ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Geomorfometria: uma análise de conceitos, métodos e aplicações em geografia física

Julio Manoel França da Silva[1], Chisato Oka-Fiori[2], Claudinei Taborda da Silveira[3]

[1] Professor adjunto da Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná – UNICENTRO, Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, Departamento de Geografia. juliosilva.geografo@gmail.com (autor correspondente). [2] Professora sênior da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Programa de Pós-graduação em Geografia. chisatofiori@gmail.com. [3] Professor adjunto da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Geografia. claudinei.ufpr@yahoo.com.br.

Artigo recebido em 15/01/2017 e aceito em 20/04/2017

R E S U M O

A Geomorfometria é uma ciência interdisciplinar atribuída de importantes bases conceituais e metodológicas para estudos voltados a quantificação da superfície terrestre, podendo oferecer um conjunto de recursos para mapeamento e predição do meio físico, diagnóstico/prognóstico ambiental e modelagem das formas e processos que possuem relação direta com a variabilidade topográfica de determinada paisagem. Buscando analisar bases teóricas, metodológicas e epistemológicas desta área do conhecimento, bem como indicar exemplos de aplicações em Geografia Física, o presente trabalho vislumbra caracterizar-se como uma contribuição inicial para pesquisas que necessitam entender as formas, processos e dinâmica do meio físico no contexto de abordagens quantitativas; analisando suas potencialidades e limitações.

Palavras-chave: epistemologia da geomorfometria, quantificação da paisagem, modelo digital de elevação, modelagem ambiental.

Geomorphometry: an analysis of concepts, methods and applications in physical geography

A B S T R A C T

The Geomorphometry is an interdisciplinary science assigned to of important concepts and methodologies for studies aimed at quantifying the earth's surface offering an array of resources for mapping and prediction of the physical medium, diagnosis/prognosis assessment and modeling of forms and processes we have a direct relationship with the topographic variability of a given landscape. Seeking to analyze theoretical, methodological and epistemological this science, as well as indicate examples of applications in Physical Geography, the present study envisions characterized as an initial contribution for searches that need to understand the forms, processes and dynamics of the physical medium in the context of quantitative approaches; by analyzing its potential and limitations.

Keywords: epistemology of geomorphometry, landscape quantification, digital elevation model, environmental modeling.

Introdução

A geomorfometria refere-se a uma área de conhecimento que busca, mediante diversos atributos e parâmetros, quantificar e parametrizar a superfície terrestre, bem como dos demais elementos do meio físico que com ela possuem relações (Chorley, 1957; Pike, 2000). Seus subsídios teóricos, técnicos e metodológicos baseiam-se na articulação das geociências com a matemática, estatística, engenharia e, mais recentemente, a ciência da computação, destacando-se como ciência interdisciplinar aplicável em diversificados campos do conhecimento (Tobler, 2000; Pike *et al.* 2009).

Considerando sua importância nas Ciências da Terra, o presente trabalho objetiva realizar uma análise bibliográfica dos principais conceitos, métodos e aplicações desta área do conhecimento, destacando sua articulação com diversificadas subáreas da geografia.

Apresenta-se, inicialmente, um breve histórico da quantificação da superfície terrestre, indicando seu desenvolvimento progressivo. Em seguida são analisados conceitos atuais correlatos, reiterando seu caráter de ciência interdisciplinar. Em um terceiro momento são delineadas as principais fontes atuais de dados de entrada, bem como algumas das técnicas utilizadas para seu processamento e derivação em objetos e parâmetros geomorfométricos. Considerando, suscintamente, exemplos de aplicações em áreas correlatas à Geografia Física, evidencia-se o destaque da geomorfologia como articuladora de um conjunto de interrelações com diversificados componentes bióticos e abióticos do meio físico,

mesmo daqueles condicionados pelas atividades humanas.

A abordagem bibliográfica delineada busca disponibilizar um arcabouço teórico, metodológico e epistemológico inicial desta área do conhecimento, considerando que sua popularização pode contribuir para que sejam verificadas, preliminarmente, as potencialidades e limitações dos recursos que oferecem, antecedendo sua eventual aplicação em Geografia Física.

Breve histórico

A quantificação da superfície terrestre possui bases advindas desde a Antiguidade, registradas em documentos das grandes civilizações desde período (ex. Grécia, China, Império Persa, Império Romano e Egito), cuja aplicabilidade destinava-se, majoritariamente, ao reconhecimento territorial, ao aproveitamento dos recursos naturais e à definição de estratégias militares. No entanto, pesquisas realizadas a partir de critérios científicos, somente se viabilizaram a partir da segunda metade do século XVIII, constatadas, por exemplo, em Barnabé Brisson (1777-1828), Carl Gauss (1777-1855) e Alexander von Humboldt (1769-1859), sendo atribuído a este último a primeira utilização do termo Geomorfometria em referência a análise da superfície terrestre por critérios matemáticos (Pike *et al.*, 2009).

Estas pesquisas fundamentaram-se, em grande parte, na técnica de isolinhas desenvolvida no mesmo período por Hutton (1774), que se baseou, por sua vez, nas denominadas Curvas de Contorno (Curvas de Nível) de Bruinz (1584). Destinadas à interpolação de pontos de inflexão para representar elevações e formas da superfície terrestre, esta técnica pode ser considerada uma das importantes inovações cartográficas da época, em virtude da conveniência, exatidão e fácil assimilação de suas propriedades perceptivas, se inserindo gradualmente nos levantamentos topográficos entre o final do século XVIII e meados do século XIX, particularmente no continente europeu e nos Estados Unidos. Destaca-se, em caráter evolutivo, a obra *"Sobre Curvas de Nível e Declividade"* de Cayley (1859), responsável por estabelecer importantes bases para a Geomorfometria contemporânea (Pike, 2000).

De acordo com Novo (2008), na segunda metade do século XIX os levantamentos topográficos incorporaram técnicas de registro de imagens geradas por exposição luminosa – a então nascente Fotografia – como é o caso daquelas tomadas de balões pelo Corpo de Engenharia da França a partir de 1858. Este contexto remete-se à primeira fase do Sensoriamento Remoto, cuja evolução metodológica, entretanto, decorreu-se somente nas quatro primeiras décadas dos anos 1900, impulsionada pelo uso sistemático de fotografias tomadas de aeronaves durante as duas guerras mundiais, concomitantemente ao progressivo aperfeiçoamento dos mecanismos fotográficos (lentes, filtros, sistemas de sincronização e filmes sensíveis à radiação ultravioleta).

Se inicialmente os produtos cartográficos gerados tinham finalidades estratégico-militares, gradativamente se inseriram na esfera civil, como é o caso do primeiro mapeamento sistemático do território brasileiro, cujo levantamento fotogramétrico, realizado entre 1942 e 1943 pela Força Aérea dos Estados Unidos, pautava-se no reconhecimento estratégico de territórios inexplorados de países americanos, incluindo o Brasil, por ocasião das alianças formadas durante a Segunda Guerra Mundial. Após o fim dos conflitos armados, as informações foram disponibilizadas ao então Conselho Nacional de Geografia, que posteriormente as compilou em cartas topográficas na escala 1:1.000.000 (Novo, 2008).

Considerando a primeira metade do século XX, abordagens quantitativas para representação da superfície terrestre se disseminaram, culminando na publicação de inúmeros trabalhos, dominantemente no campo da geologia e da geografia física. Pesquisas relevantes realizadas neste período são vislumbradas em Partsch (1911), que utilizou intervalo de 5x5 km^2 para produzir um dos primeiros mapas quantitativos de variação topográfica relativa; em Sherman (1932) que definiu parâmetros para modelar a inclinação do relevo e delimitar bacias de drenagem; em Imamura (1937), que aplicou integral hipsométrica para definição de feições geomorfológicas; em De Martonne (1941) que definiu intervalos e classes hipsométricas; e em Horton (1945) na definição de atributos para análise da rede de drenagem (Pike, 2000).

Nas décadas de 1950 e 1960, duas tecnologias imprescindíveis à geomorfometria atual iniciaram seu desenvolvimento progressivo: a) o Sensoriamento Remoto Orbital – tecnologia derivada da disputa espacial e armamentista protagonizada por Estados Unidos e ex-União Soviética (Guerra Fria); e b) a Computação Digital – resultante da revolução eletrônica que substituiu os computadores eletromecânicos do início dos anos 1940. Cabe destacar que a utilização das tecnologias mencionadas na esfera civil era restrita, devido ao sentido estratégico-militar dos sensores orbitais, assim como a limitação operacional inerente aos computadores então disponíveis;

incapazes de processar e analisar efetivamente objetos e fenômenos geoespaciais (Pike *et al.*, 2009).

As restrições de acessibilidade e uso dessas tecnologias não impediram, entretanto, a continuidade de uso de metodologias analógicas para representação topográfica, baseando-se em fotografias aéreas e dados derivados de campo; interpolados manualmente a curvas de nível.

Sobressaem neste período trabalhos voltados à: definição de integral de curva hipsométrica para análise de sistemas fluviais (Strahler, 1952); segmentação de bacias de drenagem (Chorley, 1957); utilização de cartões perfurados para tabulação de dados topográficos (Wood e Snell, 1957); revisão crítica das aplicações de dados básicos (hipsometria e declividade) no estudo de superfícies de erosão (Clarke, 1966); e estabelecimento de redes de triangulação irregular para representar dados de padrões de drenagem, vales fluviais, rupturas de declive, gradiente altimétrico e orientação do relevo (Hormann, 1969).

O início dos anos 1970 demarca a transição da geomorfometria analógica para a geomorfometria digital, culminando nos primeiros manuais do instituto Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (*United States Geological Survey* – USGS) que, por sua vez, destacam-se pela significativa contribuição na sistematização das técnicas de obtenção e extração de atributos topográficos básicos, tais como hipsometria, declividade e curvaturas de vertentes. Esta iniciativa, que se baseava em Modelos Digitais de Elevação (MDE), anteriormente conceituados por Miller e Laflamme (1958), já indicava a aplicabilidade multidisciplinar desta área do conhecimento, contribuindo, assim, para que fossem amplamente aceitos e difundidos, conceitual e metodologicamente, pela comunidade científica (Pike *et al.*, 2009).

Ao longo da década de 1980, ampliaram-se propostas metodológicas voltadas à elaboração de modelos digitais representativos da superfície terrestre, buscando o aperfeiçoamento dos procedimentos voltados à extração e análise dos atributos deles derivados. Esta conjuntura viabilizou-se pela evolução da computação digital e disponibilização de imagens digitais geradas por sensores orbitais (ex. série LANDSAT – *Land Remote Sensing Satellite*), que gradativamente foram sendo incorporadas aos métodos de quantificação e mapeamento da superfície terrestre (Zhou *et al.*, 2008).

Em termos geomorfométricos, algoritmos direcionados à resolução de problemas específicos igualmente se difundiram, destacando-se: modelos sombreados para sobreposição tridimensional de variáveis topográficas (Horn, 1981); levantamento de solos a partir de atributos topográficos (Dent e Young, 1981); modelos físicos para previsão de desastres hidrológicos (Beven *et al.*, 1984); assinaturas geométricas para quantificação de deslizamentos de terra (Pike, 1988); medição automática de dados hidrológicos em áreas de captação (Martz e Jong, 1988); interpolação de dados planialtimétricos para elaboração de modelos digitais hidrologicamente consistentes (Hutchinson, 1989) e classificação semiautomatizada de formas de relevo (Dikau, 1989).

Neste período, algoritmos com finalidades geomorfométricas se incorporaram progressivamente aos primeiros *softwares* específicos, atribuídos de ferramentas e procedimentos para armazenamento e manipulação de dados georreferenciados, que possibilitaram a resolução de problemas relacionados à consulta, resposta e tomadas de decisão sobre entidades e dados espaciais (Burrough, 1986) – os denominados Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) que, assim como o Sensoriamento Remoto, incorporaram-se às Geotecnologias – termo abrangente que agrega às tecnologias e procedimentos voltados à coleta, processamento, análise e disponibilização de informações com referência geográfica (Rosa, 2005).

O final da década de 1980 e início da década de 1990 delimita a disseminação das geotecnologias, historicamente correlacionada com o fim da bipolaridade geopolítica mundial. Este contexto propiciou que mais países se voltassem à geração, processamento e aplicação de informações geradas por sensoriamento remoto (ex. Programa *Japan Earth Resources Satellite* – JERS; Programa canadense RADARSAT; Programa britânico *Disaster Monitoring Constellation* – DMC e Programa *China-Brazil Earth Resoucers Satellite* – CBERS), colaborando com o aprimoramento de mecanismos para aquisição de informações direcionadas às demandas regionais ou mesmo para aquelas de interesse internacional (Novo, 2005).

Em relação à geomorfometria, Pike *et al.* (2009) consideram que esta conjuntura propiciou o desenvolvimento de novas bases teórico-metodológicas, os quais ampliaram-se, sobretudo, no final dos anos 1990, culminando em modelos multiescalares, elaborados sobre diversificadas fontes de dados, através de: a) levantamentos em campo com uso de aparelhos de *Sistema de Navegação Global por Satélite* (*Global Navigation Satellite System* – GNSS); b) sensores

aerotransportados (ex. LiDAR – *Light Detection and Raging*); e c) sensores globais de origem orbital (ex. imagens SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*), entre outros. Para os autores, esse novo patamar somente tornou-se viável pelo desenvolvimento progressivo dos SIGs, concomitantemente a disponibilização de algoritmos e extensões para análise espacial, muitos dos quais com funções especificamente geomorfométricas.

Os anos 2000 também se destacam pela popularização de plataformas e aplicativos digitais de imagens orbitais e mapas interativos voltados a finalidades diversificadas, tais como geomarketing, turismo, transportes, planejamento/gestão territorial e ensino. Destacam, neste sentido, os softwares *Google Earth*, *Google Maps*, *Marble*, *WW2D* e *ArcGIS Earth*, detentores de diversas funções para representação espacial dos aspectos geográficos da superfície terrestre; embora limitadas em termos geomorfométricos.

