

Análise morfoestrutural da sub-bacia do rio Alto Paraguai – MT a partir de dados de sensoriamento remoto

Jaqueline Alcântara dos Santos¹
Arnaldo de Queiroz da Silva¹
Jefferson Jesus de Souza¹

¹Universidade Federal do Pará – UFPA
Caixa Postal 479 – 3201-7000 - Belém - PA, Brasil
jk_alcantara@hotmail.com / arnaldoq@ufpa.br / jeff_0110@hotmail.com

Abstract. The identification and quantification of drainage networks are fundamental to understanding the geomorphological processes governing the changes of relief in the most distinct climatic and geological conditions. The use of remote sensing tools can improve large range of qualitative and quantitative ground investigations, due to the possibility of imperceptible field structure detection. This paper aimed to apply qualitative and quantitative analysis of drainage and relief elements to identify patterns of tectonic deformation present on both Cenozoic sedimentary and crystalline basement rocks of the Alto Paraguai River region (State of Mato Grosso/Brazil). Digital Elevation Model (DEM) from SRTM and TOPODATA data were evaluated for automatic extraction of drainage and relief lineaments. The results revealed that both drainage and lineaments automatically extracted from SRTM-DEM had good response with the drainage obtained from image LANDSAT and also to tectonic structures mapped in the studied area. This result was not achieved with the TOPODATA data. Quantitative analysis based on morphometric parameters (Asymmetry Factor Basin - AFB, Transverse Topographic Symmetry Factor - FSTT and Relationship Slope Factor-Extension - RDE) associated with the drainage network qualitative analysis (based on photointerpretation by systematic analysis of textural elements), revealed an effective structural regional control in the existing forms of drainage.

Palavras-chave: remote sensing, watershed, morphometric index, qualitative analysis of drainage, sensoriamento remoto, bacias hidrográficas, índices morfométricos, análise qualitativa da drenagem.

1. Introdução

O reconhecimento, a localização e a quantificação das drenagens são de fundamental importância para o entendimento dos processos geomorfológicos que governam as transformações do relevo sob as mais diversas condições climáticas e geológicas (Guerra e Cunha, 2001). Nesse sentido, a utilização das informações espaciais extraídas do traçado e da forma das drenagens possibilita a análise qualitativa (fotointerpretação por análise sistemática de elementos texturais) e quantitativa (índices morfométricos) de grande aplicação na análise morfoestrutural de bacias hidrográficas (p.e., Salamuni et al., 2004; Etchebehere et al., 2006; Guedes et al., 2006; Couto, 2011).

Este artigo apresenta os resultados da análise qualitativa e quantitativa dos elementos de drenagem e relevo extraídos de produtos de sensoriamento remoto, visando identificar e analisar padrões de deformação tectônica na evolução das drenagens em depósitos sedimentares cenozoicos e em terrenos do embasamento cristalino da porção sul da Faixa Paraguai.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada na porção centro-oeste da bacia hidrográfica do rio Alto Paraguai, na porção sudoeste do estado do Mato Grosso - Brasil, entre as coordenadas geográficas 15°31'55" e 16°24'41" de latitude sul e, 57°18'40" e 58°07'33" de longitude oeste (Datum WGS 84). Foram estudadas mais precisamente as sub-bacias hidrográficas do rio Padre Ignácio e um trecho do rio Paraguai próximo a cidade de Cáceres (Figura 1).

A área de estudo está contida na Província Tocantins a qual é recoberta a norte e a sul por sedimentos fanerozoicos das Bacias do Parnaíba e Paraná, respectivamente; a oeste faz limite com o Cráton Amazonas e a leste com o Cráton São Francisco. Possui direção

predominantemente norte-sul, tendo aproximadamente 2.000 km de comprimento e até 800 km de largura (Pimentel e Fuck, 1992). A porção leste estudada está contida em rochas do embasamento da Faixa de Dobramento Paraguai, de idade Neoproterozoica (Almeida e Hasui, 1984) e, a porção oeste está contida no Domínio dos Sedimentos Cenozoicos Inconsolidados ou pouco consolidados depositados em meio aquoso (Moraes et al., 2010). A Faixa de Dobramento Paraguai engloba duas áreas com padrão estrutural e metamórfico distintos: na porção externa estão os metamorfitos do Grupo Cuiabá e internamente os sedimentos não metamórficos dos grupos Corumbá, Araras e Alto Paraguai (Alvarenga, 1985).

