

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO CÉU NA
ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR UTILIZANDO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO**

VANESSA AUGUSTO MATTOS SILVA

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. LUCIANA SANCHES

Co-orientador: Prof. Dr. MARCELO DE CARVALHO ALVES

Cuiabá, MT, Fevereiro de 2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO CÉU NA
ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR UTILIZANDO
MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO**

VANESSA AUGUSTO MATTOS SILVA

*Dissertação apresentada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental da Universidade Federal de
Mato Grosso, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Mestre em
Física Ambiental.*

Orientadora: Prof^a. Dr^a. LUCIANA SANCHES
Co-orientador: Prof. Dr. MARCELO DE CARVALHO ALVES

Cuiabá, MT, Fevereiro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

S586i Silva, Vanessa Augusto Mattos
Influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação / Vanessa Augusto Mattos Silva. – 2011.
xvii, 56 f. : il. ; color. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luciana Sanches.
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-graduação em Física Ambiental, 2011.
Bibliografia: f. 50-56.

1. Radiação solar – Nebulosidade – Influência. 2. Radiação solar – Modelo de estimativa. 3. Radiação solar – Cuiabá (MT).
I. Título.

CDU – 551.521.31(817.2)(043.3)

Ficha elaborada por: Rosângela Aparecida Vicente Söhn – CRB-1/931

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: INFLUÊNCIA DA COBERTURA DO CÉU NA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR UTILIZANDO O MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

AUTORA: VANESSA AUGUSTO MATTOS SILVA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 25 de fevereiro de 2011, pela comissão julgadora:

Luciana Sanches

Profa. Dra. Luciana Sanches - Orientadora
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia- UFMT

[Assinatura]
Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves – Co-orientador
Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - UFMT

[Assinatura]
Prof. Dr. Peter Zeilhofer – Examinador Interno
Instituto de Ciências Humanas e Sociais - UFMT

[Assinatura]
Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo – Examinador Interno
Instituto de Física – UFMT

DEDICATÓRIA

A Deus, pela proteção, a minha mãe, Vânia, minha vó, Lourdes e meu eterno namorado, Thiago, pois são meu porto seguro e fazem a minha vida muito mais feliz.

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir mais uma conquista e sempre iluminando meu caminho.

Ao meu namorado, Thiago, por estar sempre juntinho e me dando forças pra não desanimar. Sempre confiando no meu potencial.

À minha família em especial a minha mãe, Vânia e minha avó, Lourdes, que, com todo amor e apoio, não mediram esforços para que eu conquistasse mais essa etapa da minha vida.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Luciana Sanches, por suas sugestões e comprometimentos sempre enriquecendo este trabalho.

Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, coordenador e amigo, por sua dedicação e apoio, sempre me mostrando que com calma tudo da certo.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, Prof. Dr. Peter Zeilhofer e Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves, meu co-orientador, pelas considerações e conhecimentos compartilhados no decorrer do desenvolvimento desta dissertação.

A todos os meus professores, pelos ensinamentos indispensáveis para mais essa conquista

Ao Professor Msc. Eduardo Cairo Chilleto por permitir a utilização de seu banco de dados, para o desenvolvimento deste trabalho.

À Soilce e ao Cesário pela atenção, colaboração e pelo carinho no decorrer dessa caminhada.

À Celina Martins, valiosa amiga, sempre companheira, compreensiva e torcedora pelas minhas vitórias.

À amiga Evânia Latorraca pela alegria, por me estimular a seguir em frente, por ficar feliz ao ver minhas conquistas e por ter compreendido a vida de estudante.

Aos meus eternos amigos Mima (Paulo Arruda), Fran, Lúcio e Burguês pela amizade e apoio.

A todos os colegas da Física Ambiental, em especial aos membros do grupo Malindi (Carol, Marcos, Thiago e Elis), Erondina, Stéfano, Andréia, Geison, Gonçalo, Vanessa Rakel, Ivan, Ivanete e Osvaldo Borges pelas alegrias e trocas de conhecimentos.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE QUADROS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS	XV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMÁTICA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	2
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. ENERGIA RENOVÁVEL	4
2.2. RADIAÇÃO	5
2.3. ÍNDICE DE CLARIDADE	6
2.4. SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL	8
2.4.1. IMAGENS SRTM	8
2.5. RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DIRETA E DIFUSA COM BASE NO MODELO SPATIAL ANALYST	9
2.5.1. CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRETA	12
2.5.2. CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA	13
2.5.3. CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	15

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO -----	15
3.2. MEDIDAS MICROMETEOROLÓGICAS -----	17
3.3. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS -----	18
3.4. ÍNDICE DE CLARIDADE -----	19
3.5. ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR COM USO DA FERRAMENTA SOLAR RADIATION DA EXTENSÃO SPATIAL ANALYST -----	20
3.5.1. PARÂMETROS E DADOS DE ENTRADA DO MODELO PARA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL -----	21
3.5.2. VARIÁVEIS DE SAÍDA DO MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO -----	23
3.5.3. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO -----	23
3.5.4. SELEÇÃO DE DADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO -----	24
3.6. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DA FERRAMENTA SOLAR RADIATION DA SPATIAL ANALYST -----	25
3.7. APLICAÇÃO DO MODELO VALIDADO EM DOIS PERÍODOS DISTINTOS -----	27
3.7.1. CORRELAÇÃO ENTRE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA ESTIMADA E VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS MEDIDAS EM CAMPO -----	27
3.7.2. PROCESSAMENTO DE DADOS ESPACIAIS -----	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	29
4.1. VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE CLARIDADE -----	29
4.2. VALIDAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ESTIMADA CONSIDERANDO A COBERTURA DO CÉU -----	30
4.3. COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDA E ESTIMADA PARA CADA TIPO DE COBERTURA DO CÉU -----	36
4.4. VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO -----	38
4.4.1. CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA ESTIMADA PELO MODELO EM DOIS PERÍODOS DISTINTOS -----	38
4.4.1.1. <i>Temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar difusa estimada pelo modelo</i> -----	38
4.4.1.2. <i>Correlação entre radiação solar difusa e variáveis meteorológicas</i> -----	41

4.4.2. DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ESTIMADA -----	42
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS -----	47
6. RECOMENDAÇÕES -----	49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	50

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Três fontes diferentes de iluminação em uma rampa. -----10
- Figura 2:** Passos seguidos para o cálculo da radiação solar sobre um MDE utilizando a extensão *Spatial Analyst* no ArcMap. -----10
- Figura 3:** Mapa de sombra sobreposto em um mapa do sol (a) e um mapa do céu (b) para latitude 39° N. As áreas sombreadas são direções obstruídas do céu. As caixas coloridas representam cada setor do sol e do céu e as cores são ilustrativas. -----11
- Figura 4:** Localização do perímetro urbano de Cuiabá-MT. -----15
- Figura 5:** Localização dos pontos de instalação das estações (1) Centro e (2) CPA em imagens QuickBird. -----17
- Figura 6:** Modelo digital de elevação SRTM do perímetro urbano de Cuiabá-MT e os pontos de coleta de dados, estação Centro (circulo cinza) e CPA (quadrado preto). -----23
- Figura 7:** Índice de claridade (Kt), nas estações Centro (a) e CPA (b) de 2006 a 2008. -----30
- Figura 8:** Radiação Global medida e estimada nas estações em condições de céu nublado (x), parcialmente nublado (Δ) e limpo (\bullet). A linha solida representa a relação 1:1. -----33
- Figura 9:** (a) Média mensal do índice de claridade (\pm DP), (b) radiação global medida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e a radiação global estimada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para as condições de céu nublado, parcialmente nublado e limpo em perímetro urbano de agosto de 2006 a junho de 2008. -----37
- Figura 10:** Média diária da temperatura e umidade relativa do ar nas estações Centro e CPA em (a) janeiro (dJ 14 a 31) e (b) julho (dJ 191 a 208) de 2007. -----39
- Figura 11:** Radiação solar global, direta e difusa, estimada pelo *Spatial Analyst* em função de um MDE para a estação Centro em (a) janeiro (dJ 14 a 31), (b) julho (dJ 191 a 208) e estação CPA (c) janeiro e (d) julho de 2007. -----40

Figura 12: (a) Declividade (inclinação do relevo), (b) orientação das vertentes (aspecto) para o perímetro urbano de Cuiabá-MT. -----43

Figura 13: Distribuição espacial da radiação solar global (KWh m⁻²) para a condição de céu limpo em (a) Janeiro e (b) Julho de 2007 no perímetro urbano de Cuiabá-MT. -----45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de dados amostrais (N) e percentuais (%) após a aplicação dos limites para a radiação solar global nas estações automáticas Centro ($\Sigma N=620$) e CPA ($\Sigma N=530$) utilizadas para coleta de dados e os respectivos dias Julianos. -----18

Tabela 2: Dias Julianos (dia do ano) selecionados para validação do modelo para todos os tipos de cobertura do céu na estação Centro e estação CPA. -----25

Tabela 3: Análise de ajuste entre a R_g estimada e medida: número de dados (N), equação linear, coeficiente de Pearson (r) ($p < 0,05$), raiz quadrada do erro médio ($RMSE$), desvio do erro médio (MBE) e coeficiente de Willmott (d). y é o valor estimado e x é o valor medido. -----34

Tabela 4: Matriz de correlação entre a radiação difusa (R_d), temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) nas estações Centro e CPA. Os coeficientes de correlação foram calculados para um intervalo de 18 dias consecutivos de janeiro e julho/2007, com médias diárias. Os valores em negrito apresentam correlação significativa ($p < 0,05$). -----42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Descrição dos parâmetros e dados utilizados como entrada do modelo para estimativa da radiação solar global. -----21

Quadro 2: Descrição dos parâmetros de entrada que não foram alterados do modelo original e dos obtidos por intermédio da observação em dois pontos específicos. --24

Quadro 3: Descrição dos valores dos parâmetros de entrada que não foram alterados e dos valores obtidos por intermédio de observação. -----31

LISTA DE SÍMBOLOS

R_g	- Radiação solar global;
T	- Temperatura do ar (°C);
u	- Velocidade do vento (m s ⁻¹);
UR	- Umidade relativa do ar;
K_t	- Índice de claridade;
R_o	- Radiação no topo da atmosfera (MJ m ⁻² dia ⁻¹);
S	- Constante Solar (W m ⁻²);
$\left(\frac{\bar{D}}{D}\right)^2$	- Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre;
\bar{D}	- Distância média entre a Terra e o Sol;
D	- Distância entre a Terra e o Sol para o dia específico;
W_s	- Ângulo solar (graus);
φ	- Latitude local (graus);
δ	- Declinação solar (graus);
dJ	- dia Juliano (1 a 365);
λ	- Comprimento de onda (cm);
R_d	- Radiação solar difusa;
R_D	- Radiação solar direta;
R_{D(θ,α)}	- Radiação solar direta para cada setor do mapa solar;
R_{d(θ,α)}	- Radiação solar difusa para cada setor do mapa celeste;
θ	- Ângulo zenital;
α	- Ângulo azimutal;
τ	- Transmissividade atmosférica;
SunDur_{0,α}	- Intervalo de tempo representado pelo setor do céu;
SunGap_{0,α}	- Fração de abertura para o setor do mapa solar;
m(θ)	- Comprimento do caminho óptico relativo;

AngIn _{0,α}	- Ângulo de incidência entre o centróide do setor céu e o eixo normal à superfície;
Elev	- Elevação ao nível do mar (m);
G_z	- Ângulo zenital da superfície;
G_a	- Ângulo azimutal de superfície;
P_{dif}	- Proporção do fluxo de radiação global que é difusa;
Dur	- Intervalo de tempo;
SkyGap _{0,α}	- Fração de abertura para o setor do céu;
Weight _{0,α}	- Proporção da radiação difusa;
Rg_N	- Radiação solar global normal;
Div _{azi}	- Número de divisões azimutais no mapa celeste;
θ₁ e θ₂	- Ângulos zenitais delimitadores do setor do céu;
ρ	- Coeficiente de determinação;
β	- Coeficiente angular da reta de regressão;
E_i	- Valores estimados;
O_i	- Valores observados;
N	- Número de observações;
r	- Coeficiente de correlação de Pearson;
d	- Coeficiente de concordância de Willmott.

