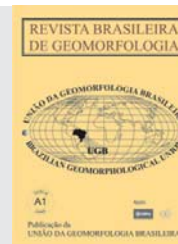




www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 15, nº 1 (2014)



ÍNDICE DE CONCENTRAÇÃO DA RUGOSIDADE: UMA NOVA PROPOSTA METODOLÓGICA PARA O MAPEAMENTO E QUANTIFICAÇÃO DA DISSECAÇÃO DO RELEVO COMO SUBSÍDIO A CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA.

ROUGHNESS CONCENTRATION INDEX: A NEW METHODOLOGY FOR QUANTIFICATION AND MAPPING OF RELIEF DISSECTION AS GEOMORPHOLOGICAL MAPPING SUBSIDY.

Tony Vinicius Moreira Sampaio

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná.

Av Cel Francisco H dos Santos, s/n. Jardim das Américas. CEP: 81530-900 - Curitiba/PR, Brasil.

E-mail: tonsampaio@ufpr.br

Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin

Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais.

Av. Antônio Carlos 6.627, Pampulha. CEP: 31270910 - Belo Horizonte/MG, Brasil.

E-mail: cristinaaugustin@gmail.com

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:

13/11/2012

Data de Aprovação:

30/12/2013

Palavras-chave:

Mapeamento Geomorfológico, Morfometria, Índice de Concentração da Rugosidade.

Keywords:

Geomorphic Mapping, Morphometry, Roughness Concentration Index.

Resumo

As diferentes metodologias utilizadas, atualmente, para mapeamento e quantificação do relevo incorporam diferentes graus de subjetividade que dificultam a obtenção de unidades morfológicas padronizadas. Tendo em vista a carência de propostas de quantificação que reduzam essas subjetividades e considerem o potencial de uso dos modelos digitais de elevação (Digital Elevation Model - DEM) e das ferramentas disponibilizadas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é que se apresenta o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR). Este leva em consideração as propostas de Horton (1945) e Hobson (1972), o uso dos Modelos Digitais de Elevação, bem como a aplicação do estimador de densidade por Kernel, ferramenta geoestatística presente na maioria dos SIGs disponíveis no mercado. Este trabalho tem como objetivo descrever a metodologia proposta, dividindo-a em ICR Global e Local, empregando-os para identificação de unidades gerais e locais de relevo (comparativas) com base na análise da distribuição e recorrência espacial da declividade. A metodologia e o potencial de uso do ICR são demonstrados a partir de sua aplicação em áreas amostrais, as quais apresentam distintas características geológicas e geomorfológicas e, a partir da apresentação de pesquisas que já fizeram emprego desta metodologia como auxiliar ao processo de mapeamento e compartimentação geomorfológica.

Abstract

The different methods used nowadays for the quantification of relief forms present some degree of subjectivity that makes it difficult to obtain homogeneous morphological relief units. Therefore, there is the need for a proposal that quantifies and reduces subjectivity and considers the potential use of digital elevation models (Digital Elevation Model-DEM) as well as the tools available in Geographic Information Systems (GIS). We propose the use of the Roughness Concentration Index (RCI) which considers of takes into account Horton's (1945) and Hobson's (1972) proposals, the use of Digital Elevation Models and the application of kernel density estimator that is a geostatistic tool available in all GIS packages. The objective of this paper is to detail the RCI methodology that is divided in Global and Local RCI in order to identify general and local relief units (comparative studies) on the basis of the spatial distribution and recurrence of slope declivity. The methodology and the potential use of the RCI are demonstrated by its application in studied areas, which have different geological and geomorphological features and, from the presentation of research that already used as an aid to mapping and geomorphological compartmentalization process.

1. Introdução

Diferentes metodologias utilizadas para a classificação do relevo adotam como referência para sua compartimentação critérios de estrutura, gênese, forma, datação ou a combinação delas (TRICART, 1965; DEMEK, 1967; AB'SABER, 1969; ROSS, 1992; LOLLO, 1996; IBGE, 2009). A partir dessas análises e dos objetivos do estudo é possível obter classificações e compartimentações das formas de relevo predominantes como planícies, planaltos, *inselbergs*, relevos dissecados e outras.

A maioria dessas metodologias é qualitativa e, quando adota referências quantitativas, incorporam diferentes níveis de subjetividades (BISHOP *et al*, 2012) que vão desde a etapa de coleta dos dados até a de definição das classes, o que dificulta a obtenção de unidades morfológicas homogêneas que independam dos materiais de análise e demais elementos envolvidos conforme observado por Sampaio e Augustin (2008).

As divergências e descontinuidades nos limites das unidades delimitadas são ainda maiores, quando o mapeamento é realizado por diferentes equipes ou a partir de diferentes referências de escala e materiais cartográficos (imagens de satélite, fotos aéreas, modelos digitais de elevação, outros) e são definidas classificações distintas para uma mesma unidade morfométrica mapeada. Isto resulta quase sempre em dificuldade na obtenção de parâmetros morfométricos que caracterizem, adequadamente, o relevo, como é o caso das descontinuidades observadas quando da junção dos mapeamentos geomorfológicos dos estados de São Paulo (ROSS & MOROZ, 1997) e Paraná (MINEROPAR, 2006), apesar de empregarem a mesma metodologia.

A dificuldade de identificação e delimitação de unidades geomorfológicas é um problema antigo e decorrente das subjetividades metodológicas e conceituais inerentes ao processo de mapeamento geomorfológico, conforme já havia sido observado por Laut e Paine (1982), Minár e Evans (2008) e Evans (2012).

Segundo Pavel *et al* (2011) a subjetividade inerente ao mapeamento das feições observadas no terreno, depende do grau de conhecimento e experiência do mapeador, refletindo a capacidade dos mesmos em delimitar áreas uniformes no que se refere aos materiais superficiais, formas e processos atuantes.

Essas dificuldades, observadas nos trabalhos de mapeamento geomorfológico, encontram-se presentes também em trabalhos correlatos, como aqueles destinados à avaliação do terreno, com vistas a zoneamentos urbanísticos ou mesmo em trabalhos de cartografia geotécnica.

Neste sentido, tentando definir uma metodologia de compartimentação geomorfológica mais aplicada e de fácil assimilação, Lollo (1994, 1996) propõe a sua divisão por associação de formas de relevo que apresentem determinada uniformidade, com base unicamente em processos de fotointerpretação. Contudo, essa proposta, além de apresentar problemas comuns àquelas que utilizam diversas escalas como base, conta ainda com outros. Entre eles, os semelhantes aos observados por Mauro (2001), e Zuquette e Gandolfi (2004), referentes às compartimentações realizadas com o enfoque fisiográfico (*landscape approach*), e que podem apresentar mais de uma forma de abordagem, pois se fundamentam, segundo estes autores, somente na "aerofotodedução", dependendo, portanto, do conhecimento

do intérprete sobre o terreno.

Problemas como os até aqui mencionados denotam carência de uma proposta de classificação passível de emprego em conjunto com as diferentes metodologias de mapeamento geomorfológico, e que possibilite a identificação de unidades morfométricas similares, ao mesmo tempo em que apresente processo de quantificação menos subjetiva para a representação do relevo.

No entanto, Shroder e Bishop (2003) chamam a atenção para o fato de que as subjetividades observadas no mapeamento, com vistas à compartimentação do terreno em unidades similares, podem ser minimizadas com a incorporação de avanços obtidos nas áreas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem numérica, bem como com a adição de parâmetros quantitativos às metodologias já existentes (enfoque paramétrico).