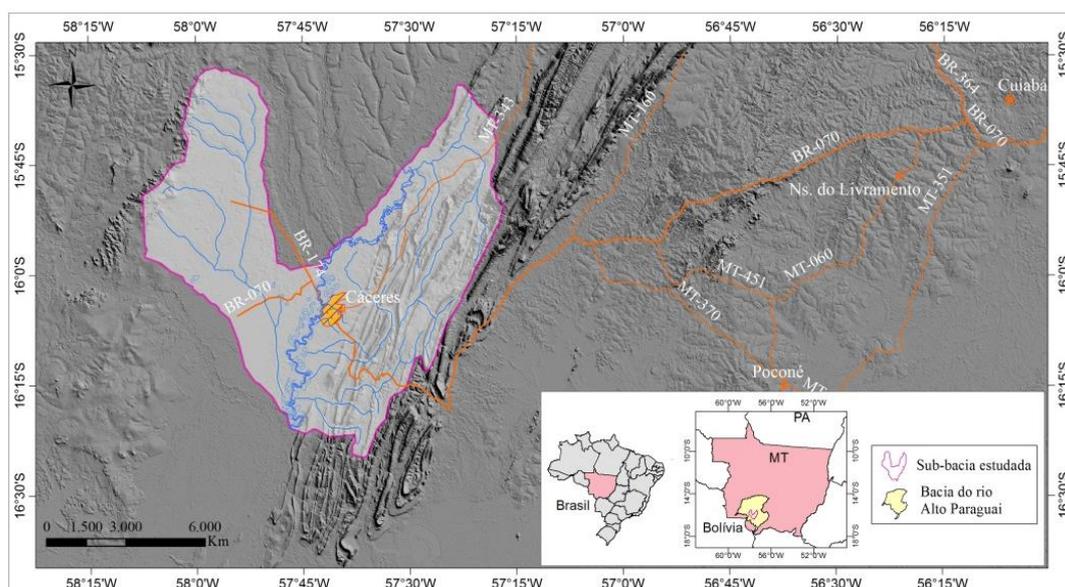


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo (Relevo Sombreado – MDE/SRTM).

2. Metodologia de Trabalho

Os dados utilizados nesta pesquisa inclui o modelo digital de elevação – MDE produzido pela missão SRTM com resolução espacial de 90 m (<<http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1>>); dados TOPODATA (Valeriano, 2005) que correspondem aos dados MDE/SRTM interpolados para resolução espacial de 30 m (<<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>); cenas LANDSAT 7 ETM⁺ (órbita: 227; ponto: 071) coletada em 17/07/2002 (<<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>) e dados vetoriais em formato *shapefile* de bacias e sub-bacias hidrográficas do Brasil (<<http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual/solicitacaoBaseDados.asp>>).

O *software* ArcGis v.10 foi utilizado para organização de um SIG (Sistema de Informações Geográficas) no sistema de projeção cartográfica UTM, datum horizontal WGS 1984, zona 21 sul. O *software* PCI/Geomatic v.12 foi empregado para extração automática de lineamentos estruturais a partir de imagens de relevo sombreado (com fonte de iluminação nas direções azimutais de 110° Az e 290° Az e, elevação solar de 45°) derivados dos MDEs, utilizando o algoritmo LINE. O algoritmo LINE é controlado por parâmetros globais cujos valores são pré-definidos ou alterados pelo usuário (PCI/Geomatica, 2012). Os valores desses parâmetros utilizados constam na tabela 1. A avaliação da qualidade dos lineamentos extraídos automaticamente foi realizada visualmente tendo como referência o mapa de lineamentos de relevo de Alencar (2011). A rede de drenagem foi extraída automaticamente a partir de MDEs SRTM e TOPODATA com o emprego do aplicativo *Generation Watershed* do *software* Global Mapper v.14 e a validação da mesma foi realizada visualmente a partir do posicionamento da drenagem sobre imagens LANDSAT (Geocover) em falsa cor (R-5, G-4, B-3) (Figura 3).

Tabela 1. Valores utilizados para os parâmetros de entrada do algoritmo LINE implementado no módulo Focus/PCI Geomatica v12.0 (Fonte: Adaptado de Conceição e Silva, 2013).