LISTA DE ABREVIATURAS

CI	- Confidence Interval
CPA	- Centro Político Administrativo
EGM	- Earth Gravitational Model
GIS	- Geographic Information System
MBE	- Mean Bias Error
MDE	- Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model)
RMSE	- Root Mean Square Error
SAD	- South America Datum
SAR	- Synthetic Aperture Radar
SIR	- Spaceborne Imaging Radar
SRTM	- Shuttle Radar Topography Mission
SWERA	- Solar and Wind Energy Resource Assessment
USGS	- U.S. Geological Survey
UTM	- Universal Transverse Mercator
WGS	- World Geodetic System

RESUMO

SILVA, V.A.M. **Influência da cobertura do céu na estimativa da Radiação Solar utilizando modelo digital de elevação.** 2011. 73 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

O sol é a principal fonte de energia da vida na terra. Assim, os dados de radiação solar e os modelos de estimativa são importantes para muitas áreas de pesquisa e aplicações. Muitos parâmetros influenciam a quantidade de energia solar em um ponto específico da superfície da terra entre eles a nebulosidade. Neste contexto, este trabalho analisou a influência da cobertura do céu, sobre a radiação solar global e suas componentes, de 2006 a 2008, estimadas com a *Solar Radiation*, uma ferramenta implementada no software ArcGis[®] 9.2 utilizando um Modelo Digital de Elevação (MDE) (projeto *SRTM*) no perímetro urbano de Cuiabá. A radiação estimada foi parametrizada e validada com medições de dois pontos (Centro e CPA). A radiação solar global medida apresentou sazonalidade característica durante o ano, com maiores valores no período do verão (dezembro a março) e os menores no inverno (junho a setembro). O modelo de estimativa da radiação apresentou melhor aplicabilidade para simular a radiação solar para céu limpo, do que para céu nublado e parcialmente nublado, apresentando melhores ajustes entre os dados calculados e medidos. Foi verificada a correlação da radiação solar difusa calculada pela *Solar Radiation* com variáveis meteorológicas medidas no Centro e no CPA em dias do período úmido e seco de 2007. A comparação entre a radiação solar difusa e as variáveis, temperatura e umidade relativa do ar, apresentou correlação significativa somente no período úmido, em ambas as estações, reforçando a influência da quantidade de material particulado no ar no comportamento das variáveis em estudo e na estimativa com o uso do MDE. Para finalizar, foi observada a distribuição espacial da radiação solar global calculada com os parâmetros validados para o período úmido e seco. Especialmente, para o período úmido e seco, os maiores valores da radiação solar global foram estimados, em janeiro, para as vertentes orientadas ao Sul, Sudeste e Sudoeste e, em julho, as orientadas ao Norte, Nordeste e Noroeste.

Palavras-Chave: radiação de onda curta, imagem SRTM, mapa da radiação.

ABSTRACT

SILVA, V.A.M. **Influence of sky coverage on the estimation of solar radiation by using only digital elevation model.** 2011. 73 f. Dissertation (Master in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

The Sun is the main energy source of the life on the Earth. Thus, solar radiation energy data and models the estimates are important for many areas of research and applications. Many parameters influence the amount of solar energy at a particular standing point of the Earth's surface, cloudiness between them. In this context, this work analysis the influence of sky coverage about a global solar radiation and its components, 2006 to 2008, estimated with the Solar Radiation, a model implemented on ArcGis[®] 9.2 using we use a methodology based on a Digital Elevation Model (DEM) (project SRTM) in the urban perimeter of Cuiabá. The estimated radiation was parameterized and validated with data points (downtown and CPA). The solar radiation measurement presented seasonal characteristics during the year, with higher values in summer (December-March) and lowest in winter (June-September). The model estimation of radiation is best applicable to simulate solar radiation to clear skies, than for simulation in cloudy skies and partly cloudy, giving the best fit between calculated and measured data. We verified the correlation of diffuse solar radiation calculated by the Solar Radiation with meteorological variables measured in downtown and CPA in days of the wet and dry seasons of 2007. The comparison between the diffuse solar radiation and the variables, temperature and relative humidity had significant correlation only in the wet season in both seasons, enhancing the influence of the amount of particulate matter in air in the conduct of the study variables and estimating using the DEM. Finally, we observed the spatial distribution of solar radiation calculated with the parameters validated in the wet and dry season. Spatially, for wet and dry period, the highest values of global radiation were estimated in January, the strands oriented to the south, southeast and southwest, and in July, driven to the North, Northeast and Northwest.

Keywords: shortwave radiation, SRTM image, Radiation map.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos físicos e manutenção de vida na Terra. Essa energia é utilizada para o crescimento das plantas, aquecimento do solo, evapotranspiração, entre outros.

A energia disponível na superfície terrestre não está distribuída de forma homogênea, influenciando assim em todos os elementos do clima.

Em escala global, o gradiente de radiação solar é causado pela geometria de rotação da terra e sua revolução em volta do sol. Numa escala local, a topografia é o fator que mais influencia a distribuição de energia. Sendo modificada pela forma do terreno, inclinação e orientação da face, assim como das sombras formadas pelas feições vizinhas ao terreno. Essa heterogeneidade espacial e temporal de energia solar determina muitos processos da terra que possuem efeito direto sobre a sociedade humana (HOFIERKA & ŠÚRI, 2002).

O Brasil é um país que está localizado no hemisfério Sul, apresentando grande diversidade de ecossistemas e de formas de relevo - tendo tanto regiões montanhosas quanto planas.

O estado de Mato Grosso é cercado por três grandes ecossistemas: a Amazônia (50%), o Cerrado (40%) e o Pantanal (10%), sendo que em Cuiabá a vegetação predominante é o cerrado (SATYAMURTI et al., 1998).

Cuiabá, capital de Mato Grosso, por possuir um relevo pouco acidentado e estar em uma região com grande potencial de energia solar durante todo o ano tem condições extremamente favoráveis para o emprego de energia solar térmica.

A radiação solar global embora possa ser medida diretamente no local nem sempre é viável devido ao custo alto com equipamentos e ao difícil acesso em vários pontos de medição.

A radiação solar pode ser estimada por vários modelos desenvolvidos baseados principalmente em temperatura e insolação, sendo uma das principais limitações desses modelos é que eles exigem calibração no local medido.

Um método alternativo para a obtenção da radiação solar incidente em um determinado local é a utilização do geoprocessamento. Para gerar informações adequadas para a tomada de decisões sobre os problemas urbanos, rurais e ambientais, o geoprocessamento apresenta um enorme potencial, principalmente se baseado em tecnologias de custo relativamente baixo, em que o conhecimento seja adquirido localmente (CÂMARA et al., 2004).

Segundo RODRIGUES (1993, p. 20), geoprocessamento é um conjunto de tecnologias de coleta, tratamento, manipulação e apresentação de informações espaciais voltado para um objetivo específico.

Com isso, o uso de ferramentas do geoprocessamento para estimar a radiação solar em Cuiabá, validados com dados de observação em campo possibilitarão a estimativa da disponibilidade de energia para o seu uso de maneira adequada e sustentável.

1.2. JUSTIFICATIVA

A variação na intensidade da radiação solar possibilita explicar a grande variabilidade no clima de uma região. Uma vez que a radiação influencia as condições de temperatura, movimentação do ar, disponibilidade hídrica para as plantas, entre outros.

O conhecimento da radiação solar para um dado local sem que estes dados estejam extrapolados, possibilita avaliá-lo corretamente, sendo fundamental para estudos agroclimatológicos e um melhor aproveitamento da energia disponível. Para minimizar esse problema é viável estimar a radiação solar de uma região com o uso de um Modelo Digital de Elevação (MDE).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar a radiação solar global incidente por meio de um Modelo Digital de Elevação do perímetro urbano do município de Cuiabá - MT.

De forma específica, esse trabalho tem como objetivos:

- a) determinar a variabilidade da cobertura do céu em dois pontos com dados medidos da radiação solar global em Cuiabá – MT, utilizando uma série de dados de 2006 a 2008;
- b) parametrizar e validar um modelo de estimativa da radiação solar, em função de um MDE;
- c) caracterizar a radiação solar global mensal, medida e estimada para cada tipo de cobertura do céu;
- d) verificar a correlação da radiação solar difusa estimada com o uso do MDE com variáveis meteorológicas medidas para dois pontos de observação de campo em dias do período úmido e seco de 2007.

Assim, pretende-se dar uma contribuição quanto à aplicabilidade de um modelo simples para estudos da radiação solar fornecendo uma informação sobre a disponibilidade desse recurso energético no perímetro urbano do município de Cuiabá.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ENERGIA RENOVÁVEL

A utilização de energia renovável está intimamente relacionada ao desenvolvimento sustentável. Em outras palavras, o desenvolvimento da tecnologia de energia renovável é amplamente visto como importante para o mundo avançar para uma abordagem sustentável à geração de energia (DINCER, 2000; ELLIOTT, 2000). A energia renovável é considerada como uma fonte fundamental para o futuro do desenvolvimento de todos os países. Principalmente devido ao fato de que os recursos energéticos renováveis têm algumas vantagens quando comparado aos combustíveis fósseis (ULGEN & HEPBASLI, 2009). A vantagem das fontes alternativas de geração de energia elétrica, é que são geralmente renováveis e de pouco ou nulo impacto sobre o meio ambiente, podendo promover o desenvolvimento de regiões menos desprovidas de infra-estrutura, utilizando-se de forma racional e sustentável os recursos naturais (BARRETO & ELS, 2004).

O aumento da demanda energética em conjunto com a elevação do custo dos combustíveis fósseis e a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a pesquisa, o desenvolvimento e o incentivo à adoção de fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental. No Brasil, diversos programas de incentivo ao consumo de biocombustíveis, à energia eólica, às pequenas centrais hidrelétricas e à utilização de energia solar encontram-se em implementação (MARTINS et al., 2007).

Segundo EL-SEBAILI & TRABEA (2003), informações sobre radiação solar são fundamentais para aplicações de energia solar, tais como, fotovoltaica, sistemas solares térmicos e projeto solar passivo. Essas informações devem ser confiáveis e prontamente disponíveis para a otimização do projeto e avaliação de desempenho de tecnologias de energia solar para uma determinada localidade. Infelizmente, para muitos países em desenvolvimento, as medições de radiação solar não estão

facilmente disponíveis por não serem capazes de suportar os equipamentos de medição e técnicas envolvidas. Portanto, é necessário desenvolver modelos matemáticos para estimativa da radiação solar em função de outras variáveis mais prontamente disponíveis.

Como a maior parte do território brasileiro está localizado na região inter-tropical, o país apresenta grande potencial para aproveitar a energia solar durante o ano inteiro (PEREIRA et al., 2006).

