

Hipsometria aplicada à evolução do megaleque do Taquari

Hiran Zani ¹

Clódís de Oliveira Andrades Filho ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Divisão de Sensoriamento Remoto
Av. dos Astronautas, 1758 – 12201-970
São José dos Campos, SP, Brasil
{ hzani, clodis } @dsr.inpe.br

Resumo. Este estudo apresenta a aplicação da curva e integral hipsométrica (H_i) como forma de análise e interpretação cronológico/evolutiva dos lobos deposicionais do megaleque do Taquari, no Pantanal brasileiro. A curva e integral hipsométrica são informações capazes de promover a representação quantitativa e gráfica da superfície do terreno, parâmetros que são utilizados como indicadores de diferentes estágios evolutivos do relevo. Como bases destas análises, foram utilizados os dados de elevação obtidos na missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). Estes dados foram processados nos aplicativos ArcGIS e Excel, de forma a obter as informações de curva, integral hipsométrica e altura do relevo para o conjunto de lobos deposicionais que constituem os compartimentos da morfologia de leque estudada. Os resultados indicam que quanto maior a concavidade da curvas hipsométricas e menor o valor de H_i , mais recentes são as morfologias dos lobos deposicionais. Esta relação também foi observada a partir do grau de dissecação da superfície expresso na variável morfométrica de altura do relevo. Neste sentido, conclui-se que as informações hipsométricas apresentam relação com a cronologia da sedimentação dos lobos deposicionais, confirmando a validade do modelo evolutivo atualmente sugerido para o megaleque do Taquari.

Palavras-chave: integral hipsométrica, curva hipsométrica, modelo digital de elevação, geomorfometria, megaleque, Quaternário.

Abstract: This study presents the application of the curve and hypsometric integral (Hi) as an instrument to analyze and interpret the chronology and evolution of the depositional lobes on Taquari megafan (Pantanal, Brazil). The curve and integral hypsometric are able to represent the relief in a quantitative and graphical way, parameters that are used as indicators of different geomorphological evolutionary stages. The elevation dataset was obtained from the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), processed in ArcGIS and Excel software, in order to obtain the curve and the quantitative parameters to describe each depositional lobe. The next step was the extraction of relief height, to assist the hypsometry analysis and to compare with lobes age. The results suggest that the greater the concavity of the hypsometric curves and the lower the value of Hi, the younger are the morphologies of depositional lobes. This relationship was also observed from the dissection degree of the surface, expressed by the relief height morphometric variable. We conclude that the hypsometric information is closely related with the relative chronology age of the depositional lobes, confirming the validity of the current evolutionary model adopted for Taquari megafan.

Key-words: hypsometric integral, hypsometric curve, digital elevation model, geomorphometry, megafan, Quaternary

1. Introdução

A geomorfologia do Pantanal é caracterizada pela ocorrência de sistemas deposicionais do tipo megaleque, com dimensões que variam de 1.000 a 50.000 km² (Assine e Soares 2004; Zani *et al.*, 2009a). Segundo Gohan e Parkash (1990), este tipo de feição ocorre somente em condições ambientais específicas, nas regiões com capacidade de fornecer e acomodar grandes volumes de sedimentos. Assim, Horton e DeCelles (2001) postularam que o contexto geotectônico ideal para o desenvolvimento de megaleques é encontrado em bacias do tipo *foreland*, que são depressões tectonicamente ativas adjacentes às cadeias de montanhas. Além do Pantanal, exemplos clássicos de megaleques que se desenvolvem em bacias *foreland* são encontrados nas planícies do Ganges-Brahmaputra na Índia e no Chaco Sul-Americano.