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Filter Radius (Pixel) (FR)	15	Line Fitting Error Threshold (LFET)	5
Edge Gradient Threshold (EGT)	60	Angular Difference Threshold (ADT)	15
Curve Length Threshold (CLT)	10	Linking Distance Threshold (LDT)	30

A análise qualitativa dos elementos de drenagem e relevo foi feita segundo a método lógico-sistemática proposto por Soares e Fiori (1976) enquanto na análise quantitativa foi empregado os seguintes parâmetros morfométricos: Índice de Relação Declividade-Extensão (RDE), Fator de Assimetria da Bacia (Af) e Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT). A análise do Fator de Assimetria de Bacias (Af) indica o caimento do terreno e geralmente relaciona-se à existência de blocos basculados, pois reflete o deslocamento lateral do seu rio principal (Cox, 1994). A migração do rio pode ser resposta a processos fluviais internos e/ou de forças deformacionais tectônicas (Andrades Filho, 2010; Couto, 2011; IBGE, 2009). Este parâmetro é calculado fazendo a razão entre a medida da área da porção direita da bacia (olhando para jusante) (A_r) e a medida da área total da bacia (A_t) (Figura 2A) (Salamuni et al., 2004). A partir desse parâmetro, estima-se a Intensidade de Assimetria de uma bacia calculada da relação $|FAB-50|$. Valores nos intervalos $0 < |FAB-50| \leq 7$, $7 < |FAB-50| \leq 15$ e $|FAB-50| > 15$, indicam intensidade baixa, média e alta, respectivamente (Cox, 1994).

O Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) reflete a migração preferencial do canal, onde o perfil topográfico que não apresenta alteração no valor de T será próximo de zero e à medida que os valores de T se aproximam de 1 a assimetria do canal aumenta (Salamuni et al., 2004; Couto, 2011). Sendo calculado pela razão entre a medida da distância da linha média do eixo da bacia até a linha média do cinturão do meandro ativo (D_a) e a medida da distância da linha média da bacia ao divisor da mesma (D_d) (Hare e Gardner, 1985) (Figura 2B).

A utilização do fator de Relação Declividade Extensão (RDE) permite detectar, no perfil longitudinal de um rio, alterações no seu curso, pois relaciona a declividade do canal com a extensão do respectivo trecho (Martinez, 2004). É calculado pela razão da medida da diferença altimétrica entre dois pontos extremos de um segmento ao longo do curso d'água (Δh) e a medida da projeção horizontal da extensão do referido segmento (Δl) multiplicado pela medida do comprimento total do curso d'água a montante do ponto (L) (Figura 2C).

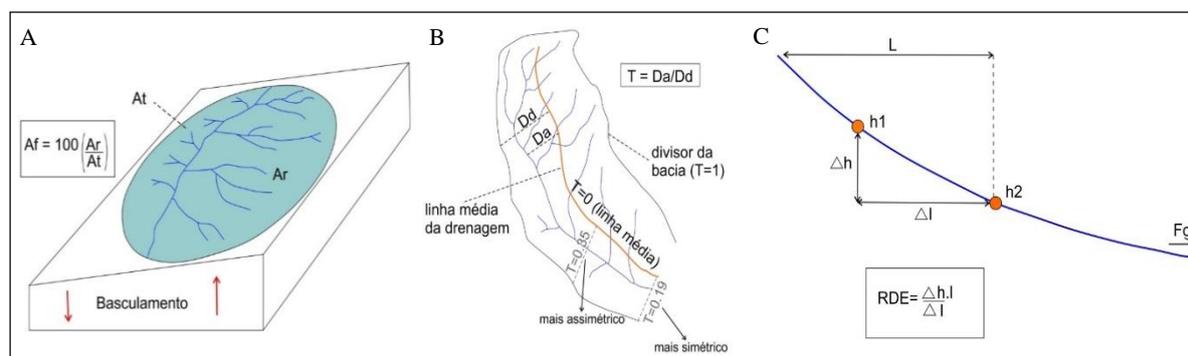


Figura 2. Parâmetros morfométricos (A) Fator de Assimetria da Bacia (Af); (B) Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT) e; (C) Fator de Relação Declividade-Extensão (RDE) (Fonte: Adaptado de Salamuni et al., 2004 e Etchebehere et al., 2006).

Foram utilizados como dados complementares o mapa de Geodiversidade do Estado do Mato Grosso (CPRM, 2010), em escala 1:1.000.000 e, o mapa litoestrutural e de lineamentos de relevo digitalizado de Alencar (2011), na escala de 1:250.000.

