

Potencial de discriminação geomorfométrica da Formação Tupanciretã na Bacia do Paraná, sul do Brasil

Clódís de Oliveira Andrades Filho¹
Bárbara Maria Giacom Ribeiro²
Fábio Corrêa Alves³
Édipo Henrique Cremon⁴
Rogério Dutra Soares⁵

¹ Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS
CEP 95.400-000 – São Francisco de Paula – RS, Brasil
clodis-filho@uergs.edu.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
CEP 90.050-170 – Porto Alegre – RS, Brasil
barbara.giacom@ufrgs.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – CEP 12.227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil
alves.fabioc@gmail.com

⁴ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - IFG
Rua 75, nº46. Centro. CEP 74055-110 - Goiânia - GO, Brasil
edipo.cremon@ifg.edu.br

⁵ Fundação de Ciência e Tecnologia – CIENTEC
CEP 90.010-460 – Porto Alegre – RS, Brasil
rogerio-soares@cientec.rs.gov.br

Abstract. Geomorphometry has shown great progress following the use of digital elevation models (DEM's), especially global DEM's derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); it has become a powerful framework for the discrimination of geological units based on associated geomorphological characteristics. We applied algorithms to SRTM DEM's in order to derive the following geomorphometric variables: height, amplitude, coherence, slope, hypsometric integral, predominance, relief anomaly, roughness, surface (SI) and terrain ruggedness (TRI) indexes. We believe these variables could help to uncover topographic patterns associated to the Tupanciretã geological formation (after Jurassic-Cretaceous period) and the Serra Geral geological formation (Jurassic-Cretaceous period). The geomorphometric variables: height, amplitude and SI and TRI indexes performed better when discriminating the spatial occurrence of the Tupanciretã and Serra Geral geological formations. This result indicates that the aforementioned geomorphometric variables could potentially improve the geological mapping of Rio Grande do Sul state; its main contribution would be the increase of the accuracy in the discrimination of deposits of sediments from Tupanciretã geological formation. This is a major contribution, once the cartographic base currently in use was elaborated in the 1960-70's and it does not take into account the myriad of geological data widely available nowadays from diverse sources such as remote sensing. These data will help to solve incongruences and enhance the current geologic mapping for Rio Grande do Sul, South of Brazil; also contributing towards the refinement of the geological evolution of the Intracratonic Basin of Paraná.

Palavras-chave: geomorphometry, digital elevation model, discrimination of geologic units, geomorfometria, modelo digital de elevação, discriminação de unidades geológicas.

1. Introdução

As formas do terreno são elementos de fundamental investigação para compreensão da evolução da paisagem e da distribuição espacial de seus efeitos e produtos. Nesse sentido, a aplicação de métricas para análise do terreno recebe destaque por permitir obter e reproduzir padrões topográficos a partir dos seus atributos. O campo do conhecimento que trabalha nesta perspectiva, a Geomorfometria, vêm apresentando um amplo progresso a partir do uso dos modelos digitais de elevação (MDE's), sobretudo aqueles oriundos da *Shuttle Radar*

Topography Mission (SRTM) de abrangência global e, portanto, com grande potencial de uso e reprodução em diferentes contextos geológicos e geomorfológicos. Alguns autores têm explorado historicamente diferentes técnicas de processamento digital de imagens sobre os dados relativos a atributos do terreno e produtos derivados (p.e., Andrades Filho et al., 2014; Pike, 2000). A partir destes dados é possível obter e explorar a concepção de um espectro de grandezas topográficas relativas às unidades geológicas, ou seja, através das assinaturas geomorfométricas dos terrenos correspondentes. Assim, cada célula da grade de valores (i.e., unidade espacial de terreno) pode ser reproduzida por gráficos descritivos dos atributos de terreno (i.e., espectro) podendo ser comparada com gráficos descritivos próprios, típicos de determinadas formas de relevo diagnósticas de contextos geológicos reconhecidos (i.e., assinaturas geomorfométricas).

