



Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/5: 945-956
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

MAPEAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE RADIAÇÃO SOLAR DEVIDA AO RELEVO EM DIFERENTES PERÍODOS, LATITUDES E CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS

*Mapping of Solar Radiation Distribution Caused by Relief on Different Periods,
Latitudes and Atmospheric Conditions*

Ana Cláudia dos Santos Luciano¹ & Márcio de Morisson Valeriano²

¹Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI
Caixa Postal 6011 - 13083-875 - Campinas – SP - Brasil
anaclauster@gmail.com

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos – SP - Brasil
valerian@dsr.inpe.br

Recebido em 12 de Março, 2015/ Aceito em 14 de Fevereiro, 2016
Received on March 12, 2015/ Accepted on February 14, 2016

RESUMO

A distribuição da radiação solar incidente no terreno devido a variações de relevo, latitude, condições atmosféricas e de período de integração foi caracterizada por estimativas sobre Modelos Digitais de Elevação (MDE) com o algoritmo *Solar Analyst*. Os níveis típicos e padrões gerais de variação da radiação solar foram observados em períodos diários, mensais, semestrais e anuais. Três áreas de estudo com relevo de plano a montanhoso foram escolhidas, nas regiões equatorial, tropical e subtropical do Brasil. Os dados topográficos utilizados provieram do Topodata, um banco de dados formado por um MDE 1" refinado a partir dos dados SRTM 3" (versão 1), e suas derivações geomorfométricas básicas, em cobertura completa do território brasileiro. Parâmetros atmosféricos relativos a condições de céu claro a nublado medidos com piranômetros e estimados com modelos de transferência radiativa foram comparados aos valores pré-programados (*default*) do algoritmo e aplicados em estimativas anuais da radiação solar. Os resultados gerais mostraram que a radiação solar apresenta variações relativas maiores quando estimada para períodos mais curtos, conforme se observou nas frações de máxima/mínima. A amplitude de variação dos níveis de radiação solar foi maior nos terrenos de maior declividade, em maior parte devido à redução dos níveis mínimos, que resulta numa distribuição mais ampla dos valores mais baixos. Um efeito similar foi observado em relação à latitude, com médias mais baixas na região subtropical devidas à ampliação da distribuição nos valores mais baixos, enquanto os máximos mantiveram-se relativamente estáveis. A integração de parâmetros atmosféricos momentâneos em períodos mais longos resultou em valores mais próximos dos parâmetros pré-programados, em respaldo à recomendação dos desenvolvedores do algoritmo. Por outro lado, a sensibilidade dos resultados a estes parâmetros indica a necessidade de parâmetros confiáveis para a exatidão de estimativas em períodos curtos.

Palavras-chave: Energia Solar, Topografia, MDE, SRTM.

ABSTRACT

The distribution of solar radiation incidence on terrain due to variations of relief, latitude, atmospheric conditions and time periods was characterized through calculations on Digital Elevation Model (DEM) with *Solar Analyst*. The typical levels and general patterns of solar radiation variations were observed under daily, monthly, semiannual and annual periods. Three test sites with relief variations from plain to mountainous terrains were chosen, in the equatorial, tropical and subtropical regions of Brazil. Elevation data was taken from Topodata, a database consisted of SRTM 3" (version 1) data, refined to a 1" resolution DEM and basic geomorphometric derivatives covering the complete Brazilian territory. Atmospheric parameters varying from clear sky to overcast conditions taken from piranometer measurements and maps based on radiative transfer models were compared to default levels of *Solar Analyst* algorithm, and applied in solar radiation estimation for the annual period. General results showed shorter periods to present higher relative variations, as observed through maxima-minima ratios. The amplitude of solar radiation levels was larger on higher slope class terrains, mostly due to the decrease of minima, which caused the distribution to spread towards low values. A similar effect was observed to be caused by latitude, with lower average levels in the subtropical area caused by a widening of distribution towards lower values while the maxima remain relatively unchanged. The integration of momentary atmospheric parameters in larger time periods was shown to approximate program default levels, in agreement to the recommendation of programmers. In other hand, the sensitivity of results variations due to atmospheric conditions indicates the need for reliable parameters to properly model solar radiation in short periods.

Keywords: Solar Energy, Topography, DEM, SRTM.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar incidente na superfície terrestre, diretamente ligada ao sistema de balanço de energia, influencia processos de aquecimento do solo, evapotranspiração, fotossíntese e outros. Como variável microclimática, a radiação solar tem alto potencial de aplicação na climatologia (regime térmico), hidrologia (regime hídrico), ecologia, agricultura (produtividade, planejamento de sistemas de irrigação, construções rurais e conforto térmico) e engenharia. Em termos práticos, na aplicação de engenharia, a projeção do teto solar de uma casa exige o conhecimento da incidência da radiação solar no local, e o planejamento da posição de painéis fotovoltaicos requer o conhecimento da incidência de radiação solar direta, pois estes são projetados para estarem voltados para o Sol (GOPINATHAN, 1991). Apesar de pouco explorada, o cálculo da distribuição da radiação solar pelo relevo se aplica na estimativa de temperaturas em escala local (FU; RICH, 2002; XIN; CHENCHAO, 2008), bem como em estudos de evapotranspiração (MÉSZÁROŠ; MIKLÁNEK, 2006) e de crescimento de espécies vegetais em diferentes condições topográficas (BRUNORI *et al.*, 1995), por exemplo.

De maneira geral, a avaliação quantitativa e a variabilidade espacial da radiação solar incidente na superfície utiliza o conhecimento da dinâmica de localização do Sol, das características

topográficas e dos processos de atenuação atmosférica (BUFFO *et al.*, 1972). Devido à dinâmica de localização do Sol, a energia que incide sobre um ponto em uma superfície horizontal do globo terrestre é expressa em função da declinação solar, da latitude e do ângulo horário, que controlam a magnitude da insolação para determinada hora do dia e do ano (OMETTO, 1981). Para Lingamgunta e Veziroglu (2004), as atenuações atmosféricas da radiação solar incidente na superfície ocorrem em virtude das variações na atmosfera, a qual se modifica tanto para épocas do ano como para horas do dia. Por esta razão, para previsão da radiação solar incidente em determinado local é útil definir um padrão das condições do céu como claro, sob nenhuma condição de nuvem.

O total de radiação solar incidente num determinado ponto do terreno depende das fontes de iluminação referentes à radiação solar direta, fortemente influenciada pelo ângulo de incidência, e à radiação difusa, cuja origem é distribuída por toda a abóbada celeste, em função da atmosfera, além da radiação difusa refletida por terrenos vizinhos (DUBAYAH; RICH, 1995). Em condições naturais, a radiação direta prevalece como fração majoritária na distribuição da radiação solar dada pelo relevo.