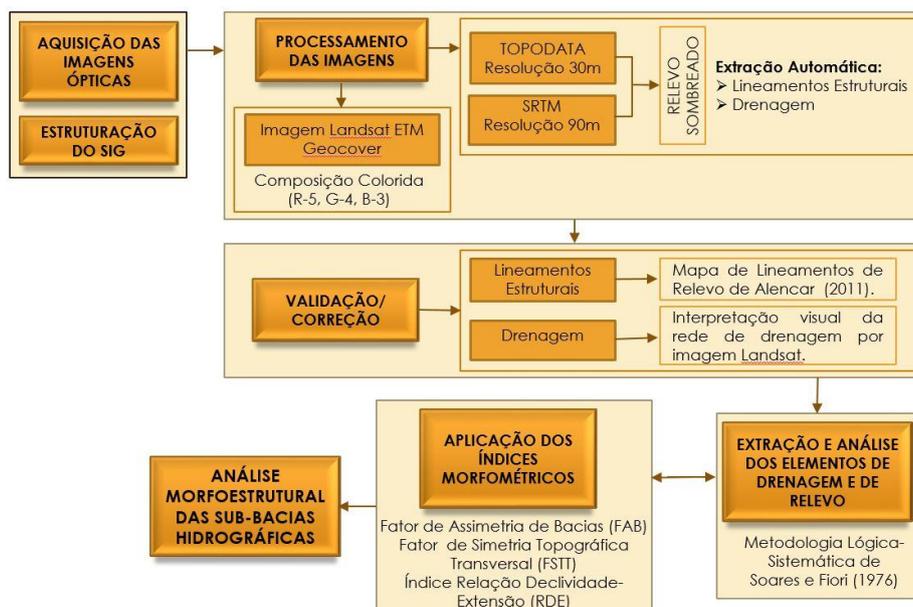


Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas neste estudo.

3. Resultados e Discussão

3.1 Análise da rede de drenagem

A rede de drenagem extraída dos dados TOPODATA não foi satisfatória devido à excessiva geração de segmentos descontínuos (Figura 4-A) que normalmente não coincidem com o traçado da drenagem observado na conformação do relevo. Por outro lado, a extração automática da drenagem a partir de dados SRTM foi satisfatória (Figura 4-B), pois cerca de 95% dos vetores gerados coincidem com drenagens observadas nas imagens LANDSAT. Somente nas áreas mais planas onde ocorrem meandros abandonados (parte central da área) a vetorização das feições de drenagem não foi eficiente. Neste caso utilizou-se imagens LANDSAT para complementar a rede de drenagem através da vetorização manual.

Analisando-se o arranjo espacial dos elementos texturais da drenagem, de acordo com os critérios do método lógico-sistemático (Soares e Fiori, 1976), foram definidas três zonas homólogas (ZH) (Figura 5). A Zona Homóloga I apresenta padrão da rede de drenagem do tipo subdendrítico com densidade média, sinuosidade mista, angularidade baixa, tropia tridirecional, fortemente assimétrica com ocorrências de formas anômalas em arco; a Zona Homóloga II apresenta padrão do tipo meandrante com densidade média, sinuosidade curva, angularidade média, tropia tridirecional, moderadamente assimétrica com a presença de formas anômalas de meandros abandonados e; a Zona Homóloga III apresenta padrão da rede de drenagem do tipo subtreliça com densidade média, sinuosidade retilínea, angularidade média a alta, tropia bidirecional, fortemente assimétrica. Nesta zona, formas anômalas em cotovelo foram identificadas.

O padrão subdendrítico normalmente desenvolve-se em substrato rochoso homogêneo, como pode ser observado na ZH I em que o substrato compreende os sedimentos não consolidados das coberturas cenozoicas (Figuras 5). O padrão meandrante apresenta canal principal sinuoso, barras em pontal formadas na parte côncava do canal e feições erosivas nas partes convexas, com inúmeros meandros abandonados. Neste tipo de sistema o transporte de sedimento é principalmente por suspensão devido se desenvolver em regiões de gradiente moderadamente baixo (IBGE, 2009). O padrão subtreliça apresenta os tributários alongados e em ângulo reto em relação ao canal principal. Este padrão é associado a formas de relevo alongadas e paralelas, característico de estratos dobrados ou basculados e pode estar relacionado a áreas de fraturas paralelas, além de sugerir materiais de diferentes resistências à

erosão aflorando paralelamente entre si com predominância do mais resistente (IBGE, 2009). O padrão subreliça observada na ZH III é condicionado pelo dobramento do conjunto litológico da Faixa Araguaia (Figuras 5). As formas anômalas dos canais de drenagem ocorrentes são em arco e cotovelo, as quais caracterizam mudanças bruscas do padrão do canal, estreitamento e/ou desvio provocado por movimentos tectônicos tardios (Soares e Fiori, 1976; IBGE, 2009).

