

## **Avaliação de atributos topográficos extraídos a partir de modelos numéricos do terreno com diferentes resoluções**

Pedro Paulo da Silva Barros<sup>1</sup>  
Vinícius Guidotti de Faria<sup>1</sup>  
Carla Cristina Cassiano<sup>1</sup>  
Cássio Bueno Maia<sup>1</sup>  
Taila Strabeli<sup>1</sup>  
Yuri Arten Forte<sup>1</sup>  
Raoni Wainer Duarte Bosquilia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo - USP/ESALQ  
Av. Pádua Dias, 11 - Caixa Postal 96 - 13.416-000 - Piracicaba - SP, Brasil  
{pedropaulo, viniciusgf, cccassiano, cassio.maia, tailastrabeli, yuriforte}@usp.br

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Dois Vizinhos  
Estrada p/ Boa Esperança, km 4 – 85660-000 – Dois Vizinhos – PR, Brasil  
raonibosquilia@utfpr.edu.br

**Abstract.** The comprehension and analysis of relief attributes are essential to the understanding of landscape dynamics in watersheds and are closely related to issues of environmental conservation. Currently, there are numerous sources of topographic data acquisition but the remote sensing products have a prominent role, especially after the granting of digital models on a global scale through the SRTM and ASTER data. Other products with higher spatial resolution are produced on a regional scale and the consistency of its data needs to be checked against products of greater scientific background. In this sense, the present study aimed to analyze a digital surface model generated for the State of São Paulo, with a spatial resolution of 5 meters, with regard to the possibility of generation and extraction of topographical information from it. In this sense we generated and analyzed four topographic attributes widely used in many environmental studies, being considered as basic information to create maps related to environmental fragility of the landscape. The results showed that the analyzed digital models differ statistically with respect to altitude and slope, while no differences were found for terrain aspect and general curvature of the terrain. However, all maps obtained were very similar to each other, and hence the use of a source with finer resolution showed no benefits compared to the coarser resolution products. Besides, we also found several artifacts in places of transition from land use classes, which were inconsistent with the reality of the area. Nevertheless, since the operator is experient and use the result with proper care, we also conclude that this product with finer resolution can be used to generate topographic attributes.

**Palavras-chave:** refief; geoprocessing; slope; terrain curvature; relevo; geoprocessamento; declividade; curvatura do terreno

### **1. Introdução**

Com a difusão e a evolução dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a obtenção, a análise e o processamento de atributos do relevo tem se tornado essenciais para a compreensão da paisagem, dando suporte a tomada de decisão para questões relacionadas à conservação ambiental ou expansão territorial (LISTO e VIEIRA, 2010). Segundo Valeriano (2003a), diferentes variáveis são passíveis de extração automática em SIG, permitindo a classificação multivariada da paisagem, e fornecendo uma segmentação da mesma em ambientes topograficamente homogêneos.

Dados topográficos são adquiridos preferencialmente por mapas planialtimétricos em diferentes escalas, todavia, imagens por interferometria e imagens orbitais de pares estereoscópicos vêm sendo utilizadas com maior frequência. Cada uma dessas fontes tem suas próprias características com relação à diferentes sensores de aquisição de dados, formatos, custos e resoluções (OLIVEIRA et al., 2013).

Os produtos gerados por técnicas de sensoriamento remoto, como os Modelos Digitais de Elevação (MDE), são amplamente reconhecidos como informação essencial para diversas áreas de pesquisa, sendo o produto base para o conhecimento do relevo da superfície terrestre, permitindo também a derivação de índices topográficos primários e secundários, de modo a subsidiar estudos relacionados aos processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos (MOORE et al., 1991).

Nesse contexto, os produtos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) possuem papel de destaque, uma vez que ambos possuem informações de relevo em escala global e constituem, muitas vezes, a única informação disponível para modelagem ambiental de áreas que não possuem dados mais precisos, como cartas topográficas em escalas refinadas.