O desenvolvimento de rotinas e procedimentos calcados no uso de modelos digitais de elevação (*Digital Elevation Model* - DEM) apresenta-se com possibilidade viável para melhoria do mapeamento geomorfológico, uma vez que permite extrair parâmetros numéricos do relevo, os quais podem ser incorporados às metodologias tradicionais ou servir de base para a elaboração de novas propostas (VALERIANO, 2008; MINÁR & EVANS, 2008; BISHOP *et al.*, 2012).

Com o objetivo de contribuir para o preenchimento dessa lacuna, Sampaio (2008) propôs o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR), ferramenta metodológica que tem por finalidade quantificar, classificar e delimitar unidades de relevo, com base na análise da distribuição espacial da declividade, entendida como padrões de rugosidade.

O Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) foi desenvolvido agregando-se ferramentas geotecnológicas à proposta de análise do relevo de Hobson (1972). Esse índice foi empregado em diferentes contextos, tendo permitido a compartimentação e a quantificação do relevo, bem como o uso dos valores obtidos em diferentes formulações matemáticas.

Este trabalho tem, portanto, como objetivo apresentar os fundamentos para a obtenção do Índice de Concentração da Rugosidade - ICR, seus requisitos, escalas de aplicação, modalidades, processo de obtenção e potencial de integração com metodologias correlatas e exemplos de aplicação, em contrapartida às limitações inerentes ao processo de mapeamento morfométrico

usualmente empregados.

É importante ressaltar, no entanto, que, para evitar a construção de propostas metodológicas puramente matemáticas ou estatísticas, é necessário que os parâmetros extraídos sejam ajustados à análise *in loco* das unidades de relevo existentes, estabelecendo-se, assim, referenciais quantitativos passíveis de emprego em diferentes contextos, e que possam ser incorporados em diferentes metodologias.

2. Mapeamento morfométrico em uso e sua relação com a dissecação.

No que se refere à análise morfométrica da dissecação e sua incorporação ao mapeamento geomorfológico, observa-se a presença de duas correntes metodológicas que são empregadas em estudos técnicos e acadêmicos no Brasil. A primeira refere-se às propostas baseadas na obtenção de parâmetros morfométricos a partir de modelos bidimensionais e, a segunda, que se baseia na análise tridimensional do relevo, podendo esta ser diretamente morfométrica (resultante da análise e processamento de modelos digitais de elevação - MDE) ou via fotointerpretação.

Metodologias baseadas em análises bidimensionais são aquelas que empregam o uso de perfis longitudinais na avaliação morfométrica da dissecação, os quais fornecem a “sinuosidade” do relevo em uma determinada direção. A análise por perfis resulta na aquisição de um valor absoluto apenas quando medida em uma dada direção e entre dois interflúvios e, na obtenção de valores aproximados quando medida em mais direções ou estendendo-se os perfis de análise por mais de um interflúvio (IBGE, 1995 & ROSS, 1992).

Neste tipo de análise, os parâmetros morfométricos são obtidos a partir da quantificação da relação entre as distâncias ou dimensões interfluviais (DI) com o grau de entalhamento vertical (GE) e, conseqüentemente, resultam em valores variáveis para diferentes direções e extensões (Figura 1).

Conforme demonstrado por Sampaio e Augustin (2008), a complexidade inerente à análise por perfis, faz com que pequenas variações na quantidade, extensão e direção dos perfis analisados resulte em diferentes concepções acerca do padrão de relevo analisado, resultando em diferentes possibilidades de enquadramento para uma mesma unidade de análise (Figura 2).

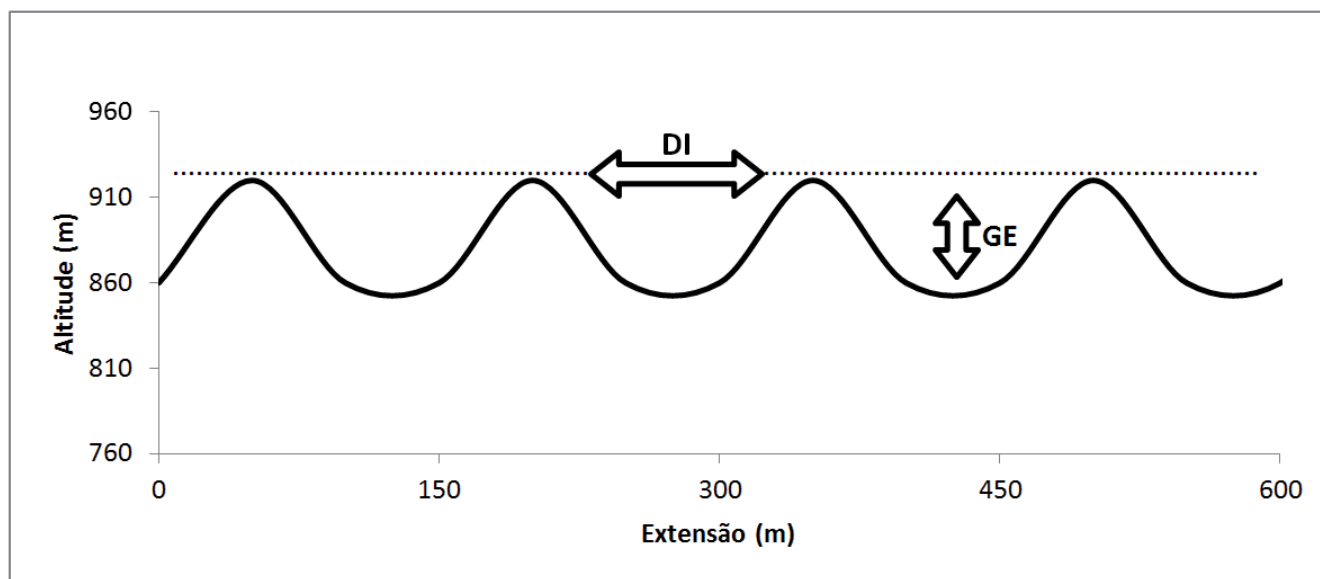


Figura 1 - Perfil topográfico hipotético indicando as dimensões empregadas na obtenção da dissecação do relevo - parâmetro morfométrico a partir da análise por perfis - bidimensional - Grau de Entalhamento Vertical (GE) e Distância Interfluvial (DI).