Uma das possíveis aplicações de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é a estimativa da

radiação solar interceptada pela superfície em diferentes escalas espaciais e temporais, como é realizado no presente estudo, que possibilita a utilização das informações de iluminação para suporte e/ou solução de problemas diversos, como por exemplo, na estimativa de evapotranspiração de culturas e também de temperatura da superfície (DUBAYAH; RICH, 1995; KUMAR *et al.*, 1997). Dentre os recursos de SIG desenvolvidos para estimativa espacializada da radiação solar, o *Solar Analyst* (FU; RICH, 1999) é um programa de reconhecido desempenho, dada sua difusão como ferramenta de SIG comercial, aliada à documentação de seu desenvolvimento e uso. Este recurso utiliza o MDE como dado de entrada principal e cria mapas de distribuição da radiação solar global, direta, difusa e de duração da radiação direta para qualquer período estabelecido (*i.e.*, instantâneo, diário, mensal e anual). Além do MDE, o cálculo requer como entrada parâmetros atmosféricos, a latitude (implícita na georreferência do MDE) e o período de interesse para integração temporal do fluxo de radiação solar.

Os parâmetros atmosféricos requisitados pelo modelo, a porção da radiação difusa (P_{dif}) e a transmitância atmosférica (τ), ambos adimensionais, não são de fácil disponibilidade para as diversas áreas de estudo, principalmente quando se considera áreas montanhosas. Batlles *et al.* (2008), propuseram em seus estudos no Sul da Espanha um método para estimar os parâmetros atmosféricos para o cálculo da radiação solar incidente na superfície. Neste método, a porção da radiação difusa foi obtida de medições radiométricas e correlacionada com os diferentes intervalos de índice de claridade, razão entre a radiação solar global diária incidente no terreno e a radiação solar global diária no topo da atmosfera (IQBAL, 1983). Em seguida, a transmitância atmosférica foi calculada por meio da fração difusa e da radiação solar global medida em estações radiométricas. Em situações onde os parâmetros atmosféricos não são conhecidos, resta permitir a operação do algoritmo com parâmetros *default* do programa. Para fins gerais, os desenvolvedores do algoritmo (FU; RICH, 1999) propõem a utilização de valores modais da porção da radiação difusa e transmitância atmosférica observados em

condições naturais típicas (FU; RICH, 2000), respectivamente iguais a 0,3 e 0,5.

O desenvolvimento do cálculo da radiação solar incidente no terreno a partir de MDE para o mapeamento de sua distribuição na superfície terrestre, somado às possíveis limitações dos recursos e dos dados para estimativa da radiação solar, permite a avaliação e a aplicação da radiação solar como variável climática em função de características físicas (relevo, condições atmosféricas e localização) da área de interesse (VALERIANO, 2011). No entanto, apesar da difusão recente de MDE em cobertura ampla, são poucos os estudos que descrevem a distribuição da radiação solar incidente na superfície terrestre em condições variadas, de modo que os efeitos de possíveis condicionantes de sua variação, bem como suas possíveis interações, permanecem pouco conhecidos. O objetivo deste trabalho consiste em apresentar os níveis típicos e padrões gerais de variação da radiação solar em períodos diário, mensal, semestral e anual em diferentes latitudes, condições de relevo e de atmosfera.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas três áreas localizadas nas latitudes equatorial, tropical e subtropical. As áreas foram escolhidas por englobarem condições topográficas diversas, com classes de declividade de plana a montanhosa, em vertentes dispostas em orientações que variam de Norte a Sul. A área A localiza-se em São Gabriel da Cachoeira, Estado de Amazonas, na bacia hidrográfica do Rio Negro (BRASIL, 2000) com relevo suave a forte ondulado e a altitude de 44m a 1044m (BRASIL, 2008). A área B tem como município de referência Mantena, Estado de Minas Gerais, localizada na bacia do rio Doce (BRASIL, 2000) com relevo forte ondulado a montanhoso e altitude entre 128m e 932m (BRASIL, 2008). A área C está localizada predominantemente no Estado de Santa Catarina, no município de Morro Grande, na bacia hidrográfica do rio Uruguai (BRASIL, 2000). O relevo nesta região apresenta características de ondulado a montanhoso e a altitude varia de 133m a 1386m (BRASIL, 2008). O clima nas áreas A, B e C, pela classificação Köppen, é Af (tropical), Aw (tropical) e Cfa e/ou Cfb (subtropical e temperado), respectivamente (BASTOS, 1982; BRASIL, 2005; PANDOLFO *et al.*, 2002).

O cálculo da radiação solar foi feito a partir do MDE disponível no banco de dados Topodata (BRASIL, 2008), que foi refinado para a resolução de 1" (VALERIANO e ROSSETTI, 2012) a partir da primeira versão dos dados SRTM da América do Sul, então disponíveis na resolução de 3" (USGS, 2003). Dados de

declividade e orientação de vertentes do Topodata foram utilizados para análises conjuntas da relação da radiação solar anual calculada e o relevo. As três áreas de estudo foram delimitadas em quadriculas de 900x900 células (*pixels*) de dados do Topodata, o que corresponde a aproximadamente 27x27 quilômetros (Figura 1).

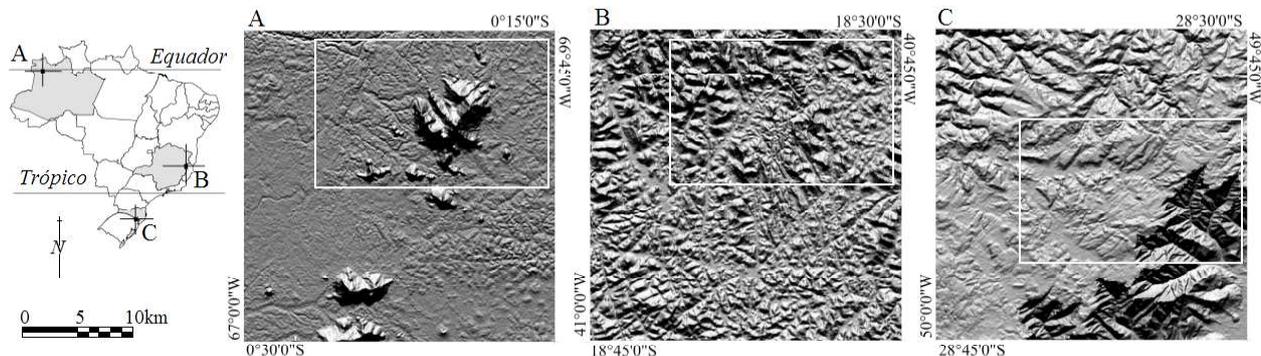


Fig. 1 - Localização e relevo sombreado (Sol de Norte, a 45° de elevação e MDE com exagero vertical de 3x) das áreas de estudo. Em retângulos brancos estão assinaladas as áreas apresentadas em detalhe nas Figuras 2, 3 e 4.

