

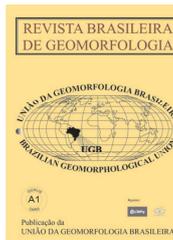


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 3 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.742>



EMPREGO DO ÍNDICE DE CONCENTRAÇÃO DA RUGOSIDADE PARA A IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES MORFOLÓGICAS ASSOCIADAS AS CROSTAS FERRUGINOSAS NO NOROESTE DO PARANÁ

THE USE OF THE ROUGHNESS CONCENTRATION INDEX FOR THE IDENTIFICATION OF MORPHOLOGIC FEATURES ASSOCIATED WITH FERRUGINOUS MATERIALS IN THE NORTHWEST OF PARANÁ

Marcel Hideyuki Fumiya

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná

Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra, CEP: 81531-980, Curitiba – Paraná, Brasil

Email: marcel.hideyuki@gmail.com

Leonardo José Cordeiro Santos

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná

Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra, CEP: 81531-980, Curitiba – Paraná, Brasil

Email: santos.ufpr@gmail.com

Caroline Gonçalves Mangueira

Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná

Av. Cel. Francisco H dos Santos, 100 - Centro Politécnico - Bloco Setor de Ciências da Terra, CEP: 81531-980, Curitiba – Paraná, Brasil

Email: caroline.mangueira@hotmail.com

Edivando Vitor do Couto

Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Via Rosalina Maria dos Santos, 1233, Campo Mourão, Paraná, CEP: 87301-899 - Brasil

Email: edivandocouto@gmail.com

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

23/05/2015

Aceito (Accepted):

21/01/2016

Palavras-chave:

Noroeste do Paraná; Índice de Concentração de Rugosidade; SRTM.

Keywords:

Northwest of Paraná;
Roughness Concentration
Index; SRTM.

Resumo:

Na região Noroeste do Paraná onde predominam arenitos do Grupo Caiuá como embasamento geológico, verifica-se a ocorrência de material ferruginoso (cauraças e arenito ferruginizado), de origem pedogenética, relacionadas a fases de aplainamento de ciclos geomorfológicos. Esse material sustenta feições do tipo, morrotes e colinas, que se diferenciam na paisagem de relevo suave característico da região. O presente trabalho objetiva mapear essas feições, utilizando o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR) e a estatística cluster, extraídos do modelo digital de elevação SRTM. O resultado da aplicação do índice associado à estatística Cluster permitiu identificar quatorze ocorrências dessas feições, sendo dez feições mantidas pela presença de materiais ferruginosos, uma por arenito carbonático e três por arenitos silicificados. Constatou-se que as feições mantidas pela presença de materiais mais resistentes aos processos de denudação, apresentam padrão de rugosidade que varia do valor “médio” até “muito alto”,

o que permitiu diferencia-los dos grandes compartimentos de relevo (planícies aluviais, superfícies aplainadas). Portanto o Índice de Concentração da Rugosidade demonstrou potencial de aplicação, sendo capaz de distinguir características geológicas e geomorfológicas na área estudada, bem como uma alternativa viável e de baixo custo para escolha prévia das áreas de interesse para posterior investigação geomorfológica em campo.

Abstract:

In the Northwest region of Paraná, where sandstones of the Caiuá Group prevail, we see the occurrence of ferruginous material (cuirasses and ferruginous sandstone), of pedogenetical origin, related to leveling phases of geomorphological cycles. That material forms features of the as hillocks and knolls, that differ from the soft relief landscape characteristic of the area. The present work aims at mapping those features, using the of Roughness Concentration Index (RCI) and Cluster Statistics, extracted from the SRTM digital elevation model. The result of the application of the index associated to cluster statistics lead to the identification of fourteen occurrences of those features, ten of them featuring ferruginous material, one featuring carbonate sandstone and three featuring siliceous sandstone. We noticed that the features sustained by the presence of materials more resistant to the denudation processes, show an average to a very high rugosity value, thus allowing to differentiate them from large relief compartments (alluvial plains, softened surfaces). Therefore, the Roughness Concentration Index showed an application potential, allowing to differentiate geological and geomorphological characteristics in the area under study as well as a viable and low cost alternative for a pre-selection of the areas of interest for subsequent geomorphological investigation in the field.

Introdução

Geomorfometria ou geomorfologia quantitativa é o ramo da geomorfologia que quantifica as formas do relevo, isto é, o foco operacional é a extração de parâmetros morfométricos da superfície terrestre e objetos que possam ser feitos a partir de Modelos Digitais de Elevação ou Terreno (MDEs e MDTs) (PIKE *et al.*, 2009).

Evans (1972) foi o pioneiro na extração automatizada de parâmetros morfométricos, e afirma que a utilização desse procedimento, naquele momento, se mostrava limitada devido a insuficiente capacidade de processamento de dados pelos softwares e hardwares da época. A ampla utilização de técnicas automatizadas somente difundiu-se com o aumento da eficácia da velocidade de processamento de dados pelos computadores nas últimas duas décadas, e também, à disponibilização de uma variedade de dados de sensoriamento remoto, que fornecem níveis de informação sem precedentes. Um desses exemplos são os MDEs provenientes de sistema de imageamento interferométrico orbital, como da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) que permitem visualizar o espaço geográfico em três dimensões (FLORENZANO, 2008).

Aliando os dados MDEs SRTM com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) é possível obter, de forma

automatizada, parâmetros morfométricos (declividade, altimetria, orientação de vertentes, curvatura vertical, curvatura horizontal, rugosidade do relevo etc), essenciais nos estudos geomorfológicos, fornecendo uma base mais objetiva e uniforme para o reconhecimento de feições do relevo (FLORENZANO, 2008). Dentre os métodos paramétricos empregados para mapear unidades e feições de relevo, destacam-se os Índices de Rugosidade do Relevo (HOBSON, 1972; GROHMANN, 2004; GROHMANN *et al.*, 2011; LOBÃO e VALE, 2007; RILEY *et al.*, 2009; SAMPAIO, 2008; SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014).

O Índice de Rugosidade em ambiente digital foi elaborado pela primeira vez por Hobson (1972) e baseia-se no uso da variabilidade declividade para representar as formas de relevo. Esse índice é obtido a partir da razão entre área superficial (irregularidade da superfície) e a área planar (superfície reduzida ao plano), sendo as informações obtidas por meio de técnicas de levantamento em campo, ou a partir de dados aeroespaciais no formato digital. A aplicação desse parâmetro morfométrico permite analisar pontualmente a rugosidade do relevo em uma dada unidade de área e possui relação direta com a declividade do mesmo (SAMPALIO, 2008).

Diversos estudos geomorfológicos embasados nesse índice, foram aplicados em diferentes partes do

território brasileiro (KARMANN *et al.*, 1996; FER-RARI *et al.*, 1998; HIRUMA e RICCOMINI, 1999; FILHO e KARMANN, 2007; HARTWIG e RICCOMINI, 2010). Contudo sua aplicação pode gerar algumas incertezas, como a interação entre o número e a magnitude das irregularidades do terreno. Portanto as análises pontuais expressas pelo Índice de Rugosidade de Hobson (1972) apresentam incongruências na compartimentação de unidades do relevo (SAMPAIO e AUGUSTIN, 2008).

Na busca de uma solução para esse problema, Sampaio *et al.* (2008, 2014), fundamentados em Hobson (1972), propuseram o Índice de Concentração da Rugosidade (ICR). Este índice utiliza valores indiretos da rugosidade, a partir da análise da repetição dos valores de declividade por unidade de área. Para realizar essa análise espacial, é utilizado o estimador de densidade Kernel que é uma ferramenta geoestatística que permite a análise da dispersão ou concentração de um fenômeno no espaço (SOUZA e SAMPAIO, 2010).

O ICR diverge da análise pontual do relevo de Hobson (1972), ao considerar o padrão espacial de distribuição dos valores de declividade, logo os valores medidos e distribuídos de forma contínua ou descontínua são avaliados em conjunto e fornecem padrões morfológicos de dissecação do relevo. Dependendo da escala espacial de análise empregada o índice pode apresentar valores distintos, diferenciando em padrões locais ou globais de relevo (SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014).

Assim, esse parâmetro morfométrico tem sido empregado com êxito quando há necessidade de mapear feições de relevo em diferentes escalas de análise: identificação de feições cársticas em metadolomitos do Grupo Açungui (NASCIMENTO *et al.*, 2010); mapeamento da vulnerabilidade a contaminação de poluentes em zonas cársticas (JENSEN, 2014); espacialização da dissecação do relevo influenciada pela tectônica, litologia e estruturas geológicas (FONSECA e AUGUSTIN, 2014); mapeamento da rede de drenagem (SAMPAIO, 2008 e 2009); identificação automática dos níveis de dissecação do relevo (MESSIAS e TROVÓ, 2013; NETO e FERNANDES, 2012); avaliação da acurácia entre mapeamento supervisionado (SANTOS *et al.*, 2006, MINEROPAR, 2006) e automático pelo ICR de unidades morfológicas do relevo do estado do Paraná (SOUZA e SAMPAIO, 2010; SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014; SILVEIRA *et al.*, 2012).