Esta síntese histórica denota um cenário favorável ao desenvolvimento da geomorfometria. No entanto, concomitantemente a sua evolução tecnológica, metodológica e de diversificação de aplicabilidade, entremeiam-se debates teóricos e conceituais; analisados na sequência.

Conceitos atuais

A Geomorfometria é entendida como uma ciência interdisciplinar derivada da articulação entre as Ciências da Terra, Ciências Exatas e Ciência da Computação, que de modo contínuo ou específico, objetiva quantificar as formas e elevações da superfície terrestre (Pike, 2000; Rasemann *et al.*, 2004), mediante modernas abordagens analítico cartográficas (Tobler, 2000), responsáveis por fornecer um conjunto de recursos espaciais, parâmetros e objetos (Evans, 1972), aplicáveis em diversificados campos do conhecimento (Figura 1).

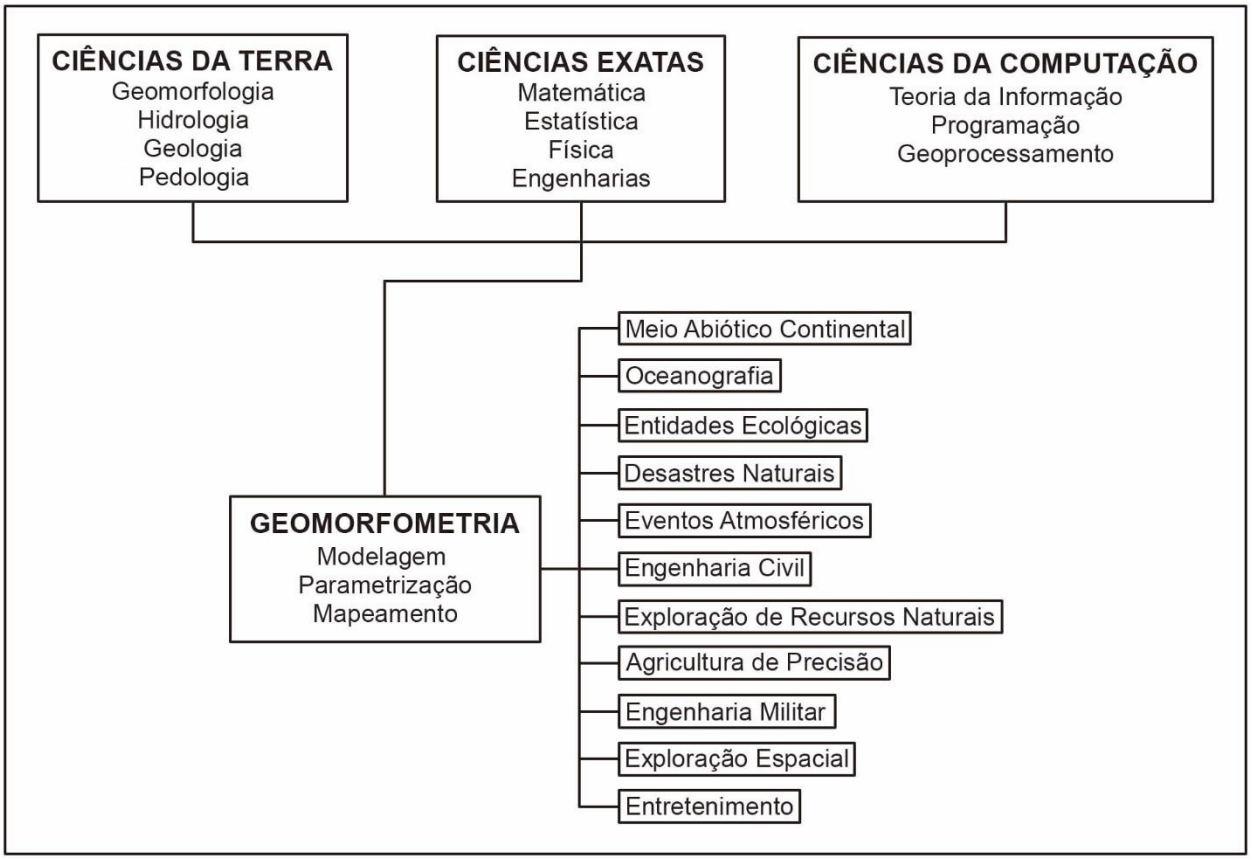

Figura 1. Principais aplicações da geomorfometria. Fonte: adaptada de Pike (2000).

Quando contextualizada em geomorfometria, a análise da diversidade de formas e processos existentes na superfície terrestre recebe denominações e terminologias diversificadas, seja em relação à sistematização dos dados de entrada: *Modelagem do Terreno* (Moore *et al.*, 1991), *Análise do Terreno* (Wilson e Gallant, 2000) e *Ciência da Topografia* (Mark e Smith, 2004); ou aos dados e objetos extraíveis: *Parâmetros Topográficos* (Speight, 1968),

Atributos Geomorfométricos (Schmidt e Dikau, 1999); *Atributos Topográficos* (Wilson e Gallant, 2000), *Variáveis Morfométricas* (Shary *et al.*, 2002), *Informações do Terreno* (Martinoni, 2002) e *Atributos do Terreno* (Pennock, 2003).

Li *et al.* (2005) consideram que, apesar do uso generalizado, o termo *Terreno* é impreciso tecnicamente, devido possuir significados e aplicações distintas, sejam nas Ciências da Terra ou nas Ciências Humanas, onde pode se referir, respectivamente, tanto à superfície topográfica e aspectos físicos quanto aos aspectos sociais, econômicos e fundiários de um determinado recorte espacial. No mesmo sentido, Pike *et al.* (2009) avaliando os termos *Análise do Terreno* (Wilson e Gallant, 2000) e *Modelagem Digital do Terreno* (Weibel e Heller, 1991), os consideram relativamente problemáticos, levando em conta que ambos podem não se referir exclusivamente à superfície topográfica, além de não distinguirem imediatamente as análises qualitativas (descritivas) e quantitativas de maneira eficiente.

Preocupações com este sentido possibilitaram, entretanto, que a evolução metodológica fosse acompanhada nas décadas seguintes por outras variantes conceituais, embora muitas vezes divergentes, como apontado por Li *et al.* (*ibid*.) no que se refere à *Modelo Digital de Elevação* (MDE) e *Modelo Digital do Terreno* (MDT). No mesmo sentido, El-Sheime *et al.* (2005) consideram um equívoco tratá-los como sinônimo, pois MDE representa os valores altimétricos de todos os elementos de um recorte da superfície, enquanto MDT refere-se, exclusivamente, às variações altimétricas do terreno, sem considerar portanto, valores de elevação relativos à vegetação, corpos hídricos e edificações, por exemplo. Outro termo equivalente é *Modelo Digital de Superfície* (MDS), que apesar de ser bastante utilizado não remete imediatamente ao sentido geomorfométrico (Hengl e Evans, 2009).

Buscando minimizar divergências terminológicas, Pike *et al*. (2009, p. 5), reiteram o uso do termo *Geomorfometria* para denotar a disciplina científica e *Formas da Superfície Terrestre* para indicar seu principal objeto de estudo. Apesar de delinearem *Modelo Digital da Superfície Terrestre* (MDST) como base para a representação tridimensional de todos os componentes físico-geográficos, os autores avaliam como satisfatória a utilização do termo *Modelo Digital de Elevação*, tanto pela sua relativa popularidade, quanto por considerarem que em geomorfometria assume diversas especificidades. Neste sentido, conceituam-no como um "conjunto de pontos no espaço cartesiano atribuídos de valores de elevação", cujo detalhamento, filtragem de dados e potencial extração de variáveis relacionam-se diretamente à sua resolução espacial e/ou espectral.

Com base nas questões referenciadas, constata-se a necessidade de que os conceitos e terminologias em geomorfometria evoluam concomitantemente à diversificação de produtos gerados, considerando a crescente disponibilidade de dados com resolução espacial e espectral cada vez maior nos próximos anos, sejam de origem orbital (ex. imagens TanDEM-X e AW3DTM), resultantes de pulsos laser (ex. LiDAR) ou derivados de *Veículos Aéreos Não-Tripulados* (VANTs).

De acordo com a avaliação de Wood (2009), independente das ênfases a que estão atrelados ou eventuais alterações e/ou atualizações conceituais e terminológicas futuras, os modelos digitais representativos da superfície terrestre constituem atualmente os principais dados espaciais de entrada para geração, processamento e análise de parâmetros e objetos geomorfométricos; via SIG.

Considerando sua estrutura, modelos digitais em geomorfometria podem ser **Vetoriais** – compostos por células irregulares; ou **Matriciais** – compostos por células regulares.

Os modelos vetoriais são estruturados por redes de triangulação que interpolam pontos de valores semelhantes, conforme sua proximidade (Figura 2a).

Já nos modelos de estrutura matricial (também denominados *raster* ou *grids*), os valores de elevação são armazenados em células elementares (*pixels*) idênticas (Figura 2b). (Hengl e Evans, 2009).

Alguns estudos apontam potencialidades e limitações destes dois formatos (ex. Moore *et al.*, 1991; Hengl e Evans, 2009), inclusive indicando estruturas alternativas, como a referente à modelos formados a partir de células hexagonais (Figura 2c).

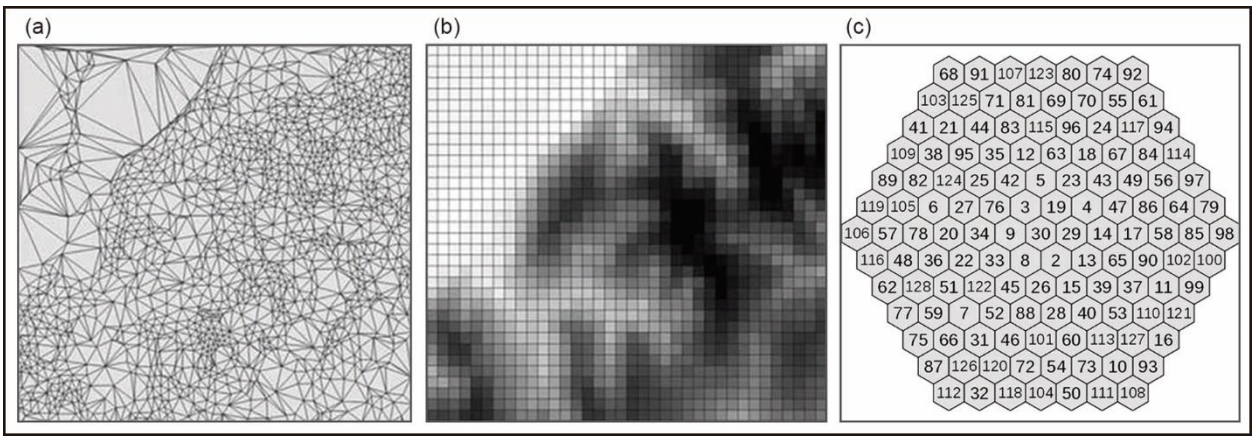

Figura 2. Estruturas de dados geomorfométricos. Fonte: adaptada de Hengl e Evans (2009).

Entre todos os formatos apresentados, entende-se que a utilização de dados *raster* possui como vantagens o seu formato regular – responsável por facilitar a modelagem das formas e elevações topográficas. Ainda, há que se considerar sua aceitação pela comunidade acadêmico-científica e seu amplo emprego em procedimentos técnico-operacionais atuais para extração de variáveis. Como uma única medida (a célula ou tamanho do *pixel*) controla automaticamente a maioria das propriedades de um modelo de estrutura *raster*, se viabiliza a formulação de ferramentas e algoritmos relativamente mais simples para processamento das informações de entrada, definição do grau de generalização requerido e geração e aplicação de parâmetros específicos a temas e áreas de interesse (Reuter e Nelson, 2009).

Nesta conjuntura, provavelmente os dados *raster* regulares se manterão como formato padrão da estrutura de modelos digitais em um futuro previsível, e suas limitações tendem a ser compensadas pela própria evolução científica da geomorfometria, em conjunto aos SIGs (Wood, 2009).

Sobre a resolução das células, Hengl (2006) avalia que não pode haver diferenças muito significativas entre as elevações da superfície real e da superfície interpolada, devendo ser compatível com as diferentes complexidades topográficas e variáveis de interesse. Exemplificando, uma superfície suave pode ser bem representada por uma resolução mais "grosseira" (células maiores), enquanto superfícies mais rugosas necessitam de resolução mais "fina" (células menores). Em termos cartográficos, Stein *et al.* (2001) avaliam que células de resolução fina remetem-se à escalas maiores, mas menores áreas de estudo, enquanto às células de resolução grosseira, ao contrário, à escalas menores, portanto, contendo informações mais generalizadas.

No caso de se optar por resoluções mais finas, deve-se verificar o eventual surgimento de "ruídos indesejáveis" (erros e artefatos), normalmente referentes à pixels de valores descontínuos ou aleatórios de um modelo, geralmente descontextualizados espacialmente dos parâmetros dele derivados. Se ao contrário, a escolha se pautar em resoluções mais grosseiras, é necessário avaliar se informações imprescindíveis não acabaram sendo indevidamente suprimidas (Wise, 2000).

Hengl (2006) considera que nenhum tamanho de célula pode ser considerado universal, adequando-se exclusivamente aos parâmetros e objetos de interesse, com base na complexidade da superfície. Neste sentido, propõe que em modelos derivados de curvas de nível, o tamanho dos pixels seja definido a partir da densidade dos pontos de inflexão, devendo ter pelo menos a metade do seu espaçamento médio. Necessitando-se de maior precisão, de acordo com as características da área de interesse, indica que sejam consideradas os 5% da sua porção mais rugosa.

No que diz respeito à resolução espacial e espectral de modelos de origem aérea ou orbital, Nelson *et al.* (2009) avaliam que, apesar de se tratar de uma questão inerente aos respectivos sensores, diferentes algoritmos de interpolação apresentam-se potencialmente aplicáveis no refinamento de dados e readequação escalar, particularmente quando, em determinado estudo, fontes de dados diversificados não estão disponíveis.