Recentemente, o desenvolvimento da tecnologia de sensoriamento remoto e a disponibilidade de bases de dados gratuitas na internet têm impulsionado a identificação de novos sistemas de megaleques (e.g., Blechschmidt *et al.*, 2009; Chakraborty e Ghosh, 2009; Hartley *et al.*, 2010), além do mapeamento mais detalhado dos já conhecidos (e.g., McCarthy *et al.*, 2005; Zani *et al.*, 2009b; Chakraborty *et al.*, no prelo). No entanto, os poucos modelos existentes que explicam a dinâmica destas feições são excessivamente qualitativos e generalizados (e.g., Gupta 1997; Horton e DeCelles 2001). O conhecimento detalhado destes sistemas é de grande importância para subsidiar políticas de planejamento regional, a fim de evitar tragédias como a ocorrida recentemente no megaleque do Kosi na Índia, onde uma mudança de grande magnitude do rio principal afetou mais de 30 milhões de pessoas (Sinha, 2009). Neste sentido, Assine (2005) demonstrou que o megaleque do Taquari no Pantanal (**Figura 1A**) fornece uma oportunidade ímpar de se estudar este tipo de sistema, pois: (1) possui uma rede de paleocanais bem preservada; e (2) ausência de obras de engenharia de grande porte para controle da drenagem. Assim, este autor propôs um modelo que detalha a cronologia das sucessivas construções e abandonos dos lobos deposicionais, que compõe o megaleque (**Figura 1B**). Neste, a porção sul do megaleque, que constitui o Pantanal da Nhecolândia, seria formado pelos eventos de sedimentação mais antigos. Já a porção norte, Pantanal de Paiaguás, foi formada por processos posteriores ao início do megaleque e que anteciparam a formação do lobo atual.

Neste contexto, o presente artigo propõe-se a testar a hipótese central do modelo elaborado por Assine (2005), que através da interpretação visual dos paleocanais identificou as idades relativas dos eventos deposicionais que formaram o megaleque do

Taquari. Para tal, será aplicado o conceito da curva e integral hipsométrica e analisada as relações entre as curvas altimétricas com as idades relativas dos compartimentos geomorfológicos do megaleque Taquari.

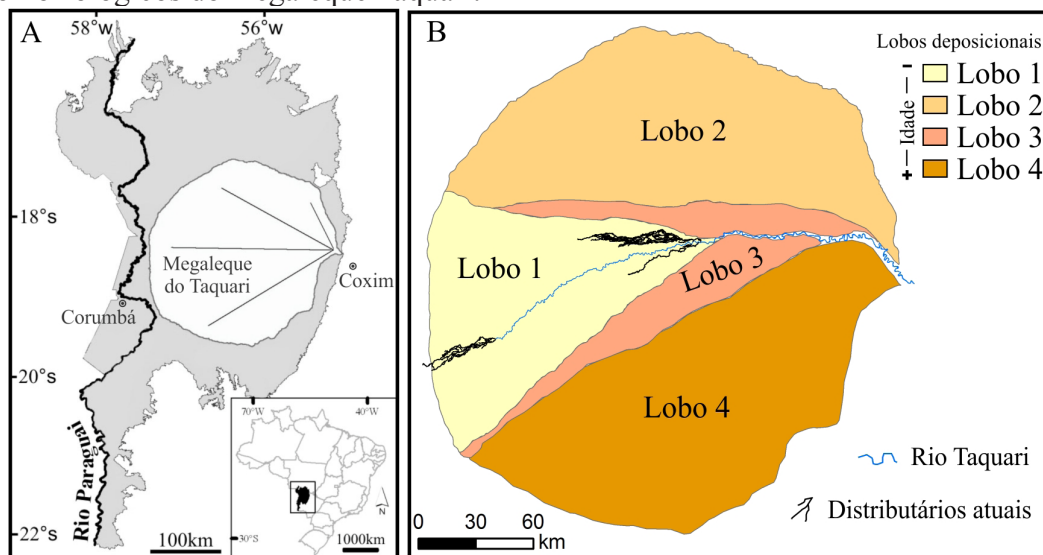


Figura 1. (A) Localização do megaleque do Taquari no Pantanal. (B) Cronologia dos lobos deposicionais que formaram o megaleque, segundo o modelo de Assine (2005).

2. Objetivo

O objetivo deste trabalho é verificar a correspondência entre curvas hipsométricas e a cronologia dos lobos deposicionais que formaram o megaleque Taquari.

3. Curva e Integral Hipsométrica

Curva hipsométrica é uma forma de representação gráfica do relevo, sendo que a integral hipsométrica (Hi) é representada pela área do gráfico sob a curva hipsométrica (**Figura 2A**). A integral é considerada um índice que descreve a curva de distribuição de elevação do terreno de uma determinada área da paisagem através da frequência acumulada das altitudes (Strahler, 1952; Schumm, 1956). A partir desta informação o índice Hi pode representar determinada unidade do terreno que ainda não esteve sujeita a processos erosivos, configurando-se como indicador de diferentes estágios evolutivos do relevo (Keller e Pinter, 2002; Pérez-Peña *et al.*, 2009) (**Figura 2B**).