O ICR, portanto se consolida como uma abordagem apropriada para a identificação de feições morfológicas do relevo, permitindo o reconhecimento da distribuição espacial da dissecação do relevo, auxiliando a escolha prévia dos pontos de interesse para investigação em campo.

Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho foi aplicar o ICR para identificar e mapear feições positivas do relevo (morros, morrotes e colinas) sustentado por materiais ferruginosos (couraças, arenitos ferruginizados), no Noroeste do estado do Paraná (figura 1).

O uso desta técnica justifica-se pelo tamanho da área analisada (23.900 km²), que inviabiliza a identificação e mapeamento dessas feições morfológicas locais (feições de pequenas dimensões), por fotografias aéreas e têm a vantagem de permitir a padronização de valores morfométricos para determinação de unidades de relevo.

Contexto Geológico e Geomorfológico

A área de estudo abrange a extensão de ocorrência dos arenitos do Grupo Caiuá, localizado no Noroeste do Estado do Paraná (figura 1). Esta área tem perímetro total equivalente a 23.900 km², o que corresponde a aproximadamente 13% da área total do Estado.

O processo de sedimentação dos arenitos do Grupo Caiuá data do intervalo Turoniano-Maastrichtiano, do Cretáceo Superior. A origem dos arenitos está relacionada ao surgimento de uma depressão criada por subsidência termo-mecânica que originou a Bacia Bauru e propiciou processos de sedimentação nesta bacia (FERNANDES e COIMBRA, 1994).

Os arenitos do Grupo Caiuá ocorrem nos Estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul. No rumo sudoeste, ultrapassa a fronteira com o Paraguai, aflorando na região noroeste daquele país (figura 2), este Grupo assenta em discordância sobre as unidades do Grupo São Bento (FERNANDES e COIMBRA, 1994).

O Grupo Caiuá é composto por três formações: Goio Erê, Rio Paraná e Santo Anastácio. Os arenitos deste grupo foram depositados em ambiente desértico, geneticamente relacionados, correspondentes a sub-ambientes distintos: zona central de *sand sea* (Formação Rio Paraná), zona de depósitos eólicos periféricos (Formação Goio Erê) e planície de lençóis de areia (Formação Santo Anastácio) (FERNANDES e COIMBRA, 1994).

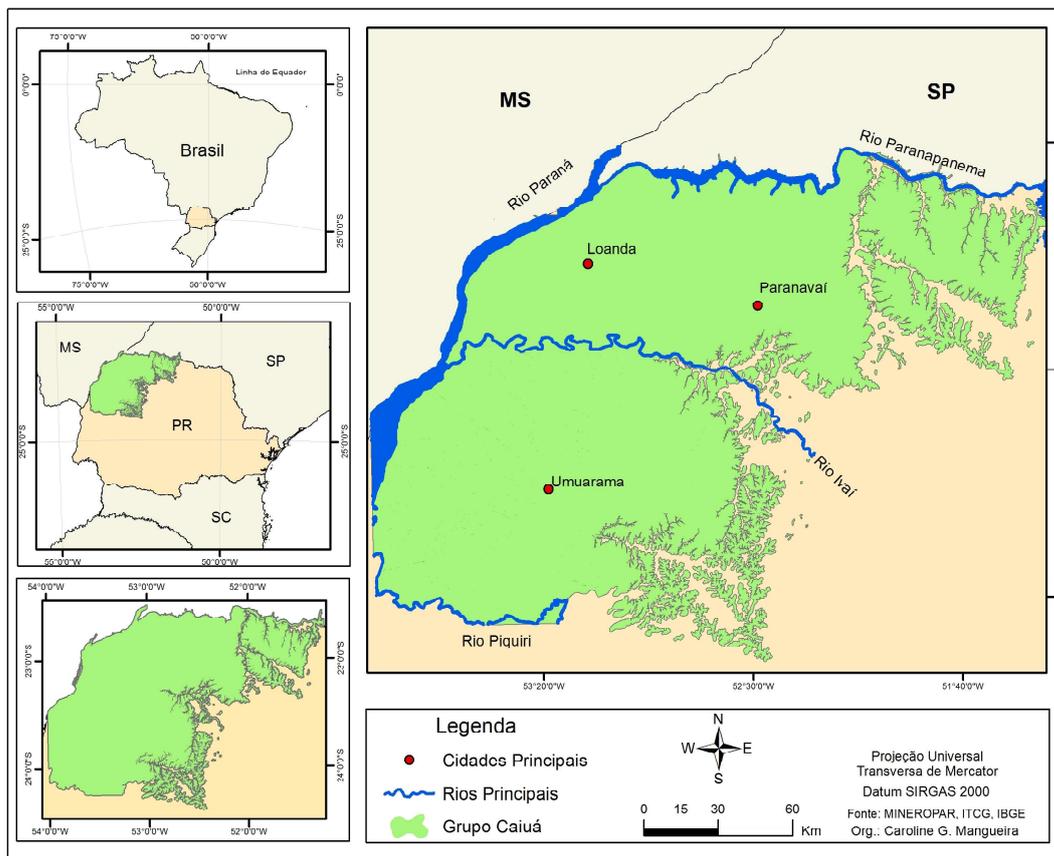


Figura 1 – Mapa de localização da área de ocorrência do Grupo Caiuá no Noroeste do estado do Paraná

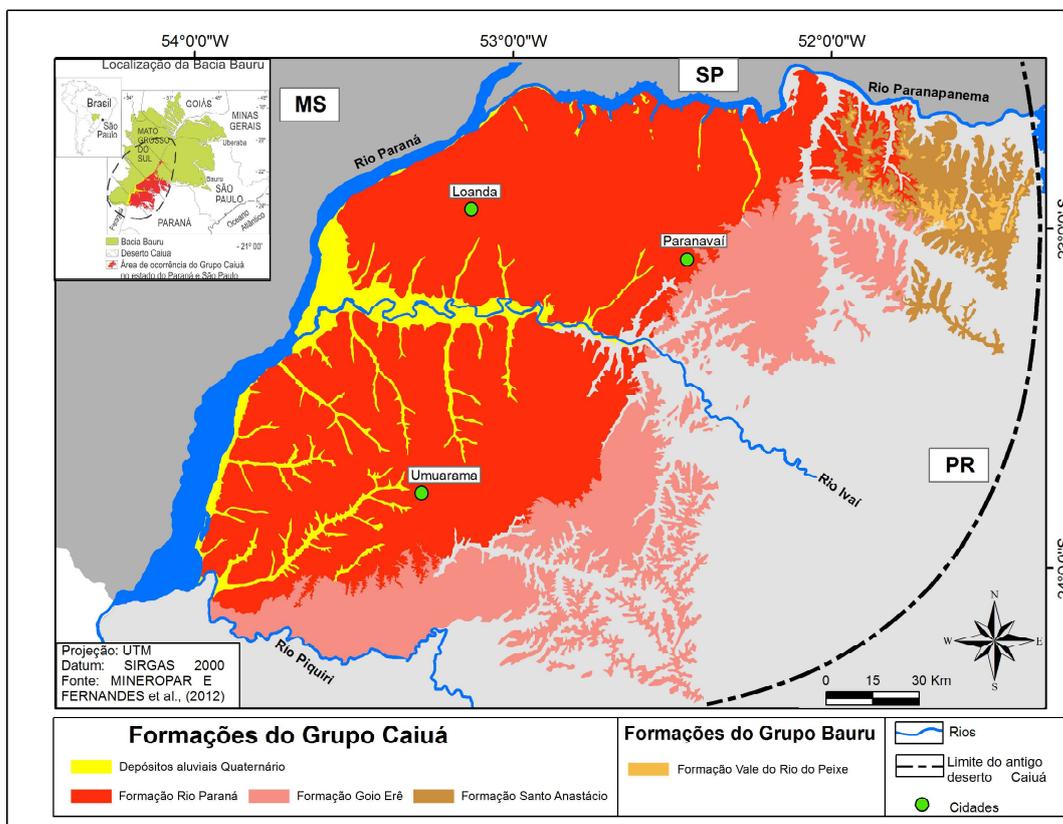


Figura 2 – Localização da ocorrência do Grupo Caiuá (Fernandes et al, 2012)

Após o fim do processo de sedimentação dos arenitos do Grupo Caiuá no final do Cretáceo, houve o desenvolvimento de superfícies de aplainamento. O processo de geração dessas superfícies ocorreu associado à atuação de longos períodos de clima semiárido à árido suficiente para que houvesse o processo de morfogênese mecânica (escoamento dentrítico, escoamento difuso superficial, recuo paralelo das vertentes, aplainamento lateral pela drenagem), que proporcionou condições favoráveis ao desenvolvimento dessas superfícies. Esses processos podem ter ocorrido de maneira cíclica durante o Cenozóico em todos os continentes, devido às oscilações climáticas (alternância entre climas secos e úmidos) (BIGARELLA *et al.*, 2003).