Com base no exposto, para que os parâmetros e objetos geomorfométricos atendam demandas variadas, confirmando sua interdisciplinaridade, é importante obter conhecimento considerável dos mecanismos que originam os modelos de entrada – problemáticas apresentadas no tópico seguinte.

Fontes de dados geomorfométricos

Conforme indicado anteriormente, os modelos digitais de estrutura *raster* (*grids* regulares) são atualmente os principais dados de entrada em SIG para análises geomorfométricas, os quais podem, de acordo com Nelson *et al.*(2009) se originar a partir de três fontes principais:

- **Mapas Analógicos:** utilizando-se de curvas de nível e elementos planimétricos vetoriais como dados de entrada, posteriormente convertidos em arquivos *raster*;
- **Levantamentos Terrestres:** realizados de maneira tradicional ou atrelados à alta tecnologia, consistindo no levantamento direto (em campo) de pontos de latitude, longitude e altitude (valores *x, y, z*);
- **Sensoriamento Remoto:** considerando sensores ativos ou passivos, aerotransportados ou orbitais, de onde se derivam: fotografias, imagens de satélite, imagens de radar e dados de escaneamento *laser*.

Os mapas analógicos não são as principais fontes de dados geomorfométricos utilizadas atualmente, porém, como existem situações em que são os únicos recursos disponíveis, continuam sendo operacionalizados. As técnicas de extração de informações topográficas incluem: escaneamento de produtos cartográficos, georreferenciamento das imagens geradas, digitalização (manual ou automática) das informações planialtimétricas e elaboração de planos de informação estruturados em arquivos georreferenciados, que agregam tabela de atributos e vetores digitais compatíveis com *softwares* de SIG (Burroug e Mcdonnell, 1998).

Os levantamentos terrestres incluem utilização de teodolitos (mecânicos ou digitais) para medição de ângulos horizontais e verticais, de onde se deriva malha de pontos cotados; ou por Sistema de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite System* – GNSS), onde é necessário percorrer a área de interesse para obtenção de coordenadas (*x, y e z*) em intervalos regulares, cujas informações são tabuladas e posteriormente associadas a arquivos vetoriais digitais. Suas aplicações mais comuns são direcionadas a levantamentos que necessitam de informações topográficas detalhadas (ex. construção de barragens, estradas e pontes) permitindo alta precisão no levantamento de pontos, embora demandem maior tempo de trabalho e maior disponibilidade orçamentária (Nelson *et al.*, 2009).

O Sensoriamento Remoto, no que diz respeito à geomorfometria, engloba dados gerados por sensores aerotransportados (fotogrametria e *laser*) e orbitais (sistemas de radar).

A Fotogrametria propicia o recobrimento de grandes áreas mediante levantamento sistemático de fotografias de alta resolução – coloridas, monocromáticas ou infravermelhas. As informações de elevação dependem, no entanto, de distintas linhas de voo em uma mesma área para minimizar o efeito das condições meteorológicas, permitir a correta sobreposição de imagens e possibilitar análises estereoscópicas eficientes para estabelecimento de pontos de elevação e, posteriormente, curvas de nível, vetorizadas manual ou digitalmente. Os procedimentos para levantamentos fotogramétricos incluem técnicas para correção de potenciais distorções ocorridas na câmera durante o voo ou para discernir as elevações do terreno daquelas atribuídas aos diversificados componentes da superfície, tais como topo de árvores, edifícios, entre outros (Smith, 2005).

A detecção de dados da superfície terrestre por sensores *laser*, por sua vez, ocorre através do registro da reflexão de retorno dos sinais transmitidos pelo próprio sensor, formando alta densidade de pontos tridimensionais, (nuvem de pontos) os quais são representativos de diversas variáveis espaciais da superfície. Geralmente, para cada segundo são registrados entre 5.000 e 100.000 pontos (*x, y, z*), com erros médios de 15 cm no plano vertical e entre 50 a 100 cm no plano horizontal (Huinsin e Gomes-Pereira, 1998). Embora possibilite derivação de um conjunto de modelos digitais da superfície, geralmente são aplicados em espaços relativamente reduzidos (Smith, 2005).

Os sensores mais comuns em sistemas de detecção a *laser* são os de retorno discreto, próximos ao infravermelho, capazes de receber sinais de retorno múltiplo, a partir de uma única transmissão. Exemplificando, o primeiro objeto registrado poderia ser referente a um dossel florestal, que refletiria o primeiro sinal de retorno do sensor, enquanto o último seria da superfície do solo, que refletiria o último sinal, embora em alguns casos, assim como em áreas que possuem cobertura florestal densa, podem ser incapazes de penetrar até o nível altimétrico de base. De qualquer forma podem ser, de maneira geral, considerados na seguinte estrutura: $x, y, z_1, z_2, z_3, \ldots z_n$, onde z_1 é o primeiro (elevação máxima) e z_n o último sinal de retorno (elevação mais baixa), cuja seleção de dados de interesse específicos dependem da operacionalização e filtragem de

dados mediante algoritmos de diversificada complexidade (Axelsson, 1999).

Os sistemas de radar abrigam sensores ativos, podendo ser aerotransportados ou baseados em satélites. Os modelos digitais deles derivados são muito utilizados atualmente em geomorfometria devido à grande cobertura espacial, disponibilidade de dados e relativa facilidade de acesso (Nelson *et al*., 2009). Enquanto sistemas aerotransportados produzem dados em transmissão única, sistemas baseados em satélites o fazem por transmissão repetida, ou seja, possibilitam que erros geométricos ou omissões de dados sejam corrigidos mais facilmente (Maune, 2001). Exemplos de fontes de dados geomorfométricos derivados de sistemas de radar são sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1. Características dos sensores de radar SRTM, ASTER, SPOT-5, TanDEM-X e AW3DTM

Sistema	***Sensor***	***Bandas Espectrais***	***Resolução Espacial***	***Precisão Vertical***
SRTM90	*Synthetic Aperture Radar* (SAR)	C	90m	16m
SRTM30	*Synthetic Aperture Radar* (SAR)	X	30m	16m
TERRA	*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER)	3N e 3B	30m	7-50
SPOT-5	*High Resolution Stereoscopic* (HRS)	Pancromáticas	10-5m	10m
TanDEM-X	*Synthetic Aperture Radar* (SAR)	X	12m	2-4m
AW3DTM	*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM)*	Pancromáticas	5m	5m

Fontes: Nelson *et al*. (2009), NASA (2015), DLR (2016), JAXA (2016).

A missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi realizada entre 11 e 20 de fevereiro de 2000, sendo resultado de convênio firmado entre as agências espaciais dos Estados Unidos (*National Aeronautics and Space Administration* – NASA), Alemanha (*Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt* – DLR) e Itália (*Agenzia Spaziale Italiana* – ASI). Esta missão consistiu em acoplar dois sistemas de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR*)*, ambos interferométricos, no ônibus espacial *Endeavour*; operacionalizados, simultaneamente, em diversas fases mediante Banda-C e Banda-X, responsáveis por gerar, respectivamente, MDEs globais com 90 metros (três arcos de segundo) e 30 metros (um arco de segundo) de resolução espacial (Rabus *et al.*, 2003).

O sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)* está incorporado ao satélite *Terra*, lançado pela NASA em dezembro de 1999 em parceria com a autarquia do governo japonês *Earth Remote Sensing Data Analysis* Center (ERSDAC), como parte da missão *Earth Observing System* (EOS). É composto por diversas bandas espectrais de finalidades diversificadas, e os modelos tridimensionais, especificamente, podem ser gerados a partir de informações obtidas por dois sensores estereoscópicos que atuam na faixa do infravermelho próximo: bandas 3N (*nadir-viewing*) e 3B (*backward-viewing*). Sua resolução espacial básica é de 30 metros, enquanto sua precisão vertical e horizontal situa-se entre sete e 50 metros, cujo nível de confiança tende a aumentar pela atualização do sistema realizada no ano de 2011 (ASTER G-DEM), vislumbrando-se a correção de erros sistemáticos do projeto anterior (ASTER-1A), assim como ampliação de sua cobertura espacial (Nelson *et al*., 2009).

O SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre)* refere-se às gerações de satélites lançados entre 1986 e 2014 sob liderança da agência espacial da França (*Centre National D'études Spatiales* – CNES), com apoio da Bélgica e da Suécia, tendo sido projetados para operar através de sensores ópticos em bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio. Incorporou na versão 5 (SPOT-5), lançada em maio de 2002, sensores de alta resolução estereoscópica (HRS), situados na frente e na traseira do sistema, projetados para realizar registros tridimensionais em grandes extensões territoriais, passíveis de constante atualização. Destes sensores, pode-se derivar MDE com precisão vertical de 10 metros e precisão horizontal de 15 metros, com nível de confiança próximo a 90% (Nelson *et al*., 2009).

O TanDEM-X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement*) refere-se ao sistema de radar liderado pela agência espacial alemã (*Deutschen Zentrums für Luft-und Raumfahrt* – DLR), consistindo em sensores SAR configuráveis, instalados em dois satélites quase idênticos: o TerraSAR-X, lançado em julho de 2007, e o TanDEM-X (do qual se derivou o nome do sistema), lançado em julho de 2010 – mesmo ano em que ambos foram alinhados e passaram a

percorrer órbita igualitária, com distância variando entre 250 a 500 metros. Este sistema foi projetado para gerar modelos digitais (MDS e MDT) consistentes e de abrangência global (WorldDEM), com alta precisão vertical (2-4m) e horizontal (12m) – muito superiores aos outros sistemas mencionados, como o SRTM (Figura 3).

Apesar de atualmente ter caráter comercial a DLR possibilita cadastro de pesquisadores para disponibilização gratuita de imagens, a qual depende, no entanto, de análise e parecer favorável pela agência dos projetos a ela submetidos (DLR, 2016).

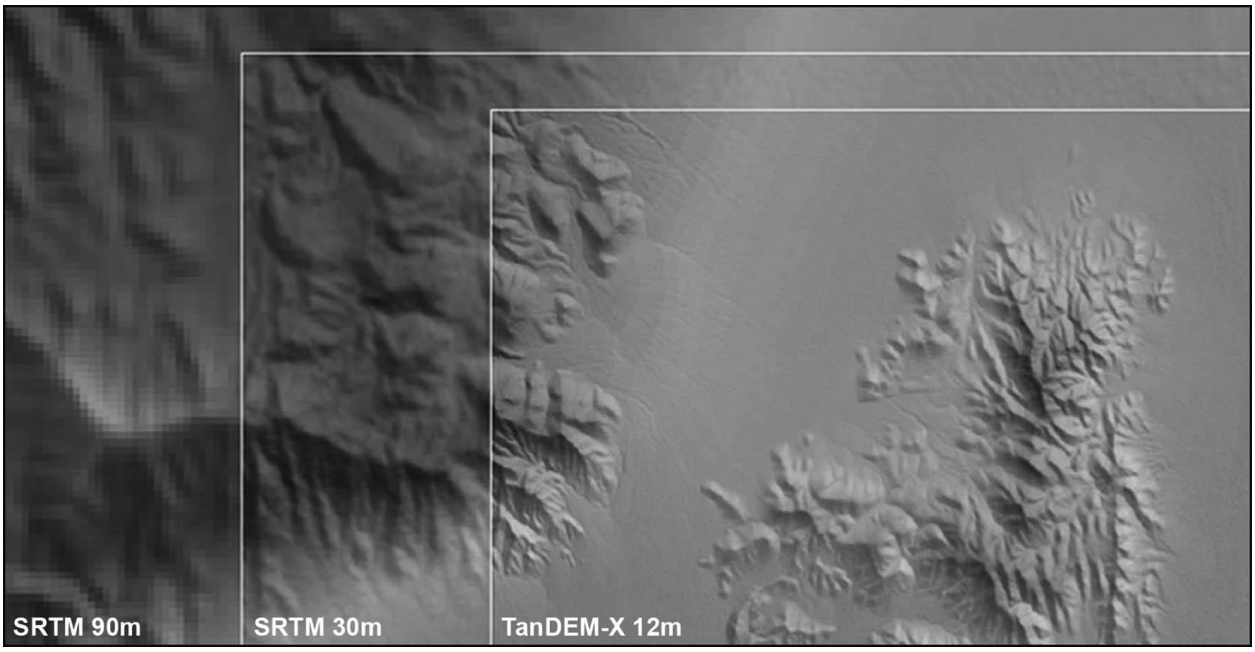

Figura 3. Comparação entre modelos SRTM 90m, SRTM 30m e TanDEM-X 12m. Fonte: DLR (2015).

Já o AW3D (*World 3D Topographic Data*) refere-se ao mais recente projeto voltado à aquisição de dados de elevação em abrangência global, iniciado pela agência espacial japonesa (*Japan Aerospace Exploration Agency* – JAXA) que utiliza informações adquiridas pelo satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*). Os MDEs deste sistema são gerados a partir do instrumento PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping),* apresentando resolução espacial básica de cinco metros; mesma medida atribuída à precisão horizontal e vertical das imagens (JAXA, 2016).

Entre os mecanismos com potencial de aplicabilidade em geomorfometria, há de se destacar os denominados **Veículos Aéreos Não Tripulados** (VANTs). Considerando a possibilidade de levantamentos precisos com custo reduzidos, têm sido compreendidos como bastante promissores para elaboração de modelos digitais e de sua derivação em parâmetros geomorfométricos, inclusive sendo objeto de estudos específicos preocupados com o processamento das informações (Eisenbeiss, 2004; Everaerts, 2008; Ferreira *et al.*, 2013); questões de segurança (Furtado *et al.*, 2008; Cetinsoy *et al.*, 2012); qualidade dos dados gerados (Johnson *et al.*, 2003; Anderson *et al.*, 2014) e aplicações geoambientais (Koh e Wich, 2012; Lucieer *et al*., 2014; Siebert e Teizer, 2014).