Para efeito de simplificação, nos testes gerais foram adotados os parâmetros atmosféricos *default* do *Solar Analyst*, porção da radiação difusa (P_{dif}) de 0,3 e transmitância atmosférica (τ) de 0,5. Estes caracterizam uma condição de atmosfera definida como *clear sky* (“céu claro”) por Fu e Rich (2000). Nos ensaios especificamente relacionados às variações das condições atmosféricas foram testados parâmetros atmosféricos determinados com medições (piranômetros) realizadas por Alves *et al.* (2013) (Tabela 1). Os autores definiram a porção da radiação difusa e a transmitância atmosférica para o cálculo da radiação solar incidente em Cuiabá-MT, por meio de diferentes intervalos de índice de claridade (IQBAL, 1983). Os dados foram caracterizados momentaneamente no período de agosto de 2006 a junho de 2008 e mostraram uma relação inversa entre os dois parâmetros, uma vez que o aumento da porção difusa proporcionou uma diminuição da transmitância atmosférica. De forma subsidiária, foram observados ainda dados do Atlas de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006) para avaliação e considerações sobre as alternativas de parametrização da atmosfera. A partir da leitura do Atlas de Energia Solar, de maneira indireta, pode-se calcular apenas a

porção difusa, em períodos sazonal e anual, pela razão entre dados da radiação difusa e global.

Tabela 1: Dados de porção de radiação difusa e transmitância da atmosfera da estação meteorológica de Cuiabá, MT

Condição	Porção difusa (P_{dif})	Transmitância(τ)
Céu claro	0,200	0,680
Parcialmente nublado	0,320	0,490
Nublado	0,770	0,130

Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2013).

O modelo de radiação solar espacial *Solar Analyst* (FU; RICH, 1999), implementado no programa *ArcGIS 9.3* (ESRI, 2006), foi utilizado no cálculo da radiação solar. Neste mesmo programa, foi feita a operação de pré-processamento de contraste e a visualização dos dados. Para a execução de análises estatísticas de regressão entre imagens e operações gerais de geoprocessamento foi utilizado o *Idrisi Selva 17.0* (EASTMAN, 2012). Para a migração de dados entre os diferentes programas usados, os arquivos foram convertidos com o uso dos programas *SPRING 4.3.3* (CÂMARA *et al.*, 1996) e *Global Mapper 13.0* (GLOBAL MAPPER LLC, 2011).

Os níveis e padrões da distribuição de radiação solar para os períodos diário (solstício de verão, equinócio e solstício de inverno), mensal (junho, setembro e dezembro), semestral (setembro a março e março a setembro) e anual foram analisados nas diferentes condições de relevo e de latitude. Foi observado o efeito geral das variáveis topográficas, declividade e orientação de vertentes, no cálculo da radiação solar e em seguida, pela análise visual dos padrões de distribuição da radiação solar, os resultados obtidos foram comparados entre si em cada período.

Para avaliar o efeito do relevo na distribuição da radiação solar, foram consideradas as classes de declividade do terreno plano (0% a 3%), suave ondulado (3% a 8%), ondulado (8% a 20%), forte ondulado (20% a 45%), montanhoso (45% a 75%) e escarpado (acima de 75%), segundo a classificação realizada por Embrapa (1999). Os níveis de radiação solar anual foram examinados em conjunto com as classes de declividade do terreno e as características de dispersão dos resultados observadas em cada classe. Para isso, foi feita a consulta dos dados de radiação solar (valores máximos, médios, mínimos e amplitude) em cada classe de declividade do terreno e os resultados registrados em forma de planilha para posterior plotagem dos dados e sua análise. Analogamente, os mesmos procedimentos foram aplicados nos testes dos demais parâmetros, latitude e condição atmosférica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A radiação solar calculada para um dia específico, com parâmetros atmosféricos *default*, variou de 120 a 6830 W.h/m² enquanto que a radiação solar mensal apresentou variações de 3,7 a 206 kW.h/m². A correlação entre a radiação solar diária com o total do mês correspondente apresentou r² acima de 0,982. Por isto, os mapas diários mostraram-se semelhantes aos totais dos meses correspondentes, exceto pela escala das respectivas legendas. De modo geral, a área subtropical apresentou as maiores variações dos níveis de radiação solar em contraste com a área equatorial. No mês de verão (dezembro), apesar da diferença de latitude em relação à declinação solar (para simplificar, declinação local) ser de 5° na área tropical e subtropical igualmente, os maiores níveis de radiação solar foram observados na área subtropical (Figura 2). Em contrapartida, no mês de primavera (setembro), na área equatorial, apesar da declinação local ser quase nula, os níveis de radiação solar foram medianos. Isto demonstra a complexidade do cálculo da radiação solar, em que a declinação local constitui componente importante, mas não determinante na integral dos cossenos do ângulo de incidência. Neste contexto, os maiores níveis de radiação solar verificados na área subtropical em comparação com as outras áreas podem ser atribuídos a maior duração do dia, que no verão aumenta conforme se observam latitudes maiores (SILVA, 2001).