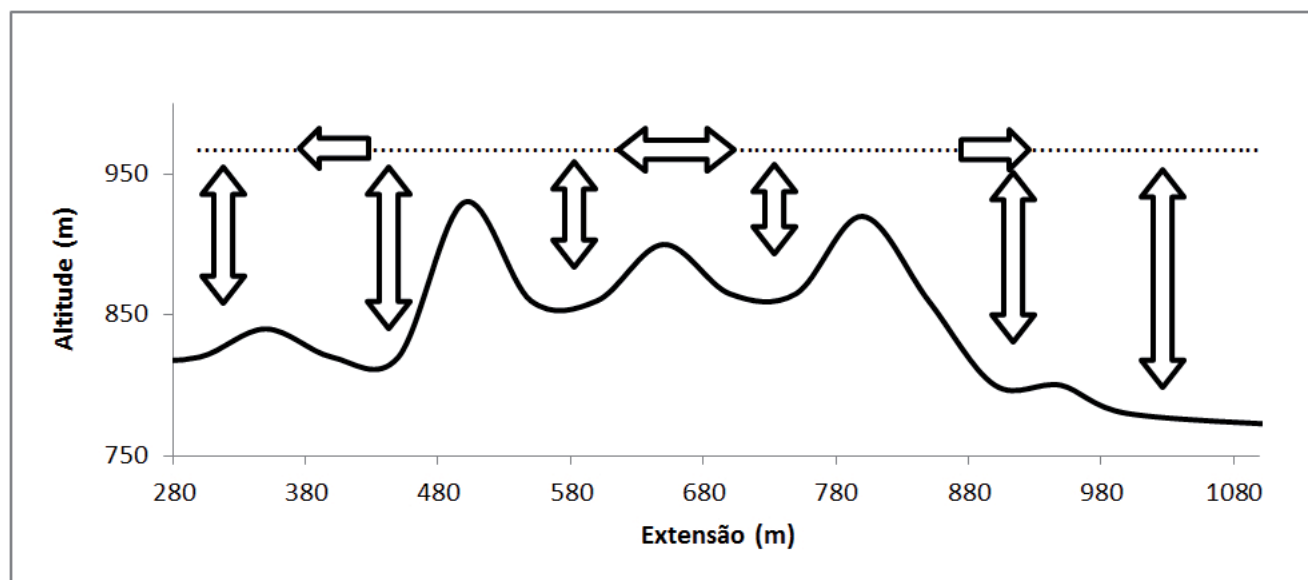


Figura 2 - Perfil topográfico esperado para uma unidade de relevo, indicando a complexidade existente na obtenção dos parâmetros morfométricos relativos à dissecação via perfis. As setas indicam os diferentes graus de entalhamento e valores de dimensão interfluvial (GE e DI) que podem ser observados em um perfil em função da extensão (área de cobertura) do mesmo.

As metodologias baseadas em análises tridimensionais são aquelas que realizam a compartimentação a partir da interpretação do relevo em dois eixos simultâneos de análise (ZUQUETTE e GANDOLFI, 2004), identificando unidades morfológicas por interpretação direta do relevo (fotointerpretação) ou através do processamento matemáticos dos pixels (partes da vertente) contidos em um MDE.

Nestas últimas, a exemplo de Valeriano (2008), cada pixel de um modelo digital de elevação é, indi-

vidualmente e quantitativamente, classificado quanto a sua forma na vertente, baseando-se na análise das curvaturas vertical e horizontal ou de ambas.

Metodologias que se utilizam da fotointerpretação são aquelas nas quais o fotointérprete define a quantidade e os limites das unidades de relevo, sendo os resultados diretamente condicionados pela escala de análise e área de abrangência do mapeamento, bem como pelo nível de experiência do fotointérprete e finalidade do estudo.

Neste sentido, ambas as correntes citadas inviabilizam a obtenção de unidades morfométricas com limites espaciais fixos aplicáveis a áreas de abrangência maiores que um pixel, em especial no que se refere à dissecação. Ainda, não permitem a associação dos valores obtidos a estudos morfológicos e geomorfológicos comparativos ou matemáticos, conforme observado também por Caseti (2005).

O ICR enquadra-se no grupo das análises tridimensionais, tratando-se de metodologia de classificação morfométrica que possibilita a aquisição de valores para representar unidades homogêneas de relevo, no que se refere à dissecação, e apresenta ao mesmo tempo:

- processo de obtenção e de delimitação das unidades mapeadas menos subjetivo (problema observado tanto nas análises bidimensionais por perfis como nas tridimensionais por fotointerpretação);
- identificação de unidades geomorfológicas homogêneas no que se refere aos padrões morfométricos de dissecação observados, representando grandezas maiores que partes da vertente como observado na classificação pontual pixel-a-pixel e,
- possibilidade de implementação automatizada via Sistema de Informações Geográficas (SIG).

A redução das subjetividades e a aquisição de valores quantitativos possibilitados pela aplicação do ICR objetivam, também, a incorporação destes quantitativos em modelos matemáticos ou estatísticos permitindo a inclusão do relevo como variável numérica.

Apesar da formulação do ICR não se encontrar totalmente isenta de subjetividade¹, possibilita a identificação de unidades morfologicamente homogêneas no que se refere à dissecação, para qualquer área independentemente do técnico operador, das escalas ou do tipo de materiais cartográficos de apoio, somente tendo como requisito para sua obtenção o Modelo Digital de Elevação.

O Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) consiste, portanto, em uma ferramenta metodológica que pode ser utilizada como auxiliar, alternativa e complementar ao mapeamento geomorfológico, possibilitando a compartimentação do relevo em unidades

com distintos padrões de dissecação. Inicialmente o ICR foi utilizado com o objetivo de avaliar o papel do relevo na estruturação da rede de drenagem, tendo em vista a elaboração de modelos matemáticos auxiliares ao mapeamento da mesma. Sua aplicação possibilitou o aumento na acurácia dos mapeamentos existentes quando aplicado a Bacia Hidrográfica do rio Benevente – ES (SAMPAIO, 2008).

Posteriormente, Nascimento (2009) e Nascimento *et al* (2010) empregaram o ICR na análise dos padrões espaciais de cavernas e níveis de exposição do sistema carste nas bacias dos rios Bacaetava, Fervida e Tranqueira, possibilitando identificar e associar os padrões observados as unidades de relevo delimitadas pelo referido índice.

O ICR também foi empregado por Souza e Sampaio (2010) em estudo comparativo entre as unidades morfológicas delimitadas no Mapeamento Geomorfológico do estado do Paraná (MINEROPAR, 2006). Empregando-se o mesmo número de classes utilizado no mapeamento do Estado, observou-se similaridade mínima de 55,6% e máxima de 77,8% entre as unidades delimitadas pelo ICR e aquelas definidas via emprego da metodologia proposta por Ross (1992) para análise da dissecação.

Da mesma maneira, Fonseca (2010), ao utilizar o ICR como metodologia auxiliar na análise do relevo a fim de caracterizar a evolução geomorfológica de duas bacias hidrográficas no Espinhaço Meridional, verificou que a aplicação deste forneceu resultados que coadunavam com os observados quando do emprego de outras metodologias.

Tendo em vista os excelentes resultados alcançados com a aplicação do ICR, torna-se necessária uma maior divulgação da metodologia empregada, para que seu uso possa ser ampliado para outras áreas, possibilitando assim a utilização do ICR em diferentes escalas espaciais e etapas dos processos de mapeamento morfológico, geomorfológico e geotécnico, bem como para outras finalidades, como em processos de modelagem ambiental, para que possa, desta forma, contribuir para o desenvolvimento do mesmo e das referidas técnicas de mapeamento.

¹ O ICR apresenta como elemento subjetivo a escolha da área de 4 km² como unidade espacial mínima necessária para obtenção do valor a ser atribuído ao pixel central, quando da utilização do ICR Global. Apesar de subjetiva, esta área tem como origem a proposta de Horton (1945), sendo o valor final validado a partir do ajustamento dos limites das classes de ICR com as unidades geomorfológicas observados em campo.

3. Índice de Concentração de Rugosidade (ICR).

Como ferramenta metodológica o ICR possibilita a compartimentação e quantificação do relevo a partir da análise dos padrões de distribuição espacial da declividade (medidas indiretas da inclinação e do tamanho das vertentes), considerando seus valores no espaço tridimensional e não no bidimensional como no caso das análises via perfis.

O ICR diverge da análise pontual do relevo (pixel-a-pixel), ao considerar o padrão espacial de distribuição dos valores de declividade. Assim, os valores medidos e distribuídos de forma contínua ou descontínua são avaliados em conjunto e fornecem padrões morfológicos de dissecação, os quais podem tomar em consideração

escalas locais e regionais, o que o torna diferente dos valores de declividade observados individualmente em cada pixel, os quais podem localmente apresentar valores distintos do padrão de dissecação no qual se encontram inseridos.

Isto se dá, porque dependendo da escala espacial de análise ou da largura do pixel empregada na caracterização da declividade (resolução espacial do modelo digital de elevação), todas as unidades de relevo de uma dada região, desde as predominantemente planas até aquelas com relevo dito escarpado, podem apresentar locais com valores de declividade elevados ou baixos, indicando a presença de superfícies íngremes e planas (Figura 3).