Além da importância no plano energético atual, a radiação solar desempenha papel importante em diversas áreas da atividade humana como, por exemplo, na meteorologia e na climatologia que são atividades essenciais para o desenvolvimento da atividade econômica de um país com extensão continental como o Brasil. Outras atividades econômicas, como agropecuária e arquitetura, também necessitam do conhecimento da radiação solar incidente na superfície do planeta para o planejamento e obtenção de maior eficiência energética. A energia solar pode ser utilizada em sistemas de irrigação de culturas; de refrigeração de alimentos, vacinas e remédios; aquecimento e iluminação artificial; conforto térmico e iluminação natural em projetos de construção civil, etc (MARTINS et al., 2004).

A topografia é um fator muito importante para determinar a quantidade de energia solar incidente em um local na superfície terrestre, pois a variabilidade de altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento podem afetar direta ou indiretamente os níveis energéticos disponíveis, que por sua vez, interferem nos processos biofísicos de aquecimento do ar e do solo, além dos processos fisiológicos de produção (DUBAYAH & RICH, 1995).

2.2. RADIAÇÃO

Ao se propagar na atmosfera, as ondas eletromagnéticas deparam-se com partículas suspensas, que atuam como espalhadoras e absorvedoras da radiação solar. Por esse motivo, apenas uma fração da radiação incidente no topo da atmosfera atinge a superfície da Terra (DRECHMER, 2005). Devido a este espalhamento, no nível do solo, tem-se no nível do solo, não somente radiação solar direta, na forma de feixe de raios solares paralelos, mas também a radiação difusa. A soma destas componentes denomina-se radiação solar global (RICIERE et al., 2002).

Segundo SOUZA (2009), a radiação solar global, ao atravessar a atmosfera, sofre atenuação pelos fenômenos da reflexão, absorção e difusão. Tais processos se verificam quando os raios de luz interagem com os gases constituintes da atmosfera, com as nuvens e/ou com partículas em suspensão momentaneamente presentes na atmosfera. A reflexão é causada pelas nuvens, enquanto que a absorção é realizada por gases como vapor d'água, gás carbônico, ozônio, etc. O espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões que o comprimento de onda incidente (principalmente nos menores comprimentos de onda do espectro solar) e não-seletivo causado por partículas em suspensão (nuvens e aerossóis).

A energia constituinte da radiação difusa do céu é o resultado do espalhamento dos raios solares incidentes em algum tipo de partícula, suspensa na atmosfera. Dos dois tipos de espalhamentos (seletivo e não-seletivo), um deles é aquele produzido por partículas de raio (r) de tamanho muito pequeno ($r < 0,1 \lambda$), comparado ao comprimento de onda (λ) (Rayleigh) e o outro, aquele produzido por partículas de tamanho maior que o comprimento de onda, isto é ($r > 0,1 \lambda$) (Mie) (VICTORIA, 2008; VIANELLO & ALVES, 2006).

2.3. ÍNDICE DE CLARIDADE

O índice de limpidez ou índice de claridade é obtido da relação entre a radiação solar global, que pode ser medida ou estimada, e a radiação extraterrestre que é a radiação que seria recebida pela superfície terrestre considerando a ausência da atmosfera.

A radiação solar, que chega no topo da atmosfera é essencialmente dependente da latitude e do dia do ano.

Como a intensidade de radiação solar que atinge uma superfície horizontal é variável, devido a atenuação sofrida ao atravessar a atmosfera, a variação do índice de limpidez mostrará o percentual atenuado em função da presença de nuvens, poeira, poluição e outros. Naturalmente que num dia nublado, a intensidade da radiação solar será menor e, conseqüentemente o valor do índice de limpidez também será menor. Ocorrendo o contrário num dia claro ou com céu sem nuvens (MARQUES et al., 2000).

Os tipos de cobertura do céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) são determinados por vários pesquisadores de diferentes formas, no entanto, na maioria dos casos os pesquisadores apresentam os intervalos de K_t para a localidade sem descrever a metodologia utilizada para obtê-los (MARTINS et al., 2009). Segundo MARQUES et al.(2000), com o índice de claridade é possível estabelecer uma indicação do grau de nebulosidade para uma determinada região. É verificado que para índice de claridade (K_t) próximo de um, a radiação incidente na superfície terrestre é muito próxima daquela incidente no topo da atmosfera, ou seja, a radiação não sofre grandes alterações na sua transmissão, indicando a condição de céu como limpo. Já para valores de K_t próximos a zero, a radiação incidente na superfície da terra é considerável menor que àquela incidente no topo da atmosfera, ou seja, a transmissão da radiação solar é afetada pela cobertura do céu, sugerindo céu coberto.

Segundo REINDL et al. (1990), em um estudo que envolveu cinco localidades européias e norte-americanas, classificaram como céu nublado quando $K_t < 0,35$; parcialmente nublado quando $0,35 \leq K_t \leq 0,75$ e céu limpo quando $K_t > 0,75$.

De acordo com JACOVIDES et al. (1996), em um estudo feito em Athalassa, localizada na planície central de Cyprus, os valores de K_t foram $K_t < 0,2$ classificado como céu nublado; $0,2 \leq K_t \leq 0,60$ parcialmente nublado e $K_t > 0,6$ céu limpo.

No Brasil, RICIERY (1998) determinou uma metodologia para obtenção do tipo de cobertura do céu em função do K_t , para a cidade de Botucatu, Estado de São Paulo, por meio de comparação gráfica da radiação global, direta e difusa na incidência horizontal. Observou que, no intervalo de $0 < K_t < 0,3$, as radiações global e difusa são praticamente iguais e a radiação direta está próxima de zero, classificando o céu nessas condições como nublado. Para, $0,3 \leq K_t \leq 0,65$ as radiações difusa e direta mantêm-se próximas, denominando de céu parcialmente nublado. Para $K_t > 0,65$, a radiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo nessas condições o dia foi classificado como céu limpo.

2.4. SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

O sensoriamento remoto orbital é um sistema de coleta de dados sobre o ambiente terrestre a partir de sensores à bordo de satélites. O aprimoramento constante dessa tecnologia tem possibilitado a disponibilização e um grande avanço no uso de imagens digitais por parte de profissionais de diversas áreas (MARINO JUNIOR, 2006).

Ao interagir com a superfície terrestre, a radiação eletromagnética pode sofrer absorção, reflexão e transmissão, dependendo das propriedades desta superfície e do intervalo espectral considerado. Os comprimentos de onda nos quais a radiação é refletida e transmitida são utilizados na identificação dos alvos em sensoriamento Remoto (GALO et al., 2002).

2.4.1. Imagens SRTM

O modelo digital tri-dimensional da Terra é conhecido como Modelo Digital de Elevação (MDE), do inglês *Digital Elevation Model* (DEM), pode ser gerado por meio de vários produtos de sensoriamento remoto ou técnicas de análise espacial.

Interferometria para dados *Synthetic Aperture Radar* (SAR) é uma técnica relativamente nova, a qual permite o processamento de pares de imagens radar para obtenção de um modelo digital de elevação acurado. Neste processo, o par de imagens é adquirido a partir de duas posições distintas da antena, espacialmente separadas por uma distância conhecida como linha-base (*base line*). Por serem obtidas de duas posições distintas, as imagens não possuem uma superposição perfeita, sendo necessário um corregristo antes de qualquer outra utilização. Quando as antenas são montadas na mesma plataforma as imagens podem ser geradas em uma única passagem. Caso seja utilizada somente uma antena, devem ser realizadas duas passagens (OUARZEDDINE, 2002).

O Projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) representa a primeira experiência de interferometria a bordo de uma nave espacial. Esta nave levou em seu compartimento de carga um equipamento SAR interferométrico, operando nas bandas C e X. No período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, a bordo do *Space Shuttle Endeavour*, numa altitude de vôo de 233 km e uma inclinação de 57°, um conjunto composto por duas antenas coletou 14 Terabytes de dados que permitiram a

avaliação do perfil de altitude para criação de modelo digital tri-dimensional da Terra entre as latitudes 60°N e 56°S (KOCH et al., 2002; CHIEN, 2000).

Este arranjo de antenas consiste em uma principal, americana do sistema *Spaceborne Imaging Radar* (SIR) SIR-C operando na banda C com comprimento de onda, $\lambda = 6,0$ cm, colocada no compartimento de carga da nave com função de transmissão e recepção e outra antena secundária, germano-italiana do sistema X-SAR operando na banda X com comprimento de onda, $\lambda = 3,1$ cm, com função de recepção, colocada na extremidade de uma haste de 60 metros de comprimento fora da nave, configurando a linha de base interferométrica que garante a observação a partir de dois pontos ligeiramente diferentes (KOCH et al., 2002).

Os arquivos MDE, gerados a partir de radar, estão disponíveis gratuitamente em USGS (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>) com resolução 90 x 90 metros, com *datum* horizontal WGS84 e *datum* vertical WGS84/EGM96, com acuidade vertical relativa na ordem de 5 metros (SMITH & SANDWELL, 2003; ROSEN et al. 2001a, b).

2.5. RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL, DIRETA E DIFUSA COM BASE NO MODELO SPATIAL ANALYST

Em uma escala global, os gradientes latitudinais da insolação causados pela geometria da rotação da Terra e da revolução em torno do Sol são bem conhecidos (FU & RICH, 1999). Nas escalas da paisagem, a topografia é um fator chave que determina a variabilidade espacial da radiação. Variação em elevação, orientação (inclinação e aspecto), e sombras de características topográficas afetam a quantidade de radiação recebida pelos diferentes locais. Esta variabilidade espacial também muda com o tempo do dia e época do ano. As ferramentas de análise de radiação solar, no ArcGIS, extensão *Spatial Analyst*, disponível gratuitamente, permite mapear e analisar o efeitos do sol sobre uma área geográfica para períodos específicos. Permite estimativas em função de efeitos atmosféricos, latitude e altitude local, declividade (inclinação) e direção de bússola (aspecto), diárias e mudanças sazonais do ângulo do sol e efeitos de sombras projetadas por topografia circundante, conforme a Figura 1 em que se verifica três fontes diferentes de iluminação em uma rampa: irradiância (1) direta do Sol, (2) irradiância difusa do céu, onde uma porção

do céu pode ser obstruída; e, (3) difusa e radiação direta refletida do terreno vizinho (GASTLI & CHARABI, 2010; DUBAYAH & LOCHEL, 1997).

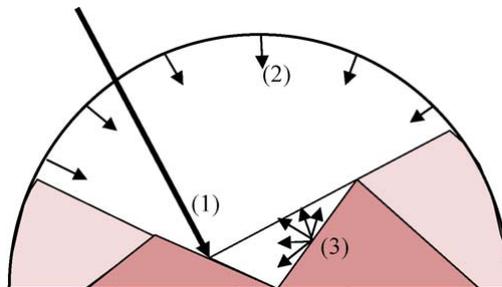


Figura 1: Três fontes diferentes de iluminação em uma rampa.

Fonte: DUBAYAH & LOCHEL (1997).

Segundo FU & RICH (1999) as ferramentas de radiação solar do ArcGIS *Spatial Analyst* permitem estimar os valores de radiação solar: global, direta e difusa, podem efetuar cálculos para pontos específicos ou para toda área geográfica, por meio de seis etapas, conforme descrito na Figura 2, porém não incluem radiação refletida no cálculo da radiação total. Portanto, a radiação total é calculada como a soma da radiação direta e difusa.