No sul do Brasil, o registro geológico da evolução da Bacia intracratônica do Paraná têm sido bastante estudado (p.e., Milani et al., 2007), sobretudo as unidades de idade até o período Cretáceo, que foi quando encerraram-se os eventos magmáticos extrusivos na Bacia. A Formação Serra Geral representa um dos maiores episódios vulcânicos que se tem conhecimento. Esta formação inclui derrames de lava a intrusões de corpos básicos a ácidos e está associada a processos tectônicos que culminaram com a abertura do Oceano Atlântico Sul. No caso particular do sul do Brasil, estas rochas vulcânicas são classicamente associadas ao final da evolução estratigráfica da Bacia do Paraná (p.e., Milani et al., 2007). A porção norte do Rio Grande do Sul é dominada por rochas da Formação Serra Geral e pela ocorrência de depósitos sedimentares sobrejacentes. Menegotto et al. (1968) mapeou estas ocorrências sedimentares, atribuindo uma idade posterior as rochas extrusivas da Serra Geral, nomeando estes depósitos de Formação Tupanciretã. Porém, investigações sobre a evolução geológica pós-cretácea dessa área são ainda escassas, sendo necessários mais estudos de cunho cronológico, paleobiogeográfico, estratigráfico, estrutural, etc. Estes estudos poderão contribuir para a resolução definitiva de questões geológicas relevantes, como por exemplo, a gênese da ocorrência destes depósitos areníticos (i.e., Formação Tupanciretã) sobre as rochas ígneas da Formação Serra Geral no sul do Brasil. Nesse sentido, uma etapa fundamental é o mapeamento preciso dos depósitos sedimentares aflorantes nessa região, já que a cartografia de referência advém de trabalhos das décadas de 60-70 (p.e., Menegotto et al., 1968) e várias novas informações geológicas da área foram obtidas deste então (p.e., CPRM, 2016) sendo estas últimas inconsistentes espacialmente com o mapeamento vigente. Além disso, a alta disponibilidade de produtos de sensoriamento remoto, sobretudo de dados de elevação e suas derivadas geomorfométricas, podem contribuir para o aprimoramento do mapa geológico do Rio Grande do Sul, no que diz respeito à distribuição espacial da Formação Tupanciretã. Portanto, este trabalho tem por objetivo obter a assinatura geomorfométrica da Formação Tupanciretã e avaliar o potencial de discriminação desses produtos entre depósitos sedimentares e rochas ígneas referentes à Formação Serra Geral (i.e., fácies Caxias, Gramado e Parapanema).

2. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no sul do Brasil, na porção meridional extrema da Bacia intracratônica do Paraná, onde são aflorantes as rochas ígneas da Formação Serra Geral e os depósitos sedimentares da Formação Tupanciretã (Figura 1).

A Formação Serra Geral corresponde a derrames vulcânicos que cobrem praticamente toda a região sul do Brasil, as áreas oriental do Paraguai e ocidental do Uruguai (i.e., Formação Arapey), e área norte da Argentina (i.e., Membro Posadas da Formação Curuzú Cuatiá). Além disso, as idades das rochas vulcânicas na porção sul da Bacia do Paraná situam-se entre $131,4 \pm 1,6$ e $132,9$ Ma enquanto que as das regiões norte e central entre $129,9 \pm 0,1$ Ma e $131,9 \pm 0,9$ Ma. A Formação Serra Geral compreende basaltos toleíticos, andesitos toleíticos e riolitos-riolitos. De modo geral, a observação macroscópica das rochas vulcânicas dessa

Formação permite individualizar três tipos petrográficos principais, facilmente reconhecíveis. O primeiro deles, majoritário, corresponde aos basaltos, que possuem textura intergranular e suas variações (p.e., intersertal, hialofítica). Os outros dois tipos petrográficos são representados por rochas de natureza ácida. Essas são caracterizadas em parte pela coloração cinza clara, por vezes vermelho-acastanhada, natureza afírica, textura hipo a holohialina, e outra parte são porfíricas, com cerca de 24% de fenocristais de plagioclásio com até 2 cm de comprimento, imersos em matriz afanítica de coloração cinza clara quando fresca e acastanhada quando alterada.