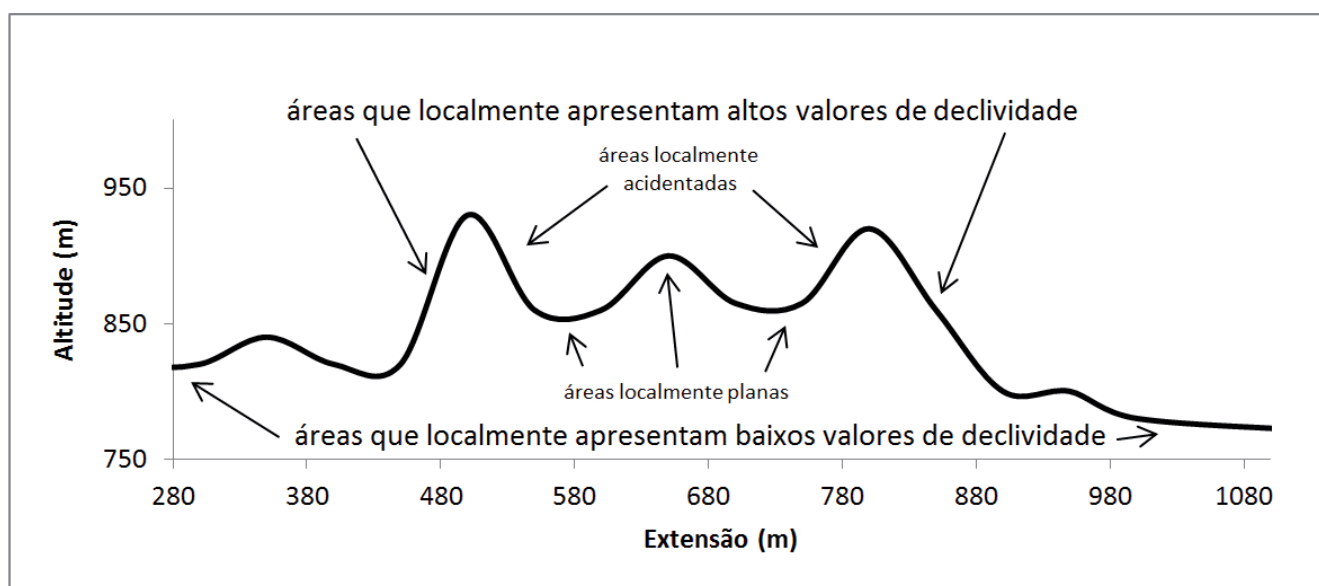


Figura 3 - Perfil indicando a possibilidade de ocorrência de diferentes valores de declividade em diferentes unidades morfológicas.

O uso da variabilidade espacial da declividade para representar diferentes formas do relevo foi proposto inicialmente por Hobson (1972), com o objetivo de delimitar estruturas geológicas. Segundo este autor, a variabilidade espacial da declividade, denominada de rugosidade, fornece indicativos acerca da variabilidade das estruturas geológicas subjacentes.

Segundo Hobson (1972), a rugosidade (R) corresponde à relação entre a área da superfície do terreno inclinada (Si ou área da vertente) e a área da superfície do terreno reduzida ao plano (Sp ou superfície reduzida ao plano), sendo $R = Si / Sp$.

Apesar de tratar o relevo de forma tridimensional, a metodologia proposta por Hobson (1972) resulta na aquisição de dados locais sobre a declividade, conforme

demonstrado por Sampaio e Augustin (2008). Desta forma, a referida proposta diferencia-se em escala e metodologia da do ICR, visto que neste último, os valores obtidos para cada ponto representam não mais seus valores locais, mas o padrão dos valores de declividade observados em uma determinada área, fornecendo, portanto, unidades espaciais contínuas com características morfológicas similares.

O padrão de variabilidade dos valores altimétricos que caracterizam uma vertente ou segmento de vertente quanto a sua declividade e quanto ao padrão de dissecação, é traduzido no ICR como um padrão espacial regional (análise regional), indicando a variação dos valores de declividade por unidade de área.

Desta forma, distintas unidades de relevo são

definidas no ICR através da análise da intensidade de recorrência de um dado valor de declividade diferenciando, por exemplo, relevos tipicamente planos de vertentes localmente planas (Figura 4).

Enquanto na análise por perfis, os valores de GE e DI podem ser idênticos para morfologias distintas, possibilitando distintos enquadramentos para uma mesma unidade, o ICR resume a combinação das mesmas a partir da análise da recorrência espacial dos valores de declividade, conforme Bishop (2012), considerado como parâmetro mais importante para caracterização morfométrica de processos (Figura 5).

Sampaio e Augustin (2008) já haviam demonstrado que as combinações de GE e DI geram classes de sobreposição que dificultam a aplicação uniforme da metodologia empregada na caracterização da dissecação. Neste sentido, conforme se observa na figura 5, enquanto em A e B e, em C e D, os valores de GE são diferentes os de DI são idênticos; e se para A e C e, para B e D, os valores de GE são idênticos, os DI são diferentes. Desta forma, a combinação de GE e DI para os casos acima exemplificados, resulta na aceitação de que pelo menos duas das unidades acima são similares.

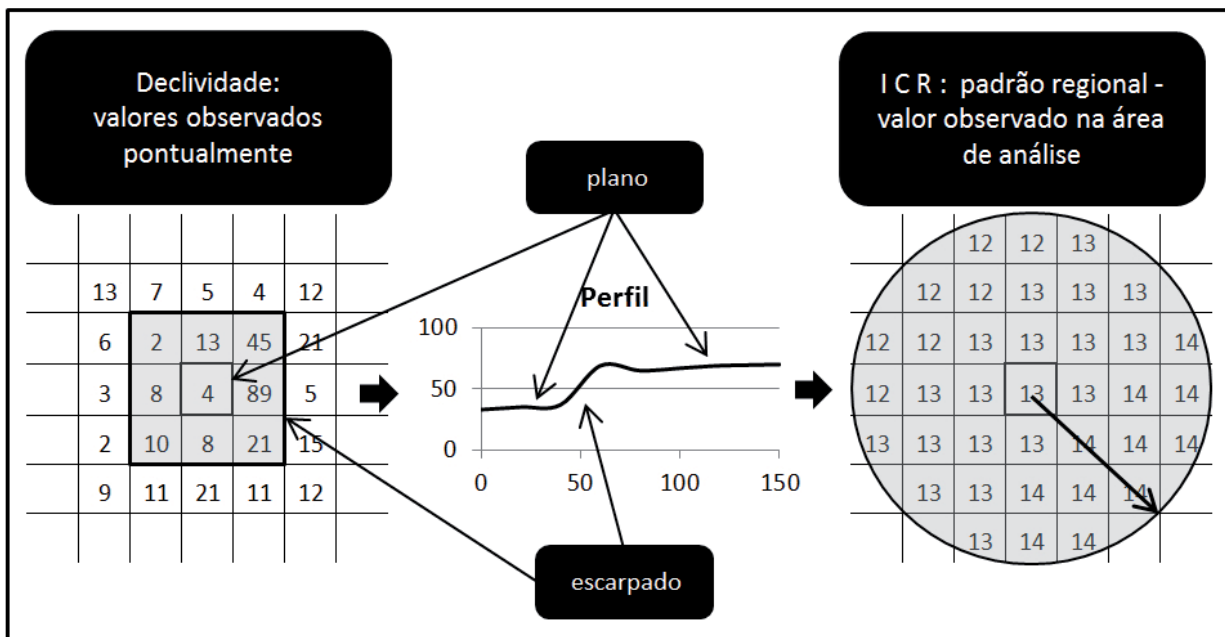


Figura 4 - Relação entre a análise pontual da declividade e o padrão de recorrência dos valores observados empregando como suporte a análise sobre arquivo matricial.