Recentemente, com a conclusão do projeto “Mapeia SP” da EMPLASA (Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A), o Estado de São Paulo passou a contar com um recobrimento aerofotogramétrico completo que, entre outros produtos, disponibilizou um Modelo Digital de Superfície (MDS) com alta resolução espacial. Juntamente com este MDS, surge um questionamento entre pesquisadores da área sobre o uso potencial e limitações destes dados para geração de atributos do relevo, em detrimento de outros produtos já consolidados, como os próprios SRTM e ASTER.

Apesar das diferenças inerentes a cada produto, tanto MDE como MDS são representações matemáticas computacionais da distribuição de um mesmo fenômeno - no caso a superfície terrestre - sendo ambos considerados como Modelos Numéricos do Terreno (MNT) e, em situações específicas, suas informações podem ser utilizadas para finalidades similares.

Assim, em função das diferenças de aquisição dos produtos de superfície disponíveis, bem como suas diferentes resoluções, torna-se essencial o desenvolvimento de estudos que procurem averiguar a consistência das informações derivadas de diferentes fontes de dados e, mais do que isso, analisar se a resolução mais refinada de um dado é transmitida às informações processadas a partir dele. Deste modo, este trabalho teve como objetivo a comparação dos produtos SRTM, ASTER e EMPLASA em relação à geração de atributos topográficos.

## **2. Metodologia de Trabalho**

### **2.1 Área de estudo**

A bacia do rio Corumbataí está localizada na porção centro-este do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22°04'46”S e 22°41'28”S e os meridianos 47°26'23”W e 47°56'15”W, com aproximadamente 1.700 km<sup>2</sup> e cinco sub-bacias principais (Figura 1). O perímetro desta bacia é de aproximadamente 301,52 km, com 63,72 km de extensão na direção norte-sul e 26,80 km de extensão (maior largura) na direção leste-oeste. O rio Corumbataí é considerado um importante afluente do rio Piracicaba, estando situado à sua margem direita.

A área está situada na porção nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, com uma diversidade geológica de rochas paleozóicas, mesozóicas (incluindo as rochas magmáticas intrusivas da formação Serra Geral) e cenozóicas (CEAPLA, 2014). O relevo da bacia do Corumbataí, definido por Koffler (1993), caracteriza-se por Morretes Alongados e Espigões na região norte, com topos angulosos e achatados, drenagens com padrões dendríticos e em maiores densidades; no restante da bacia, o relevo é dominado por Colinas Médias e Amplas, com topos aplainados, drenagens com padrões sub-angulares e em menores densidades.