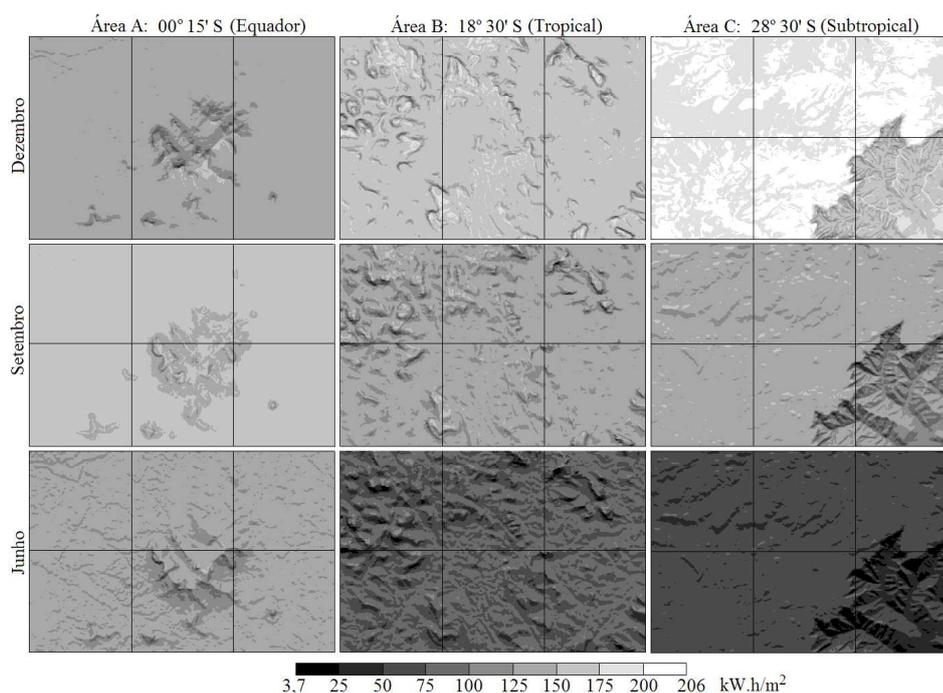


Fig. 2 - Totais mensais de radiação solar para junho, setembro e dezembro.

Os resultados na área A, Equatorial, do mês de setembro (Figura 2) mostram uma distribuição isotrópica em torno das feições do relevo, numa ilustração da distribuição esperada em condições de declinação local nula. Nesta condição, a relação esperada com o relevo em períodos diurnos a anuais é uma função aproximada do cosseno da declividade. Portanto, espera-se que os maiores níveis de radiação solar ocorram nas áreas planas e que sejam reduzidas com a declividade. Em condições pouco diferentes, Kumar *et al.* (1997) observaram no mês de dezembro (que corresponde ao período de menor declinação local na área daquele estudo, a 37,8° S) índices de radiação solar distribuídos de forma mais uniforme em relação às orientações de vertente, e áreas planas associadas aos maiores níveis.

Em contraposição, no mês de inverno (junho, período de maior declinação local nas três áreas) o efeito da orientação de vertentes sobre a distribuição da radiação solar foi mais evidente, o que pode ser verificado pelo forte contraste entre as vertentes nas orientações N e S (Figura 2). Na área subtropical, a declinação solar não atinge a latitude local, portanto este efeito se expressa em todos os períodos, como observado mais intensamente nos resultados obtidos por Tian *et al.* (2001) em área subtropical, a 36,5° S. Nas situações de alta declinação local, deve-se creditar a intensidade do efeito da orientação de vertentes em parte à baixa elevação geral do Sol ao longo de sua trajetória diurna, o que promove maior variação momentânea

dos ângulos de incidência dos raios solares no terreno, favorecendo também o sombreamento. Porém, a alta declinação local está também associada a uma distribuição mais restrita dos ângulos azimutais solares em torno da direção do Equador (ao Norte, para o hemisfério Sul). Essa prevalência em azimute resulta no controle da radiação solar pela orientação de vertentes. Em latitudes além dos trópicos, ocorre em qualquer período de integração ao longo do ano.

O intervalo de variação da radiação solar semestral foi de 56 a 1156 MW.h/m². Os mapas semestrais também apresentaram maior variação dos níveis de radiação solar na área subtropical em contraste com a área equatorial (Figura 3). Na área equatorial (A), a variação de radiação solar foi mais homogênea entre os dois períodos, em virtude da simetria da variação anual de declinação em torno do Equador. Apesar disso, esta área exibe contraste entre vertentes voltadas para Norte e para Sul, cujo sentido se inverte entre o semestre primaveril e o semestre outonal, devido à variação da posição do Sol entre os semestres. Nas áreas tropical (B) e subtropical (C), a radiação solar foi relativamente maior no semestre primaveril, sobretudo na última, onde se observa as maiores diferenças entre os períodos. Este comportamento é explicado tanto pela declinação local média entre os dois períodos como pela variação anual da duração dos dias, mais ampla nas regiões afastadas do Equador, com maior duração no semestre primaveril do que no outonal, como descrito por Geddes (1939) e Silva (2001).

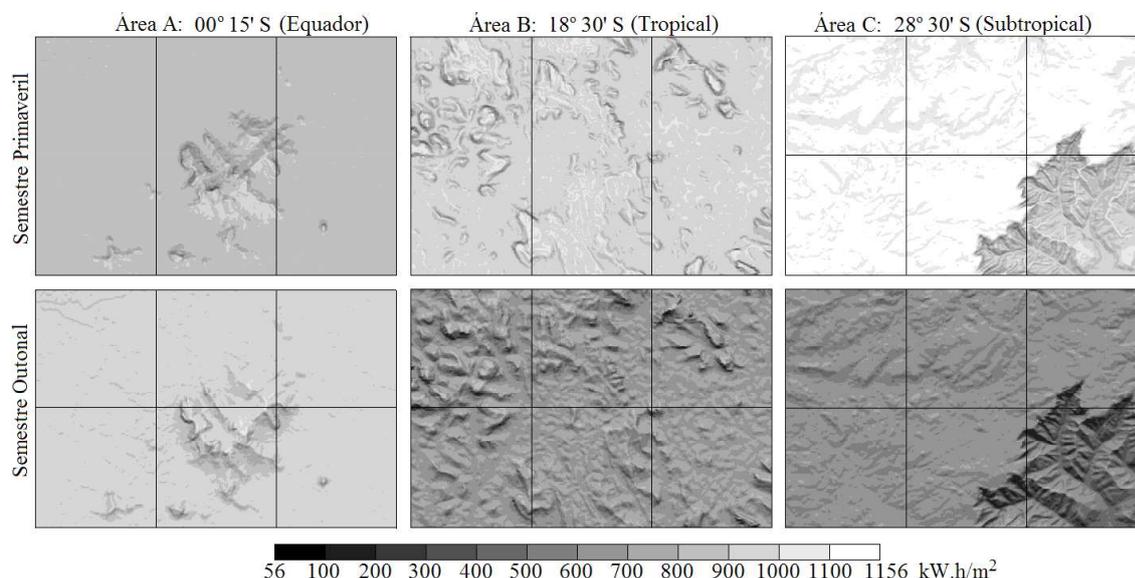


Fig. 3 - Totais semestrais de radiação solar para os períodos primaveril e outonal.