Os depósitos sedimentares da Formação Tupanciretã recobrem as rochas extrusivas da Formação Serra Geral, ocorrendo de maneira isolada, sempre em suaves elevações. Suas exposições ocorrem principalmente próximas a cidade de Tupanciretã, e, secundariamente, próximas as cidades de Palmeira das Missões, leste de Passo Fundo, oeste de Santiago e sul de Júlio de Castilhos. Com até 60 metros de espessura, esta formação possui conglomerados na região basal, sobrepostos por arenitos intercalados por camadas de argilitos. Conforme Menegotto et al. (1968), o conglomerado é composto por clastos angulares a sub-arredondados de rocha basáltica, geralmente amigdaloidal, quartzo e calcedônia. A matriz consiste de areia média de cor cinza-esverdeada ou rosa-avermelhada, localmente ocorre matriz argilosa. Estratificação é visível onde o conglomerado se interdigita com cunhas de arenito. Na base da unidade, ocorre conglomerado e em direção ao topo passa a ser arenito conglomerático, acompanhado por uma gradual diminuição no tamanho dos clastos. Segundo Menegotto et al. (1968), a Formação Tupanciretã, pós-Jurássica, se depositou num ambiente lacustre com possíveis áreas fluviais, com áreas fontes da Serra Geral. Interpretação mais recente conclui que os conglomerados possuem gênese relacionada a leques aluviais. Arenitos fluviais foram encontrados no sul e arenitos eólicos foram encontrados no norte da área de estudo por Nowatzki et al. (1999).

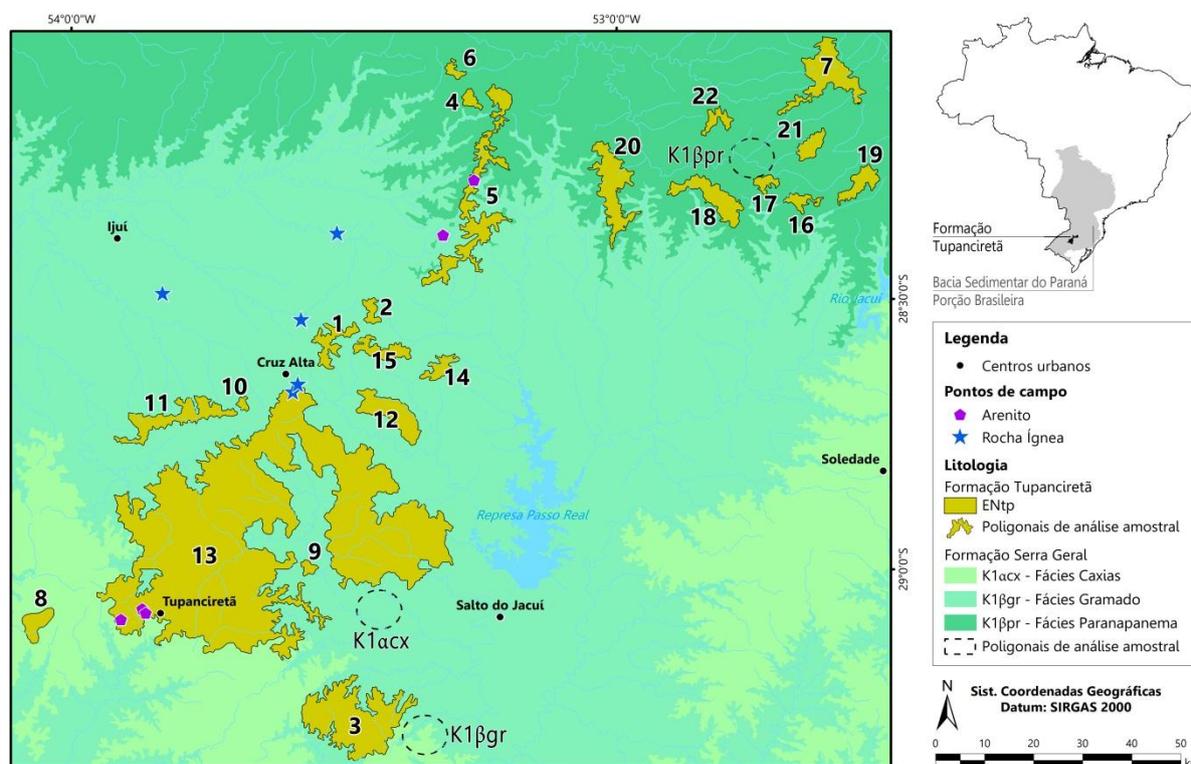


Figura 1. Localização da área de estudo e distribuição das unidades geológicas. A numeração em vermelho indica as manchas de depósitos sedimentares da Formação Tupanciretã sobre as unidades da Formação Serra Geral. Adaptado de CPRM (2006).