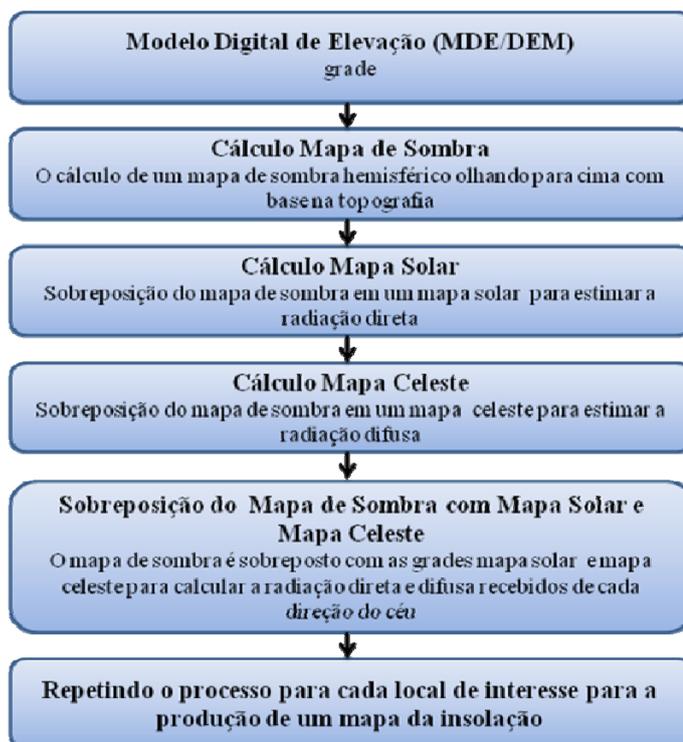


Figura 2: Passos seguidos para o cálculo da radiação solar sobre um MDE utilizando a extensão *Spatial Analyst* no ArcMap.

Fonte: GASTLI & CHARABI (2010), tradução nossa.

Para a estimativa da radiação solar direta e difusa, o modelo cria um mapa de sombra (*viewshed*), mapa solar (*sunmap*) e um mapa celeste (*skymap*). A seguir, estão descritas as principais características para o cálculo da radiação solar global (FU & RICH, 2000).

A distribuição angular de visibilidade do céu versus obstrução é denominado mapa de sombra (*viewshed*). Esta é semelhante à vista de baixo para cima por meio de fotografias hemisféricas (olho de peixe). O mapa de sombra é calculado em um determinado conjunto de direções em torno de um local de interesse, a determinação do ângulo máximo de obstrução, por vezes referido como ângulo de horizonte eficaz, em cada direção (DOZIER & FREW, 1990).

A grade que exhibe a posição aparente do sol variando com o tempo, com setores do céu discretos definidos pela posição do sol em intervalos durante o dia (horas) e a época do ano (dias ou meses) é denominada mapa solar (*sunmap*). Cada setor tem um valor único, enfim, a radiação solar proveniente de cada setor é calculada separadamente, e o mapa de sombra é sobreposto ao mapa solar para o cálculo da radiação direta (Figura 3a).

A grade que representa uma visão hemisférica de todo o céu dividido em uma série de setores definidos pelo zênite do céu e os ângulos de azimute é denominado mapa celeste (*skymap*). Cada setor é atribuído um valor de identificador único. Ela é criada para calcular a radiação difusa para um determinado local, com base na direção do céu (zênite e azimute) ao ser sobreposta pelo mapa de sombra (Figura 3b).

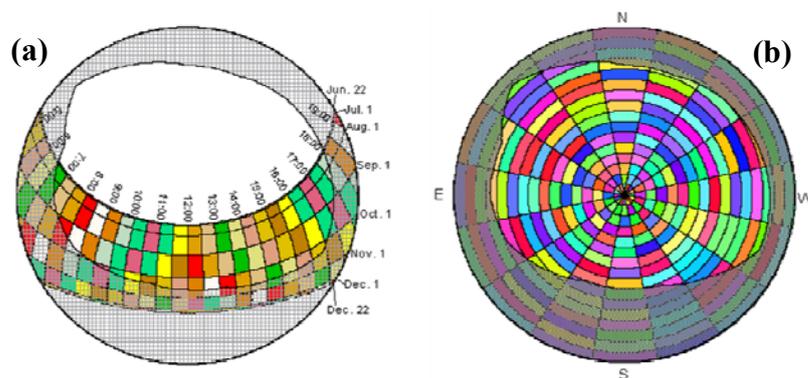


Figura 3: Mapa de sombra sobreposto em um mapa do sol (a) e um mapa do céu (b) para latitude 39° N. As áreas sombreadas são direções obstruídas do céu. As caixas coloridas representam cada setor do sol e do céu e as cores são ilustrativas.

Fonte: FU & RICH (2000).

2.5.1. Cálculo da radiação solar direta

Para cada setor do mapa solar que não está completamente obstruído, a radiação solar é calculada com base na fração de abertura, posição do sol, atenuação atmosférica e do terreno que recebem orientação da superfície. A *Solar Analyst* implementa um modelo simples de transmissão (RICH 1989, 1990, PEARCY 1989, MONTEITH AND UNSWORTH 1990, GATES 1980, LIST 1971), que começa com a contas de Constante Solar e os efeitos atmosféricos com base na transmissividade e profundidade de massas de ar.

A radiação direta total (R_D) para um determinado local é a soma da radiação direta ($R_{D(\theta,\alpha)}$) de todos os setores do mapa solar (equação 1).

$$R_D = \sum R_{D(\theta,\alpha)} \quad (1)$$

A radiação solar direta em cada setor do mapa solar (R_{DS}), com ângulo zenital (θ) e ângulo azimutal (α) do centróide do setor do céu é calculada pela equação 2:

$$R_{D(\theta,\alpha)} = S\tau^{m(\theta)}\text{SunDur}_{\theta,\alpha}\text{SunGap}_{\theta,\alpha} \cos(\text{AngIn}_{\theta,\alpha}) \quad (2)$$

Em que, S representa a Constante Solar (1367W m^{-2}); τ é a transmissividade para a direção do zênite; $m(\theta)$ é o comprimento do caminho óptico relativo, medido em percentagem em relação ao comprimento do caminho do zênite (equação 3); $\text{SunDur}_{\theta,\alpha}$ é o intervalo de tempo representado pelo setor do céu; $\text{SunGap}_{\theta,\alpha}$ é a fração de abertura para o setor do mapa solar; $\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$ é o ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e o eixo normal à superfície (equação 4);

O comprimento do caminho óptico relativo ($m(\theta)$) é determinado pelo ângulo zenital solar e altitude acima do nível do mar. Para ângulos zenitais menores que 80° , pode ser calculado pela equação 3.

$$m(\theta) = \text{EXP}(-0.000118\text{Elev}-1.63810^{-9}\text{Elev}^2) / \cos(\theta) \quad (3)$$

Em que, θ é o ângulo zenital; Elev é a elevação do nível do mar, em metros.

O efeito da orientação da superfície é levado em conta multiplicando pelo cosseno do ângulo de incidência. Ângulo de incidência ($\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$) entre a superfície

de intercepção e um determinado setor do céu com o ângulo zenital e ângulo azimutal do respectivo centróide é calculado pela equação 4.

$$\text{AngIn}_{\theta,\alpha} = \text{acos} [\cos(\theta)\cos(G_z) + \text{sen}(\theta)\text{sen}(G_z) \cos(\alpha - G_a)] \quad (4)$$

Em que, G_z é o ângulo zenital da superfície; G_a é o ângulo azimutal da superfície.

2.5.2. Cálculo da radiação solar difusa

Para cada setor do céu a radiação difusa é calculada em seu centróide ($R_{d(\theta,\alpha)}$), integradas ao longo do intervalo de tempo, e corrigido pela fração de abertura e ângulo de incidência por meio da equação 5.

$$R_{d(\theta,\alpha)} = R_{g_N} \cdot P_{\text{dif}} \cdot \text{Dur} \cdot \text{SkyGap}_{\theta,\alpha} \cdot \text{Weight}_{\theta,\alpha} \cdot \cos(\text{AngIn}_{\theta,\alpha}) \quad (5)$$

Em que; R_{g_N} é a radiação global normal (equação 6); P_{dif} é a proporção do fluxo de radiação global que é difusa; Dur é o intervalo de tempo para análise; $\text{SkyGap}_{\theta,\alpha}$ é a fração de abertura (parte do céu visível) para o setor do céu; $\text{Weight}_{\theta,\alpha}$ é a proporção de radiação difusa em um dado setor do céu em relação a todos os setores (equação 7); $\text{AngIn}_{\theta,\alpha}$ é o ângulo de incidência entre o centróide do setor do céu e o eixo normal à superfície.

A radiação global normal (R_{g_N}) pode ser calculada pela soma da radiação direta de todos os setores (incluindo setores obstruídos) sem correção para o ângulo de incidência, em seguida, corrigindo a proporção de radiação direta, o que equivale a $1 - P_{\text{dif}}$ (equação 6).

$$R_{g_N} = (S \sum (\tau^{m(\theta)})) / (1 - P_{\text{dif}}) \quad (6)$$

Para o modelo de céu difuso uniforme, $\text{Weight}_{\theta,\alpha}$ é calculada baseada na derivação de RICH (1989) pela equação 7.

$$\text{Weight}_{\theta,\alpha} = (\cos(\theta_2) - \cos(\theta_1)) / \text{Div}_{\text{azi}} \quad (7)$$

Em que, θ_1 e θ_2 são os ângulos zenitais delimitadores do setor do céu; Div_{azi} é o número de divisões azimutais no mapa celeste.

A radiação solar difusa total para o local (R_d) é calculada como a soma da radiação solar difusa ($R_{d(\theta,\alpha)}$) de todos os setores *skymap* (equação 8).

$$R_d = \sum R_{d(\theta,\alpha)} \quad (8)$$

2.5.3. Cálculo da radiação solar global

Radiação Global (R_g) é calculada como a soma da radiação direta e radiação difusa de todos os setores (equação 9).

$$R_g = R_{D(\theta,\alpha)} + R_{d(\theta,\alpha)} \quad (9)$$

FU & RICH (2000), desenvolveram o algoritmo do *Solar Analyst* para ter um modelo geométrico da radiação solar a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e utilizaram essa ferramenta nos arredores do *Rocky Mountain Biological Laboratory* para estimar os mapas de insolação e confrontá-los com dados de temperatura média diária do solo e concluíram que essa ferramenta pode ajudar a compreender os padrões de insolação para utilizar os recursos da terra de maneira mais eficiente.

MARTÍNEZ-DURBÁN et al. (2009) utilizaram a ferramenta *Spatial Analyst* para estimar a radiação global diária em todos os tipos de condições de céu, utilizando o índice de claridade, para 14 pontos com estações medindo essa variável localizadas no norte do Parque Natural da Sierra Nevada, Granada, Espanha. Estimaram com o uso de um MDE e imagens de satélite e depois esses dados foram comparados com os resultados medidos e tiveram melhor desempenho os estimados com uso do MDE introduzindo o índice de claridade os resultados ao considerarem o índice de claridade foi um RMSE de 18%.

GASTLI & CHARABI (2010), estimaram a radiação global para Omã, situado no extremo leste da Península Arábica, com o uso da *Spatial Analyst* tendo como dado de entrada um MDE em 2007 e os mapas gerados representaram a variabilidade da radiação em função do relevo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

A área estudada compreende o perímetro urbano do município de Cuiabá (15°10', 15°50'S e 54°50', 58°10'O), capital do estado de Mato Grosso (Figura 4). O município possui uma área de 3224,68 km², sendo que a área urbana ocupa 251,94 km² e a área rural ocupa 2972,74 km². Limita-se ao norte, com os municípios de Acorizal, Rosário Oeste e Chapada dos Guimarães, ao leste com Chapada dos Guimarães, ao sul com Santo Antônio de Leverger e a oeste com Várzea Grande e Acorizal (MAITELLI, 1994). Está a uma altitude média de 165 m acima do nível do mar, variando em sua área urbana de 146 a 250 m (CUIABÁ, 2004).