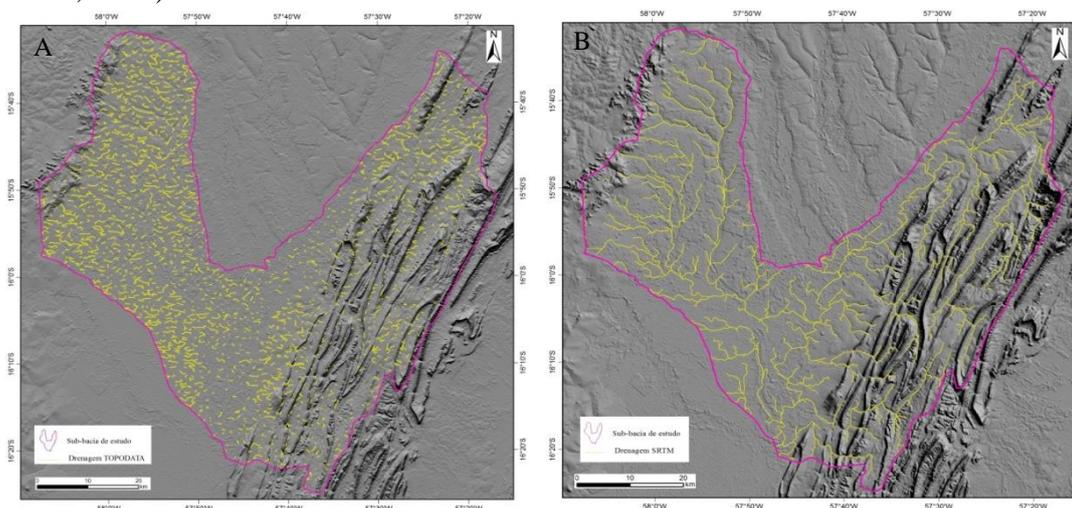


Figura 4. Rede de drenagem gerada automaticamente a partir do Modelo Digital de Elevação: (A) dos dados TOPODATA (30 m) e; (B) dos dados SRTM (90 m).

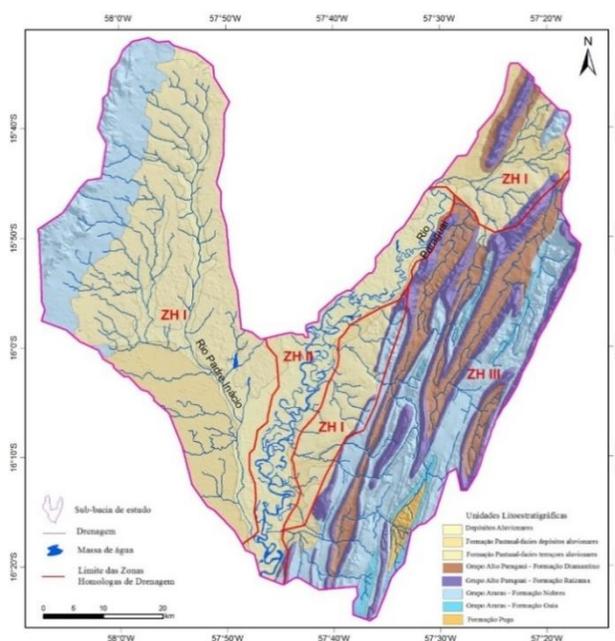


Figura 5. Mapa das unidades geológicas ocorrentes na área de estudo e as zonas homólogas da rede de drenagem (Fonte: Adaptado de Alencar, 2011 e Moraes et al., 2010).

3.2 Análise morfoestrutural dos lineamentos

A extração automática dos lineamentos de relevo extraídos do MDEs TOPODATA, nas duas direções de iluminação, não foi satisfatória devido à excessiva extração de linhas que em sua maioria não coincidem com as principais estruturas do relevo, como quebras positivas e negativas. Quanto ao MDE/SRTM, as imagens de relevo sombreado com fonte de iluminação a 110°Az realçou as feições lineares como as quebras positivas, enquanto na imagem com fonte de iluminação a 290°Az as feições lineares associadas às quebras negativas e as cristas

de serras foram mais realçadas. O resultado da extração automática foi analisado por inspeção visual onde foi verificado a frequência e os acertos no traçado dos lineamentos tendo como referência o mapa de lineamento de relevo de Alencar (2011) (Figura 6).