Entre as três áreas de estudo, os totais de radiação solar anual calculados apresentaram variação de 405 a 2002 kW.h/m² (Figura 4). Observa-se que a extensão do período de integração corresponde a uma maior uniformidade dos totais de radiação acumulados: a razão entre os níveis máximos e mínimos de radiação solar para os períodos anual, semestral e diário correspondeu a aproximadamente 5, 20 e 57, respectivamente. As principais diferenças na distribuição dos níveis de radiação anual em comparação a radiação obtida nos períodos diário, mensal e semestral ocorreram em função da dinâmica celeste, que permite uma distribuição da geometria na incidência dos raios solares à medida que se aumenta o período de integração, enquanto em períodos mais curtos a configuração torna-se relativamente particularizada. O caso mais evidente deste efeito pode ser verificado numa comparação entre os resultados semestrais e anuais (Figuras 3 e 4) na área equatorial (A), onde as vertentes Norte e Sul são contrastantes

apenas no período semestral, diferente do padrão associado à declividade observada no período anual. Nas outras áreas também se observa o efeito de maior distribuição da radiação solar, embora seja menos evidente, sobretudo na latitude subtropical, devido à relativa prevalência do disco solar na direção do Equador (ao Norte, para o hemisfério Sul), que contamina o cômputo total com o efeito da orientação de vertentes. Em contraposição, a radiação solar obtida em períodos curtos, até momentâneos, oferece o máximo de variação dos níveis de radiação solar, devido à condição da geometria de iluminação, que se apresenta mais restrita em virtude da configuração dada pelo horário, data e latitude. Neste contexto, a estimativa da radiação solar momentânea com os mesmos dados (MDE Topodata) foi feita para correção do efeito topográfico sobre imagens óticas de satélite e permitiu a melhoria do cálculo de biomassa (BARBOSA *et al.*, 2014) e da classificação do uso e cobertura da terra (MOREIRA; VALERIANO, 2014).

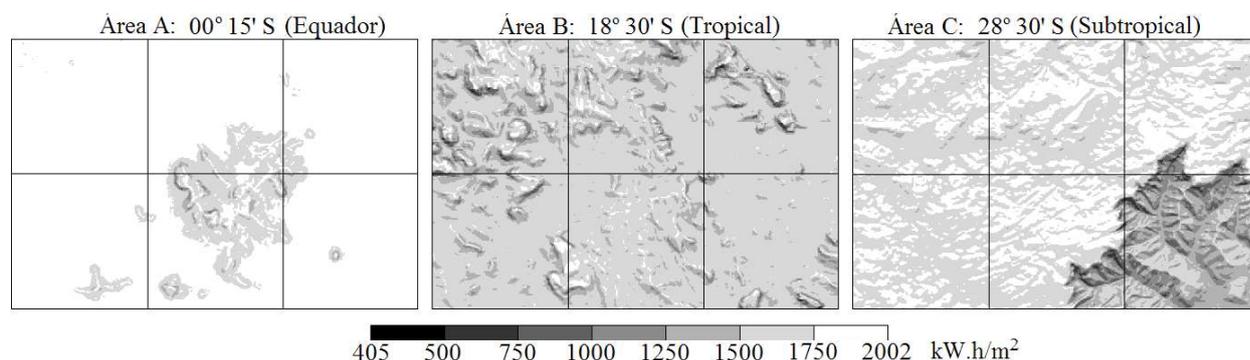


Fig. 4 - Totais anuais de radiação solar.

A amplitude de variação se mostrou crescente de acordo com as classes declividade, como verificado também por Buffo *et al.* (1972) e Kumar *et al.* (1997) (Figuras 5). Os níveis máximos de radiação solar anual incidente no terreno apresentaram aumento discreto em comparação com a forte diminuição dos níveis mínimos. Adicionalmente, a amplitude da radiação solar anual mostrou-se relacionada à latitude. Conforme se observou em relação à condição de pequena declinação local, em que as variações estão relacionadas mais ao cosseno da declividade do que às orientações de vertentes (Figura 4, área A), a área A apresentou amplitude absoluta de radiação solar anual baixa e relativamente estável, com um crescimento mais expressivo somente a

partir de relevo montanhoso. Em comparação, a área C, subtropical, apresentou uma amplitude relativamente alta desde as áreas planas, em níveis atingidos somente a partir de relevo ondulado (declividade maior do que 8%) nas demais áreas (Figura 5). A amplitude relativa ao total de variação observada em terrenos montanhosos na área equatorial é superada desde terrenos forte-ondulados na área subtropical. Em termos de amplitude absoluta, a variação na área subtropical desde terrenos ondulados é equivalente àquela observada na área equatorial somente em terrenos montanhosos. Estas observações permitem verificar a intensificação do efeito do relevo na distribuição dos níveis de radiação solar anual com o aumento da latitude.