3. Material e Métodos

Os dados de sensoriamento remoto utilizados no presente trabalho incluíram: (i) duas cenas de modelo digital de elevação (MDE) do projeto Topodata (Valeriano e Rossetti, 2012), que foi produzido por interpolação dos dados SRTM v.1 de 3 arcos-segundo (~ 90 m) para a resolução de 1 arco-segundo (~ 30 m) (acesso em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata>); e (ii) duas cenas das variáveis geomorfométricas locais de declividade e orientação de vertentes derivadas do projeto Topodata. Todos esses dados foram integrados em banco de dados georreferenciado e executados em Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Para a discriminação de feições geológicas na área de estudo foram necessárias inicialmente a execução de etapas de pré-processamento sobre os MDEs e variáveis geomorfométricas, a partir da criação de mosaico das cenas. A etapa posterior foi utilizar os MDEs e a declividade como base para extrair índices e variáveis geomorfométricas. Dentre os produtos com potencial de discriminação de feições geológicas em superfície foram testados: a altura, amplitude, predominância topográfica, rugosidade superficial, anomalia de relevo, índice elevação-relevo, e índice de superfície (*surface index* - SI), cujas equações estão resumidas na Tabela 1. Esses produtos foram calculados utilizando como base operações de vizinhança (janelas móveis) circulares com raio de 15 *pixels*. Esse limiar foi definido de acordo com investigações prévias em variograma, considerando à distância média de dependência espacial entre os dados topográficos. Porém, no caso da rugosidade superficial e anomalia de relevo também foram testadas janelas móveis com raios de 3 (A) e 30 (B) *pixels*, respectivamente.

Tabela 1. Resumo de variáveis geomorfométricas e índices extraídos dos dados SRTM, incluindo suas equações e referências consultadas.

| Produto | Equação | Referência |
|--------------------------------|---|------------------------|
| Altura (m): | $Z_n - Z_{n_{\min}}$ | Muñoz (2009) |
| Amplitude (m): | $Z_{n_{\max}} - Z_{n_{\min}}$ | |
| Predominância topográfica (m): | $Z_n - (Z_{n_{\max}} + Z_{n_{\min}} / 2)$ | |
| Rugosidade superficial: | $\frac{Res \sqrt{Res^2 + [Res \times \tan(a)]^2}}{Res^2}$ | Grohmann et al. (2007) |
| Anomalia de relevo: | $Z_n / Z_{n_{\max}} - Z_{n_{\min}}$ | Scotti et al. (2014) |
| Índice elevação-relevo: | $Z_{n_{\text{med}}} - Z_{n_{\min}} / Z_{n_{\max}} - Z_{n_{\min}}$ | Pike e Wilson (1971) |
| Índice de superfície (SI): | $(N_{zn} \times N_{hi}) - N_{sr}$ | Andreani et al. (2014) |

Z_n = Elevação; $Z_{n_{\max}}$ = elevação máxima; $Z_{n_{\min}}$ = elevação mínima; $Z_{n_{\text{med}}}$ = elevação média; Res = resolução espacial do MDE; a = declividade do *pixel*; N_{zn} = elevação normalizada; N_{hi} = integral hipsométrica normalizada; N_{sr} = rugosidade normalizada.