De acordo com a classificação de Bigarella e Andrade (1965) e Bigarella *et al.* (1965), no Noroeste do Paraná encontram-se duas superfícies de aplainamento associadas a essas oscilações climáticas: Superfícies Interplanáltica II e I, correspondendo ao Pd₁ de provável idade Pleistocênica (figura 3).

A Superfície interplanáltica II (SPII) corresponde a remanescentes de uma superfície de aplainamento elaborado em nível inferior aos da superfície de cimeira ou Pediplano 3, atualmente conformando modelados de

aplainamento degradado. Sobre a SPII, são observados relevos residuais de pequenas elevações inferiores a 20 metros de altura mantidos por materiais ferruginosos (couraças, arenitos ferruginizados) e ocorrem, principalmente, nos interflúvios entre as bacias dos rios Ivaí e Piquiri (JUSTUS, 1985).

A Superfície interplanáltica I corresponde aos compartimentos de interdenudação beira rio, acompanhando a drenagem, elaborado pelo entalhamento vertical da drenagem e ampliado por degradação lateral. No SPI, presente nas cercanias do rio Ivaí, há presença de nódulos ferruginosos, calcedônia, arenitos silicificados na forma de linhas de pedra com espessura de até 0,30 metros soterrados por colúvios que podem atingir 20 metros de espessura. No entanto, estas linhas de pedra não acompanham formas de relevo positivo, assim como aquelas observáveis em SPII.

Materiais e Método

Procedimentos metodológico para geração do ICR

Para elaboração do ICR proposto por Sampaio (2008, 2014), foram obtidos modelos digitais de elevação do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

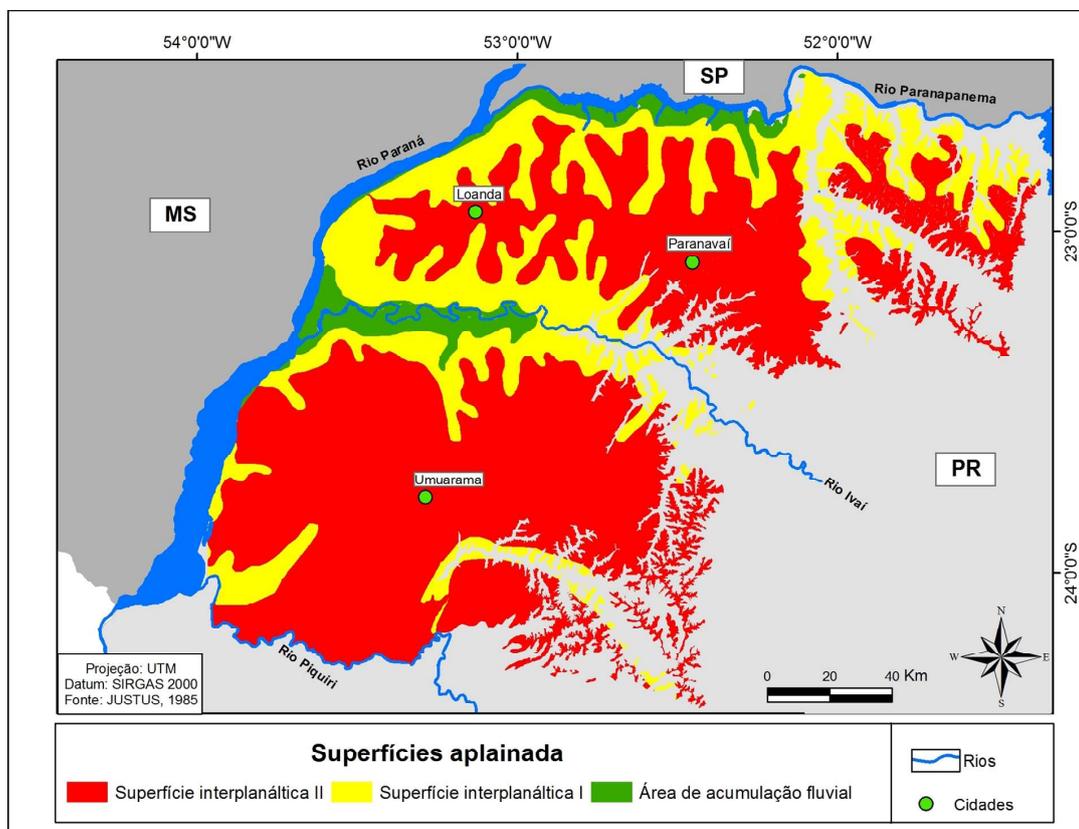


Figura 3 – Mapa de superfície de aplainamento no Noroeste do Paraná

disponibilizadas pela USGS/NASA (Digital Elevation Database versão 4.1), com resolução de 3 arco segundo (aproximadamente 90 metros de resolução espacial), que abrangem a área de ocorrência dos arenitos do Grupo Caiuá no Noroeste do Paraná.

Neste estudo optou-se pelo uso do ICR local, que permite compartimentar qualquer área em subunidades morfológicas, sendo de grande valia em estudos exploratório (SAMPAIO e AUGUSTIN, 2014). Neste sentido, mesmo feições morfológicas de pequenas dimensões (feições locais) podem ser facilmente identificadas e delimitadas pelo emprego do ICR local, como é o objetivo desse estudo.

Após a aquisição dos dados SRTM, foram realizadas as seguintes etapas (figura 4) para geração do ICR:

- Processamento dos MDEs em meio digital pelo Sistema de Informação Geográfica - ArcGIS 9.3.1, em que foram obtidos imagens raster (formato matricial) com valores de declividade (%);
- Conversão do raster de declividade para um arquivo de pontos (formato vetorial);
- A partir do arquivo de pontos aplicou-se o Estimador de Densidade por Kernel optando-se pelo uso do raio de

282 metros (0,25 km²). Após a aplicação do estimador, normalizaram-se os valores por álgebra de mapas, obtendo os valores do ICR local¹.

A partir da geração do índice foram determinadas morfologias de relevo por agrupamento dos valores de ICR local, com os seguintes intervalos:

- ICR local muito baixa - valores ICR abaixo de 2,5;
- ICR local baixa – valores ICR de 2,5 a 6;
- ICR local média – valores ICR de 6 a 14;
- ICR local alta – valores ICR de 14 a 30;
- ICR local muito alta – valores ICR de 30 a 32,193.

Foi aplicado o atributo morfométrico de sombreamento do relevo, com os parâmetros regulados para 50° de elevação e 315° de azimute, a fim de auxiliar na visualização da textura do relevo e dos padrões do relevo.

Para classificação das feições morfológicas (morros, morrotes e colinas), foram utilizados os critérios morfométricos estabelecidos pelo IPT (1981) (quadro 1).

Também foram realizados trabalhos de campo para constatar a veracidade das feições identificadas a partir do emprego do ICR local.