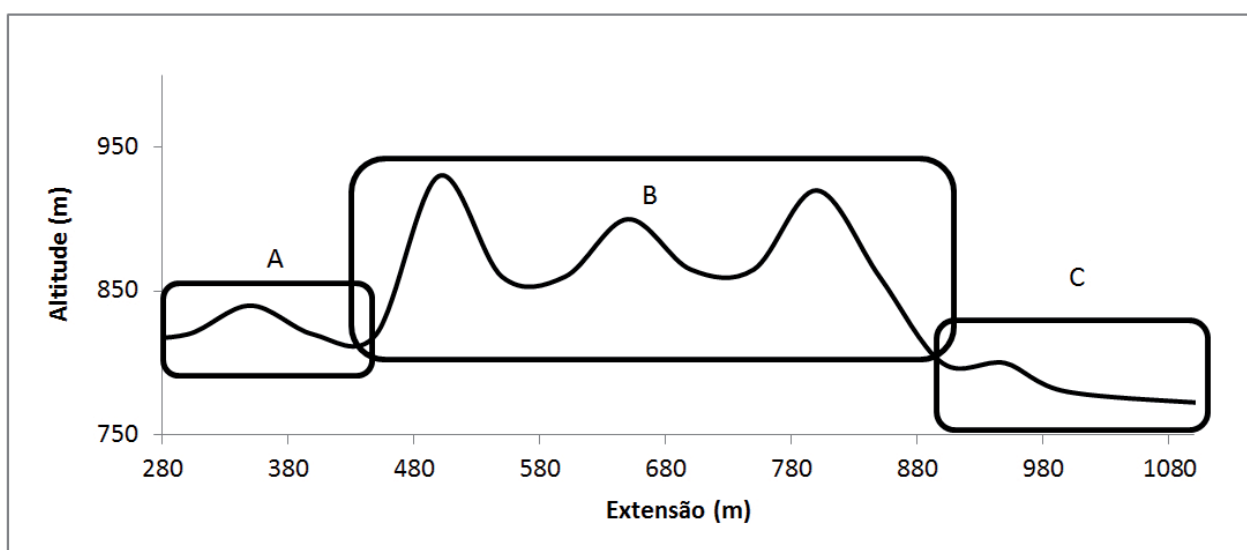


Figura 5 - Possibilidades de enquadramento de GE e DI.

Já na concepção do ICR, o relevo dito plano, por exemplo, é aquele que independente da escala de análise e da largura do pixel (medidas que interferem na descrição da unidade de análise) apresenta como padrão de distribuição espacial a predominância de valores de declividade baixos, ainda que localmente possam ser observados valores elevados.

4. Índice de Concentração de Rugosidade (ICR): processo de obtenção, modalidades e exemplos de aplicação.

O ICR é obtido a partir da transformação do modelo digital de elevação (MDE) em valores de declividade calculados em porcentagem², o qual é posteriormente convertido para o formato de pontos (vetorial), armazenando-se como atributo os valores de declividade (Figura 6).

É a partir do arquivo de pontos que se torna possível a aplicação do Estimador de Densidade por Kernel (*Kernel estimator*) uma vez que o mesmo não atua sobre arquivos matriciais, fornecendo ao mesmo dois parâmetros: área de análise (raio do kernel) e campo de atributos. Para obtenção do ICR, se emprega como

atributo os valores de declividade, o que resulta em um novo arquivo matricial no qual cada pixel apresenta a soma dos valores de declividade de todos os pixels com distância inferior ao raio definido.

O ICR corresponde, portanto, à soma dos valores de declividade dos pontos existentes dentro de uma determinada área (rugosidade do relevo) sendo condicionado pela quantidade de pontos computados, o que varia em função da resolução espacial do DEM.

Os valores obtidos pela aplicação do ICR variam de próximo a zero para áreas predominantemente planas, até aproximadamente infinito para áreas com relevo muito acidentado, como consequência das variações possíveis para os valores de declividade expressos em porcentagem (0% para 0°, 100% para 45° e ∞ para 90°).

Como a resolução espacial do modelo digital de elevação afeta os valores de ICR obtidos em função da quantidade de pontos somados por unidade de área, estes devem ser normalizados, obtendo-se faixas de valores de ICR passíveis de comparação em diferentes estudos e contextos, independente da resolução espacial do DEM empregado.

A normalização pode ser feita no ambiente SIG

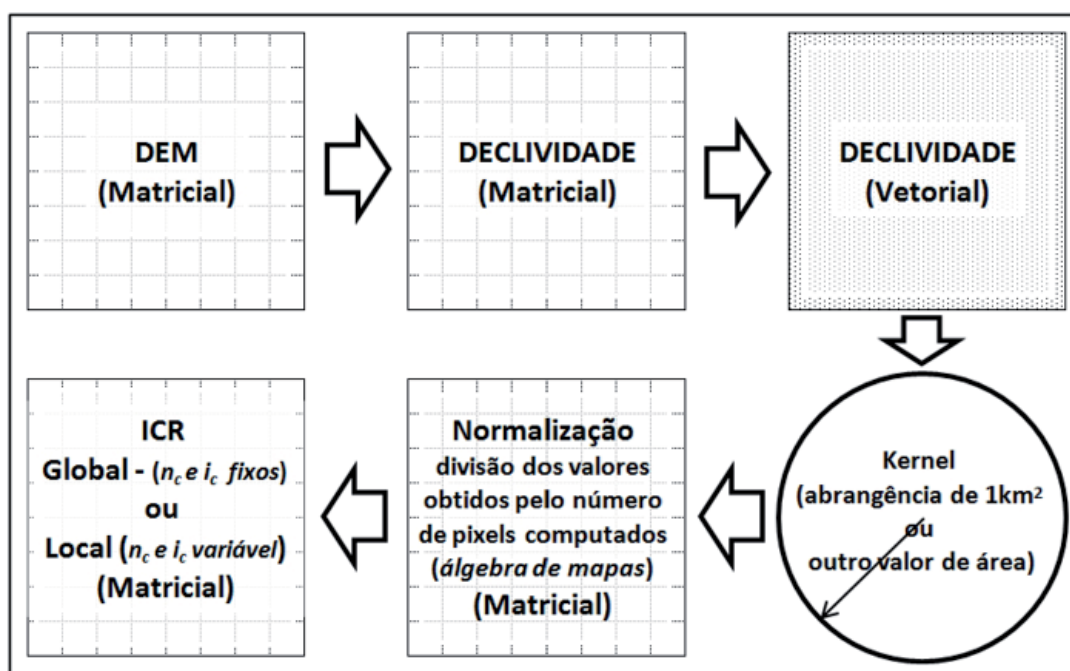


Figura 6 - Etapas para obtenção do ICR com área de abrangência, número e intervalo de classes pré-definidos (n_c e i_c) e, com área, número e intervalos de classes livres.

²Para efeito de cálculo em Sistemas de Informação Geográfica deve ser observado o Sistema Cartográfico, ajustando-o para coordenadas em metros.

por operação de álgebra de mapas, dividindo-se a matriz resultante da aplicação do kernel pelo número de pixels computados, seguindo-se a lógica da divisão da área de abrangência do kernel pela área do pixel³.

