

## MODELAGEM DE PROCESSOS DE ECOSISTEMAS EM REGIÃO MONTANHOSA: VARIABILIDADE ESPACIAL DA IRRADIÂNCIA

PABRICIO MARCOS OLIVEIRA LOPES<sup>1</sup>  
BRENNER STEFAN GOMES SILVA<sup>1</sup>  
DALTON MORISSON VALERIANO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{pabricio, brenn421421er, dalton}@ltid.inpe.br

**Abstract.** The simulation of environmental conditions is a necessary step toward ecological modeling. Terrain topography is one of the major factors that control the spatial distribution of environmental conditions as it influences soil formation, water flow and irradiance. A simulation of solar irradiance over rugged terrain is presented. The simulation applied the TOPORAD algorithm available in Image Processing Workbench environment. Direct and diffuse irradiance were modeled separately for a portion of the Mantiqueira Mountains in SE Brazil.

**Keywords:** Irradiance modeling, mountainous terrain, ecosystem modeling, Atlantic forest, SE Brazil.

### 1. Introdução

A modelagem de processos de ecossistemas como o balanço de energia, as trocas de energia e de massa entre a superfície e a atmosfera, os ciclos biogeoquímicos e a produtividade primária permitem não apenas o entendimento das interações entre estes processos como também pode permitir a inferência de suas respostas frente a eventuais mudanças climáticas (Bonan, 1995). Os processos de ecossistema são resultados de interações entre o conjunto de fatores bióticos como a composição de espécies presentes no ecossistema e seus comportamentos ecofisiológicos e fatores abióticos como disponibilidade de radiação solar e nutrientes. Os fatores abióticos são espacialmente variáveis em diversas escalas devido a regimes climáticos, tipos de solo, etc o que impõe variabilidade espacial na estrutura e processos de ecossistemas.

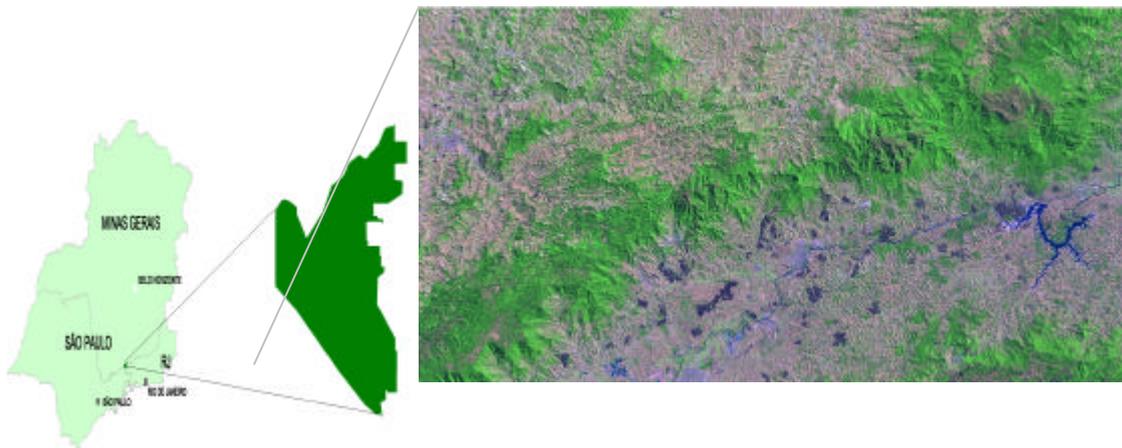
A variabilidade ambiental em pequenas escalas é encontrada em regiões montanhosas onde a topografia impõe forte anisotropia nas condições microclimáticas, nos processos pedogenéticos e nos padrões de escoamento e retenção de água (Running e Gower, 1991). A variabilidade em elevação, exposição e sombreamento causa gradientes ambientais, bem como seqüências características de ecossistemas, as quais são encontradas ao longo de declives em montanhas. Esses gradientes também afetam diretamente ou indiretamente a produtividade primária, o aquecimento do solo e do ar, e os balanços de água e de energia (Dubayah, 1992). Um dos fatores ambientais que podem ser diretamente modelados a partir da representação da topografia, em modelo digital de terreno e de sua análise em um Sistema de Informação Geográfica, é a irradiância (Dozier e Frew, 1990; Dubayah e Rich 1995).