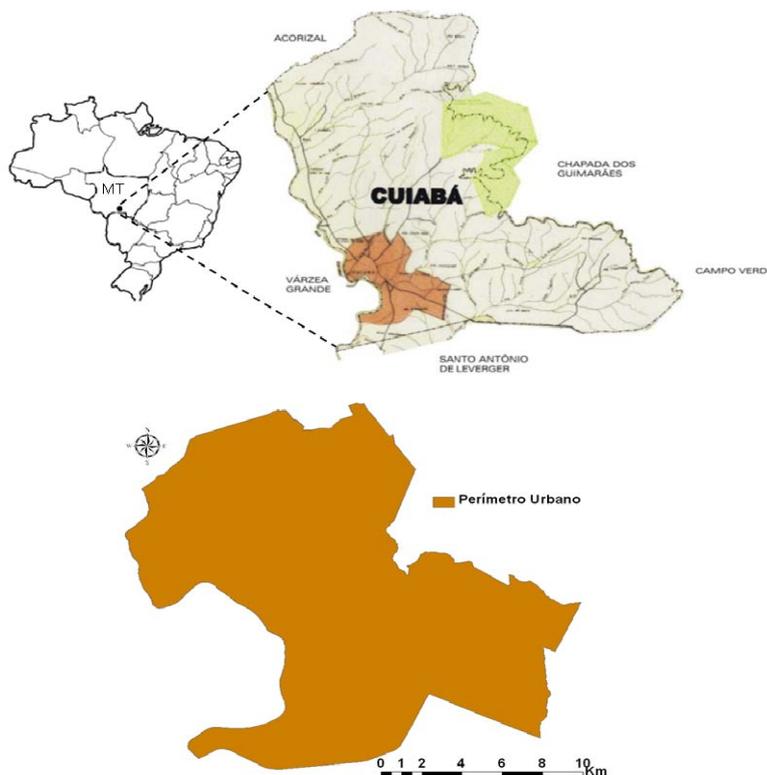


Figura 4: Localização do perímetro urbano de Cuiabá-MT.

Fonte: Adaptado de CUIABÁ (2004).

O clima é do tipo Aw (tropical seco e úmido), segundo classificação de Köppen. Apresenta a temperatura elevada, chegando aos meses mais quentes a temperatura média de 39° C, com duas estações bem definidas: uma seca (outono-inverno) e outra chuvosa (primavera-verão). A estação seca vai de maio a agosto e a chuvosa de setembro a abril. A temperatura média anual é de 27° C, média máxima diária é de 39° C em agosto e média mínima diária em torno de 11° C em julho (INMET, 2005).

A umidade relativa do ar tem média anual de 70%, no inverno a umidade relativa do ar diminui, chegando a níveis de 12%, ocorrendo então a estação seca. (INMET, 2005). O índice pluviométrico diferencia-se de forma significativa durante as estações, pois em sua maioria o inverno é bastante seco e o verão muito chuvoso. A média na região é de 1500 mm/ano (SAMPAIO, 2006).

Segundo DUARTE (1995), em Cuiabá a direção do vento predominante é N (Norte) e NO (Noroeste) durante boa parte do ano, e S (Sul) no período de inverno.

A zona urbana está localizada em uma depressão, denominada Baixada Cuiabana, e circundada ao norte e ao leste pela Chapada dos Guimarães (MAITELLI & VILANOVA, 2009).

Para o desenvolvimento deste estudo foram instaladas estações meteorológicas em dois pontos nomeadas como estação Centro e estação CPA que representam diferentes características de construção urbana (densidade construtiva).

O primeiro ponto, estação Centro, localizado na Rua Manoel Ferreira de Mendonça, nº 260, Bairro Bandeirantes, no centro do município de Cuiabá, (15°36'1"S; 56°5'29"O, altitude 187m), com alta densidade construtiva, entorno totalmente urbanizado com vegetação esparsa, o uso do solo é predominantemente comercial. Possui em sua morfologia, edificações de um e dois pavimentos, prédios isolados com mais de sete pavimentos, área comercial, com pequenas propriedades residenciais intercambiadas, ruas pavimentadas e baixo coeficiente de permeabilidade do solo (MAITELLI, 1994; OLIVEIRA et al., 2009) (Figura 5-código 1).

Já o outro ponto, estação CPA, localizado na Rua C, Secretaria Estadual de Planejamento, Centro Político Administrativo, (15°33'59"S; 56°4'30"O, altitude

239m) com entorno com poucas construções destinado a edifícios governamentais e próximo a lagoa Paiaguás (Figura 5 – código 2).

A distância em linha reta entre as estações foi de 4 Km.

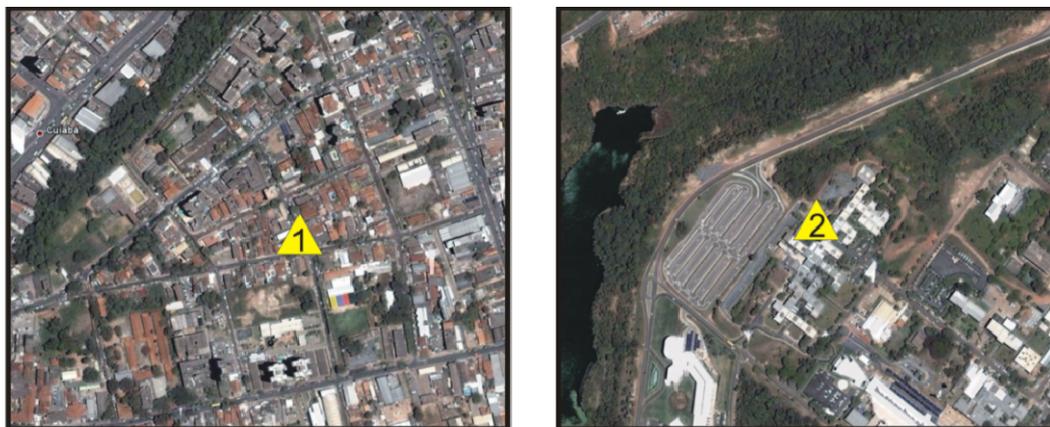


Figura 5: Localização dos pontos de instalação das estações (1) Centro e (2) CPA em imagens QuickBird.

Esses pontos foram selecionados com a finalidade de confrontar os dados de radiação solar global coletados pelas estações (dados médios diários) com os dados estimados pela ferramenta *Solar Radiation* da extensão *Spatial Analyst* do software SIG ArcGIS® 9.2 a fim de validar os dados estimados. A seleção dos dias para validação foi de acordo com o índice de claridade que determina o tipo de cobertura do céu, metodologia de RICIÉRE (1998).

3.2. MEDIDAS MICROMETEOROLÓGICAS

Para medição de variáveis micrometeorológicas - temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (u), radiação solar global (Rg) - foi utilizada uma estação meteorológica móvel (WM 918, Davis Instruments, Hayward, Califórnia, USA) em cada ponto.

Os dados adquiridos foram armazenados por um sistema de aquisição de dados, (Datalogger e console Vantage Pro2 do Fabricante Davis Instruments), programado para armazenar os dados a cada 30 minutos nos anos de 2006, 2007 e 2008.

A estação Centro foi instalada a 4,20m de altura, e a estação CPA a 10,50m de altura, por questões de segurança.

3.3. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS MEDIDOS

Para a análise da radiação solar global medida foi adotado valores limites mínimos e máximos com a finalidade de limpar os dados espúrios. O limite mínimo e máximo foram, respectivamente, 0 e 1300 W m^{-2} .

Os dados descartados apresentavam ausência de medição ou valores fora do limite adotado, a fim de evitar o comprometimento das estimativas dependentes da qualidade do dado medido em campo. O valor mínimo dessa variável (N) foi superior a 18% do conjunto de dados completos após a aplicação dos descartes de dados espúrios, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Número de dados amostrais (N) e percentuais (%) após a aplicação dos limites para a radiação solar global nas estações automáticas Centro ($\Sigma N=620$) e CPA ($\Sigma N=530$) utilizadas para coleta de dados e os respectivos dias Julianos.

Estação	Ano	N	Dados (%)	dJ	
Centro	2006	097	26,57	224 a 227	
				229 a 321	
	2007	352	96,44	014 a 365	
	2008	171	46,72	001 a 171	
	CPA	2006	068	18,63	278 a 331
					352 a 365
2007		365	100,00	001 a 365	
2008		097	26,50	001 a 058	
				060 a 098	

3.4. ÍNDICE DE CLARIDADE

O índice de claridade (K_t) determinou a cobertura do céu, definido como a razão entre a radiação solar incidente (R_g) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e a radiação no topo da atmosfera (R_o) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (equação 10).

$$K_t = \frac{R_g}{R_o} \quad (10)$$

O índice de claridade (K_t) foi determinado pelo tipo de cobertura do céu de acordo com a metodologia de RICIERI (1998), em que no intervalo de $0 < K_t < 0,3$, as radiações global e difusa são praticamente iguais e a radiação direta está próxima de zero, classificando o céu nessas condições como nublado. Para $0,3 \leq K_t \leq 0,65$, as radiações, difusa e direta, mantêm-se próximas denominando de céu parcialmente nublado. E entre $0,65 < K_t < 1,0$, a radiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo nessas condições denominou de céu limpo.

A radiação no topo da atmosfera (R_o) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi calculada por meio da equação 11. Segundo VIANELLO & ALVES (2006), a latitude local e o tempo são os dois fatores que fazem essa variável variar.

$$R_o = \frac{S}{\pi} 0,0864 \left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 \left\{ \left[\frac{\pi}{180} W_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \right] + [\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(W_s)] \right\} \quad (11)$$

Em que, S representa a Constante Solar (1367 W m^{-2}), $0,0864$ é o fator para converter W m^{-2} para MJ m^{-2} , $\left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2$ é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, em que \bar{D} é a distância média entre a Terra e o Sol e D representa a distância para o dia específico W_s é o ângulo solar (graus), φ é a latitude local (graus) e δ é a declinação solar (graus).

Para calcular $\left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2$ usou-se a equação proposta por Spencer (1971) para quantificar a energia solar que chega na Terra, conforme equação 12.

$$\left(\frac{\bar{D}}{D} \right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos(X) + 0,00128 \sin(X) + 0,000719 \cos(2X) + 0,000077 \sin(2X) \quad (12)$$

Em que X é definido em função do dia Juliano (dJ) pela equação 13.

$$X = \frac{2\pi(dJ-1)}{365} \quad (13)$$

O ângulo solar, ângulo horário (W_s) do nascer ou do pôr do sol foi determinado pela equação 14.

$$W_s = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi)\operatorname{tg}(\delta)) \quad (14)$$

A declinação solar (δ) foi determinada pela equação proposta por Cooper (1969) (equação 15).

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \frac{360}{365}(284 + dJ) \quad (15)$$

3.5. ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR COM USO DA FERRAMENTA *SOLAR RADIATION DA EXTENSÃO SPATIAL ANALYST*

Para estimativa da radiação solar global e suas componentes, direta e difusa, foi utilizada a ferramenta *Solar Radiation* da extensão *Spatial Analyst* do software de SIG ArcGIS® 9.2. Este modelo estima a radiação solar global, direta e difusa considerando a influência da latitude, altitude e orientação da superfície (declividade e aspecto). Os parâmetros topográficos foram derivados do Modelo Digital de Elevação (MDE) (DEM – *Digital Elevation Model*).