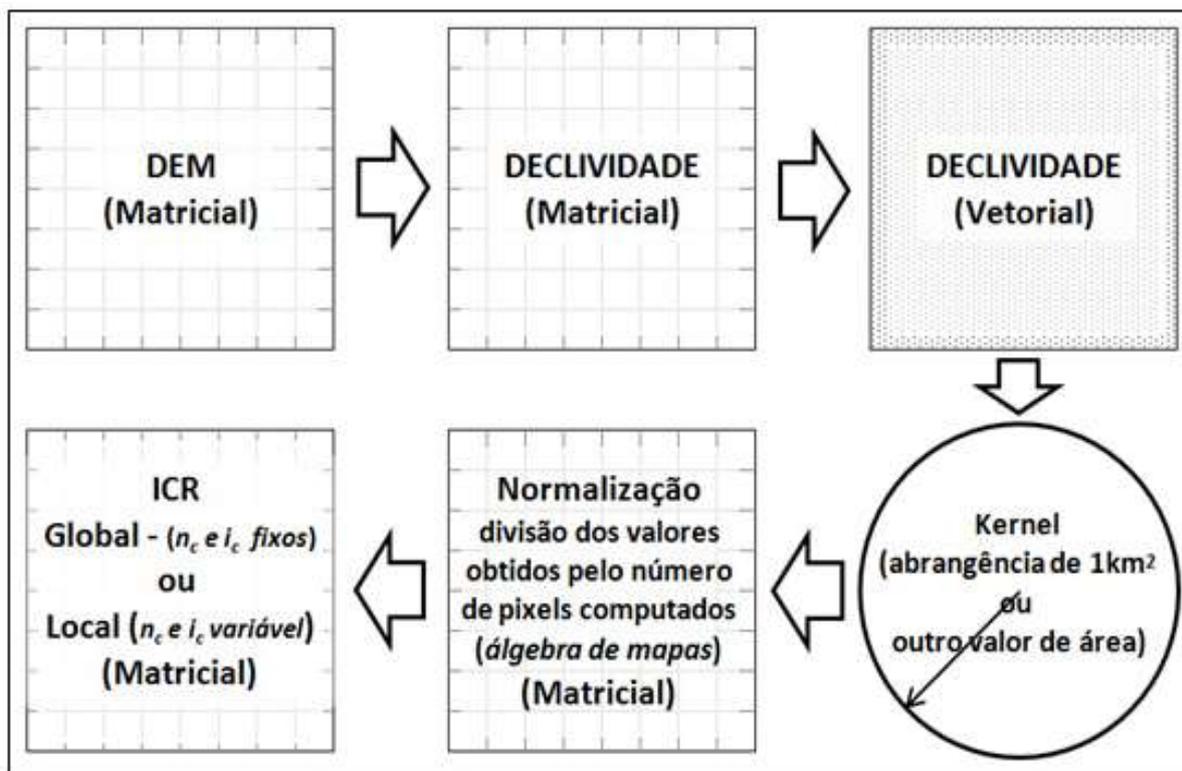


Figura 4 – Etapas para geração do mapa de rugosidade do relevo (SAMPAIO E AUGUSTIN, 2014)

¹ Nesse trabalho o ICR local será designado como rugosidade nas discussões dos resultados.

Quadro 1: Aplicação dos principais critérios (IPT 1981) para identificação de feições morfológicas na categoria dos relevos de degradação (denudação)

Conjuntos de sistemas de relevo	Declividade dominante das encostas	Amplitude locais
Relevo colinoso	0 a 15%	<100 m
Relevo de morros com encostas suavizadas	0 a 15%	100 a 300 m
Relevo de morrotes	>15%	<100 m
Relevo de morro	>15%	100 a 300 m
Relevo montanhoso	>15%	> 300 m

Análise de agrupamento de *Cluster*

Para análise estatística dos dados, empregou-se a análise *Cluster*, a partir do Programa Past (Palaeontological Statistics). A análise *Cluster* busca encontrar nos dados estruturas de agrupamentos que possam separar relevos mantidos por arenitos e materiais ferruginosos a partir dos dados de ICR, de elevação e de declividade.

Para aplicação da análise de agrupamento, foram selecionados os pontos com formas de relevo característica de colina, morro e morrote, identificados previamente pelo ICR. A amostragem dos parâmetros para análise de *Cluster* foi gerada por pontos de buffer com raio de 500 metros, radiando cada ponto central das feições morfológicas.

A partir dessa seleção foram obtidos parâmetros estatísticos dos atributos morfométricos. O Método de agregação utilizado foi a Média de Grupo, onde as feições morfológicas são agrupadas com base na distância média entre todos os membros (distância Euclidiana).

A representação das sequências de agrupamentos formados foi apresentada na forma de dendograma ou diagrama em árvore. Essa hierarquia resultante expressa um índice de relação, no qual cada ligação corresponde a um valor numérico. Quanto maior o índice, mais heterogêneas são as árvores agrupadas. Uma vez formado o dendograma, a separação dos grupos é realizada observando-se as ramificações formadas num corte em determinado nível, geralmente na metade da maior distância.

Resultados

A geração da rugosidade (figura 5) para o Noroeste do Paraná permitiu a discretização de cinco classes (muito

baixa, baixa, média, alta e muito alta), em que a distribuição espacial concentra-se nas classes de rugosidade muito baixa (42%) e baixa (54%) e representam 96% da área, fato que demonstra a morfologia predominantemente plana. As demais classes de rugosidade representam 4%, sendo que a classe de rugosidade média corresponde a 3,57%, a alta 0,30% e a muito alta 0,13% (figura 6).

As classes de rugosidade muito baixa e baixa estão associadas aos grandes compartimentos do relevo de baixa dissecação, situados nas planícies aluviais dos rios Paraná, Ivaí, Piquiri e Parapanema e aos modelados de degradação como as Superfícies Interplanáltica II e I.

As classes de rugosidade média, alta e muito alta, estão associadas a feições residuais de caráter local (morro, morrote, colina), essas feições são mantidas por rochas de cimentação silicosa, carbonática ou materiais ferruginosos de maior resistência à processo de denudação.

Pelos valores dispares da rugosidade apresentado pelas feições residuais foi possível distingui-las dos demais compartimentos de relevo. Para auxiliar a identificação de feições pela rugosidade, também se utilizou a técnica de sombreamento do relevo (figura 7) derivado do modelo digital de elevação SRTM, pois essa técnica permite o seu realce a partir da simulação de diferentes ângulos de iluminação, destacando feições estruturais e esculturais diferenciadas na paisagem, enquanto a altimetria não permite esse destaque (figura 7 B, E).

Com a associação entre rugosidade e sombreamento do relevo foi possível identificar quatorze feições residuais do relevo no Noroeste do Paraná, sendo essas inventariadas utilizando atributos morfométricos (altitude e declividade) derivados do modelo digital de elevação SRTM, seguindo critérios estipulados por IPT (1981).