Kostrzewa *et al.* (2003) e Medeiros *et al.* (2008) reconhecem uma série de limitações técnicas nos dados derivados de VANTs, vislumbrando, no entanto, ampliação progressiva de sua aplicação em análises do meio físico, particularmente nas que necessitam de maior nível de detalhamento, como levantamentos topográficos para obras de engenharia, agricultura de precisão, monitoramento ambiental e planejamento e gestão territorial.

Processamento das fontes de dados

A extração de parâmetros e objetos geomorfométricos em SIG se pauta nas características dos modelos digitais de entrada, as quais devem ser especificadas para denotar os graus de generalização e precisão das informações originadas. Estas especificações referem-se ao: algoritmo de interpolação, tamanho da janela de amostragem, tamanho de célula (*pixel*) e fator de arredondamento numérico.

As indicações dos nomes do SIGs e das ferramentas utilizadas são igualmente importantes, já que podem existir diferenças entre um mesmo modelo processado em softwares diferentes, o que acaba repercutindo na configuração dos dados possíveis de serem extraídos (Pike *et al.*, 2009).

Atualmente, a maioria das plataformas de SIG disponíveis (exemplificados no Quadro 2) possuem módulos aplicáveis em geomorfometria, incorporando operações matemáticas e estatísticas para processamento das fontes de dados e para extração de parâmetros e objetos, além de ferramentas específicas para tratamento cartográfico; disponibilizadas tanto por softwares proprietários (ex. ArcGIS, ENVI, IDRISI, *Surfer* e *Global Mapper*) quanto por softwares com código e/ou fonte abertos (ex. GvSIG, MicroDEM, GRASS, QGIS, SAGA, KOSMO, ILWIS e SPRING).

Quadro 2. Exemplos de SIGs com módulos aplicáveis em geomorfometria

SIG	Instituição/país de origem	Acessibilidade
ArcGIS	*Environmental Systems Research Institute* (ESRI)/EUA	www.esri.com
ENVI	*Exelis* VIS/Reino Unido	www.exelisvis.com
IDRISI	*Clark Labs*/EUA	https://clarklabs.org/terrset
Surfer	*Golden Software*/ EUA	www.goldensoftware.com
Global Mapper	*Blue Marble Geographics/*EUA	www.bluemarblegeo.com
GvSIG	*Generalidad Valenciana*/Espanha	www.gvsig.com
MicroDEM	*U.S Naval Academy/*EUA	www.usna.edu
GRASS	*Construction Engineering Research Laboratory* (CERL)/EUA	http://grass.osgeo.org
QGIS	*Locate Press* – EUA	www.qgis.org
SAGA	*University of Göttingen*/Alemanha	www.saga-gis.org
KOSMO	*Sistemas Abiertos de Informacíon Geográfica* (SAIG)/Espanha	www.opengis.es
ILWIS	*Institute of Geoinformation Science and Earth Observations (ITC)*/Países Baixos	www.ilwis.org
SPRING	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)/Brasil	www.dpi.inpe.br/spring

Fontes: Instituições e *websites* mencionados (2015).

Steiniger e Bocher (2009), realizando estudo comparativo entre softwares de SIG, apontam inúmeras vantagens daqueles livres e de código aberto em relação aos comerciais (softwares proprietários), tais como uso irrestrito, desenvolvimento colaborativo, ausência de taxas de licenciamento e possibilidade de customização. Por outro lado, apontam que a garantia de suporte técnico e perfeita funcionalidade de todos os componentes do SIG, são vantagens melhor proporcionadas pelos softwares proprietários.

Wood (2009), por outro lado, avalia que a escolha por um determinado SIG não pode ser determinada exclusivamente pelas funcionalidades ou viabilidades orçamentárias que oferece, já que a capacidade técnico-operacional dos recursos humanos envolvidos também acaba sendo um critério bastante significativo. No que diz respeito às funções especificamente geomorfométricas, a escolha de um SIG também deve considerar, primordialmente, sua capacidade de auxiliar a identificação prévia das potencialidades e limitações das fontes de dados utilizadas.

Sobre esta questão, Florinski (1998) considera que uma análise geomorfométrica bem sucedida perpassa diferentes etapas de "pré-processamento" de dados, visando à estimativa de elevações e objetos ausentes ou filtragem de elementos inconsistentes, visando a melhor aproximação possível com as características reais da superfície terrestre.

Esta fase, que antecede a extração de parâmetros e objetos, pode reduzir o número de dados inconsistentes, que para Wise (2000) podem ser classificados, de maneira geral em: a**) Artefatos**; b) **Erros sistemáticos**; e c) **Erros aleatórios** (Figura 4).

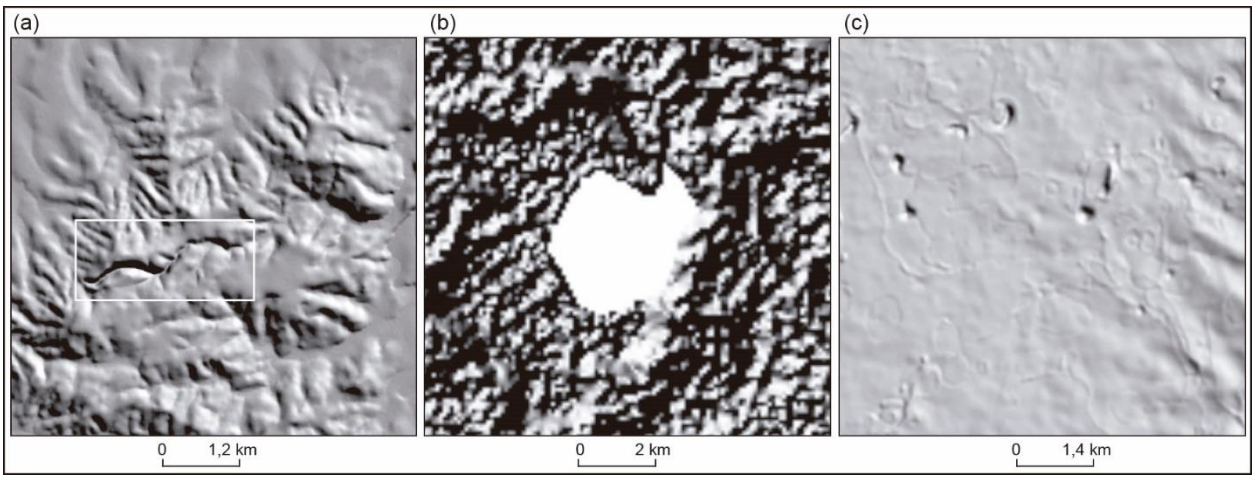

Figura 4. Dados inconsistentes em MDT de origem planialtimétrica (a), em MDE SRTM-90 (b) e em MDE ASTER1-30 (c).

Os **Artefatos**, por possuírem formatos irregulares, são facilmente detectados em vistas tridimensionais (relevo sombreado), podendo apresentar, por exemplo, orifícios, rugosidades, patamares ou superfícies lineares não condizentes com a configuração geral da área. Os **Erros Sistemáticos**, por outro lado, são inerentes aos métodos originais de coleta de dados e às limitações dos procedimentos posteriores de interpolação e retificação. Ao contrário dos artefatos, erros sistemáticos não são facilmente detectados, sendo necessárias técnicas de maior complexidade para identificação de informações relevantes dos erros advindos das próprias fontes de dados ou buscar resolvê-los, por exemplo, pelas características geométricas de alguns parâmetros primários, tais como inclinação, declividade e curvaturas de vertentes (Hofer *et al.*, 2006). Os **Erros Aleatórios**, por sua vez, são frequentemente associados há equívocos de medição, sendo mais significativos em modelos derivados de sensoriamento remoto.

Wise (2000) considera que erros aleatórios em modelos de elevação orbitais são potencialmente problemáticos, destacando, no entanto, que se constatada sua constância, a distinção entre ruídos e variabilidade normal da área de interesse é facilitada consideravelmente.

Reuter *et al.* (2009), abordando erros diretamente oriundos dos distintos métodos de coleta de dados (erros específicos), destaca que em modelos derivados de curvas de nível, podem haver, por exemplo, densidades diferentes de linhas ao longo da área e inserção de valores equivocados de elevação ou vetorização imprecisa, que sendo sensíveis aos métodos de interpolação, podem subtrair ou deformar a estrutura de parâmetros e objetos de interesse. Em modelos derivados de dispositivos de nível de campo, os erros podem estar associados há pausas ou interrupções no levantamento, subamostragem de áreas inacessíveis (ex. encostas íngremes e extensos corpos hídricos) ou oscilação da precisão requerida. Já em modelos derivados de sensoriamento remoto, os dados de elevação podem acabar representando não somente o nível topográfico, mas igualmente agregando outros componentes da superfície.

Os autores destacam, entretanto, que erros, imprecisões ou ausência de dados nos modelos de entrada, assim como sua propagação nos dados geomorfométricos de saída (parâmetros e/ou objetos), podem ser minimizados a partir de três conjuntos metodológicos:

- **Métodos Empíricos:** que se aplicam ao reconhecimento técnico de problemas e recursos de uma área específica, permitindo comparação entre diferentes modelos digitais, os quais, inclusive, podem ser complementados por dados derivados de investigação de campo (Fisher, 1998; Fisher e Tate, 2006);
- **Métodos de Filtragem:** que objetivam a mensuração do deslocamento existente entre dois conjuntos de dados, visando verificar sua precisão horizontal ou sua distinção entre os valores representativos da elevação topográfica e objetos que estão acima do nível geral do terreno (Rabus *et al.*, 2003; Hengl *et al.*, 2004; Evans e Hudak, 2007; Gallant e Hutchinson, 2006; Reuter *et al.*, 2009);
- **Métodos de Simulação Estatística:** que visam estimar valores ausentes das fontes de dados (Knöpfle *et al.*, 1998; Valeriano, 2004) e/ou modelar formas e processos

(Wise, 1998; Burrough *et al.*, 2000; Hutchinson e Gallant, 2000).

Destaca-se que enquanto os métodos empíricos baseiam-se em informações advindas de análise direta em campo, os métodos de filtragem e/ou simulação somente se viabilizam por meio de operações matemáticas e geoestatísticas.

Suscintamente, em termos estatísticos, a superfície terrestre pode ser vista como uma combinação de componentes determinísticos e aleatórios (Oksanen, 2006):

$$Z(S) = z*(s) + \varepsilon r(s) + \varepsilon rr(s)$$

onde $z*(s)$ é o componente determinístico, $\varepsilon r(s)$ é o erro espacial aleatório e $\varepsilon rr(s)$ são os erros de medição (ruídos). Esta formulação pode ser complementada com a finalidade de planejar a filtragem de um modelo específico ou estimar a influência da propagação da incerteza em parâmetros deles derivados, como a proposta de Gallant e Hutchinson (2006) para dados SRTM, considerando:

$$ZSRTM(S) = z(s) + m(s) \cdot g(s) + h(s) + \varepsilon SRTM(s)$$

onde $z(s)$ é a superfície terrestre atual, $g(s)$ é a altura do dossel (árvores, prédios, etc.), $m(s)$ é o multiplicador de valor de máscara (0 ou 1), $h(s)$ é o desvio sistemático devido à diferença de datuns geodésicos utilizados e ε SRTM(s) é o erro de observação aleatória (normalmente distribuídos).

Há que se destacar que, em geomorfometria, corrigir e/ou modelar dados significa operacionalizar algoritmos de interpolação, visando estimar elevações e formas em setores da superfície terrestre onde não foram realizados registros, mediante funções de vizinhança ou conectividade (Smith *et al.*, 2005). Para Hengl e Evans (2009) os interpoladores com função geomorfométrica podem ser agrupados de acordo com: **a) Efeito de Suavização** (Baixo, Médio ou Alto); **b) Efeito de proximidade**, podendo ser subdivididos em *Global* (quando uma única função se aplica a toda área de estudo) ou *Local* (quando se aplicam algoritmos repetidamente em subconjuntos amostrais); e **c) Pressupostos**, sejam determinísticos (certeza de ocorrência) ou estocásticos (probabilidade de ocorrência).

No Quadro 3 são apresentados alguns dos principais algoritmos, compatíveis com SIG, processados nas fases que antecedem a extração de parâmetros geomorfométricos:

Estudos de finalidades variadas têm se preocupado em comparar métodos de interpolação de dados digitais de elevação, indicando aqueles detentores de maior ou menor eficiência na modelagem da superfície terrestre, seja em relação às fontes de dados, aos parâmetros derivados ou a capacidade operacional dos SIGs. Análises com este sentido podem ser verificadas na comparação entre: Vizinho Natural, Krigagem e Curvatura Mínima (Tatalovich *et al.*, 2006); Krigagem, IDW, Curvatura Mínima, TIN e ANUDEM (Reuter *et al.*, 2007); Krigagem, Linear e IDW (Valeriano, 2004; Marcuzzo *et al.*, 2011), IDW, Krigagem, ANUDEM, Vizinho mais Próximo e Curvatura Mínima (Arun, 2013); ANUDEM, IDW, TIN, Krigagem, Vizinho Natural e Curvatura Mínima (Tan e Xu, 2014); e Krigagem e ANUDEM (Nogueira e Amaral, 2009; Carmo *et al*., 2015).

Temme *et al.* (2009) consideram que o grau de eficiência de cada algoritmo de interpolação é dependente, em grande parte, do nível de amostragem de dados e dos objetivos estipulados para um determinado recorte espacial, e, por este motivo, não é possível afirmar com exatidão qual seria o mais apropriado.

Pain (2005) e Hengl e Evans (2009), por sua vez, afirmam que tal escolha pode ser definida pela análise das propriedades dos dados de entrada e pelo conhecimento prévio da área e dos objetivos finais da pesquisa. Exemplificando, em dados onde os valores de elevação foram medidos com alta precisão, o interpolador deve ser capaz de preservar esses recursos. Por outro lado, se as medições contêm muitos ruídos deve-se considerar a eventual utilização de um interpolador que possa suavizá-los.