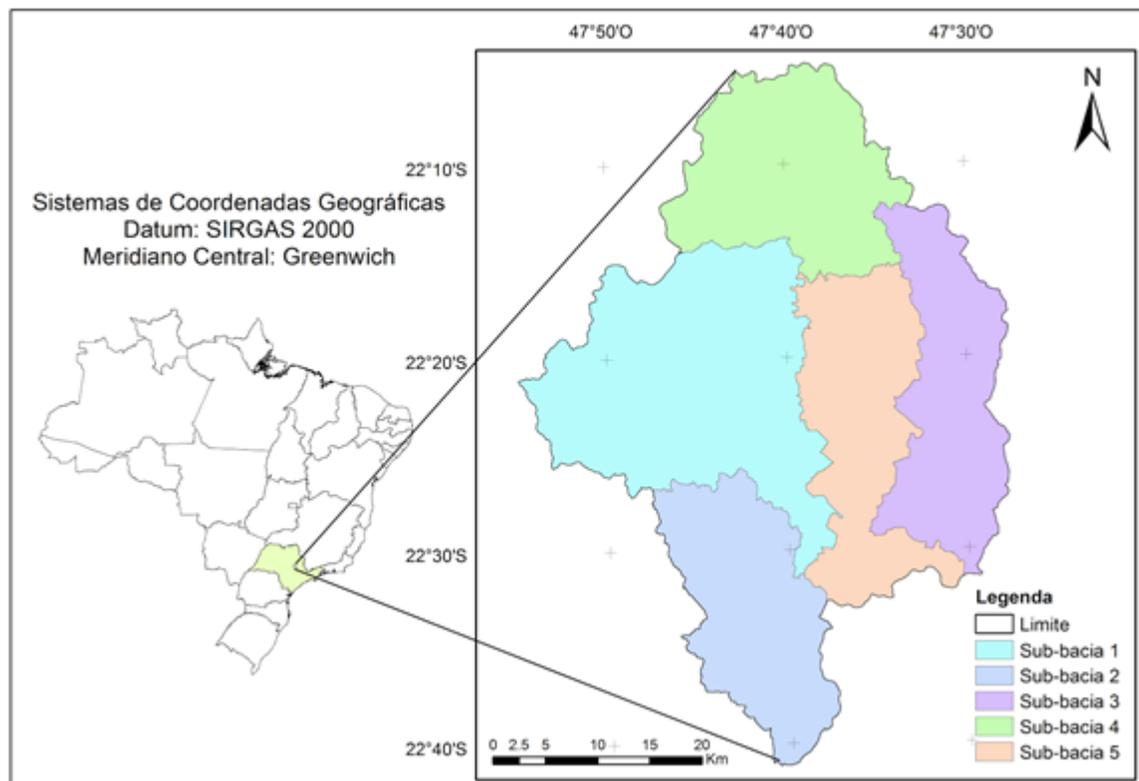


Figura 1. Localização da Bacia do Rio Corumbataí e suas sub-bacias.

## 2.2 Modelos numéricos do terreno

Os produtos da missão SRTM correspondem aos dados de altimetria da superfície terrestre, para as regiões compreendidas entre as latitudes  $56^{\circ}$  N e  $60,25^{\circ}$  S, em uma resolução espacial aproximada de 90 m (3 arc-segundos), obtidos no ano de 2000 por um instrumento sensor do tipo radar de varredura. Os dados SRTM foram obtidos diretamente no site do Projeto TOPODATA (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>), que possui um MDE refinado em comparação ao original, com resolução espacial de aproximadamente 30 metros (VALERIANO, 2008). De acordo com HOFTON et al. (2006), os dados SRTM podem apresentar distorções na altimetria em função do uso e cobertura do solo, principalmente vegetação densa e edificações, o que impede muitas vezes a determinação da altimetria mais próxima de valores obtidos em campo.

O sensor ASTER corresponde à uma ação conjunta dos governos dos Estados Unidos e Japão, produzindo dados de altimetria a partir de estereoscopia das bandas 3N (Nadir) e 3B (Off-Nadir), ambas responsivas ao comprimento de onda do infravermelho próximo (0.78 a 0.86 micrometros). Os produtos ASTER foram obtidos no site do USGS - United States Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), que disponibiliza gratuitamente um MDE com resolução espacial de 1 arc-segundo (aproximadamente 30 m), apesar do par estereoscópico ser coletado com 15 metros de resolução espacial. Apesar da melhor discretização espacial do ASTER, em geral, esse produto apresenta um nível de ruído superior ao SRTM, uma vez que sofre a influência da presença de nuvens nas respostas radiométricas, ocasionando a ocorrência de grandes artefatos em seus produtos (SOUZA et al., 2011).

Por sua vez, o MDS da EMPLASA constitui-se de um produto associado ao levantamento aerofotogramétrico do Estado de São Paulo realizado nos anos de 2010 e 2011, sendo obtido por meio de estereoscopia de fotografias aéreas na escala 1:25.000, com superposição lateral de 60%

e 30% entre as faixas de vôo. O MDS foi produzido a partir de ortofotos com 1 metro de resolução espacial, mas o produto final é disponibilizado aos usuários com 5 metros de resolução. Devido à sua alta discretização espacial, o produto da EMPLASA possui bordas abruptas entre diferentes classes de uso do solo, resultando em distorções de altitude em zonas de transição. Para facilitar as discussões, daqui em diante os três produtos serão tratados como MNT.