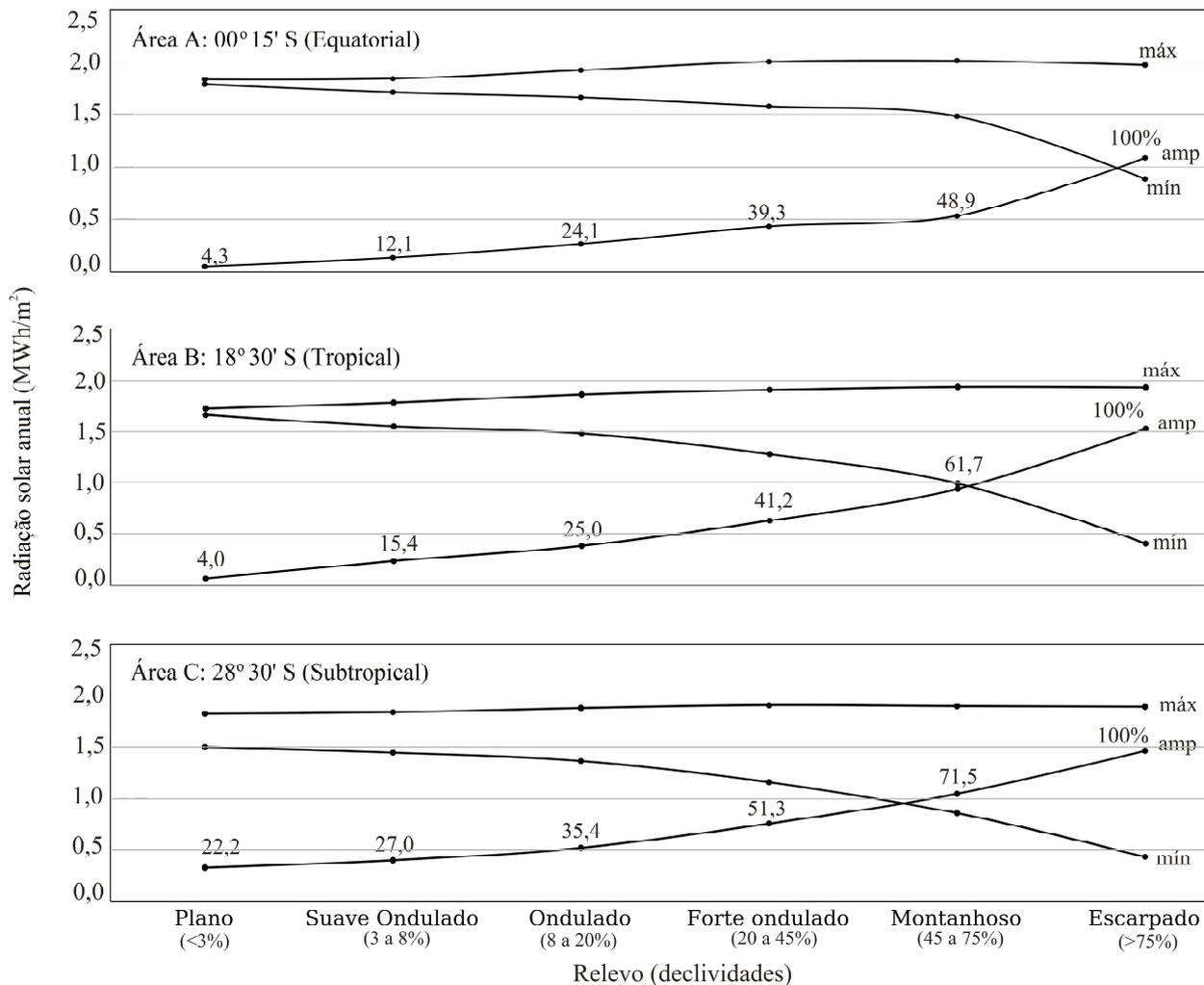


Fig. 5 - Níveis máximos e mínimos de radiação solar anual e amplitude em função do relevo, calculados nas diferentes latitudes.

Comparando-se as distribuições numéricas dos totais anuais de áreas montanhosas e planas (Figura 6), observa-se que as últimas apresentam níveis restritos e decrescentes com a latitude, em padrão parecido com a ausência de relevo, em que a radiação solar anual tende a ser correlacionada ao cosseno da latitude. As áreas montanhosas, por sua vez, apresentam níveis tão mais distribuídos quanto maior a latitude, corroborando observações anteriores. No cômputo anual, a declinação local tende a refletir a latitude, de modo que na área equatorial ocorrem os maiores níveis de radiação solar quando comparado com as outras áreas. Este resultado é também relatado nos estudos de Buffo *et al.* (1972) e Kumar *et al.* (1977), em que os maiores níveis de radiação solar nas diversas vertentes e declividades ocorreram nas menores latitudes. Porém, a comparação da Figura 6 permite acrescentar que as áreas planas representam níveis anuais compatíveis aos máximos observados no Equador, diferente das demais áreas, onde

representam níveis intermediários. Além dessa observação, os histogramas exibem a diferença na redução da radiação solar, devida à latitude, sobre os níveis máximos e mínimos, que se mostra menos intensa para os valores mais altos.

A comparação entre dados atmosféricos (Figura 7) indica que os valores *default* do programa *Solar Analyst* se aproximam do que Alves *et al.* (2013) descrevem como céu parcialmente nublado, apesar da expressão *clear sky* usada por Fu e Rich (2000). Os níveis de transmitância dos demais dados plotados na Figura 7, calculados com a equação de ajuste (2ª ordem), mostram que os dados sazonais, obtidos do Atlas de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006), também se distribuem mais próximos aos de céu parcialmente nublado. Comparando a aplicação dos parâmetros atmosféricos para *clear sky* e parcialmente nublado (Figura 7 e Tabela 1), os resultados médios de radiação solar anual da área subtropical (C) diferiram em apenas 1%.

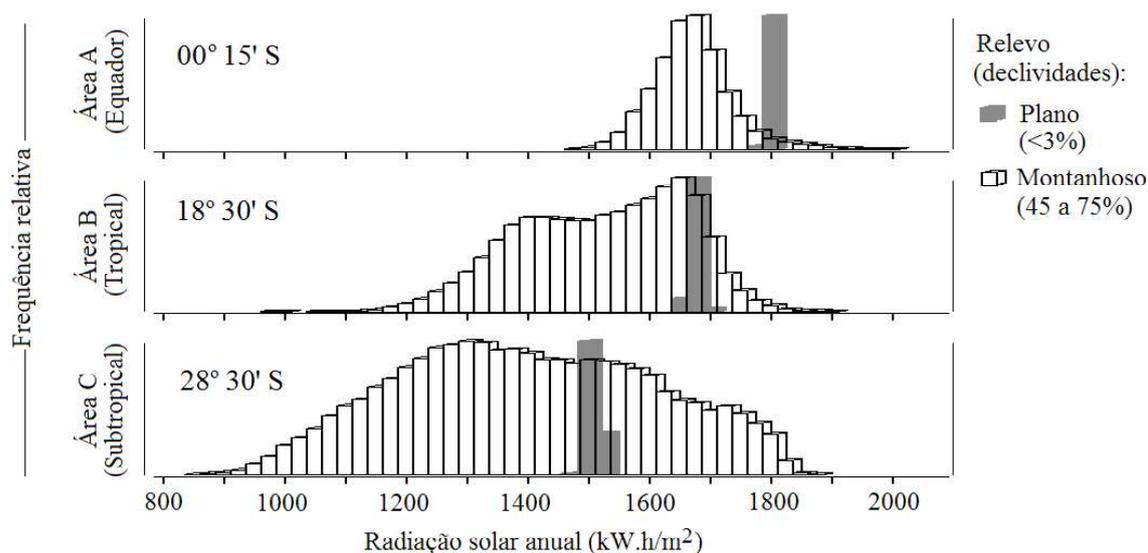


Fig. 6 - Níveis de radiação solar nas condições de relevo plano e montanhoso para as áreas de estudo A, B e C, localizadas nas regiões equatorial, tropical e subtropical, respectivamente.