A integral hipsométrica é geralmente extraída para a unidade de bacia hidrográfica, o que não exclui a potencialidade de aplicação em outros recortes espaciais que permitem a avaliação do equilíbrio entre os processos erosivos e deposicionais que atuam em determinada porção da superfície. Para uma investigação geomorfológica adequada é necessário que a análise seja realizada tanto pela forma da curva hipsométrica como pelo valor de Hi obtido (Ohmori, 1993; Pedrera *et al.*, 2009), sendo esta abordagem muito aplicada em análises comparativas entre diferentes áreas (e.g., Chen *et al.*, 2003; El Hamdouni *et al.*, 2008; Masek *et al.*, 1994).

De modo geral, quando aplicadas à unidade de bacia hidrográfica, as formas convexa, côncavo-convexa ou retilínea, e côncava da curva hipsométrica indicam, respectivamente, baixo, médio e alto grau de dissecação do relevo. No que diz respeito

à integral hipsométrica, esta é analisada a partir do valor absoluto de H_i , devendo variar de 0 a 1, sendo que valores próximos a 0 sugerem uma área altamente erodida, enquanto valores próximos a 1 indicam terrenos pouco erodidos. Além disto, as interpretações não devem excluir a possibilidade de influência de fatores litológicos nas formas obtidas de curvas hipsométricas e o valor de H_i , pois, variações litológicas podem gerar diferentes condições de resistência do terreno a processos erosivos o que dificulta análises de cunho comparativo e cronológico.

Este estudo propõe uma interpretação da curva e integral hipsométrica que corresponde a uma análise inversa à dinâmica de estruturação do relevo existente em uma unidade de bacia hidrográfica. Na bacia hidrográfica as condições de alta maturidade são reveladas por expressivas áreas dissecadas, onde, geralmente, processos deposicionais são atuantes durante longo período. No entanto, em lobos deposicionais, a dinâmica é inversa, visto que quanto mais representativas são às áreas planificadas e com alta deposição sedimentar, mais recente é o compartimento. Neste sentido, espera-se que os baixos valores de H_i e as curvas hipsométricas com feições mais côncavas representem os terrenos com menor maturidade, ou seja, mais jovens.

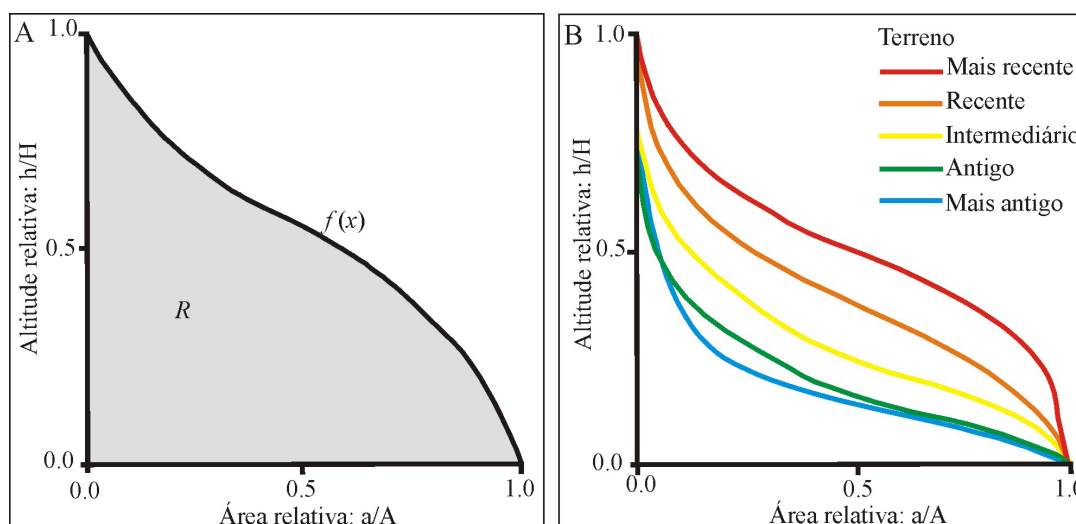


Figura 2. (A) Representação de uma curva hipsométrica a partir da função $f(x)$ (segundo Strahler (1952)), onde (R) exprime a porção sob a curva, traduzindo a integral hipsométrica (Elevação total (H) do terreno (elevação máxima menos a elevação mínima), (A) é a área superficial total da bacia, e área (a) corresponde a superfície acima de uma determinada elevação (h)). (B) Arquétipos teóricos de curvas hipsométricas (adaptado de Ohmri (1993)) segundo estágios de maturidade de determinado terreno, sendo que as curvas com maior convexidade indicam baixa maturidade e as curvas com maior concavidade indicam alta maturidade do terreno.