### 2.3 Atributos topográficos

Todos os procedimentos de geração e extração de atributos topográficos foram conduzidos em ambiente SIG, com o uso do software ArcGIS 9.3 (ESRI, 2010). A partir dos diferentes MNT, foram analisadas quatro variáveis topográficas: altitude, declividade, aspecto do terreno e curvatura geral do terreno, as quais possuem importância destacada em análises ambientais diversas (MOORE et al., 1991), bem como representam informação básica para geração de mapas temáticos relacionados à fragilidade ambiental da paisagem.

Os valores de altitude foram obtidos diretamente do MNT. Os mapas de declividade e aspecto do terreno foram obtidos, respectivamente, por meio da aplicação das funções *Slope* e *Aspect*, sendo que ambas as funções são baseadas na utilização de janelas móveis de 3 x 3 pixels e na determinação da diferença de altitude entre a célula central e seus oito vizinhos, sempre considerando as direções norte-sul e leste-oeste (ARCGIS ONLINE RESOURCES, 2011).

Basicamente, o algoritmo de declividade determina um ângulo de inclinação para a célula central da janela móvel, o qual é ponderado pelos gradientes de altitude observados nas diferentes direções (VALERIANO, 2003b). Por sua vez, o aspecto do terreno é correspondente à direção da máxima declividade observada entre a célula central e seus oito vizinhos (MENDES e CIRILO, 2001), sendo que a orientação de cada célula é determinada no mapa de acordo com os valores medidos em graus, no sentido anti-horário, ao passo que superfícies planas são representadas no mapa por valores unitários negativos (Figura 2). De acordo com Minella e Merten (2012), a declividade e o aspecto do terreno são atributos topográficos amplamente utilizados em ciências ambientais, exercendo importante influência sobre o fluxo da água, processos erosivos, sombreamento, energia solar recebida, reflectância da superfície, temperatura, entre outros.

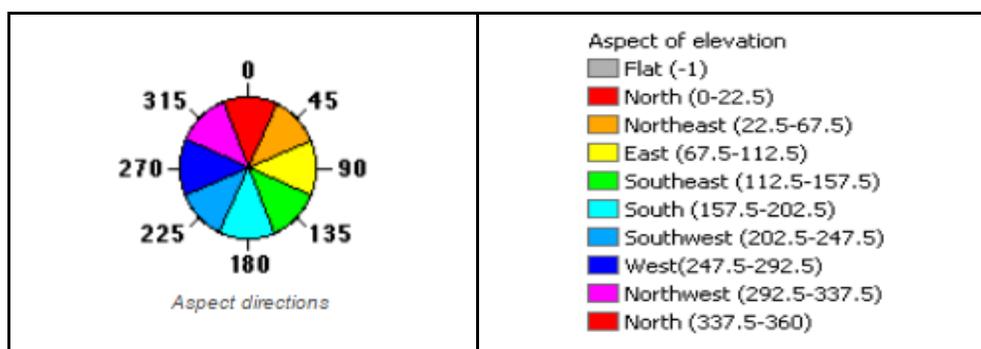


Figura 2. Ângulos em graus obtidos pela função *Aspect*, indicando o aspecto do terreno. Fonte: Adaptado de ArcGIS Online Resources, 2011.

Também foi gerado o mapa de curvatura geral do terreno (em radianos por metro), através da função *Curvature*, que calcula a segunda derivada da altitude por meio de uma análise célula à célula. O mapa resultante apresenta valores positivos que indicam superfícies convexas como interflúvios e divisores topográficos, valores negativos que indicam superfícies côncavas como vales e depressões e, também, valores neutros que representam superfícies planas (VALERIANO, 2003a). Do ponto de vista prático, o mapa de curvatura geral do terreno pode ser usado para

descrever as características físicas da bacia, principalmente no que se refere ao entendimento dos processos de geração de escoamento superficial e erosão do solo (BEVEN e KIRBY, 1979).