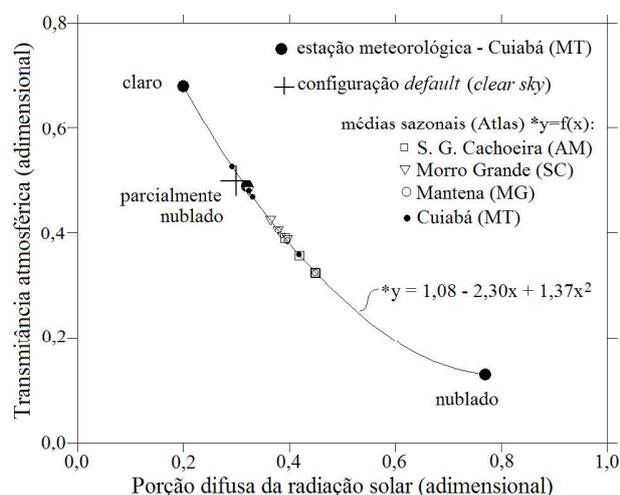


Fig. 7 - Diferentes combinações de dados atmosféricos para o cálculo da radiação solar (transmitância e porção difusa): estação meteorológica de Cuiabá (ALVES *et al.*, 2013); Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006), com transmitância estimada; e parâmetros de configuração *default* do *Solar Analyst* (FU; RICH, 2000).

A ampla variação dos registros da estação meteorológica de Cuiabá (ALVES *et al.*, 2013) para as condições de céu claro, parcialmente nublado e nublado (Figura 7) deve-se, provavelmente, ao curto período das observações, correspondente a 30 minutos. A comparação com a variação entre os dados sazonais da mesma localidade retirados do Atlas sugere que a exatidão de estimativa da radiação solar para períodos menores (determinada hora, dia ou semana) requer maior cuidado com

a qualidade dos dados atmosféricos do que quando se caracterizam períodos maiores ou médias interanuais de períodos específicos do ano. Por outro lado, os parâmetros atmosféricos integrados em médias sazonais ou períodos mais longos tendem a se aproximar dos valores *default* do programa *Solar Analyst*. Tal fato demonstra que o cálculo da radiação solar com parâmetros atmosféricos integrados em períodos sazonais ou anuais origina valores de radiação solar mais estáveis em comparação ao cálculo com parâmetros atmosféricos momentâneos.

Na comparação entre resultados de radiação solar anual obtidos sob diferentes condições atmosféricas para a área C, a parametrização da atmosfera parcialmente nublada resultou numa média igual a 74,5% daquela obtida em dias de céu claro. Esta redução foi relativamente uniforme, pois os mapas mostraram-se altamente correlacionados, com coeficiente de determinação (r^2) de 98,3%. Os parâmetros de céu nublado, por sua vez, resultaram numa média de radiação solar 38,3% daquela obtida para céu claro, e a correlação foi reduzida a $r^2=68,9\%$. Foi verificado que a correlação diminuiu por uma atenuação do efeito do relevo, em que há um decréscimo geral na radiação solar, porém a redução nas áreas menos iluminadas (sob céu claro) é parcialmente compensada pelo aumento da incidência de radiação difusa, advinda da abóbada celeste. Desse mecanismo resulta uma compressão da amplitude (em y) das curvas de variação da radiação solar em relação às

classes de declive (Figura 8), que acompanha a redução dos totais com a nebulosidade. Uma vez que o cômputo anual corresponde a uma distribuição da posição do iluminante, em efeito

análogo, e portanto correlacionado, a uma porção maior de radiação difusa, é esperado que estas correlações sejam ainda mais reduzidas quando se consideram períodos mais curtos.

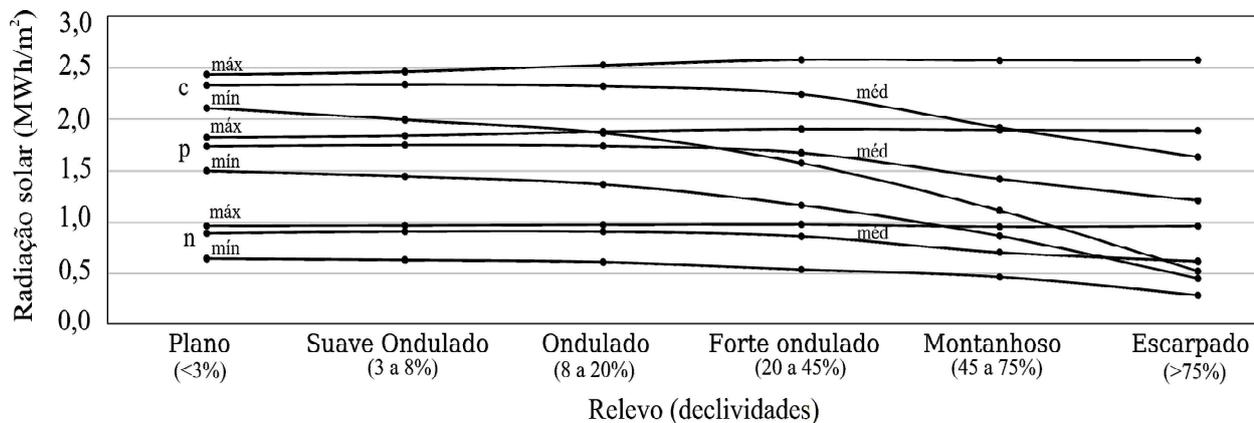


Fig. 8 - Níveis máximos, médios, mínimos e amplitude de radiação solar anual em função do relevo para as condições atmosféricas de céu claro (c), parcialmente nublado (p) e nublado (n), na Área C (subtropical).

A análise temporal, topográfica, geográfica e atmosférica do cálculo e distribuição da radiação solar no terreno permitiu avaliar o potencial de variação da radiação sob diversas condições. Dada a complexidade das interações entre posição (latitude), atmosfera, período e o próprio relevo na distribuição da radiação solar incidente, a observação isolada de cada fator numa determinada situação é pouco passível de extensão às demais circunstâncias demandadas pelas possíveis aplicações. Portanto, a aplicação de MDE à modelagem da radiação solar com algoritmo acoplado a SIG mostrou-se uma forma operacional e necessária para a estimativa da radiação solar incidente. Diante do recente panorama de disponibilidade, cobertura e qualidade de MDEs, a facilidade para o mapeamento relativamente detalhado de sua distribuição representa uma perspectiva importante a ser aplicada na avaliação do potencial natural e no planejamento de atividades que envolvam energia solar.