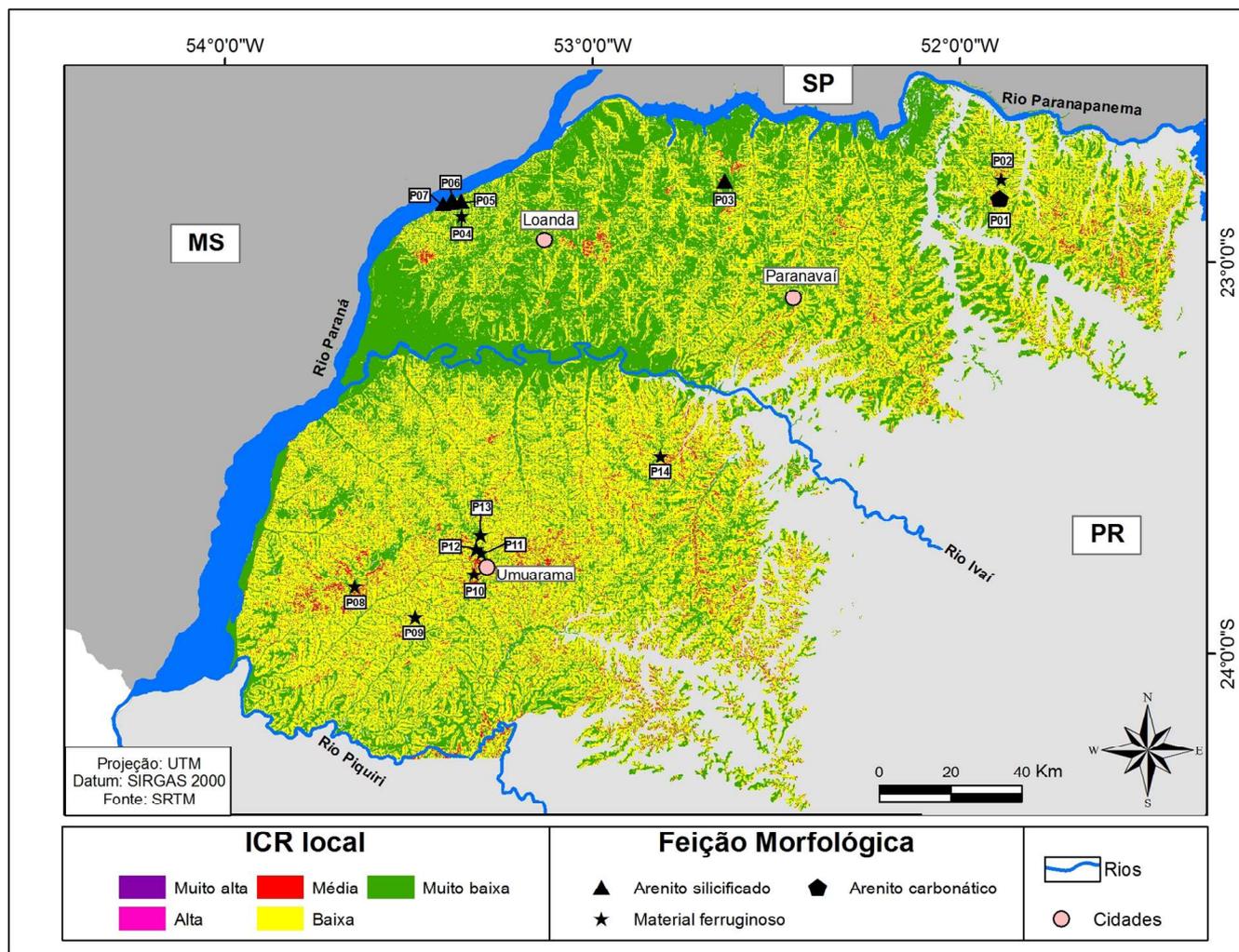


Figura 5 – Mapa do ICR do Noroeste do Paraná

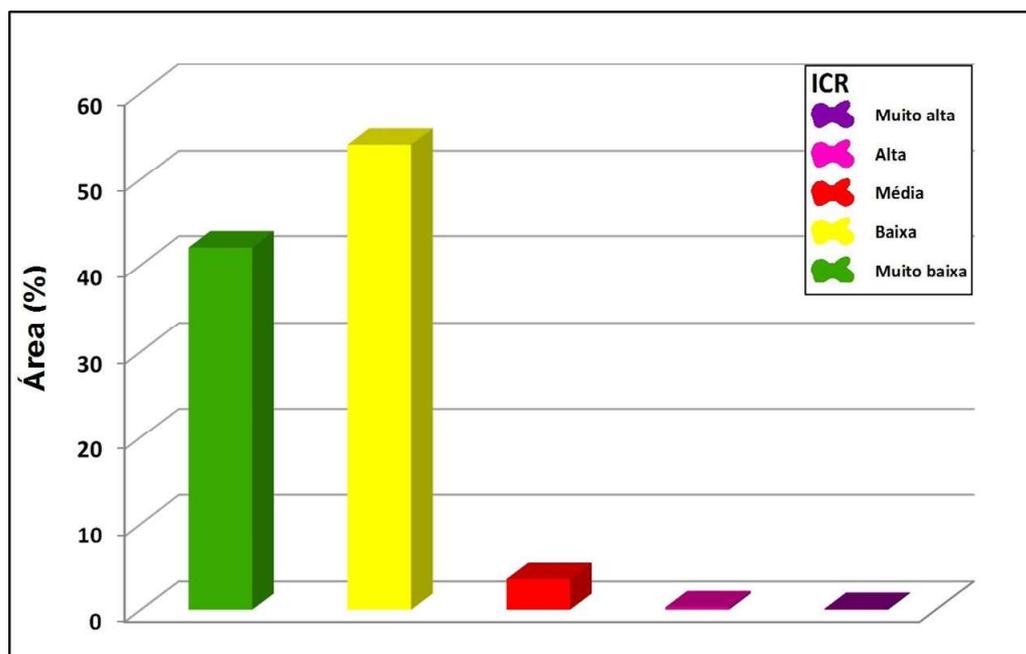


Figura 6 – Gráfico de porcentagem de área, para cada classe de ICR para o Noroeste do Paraná

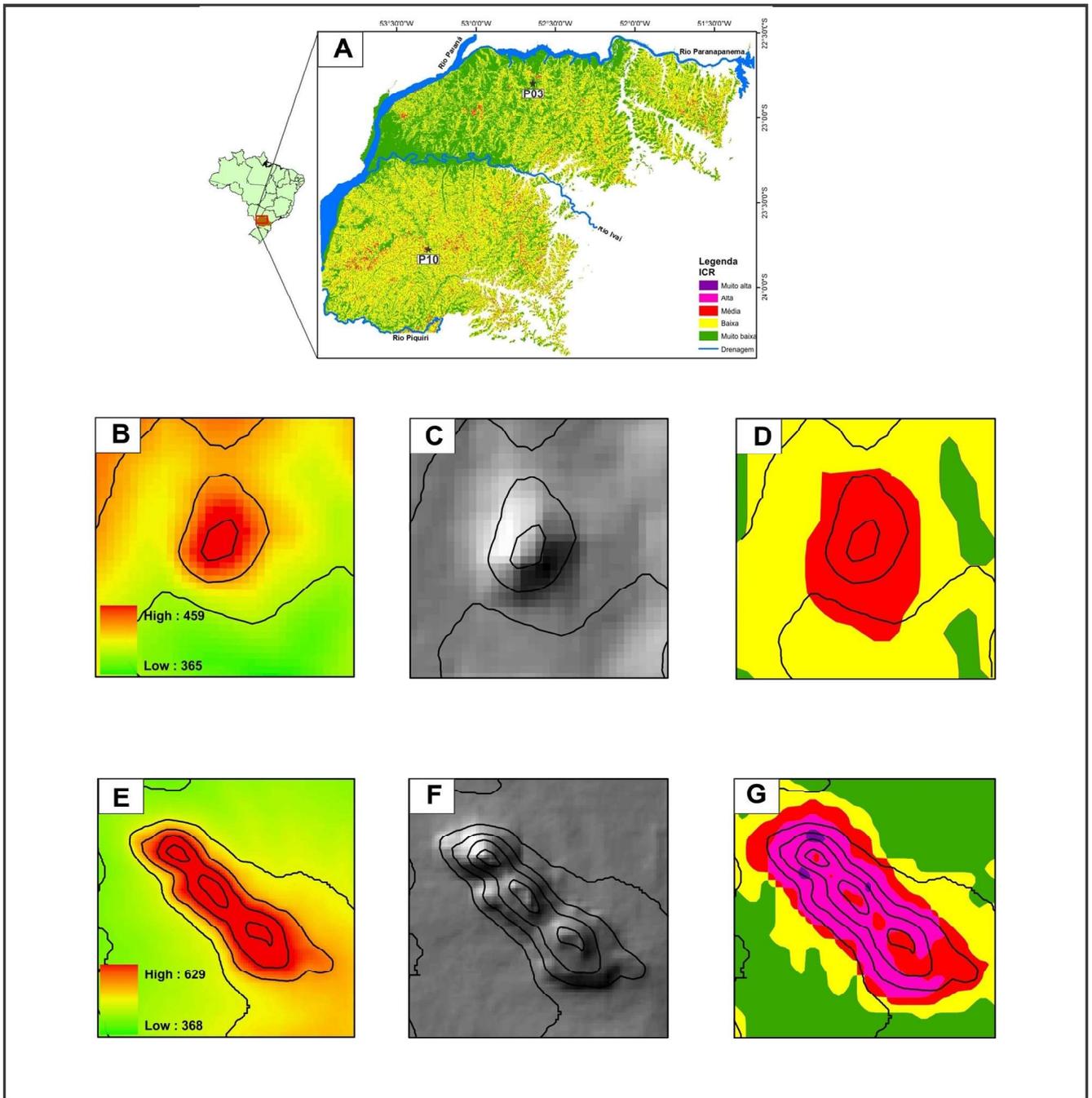


Figura 7 – (A) Rugosidade do Noroeste do Paraná. (B) Altimetria do MDE do ponto 10. (C) Imagem sombreado do ponto 10, representando um morrote. (D) ICR local do ponto 10, no qual o morrote está representado pelo ICR médio. (E) Altimetria do MDE do ponto 3. (F) Imagem sombreado do ponto 3. (G) ICR do ponto 3, no qual morro está representado pelas classes média, alta e muito alta. Todas as imagens estão sobrepostas por curvas de nível possuem 50 m de equidistância.

As 14 feições morfológicas identificadas foram classificadas como morro (1), morrotes (8) e colinas (5), conforme apresentado no quadro 2.

A utilização da rugosidade permitiu a identificação de feições de relevo em uma região de morfologia relativamente homogênea, no entanto, somente a apli-

cação desse índice não possibilitou apontar diferentes tipos de rochas responsáveis pela manutenção dessas feições. No intuito de auxiliar a pré-seleção de feições geomorfológicas a serem analisado em campo, empregou-se a análise *Cluster*, utilizando atributos morfo-métricos (declividade, altitude e rugosidade) derivados

Quadro 2: Pontos de ocorrência das feições morfológicas, atributos morfométricos e materiais presentes

Ponto	Altitude (m)			Declividade (%)			Feição morfológica	Material ferruginoso ou rocha
	máxima	mínima	amplitude	máxima	mínima	média		
01	476	450	26	22	6,5	15,5	Morrote	Arenito Carbonato
02	460	440	20	17	6	14	Colina	Material ferruginoso
03	629	430	199	60	10,88	49,12	Morro	Arenito silicificado
04	403	380	23	20	6	12,23	Colina	Material ferruginoso
05	320	300	20	18,61	6,78	13,15	Colina	Arenito silicificado
06	320	280	40	30	1,3	16,20	Morrote	Arenito silicificado
07	320	280	40	34,44	1	19,36	Morrote	Arenito silicificado
08	439	390	49	23	7,89	15,11	Morrote	Material ferruginoso
09	431	400	31	27	11,5	15,5	Morrote	Material ferruginoso
10	465	430	35	25	9,5	15,5	Morrote	Material ferruginoso
11	491	460	31	16	4,2	11,8	Colina	Material ferruginoso
12	489	450	39	30	10,06	19,94	Morrote	Material ferruginoso
13	480	440	40	20	6,4	13,6	Colina	Material ferruginoso
14	472	440	32	31	8,24	22,76	Morrote	Material ferruginoso

de modelos digitais de elevação SRTM, para distinguir características morfométricas, que podem apresentar agrupamentos de feições por suas respectivas litologias.