Este trabalho tem como objetivo gerar a imagens da irradiância solar direta e difusa para condições de céu limpo, a partir de algoritmo TOPORAD, disponível no sistema de análise de imagens e informação geográfica "Image Processing Workbench (IPW) (<http://www.icesc.ucsb.edu/~ipw2/>)

## 2. Metodologia

### 2.1. Área de estudo

A área de estudo compreende uma porção da Serra da Mantiqueira uma superfície de 14.228 Km<sup>2</sup>, entre as coordenadas W 44° 30' e W 45° 30' e S 22°15' e S 22°45' representada pelas seguintes cartas topográficas na escala de 1:50.000 Itajubá, Virgínia, Passa Quatro, Agulhas Negras, Delfim Moreira, Lorena, Cruzeiro e São José do Barreiro (**Figura 1**). É uma região montanhosa formada por rochas pré-cambrianas e apresenta solos dos tipos argissolos vermelho-amarelos, cambissolos háplicos e os latossolos vermelho-amarelos e os solos existentes nas áreas de várzea do Paraíba do Sul. O clima é subtropical, com comportamento térmico do tipo mesotérmico brando, super úmido com subsecas de acordo com a classificação de Nimer (1989). A precipitação varia entre 1000 a 2000 mm anuais. A vegetação predominante dos fragmentos florestais encontrados no alto da serra é Floresta Pluvial Montana, com Campos de Altitudes em áreas acima da cota de 1800 metros e algumas manchas de Floresta Ombrófila Mista, localizando-se em uma região montanhosa que varia de 700 a 2.100 metros de altitude. Baixas temperaturas estão relacionadas ao aparecimento de aspectos subtropicais, como a ocorrência de araucárias nas florestas subtropicais e dos campos em altitudes, que caracterizam linhas abruptas de ecótonos.



**Figura 1:** Localização e composição colorida de imagem TM-Landsat (TM3-B, TM4-G, TM5-R) da área de estudo.

### 2.2. Simulação da Irradiância

Os procedimentos para a extração espacial da irradiância solar, utilizando o MNT altimétrico é descrito a seguir. A ferramenta utilizada é o IPW que requer um conhecimento dos comandos básicos do sistema Unix. Os arquivos úteis ao IPW devem estar em formato binário, podendo ser convertido a partir de arquivos ASCII comuns (sem cabeçalho), utilizando comandos de importação disponíveis no IPW. Estes e os demais comandos do IPW estão descritos em ICESS-UCSB (2002), além da ajuda fornecida pelo próprio software, quando instalado.

Primeiramente é necessária a criação de um cabeçalho, contendo a resolução da imagem. Além disso é necessária a indicação das coordenadas do primeiro pixel da imagem. É considerado o pixel da extremidade superior esquerda da imagem como sendo o pixel inicial. As coordenadas da imagem são utilizadas para os cálculos da posição do sol em seu

movimento aparente nas diferentes horas do dia. Estes dados são inseridos no cabeçalho da imagem e a partir daí podem ser realizados os cálculos de sombreamento e incidência da luz solar.

Os valores de irradiância solar direta e difusa para um dia de céu limpo são processados quando o IPW recebe a altimetria da imagem de entrada e escreve como saída uma imagem com duas bandas, uma para a irradiância direta normal ao sol e outra para a irradiância difusa em uma superfície horizontal. Os parâmetros para a estimativa da transferência e deposição de energia radiante na atmosfera são: comprimento da profundidade ótica que é dado relativo ao ângulo de inclinação solar, considerando-se a elevação normal à superfície dada em metros; fator de assimetria do espalhamento; irradiância solar que chega na parte externa do topo da atmosfera; ângulo zenital solar. Os valores da irradiância total em um determinado intervalo do espectro ou a irradiância espectral, também são calculados.

Em seguida, o IPW separa as bandas da imagem gerada para que se obtenha as imagens de irradiância direta e difusa. A partir da imagem de elevações (MNT), gera-se uma nova imagem de duas bandas contendo aspecto e declividade para cada uma delas. A seguir estas bandas são separadas em duas novas imagens. Estas imagens seriam necessárias para o cálculo do fator de visibilidade do céu. No entanto posteriormente é calculado fator de visibilidade do céu diretamente.