4. CONCLUSÕES

A modelagem feita neste estudo mostrou uma complexa interação entre os quatro fatores (posição, período, nebulosidade e relevo), de tal forma que a relação entre a radiação solar e um determinado fator se modifica conforme a condição dos demais. O conhecimento da

interação destes fatores possibilita a quantificação da radiação solar incidente no terreno e na identificação de suas possíveis aplicações no meio físico, como por exemplo, nas grandes áreas agrícola (produtividade, planejamento de ambientes de produção, evapotranspiração), biológica, engenharia (painéis fotovoltaicos) e ecologia. Isoladamente, as variações causadas pelo relevo são maiores quanto maior a classe de declividade observada, sob quaisquer condições. A radiação solar diária mostra-se altamente correlacionada com o total estimado para o mês correspondente. No entanto, à medida que se amplia o período de integração, o efeito do relevo é reduzido, dado que a integração de diferentes datas e horários correspondem a uma maior distribuição da trajetória solar pela abóbada celeste. O aumento da nebulosidade causa uma redução importante nos níveis de radiação solar incidente em todo o terreno; a redução é menos intensa nas áreas de menor radiação direta, devido à maior contribuição da porção difusa (portanto mais distribuída) da radiação incidente, o que leva a uma atenuação do efeito do relevo. Os parâmetros atmosféricos podem variar amplamente entre observações momentâneas, o que torna a calibração com dados medidos muito importante para a exatidão de estimativas em períodos curtos. À medida que se integram períodos sazonais a interanuais, os

parâmetros tendem a valores próximos entre si e da configuração padrão do algoritmo usado. O aumento da latitude está associado a uma redução dos níveis gerais de radiação solar anual e a uma intensificação do efeito do relevo. Em períodos semianuais ou mais curtos, deve-se considerar a diferença entre a latitude e a declinação solar representativa do período. Quanto maior este ângulo, mais intenso o efeito do relevo e maior o peso da orientação de vertentes nas variações de radiação solar. Ao contrário, quando a declinação média do período analisado coincide com a latitude local, o efeito da orientação de vertentes, assim como do relevo em geral, é reduzido, restando uma pequena variação em função da declividade, que resulta em maiores níveis de radiação solar nas áreas planas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é parte da dissertação de mestrado da autora principal. Integra o projeto CNPq coordenado pelo co-autor “Modelagem digital do terreno aplicado a estudos do meio físico”, n.o. 305766/2011-2. Os autores agradecem as respectivas bolsas do CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. S.; SILVA, V. A. M. Effects of sky conditions measured by the clearness index on the estimation of solar radiation using a digital elevation model. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 3, n. 4, p. 618-626, 2013.

BARBOSA, J. M.; MELENDEZ-PASTOR, I.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; BITENCOURT, M. D. Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 88, p. 91-100, 2014.

BASTOS, T. X. **O clima da Amazônia Brasileira Segundo Köppen**. EMBRAPA-CPATU, n. 87. 4p. 1982.

BATLLES, F. J.; BOSCH, J. L.; TOVAR-PESACADOR, J.; MARTÍNEZ-DURBÁN, M.; ORTEGA, R.; MIRALLES, I. Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. *Energy Conversion and Management*, v. 49, n. 2, p.

336-345, 2008.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 08 fev. de 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Panorama sobre a desertificação no Estado do Espírito Santo**. Brasília, 2005. 89 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_desertif/_arquivos/panorama_espiritosanto.pdf>. Acesso em: 21 jul. de 2014.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Atlas de Saneamento**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_saneamento.shtm>. Acesso em: 21 jul. de 2014.

BRUNORI, A.; NAIR, P. K. R.; ROCKWOOD, D. L. Performance of two Eucalyptus species at different slope positions and aspects in a contour-ridge planting system in the Negev Desert of Israel. *Forest Ecology and Management*, v. 75, n. 1-3, p. 41-48, 1995.

BUFFO, J.; FRITSCHEN, L. J.; MURPHY, J. L. **Direct solar radiation on various slopes from 0 to 60 degrees north latitude**. Portland: Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 1972, 74p. Disponível em: <http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/pnw_rp142.pdf> Acesso em: 14 jan. de 2014.

CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. *Computers & Graphics*, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 4, p. 405-419, 1995.

EASTMAN, J. R. **IDRISI Selva: Manual**. Versão 17.0. Worcester: Clark University. 2012. 322p.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

- ESRI. **ArcInfo**: Using ArcGIS Desktop. Versão 9.3. Redlands: Environmental Systems Research Institute. 2006. 435 p.
- FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, n. 1-3, p. 25-35, 2002.
- FU, P.; RICH, P. M. **The Solar Analyst user manual**. Versão 1.0. Vermont: Helios Environmental Modeling Institute (HEMI). 2000. 49p.
- FU, P., RICH, P. M. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. In: Annual ESRI User Conference, 19., 1999, San Diego, USA. **Proceedings...** San Diego: ESRI, 1999. 33p.
- GEDDES, A. E. M. **Meteorology**: An introductory treatise. 2. ed. London and Glasgow: Blackie & Son Limited, 1939. 398 p.
- GLOBAL MAPPER LLC. **Global mapper user's manual**. Versão 13.0. Hallowell: Blue Marble Geographics. 2011. 364p. Disponível em: <http://www.globalmapper.com/helpv13/Help_Main.html>. Acesso em: 28 jan. 2015
- GOPINATHAN, K.K. Solar radiation on variously oriented sloping surfaces. **Solar Energy**, v. 47, n.3, p. 173-179, 1991.
- IQBAL, M. **An Introduction to solar radiation**. Toronto: Academic, 1983. 390 p. ISBN (0-12-373752-4).
- KUMAR, L.; SKIDMORE, A. K.; KNOWLES, E. Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, n. 5, p. 475 - 497, 1997.
- LINGAMGUNTA, C.; VEZIROGLU, T. N. A universal relationship for estimating daily clear sky insolation. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n.15-16, p. 2313-2333, 2004.
- MÉSZÁROŠ, I.; MIKLÁNEK, P. Calculation of potential evapotranspiration based on solar radiation income modeling in mountainous areas. **Biologia**, v. 61, n. S19, p. 284-288, 2006.
- MOREIRA, E. P.; VALERIANO, M. M. Application and evaluation of topographic correction methods to improve land cover mapping using object-based classification. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 32, p. 208-217, 2014.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1981. 425p.
- PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P.; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F. V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-Rom.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p.
- SILVA, M. A. V. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Brasília: INMET, 2001. 515p.
- TIAN, Y. Q.; DAVIES-COLLEY, R. J.; GONG, P.; THORROLD, B. W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.109, n.1, p. 67-74, 2001.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS), 2003. **Shuttle Radar Topography Mission documentation: SRTM Topo**. http://edcftp.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/Documentation/SRTM_Topo.txt
- VALERIANO, M. M. Cálculo do fator topográfico de iluminação solar para modelagem ecofisiológica a partir do processamento de Modelos Digitais de Elevação (MDE). In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p.5933 - 5940
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300-309, 2012.
- XIN, Y.; CHENCHAO, X. Terrain-based revision of an air temperature model in mountain areas. In: ZHOU, Q.; LEES, B. (Ed). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Berlin: Springer, 2008. cap. 5, p. 425-442. ISBN (978-3-540-77799-1).