## 2.4 Análise estatística dos resultados

Para analisar as diferenças entre os atributos topográficos gerados a partir de cada MNT, utilizou-se a função *Create random points* para gerar 200 pontos aleatórios para cada sub-bacia do rio Corumbataí, resultando em 1000 pontos aleatoriamente distribuídos pela área de estudo. Por meio da função *Extract values to points*, os mesmos pontos aleatórios foram utilizados para extrair os valores absolutos dos quatro mapas de atributos topográficos de cada MNT. Dessa forma, obteve-se um conjunto de dados final com 3000 observações, sendo 1000 referentes a cada MNT, e 4 variáveis (atributos topográficos) a serem analisadas.

Para avaliar as diferenças entre os atributos topográficos gerados para cada MNT foram realizados testes estatísticos de análise de variância e comparação de médias por meio do software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008). Adotou-se como efeito fixo (tratamento) os diferentes MNT e como efeito aleatório os pontos amostrais. Para definir se os testes seriam conduzidos no campo paramétrico ou não, foram avaliados os resíduos das análises de variância, especialmente quanto o atendimento dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, bem como os coeficientes de assimetria e curtose. Todos os testes estatísticos foram interpretados com base no nível de significância de 5%.

## 3. Resultados e Discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de altitude, declividade, aspecto do terreno e curvatura geral do terreno para os três MNT utilizados neste trabalho.

Tabela 1. Valores médios dos atributos topográficos obtidos para diferentes MNT para a bacia do rio Corumbataí-SP.

Fonte de dados	Altitude (m)	Declividade (%)	Aspecto do terreno (°)	Curv. geral do terreno (rad/m)
ASTER	650.0914 a	12.1521 b	179.9095 a	0.003569834 a
EMPLASA	646.4551 b	13.6519 a	175.2180 a	-0.026499921 a
SRTM	644.7773 c	8.8401 c	178.1734 a	-0.003192760 a

Nota: Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, com comparação de médias *a posteriori*.

A análise estatística encontrou diferenças significativas para altitude e declividade, sendo que aspecto do terreno e curvatura geral do terreno não diferiram entre os tratamentos. Comparando as informações de altitude média registrada pelos modelos, observa-se que os dados ASTER apresentaram o maior valor médio, aproximadamente 650 m, seguido por EMPLASA e SRTM. Corroborando com os resultados obtidos por Chagas et al., (2010) que avaliaram MDE obtidos por diferentes métodos e encontraram resultados bastante satisfatórios para o SRTM, porém ligeiramente inferiores aos outros estudados.

A seguir, a Figura 3 apresenta de forma gráfica a variação encontrada para os atributos topográficos de cada MNT: altitude, declividade, aspecto do terreno e curvatura geral do terreno.