Os arquivos MDE, resultado do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), foram obtidos gratuitamente pela USGS (<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>). Os dados estavam distribuídos com projeção geográfica (Lat/ Long), *datum* horizontal WGS84 e *datum* vertical EGM96. Este produto é reamostrado para uma resolução espacial de 3 segundos de arco (versão 3.0) o que corresponde aproximadamente 90 m de resolução espacial (ALVES & ALVES, 2009). Foram re-projetados para a projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) e *datum* SAD 69 (*South América Datum* de 1969) fuso 21S.

Para criar os *grids* de radiação empregaram-se as equações definidas por FU & RICH (2002).

Da ferramenta de análise da radiação solar foram utilizados os módulos *Area Solar Radiation* que calcula mapas contínuos de radiação e *Points Solar Radiation* que calcula os valores de radiação para pontos específicos.

Os pontos específicos para gerar os valores de radiação foram dois, denominados de estação Centro e estação CPA. Esses pontos foram transformados para o formato *shapefile* no modelo de dados geográficos tipo ponto, com projeção UTM e *datum* 69 fuso 21S, a mesma do MDE, já que os pontos e o MDE devem estar no mesmo sistema de coordenadas.

3.5.1. Parâmetros e dados de entrada do modelo para estimativa da radiação solar global

Os parâmetros e dados adotados para o cálculo dos valores de radiação solar global e suas componentes estão descritos no Quadro 1.

Quadro 1: Descrição dos parâmetros e dados utilizados como entrada do modelo para estimativa da radiação solar global.

PARÂMETRO	TERMO NA <i>SOLAR RADIATION</i>	DESCRIÇÃO
MDE	DEM	Grade (entrada de varredura de superfície)
Ponto específico	Input points	Feição de ponto, para calcular a radiação solar em pontos específicos com o módulo <i>Points Solar Radiation</i>
Localizador de altura	Height offset	Altura, em metros, acima da superfície do MDE para que a radiação fosse estimada. Isso serve para obter resultados como se estivesse na mesma altura em que o sensor foi instalado em campo
Latitude média	Latitude	Para representar o local em que radiação solar foi estimada, calculada automaticamente em função do MDE
Tamanho do céu: Número de linhas e colunas do <i>skymap</i> , <i>sunmap</i> e <i>viewshed</i>	Sky Size/ Resolution	Número de linhas e colunas da grade bidimensional, unidade: células. Os ângulos de obstrução que foram convertidos para coordenadas hemisféricas foram projetados nessa grade
Configuração do tempo	Time configuration	Especifica o período de tempo utilizado para os cálculos.

PARÂMETRO	TERMO NA SOLAR RADIATION	DESCRIÇÃO
Intervalo de tempo em horas	Hour interval	Intervalo de tempo durante o dia para dividir os setores do céu do <i>sunmap</i> e gerar a posição aparente do sol variando com o tempo
Parâmetros Topográficos		
Fator de correção de unidades do MDE	Z factor	Ajusta as unidades de medida para as unidades de z quando eles são diferentes das coordenadas x, y da superfície de entrada.
Declividade e aspecto	Slope and aspect	Como as informações de declividade e aspecto foram gerados para análise.
Cálculo do número de direções azimutais para o cálculo do <i>viewshed</i>	Calculation directions	O efeito do relevo sobre a duração da radiação incidente baseou-se no cálculo de um diagrama de obstrução com varias divisões, valor múltiplo de 8, em torno de cada pixel do MDE, valor utilizado para aumentar a precisão
Parâmetros de Radiação		
Divisões zênite	Zenith divisions	Número de divisões, em relação ao zênite, usadas para criar os setores do céu no <i>skymap</i>
Divisões azimute	Azimuth divisions	Número de divisões, em relação ao Norte, usadas para criar os setores do céu no <i>skymap</i>
Tipo de modelo de radiação difusa	Difuse model type	Modelo difuso uniforme, a radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direções do céu
Proporção difusa	Diffuse proportion	Proporção do fluxo de radiação global normal que é difusa, valor definido pelas condições atmosféricas
Transmissividade	Transmittivity	Fração da radiação que atravessa a atmosfera, média de todos os comprimentos de onda

O MDE do projeto SRTM é do perímetro urbano de Cuiabá-MT e os pontos estão identificados como estação Centro e estação CPA (Figura 6).

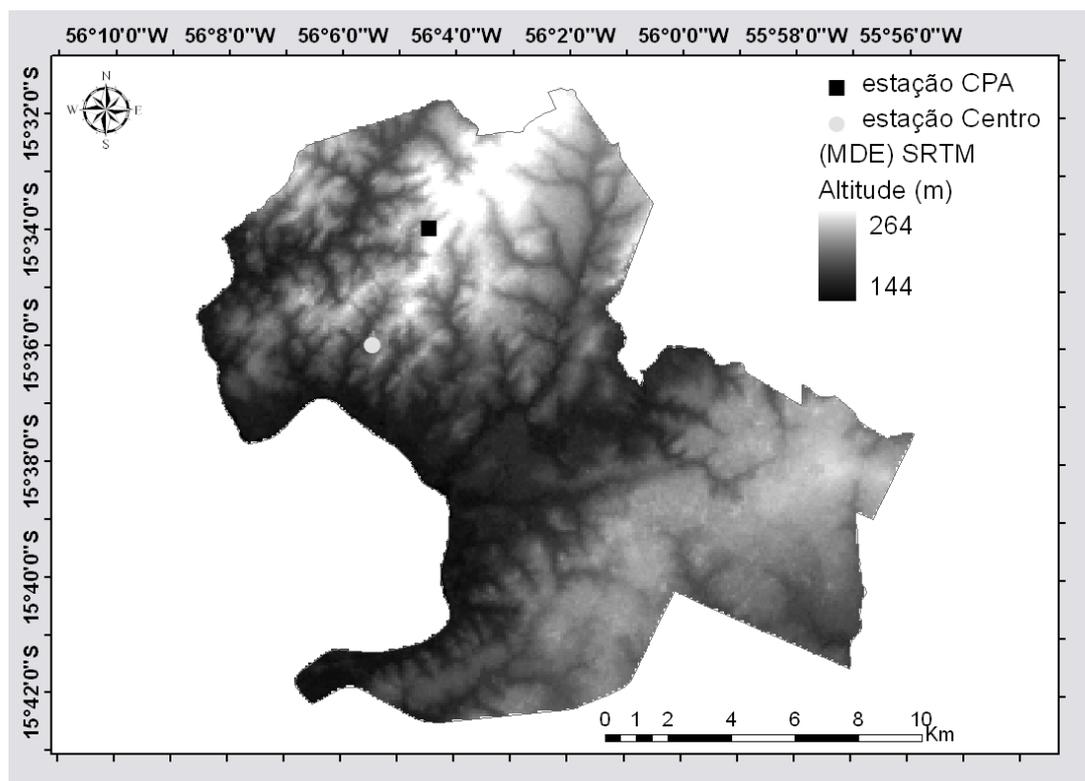


Figura 6: Modelo digital de elevação SRTM do perímetro urbano de Cuiabá-MT e os pontos de coleta de dados, estação Centro (círculo cinza) e CPA (quadrado preto).

3.5.2. Variáveis de saída do modelo de estimativa da radiação

As variáveis de saída do modelo são mapas de radiação solar: global, direta e difusa da área em estudo, bem como os valores pontuais da radiação para os pontos nomeados de estação Centro e estação CPA. Os resultados da radiação estão expressos em Wh m^{-2} , e referem-se ao potencial máximo, pois não foram levados em conta dados referentes à nebulosidade.

3.5.3. Parametrização do modelo de estimativa da radiação

A parametrização consiste na modificação dos valores originais dos parâmetros do modelo até que as variáveis de saída estejam coerentes com os dados reais obtidos a campo (WEBER, 2010).

Os parâmetros utilizados com base no padrão do modelo original (valores que já estão como dados de entrada ao utilizar a ferramenta) e os obtidos por intermédio da observação dos valores coletados em dois pontos denominados de estação Centro e estação CPA estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2: Descrição dos parâmetros de entrada que não foram alterados do modelo original e dos obtidos por intermédio da observação em dois pontos específicos.

MODELO ORIGINAL	OBSERVAÇÃO
Localizador de altura	MDE
Fator de correção de unidades do MDE	Ponto específico
Cálculo do número de direções azimutais para o cálculo do <i>viewshed</i>	Latitude média
Divisões zênite	Tamanho do céu: Número de linhas e colunas do <i>skymap</i> , <i>sunmap</i> e <i>viewshed</i>
Divisões azimute	Intervalo de tempo em horas
Tipo de modelo de radiação difusa	Configuração do tempo
	Declividade e aspecto
	Proporção difusa
	Transmissividade

3.5.4. Seleção de dados para validação do modelo

Dos dados disponíveis de 2006 a 2008, nas estações Centro e CPA, foram selecionados 116 dias considerando a classificação do céu, sendo 40 dias de céu nublado, 60 dias de céu parcialmente nublado e 16 dias de céu limpo para estimar a radiação solar global e confrontá-los com os dados medidos em campo para validar o modelo com os parâmetros obtidos após a parametrização (Tabela 2).

Tabela 2: Dias Julianos (dia do ano) selecionados para validação do modelo para todos os tipos de cobertura do céu na estação Centro e estação CPA.

	Centro	CPA
Nublado	230(18/08/06); 240(28/08/06); 252(09/09/06); 267(24/09/06); 274(01/10/06); 278(05/10/06); 279(06/10/06); 284(11/10/06); 286(13/10/06); 287(14/10/06); 288(15/10/06); 014(14/01/07); 026(26/01/07); 049(18/02/07); 050(19/02/07); 077(18/03/07); 117(27/04/07); 128(08/05/07); 167(16/06/07); 074(14/03/08).	284(11/10/06); 286(13/10/06); 324(20/11/06); 363(29/12/06); 030(30/01/07); 036(05/02/07); 050(19/02/07); 077(18/03/07); 117(27/04/07); 143(23/05/07); 191(10/07/07); 239(27/08/07); 262(19/09/07); 280(07/10/07); 319(15/11/07); 337(03/12/07); 008(08/01/08); 055(24/02/08); 074(14/03/08); 094(04/04/08).
Parcialmente Nublado	238(26/08/06); 257(14/09/06); 285(12/10/06); 307(03/11/06); 015(15/01/07); 016(16/01/07); 036(05/02/07); 041(10/02/07); 071(12/03/07); 079(20/03/07); 086(27/03/07); 087(28/03/07); 093(03/04/07); 107(17/04/07); 118(28/04/07); 124(04/05/07); 142(22/05/07); 152(01/06/07); 176(25/06/07); 193(12/07/07); 207(26/07/07); 214(02/08/07); 238(26/08/07); 253(10/09/07); 277(04/10/07); 289(16/10/07); 306(02/11/07); 316(12/11/07); 045(14/02/08); 087(27/03/08).	290(17/10/06); 293(20/10/06); 297(24/10/06); 299(26/10/06); 303(30/10/06); 304(31/10/06); 308(04/11/06); 310(06/11/06); 321(17/11/06); 324(20/11/06); 353(19/12/06); 354(20/12/06); 358(24/12/06); 002(02/01/07); 021(21/01/07); 047(16/02/07); 049(18/02/07); 065(06/03/07); 086(27/03/07); 098(08/04/07); 123(03/05/07); 138(18/05/07); 204(23/07/07); 214(02/08/07); 238(26/08/07); 251(08/09/07); 311(07/11/07); 006(06/01/08); 045(14/02/08); 077(18/03/08).
Limpo	225(13/08/06); 248(05/09/06); 316(12/11/06); 317(13/11/06); 319(15/11/06); 358(24/12/07); 097(06/04/08); 101(10/04/08); 125(04/05/08).	315(11/11/06); 316(12/11/06); 317(13/11/06); 318(14/11/06); 359(25/12/06); 361(27/12/06); 107(17/04/07).