4. Material e Métodos

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*; Jarvis *et al.*, 2008) disponibilizados em sua 4ª versão a partir do endereço eletrônico <http://srtm.csi.cgiar.org>. Estes dados constituem a última versão disponibilizada, resultante da aplicação de novos algoritmos de interpolação e modelos digitais de elevação (MDE's) auxiliares, conforme descrito por Reuter *et al.* (2007). Neste conjunto de dados, além do MDE de 3 segundos de arco (~90m), também estão disponíveis

dados reamostrados para 21 segundos de arco (~250m), os quais foram utilizados nesse trabalho.

O procedimento para a obtenção das curvas hipsométricas se iniciou com a importação do MDE-SRTM no aplicativo ArcGIS 9.2. Os polígonos que representam os lobos deposicionais do Taquari (**Figura 1**) foram utilizados como máscara, para extração individual das altitudes dos compartimentos. Assim, obteve-se 4 arquivos que foram convertidos para formato de texto tabular (x,y,z) e importados na planilha eletrônica Excel 2007. Finalmente, gráficos univariados representando as frequências acumuladas das altitudes foram confeccionados somente com a coluna z. Aplicou-se uma transformação linear nos eixos x e y para reajustar os valores de 0 a 1, a fim de se realizar comparações entre as curvas geradas.

Para a extração dos parâmetros quantitativos que descrevem a curva da hipsométrica foi utilizada a abordagem proposta por Harlin (1978). Segundo este autor, as curvas das frequências acumuladas podem ser aproximadas por um polinômio do 3º grau:

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (\text{Equação 1})$$

Os coeficientes a_x são obtidos através da regressão da curva hipsométrica e utilizados na integração da área (A) que está abaixo da curva:

$$A = \int_0^1 a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 f(x) dx \quad (\text{Equação 2})$$

Assim, o primeiro momento de $f(x)$, referente ao eixo x e que representa o centróide da função (Hi), é definido através de:

$$Hi = \frac{1}{A} \int_0^1 xf(x) dx \quad (\text{Equação 3})$$

Os valores de Hi variam de 0 a 1, e serão utilizados como índice descritivo da idade relativa dos lobos deposicionais. Estas equações foram implementadas por Pérez-Peña *et al.* (2009) na extensão *CalHypso* para o aplicativo ArcGIS 9.x.

Além da integral hipsométrica, foi calculada a variável morfométrica de altura do relevo. Este parâmetro foi extraído dos lobos deposicionais através de filtros espaciais não-lineares. Foram aplicados os filtros de mínimo e máximo, com janela de tamanho 7x7. A subtração dos planos de informação resultantes revela a altura do relevo. Segundo Evans (1972), esta variável pode expressar o grau de dissecação do relevo e foi utilizada neste trabalho para auxiliar na interpretação das curvas hipsométricas.

5. Resultados e Discussão

As curvas hipsométricas obtidas para os lobos deposicionais estão representadas na **Figura 3**. Observa-se que quanto maior a concavidade da curva, mais jovem é o lobo deposicional, exceto para o Lobo 3. Esta analogia é igualmente verificada pela análise de Hi , sendo que quanto mais próximo de 0, mais jovem o compartimento, exceto para o Lobo 3 (**Figura 4**).

Strahler (1952) e Schumm (1956) identificaram para bacias hidrográficas que quanto mais acentuada a concavidade da curva hipsométrica e menor Hi , mais antigo é o compartimento representado (**Figura 2**). No entanto, a relação entre curva hipsométrica

com idade dos lobos deposicionais, verificada no megaleque do Taquari, é inversa a esta proposta. Tal ocorrência era esperada, devido à predominância de processos deposicionais na unidade dos lobos, ao passo que em bacias hidrográficas tributárias predominam processos erosivos. Assim, para ambientes de sedimentação recente, como o Pantanal, é coerente que terrenos mais jovens possuam maior frequência acumulada das altitudes menos elevadas.