Depois de realizada a escolha e o processamento do modelo digital com base em alguns dos procedimentos demonstrados, se propicia a extração de variáveis, igualmente operacionalizadas mediante o instrumental oferecido pelas plataformas de SIG.

Neste sentido, vislumbrando abordagens geográficas, é importante apresentar uma síntese dos principais parâmetros geomorfométricos potencialmente aplicáveis em Geografia Física e em suas subdivisões, destacando-se a Geomorfologia enquanto estrutura abiótica.

Quadro 3. Principais métodos de interpolação operacionalizados em ambiente SIG

Método de interpolação	***Efeito de suavização***	***Efeito de proximidade***	***Pressupostos***	***Requisitos de entrada***	***Forma de interpolação***
Linear	Baixo	Local	Determinístico	Nenhum	Estima a altura de algum nó de grade a partir de pelos três pontos x,y,z conhecidos
Vizinho natural	Médio	Local	Determinístico	Ponderação e raio de pesquisa	Estima valores por média ponderada de pontos vizinhos, agrupados por *"Polígonos de Thiessen"*
Vizinho mais próximo	Baixo	Local	Determinístico	Raio de pesquisa	Atribui valor a um nó desconhecido a partir do valor do ponto mais próximo
Inverso ponderado da distância (IDW)	Baixo	Local	Determinístico	Ponderação e raio de pesquisa	Baseia-se em coeficientes de ponderação que controlam a influência de pontos amostrais sobre pontos desconhecidos
Rede Irregular de triangulação (TIN)	Baixo	Local	Determinístico	Raio de pesquisa	São inseridos círculos entorno de pontos amostrais, cujas intersecções são conectadas por rede de triângulos
Curvatura mínima (*Spline*)	Alto	Local	Determinístico	Fator de suavização e raio de pesquisa	Utiliza curvas suaves que perpassam os valores de entrada a partir de polinômios de pequena ordem
ANUDEM	Alto	Local/Global	Determinístico	Fator de suavização, direção de fluxo e raio de pesquisa	Agrega dados de elevação com os da rede de drenagem para produzir superfícies hidrologicamente consistentes
Krigagem	Médio	Local/Global	Estocástico	Variograma e raio de pesquisa	Analisa pontos de elevação dispersos para determinar dependência espacial, escala de variação e grau de aleatoriedade das amostras

Fontes: Valeriano (2008), Hengl e Evans (2009) e ESRI (2010).

Parâmetros geomorfométricos em Geografia Física

Conforme delineado anteriormente, os dados extraíveis de MDTs, MDEs ou MDSTs são derivados da análise geomorfométrica de diferentes fontes. Direciona-se há campos do conhecimento que necessitam de medidas descritivas (parâmetros) e formas e feições (objetos) da superfície terrestre (WilsoN, 2012), considerando desde aqueles de aplicabilidade geral, quanto específica (Wilson e Gallant, 2000).

Olaya (2009) subdivide os parâmetros geomorfométricos em:

a) Locais: podendo ser *geométricos* – baseados na análise das suas propriedades matemáticas, a partir de funções de primeira derivada (ex. declividade e orientação de vertentes) e de segunda derivada (ex. perfil/plano de curvatura e índice de visibilidade); ou *estatísticos* – envolvendo operações por análise de vizinhança com janelas amostrais fixas ou ajustáveis (em tamanho e formato) para extrair informações específicas, (ex. índice de rugosidade, índice de complexidade de forma e índice de posição topográfica). Utiliza desde descritores básicos (ex. média, mediana e desvio padrão) até complexos (ex. fractais e coeficientes de variação anisotrópica);

b) Regionais: parâmetros secundários relacionados às propriedades hidrológicas do terreno, que consideram a função de *conectividade* (relações existentes entre os pixels) de fluxos hídricos (ex. área de captação, comprimento de rampa e índice de umidade topográfica).

Teoricamente, algoritmos voltados a geomorfometria podem ser aplicados em todas as escalas cartográficas, mesmo milimétricas, embora a maioria das análises atuais se restrinjam as escalas métricas. Reiterando, são as etapas de pré-processamento de um modelo digital que

determinarão a precisão espacial, vertical e de aplicabilidade dos parâmetros e objetos dele extraídos, influenciadas diretamente pelos interpoladores, *softwares* e tamanho dos *pixels* dos modelos (Evan e Cox, 1999).

No Quadro 4 são demonstradas as características principais de parâmetros geomorfométricos (locais ou regionais) de aplicabilidade geral.

Quadro 4. Parâmetros geomorfométricos básicos

Parâmetro	***Tipo***	***Características principais***
Declividade	Local/Primário	Indica o ângulo formado entre o plano horizontal e à tangente de uma superfície.
Orientação (aspecto)	Local/Primário	Medida de ângulo horizontal que expressa, em azimute (0 a 360º), a direção esperada para o escoamento superficial.
Relevo Sombreado	Local/Primário	Modelagem tridimensional da topografia que melhora a aparência visual do relevo, tornando-o mais claro e intuitivo à percepção humana.
Perfil de curvatura	Local/Primário	Refere-se à variação convexo-côncava das formas de vertentes quando analisadas em perfil.
Plano de curvatura	Local/Primário	Refere-se à divergência ou convergência de fluxos de matéria sobre as vertentes, quando analisadas horizontalmente.
Hipsometria	Local/Primário	Representam as variações de altitude de uma superfície mediante classes ou intervalos, diferenciados por gradação de cores.
Comprimento de rampa	Regional/Secundário	Determina a velocidade do fluxo e grau de confluência do escoamento superficial.
Acumulação de fluxo	Regional/Secundário	Considera toda área capaz de fornecer escoamento à um determinado ponto do terreno.
Canais de drenagem e divisores	Regional/Secundário	Utilizados como base para delimitação de bacias hidrográficas e discretização dos seus elementos hidrológicos

Fonte: Wilson e Gallant (2000), Valeriano (2008), Olaya (2009).

Os dados geomorfométricos básicos podem ser obtidos a partir de algoritmos estruturados sobre modelos teóricos e metodológicos distintos, como as propostas de Young (1972), Horn (1981) e Berry (1996) para cálculo de declividade; de Krcho (1973), Gallant e Wilson (1996) e Shary *et al.* (2002) para determinação da orientação de vertentes (aspecto); de Evans (1972), Zevenbergen e Thorne (1987), Shary (1991) e Burrough e McDonnell (1998) para cálculo de plano e perfil de curvatura de vertentes; e de O'Callaghan e Mark (1984) e Tarboton (1997) para determinação de acumulação de fluxo e índice topográfico de umidade. Análises comparativas, indicando vantagens e desvantagens de tais propostas, podem ser verificadas em Schimidt *et al.* (2003) e Gruber e Peckham (2009).

Sobre esta diversificação teórico-metodológica, Florinski (1998) alerta que, em SIG, mesmo as proposições consideradas mais eficientes resultarão em saídas pobres se os dados de entrada utilizados são de baixa qualidade ou potencialmente inadequados para a aplicação requerida. Temme *et al.* (2009), no mesmo sentido, consideram que erros existentes nas fontes de dados podem se propagar nos parâmetros geomorfométricos de formas nem sempre facilmente previsíveis e, por este motivo, a definição das incertezas e suas propagações espaciais torna-se imprescindível para garantir a qualidade das informações geradas. Sendo assim, uma cuidadosa comparação entre diferentes algoritmos, utilizando-se condições de controle (ex. Validação Cruzada, Raiz Quadrada do Erro Médio, Método de Monte Carlo), permite avaliar os diversos graus de sensibilidade das propriedades dos modelos de entrada, bem como eventual propagação de dados inconsistentes nos parâmetros derivados (Zhou e Liu, 2004).

Entre os estudos direcionados às problemáticas supramencionadas destacam-se a avaliação de parâmetros primários extraídos de modelos gerados por distintos interpoladores (Carrara *et al.* 1997; Desmet, 1997); de parâmetros potencialmente sensíveis a artefatos, tais como declividade, aspecto e curvaturas (Wise, 1998; Fisher e Tate, 2006); e da incerteza estatística de dados de elevação de diferentes modelos (Holmes *et al.*, 2000; Oksanen, 2006; Darnell *et al.*, 2008).

Pesquisas voltadas à análise de erros e incertezas de MDEs igualmente abordam sua propagação em parâmetros secundários e/ou específicos, avaliados, por exemplo, na predição de solos (Hengl *et al.*, 2004; Borisov *et al.*, 2009); no

mapeamento da vegetação (Van Niel *et al.*, 2004; Hutton e Brazier, 2012); em modelos hidrológicos (Endreny e Wood, 2001; Zandebergen, 2011) e no mapeamento de formas e processos geomorfológicos (Hebeler e Purves, 2011; Bell, 2012; Casella e Franzini, 2015).

Reitera-se que, independente do parâmetro geomorfométrico gerado e suas eventuais aplicações, sua validação torna-se imprescindível, embora este seja um problema ainda não resolvido integralmente em termos metodológicos, aos quais se entremeiam à necessidade de confirmação de um conjunto de hipóteses para se chegar a um modelo estatístico de erro considerado ideal (Temme *et al.*, 2009).

Por outro lado é evidente que, na Geografia Física, estes dados fornecem respaldos técnicos e metodológicos às suas diversificadas subáreas, possibilitando a extração de parâmetros secundários e objetos específicos, como aqueles referentes à: **predição e cartografia pedológica** (Hengl *et al.*, 2004; Silveira *et al.* 2013), **delimitação de unidades de paisagem** (Hörsh, 2003; Klingseisen *et al.*, 2008; Shary e Sharaya, 2014), **caracterização climática** (Böhner, 2005; Hong *et al.*, 2005; Daly *et al*., 2008) **modelagem hidrológica** (Tarboton, 1997; Armstrong e Martz, 2003; Lin e Oguchi, 2004), **modelagem de desastres geoambientais** (Korup, 2004; Salinas e López-Blanco, 2010; Sailer *et al.*, 2014), **levantamentos arqueológicos** (Doneus e Briese, 2006; Verhagem e Dragut, 2012), **análise da geodiversidade** (Zwoliñski, 2010; Lindsay *et al.*, 2013; Testa *et al.*, 2013; Manosso e Nóbrega; 2015) e **análise digital do relevo** (Miliarelis, 2001; Weiss, 2001; Bolongaro-Crevenna *et al.*, 2005; Gallant *et al.*, 2005; Iwahashi e Pike, 2007); sendo a última delineada mais detalhadamente na sequência, considerando tanto abordagens especificamente geomorfológicas, quanto a influência da estrutura do relevo e de suas funções frente a outros aspectos do meio físico.

Parâmetros geomorfométricos em Geomorfologia

A geomorfometria, antes de se tornar uma área de conhecimento com "direitos próprios", por muito tempo foi considerada uma subárea da geomorfologia, devido seu amplo conjunto de relações mútuas, diretas e indiretas (Macmillan e Shary, 2009). Apesar de ter se individualizado enquanto ciência, a geomorfometria cumpre funções imprescindíveis na análise geomorfológica, apresentando inúmeras vantagens em relação aos procedimentos manuais e qualitativos, tais como as indicadas por Macmillan *et al.* (2000); Iwahashi e Pike (2007) e Evans (2012).

Considerando a taxonomia e cartografia geomorfológica, propostas metodológicas intensificaram-se a partir do Congresso Internacional de Geógrafos, realizado em 1956 na cidade do Rio de Janeiro, promovido pela União Geográfica Internacional (UGI). Deste evento resultou uma comissão específica para impulsionar as pesquisas com esta finalidade, que passaram a se desenvolver sistematicamente, sobretudo, em países europeus, culminando nos sistemas de mapeamento francês (ex. Tricart e Cailleux, 1956; Tricart, 1965), soviético (ex. Mescerjakov, 1968; Demek, 1972;), holandês (ex. Verstappen e Zuidam, 1975; Verstappen, 1983) e alemão (ex. Kügler, 1976). Algumas delas influenciaram significativamente as metodologias desenvolvidas e aplicadas em território brasileiro (ex. IPT, 1981; Ross, 1992; Ross e Moroz, 1997; Santos *et al.*, 2006; IBGE, 2009).

Porém, como as propostas mencionadas se estruturaram a partir de modelos teóricos distintos ou ênfases em determinados aspectos geomorfológicos, tornou-se inviável o estabelecimento de normativas e padronizações definitivas, ao menos no contexto internacional (Ross, 1990).

Por outro lado, à caracterização e cartografia do relevo evoluiu concomitantemente aos subsídios teóricos e metodológicos posteriores, destacando-se aqueles disponibilizados pela Geomorfometria, que sendo estruturadas a partir de operações matemáticas, estatísticas e computacionais em desenvolvimento progressivo, foram responsáveis por ampliar a precisão na extração e classificação de elementos geomorfológicos, abrangendo a derivação de modelos digitais por métodos automáticos ou semiautomáticos em ambiente SIG (Macmillan *et al*., 2000; Iwahashi e Pike, 2007; Klingseisen *et al*., 2008; Evans, 2012).

Destaca-se que na análise geomorfológica quantitativa, os procedimentos manuais e a interpretação visual qualitativa ainda possuem funções importantes (Romstad, 2001; Valeriano, 2008), inclusive servindo como critério para validação ou comparação de dados gerados automaticamente (Gallant *et al*., 2005; Seijmosbergen *et al*., 2011).

Mesmo assim, em comparação a métodos manuais, a classificação digital das formas de relevo possibilita que unidades homogêneas sejam melhores reconhecidas em relação às unidades adjacentes (Macmillan e Shary, 2009) e que as mesmas sejam hierarquizadas em níveis taxonômicos mais precisos (Dikau, 1990;

Macmillan *et al.,* 2004), possibilitando a estruturação de "um sistema de informações geomorfológicas capaz de prover métodos apropriados de análise e modelagem" (Dikau, 1990, p. 230). Melhorando a consistência e confiabilidade na precisão e espacialização dos dados adquiridos, estes procedimentos modernos permitem, ainda, que os mapeamentos sejam elaborados em escalas diversificadas – das locais às continentais.