Metodologicamente, o ICR pode ser implementado para descrever e diferenciar padrões locais ou globais de relevo (ICR Local - ICR_l e Global - ICR_g). Na análise global, adota-se como referência a área de 4km² para aquisição dos valores de ICR e, os valores obtidos são distribuídos em seis classes com intervalos fixos para cada classe (número de classes e intervalo de classes fixos - n_c e i_c), sendo que os limites empregados para caracterizar cada uma das classes foram definidos a partir das observações feitas nos estudos citados anteriormente e em regiões amostrais.

Para o ICR Global, a escolha da área de abrangência para aplicação do estimador de densidade por kernel (área de influência) considerou inicialmente a proposta de Horton (1945), que sugeriu 1km² como unidade de área ideal para análise da dissecação do relevo, o que em se tratando de circunferência implica no emprego de 564m de raio para aplicação do kernel. Segundo o autor, esta dimensão seria adequada ao estabelecimento de padrões morfológicos e morfométricos para diferentes tipos de bacias hidrográficas.

Apesar de considerar esta dimensão como sendo a mais adequada para diferenciação de unidades morfométricas, dado a impossibilidade operacional à época da pesquisa, Horton (1945) usou o limite da Bacia Hidrográfica como referência para obtenção dos valores de densidade de drenagem, fornecendo com este uma medida indireta e quantitativa da dissecação do relevo.

Para calibrar o raio de busca a ser empregado pelo estimador de densidade por kernel na geração do ICR foram testados diferentes valores partindo-se do raio de 564m, conforme proposta de Horton (1945) e chegando-se a 1128m, como valor que apresentou a melhor resposta a análise da influência do relevo na distribuição espacial das nascentes na Bacia do rio Benevente – ES (SAMPAIO, 2008).

Este mesmo valor foi empregado com sucesso no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos no norte de Curitiba - PR (NASCIMENTO, *et al*, 2010) e permitiu a compartimentação do relevo

paranaense apresentando maior correlação com as unidades geomorfológicas previamente identificadas pelo Mapeamento Geomorfológico do Paraná (SOUZA e SAMPAIO, 2010), bem como para as demais pesquisas citadas anteriormente.

Os limites das classes propostas para o ICR divergem, em parte, dos valores usualmente empregados pela geomorfologia para delimitar as classes de declividade, pois são resultantes da análise direta em campo nas áreas já pesquisadas e nas unidades amostradas para fins deste estudo. Neste sentido, consideram-se os seguintes intervalos para as seis unidades de relevo:

- plano – valores de ICR abaixo de 2,5,
- suavemente ondulado – valores ICR de 2,5 a 6,
- ondulado – valores ICR de 6 a 14,
- fortemente ondulado – valores ICR de 14 a 30,
- escarpado – valores ICR de 30 a 45 e,
- fortemente escarpado – valores ICR acima de 45.

As unidades amostrais utilizadas como referência para obtenção dos valores limites de cada classe de ICR foram escolhidas por apresentar, em dimensões adequadas à pesquisa, as unidades morfológicas descritas anteriormente. Neste sentido, foram pesquisadas as seguintes áreas considerando seus aspectos quanto à geologia e geomorfologia:

1. divisa dos estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo (faixa leste), com presença de unidades morfológicas variando de tipicamente plano a escarpado;
2. divisa dos estados de Goiás e Tocantins com a Bahia, com predominância de unidades variando de plano a ondulado;
3. litoral e região serrana do estado Paraná, unidades variando de plano a fortemente escarpado (Figura 7);
4. divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, com predominância de unidades variando de fortemente ondulado a fortemente escarpado;
5. município de Campo Grande (Mato Grosso do Sul), com predominância de relevos planos a suavemente ondulados (Figura 8).

O ICR local, por sua vez, permite a compartimentação da área em um número variável de classes,

³No software ArcGis, quando se utiliza coordenadas em metros (UTM), os valores resultantes da aplicação do kernel são exibidos por *default* relativos a 1km², portanto, o valor de normalização deve ser, por exemplo, sempre de 123 se a resolução do DEM for de 90m, independentemente do raio de busca empregado (Km²/área do pixel).

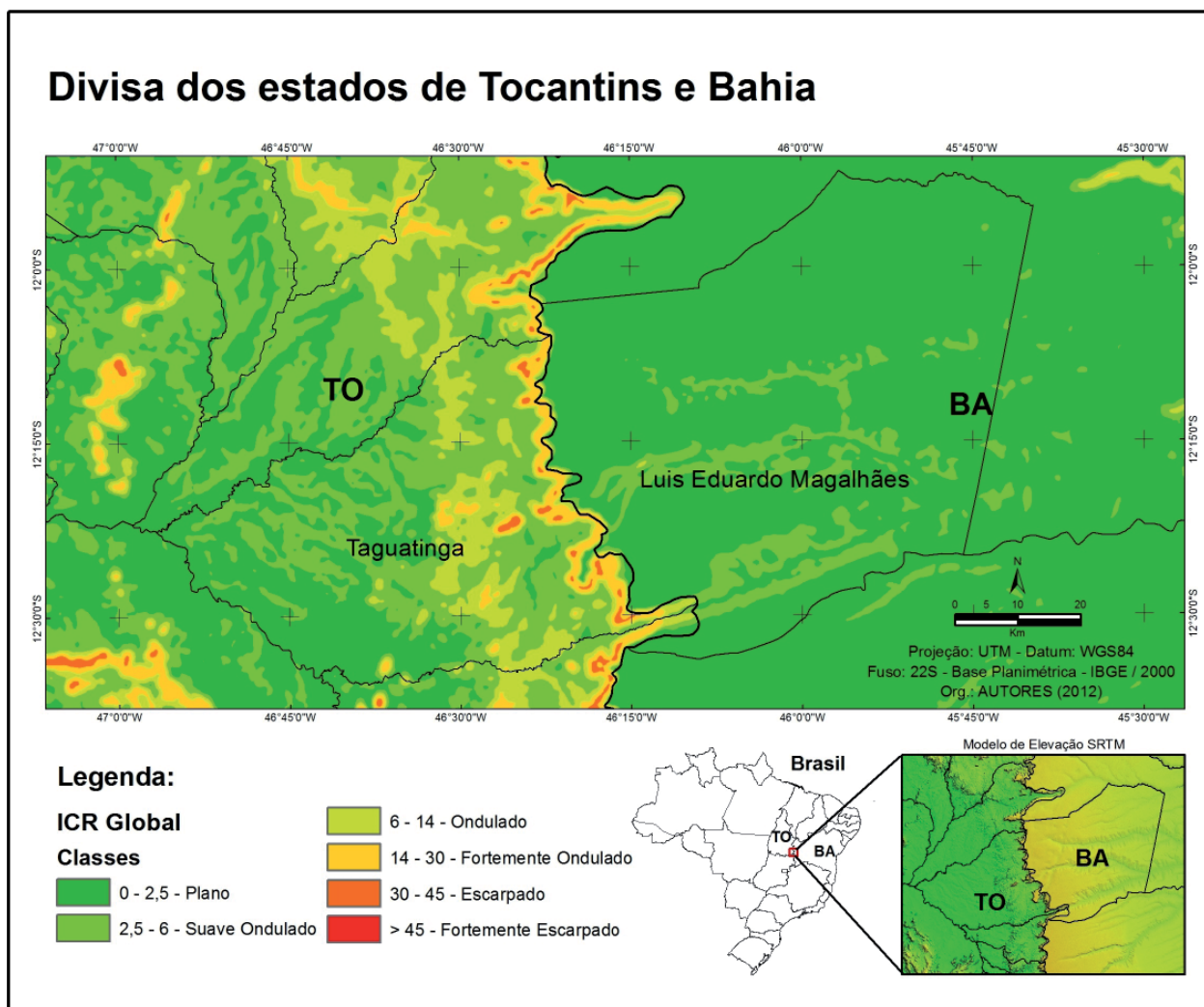


Figura 7 - Exemplo de aplicação do ICR Global na área da divisa dos estados de Tocantins e Bahia – prevalência de áreas planas (BA), Onduladas (TO) e a presença da escarpa na divisa dos estados.

com diferentes intervalos de valores e área de análise livre (raio do kernel). Para tanto, sugere-se o emprego de 564m de raio (1km²) como valor de partida para as análises exploratórias, o uso de *quantis* na definição dos limites dos intervalos de classes e o agrupamento inicial dos dados em cinco classes.