Os valores da data e do intervalo espectral são necessários para a obtenção do valor da irradiância solar exoatmosférica. Uma malha é gerada contendo os valores do cosseno do ângulo de iluminação solar para cada pixel da malha de altimetria: É necessária a transformação da radiação direta para que esteja normal ao horizonte. Para isto basta multiplicar a malha de irradiância direta pela malha da que denota para cada pixel o ângulo de iluminação solar. Uma nova imagem com duas bandas dadas como entrada é gerada e realiza-se a multiplicação.

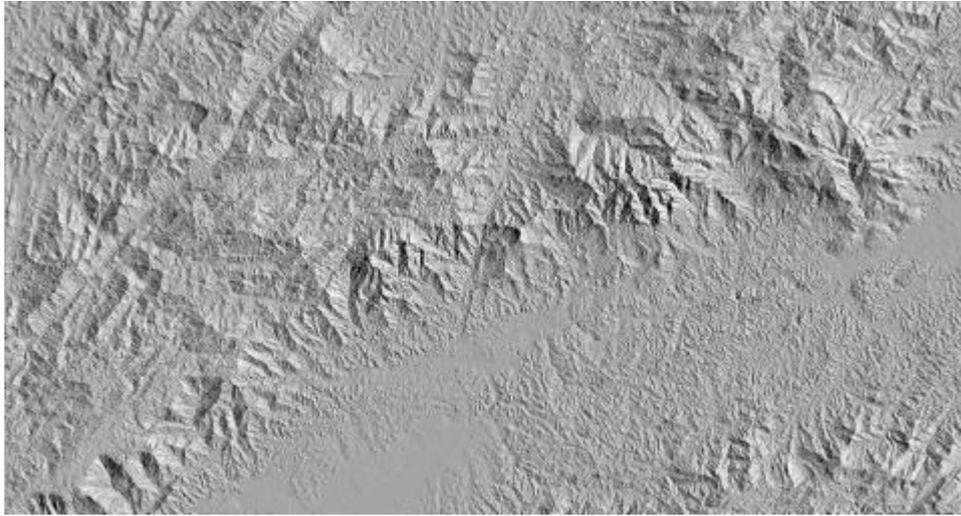
Para a geração do fator de visibilidade do céu, O IPW realiza o cálculo a partir do MNT altimétrico com cabeçalho de coordenadas. Este comando gera uma imagem de duas bandas, uma para o fator de visibilidade do céu e outra para o fator de configuração do terreno. Estas são separadas e a imagem da irradiância difusa já calculada é multiplicada pelo fator de visibilidade do céu, obtendo-se assim a irradiância direta normal ao horizonte. Como resultado final, são obtidas as seguintes imagens para condição de céu limpo: Irradiância Direta - normal ao horizonte e a Irradiância Difusa. A soma destas duas variáveis é a irradiância solar global.