3.6. VALIDAÇÃO DO ALGORITMO DA FERRAMENTA *SOLAR RADIATION DA SPATIAL ANALYST*

Para verificar o desempenho do modelo realizou-se o cálculo do coeficiente de Pearson, r ($p < 0,05$) que mede o grau da correlação e a direção dessa correlação, se

positiva ou negativa entre duas variáveis de escala métrica. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1. Quando 1 significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, quando -1 significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. Essa correlação foi entre os valores da radiação global medida e os valores da radiação global estimada pelo modelo.

Outro indicativo de desempenho do modelo foi o uso de um índice estatístico, raiz do erro médio quadrático (*RMSE - root mean square error*).

O *RMSE* é a medida da magnitude média dos erros modelados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados. (PINTO et al., 2010; VICTORIA, 2008).

Os valores estimados e medidos são, respectivamente, valores simulados pelo modelo e medidos pela estação em cada local, e pode ser calculado pela equação 16.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (16)$$

Em que, E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, n é o número de observações. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude (STONE, 1993).

Além da análise do *RMSE* foram utilizados outros indicativos de desempenho do modelo, o desvio das médias (*MBE - Mean Bias Error*).

O *MBE* indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo). O ideal é valor de *MBE* tendendo a zero. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (ULGEN & HEPBASLI, 2009; STONE, 1993).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (17)$$

Em que, E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, n é o número de observações e \bar{O} é o valor médio medido. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (STONE, 1993).

E por fim, foi calculado o índice de concordância de Willmott (d) (1981) que é capaz de avaliar a exatidão e avaliar o afastamento dos valores estimados em relação aos medidos (MARTIN et al., 2007).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (18)$$

Os indicadores estatísticos *RMSE* e *MBE* foram recomendados por Iqbal (1983), e o índice de concordância (d) de Willmott, para as diferentes condições de cobertura de céu (DIEZ-MEDIAVILLA et al., 2005; NOTTON et al., 2006; LOUTZENHISER et al., 2007; ESCOBEDO et al., 2009; EVSEEV & KUDISH, 2009; EL-SEBAII et al., 2010).

3.7. APLICAÇÃO DO MODELO VALIDADO EM DOIS PERÍODOS DISTINTOS

3.7.1. Correlação entre radiação solar difusa estimada e variáveis meteorológicas medidas em campo

Para testar a aplicabilidade do modelo, após a parametrização e validação, foi verificada a possível correlação da radiação solar difusa (R_d), uma das variáveis estimadas, com a temperatura do ar (T) e a umidade relativa do ar (UR), medidas pelas estações Centro e CPA, em que foram selecionados 18 dias consecutivos de janeiro (dJ 14 a 31), representando o período úmido e 18 dias de julho (dJ 191 a 208), representando o período seco, de 2007.

Foram calculadas as médias diárias considerando dados diurnos e noturnos da temperatura do ar (T) e da umidade relativa do ar (UR), considerando somente os dados diurnos da radiação solar global (R_g).

Para as variáveis meteorológicas, temperatura do ar (T) e umidade relativa (UR), foram adotados limites mínimos e máximos, respectivamente, de 12°C e 50°C para a temperatura e de 25% e 105% para a umidade relativa.

O teste de correlação de Pearson foi realizado entre as variáveis: Temperatura do ar (T), Umidade relativa do ar (UR) e Radiação solar difusa (R_d) estimada pela

extensão *Spatial Analyst*, ferramenta *Solar Radiation* em função do MDE. Essa verificação foi devido ao fato de que as variáveis meteorológicas (T) e (UR) geralmente são obtidas com maior facilidade e a outra variável (R_d) é em geral a componente mais difícil de obter em campo.

3.7.2. Processamento de dados espaciais

Para observar a distribuição espacial da radiação solar global, em função da altitude, declividade e aspecto, foram feitos os mapas dessa radiação em dois períodos, úmido e seco, e ainda, os mapas da declividade e do aspecto.

Para representar o período úmido foram selecionados 18 dias consecutivos de janeiro (dJ 14 a 31) e para representar o período seco 18 dias de julho (dJ 191 a 208) de 2007 para o perímetro urbano de Cuiabá.

Os mapas da radiação solar global foram feitos utilizando os parâmetros validados para a cobertura do céu classificado como limpo.

Já os mapas de declividade e aspecto foram gerados a partir da extensão *Spatial Analyst* com as ferramentas *Slope* e *Aspect*, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. VARIABILIDADE DO ÍNDICE DE CLARIDADE

O K_t variou de 0,002 a 0,69 com média de 0,47, indicando que em média 47% da radiação que incidem no topo da atmosfera, chegam à superfície terrestre (Figura 7) nas estações Centro e CPA de 2006 a 2008. Do total de 1150 dias, 58,61% foram valores superiores a média de K_t e 41,39% inferiores. A média de K_t encontrada foi semelhante ao valor de 0,41 encontrado por VALIATI (2001), e de 0,44 encontrado por DALLACORT et al. (2004) ambos para uma região de Cascavel no Paraná; e para área rural de Botucatu/SP, com menores valores mensais de 0,45 e maiores de 0,59 (INÁCIO, 2009). A maior frequência de altos valores de K_t foi de junho a agosto, meses com menor nebulosidade e os menores índices foram de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, meses com maior nebulosidade. Sazonalidade semelhante foi encontrada por SANTOS et al. (2000) e INÁCIO (2009) em Botucatu/SP com índices mais altos nos meses correspondentes ao inverno (julho e agosto), meses sem nuvens, e os menores no período chuvoso e nebuloso, janeiro, fevereiro e dezembro. E ainda, nos meses com menor nebulosidade houve uma menor oscilação dos valores diários de K_t . Os resultados confirmam a dependência da cobertura do céu na transmissão da radiação solar global, em que menores K_t foram relacionados com maior concentração de nuvens e vapor d'água e os maiores valores de K_t relacionados menor concentração de nuvens e vapor d'água.

Houve também uma menor oscilação diária dos valores de K_t nos meses com menor nebulosidade.

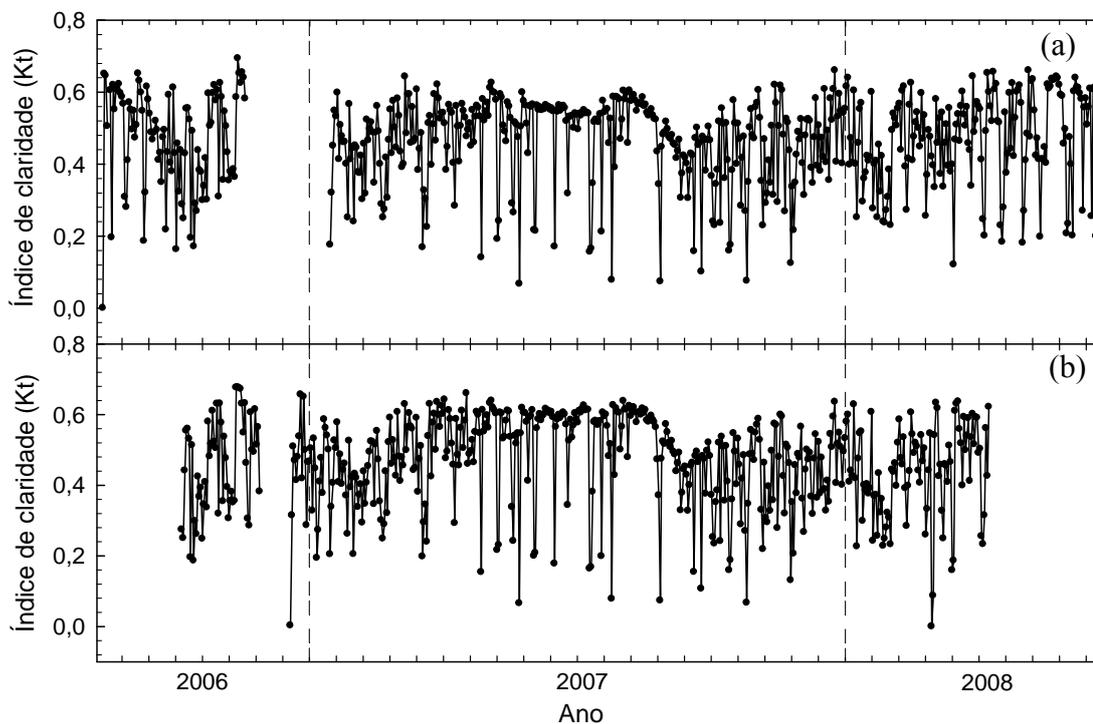


Figura 7: Índice de claridade (Kt), nas estações Centro (a) e CPA (b) de 2006 a 2008.

4.2. VALIDAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL ESTIMADA CONSIDERANDO A COBERTURA DO CÉU

Inicialmente, o modelo de estimativa da radiação foi aplicado com os parâmetros de entrada de acordo com o *Solar Radiation* da extensão *Spatial Analyst* do software de SIG ArcGIS[®] 9.2. Depois de testar exaustivamente os parâmetros, alterando um parâmetro por vez, os melhores ajustes estatísticos foram aprovados com maior coeficiente de Pearson (r), menor raiz do erro médio quadrático ($RMSE$), desvio das médias (MBE) e maior coeficiente de Willmott (d). Os parâmetros obtidos após a parametrização do modelo estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3: Descrição dos valores dos parâmetros de entrada que não foram alterados e dos valores obtidos por intermédio de observação.

PARÂMETRO	FORMA DE OBTENÇÃO	VALOR UTILIZADO	JUSTIFICATIVA
Localizador de altura	Dado pelo modelo	0	Local de instalação dos sensores em área sem grandes variações de altitude
Fator de correção de unidades do MDE	Dado pelo modelo	1	A unidade de medida de z é a mesma da x, y da superfície de entrada
Cálculo do número de direções azimutais para o cálculo do <i>viewshed</i>	Dado pelo modelo	32	Valor indicado para topografias complexas
Divisões zênitais	Dado pelo modelo	8	No manual indica que esse número de divisões é suficiente para obter resultados satisfatórios
Divisões azimutais	Dado pelo modelo	8	No manual indica que esse número de divisões é suficiente para obter resultados satisfatórios
Tipo de modelo de radiação difusa	Dado pelo modelo	<i>Uniform Sky</i> (Modelo difuso uniforme)	A radiação difusa de entrada é a mesma em todas as direções do céu
MDE	Obtido pelo SRTM	grade	Obtido do projeto SRTM
Ponto específico	Adotado	Estação Centro e CPA	Feição de ponto para utilizar o módulo <i>Points Solar Radiation</i>
Latitude média	Adotado	-15,6166116390984	Calculada em função do MDE

PARÂMETRO	FORMA DE OBTENÇÃO	VALOR UTILIZADO	JUSTIFICATIVA
Tamanho do céu: Número de linhas e colunas do <i>skymap</i> , <i>sunmap</i> e <i>viewshed</i>	Adotado	400	O dobro do indicado pelo programa, aumento da precisão nos cálculos
Configuração do tempo	Adotado	Um dia	Para confrontar com o valor obtido em campo
Intervalo de tempo em horas	Adotado	0,5	Mesmo intervalo de tempo do valor medido em campo
Declividade e aspecto	Adotado	<i>From DEM</i>	Gera grades de inclinação e aspecto a partir do MDE
Proporção difusa	Parametrizado	de 0,20 a 0,77	Parametrizado em função do tipo de cobertura do céu
Transmissividade	Parametrizado	de 0,68 a 0,13	Parametrizado em função do tipo de cobertura do céu

A melhor parametrização para a aplicação do modelo *Spatial Analyst* em diferentes condições de céu, foi para o parâmetro proporção de radiação difusa (0,2 para céu limpo, 0,32 para céu parcialmente nublado e 0,77 céu nublado) e a fração da radiação que atravessa a atmosfera (0,68 para céu limpo, 0,49 para céu parcialmente nublado e 0,13 para céu nublado). Os demais parâmetros foram descritos no Quadro 3 e não variaram no *default* do *Solar Radiation*.