Além dos produtos listados anteriormente, também foi testado o potencial de aplicação do índice TRI (*Topographic Ruggedness Index*) (Riley et al., 1999) e da variável geomorfométrica não local coerência topográfica (Valeriano e Rossetti, 2011). Esse produto foi gerado com base na orientação de vertentes. Como etapa de pré-processamento, foi feita a conversão da orientação de vertentes em graus para radianos. Em seguida, foi realizada a decomposição da orientação de vertentes em senos e cossenos, bem como, a integração dessas componentes por janela móvel (média) e cálculo da componente resultante para uma determinada área de *pixels*. Testes preliminares sugeriram que o produto com maior potencial para discriminar as feições geológicas no caso da área de estudo foi aquele gerado por janela móvel com raio de 7 *pixels*. O aumento de janelas móveis a partir desse limiar promoveu apenas

a generalização da informação topográfica. Em posse das variáveis geomorfométricas, estas foram comparadas por gráficos *box-plot* para cada poligonal geológica de referência

4. Resultados e Discussão

A partir dos dados de elevação foi possível obter produtos para 12 variáveis geomorfométricas (i.e., altura, amplitude, coerência topográfica, declividade, índice elevação-relevo, predominância topográfica, anomalia do terreno a-b, rugosidade a-b, índices SI e TRI) e caracterizar quantitativamente o terreno relativo à ocorrência superficial da Formação Tupanciretã (ENtp) (Figuras 2 e 3). Os resultados foram obtidos e expressos para 22 manchas de cobertura sedimentar com base no mapa geológico (i.e., poligonais sobre a classe ENtp) (Figura 1) discriminadas em três conjuntos distintos de acordo com a disposição em adjacência da Formação Serra Geral (K1): (i) poligonais adjacentes à unidade Paranapanema (K1 β pr) – P4, P5, P6, P7, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22; (ii) poligonais adjacentes à unidade Gramado (K1 β gr) – P1, P2, P9, P10, P11, P12, P14, P15; e (iii) poligonais adjacentes à unidade Caxias (K1 α cx) – P3, P8, P13; além de um conjunto relativo à ocorrência superficial das rochas extrusivas (i.e., poligonais sobre a classe K1).

A maior parte das variáveis geomorfométricas revelou um padrão quantitativo das formas de terreno bastante semelhante entre as manchas de cobertura sedimentar da Formação Tupanciretã, sendo possível destacar os baixos valores de declividade (~Mediana= 9,5°), os moderados valores de predominância topográfica (~Mediana=24) e os baixos valores de rugosidade superficial (~Mediana=1.004) (Figuras 2 e 3). Apesar deste padrão, é possível observar que algumas variáveis apresentam um grau de dissemelhança entre manchas sedimentares reveladas, sobretudo pela altura, amplitude, índice elevação-relevo, e índices SI e TRI (Figuras 2 e 3). Esta variabilidade é mais destacada nas ocorrências de Formação Tupanciretã adjacentes à unidade Gramado da Formação Serra Geral, onde, por exemplo, os valores medianos do índice elevação-relevo variam de 0,48 a 0,56; nas ocorrências adjacentes à unidade Paranapanema, são mais altos e variam de 0,52 a 0,56. Este pode ser um indicador de que, apesar da alta semelhança entre as características geomorfométricas do terreno nas diferentes manchas da Formação Tupanciretã, estas estão apresentando diferentes graus de dissecação no momento atual, sendo que as ocorrências adjacentes à unidade Caxias são aquelas que revelam um estágio de dissecação mais avançado, já que os valores de índice elevação-relevo são os mais baixos entre as poligonais amostrais (Medianas= 0,46 a 0,51) e, de modo geral, quanto mais baixos os valores de índice elevação-relevo, mais avançado é o processo de denudação (p.e., Pike e Wilson, 1971). Interpretação similar pode ser atribuída aos baixos valores encontrados no índice SI, TRI, altura, amplitude, coerência topográfica e predominância nas manchas adjacentes à unidade Caxias em relação às outras unidades da Formação Serra Geral, conforme ilustra as Figuras 2 e 3.