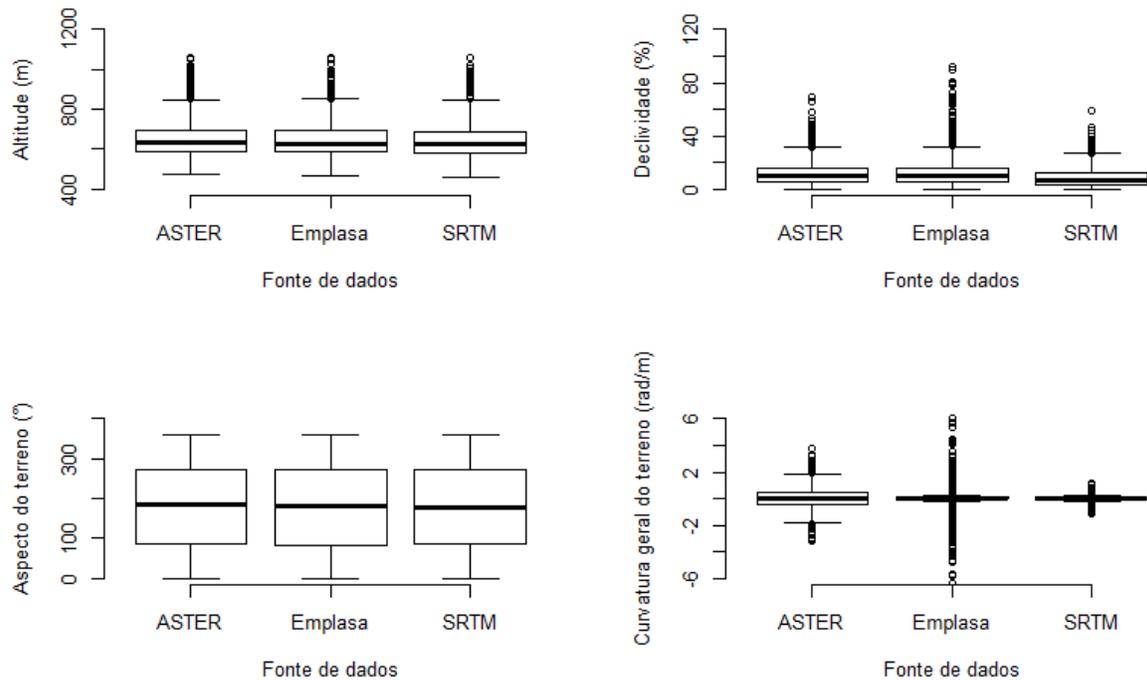


Figura 3. Gráficos box-plot dos atributos topográficos obtidos a partir de diferentes MNT para a bacia do rio Corumbataí-SP.

No que se refere à declividade, Valeriano (2005) diz que as principais diferenças que existem na dispersão da declividade se deve ao menos por duas fontes, a saber, as diferenças de resolução (horizontal e vertical) e o próprio desempenho do algoritmo de declividade, que varia em função de características do MNT. Foi observado uma declividade média maior para o produto da EMPLASA, sendo que este resultado já era esperado, uma vez que as bordas abruptas entre diferentes classes de uso do solo foram responsáveis pela geração de altas declividades nestes locais. Ressalva-se que este problema não deve ser um empecilho no caso de utilização do produto da EMPLASA para áreas homogêneas com culturas de baixo dossel, como cana-de-açúcar, soja e pastagens em geral.

Chagas et al. (2010), ressalta a importância de considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MNT são visões simplificadas da realidade, submetidas a um processo de generalização. Deste modo, como todas as fontes de dados topográficos estão sujeitas à erros inerentes ao processo de aquisição, cabe ao operador desses dados o discernimento para aceitar, ou não, o erro apresentado na geração de atributos topográficos, ou qualquer outra variável, a partir de MNT.

Apesar de ter sido encontrada diferença significativa entre altitude e declividade, os mapas obtidos ficaram muito próximos entre si, de modo que a utilização dos dados da EMPLASA não trouxe benefícios visíveis na geração de atributos topográficos, apesar de sua maior resolução espacial. Assim, torna-se essencial avaliar outras variáveis inerentes à cada produto como disponibilidade, resolução espacial, tamanho de arquivo e tempo para processamento de informações. Neste sentido, os MNT gerados a partir de sensores óticos orbitais apresentam vantagem, pois possuem disponibilidade de dados em nível mundial, resolução moderadamente elevada, tamanho de arquivo mediano e processamento rápido, enquanto que os dados da EMPLASA, por apresentarem uma maior resolução espacial, tem características opostas aos outros

dois produtos: disponíveis regionalmente, obtenção dos dados mediante formalização de contrato, grande tamanho de arquivo e, conseqüentemente, baixa velocidade de processamento das informações.