Considerando a necessidade de diferenciar as nomenclaturas empregadas para denominar as unidades de relevo observadas a partir da aplicação do ICR Global das unidades observadas pelo ICR Local, sugere-se o emprego de termos diferenciados, como, por exemplo, Índice de Concentração da Rugosidade: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto.

O ICR local permite compartimentar qualquer área em unidades com distintos padrões morfométricos de dissecação e recorrência da declividade e, em diferentes números de classes, independente da existência das

unidades de relevo observadas na análise global ou em mapeamentos prévios (Figura 8).

Para a região leste do Paraná (Figura 7), bem como para outras áreas no Estado (SOUZA & SAMPAIO, 2010), a aplicação do ICR Local resultou na identificação e delimitação de unidades geomorfológicas com aproximadamente 80% de similaridade (média) em relação às unidades delimitadas pelo mapeamento geomorfológico feito para o Estado (MINEROPAR, 2006), o qual emprega a metodologia proposta por ROSS (1992) (Figura8).

Cabe observar, que a definição da área de análise (raio de abrangência do Kernel) interfere diretamente na capacidade do ICR em diferenciar distintas unidades de relevo, sendo que, quanto maior esta área (raio de busca), mais uniformizadas serão as distintas formas observadas.

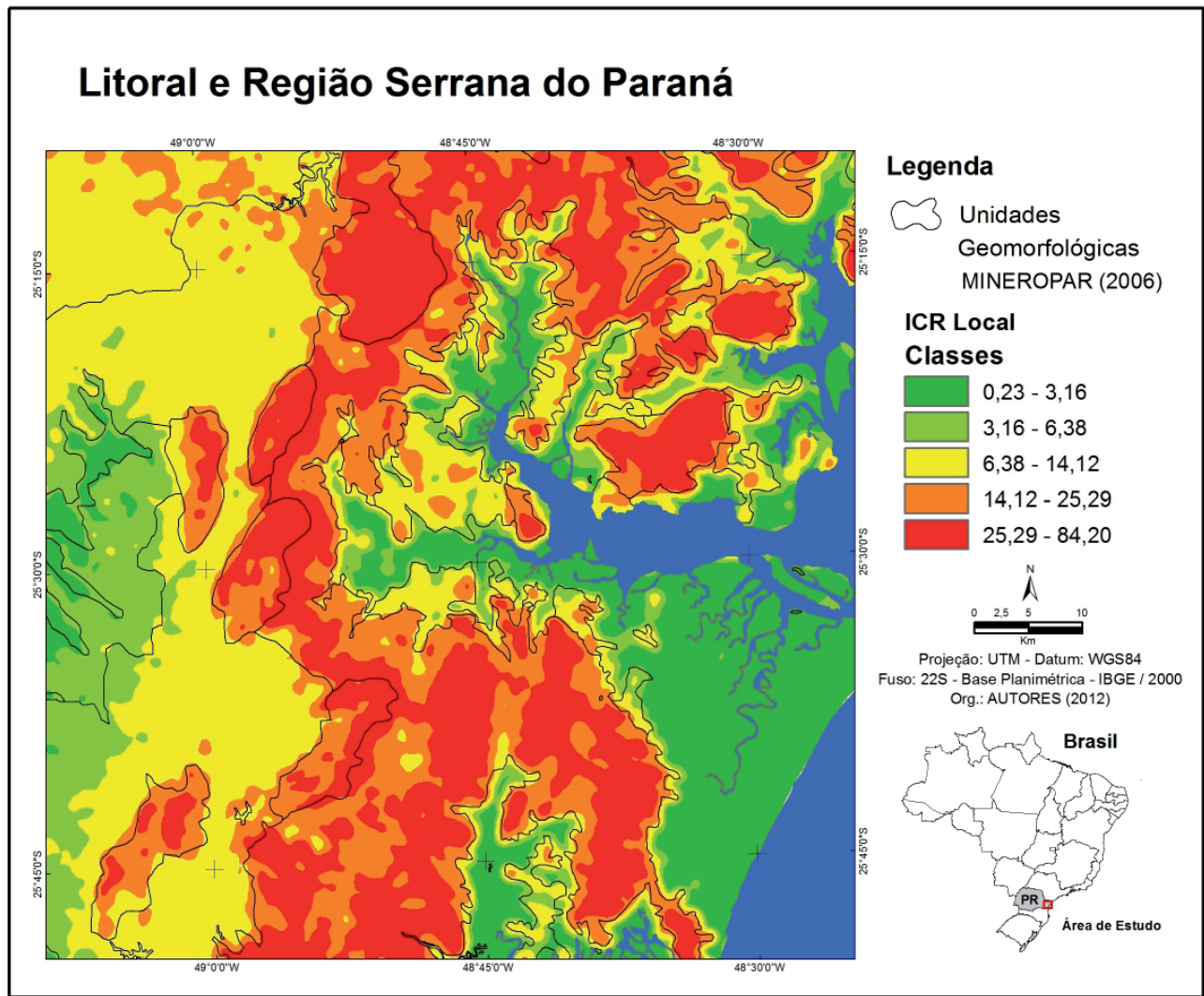


Figura 8 - ICR Local da região leste do estado do Paraná com sobreposição das Unidades Geomorfológicas mapeadas pela Mineropar (2006). Base escala 1:250.000.

5. Conclusões e observações.

Em função das constantes imprecisões encontradas nas metodologias atualmente utilizadas em mapeamentos geomorfológicos, foi desenvolvido o Índice de Concentração de Rugosidade (ICR), que permite a aquisição de valores para representar unidades homogêneas de relevo quanto à dissecação e declividade, de forma acurada, uma vez que os resultados independem do elaborador e da base cartográfica empregada.

O referido índice constitui um processo de obtenção e de delimitação das unidades mapeadas menos subjetivo, problema observado tanto nas análises bidimensionais por perfis como nas tridimensionais por fotointerpretação. Além de possibilitar a identificação de unidades geomorfológicas homogêneas no que se

refere aos padrões morfométricos de declividade e dissecação observados, o faz a partir da representação de grandezas maiores que partes da vertente como observado na classificação pontual pixel-a-pixel através da implementação automatizada via Sistema de Informações Geográficas (SIG). Isto levou à incorporação destes quantitativos em modelos matemáticos ou estatísticos, permitindo a inclusão do relevo enquanto como variável numérica.

A funcionalidade e potencialidade de uso do ICR foram demonstradas quando da identificação de unidades morfológicas e hidrológicas em diferentes escalas de análise (SAMPAIO, 2008; SAMPAIO & AUGUSTIN, 2008; NASCIMENTO *et al*, 2010 e FONSECA, 2010), bem como na compartimentação do relevo, com a

identificação de unidades similares àquelas delimitadas via emprego da metodologia proposta por Ross (1992).

A área de abrangência utilizada na aplicação do kernel (raio) para obtenção do ICR Global, bem como a nomenclatura para a definição das unidades de relevo, encontram respaldo em diversas pesquisas e nos estudos geomorfológicos apresentados neste texto.