Considerando um paralelo geral das características geomorfométricas entre a Formação Tupanciretã e Formação Serra Geral observa-se que parte das variáveis não revelaram diferenças expressivas (i.e., coerência topográfica, índice elevação-relevo, anomalias de relevo e rugosidades). No entanto, é possível apontar que as variáveis altura, amplitude e os índices SI e TRI apresentaram contrastes importantes, sobretudo revelado pelos mais altos valores obtidos nestes índices pelas unidades da Formação Serra Geral em relação a cobertura sedimentar da Formação Tupanciretã, com destaque para a unidade Gramado, que apresenta uma variabilidade maior entre as unidades da Formação Serra Geral. Portanto, a própria variabilidade entre as formas de terreno nas diferentes unidades da Formação Serra Geral é uma condição que aponta para uma distinta capacidade de discriminação entre a Formação Tupanciretã e a Formação Serra Geral associada à posição geográfica da ocorrência da cobertura sedimentar adjacente/sobre umas das três unidades da Formação Serra Geral (i.e., K1 β pr, K1 β gr e K1 α cx).

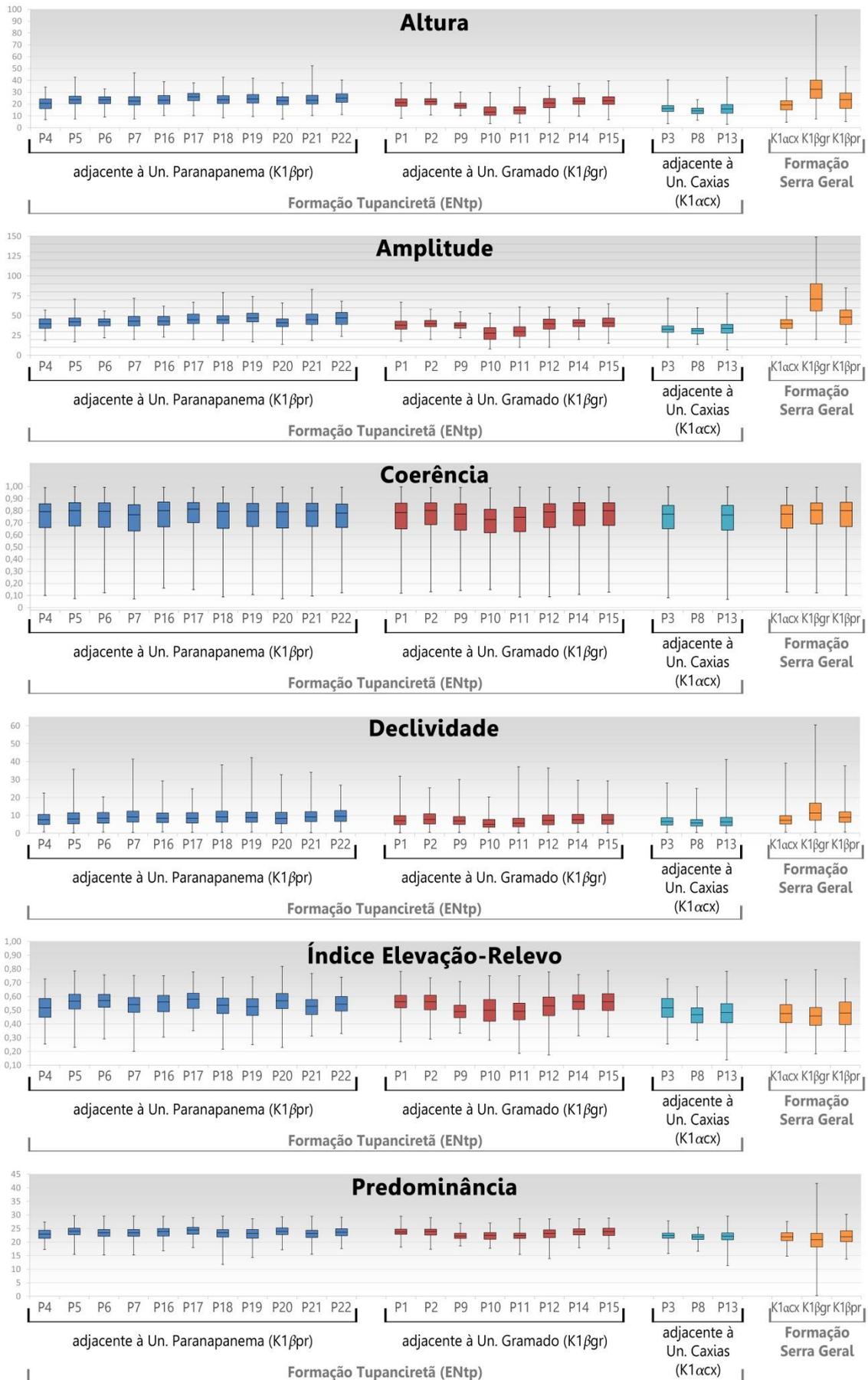


Figura 2. Variáveis geomorfométricas aplicadas à Fm. Tupanciretã e Fm. Serra Geral.