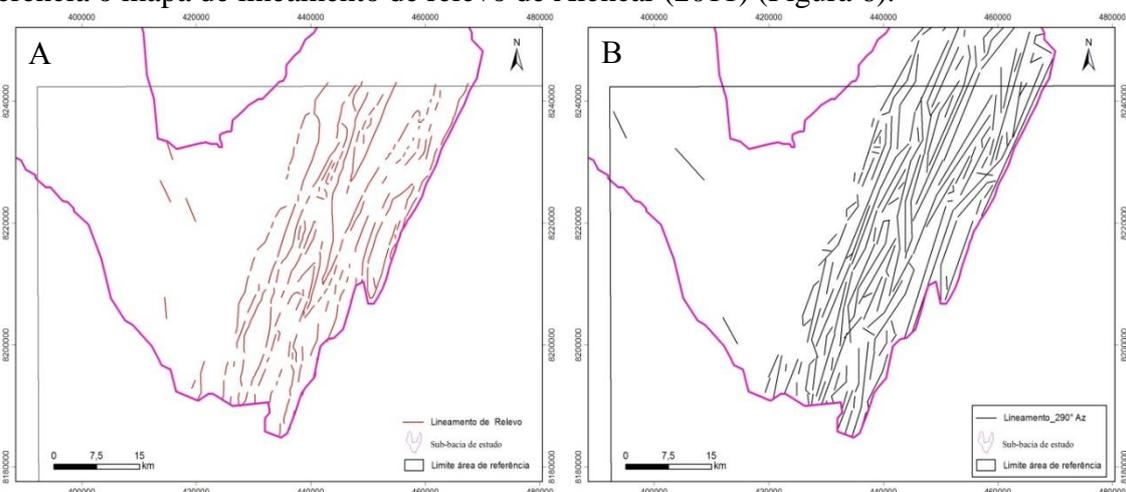


Figura 6. (A) Mapa de lineamentos de relevo (Alencar, 2011) utilizado para comparação e validação dos dados adquiridos pela extração automática; (B) Mapa de lineamentos extraídos automaticamente do MDE/SRTM.

Foi possível distinguir três principais domínios/zonas estruturais a partir dos lineamentos de relevo: o Domínio I apresenta direção preferencial NE-SW e secundariamente NNW-SSE; o Domínio II exibe direção preferencial NW-SE e secundariamente direção quase N-S, porém não é representativo por apresenta poucos dados e; o Domínio III caracteriza-se pela direção preferencial NE-SW, o qual se associa a falhas e dobras com padrão paralelo esculpindo sinformes e antiformes (Alencar, 2011; Moraes et al., 2010) (Figura 7A).

Utilizando a mesma metodologia para a rede de drenagem, foram identificados dois domínios dos lineamentos (Figura 7B), onde as feições lineares identificadas compreendem formas simples ou composta, alinhadas que possivelmente refletem o controle estrutural de subsuperfície. O Domínio I é definido por lineamentos de drenagem mais longos com direção preferencial NW-SE e secundariamente N-S, os quais estão desenvolvidos em sedimentos aluvionares e; o Domínio II exibe lineamentos mais longos na direção NE-SW e mais curtos na direção NW-SE, relacionados à disposição espacial das serras da Faixa Paraguai.

3.3 Análise morfométrica da drenagem

Os valores de Af obtidos para as sub-bacias do rio Paraguai e Padre Ignácio foram de 9,7 e 71,2 nesta ordem, indicando um possível basculamento a leste e a oeste. A Intensidade de Assimetria foi superior a 15 para ambas sub-bacias, classificando-as como de alta assimetria (Figura 8A). Esta análise permite inferir que possivelmente ocorreu na parte central da área de estudo, um setor em processo de subsidência que pode estar condicionado por um sistema de falha na direção quase N-S que controlam a direção das grandes drenagens da região, como pode ser verificado no mapa de lineamentos de drenagem (Figura 7B) e na geologia regional.

Os valores obtidos do índice FSTT para a sub-bacia do trecho do rio Paraguai indicam um possível basculamento forte (média FSTT igual a 0,75) e que possivelmente pode ser associado a um maior controle tectônico e; para a sub-bacia do rio Padre Ignácio o valor médio de 0,51 para o FSTT indica um possível basculamento intermediário (Figura 8B). Nestas sub-bacias ocorrem localmente valores mais elevados do índice FSTT, ou anômalos, que coincidem normalmente com áreas de maior orientação preferencial, quase E-W, da drenagem. Essa orientação possivelmente pode estar relacionada com as direções

preferenciais de fraturas e falhas descritas na geologia regional da área e identificadas nos lineamentos de drenagem do domínio II desta sub-bacia (Figura 7B).