Klingseisen *et al.* (2008), constatando alto grau de subjetividade na delimitação visual do relevo, bem como diversas limitações das plataformas SIG sobre os objetivos estipulados, elaboraram *software* específico (LANDFORM 2) estruturado por algoritmo *fuzzy* para classificação semiautomatizada de unidades homogêneas, fundamentando-se em Speight (1990).

Considerando a possibilidade de testar padronizações em MDE e em seguida ajustá-las de acordo com a complexidade geomorfológica da porção sudoeste do território australiano, os autores definiram objetivos direcionados à agricultura de precisão (Fazenda Muresk). O estudo consistiu em subdividir atributos topográficos básicos (parte superior, média e inferior) para definição de classes primárias de formas de relevo, cujos ruídos remanescentes (células únicas ou tiras estreitas) puderam ser removidos por filtro de mediana, estruturado em janela de 5x5 células.

Uma questão importante relacionada à análise digital do relevo é de que parâmetros geomorfométricos aplicados em classificações e mapeamentos tradicionais sejam submetidos à automatização. Gallant *et al.* (2005) disponibilizaram-se a esta tarefa em relação às proposições de Hammond (1964), que se pautou, por sua vez, na combinação de mapas de declividade, formas e perfis topográficos para definir 12 classes de formas de relevo em estudo aplicado na porção norte do Alasca (EUA).

A aplicação desta metodologia em ambiente SIG refere-se à utilização de janelas móveis (10x10) de MDE para extração e combinação dos mesmos parâmetros adotados originalmente, cuja validação estatística não se viabilizou devido à indisponibilidade dos dados quantitativos no trabalho de referência. Apesar do maior detalhamento existente no mapa digital, os autores constataram visualmente muitas similaridades com o mapa analógico, embora ponderem que nem todas as metodologias para mapeamentos analógicos possam ser informatizadas.

Propondo uma classificação geomorfológica essencialmente automatizada, Macmillan *et al.* (2000) desenvolveram método envolvendo a lógica *fuzzy* em MDEs para identificação heurística de 15 padrões morfológicos, anteriormente categorizados por Pennock *et al.* (1994), baseando-se em parâmetros geomorfométricos primários. Aplicada no oeste canadense, esta pesquisa objetivou melhorar procedimentos manuais voltados à descrição de entidades geomorfológicas, especificamente aplicáveis na agricultura de precisão. Os principais resultados positivos obtidos referem-se à redução de fragmentação espacial, modelando áreas mais contínuas, e melhor distribuição de classes definidas em posições relativas de declividade.

Romstad (2001) considera que alguns parâmetros topográficos derivados de MDEs fornecem dados importantes sobre as características de certo elemento da paisagem. No entanto, avalia que o a distribuição espacial destes parâmetros normalmente é negligenciada em algoritmos comumente utilizados para classificação automática do relevo, não resolvendo integralmente problemas escalares ou relacionados à sobreposição entre diferentes classes.

O autor adaptou algoritmo de generalização (*cluster* iterativo), proposto inicialmente por Friedrich (1996), para particionar sua área de estudo (nordeste da Ilha *Spitzberg*, Noruega) em unidades homogêneas, levando em conta relações de vizinhança em *grids* de parâmetros geomorfométricos primários, responsáveis por definir grau de generalização – por ele denominado *Fusão Contextual*. Seu estudo concluiu que o método proposto é capaz de reiterar hipóteses sobre as relações entre parâmetros topográficos e formas de relevo, com a vantagem de simplificar a interpretação e aperfeiçoar a representação de sua distribuição espacial.

A necessidade de maior eficiência na distribuição espacial das categorias ou classes geomorfológicas é uma questão igualmente apontada por Iwahashi e Pike (2007), que sugerem que a discretização do relevo seja realizada mediante um número restrito de variáveis topográficas, ou seja, somente aquelas detentoras de recursos espaciais imprescindíveis.

Utilizando assinaturas geométricas – entendidas como um conjunto de medidas voltadas à distinção de unidades espaciais díspares (Pike, 1988), os autores demonstram que apenas três variáveis (declividade, convexidade e textura), quando submetidas a um conjunto de regras em uma árvore de decisão simples, são suficientes para gerar automaticamente mapas geomorfológicos. Esta premissa resultou em proposta de classificação que compreende oito, 12 e 16 classes aplicadas em escala distintas, respectivamente, no distrito de Shimukappu, Japão (MDE com 55m),

em todo o território japonês (MDE com 270m) e em toda porção continental da Terra (MDE com 1 km de resolução horizontal).

Em relação à análise da interdependência entre as variações topográficas com os demais aspectos do meio natural e/ou antrópico, destaca-se a proposta metodológica de Weiss (2001), que considera que muitas características físico-ambientais estão altamente correlacionadas à posição topográfica dos componentes de uma paisagem. Analisando a vizinhança existente entre valores de declividade e de elevação em MDE, buscou padrões espaciais para classificação supervisionada de feições e formas de relevo, relacionando-os a fenômenos hidrológicos, climatológicos e ecológicos em sua área de pesquisa: os arredores do Monte Hood (Oregon, EUA).

O autor propôs o algoritmo Índice de Posição Topográfica – IPT (*Topographic Position Index* – TPI) para verificar as diferenças entre valores de um ponto central de células *raster* com os valores médios do seu entorno. Utilizando-se de janelas anelares, pondera que valores positivos indicam áreas mais elevadas (ex. cristas e morros); valores negativos, locais mais rebaixados (ex. vales e depressões); e valores próximos à zero, superfícies planas (ex. planícies aluviais ou costeiras).

Como células de grade de valores idênticos podem se referir a contextos geomorfológicos distintos, sugere, ainda, que a discretização do IPT em formas de relevo se baseie na variabilidade de vizinhança existente, que pode ser definida a partir de valores de desvio padrão. Nesta conjuntura, define duas propostas de classificação de formas de relevo: uma com até seis classes – a partir de matriz única, com raio de análise de tamanho fixo; e outra com até dez classes – a partir de duas matrizes, com raios de análise com tamanhos que podem variar conforme o grau de generalização requerido.

Outros exemplos de classificação e mapeamento automatizado e semiautomatizado de unidades e formas geomorfológicas, bem como sua interrelação com meio físico e geoambiental, podem ser encontrados em Dikau *et al.* (1995), Miliaresis (2001), Bolongaro-Crevenna *et al.* (2005), Dragut e Blaschke (2006), Ehsani e Quiel (2008), Minár e Evans (2008), Saadat *et al.* (2008), Smith (2011) e Hani *et al.* (2012).

Conclusões

Com base no exposto verifica-se que a quantificação da superfície terrestre se baseou na necessidade do reconhecimento territorial durante a Antiguidade, tendo sido impulsionada, entretanto, em termos conceituais e metodológicos, somente a partir do final do século XIX, gradualmente se sistematizando enquanto ciência; culminando nas bases da Geomorfometria atual.

Em que pese suas múltiplas aplicações, desde a sistematização da Geografia, particularmente da Geografia Física, a geomorfometria têm se constituído com um arcabouço metodológico imprescindível. De maneira evolutiva, vem contribuído em muitas pesquisas que utilizam a informação topográfica como premissa.

A análise bibliográfica demonstrou que a acurácia das informações da superfície terrestre é inerente a crescente disponibilização de fontes de dados, sejam de origem terrestre ou orbital; cuja aplicabilidade, essencialmente interdisciplinar, é bastante promissora.

Entrementes, a utilização dos modelos digitais de diversificadas fontes, bem como dos parâmetros geomorfométricos deles derivados, deve ser acompanhada de uma análise crítica das suas potencialidades e limitações, de maneira a propiciar a melhor aproximação possível com a realidade. Neste sentido, destaca-se a necessidade de se conhecer não somente os procedimentos técnicos de extração automática de dados via SIG, mas, igualmente, das operações matemáticas e estatísticas que podem indicar o nível de precisão das informações adquiridas; que atribuídos de diferentes complexidades, são fundamentais na validação dos modelos gerados.

Reitera-se, entretanto, que os estudos em Geografia Física e de suas ramificações são dotados de um caráter científico mais rigoroso quando embasados pela geomorfometria, auxiliando a resolução daqueles problemas geoespaciais que, direta ou indiretamente, integram-se a diversidade dos objetos, formas e processos ocorridos na superfície terrestre; confirmando sua interdisciplinaridade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geografia da UFPR e ao Departamento de Geografia da UNICENTRO.

Referências

Almeida, P. E. M., Evsukoff, A. G., 2003. Sistemas Fuzzy, in: Rezende, S. O. (Org.), Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações. Manole, São Paulo, pp. 169-202.

Anderson, R. C., Shanks, P. C., Kritis, L. A., Trani, M. G., 2014. Supporting remote sensing research with small unmanned aerial systems.

The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40, 17-20.

Armstrong, R. N., Martz, L. W., 2003. Topographic parameterization in continental hydrology: a study in scale. Hydrological Processes [online] 17, 3763-3781. Disponível: dx.doi.org/10.1002/hyp.1352. Acesso: 05 fev. 2016.

Arun, P. V., 2013. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. The Egyptian Journal for Remote Sensing and Space Sciences [online] 16, 133-139. Disponível:https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.09.001. Acesso: 14 set. 2015.

Axelsson, O., 1999. Processing of laser scanner data – algorithms and aplications. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing [online] 54, 138-147. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00008-8. Acesso: 07 set. 2015.

Bell, A. D. F., 2012. Creating DEMs from Survey Data: Interpolation Methods and Determination of Accuracy. Geomorphological Techniques [online] 2(3.1), 1-9. Disponível: http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.3.1_CreatingDEMsFromSurveyData.pdf. Acesso: 07 ago. 2015.

Berry, J. K., 1996. Beyond Mapping: concepts, algorithms and Issues in GIS. Wiley, New Jersey.

Beven, K. J., Kirby, M. J., Schoffield, N., Tagg, A., 1984. Testing a physically based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. Journal of Hidrology [online] 69, 119-143. Disponível: https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90159-8. Acesso: 11 set. 2016.

Böhner, J., 2005. Advancements and new approaches in climate spatial prediction and environmental modelling. Arbeitsberichte des Geographischen Instituts der HU zu Berlin 109, 49-90.

Bolongaro-Crevenna, A., Torres-Rodríguez, V., Sorani, V., Frame, D., Ortiz, M. A., 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. Geomorphology [online] 67, 407-422. Disponível:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.007. Acesso: 04 jun. 2015.

Borisov, M., Bankovic, R., Drobnjak, S., 2009. Modelling the Uncertainty of Digital Elevation Models with Geostatistical Simulation and Application on Spatially Distribution of Soil Nitrogen. Scientific Technical Review [online] 59, 54-59. Disponível: http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/34-09/8/8.pdf. Acesso: 07 abr. 2015.

Burrough, P. A., 1986. Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Oxford Science Publications, New York. (Monographs on Soil and Resources Survey 12)

Burrough, P. A., Mcdonnell, R. A., 1998. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press Inc., New York.

Burrough, P. A., Van Gaans, P. F. M., Macmillan, R. A., 2000. High resolution landform classification using fuzzy k-means. Fuzzy Sets and Systems [online] 113, 37-52. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00011-1. Acesso: 10 fev. 2016.

Carrara, A., Bitelli, G., Carla, R., 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. International Journal of Geographical Information Science [online] 11, 451-473. Disponível: http://dx.doi.org/10.1080/136588197242257. Acesso: 02 jan. 2015.

Carmo, E. J., Rodrigues, D. D., Santos, G. R., 2015. Avaliação dos interpoladores Krigagem e Topo to Raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. Boletim de Ciências Geodésicas [online] 21, 674-690. Disponível: http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400039. Acesso: 04 mar. 2016.

Casella, V., Franzini, M., 2015. Standardization of figures and assessment procedures for DTM vertical accuracy. Geomatics. Natural Hazards and Risk [online] 6, 515-533. Disponível: http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2014.889047. Acesso: 04 dez. 2016.

Cetinsoy, E., Dikyar, C., Hancer, C., Oner, K. T., Sirimoglu, E., Unel, M., Aksit, M. F., 2012. Design and construction of a novel quad tilt-wing UAV. Mechatronics [online] 22, 723-745. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2012.0.003. Acesso: 22 jul. 2016.

Chorley, R. J., 1957. Climate and morphometry. Journal of Geology 65, 628-638.

Clarke, J., 1966. Morphometry from maps, in: Dury, G. H. (Ed.), Essays in Geomorphology. Heinemann, London, pp. 235-274.

Daly, C., Halbleib, M., Smith, J. I., Gibson, W. P., Doggett, M. K., Taylor, G. H., Curtis, J., Pasteris, P. P., 2008. Physiographically sensitive mapping of climatological temperature and precipitation across the conterminous United States. International Journal of Climatology [online] 28, 2031-2064.

Disponível: https://doi.org /10.1002/joc.1688. Acesso: 07 mar. 2016

Darnell, A. R., Nicholas, J. T., Brunsdon, C., 2008. Improving user assessment of error implications in digital elevation models. Computers, Environment and Urban Systems [online] 32, 268-277. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.02.003. Acesso: 12 out. 2015.

Demek, J., 1972. Manual of detailed geomorphological mapping. Academy of Sciences, Praga.

Dent, D., Young, A., 1981. Soil Survey and Land Evaluation, vol. XIII. George Allen & Unwin, London.

Desmet, P. J. J., 1997. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. Earth Surface Processes and Landforms [online] 22, 563-580. Disponível: https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199706)22:6<563::AID-ESP713>3.0.CO,2-3. Acesso: 11 mai. 2016.

Dikau, R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis, in: Raper, J. F. (Ed.), Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems. Taylor & Francis, London, pp. 51-77.

Dikau, R., 1990. Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory in: Brassel, K., Kishimoto, H. (Eds.), Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling. University of Zürich, Switzerland, pp. 230-239.

Dikau, R., Brabb, E. E., Mark, R. K., Pike, R. J., 1995. Morphometric landform analysis of New Mexico. Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband 10, 109-126.

