.
- PRINCIPATO, S. M.; MOYER, A. N.; HAMPSCH, A. G.; IPSEN, H. A. Using GIS and streamlined landforms to interpret paleo-ice flow in northern Iceland. **Boreas**, n. 45, p.470–482, 2016. DOI: 10.1111/bor.12164
- RABATEL, A.; MACHACA, A.; FRANCOU, B.; JOMELLI, V. Glacier recession on Cerro Charquini (16°S), Bolivia since the maximum of the Little Ice Age (17th century). **Journal of Glaciology**, n. 52 (176), p. 110-118, 2006. DOI: 10.3189/172756506781828917
- RABATEL, A. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. **The Cryosphere**, v. 7, p. 81–102, 2013. DOI: 10.5194/tc-7-81-2013
- RIBEIRO, R.R.; SIMÕES, J.C.; ARIGONY-NETO, J.; RAMIREZ, E. Inventory of glacier-front positions using CBERS-2 data: a case study for the Bolivian Andes. **Glacier Mass Balance Changes and Meltwater Discharge. IAHS Publication**, v. 318, p. 135–142, 2007.
- SANCHES, A. M. **Variações na extensão da cobertura de gelo do Nevado Cololo, Bolívia**. Dissertação (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2013. 92p.
- SARASAN, A.; JÓZSA, E.; ARDELEAN, A. C.; DRAGUT, L. Sensitivity of geomorphons to mapping specific landforms from a digital elevation model: A case study of drumlins. **Area**. p. 1–11, 2018. DOI: 10.1111/area.12451
- WEISS, A. Topographic Position and Landforms Analysis. In: ESRI User Conference, 2001, San Diego, CA. **Anais...San Diego: Califórnia**. 2001.p.1.