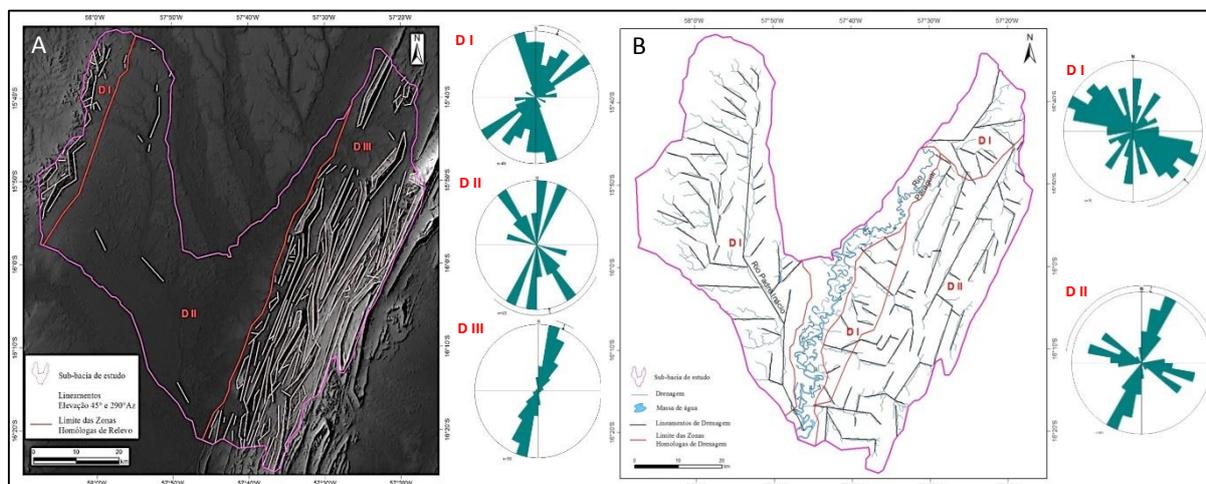


Figura 7. Domínios estruturais e seus respectivos diagramas de roseta, estabelecidos a partir de (A) lineamentos de relevo e; (B) lineamentos da rede de drenagem, obtidos do MDE/SRTM.

De acordo com o Índice de Gradiente RDE cerca de 63,7% dos trechos do rio Padre Ignácio e 50% dos trechos do rio Paraguai apresentam indícios de anomalias e predominantemente ocorrem nos baixos e médios cursos dos rios, respectivamente (Figura 8C). Os trechos considerados como anômalos relacionam-se a possível influência tectônica em sua formação.