Apesar de não trazer vantagens no que diz respeito à geração automática de atributos topográficos, ressalva-se que o MDS da EMPLASA pode ser utilizado para outros fins que não foram contemplados por este trabalho como, por exemplo: (i) a modelagem do campo de visada, uma variável importante para planejamento de alocação de torres de monitoramento de incêndios florestais; (ii) valoração da beleza cênica em estudos de ecologia da paisagem, possibilitando que se determine a visibilidade de fragmentos florestais em algum ponto específico de áreas urbanas; (iii) demais estudos onde a variável “altura do dossel” seja requerida.

#### 4. Conclusões

Os diferentes MNT utilizados neste trabalho apresentaram diferenças estatísticas somente para altitude e declividade, sendo que não foram observadas diferenças para aspecto do terreno e curvatura geral do terreno. No entanto, todos os mapas obtidos ficaram muito semelhantes entre si, de modo que a utilização de uma fonte com resolução mais refinada (EMPLASA) não apresentou benefícios em relação aos demais produtos gerados a partir dele e, pelo contrário, foram observados artefatos inconsistentes com a realidade da área em locais de transição de classes de uso do solo.

Apesar disso, desde que o operador seja experiente e utilize o resultado com os devidos cuidados, ponderando as questões inerentes ao uso do solo de cada localidade sob análise, conclui-se que este produto de maior resolução pode ser utilizado para geração de atributos topográficos.

#### Agradecimentos

À Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (EMPLASA) que gentilmente cedeu os arquivos digitais, sem ônus (CLU N° 076/14).

#### Referências

ARCGIS ONLINE RESOURCES, 2011. Disponível em: < <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/> >. Acesso em: 09 Nov. 2014.

ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER. (ASTER). Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 31 Out. 2014.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, v.24, p.43-69, 1979.

CHAGAS, C. S.; FILHO, E. I. F.; ROCHA, M. F.; JÚNIOR, W. C.; NETO, N. C. S. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n.2, p.218–226, 2010.

CEAPLA – Centro de Análise e Planejamento Ambiental. Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí. Rio Claro, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Disponível em:< <http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/apresentacao.php>>. Acesso em: 18 Out. 2014.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. ArcGIS Desktop: versão 9.3. Redlands, CA. 2010.

HOFTON, M.; DUBAYAH, R.; BLAIR, J. B.; RABINE, D. Validation of SRTM elevations over vegetated and Non-Vegetated terrain using medium footprint Lidar, **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.72, n.3, p. 279-285, 2006.

KOFFLER, N. F. Uso das terras da bacia do Rio Corumbataí em 1990, **Geografia**, v. 18, n. 1, p. 135-150, 1993.

LISTO, F. L. R.; VIEIRA, B. C. Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos, **Revista de Geografia**, v. 27, n. 3, p. 204, 2010.

MINELLA, J.; MERTEN, G. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, v. 42, n. 9, p. 1575–1582, 2012.

MENDES, C.A.B.; CIRILO, J.A. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: ABRH, 2001. 535p.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>>. Acesso em: 08 out. 2014.

OLIVEIRA, J S. DE ; FIORIO, P. R. ; BARROS, P. P. ; MARTINS, J. A. Estimativas de perda de solos em ambiente sig utilizando diferentes fontes de dados topográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais XVI SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p. 6719-6726. DVD.

R DEVELOPMENT CORE TEAM (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 15 Out. 2014.

SALGADO, M. P. G.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F. T. Comparação entre métodos para geração de modelos digitais de elevação a partir de dados cartográficos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15, 2011, Curitiba. **Anais XV SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2011. Artigos, p. 8880-887. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00056-0.

SOUZA, A. M. B., CRUZ, M. A. S., ARAGÃO, R. Análise comparativa do uso de modelos digitais de elevação para a caracterização física da bacia do rio Japarutuba. In Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, Nov.-Dez. 2011

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.539-546, 2003a.

VALERIANO, M. M. Mapeamento da declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 303–310, 2003b.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12, 2005, Goiania, **Anais XII SBSR**. São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3595-3602, CD-ROM.

VALERIANO, M. M. **Topodata: guia de utilização de dados geomorfométricos locais**. São José dos Campos: INPE, 2008.