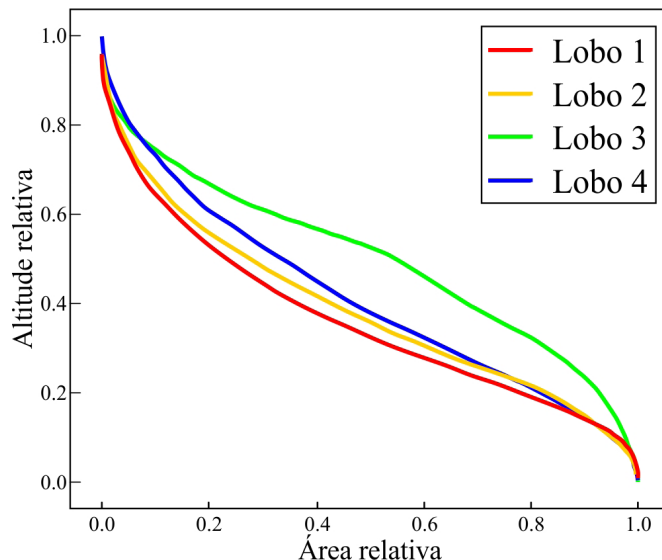


Figura 3. Curvas hipsométricas dos lobos deposicionais.

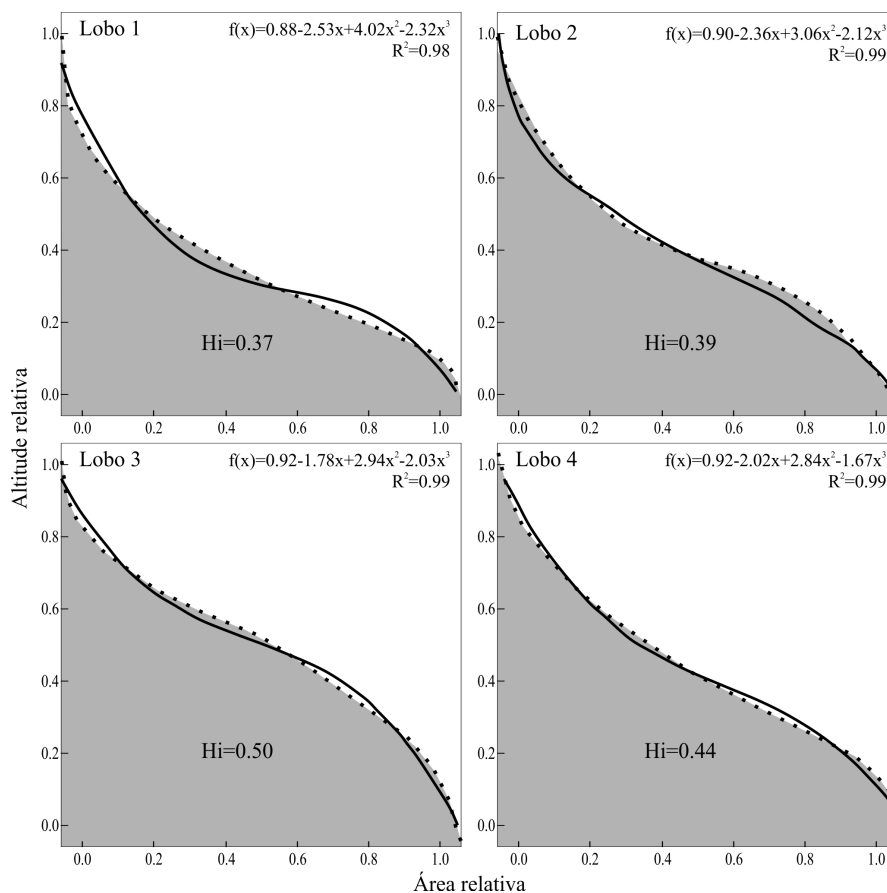


Figura 4. Curvas hipsométricas (linha sólida) modeladas por polinômios do 3º grau (linha pontilhada). *Hi*: integral hipsométrica.

A discordância da curva hipsométrica do Lobo 3 com as demais pode ser explicada: (1) pela sobreposição quase que total do Lobo 1, que impediu amostrar de forma representativa a topografia do Lobo 3; (2) pela geometria alongada e delgada deste compartimento que, segundo Willgoose e Hancock (1998), pode comprometer a análise da curva hipsométrica e a extração dos parâmetros quantitativos; e (3) por provável interferência de feições erosivas associadas ao canal atual do Taquari, restritas apenas ao cinturão de meandros (Assine, 2005), mas que se encontra sobreposto ao Lobo 3.