Os limites dos intervalos das classes propostos para o ICR Global apoiam-se nas observações diretas de campo, que possibilitaram o desenvolvimento de estudos comparativos para diferentes áreas e a aplicação de funções matemáticas e estatísticas associadas aos padrões morfológicos observados.

O ICR Global destina-se à identificação de unidades de relevo que configuram padrões regionais, podendo não delimitar feições morfológicas locais presentes numa área. Neste sentido, uma escarpa como feição linear, ou um declive localmente escarpado, diferem-se das unidades de relevo escarpado identificadas pelo ICR Global, assim como, uma superfície localmente plana difere-se da unidade de relevo plano por este delimitado.

O emprego de diferentes áreas de abrangência para o Kernel e de diferentes números e intervalos de classes (ICR Local) possibilita a compartimentação de quaisquer ambientes em subunidades morfológicas, sendo de grande valia em estudos exploratórios e os com a finalidade de identificar unidades preliminares de estudo.

Neste sentido, mesmo feições morfológicas de pequenas dimensões (feições locais) podem ser facilmente identificadas e delimitadas pelo emprego do ICR Local, possibilitando a compartimentação do relevo, mesmo quando utilizados em locais com padrões morfométricos muito similares e aparentemente homogêneos.

A aplicação do ICR Global e do ICR Local não apresenta restrições de uso quanto à escala. No entanto, tendo em vista a possibilidade de identificação de unidades com dimensões muito reduzidas e, conseqüentemente, inadequadas à finalidade de estudo, estas podem ser ajustadas à escala final de mapeamento a partir do emprego de técnicas de generalização cartográfica, reduzindo-se o número de polígonos identificados.

Uma das características do ICR (Global e Local) é a formação de zonas de transição entre as unidades de relevo mapeadas. Estas áreas se devem ao surgimento

dos pixels que mesclam valores de declividade de duas unidades distintas de relevo. Apesar de poderem ser eliminadas, definindo recortes mais ajustados em termos de contorno, estas se caracterizam como áreas de transição, sendo interessantes do ponto de vista geomorfológico por representar processos, em geral, pertinentes as duas unidades vizinhas.

Como arquivo matricial, o ICR pode ser combinado a outros elementos de análise morfométrica, como a exemplo a altitude e comprimento da vertente, possibilitando diferentes tipos de análises via álgebra de mapas e ampliando o leque de ferramentas metodológicas automatizadas para o mapeamento geomorfológico.

Embora ainda incipiente para solucionar os problemas relativos à quantificação morfológica da paisagem, a proposta do Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) tem por finalidade enriquecer a discussão sobre o tema, no sentido de estabelecer valores morfométricos fixos às unidades de relevo, permitindo sua obtenção de forma padronizada, mais ágil e precisa via Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Desta forma, a proposta do ICR possui caráter complementar às demais propostas de mapeamento morfométrico, podendo ser utilizada para fins de identificação prévia de unidades morfológicas e morfométricas. Este também pode ser usado como modelo quantitativo de comparação entre diferentes ambientes morfológicos, ou ainda, como ferramenta complementar aos atuais índices de dissecação e coeficiente de rugosidade.

6. Referências.

- AB'SÁBER, A. N. Um Conceito de Geomorfologia a Serviço das Pesquisas sobre o Quaternário. São Paulo, **Geomorfologia**, n. 18. 1969. p.1-23.
- BISHOP, M.P.; JAMES, L.A.; SHRODER Jr, J.F.; WALSH, S.J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology** 137 (2012). p. 5-26
- CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 11/10.2011.
- DE BIASE, M. A carta clinográfica: os métodos de representação

- e sua confecção. **Revista de Geografia**. V.6. 1993. p.45-60.
- DEMEK, J. Generalization of geomorphological maps. In **Progress Made in Geomorphological Mapping**. Brno. 1967. p. 35-66.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.
- EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology** 137 (2012). p. 94–106.
- FONSECA, B. M. **O uso do sistema de informações geográficas na análise morfométrica e morfológica de bacias de drenagem na Serra do Espinhaço Meridional-MG**. Dissertação de Mestrado. IGC – UFMG. Belo Horizonte. 2010. 93 p.
- HOBSON, R. D. Surface roughness in topography: quantitative approach In: Chorley, R.J., 1972. **Spatial analysis in geomorphology**. 1972. p. 225-245.
- HORTON, R.E. (1945) Erosional development of streams and their drainage basins: hydropysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America** 56, 2 75-370.
- IBGE. **Manual técnico de geomorfologia**. Manuais técnicos em geociências n. 5. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. – 2. ed. - Rio de Janeiro : IBGE, 2009. 182 p.
- LAUT, P. & PAINE, T. A. A step towards an objective procedure for land classification and mapping. **Applied Geography**. 1982. 2. p. 109-126.
- LOLLO, J. A. **“Landform”**: Conceituação, Descrição e Aplicabilidade na Caracterização Preliminar de Unidades do Meio Físico para Cartografia Geotécnica. São Carlos: EESC/USP. 1994. Seminário (Pós-graduação em 71 Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1994. 46 p.
- LOLLO, J. A. **O uso da técnica de avaliação de terreno no mapeamento geotécnico**: sistematização e aplicação na quadrícula de Campinas. São Carlos, 1996. 2v. Tese Doutorado - EESC/USP. 267 p.
- MAURO, J.R. **Carta de Susceptibilidade à Erosão para a Área da Bacia do Prosa, Campo Grande – MS**: Escala 1:15.000. Ilha Solteira, 2001. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil de Ilha Solteira, UNESP. 65 p.
- MINÁR, J. & EVANS, I. A. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (2008) p. 236–259.
- MINEROPAR. **Mapa Geomorfológico do Estado do Paraná**. Paraná: Mineropar. 2006.
- NASCIMENTO, E. R. **Caracterização de feições cársticas a partir de parâmetros morfométricos do relevo**: Região Metropolitana de Curitiba (RMC). 2009. 104f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós Graduação em Geologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- NASCIMENTO, E.R., NETO, J.M.R e REBELO, A.M.A. Aplicação do Índice de Concentração da Rugosidade do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos ocorrentes na região norte do município de Curitiba, PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, 2010. p. 61-68.
- PAVEL, M., NELSON, J.D. e FANNIN, R.J. An analysis of landslide susceptibility zonation using a subjective geomorphic mapping and existing landslides. **Computers & Geosciences** 37 (2011). p. 554–566.
- ROSS, J. L. S. “O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo” in: **Revista do Departamento de Geografia, FFLCH-USP**, São Paulo, 1992.
- ROSS, J. L. S. & MOROZ, I.C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia Depto de Geografia FFLCH-USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. 63 p.
- SAMPAIO, T. V. M., AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise das incongruências dos índices de dissecação e rugosidade. **Anais do VII Encontro Nacional de Geomorfologia**. Belo Horizonte, 2008.
- SAMPAIO, T. V. M. **Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem** – uma proposta baseada na análise da Bacia Hidrográfica do Rio Benevente – ES. 2008. Tese de Doutorado. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 2008. 147 p.
- SOUZA, L. F. e SAMPAIO, T. V. M. **Aplicação do Índice de Concentração da Rugosidade à identificação de classes de dissecação do relevo**: uma proposta de quantificação e automatização em ambiente SIG. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010.
- SHRODER Jr., J. F., BISHOP, M. P., 2003. A perspective on computer modeling and fieldwork. **Geomorphology** 53, p. 1–9.

Índice de Concentração da Rugosidade: Uma Nova Proposta Metodológica para o Mapeamento

TRICART, J. Principes et méthodes de l geomorphologie. **Paris: Masson Ed.**, 1965, 201p.

VALERIANO, M. de M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São

Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 3, p. 72-104.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Texto, 2004. 190 p.