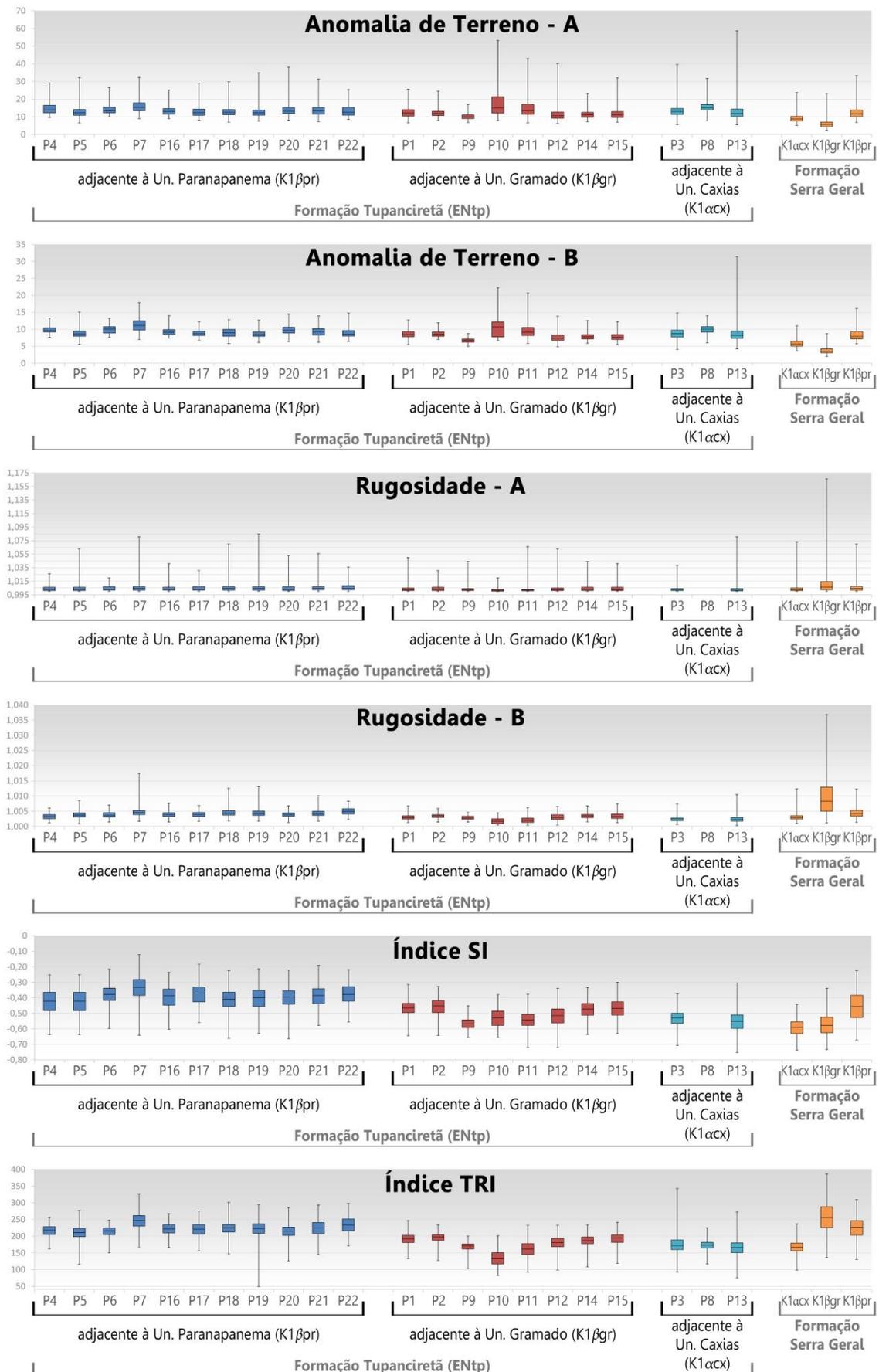


Figura 3. Variáveis geomorfométricas aplicadas à Fm. Tupanciretã e Fm. Serra Geral.