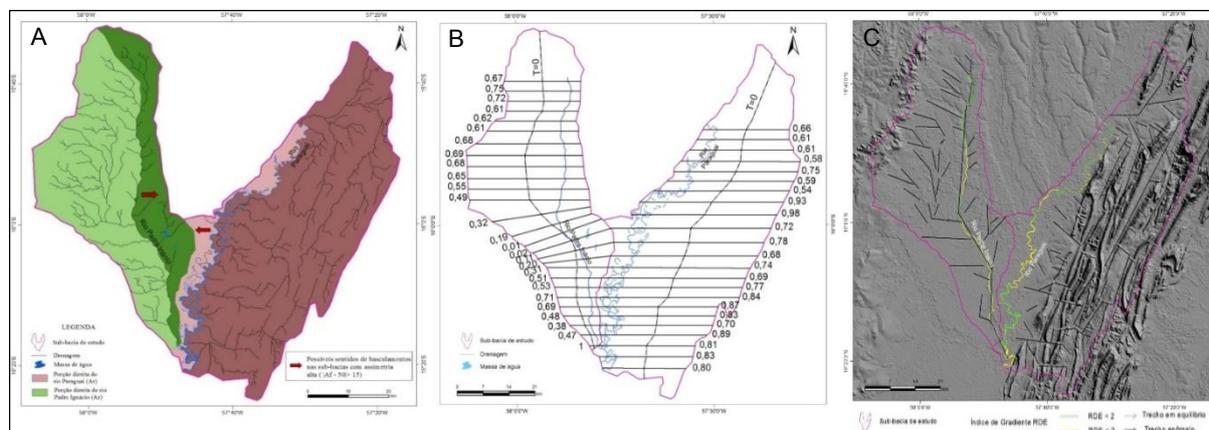


Figura 8. Produto da quantificação dos índices morfométricos: (A) segundo a análise do Índice FAB; (B) análise do Índice FSTT e; (C) representação dos segmentos anômalos (linhas de cores amarelo) e não anômalos (linhas de cor verde) segundo o Índice de Gradiente RDE sobre a imagem do relevo sombreado MDE e aos lineamentos de drenagem.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo, baseados na interpretação de dados extraídos do Modelo Digital de Elevação/SRTM, como a análise dos lineamentos de relevo e drenagem, análise qualitativa dos padrões da rede de drenagem e o cálculo de índices morfométricos, mostram que há forte influência de atividade tectônica no trecho estudado da bacia do rio Alto Paraguai.

Referências Bibliográficas

- Abreu Filho, W.; Borges, F. R.; Abram, M. B. org. 2011. **Projeto Fosfato Brasil – Estado de Mato Grosso: Áreas Arara/Serra do Caeté e Planalto da Serra**. Informe de Recursos Minerais. Goiânia: CPRM. 2011. (Série Insumos Minerais para Agricultura, nº 14).
- Alencar, L. D. C. **Geometria e História Cinemática do Segmento Setentrional da Faixa Paraguai, na Região de Cáceres/MT**. 2011. 94f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém, PA, 2011.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.(Coord.). **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo. Editora Blücher Ltda.1984. p. 265–281.
- Andrades Filho, C. O. **Análise Morfoestrutural da porção central da Bacia Paraíba (PB) a partir de dados MDE-SRTM e ALOS-PALSAR FBD**. 2010, 177 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.
- Conceição, R. A. C.; Silva, A. Q. Extração automática de lineamentos utilizando imagens SRTM, Landsat ETM+ e ALOS PALSAR na região de Nobres, MT. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. Anais XVI SBSR. p. 3688-3695. 2013.
- Couto, E. V. **Influência Morfotectônica e Morfoestrutural na Evolução das Drenagens nas Bordas Planálticas do Alto Ivaí – Rio Alonzo – sul do Brasil**. 2011. 123f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Maringá, 2011.
- Etchebehere, M. L. C.; Saad, A. R.; Santoni, G. C.; Casado, F. C.; Fulfaro, V. J. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. **Revista de Geociências USP**, v. 25, p. 271-289, 2006.
- Guedes, I. C.; Santoni, G. C.; Etchebehere, M, L. C.; Stevaux, J. C.; Morales, N; Saad, A. R. Análise de Perfis Longitudinais de Drenagem da Bacia do Rio Santo Anastácio (SP) para detecção de possíveis Deformações Neotectônicas. **Revista UnG – Geociências** v. 5, n. 1. p. 75-102. 2006.
- Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. ed. 4, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- Hare P.W; Gardner I.W. Geomorphic indicators of vertical neotectonics along converging plate margins. Nicoya Peninsula, Costa Rica. In: Morisawa M.;Hack J.T (Eds.). **Tectonic Geomorphology. Proceedings 15th. Annual Binghamton**, 1985.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2 ed. Rio de Janeiro. 2009. 182 p. – (Manuais técnicos em geociências; n.5).
- Martinez, M. **Aplicação de parâmetros morfométricos de drenagem na bacia do rio Pirapó: o perfil longitudinal**. Maringá, 2004. 146 p. Dissertação (Mestrado em Análise Regional e Ambiental) - Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Maringá.
- Moraes et al. **Geodiversidade do estado do Mato Grosso**. Goiânia: CPRM, 2010 (Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade).
- Nogueira, A.C.R.; Riccomini, C. O Grupo Araras (Neoproterozoico) na parte norte da Faixa Paraguai e sul do Cráton Amazônico, Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 36: 623-640. 2006
- Pimentel, M.M.; Fuck, R.A. Neoproterozoic Crustal Accretion in Central Brazil. **Geology**, 20 (4): p.373-379. 1992.
- Rodrigues, J. B., **Geocronologia e Geoquímica da Sequência Vulcano-sedimentar de Iporá e Rochas Graníticas Associadas**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geologia) nº 108. UnB. Brasília. 1996.
- Salamuni, E.; Ebert, H. D.; Hasui, Y. Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba. 2004. **Revista Brasileira de Geociências**, v.34(4): p. 469-478. 2004.
- Soares, P.C.; Fiori, A.P. **Lógica e sistemática na análise de fotografias aéreas em Geologia**.1976. São Paulo: Notícia Geomorfológica. 1976.
- Valeriano, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005, p. 3595-3602.