DLR – Deutsche Zentrum für Luft-und Raumfahrt, 2016. TanDEM-X Science Service System. Disponível: https://tandemx-science.dlr.de/. Acesso: 7 out. 2016.

Doneus, M., Briese, C., 2006. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 155-162.

Dragut, L., Blaschke, T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. Geomorphology [online] 81, 330-344. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013. Acesso: 19 out. 2016.

Ehsani, A. H., Quiel, F., 2008. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. Geomorphology [online] 99, 1-12. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.002. Acesso: 18 mar. 2015.

Eisenbeiss, H., 2004. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition. International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online] 36 (5/W1). Disponível:https://pdfs.semanticscholar.org/3dde/3a3d661a99b641914989a402610347e505c9.pdf. Acesso: 07 set. 2015.

El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A., 2005. Digital Terrain Modelling: acquisition, manipulation and applications. Artech House Inc., Norwood-Massachusetts.

Endreny, T. A., Wood, E. F., 2001. Representing elevation uncertainty in runoff modelling and flowpath mapping. Hydrological Processes [online] 15, 2223-2236. Disponível: https://doi.org/10.1002/hyp.266. Acesso: 03 jan. 2016.

ESRI, 2010. ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst. Version 10.1. Environmental Systems Research Institute, Califórnia.

Evans, I. S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, in: Chorley, R. J. (Ed.), Spatial Analysis in Geomorphology. Harper & Row, New York, pp. 17-90.

Evans, I. S., Cox, N. J., 1999. Relations between land surface properties: altitude, slope and curvature, in: Hergarten, S., Neugebauer, H. J. (Eds.), Process Modelling and Landform Evolution. Springer Verlag, Berlin, pp.13-45.

Evans, J. S., Hudak, A. T., 2007. A multiscale curvature filter for identifying ground returns from discrete return lidar in forested environments. Transactions on Geoscience and Remote Sensing 45, 1029-1038. Disponível:https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2007_evans_j001.pdf. Acesso: 01 mar. 2016.

Evans, I. S., 2012. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? Geomorphology [online] 137, 94-106. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.029. Acesso: 09 out. 2015.

Everaerts, J., 2008. The use of UAVs for remote sensing and mapping. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online]. Beijing, China. Disponível: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/203.pdf. Acesso: 11 fev. 2016.

Fisher, P., 1998. Improved modeling of elevation error with geostatistics. GeoInformatica [online] 2, 215-233. Disponível:

https://doi.org/10.1023/A:1009717704255. Acesso: 17 fev. 2016.

Fisher, P. F., Tate, N. J., 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. Progress in Physical Geography [online] 30, 467-489. Disponível: https://doi.org/10.1191/0309133306pp492ra. Acesso: 11 out. 2016.

Florinsky, I. V., 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. International Journal of Geographical Information Science [online] 12, 47-62. Disponível: http://dx.doi.org/10.1080/136588198242003. Acesso: 28 fev. 2016.

Friedrich, K., 1996. Multivariate distance methods for geomorphographic relief classification. In: Proceedings EU Workshop on Land Information Systems: Developments for planning the sustainable use of land resources. European Soil Bureau, Hannover.

Gallant, J. C., Wilson, J. P., Tapes, G., 1996. A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences. Computers & Geosciences [online] 22 , 713-722. Disponível: https://doi.org/10.1016/0098-3004(96)00002-7. Acesso: 12 out. 2015.

Gallant, A. L., Brown, D.D., Hoffer, R.M., 2005. Automated Mapping of Hammond's Landforms. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters [online] 2, 384-388. Disponível: https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.848529. Acesso: 11 jul. 2015.

Gallant, J. C., Hutchinson, M. F., 2006. Producing digital elevation models with uncertainty estimates using a multiscale Kalman filter. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Lisbon, pp.150-160.

Gruber, S., Peckham, S., 2009. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology, in: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.) ,Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 171-194. (Series Developments in Soil Science, 33)

Hammond, E. H., 1964. Analysis of properties in landform geography: an application to broad-scale landform mapping. Ann. Assoc. Am. Geogr. [online] 54, 11-19. Disponível: https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1964.tb00470.x. Acesso: 11 mai. 2016.

Hani, A. F. M., Sathyamoorthy, D., Asirvadam, V. S., 2012. Computing surface roughness of individual cells of Digital Elevation Models via multiscale analysis. Computers & Geosciences [online] 43, 137-146. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.09.015. Acesso: 14 set. 2015.

Hebeler, F., Purves, R. S., 2009. The influence of elevation uncertainty on derivation of topographic indices. Geomorphology [online] 111, 4-16. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.026. Acesso: 12 fev. 2016.

Hengl, T., Gruber, R. S., Shrestha, D. P., 2004. Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modeling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation [online] 5, 97-112. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.01.006.
Acesso: 01 dez. 2015.

Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. Computers & Geosciences [online] 32, 1283-1298. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008. Acesso: 13 nov. 2015.

Hengl, T., Evans, I., 2009. Mathematical and Digital Models of the Land Surface, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 31-64. 07 mar. 2016. (Series Developments in Soil Science, 33)

Hofer, M., Sapiro, G., Wallner, J., 2006. Fair polyline networks for constrained smoothing of digital terrain elevation data. Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online] 44, 2983-2990. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875451. Acesso: 04 dez. 2015.

Holmes, K. W., Chadwick, O. A., Kyriakidis, P. C., 2000. Error in a USGS 30m digital elevation model and its impact on digital terrain modeling. Journal of Hydrology [online] 233, 154-173. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00229-8. Acesso: 17 jun. 2015.

Hong, Y., Nix, H. A., Hutchinson, M. F., Booth, T.H., 2005. Spatial interpolation of monthly mean climate data for China. International Journal Climatolology [online] 25, 1369-1379. Disponível:http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1187/pdf. Acesso: 21 fev. 2016.

Hormann, K., 1969. Geomorphologische Kartenanalyse mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. Zeitschrift für Geomorphologie 133 (1), 75-98.

Horn, B. K. P., 1981. Hill shading and the reflectance map. Proceedings of the IEEE [online] 69, 14-47. Disponível: https://doi.org/10.1109/PROC.1981.11918. Acesso: 07 abr. 2015.

Hörsch, B., 2003. Modelling the spatial distribution of montane and subalpine forests in

the central Alps using digital elevation models. Ecological Modelling [online] 168, 267-282. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00141-8. Acesso: 10 jan. 2016.

Huising, E. J., Gomes-Pereira, L. M., 1998. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing [online] 53, 245-261. https://doi.org/10.1016/S0924-2716(98)00013-6. Acesso: 19 mar 2016.

Hutchinson, M. F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hidrology [online] 106, 211-232. Disponível: https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5. Acesso: 24 mar. 2016.

Hutchinson, M. F., Gallant, J. C., 2000. Digital elevation models and representation of terrain shape, in: Wilson, J.P., Gallant, J. C. (Eds.), Terrain Analysis: Principles and Applications. Wiley, New Jersey, pp. 29-50.

Hutton, C., Brazier, R., 2012. Quantifying riparian zone structure from airborne LiDAR: vegetation filtering, anisotropic interpolation, and uncertainty propagation. Journal of Hydrology [online] 442-443, 36-45. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.043. Acesso: 07. Abr. 2015

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009. Manual técnico em geomorfologia, 2 ed. IBGE, Rio de Janeiro.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. IPT, São Paulo.

Iwahashi, J., Pike, R. J., 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology [online] 86, 409-440. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012. Acesso: 18 fev 2015.

JAXA. Japan Aerospace Exploration Agency, 2016. World 3D Topographic Data. Disponível: http://aw3d.jp/en/. Acesso: 05 mar. 2016. Acesso: 11 fev. 2016.

Johnson, L., Herwitz, S., Dunagan, S., Lobitz, B., Sullivan, D., Slye, R., 2003. Collection of Ultra High Spatial and Spectral Resolution Image Data over California Vineyards with a Small UAV. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Environment [online]. Disponível: https://pdfs.semanticscholar.org/bdd7/ad027c773b2a1bf53d865b92c0a7199a6da1.pdf?_ga=2.240697539.1987294132.1495502243138908146 2.1495502243. Acesso: 04 dez. 2015.

Klingseisen, B., Meternicht, G., Paulus, G., 2008. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. Environmental. Modelling & Software [online] 23, 109-121. Disponível:https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.007. Acesso: 01 fev. 2016.

Knöpfle, W., Strunz, G., Roth, A., 1998. Mosaicking of Digital Elevation Models derived by SAR Interferometry, in: Fritsch, D., Englich, M., Sester, S. (Eds.), The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing [online] 32/4. Commission IV GIS between Visions and Applications, Stuttgart, pp. 306-313. Disponível: https://pdfs.semanticscholar.org/fbeb/44e27d73246575c220ff6ecb4fa8c2f85057.pdf. Acesso: 09 abr. 2016.

Koh, L., Wich, S., 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. Tropical Conservation Science [online] 5, 121-132. Disponível: http://tropicalconservationscience.mongabay.com/content/v5/TCS-2012_jun_121-132_Koh_and_Wich.pdf. Acesso: 12 fev. 2016.

Korup, O., 2004. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams. Engineering Geology [online] 73, 13-35. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.003. Acesso: 14 abr. 2015.

Kostrzewa, J., Meyer, W. H., Laband, S., Terre, W. A., Petrovich, P., Swanson, K., 2003. An Infrared Microsensor Payload for Miniature Unmanned Aerial Vehicles. Unattended Ground Sensor Technologies and Applications. Proceedings of the SPIE [online], 265-274. Disponível: https://doi.org/10.1117/12.500712. Acesso: 08 jul. 2015.

Krcho, J., 1973. Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory. Slovak Pedagogical Publishers, Bratislava.

Kügler, H., 1976. Zur Aufgaben der geomorphologischen Forschung und Kartierung in der DDR. Petermanns Geographische Mitteilungen 120, 154-160.

Li, Z., Zhu, Q., Gold, C., 2005. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. CRC Press, Boca Raton.

Lin, Z., Oguchi, T., 2004. Drainage density, slope angle, and relative basin position in Japanese bare lands from high-resolution DEMs. Geomorphology [online] 63, 159-173. Disponível:https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.012. Acesso: 09 ago. 2015.

Lindsay, M. D., Jessell, M. W., Ailleres, L., Perrouty, S., Kemp, E., Betts, P. G., 2013. Geodiversity: Exploration of 3D geological model space. Tectonophysics [online] 594, 27-

37. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.013. Acesso: 18 mai. 2015.

Lucieer, A., Jong, S. M., Turner, D., 2014. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. Progress in Physical Geography [online] 38, 97-116. Disponível: http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0309133313515293. Acesso: 13 mai. 2015.

Macmillan, R. A., Pettapiece, W. W., Nolan, S. C., Goddard, T. W., 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. Fuzzy Sets and Systems [online] 113, 81-109. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0165-0114(99)00014-7. Acesso: 18 fev. 2016.

Macmillan, R. A., Jones, R. K., Mcnabb, D. H., 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using Digital Elevation Models (DEMs). Computers, Environment and Urban Systems [online] 28, 175-200. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0198-9715(03)00019-X. Acesso: 17 mar. 2016.

Macmillan, R. A., Shary, P. A., 2009. Landform and landform elements in geomorphometry, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), Geomorphometry – Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 227-254. (Series Developments in Soil Science, 33)

Manosso, F. C., Nóbrega, M. T., 2015. Calculation of geodiversity from landscape units of the Cadeado Range region in Paraná, Brazil. Geoheritage [online] 8, 189-199. Disponível: https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-015-0152-1. Acesso: 12 mar. 2015.

Marcuzzo, F. N. N., Andrade, L. R., Melo, D. C. R., 2011. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 4, 793-804. Disponível: http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/197. Acesso: 18 fev. 2016.

Mark, D. M., Smith, B., 2004. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations, in: Bishop, M. P., Shroder, J. F. (Eds.), Geographic Information Science and Mountain Geomorphology. Springer-Praxis, Chichester, pp. 75-97.

Martinoni, D., 2002. Models and experiments for quality handling in Digital Terrain Modelling. Thesis (Ph.D.). Zürich, University of Zürich.

Martz, L. W., Jong, E., 1988. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models. Computers and Geosciences 14, 627-640.

Maune, D. F., 2001. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User's Manual. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda.

Medeiros, F. A., Alonso, A. S., Balestra, M. R. G., Dias, V. O., Landerhal Jr., M. L., 2008. Utilização de um veículo aéreo não-tripulado em atividades de imageamento e georreferenciado. Ciência Rural [online] 8, 2375-2378. Disponível: http://www.scielo.br/pdf/cr/v38n8/a46v38n8.pdf. Acesso: 04 mar. 2016.

Mescerjakov, J. P., 1968. Lês concepts de morphostructure et de morphosculture: um nouvel instrument de l´analyse géomorphologique. Annales de Geógraphie [online] 77, 539-552. Disponível: http://www.persee.fr/doc/geo_00034010_1968_num_77_423_15733. Acesso: 14 mai. 2015.

Miliaresis, G. C., 2001. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. Computers and Geosciences [online] 27, 775-786. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00168-0. Acesso: 19 ago. 2015.

Minár, J., Evans, I. S., 2008. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. Geomorphology [online] 95, 236-259. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.003. Acesso: 14 ago 2015.

Moore, I. D., Grayson, R. B., Ladson, A. R., 1991. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes [online] 5, 3-30. Disponível: https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103. Acesso: 13 fev. 2015.

NASA. National Aeronautics and Space Administration, 2015. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível: http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/. Acesso: 10 ago. 2015.

Nelson, A., Reuter, H. I., Gessler, P., 2009. DEM Production Methods and Sources, in: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 65-86. (Series Developments in Soil Science, 33)

Novo, E. M. L. M., 2008. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações, 3 ed. Blucher, São Paulo.

O'callaghan, J. F., Mark, D. M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. Computer Vision, Graphics and Image Processing [online] 28, 323-344. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0. Acesso: 13 fev. 2015.