5. Conclusão

A extração das variáveis geomorfológicas relativas à altura, amplitude, coerência, declividade, índice elevação-relevo, predominância, anomalia do terreno, rugosidade, índices SI e TRI foi bem sucedida pela aplicação de algoritmos sobre o MDE interferométrico SRTM.

Foi possível evidenciar que as características geomorfológicas das diferentes áreas de ocorrência da Formação Tupanciretã são semelhantes, marcadas por baixas variações altimétricas e baixa dissecação. No entanto, as variáveis altura, amplitude, índice elevação-relevo, e índices SI e TRI indicaram sensíveis contrastes no relevo entre as diferentes ocorrências sedimentares, tendo possível associação destas com as diferentes unidades da Formação Serra Geral espacialmente adjacentes.

As variáveis geomorfológicas altura, amplitude e índices SI e TRI revelaram maior potencial de distinção espacial entre a Formação Tupanciretã e Formação Serra Geral. No entanto, são necessários esforços futuros na aquisição de grande número de dados geológicos de campo, amplamente distribuídos, para que o mapeamento das unidades geológicas em superfície seja realizado de forma precisa, com base na geomorfometria e validação em campo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão das bolsas de doutorado à segunda autora e ao terceiro autor.

Referências Bibliográficas

- Andrades Filho, C. O.; Rossetti, D. F.; Bezerra, F. H. R.; Medeiros, W. E.; Valeriano, M. M.; Cremon, E. H.; Oliveira, R. G. Mapping Neogene and Quaternary sedimentary deposits in northeastern Brazil by integrating geophysics, remote sensing and geological field data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 56, p. 316-327, 2014.
- Andreani, L.; Stanek, K.P.; Gloaguen, R.; Krentz, O.; Domínguez-González, L. DEM-Based Analysis of Interactions between Tectonics and Landscapes in the Ore Mountains and Eger Rift (East Germany and NW Czech Republic). **Remote Sensing**, v. 6, n. 9, p. 7971-8001, 2014.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Geobank**. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 02 nov 2016.
- Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil (CPRM). BRASIL. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2006. Mapas. Escala 1: 750. 000.
- Grohmann, C. H.; Riccomini, C.; Alves, F. M. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 1, p. 10-19, 2007.
- Menegotto, Egydio; Sartori, Pedro Luiz; Maciel Filho, C. L. Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul. **Boletim do Instituto de Solos e Culturas**, UFSM, v. 1, p. 1-19, 1968.
- Milani, E. J.; Gonçalves de Melo, J. H.; Souza, P. A.; Fernandes, L. A.; França, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n. 2, p. 265-287. 2007
- Muñoz, A.; Valeriano, M. M. Modelagem da dissecação por geoprocessamento para delineamento de manchas de solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14 (SBSR), 2009, Natal, Brasil. **Anais...** p. 7741-7748.
- Nowatzki, C. H.; Dutra, T. L.; Fleck, A. Novas observações sobre a Formação Tupanciretã. **Acta Geologica Leopoldensia**, v. 23, n. 48, p. 39-52, 1999.
- Pike, R. J. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1, p. 1-20, 2000.
- Pike, R.J.; Wilson, S.E. Elevation relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Geological Society of America Bulletin**, v. 82, p. 1079-1084, 1971.
- Scotti, V.; Molin, P.; Faccenna, C.; Soligo, M.; Casas-Sainz, A. The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian Chain (Spain): quantitative geomorphological analysis and geochronology. **Geomorphology**, v. 206, p. 37-57, 2014.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012.
- Valeriano, M.M.; Rossetti, D.F. Análise digital do padrão de coerência da orientação de vertentes em terrenos planos. In: Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 13. (ABEQUA), 2011, Búzios. **Anais...** São Paulo: ABEQUA, 2011. p. 1-5.