Foi identificada uma relação positiva entre a altura média do relevo com a cronologia relativa dos lobos deposicionais (**Figura 5**). Desta maneira, quanto mais antigo for o compartimento sedimentar, mais dissecado estará o seu relevo. Segundo Zani *et al.* (2009a), as maiores amplitudes de relevo no megaleque estão associadas com feições erosivas lineares, que dissecam os depósitos aluviais mais antigos na porção proximal do megaleque. Feições relictas e de elevada amplitude altimétrica já haviam sido documentadas no Pantanal da Nhecolândia (i.e., Lobo 4) por Tricart (1982) e Ab'Saber (1988), corroborando que os lobos deposicionais antigos estão mais dissecados que os recentes.

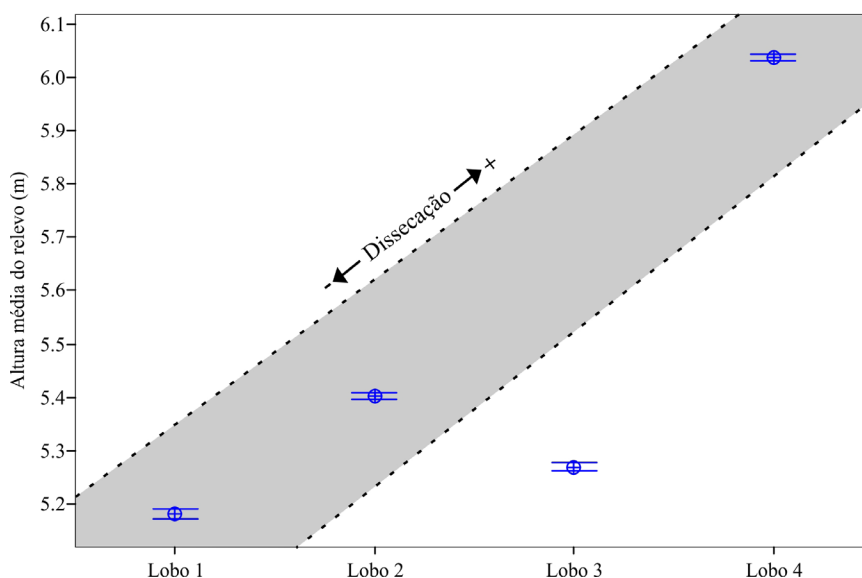


Figura 5. Relação entre altura do relevo com a idade relativa dos lobos deposicionais. Os círculos azuis representam os valores médios e as barras o desvio padrão.

6. Conclusões

Foi aplicada a análise da curva e integral hipsométrica para verificar a validade do modelo de construção e abandono de lobos deposicionais do megaleque Taquari, proposto por Assine (2005). A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que: (1) as curvas hipsométricas estão relacionadas com a cronologia dos lobos deposicionais, confirmando a validade do modelo de Assine (2005), exceto para o Lobo 3; (2) a variável morfométrica de altura do relevo confirmou que os terrenos mais antigos do megaleque possuem maior grau de dissecação que os terrenos de sedimentação recente; e (3) para o megaleque do Taquari, a proposta de análise inversa da curva hipsométrica se confirmou como factível na relação com estágios evolutivos do relevo.