Oksanen, J., 2006. Uncovering the statistical and spatial characteristics of fine toposcale DEM error. International Journal of Geographical Information Science [online] 20, 345-369. Disponível:http://dx.doi.org/10.1080/13658810500433891.Acesso: 10 ago. 2015.

Olaya, V., 2009. Basic Land-Surface Parameters, in: Hengl, T., Reuter, H. I. (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 141-170. (Series Developments in Soil Science, 33)

Pain, C. F., 2005. Size does matter: relationships between image pixel size and landscape process scales, in: Zerger, A., Argent, R.M. (Eds.), International Congress on Modelling and Simulation. Society of Australia and New Zealand, Melbourne, pp. 1430-1436.

Pennock, D. J., Anderson, D. W., Jong, E. D., 1994. Landscape changes in indicators of soil quality due to cultivation in Saskatchewan, Canada. Geoderma [online] 64, 1-19. Disponível: https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90086-8. Acesso: 13 fev. 2015.

Pennock, D. J., 2003. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. Soil and Tillage Research [online] 69, 15-26. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00125-3. Acesso: 10 ago. 2015. 13 fev. 2015.

Pike, R. J., 1988. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models. Mathematical Geology [online] 20, 491-511. Disponível: https://doi.org/10.1007/BF00890333. Acesso: 13 fev. 2015.

Pike, R. J., 2000. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. Progress in Physical Geography [online] 24, 1-20. Disponível: http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/030913330002400101. Acesso: 13 fev. 2015.

Pike, R. J., Evans, I., Hengl, T., 2009. Geomorphometry: a brief guide, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, 3-30. (Series Developments in Soil Science, 33)

Rabus, B., Eineder, M., Roth, A, Bamler, R., 2003. The Shuttle Radar Topography Mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing [online] 57, 241-262. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00124-7. Acesso: 13 fev. 2016.

Rasemann, S., Schmidt, J., Schrott, L., Dikau, R., 2004. Geomorphometry in mountain terrain, in: Bishop, M. P., Shroder, J. F. (Eds.), GIS & Mountain Geomorphology. Springer, Berlin, pp.101-145.

Reuter, H. I., Nelson, A., Jarvis, A., 2007. An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. International Journal of Geographical Information Science [online] 21, 1-57. Disponível: http://dx.doi.org/10.1080/13658810601169899 Acesso: 13 fev. 2015.

Reuter, H. I., Hengl, T., Gessler, P., Soille, P., 2009. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam, Elsevier, pp. 87-120. (Series Developments in Soil Science, 33)

Reuter, H. I., Nelson, A., 2009. Geomorphometry in ESRI Packages, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), Geomorphometry, Concepts, Software, Applications. Amsterdam. Elsevier, pp. 269-292. (Series Developments in Soil Science, 33)

Romstad, B., 2001. Improving relief classification with contextual merging. Proceedings of ScanGIS'2001 – The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. Ås, Norway, 3-13.

Rosa, R., 2005. Geotecnologias na geografia aplicada. Revista do Departamento de Geografia 16, 81-90.

Ross, J. L. S., 1990. Geomorfologia: ambiente e planejamento. Contexto, São Paulo.

Ross, J. L. S., 1992. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. São Paulo. Revista do Departamento de Geografia da USP 6, 17-29.

Ross, J. L. S., Moroz, I. C., 1997. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. IPT/FAPESP, São Paulo.

Saadat, H., Bonnell, R., Sharifi, F., Mehuys, G., Namdar, M., Ale-Ebrahim, S., 2008. Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. Geomorphology 100, 453-464. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.011. Acesso: 14 fev. 2016.

Sailer, R., Rutzinger, M., Rieg, L., Wichmann, V., 2014. Digital elevation models derived from airborne laser scanning point clouds: appropriate spatial resolutions for multi-temporal characterization and quantification of geomorphological processes. Earth Surface Processes and Landforms [online] 39, 272-284. Disponível: https://doi.org/10.1002/esp.3490. Acesso: 17 fev. 2016.

Salinas, S., López-Blanco, J., 2010. Geomorphic assessment of the debris avalanche deposit from the Jocotitlán volcano, Central Mexico. Geomorphology [online] 123, 142-153. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.07.006. Acesso: 09 abr. 2015.

Santos, L. J. C., Oka-Fiori, C., Canali, N. E., Fiori, A. P., Silveira, C. T., Silva, J.M.F., Ross, J. L. S., 2006. Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná. Revista Brasileira de Geomorfologia [online] 7, 03-12. Disponível:http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v7i2.74. Acesso: 13 dez. 2015.

Schmidt, J., Dikau, R., 1999. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models – semantics, methods, future needs, in: Dikau, R., Saurer, H. (Eds.), GIS for Earth Surface Systems - analysis and modelling of the natural environment. Schweizbart'sche, Verlagsbuchhandlung, pp.153-173.

Schmidt, J., Evans, I. S., Brinkmann, J., 2003. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. International Journal of Geographical Information Science [online] 17, 797-814. Disponível: http://dx.doi.org/10.1080/13658810310001596058. Acesso: 17 fev. 2016.

Seijmonsbergen, A .C., Hengl, T., Anders, N. S., 2011. Semi-automated extraction of geomorphological features using DEMs, in: Smith, M. J., Paron, P., Griffiths, J. (Eds.), Geomorphological Mapping: Methods and Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 297-335. (Developments in Earth Surface Processes, 15)

Shary, P.A., 1991. The second derivative topographic method, in: Stepanov, I. N. (Ed.). The Geometry of Earth Surface Structures. Pushchino Research Centre Press, Pushchino, pp. 28-58.

Shary, P. A., Sharaya, L. S., Mitusov, A. V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. Geoderma [online] 107 (1-2), 1-32.https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7. Acesso: 11 mai. 2015.

Shary, P. A., Sharaya, L. S., 2014. Change in NDVI of Forest Ecosystems in Northern Caucasus as a Function of Topography and Climate. Contemporary Problems of Ecology [online] 7, 855-863. Disponível: https://doi.org/10.1134/S1995425514070099. Acesso: 19 jan. 2016.

Siebert, S., Teizer, J., 2014. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction [online] 41, 1-14. Disponível:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.01.004. Acesso: 07 set. 2015.

Silveira, C. T., Oka-Fiori, C., Santos, L. J. C., Sirtolo, A. E., Silva, C. R., Botelho, M.F., 2013. Soil prediction using artificial neural networks and topographic atributes. Geoderma [online] 195-196, 165-172. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.016. Acesso: 19 abr. 2015.

Smith, S. L., Holland, D. A., Longley, P., 2005. Quantifying interpolation errors in airborne laser scanning models. Geographical Analysis [online] 37, 200-224. Disponível: https://doi.org/10.1111/j.15384632.2005.00636.x. Acesso: 12 mai. 2015.

Smith, S. E., 2005. Topographic mapping, in: Grunwald, S. (Ed.), Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press, New York, pp. 155-182.

Smith, M. J., 2011. Digital Mapping: Visualisation, Interpretation and Quantification of Landforms, in: Smith, M. J., Paron, P., Griffiths, J. S. (Eds.), Geomorphological Mapping: Methods and Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 225-251.

Speight, J. G., 1968. Parametric description of landform, in: Stewart, G. A. (Ed.), Land evaluation. Macmillan, Australia, pp. 239-250.

Speight, J. G., Landform, in: Mcdonald, R. C., Isbell, R. F., Speight, J. G., Walker, J., Hop, M.S., (Eds.), 1990. Australian Soil and Land Survey Field Handbook. Inkata Press, Melbourne, pp. 9-57.

Stein, A., Riley, J., Halberg, N., 2001. Issues of scale for environmental indicators. Agriculture, Ecosystems & Environment [online] 87, 215-232. Disponível: https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00280-8. Acesso: 12 fev. 2015.

Steiniger, S., Bocher, E., 2009. An Overview on Current Free and Open Source Desktop GIS Developments. International Journal of Geographical Information Science [online] 23, 1345-1370. Disponível:

http://dx.doi.org/10.1080/13658810802634956. Acesso: 12 mai. 2015.

Strahler, A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin [online] 63, 1117-1142. Disponível: http://dx.doi.org/10.1130/00167606(1952)63[1117. Acesso: 13 jan. 2015.

Tan, Q., Xu, X., 2014. Comparative Analysis of Spatial Interpolation Methods: an Experimental Study. Sensors & Transducers [online] 165, 155-163. Disponível: http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/february_2014/Vol_165/P_1893.pdf. Acesso: 01 mar. 2016.

Tarboton, D. G., 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid Digital Elevation Models. Water Resources Research [online] 33, 309-319. Disponível: http://dx.doi.org/10.1029/96WR03137. Acesso: 12 nov. 2015.

Tatalovich, Z., Wilson, J. P., Cockburn, M., 2006. A comparison of Thiessen Polygon, Kriging and Spline Models of Potential UV Exposure. Cartography and Geographic Information Science [online] 33, 217-231. Disponível: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1559/152304006779077318. Acesso: 19 nov. 2015.

Temme, A. J. A. M., Heuvelink, G. B. M., Schoorl, J. M., Claessens, L., 2009. Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry, in: Hengl, T., Reuter, H.I., (Eds.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 121-140. (Series Developments in Soil Science, 33.)

Testa, B., Aldighieri, B., Bertini, A., Blendinger, W., Caielli, G., De Franco, R., Giordano, D., Kustatscher, E., 2013. Geomorphodiversity of the San Lucano Valley (Belluno Dolomites, Italy): a Well-Preserved Heritage. Geoheritage [online] 5, 151-172. http://dx.doi.org/10.1007/s12371-013-0079-3. Acesso: 11 mai. 2015.

Tobler, W. R., 2000. The development of analytical cartography – a personal note. Cartography and Geographic Information Science [online] 27, 189-194. Disponível: http://dx.doi.org/10.1559/15230400078354786 7. Acesso: 08 jan. 2015.

Tricart, J., Cailleux, A., 1956. Le problème de la classification dês faits géomorphologiques. Annales de Géographie [online] 349, 162-186. Disponível:http://www.persee.fr/docAsPDF/geo_0003-4010_1956_num_65_349_14285.pdf. Acesso: 11 dez. 2016.

Tricart, J., 1965. Principles et méthodes de la Geomorphologie. Masson et Cie, Paris.

Valeriano, M. M., 2004. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. INPE, São José dos Campos.

Valeriano, M. M., 2008. Dados Topográficos, in: Florenzano, T. G. (Org.), Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos, São Paulo, pp. 73-104.

Van Niel, K., Laffan, S. W., Lees, B. G., 2004. Effect of error in the DEM on environment variables for predictive vegetation modelling. Journal of Vegetation Science [online] 15, 747-756. Disponível: http://dx.doi.org/10.1111/j.16541103.2004.tb02317.x. Acesso: 27 fev. 2016.

Verhagem, P., Dragut, L., 2012. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. Journal of Archaeological Science [online] 39, 698-703. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.001. Acesso: 28 dez. 2015.

Verstappen, H. T., Zuidam, R. A. V., 1975. ITC System of geomorphological survey. Elsevier, Amsterdam.

Verstappen, H. T., 1983. Applied Geomorphology: geomorphological surveys for environmental development. Elsevier, Amsterdam.

Weibel, R., Heller, M., 1991. Digital terrain modelling, in: Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D.W. (Eds.), Geographical Information Systems. Longman, London, pp. 269-297.

Weiss, A., 2001. Topographic Position and Landforms Analysis – Poster presentation. Disponível:http://www.jennessent.com/downloads/tpi-poster-tnc_18x22.pdf. Acesso: 03 mar. 2015.

Wilson, J. P., Gallant, J. C. (Eds.), 2000. Terrain Analysis: principles and applications. John Wiley & Sons, New York.

Wilson, J. P., 2012. Digital terrain modelling. Geomorphology [online] 137, 107-121. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012. Acesso: 23 fev. 2015.

Wise, S. M., 1998. The effect of GIS interpolation errors on the use of digital elevation models in geomorphology, in: Lane, S.N., Richards, K. S., Chandler, J. H. (Eds.), Landform Monitoring, Modelling and Analysis. Wiley, New Jersey, pp. 139-164.

Wise, S. M., 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. Hydrological Processes [online] 14 (11-12), 1909-1929. Disponível: https://doi.org/10.1002/1099-

1085(20000815/30)14:11/12<1909:AID-HYP45>3.0.CO,2-6. Acesso: 11 fev. 2016.

Wood, W. F., Snell, J.B., 1957. The dispersion of geomorphic data around measures of central tendency and its application. Research Study Report EA-8. U.S. Army Quartermaster Research and Development Center, Natick, MA.

Wood, J., 2009. Overview of Software Packages Used in Geomorphometry, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.) Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Elsevier, Amsterdam, pp. 257-268. (Series Developments in Soil Science, 33)

Young, A., 1972. Slopes. Oliver and Boyd, Edinburgh.

Zandebergen, P. A., 2011. Error Propagation Modeling for Terrain Analysis using Dynamic Simulation Tools in ArcGIS Modelbuilder. Geomorphometry [online], 57-60. Disponível: http://www.geomorphometry.org/system/files/Zandbergen2011geomorphometry.pdf. Acesso: 09 mai. 2015.

Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. Earth Surface Processes and Landforms [online] 12, 47-56. Disponível: https://doi.org/10.1002/esp.3290120107. Acesso: 02 mar. 2016.

Zhou, Q., Liu, X., 2004. Analysis of errors of derived slope and aspect related to DEM data properties. Computers & Geosciences [online] 30, 369-378. Disponível: https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.07.005. Acesso: 03 abr. 2015.

Zhou, Q., Lees, B., Tang, G., 2008. Advances in Digital Terrain Analysis. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer-Verlag, Berlim.

Zwoliñski, Z., 2010. The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. Landform Analysis [online] 11, 77-85. Disponível: http://geoinfo.amu.edu.pl/sgp/LA/LA11/LA11_11.pdf. Acesso: 11 nov. 2015.