Por meio da análise *Cluster*, foram obtidos dois grupos distintos (Grupo I e II) caracterizados pelos parâmetros de máxima, média e desvio padrão dos parâmetros abordados (figura 8 e quadro 3).

O Grupo I (figura 8), constituído pelas feições de relevo denominados de pontos 3, 5, 6 e 7, é homogêneo, porém, verifica-se a existência de dois ramos nesse grupo; um para os pontos 5, 6 e 7 e outro isolado para o ponto 3 (figura 8).

A diferenciação nos ramos dentro do Grupo I se deve aos valores morfométricos semelhante, entre um conjunto de feições (pontos 5, 6 e 7) e o valor díspare de uma única feição (ponto 3). Porém essa diferença não foi suficiente para separá-lo em outro grupo. As feições de relevo do Grupo I agrupam as classes morro

e morrote, apresentando características como: valores de declividade e rugosidade mais altos, distintas das feições do Grupo II (quadro 3).

A ramificação no Grupo I relacionado ao ponto 3, foi classificada pelo *Cluster* como um ramo diferente das demais feições do dendograma e corresponde à feição geomorfológica de maior expressão no modelado do Noroeste do Paraná. Encontra-se isolada numa paisagem de colinas amplas e apresenta média de altitude de 535,9 m, declividade 33,6% e rugosidade 19,6 (quadro 3).

O ramo associado aos pontos 5, 6 e 7 também apresentam características que se destacam na paisagem com menores altitudes quando comparados ao ramo do ponto 3, e médias das cotas altimétricas de 301, 291 e 294 metros respectivamente. Essas feições assemelham entre si e portanto agrupam-se no mesmo ramo do dendograma (figura 8).

As feições do Grupo II (figura 8) apresentam atributos morfométricos similares entre si, o que não permitiu

diferenciar os pontos (quadro 3).

A partir da identificação prévia das feições de relevo pelos métodos empregados, foi realizada a averiguação em campo e apurou-se que as 14 feições identificadas pela rugosidade foram confirmadas, como também os três tipos de condicionantes que mantêm essas feições (quadro 2): os arenitos silicificados, arenitos carbonáticos e os materiais

ferruginosos (figura 9). Os tipos de cimentos em arenitos e materiais ferruginosos possuem origens distintas, no qual os cimentos silicáticos (figura 9F) são de origem hidrotermal (FERNANDES *et al.*, 1993); os cimentos carbonáticos (figura 9I) de origem de ambiente árido (FERNANDES e COIMBRA, 1994); e os cimentos ferruginosos (figura 9C) de origem pedogenética (JUSTUS, 1985).

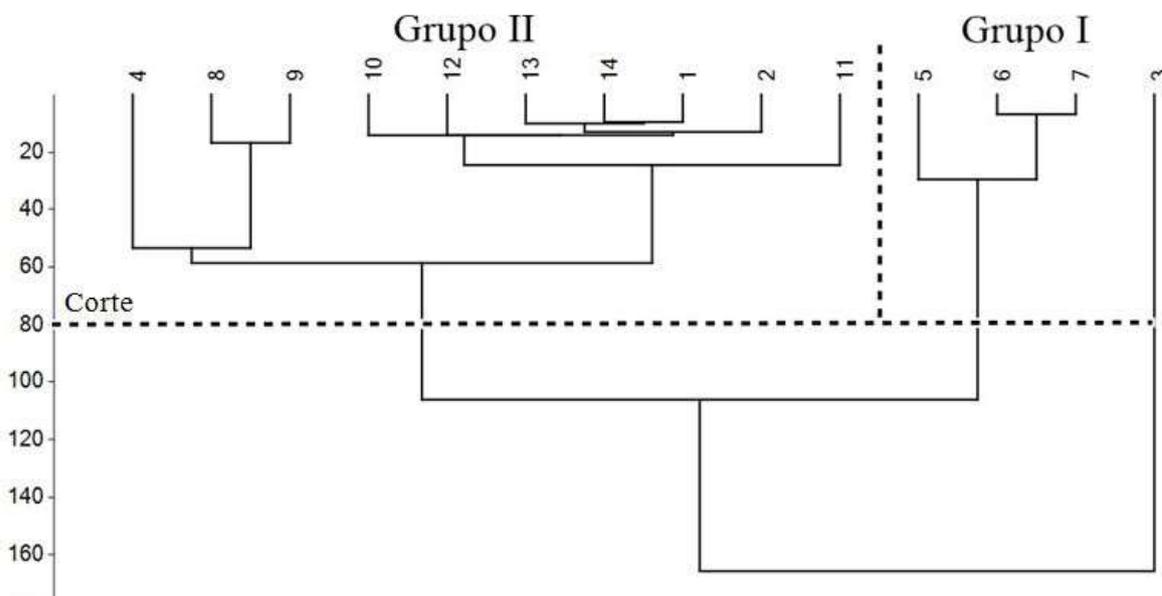


Figura 8 - Dendrograma com base no método de ligação Euclidiano obtido pela análise de Cluster

Quadro 3: Parâmetros morfométricos extraídos para cada feição geomorfológica

Variável	Grupo I				Grupo II									
	3	5	6	7	1	2	10	11	12	13	14	4	8	9
Máxima Elevação	629	331	332	337	476	482	465	492	489	479	470	391	440	432
Média Elevação	535,9	301,6	291,4	294,2	440,9	457,5	431,9	463,7	449,4	449,1	439,4	363,4	405,8	392,4
Desvio Padrão Elevação	12,7	13	15,7	20,4	10,7	13,9	11,6	11,8	49,1	13,1	12,6	8,6	16,7	15,4
Máxima Declividade	59,4	17,5	32,5	32,8	22,6	22,5	26,4	16,5	29,9	20,3	29,1	21,8	22,6	27,7
Média Declividade	33,6	8,4	12,3	11,0	8,6	8,9	9,0	6,7	9,0	9,0	11,1	7,2	9,9	8,9
Desvio Padrão Declividade	6,2	1,7	3,9	3,9	2,5	2,0	2,5	2,0	2,8	2,0	2,6	1,7	2,3	2,3
Máxima Rugosidade	30,6	7,3	12,1	15,3	10,6	9,6	10,3	6,8	9,3	9,7	11,8	8,9	11,0	11,0
Média Rugosidade	19,6	4,4	6,3	5,9	4,6	4,8	4,7	3,1	4,6	4,6	5,1	3,9	5,3	4,8
Desvio Padrão Rugosidade	5,3	1,2	2,3	2,9	2,1	1,8	1,9	1,8	2,0	1,7	1,7	1,5	2,1	2,0
Feição Morfológica	Morro	Colina	Morrote	Morrote	Morrote	Colina	Morrote	Colina	Morrote	Colina	Morrote	Colina	Morrote	Morrote
Material ferruginoso ou rocha	Arenito Silicificado				Material ferruginoso e Arenito Carbonato									