### 3. Resultados

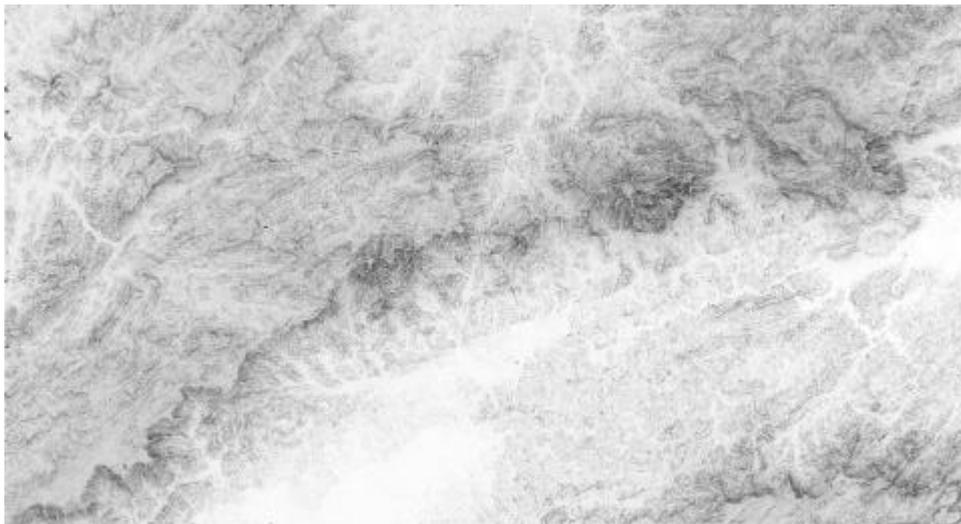
Os efeitos das componentes direta e difusa são representados nas **Figuras 2a e b**. A imagem da componente direta (**Figura 2a**) apresenta um contraste de iluminação solar. As regiões de altitudes elevadas são mais iluminadas que as de baixas. Este efeito é devido ao horário adotado para a simulação da irradiância (9:00 h) em que o ângulo zenital solar é de  $47.9^\circ$ , proporcionando pouca iluminação dos locais mais baixos. A exemplo, observa-se nas escarpas da serra da Mantiqueira voltadas para nordeste que recebem mais irradiação solar direta (tons mais claros) que a região do Vale do Paraíba. De acordo com Dubayah (1992), a irradiância direta depende da radiação solar no topo da atmosfera e do ângulo zenital. Nota-se ainda, que a topografia condiciona fortemente a variabilidade espacial da incidência de luz direta.

A irradiância difusa é mostrada na **Figura 2b**. As regiões mais baixas apresentam valores mais elevados de irradiância difusa, enquanto que nas áreas de grande altitude observa-se valores relativamente mais baixos. Isto por ser observado na crista da Serra da Mantiqueira

onde valores de irradiância solar são simulados. No entanto, nas regiões de altitudes mais baixas, a irradiância difusa é bastante elevada.



**a**



**b**

**Figura 2:** Imagem da irradiância solar na área de estudo, simulada para às 09:00 de um dia de equinócio: **a** componente direta e **b** componente difusa.

A simulação de irradiância solar direta e difusa tem aplicabilidade em modelos de processos ecológicos que levam em conta a variabilidade de condições ambientais. A simulação distribuída de processos ecológicos auxilia o entendimento das relações entre os diversos processos de ecossistema e também permite a generalização destes processos em diversas escalas .

#### 4. Referências

- Bonan, G.B. Land-Atmosphere interactions for climate system models: coupling biophysical, biogeochemical, and ecosystem dynamical processes, *Remote Sensing Environmental*, vol. 51, p.57-73, 1995.
- Dozier, J., Frew, J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, p.963-969, 1990.
- Dubayah, R. Estimation net solar radiation using Landsat Thematic Mapper and digital elevation data. *Water Resources Research*, v.28, p.469-484, 1992.
- Dubayah, R., Rich, P.M. Topographic solar radiation models for GIS, *Int. J.Geographical Information Systems*, vol.9, p.405-419, 1995.
- Hungerford, R. D.; Nemani, R. R.; Running, S.; Coughlan, J. C. *MTCLIM: a Mountain Microclimate Simulation Model*. Intermountain Research Station, FOREST Service, USDA, Research Paper INT-414, 1989.
- Nimer, E. Climatologia da Região Sudeste do Brasil: Introdução à climatologia dinâmica. *Revista Brasileira de Geografia*, vol.34, p.3-48, 1972.
- NTSG – *Numerical Terradynamics Simulation Group* [online] [http://www. forestry. umt. Edu / ntsg / EcosystemModeling/spatial/ rhessys / rhess](http://www.forestry.umn.edu/~ntsg/EcosystemModeling/spatial/rhessys/rhess)> acesso: 2002.
- Running , S.W., Gower, S.T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, vol.9, p.147-160, 1991.
- Running, S. W.; Nemani, R. R.; Hungerford, D. R. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating FOREST evapotranspiration and photosynthesis, *Can.J.For.Res*, v. 17, p. 472-483, 1987.
- Saulnier, G-M. *Information pedologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL*. Grenoble, Tese (Docteur) –L’Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996, 283p.
- <http://www.icesb.ucsb.edu/~ipw2/>