7. Referências

- Ab'Saber, A.N. O Pantanal Matogrossense e a teoria dos refúgios. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n. 2 especial, p. 9-57, 1998.
- Assine, M.L. River avulsions on the Taquari megafan, Pantanal wetland, Brazil. **Geomorphology**, v.70, p. 357-371, 2005.
- Assine, M.L.; Soares, P.C. Quaternary of the Pantanal, west-central Brazil. **Quaternary International**, v. 114, n. 1, p. 23-34, 2004.
- Bleischmidt, I.; Matter, A.; Preusser, F.; Riek, D.Z. Monsoon triggered formation of Quaternary alluvial megafans in the interior of Oman. **Geomorphology**, v. 110, n. 3-4, p. 128-139, 2009.
- Chakraborty, T.; Ghosh, P. The geomorphology and sedimentology of the Tista megafan, Darjeeling Himalaya: Implications for megafan building processes. **Geomorphology**, v. 115, n. 3-4, p. 252-266, 2010.
- Chakraborty, T.; Kar, R.; Ghosh, P.; Basu, S. Kosi megafan: historical records, geomorphology and the recent avulsion of the Kosi River. **Quaternary International**, no prelo.doi: 10.1016/j.quaint.2009.12.002
- Chen, Y. C.; Sung, Q.; Cheng, K. Y. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. **Geomorphology**, v. 56, n. 1-2, p. 109-137, 2003.
- El Hamdouni, R.; Irigaray, C.; Fernández, T.; Chacón, J.; Keller, E. A. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain). **Geomorphology**, v. 96, n. 1-2, p. 150-173, 2008.
- Evans, I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: R.J. Chorley (Org.). **Spatial analysis in geomorphology**. New York: Harper and Row, 1972. pp17-90.
- Gohain, K.; Parkash, B. Morphology of the Kosi megafan. In: A.H. Rachocki; M. Church (Org.). **Alluvial fans – a field approach**. New York: Wiley, 1990. pp151-178.
- Gupta, S. Himalayan drainage patterns and the origin of fluvial megafans in the Ganges foreland basin. **Geology**, v. 25, n. 1, p. 11-14, 1997.
- Harlin, J.M. Statistical moments of the hypsometric curve and its density function. **Mathematical Geology**, v. 10, n. 1, p. 59-72, 1978.
- Hartley, A.J.; Weissmann, G.S.; Nichols, G.J.; Warwick, G.L. Large distributive fluvial systems: characteristics, distribution, and controls on development. **Journal of Sedimentary Research**, v. 80, n. 2, p. 167-183, 2010.
- Horton, B.K.; DeCelles, P.G. Modern and ancient fluvial megafans in the foreland basin system of the central Andes, southern Bolivia: implications for drainage network evolution in fold-thrust belts. **Basin Research**, v. 13, n. 1, p. 43-63, 2001.
- Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Keller, E. A; Pinter, N. **Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape**. New Jersey: Prentice Hall, 2002, 362 p.
- Masek, J.G.; Isacks, B.L.; Gubbels, T.L.; Fielding, E.J. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. B7, p. 13941-13956, 1994.
- McCarthy, J.; Gumbrecht, T.; McCarthy, T.S. Ecoregion classification in the Okavango Delta, Botswana from multitemporal remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 19, p. 4339-4357, 2005.
- Ohmori, H. Changes in the hypsometric curve through mountain building resulting from concurrent tectonics and denudation. **Geomorphology**, v. 8, n. 4, p. 263-277, 1993.
- Pedraza, A.; Pérez-Peña, J.V.; Galindo-Zaldívar, J.; Azañón, J. M.; Azor, A. Testing the sensitivity of geomorphic indices in areas of low-rate active folding (eastern Betic Cordillera, Spain), **Geomorphology**, v. 105, n. 3-4, p. 218-231, 2009.

- Pérez-Peña, J.V.; Azañón, J. M.; Azor, A. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain, **Computers & Geosciences**, v. 35, n. 6, p. 1214–1223, 2009.
- Reuter, H. I, Nelson, A., Jarvis, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, **International Journal of Geographic Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007.
- Schumm, S.A. Evolution of drainage systems and slopes badlands or Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.
- Strahler, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n. 10, p. 1117-1142, 1952.
- Sinha, R. The great avulsion of Kosi on 18 August 2008. **Current Science**, v. 97, n. 3, 2009.
- Tricart, J. El Pantanal: um ejemplo del impacto geomorfológico sobre el ambiente. **Informaciones Geográficas**, v. 29, n. 1, p. 81-97, 1988.
- Willgoose, G.; Hancock, G. Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport-limited catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. 7, p. 611-623, 1998.
- Zani, H.; Assine, M.L.; Silva, A.; Coradini, F.A.; Kuerten, S.; Gradella, F.S. Geoformas deposicionais e feições erosivas no Pantanal Mato-Grossense identificadas por sensoriamento remoto. **Geografia**, v. 34, número espacial, p. 643-654, 2009a.
- Zani, H.; Assine, M.L.; Silva, A.; Coradini, F.A. Redes de drenagem distributária e formas deposicionais no Megaleque do Taquari, Pantanal: uma análise baseada no MDE-SRTM. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 1, p. 21-28, 2009b.