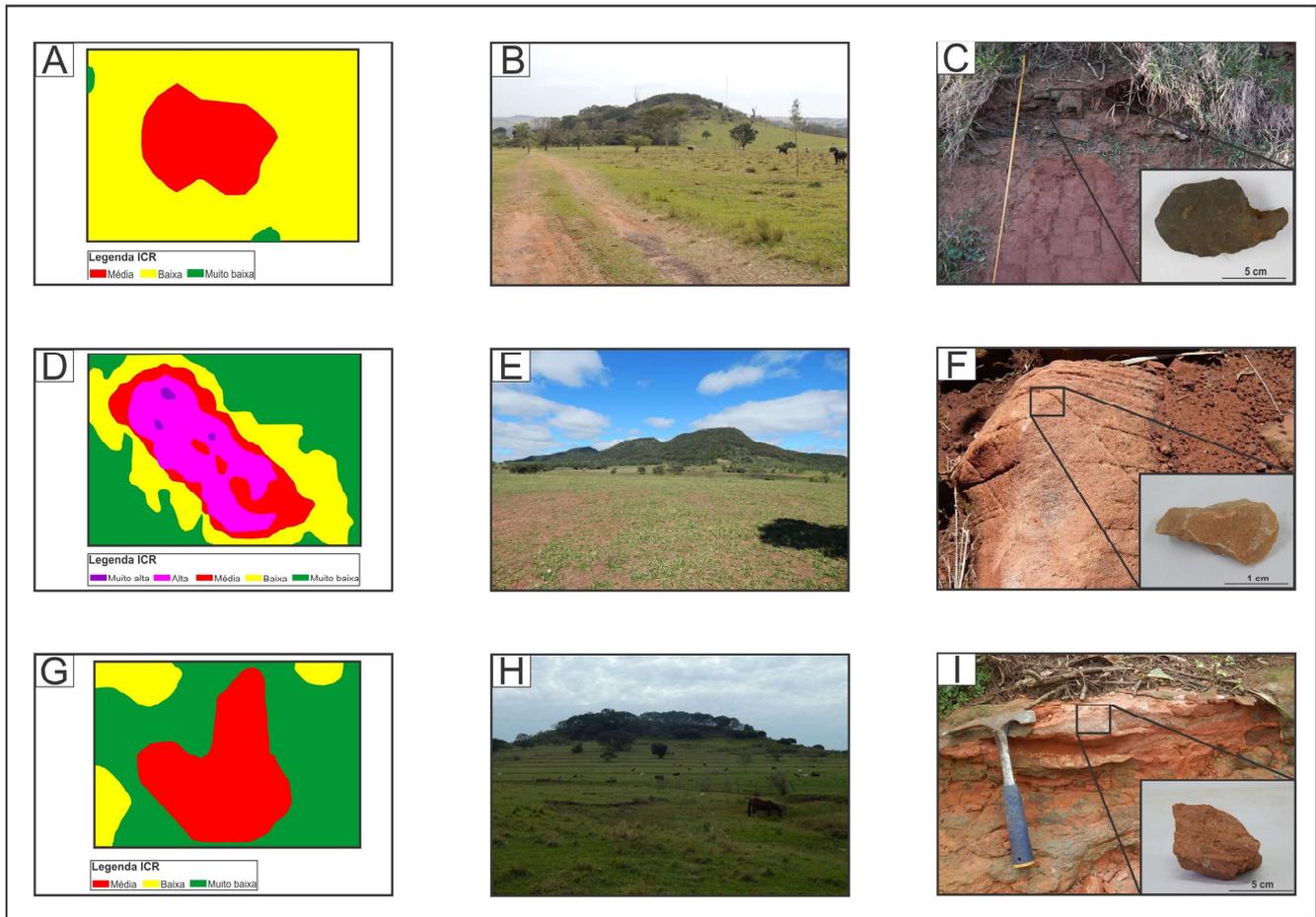


Figura 9 – ICR local e ocorrência de morros e morrotes e o tipo de material que mantém estas feições (pontos 2, 3 e 10 – figura 5). (A) ICR do ponto 10. (B e C) Foto do morrote e materiais ferruginosos do ponto 10. (D) ICR do ponto 3. (E e F) Foto do morro e dos arenitos silicificados do ponto 3. (G) ICR do ponto 2. (H e I) Foto do morrote e dos arenitos carbonático ponto 2.

Verificou-se também, por meio de trabalho de campo que a rugosidade não define limite abrupto para feições morfológicas com o seu entorno (figura 10 D), essa apresenta zonas de transição (figura 10 E e F). Segundo Sampaio (2014), o surgimento dessas áreas se deve à mescla de valores de declividade dos pixels de duas unidades distintas de relevo, sendo essas transições importantes setores do ponto de vista geomorfológico por representar processos ou preservar depósitos correlativos que atuaram na esculturação das feições dos relevos (figura 10 E e F).

A importância dessas zonas de transição é notada nas proximidades dos Três Morrinhos (figura 10 E), onde Justus e Bigarella (1985) observaram depósitos correlatos (colúvios, linhas de pedra, níveis embutidos à drenagem) relacionados a processos geomorfológicos, como: materiais originados por escoamento dentrítico, difuso superficial e de recuo paralelo das vertentes. Segundo os autores (*op cit*) esses depósitos dizem respeito

aos ciclos recorrentes de flutuações climáticas (climas úmidos para mais secos) e atuação dos processos de erosão rápida característicos de ambientes de alta energia. Adicionalmente, esses processos geraram modelados de dissecação média e fina, de evolução rápida, que contribuíram na esculturação das feições morfológicas atuais no decorrer do Quaternário.

A correlação entre os materiais que mantêm as feições está de acordo com o indicado pela separação em dois grupos de feições na análise *Cluster*, mostrando que a utilização deste recurso metodológico foi eficiente, uma vez que as feições do Grupo I são mantidas exclusivamente por arenitos silicificados.

O ponto 3 classificado pelo *Cluster* como um ramo diferente das demais feições do dendograma do Grupo I, corresponde à feição geomorfológica de maior expressão no relevo no Noroeste do Paraná, denominado de Três Morrinhos, localizado no município de Terra Rica. Em

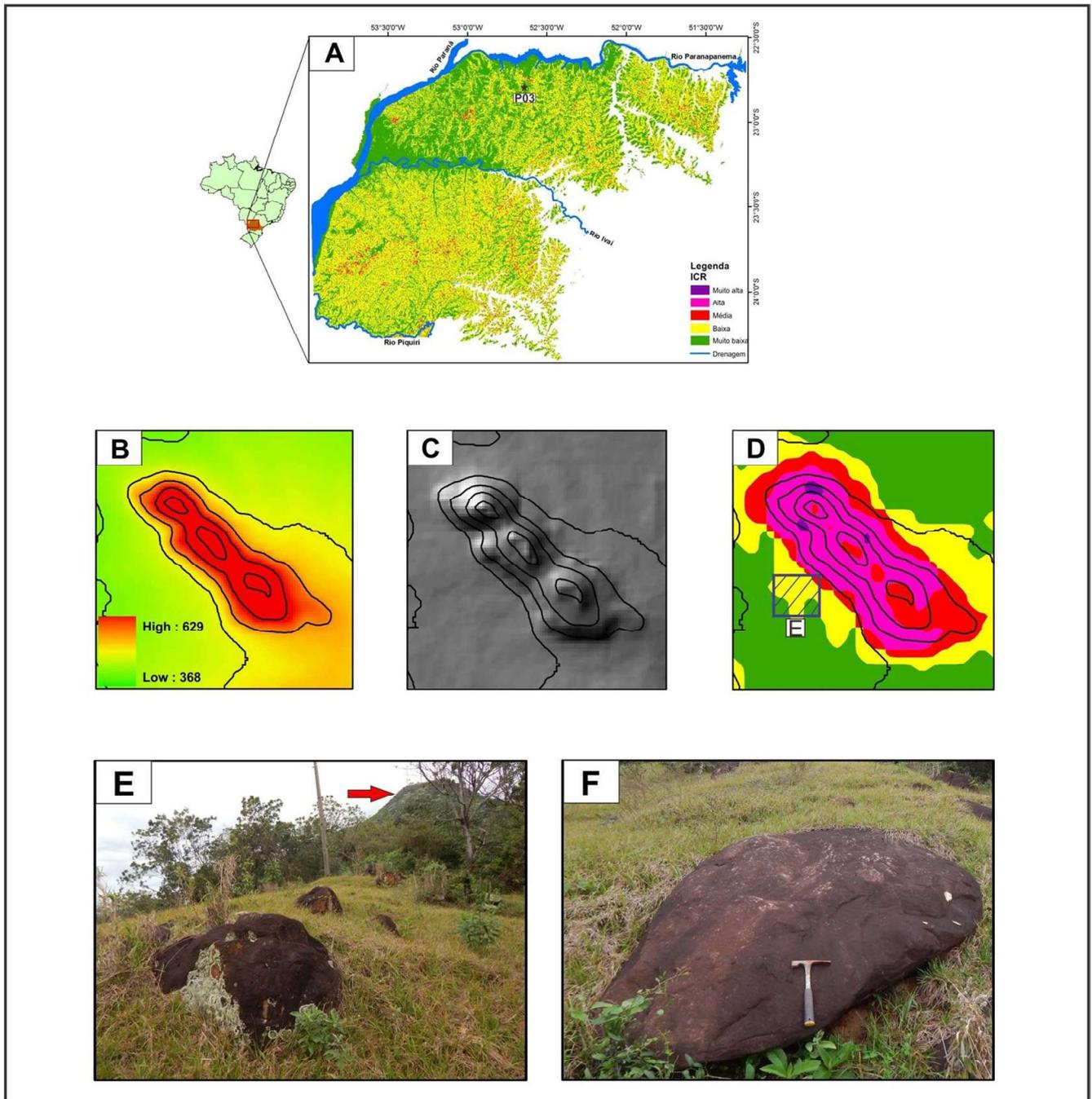


Figura 10 – Zonas de transição em feição sustentada por arenito silicificado. (A) Rugosidade do Noroeste do Paraná. (B) Altimetria do MDE do ponto 3. (C) Imagem sombreado do ponto 3. (D) ICR do ponto 3, no qual morro está representado pelas classes média, alta e muito alta. (E) Foto da zona de transição mapeados pela rugosidade (demarcado no quadro D), com presença de blocos soltos de arenito silicificado e visão parcial da feição (seta vermelha). (F) Bloco solto de arenito silicificado. As imagens B, C, D estão sobrepostas por curvas de nível possuem 50 m de equidistância.

um relevo regional de altitudes médias de 350 m, essa é a feição de maior expressão na área, apresentando altitudes acima de 600 m. Essa feição destaca-se isolada na paisagem de colinas amplas sustentada por arenito silicificado, mais resistente aos processos de denudação em

relação aos arenitos não silicificados do entorno. Esse morro apresenta topos de cerca de 200 metros acima do nível cimeiro regional (FERNANDES *et al.*, 2012).

As feições da outra ramificação do Grupo I (pontos 5, 6, 7), também são sustentadas por arenitos

silicificados e destacam-se na paisagem com menores altitudes, declividade e rugosidade quando comparados com o ponto 3.

O Grupo II, apesar da similaridade no dendo-grama, não possibilitou a separação de feições como no Grupo I, pois os fatores que sustentam as feições desse grupo são os materiais ferruginosos e arenitos com cimento carbonático e o comportamento morfométrico entre as feições mantidas por esses materiais são semelhantes, não sendo possível a separação desses pela análise *Cluster*.

Considerações Finais

A utilização do ICR junto ao sombreamento do relevo, mostrou-se eficiente na identificação de feições morfológicas do relevo no Noroeste do Paraná, possibilitando a distinção de feições de pequenas dimensões mesmo em uma paisagem que apresenta padrões morfométricos homogêneos.

A tentativa de quantificar morfologicamente a paisagem estabelecendo valores fixos de rugosidade às unidades de relevo permitiu sua padronização, mostrando-se válida uma vez que todas as colinas e morrotes sustentados por materiais ferruginosos apresentam valores padrão na classe rugosidade média. No entanto, não foi possível distinguir, apenas pela rugosidade, as feições mantidas pelos arenitos silicificados e carbonatos das sustentadas por materiais ferruginosos, visto que essas feições possuem morfologias muito similares. Para solucionar o entrave, a análise estatística de agrupamento por *Cluster* foi utilizada de maneira satisfatória, permitindo a distinção entre dois grupos: os sustentados por arenitos silicificados e os materiais ferruginosos/arenitos carbonáticos.

Com base nos resultados, a aplicação do ICR evidenciou o potencial positivo de aplicabilidade do método, possibilitando a identificação das feições geomorfológicas de interesse. Outra vantagem constatada pelo uso do índice é a utilização de uma única base que neste caso o modelo digital de elevação SRTM, que elimina a necessidade de uso integrado de materiais em diferentes escalas como fotografias aéreas, cartas topográficas e mapas geológicos.

Deste modo, análise integrada entre ICR, análise *Cluster* e sombreamento do relevo demonstrou potencial de aplicação, sendo possível distinguir características

geológicas e geomorfológicas na área estudada bem como uma alternativa viável e de baixo custo para escolha prévia das áreas de interesse para posterior investigação geomorfológica em campo.

Referências Bibliográficas

- BIGARELLA, J.J.; ANDRADE, G.O. Contribution to the study of the Brazilian Quaternary. **Geological Society of America**, v. 84, 433-451, 1965.
- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA, J.X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. **Boletim Paranaense de Geografia**, n.16 e 17, 1965.
- BIGARELLA, J.J.; BECKER, R. **Estrutura e origens das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, v.3, 2003.
- EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistic. In: CHORLEY, R. J. (Ed.) *Spatial Analysis in Geomorphology*. New York: **Harper and Row**, p.17-90, 1972.
- FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A.M.; BRANDT NETO, M. Silicificação hidrotermal neocretácea na porção meridional da Bacia Bauru. **Revista do Instituto Geológico**, v.14(2): 19-26, 1993.
- FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A.M. O Grupo Caiuá (Ks): Revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v.24(3):164-176, 1994.
- FERNANDES, L.A.; COUTO, E.V.; SANTOS, L.J.C. Três Morrinhos, Terra Rica, PR - Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento K-T. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Souza, C.R.G.; Fernandes, A.C.S.; Berbert-Born, M.; Sallun Filho, W.; Queiroz, E.T.; (Edit.). (Org.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. 1.ed. Brasília: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, v. III, p. 69-87, 2012.
- FERRARI, J.A.; HIRUMA, S.T.; KARMANN, I. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do vale do Ribeira, São Paulo. São Paulo: **Revista do Instituto Geológico**, v. 19, 9-17, 1998.
- FILHO, S.W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). **Revista Brasileira de Geociências**, v.37, 551-564, 2007.
- FLORENZANO, T.G. Geomorfologia: conceitos e tecnologias

atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FONSECA, B.M.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Análise morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estrutura geológica, Serra do Espinhaço Meridional. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15(2):153-172, 2014.

GROHMANN, C.H. Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R. **Computers & Geosciences**, v.30, n.30, 1055-1067, 2004.

GROHMANN, C.H.; SMITH, M.J.; RICCOMINI, C. Multiscales analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.49, 1200-1213, 2011.

HARTWING, M. E.; RICCOMINI, C. Análise morfotectônica da região da Serra dos Orgãos, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n° 1, 2010.

HIRUMA, S.T.; RICCOMINI, C. Análise morfométrica em Neotectônica: o exemplo do Planalto de Campos do Jordão, SP. São Paulo: **Revista do Instituto Geológico**, v.20, 5-19, 1999.

HOBSON, R.D. Surface in topography: quantitative approach In: Chorley, R.J. **Spatial analysis in geomorphology**, 225-245, 1972.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, v.12 (relatório nº 15388), 1981.

JENSEN, D.C.; GOMES, M.; SANTOS, D.J.; CAVALCANTI, L.F. Mapa de vulnerabilidade natural do patrimônio espeológico da região de abrangência do PAN cavernas do São Francisco. **Revista Brasileira de Espeologia**, v.1(4): 63-77, 2014.

JUSTUS, J. **Subsídios para interpretação morfogenética através da utilização de imagens de radar**. 1985. 204p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 1985.

KARMANN, I.; PEREIRA, R.F.; FERRARI, J.A. Índice de Rugosidade: parâmetro morfométrico da intensidade do relevo. Exemplo do carste da bacia do Rio Uma, Bahia. **Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 4, 575-579, 1996.

LOBÃO, J.S.B.; VALE, R.M.C. Microbacias na Região do Parque Estadual de Morro do Chápeu (PEMC): Um modelo em SIG para Análise Ambiental. In: **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, INPE, 2007.

MESSIAS, C.G.; TROVÓ, D.F.G. Dissecação do relevo do setor nordeste da carta topográfica de São José dos Campos: uma comparação entre métodos de mapeamento manual e Índice de

Concentração de Rugosidades. In: **Encuentro de Geógrafos de America Latina, Lima-Perú**, 2013.

MINEROPAR. **Mapa Geomorfológico do Estado do Paraná**. Paraná: Mineropar, 2006.

NASCIMENTO, E.R.; NEO, J.M.R.; 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(2): 61-68, 2010.

NETO, M.C.; FERNANDES, E. Concentração da rugosidade topográfica: subsídios ao estudo de fragilidade pontencial da bacia hidrográfica do rio Seridó. **Revista Geonorte**, v.2(4): 1396-1405, 2012.

PIKE, R.; EVANS, I.; HENGL, T. Geomorphometry: A brief guide. In: HENGL, T; REUTER, H (eds). **Geomorphometry: Concepts, software and applications**. Amsterdam, Elsevier Ed. Quantitative morphology. **Geological Society of American Bulletin**, v.1, p.1-707, 2009.

RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantify topographic heterogeneity. **Journal of Science**, v.5, n.4, p.23-27, 1999. Disponível em: <http://download.osgeo.org/qgis/dov=c/reference-docs/Terrain_Ruggedness_Index.pdf> Visualizado em 06/03/2015.

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**. Tese (Doutorado). Institu de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

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.; Índice de Concentração da Rugosidade (ICR): uma proposta para o mapeamento morfométrico via emprego de Geotecnologias. **Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, Viçosa-MG, 2009.

SAMPAIO, T.V.M.; AUGUSTIN, C.H.R.R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsidio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15(1): 47-60, 2014.

SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C;T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de**

Geomorfologia, n.2, p.3-12, 2006.

SILVEIRA, R.M.P.; SILVEIRA, C.T.; OKA-FIORI, C. Análise do relevo empregada no mapeamento de unidades Geomorfológicas. **Revista Geografar**, v.7(2), p.43-68, 2012.

SOUZA, L.F.; 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 Tecnologia da Geoinformação**, Recife-PE, 27-30, 2010.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>>. Acesso em: 06/03/2015.