BATLLES et al. (2008) ao analisarem a radiação solar global com uso do *Solar Analyst* em duas redes de estações radiométricas no sul da Espanha também estimaram valores médios dos parâmetros do modelo transmissividade e de fração difusa para todos os tipos de condições do céu, a partir dos diferentes intervalos de K_t para obter mapas da radiação real de uma região.

Por meio da análise das observações e dados simulados da radiação solar global para cada condição de cobertura de céu: céu nublado, parcialmente nublado e limpo e todos os tipos de cobertura do céu estão representados na Figura 8.

Esses dados apresentaram algumas regiões com grande concentração indicando que o programa pode estimar a radiação solar em intervalos de valores.

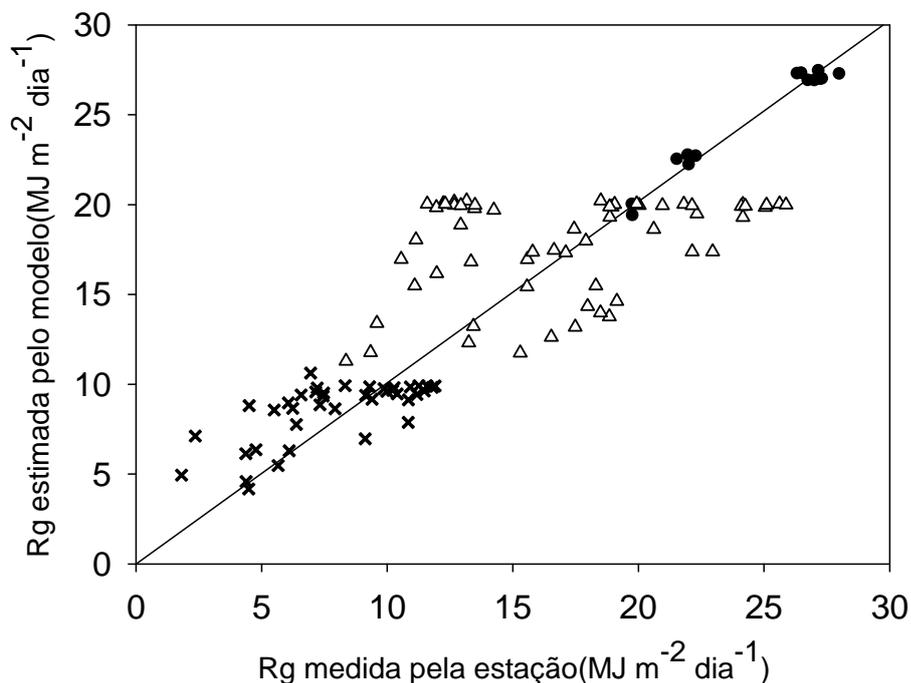


Figura 8: Radiação Global medida e estimada nas estações em condições de céu nublado (x), parcialmente nublado (Δ) e limpo (\bullet). A linha sólida representa a relação 1:1.

Na condição de céu limpo e nublado, os valores dos parâmetros do modelo *Solar Radiation*, após alguns testes, foram apropriados para estimativa de R_g . Entretanto para condição de céu parcialmente nublado foi necessário um maior número de testes e o resultado não foi satisfatório. Isso pode ter ocorrido, pois no período seco, menos nebuloso, esperava-se que ocorresse maior número de dias com céu limpo devido à ausência de formação de nuvens na região em estudo.

Entretanto há muitos focos de queimada e a concentração de aerossóis lançados à atmosfera em eventos de queimadas de biomassa que apresentam alta absorção da radiação solar, podendo reduzir significativamente a radiação solar incidente na superfície em função da sua concentração na atmosfera. Comportamento semelhante foi observado por MARTINS et al. (2007) ao apresentarem os resultados obtidos pelo projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) no mapeamento dos recursos de energia solar para o território brasileiro com uso do modelo de transferência radiativa BRASIL-SR de julho a dezembro/05.

PEREIRA et al. (1999) verificaram que os produtos de combustão injetados na atmosfera durante a época de incêndios (julho a outubro) podem explicar os

desvios sistemáticos ao validar a radiação solar global estimada por meio do modelo de radiação BRASIL-SR com imagens de satélite e os dados de superfície. Os autores verificaram que o número de focos de incêndios foi correlacionado com a *MBE* entre as estimativas da *Rg* por meio de imagens de satélite e os dados de superfície.

A melhor relação entre a *Rg* estimada pelo *Solar Radiation* e a medida para as três condições de céu foi obtida por equação linear conforme Tabela 3.

Tabela 3: Análise de ajuste entre a *Rg* estimada e medida: número de dados (*N*), equação linear, coeficiente de Pearson (*r*) ($p < 0,05$), raiz quadrada do erro médio (*RMSE*), desvio do erro médio (*MBE*) e coeficiente de Willmott (*d*). *y* é o valor estimado e *x* é o valor medido.

Cobertura de céu	N	Equação linear	<i>r</i>	<i>RMSE</i> (MJ.m⁻²)	<i>MBE</i> (MJ.m⁻²)	<i>d</i>
Nublado	40	$y = 0,426x + 5,170$	0,69	1,23	0,60	0,77
Parcialmente nublado	60	$y = 0,209x + 14,221$	0,36	2,61	0,75	0,60
Limpo	16	$y = 0,943x + 1,567$	0,98	0,51	0,15	0,99
Todos os tipos	116	$y = 0,770x + 4,056$	0,87	3,10	0,61	0,93

No geral, a *Rg* estimada para cada condição de cobertura do céu superestimaram os valores de acordo com o *MBE*. Como esperado o melhor ajuste para a correlação entre a *Rg* estimada e a *Rg* medida ocorreu para a condição de cobertura de céu limpo (Tabela 3) com maior valor de *r* ($r=0,98$) e *d* ($d=0,99$) e menores valores de *RMSE* (0,51 MJ.m⁻²) e *MBE* (0,15 MJ.m⁻²). Os piores ajustes ocorreram na condição de parcialmente nublado e nublado em que os valores mostram o alto espalhamento entre a *Rg* medida e estimada com superestimativas de 0,75 e 0,60 MJ.m⁻², respectivamente. Possivelmente uma das causas para essa superestimativa é de que o *Solar Radiation* considera poucos parâmetros representativos da composição e condição atmosférica. Embora o desempenho do ajuste verificado pelo *d* indique uma boa concordância entre os dados estimados aos medidos (valores tendendo a 1).

BATLLES et al. (2008), para dados diários, encontraram melhores ajustes em condição de céu limpo e piores ajustes nas condições de céu nublado, já no presente estudo, os melhores ajustes também foram para condição de céu limpo, porém os piores ajustes foram nas condições de céu parcialmente nublado, supostamente porque o intervalo $0,3 \leq kt \leq 0,65$ adotado neste presente estudo como condição de cobertura parcialmente nublado, foi dividido pelos autores em duas classes de parcialmente nublado, facilitando o ajuste do modelo de estimativa de R_g . Considerando o pior ajuste dos autores, na condição de nublado ($kt < 0,35$), houve maiores erros, com uma média de *RMSE* cerca de 26%, com um aumento de 16% em relação ao intervalo de $kt > 0,65$ (cobertura de céu limpo).

Uma tendência do modelo com uso da *Spatial Analyst* em subestimar a radiação com valores altos para céu nublado e parcialmente nublado confirma a necessidade em estimar a radiação somente para céu limpo conforme indicação de FU & RICH (2000). E ainda, segundo MARTINS et al. (2004), a dificuldade em validar os dados para condições de céu que não seja limpo confirma a influência significativa dos aerossóis de queimadas na transferência radiativa da atmosfera ao concluir que a proximidade de focos de queimadas produz um erro sistemático semelhante ao erro produzido pela presença de nuvens nas estimativas fornecidas pelo modelo BRASIL-SR.

MARTÍNEZ-DURBÁN et al. (2009) utilizaram o *Spatial Analyst* para estimativa da radiação global com o uso do MDE com resolução de 20m obtendo resultados satisfatórios com valores de *RMSE* na ordem de 18% e os valores de proporção difusa e transmissividade variando em função do índice de claridade.

Outro modelo de estimativa da radiação global, estimado pela equação de Angstrom, estimou a radiação solar global diária para a região de Cascavel/PR de maneira satisfatória com tendência a superestimar a radiação global em janeiro, fevereiro, abril, junho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro e subestima para os meses de março, maio e julho (VALIATI et al., 2000).

4.3. COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDA E ESTIMADA PARA CADA TIPO DE COBERTURA DO CÉU

Os maiores valores do índice de claridade foram verificados durante o inverno, devido ao menor valor da radiação solar global, ocorrendo o contrário, durante o verão (Figura 9a). Isso corresponde com SANTOS et al. (2000) que encontraram valores mais altos durante o período de inverno. Assim como neste estudo, a distribuição do índice de claridade na região de Maceió foi normalmente dominada por dia parcialmente nublado e as frequências de dias claros e nublados foram pequenas, com variação mensal do índice de claridade foi aproximadamente de 0,50 em maio, julho e agosto para 0,61 em novembro, com uma média anual de 0,56 (DE SOUZA et al., 2005).

A média mensal da R_g medida foi $16,41 \text{ MJ m}^{-2}$ sendo que as condições de céu nublado, parcialmente nublado e limpo, a média foi $8,15 \text{ MJ m}^{-2}$, $17,97 \text{ MJ m}^{-2}$ e $24,35 \text{ MJ m}^{-2}$, indicando que houve variações na energia recebida pela superfície terrestre com relação ao tipo de cobertura do céu.

No hemisfério Norte, ULGEN & HEPBASLI (2009), estudaram em três cidades da Turquia, Ankara ($39,95^\circ \text{ N}$ e $32,88^\circ \text{ L}$), Istanbul ($40,96^\circ \text{ N}$ e $28,08^\circ \text{ L}$) e Izmir ($38,40^\circ \text{ N}$ e $27,16^\circ \text{ L}$) os valores médios mensais da radiação solar global e encontraram valores de R_g ao longo dos meses do ano opostos aos valores de Cuiabá (Brasil). Isso ocorre, pois quando o Sol declina no hemisfério norte ele está mais próximo da latitude da Turquia e mais afastado da latitude do Brasil.

As médias mensais da R_g ao considerar as duas estações juntas e a correspondente estimada para todos os tipos de cobertura do céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) estão representados na Figura 9b.

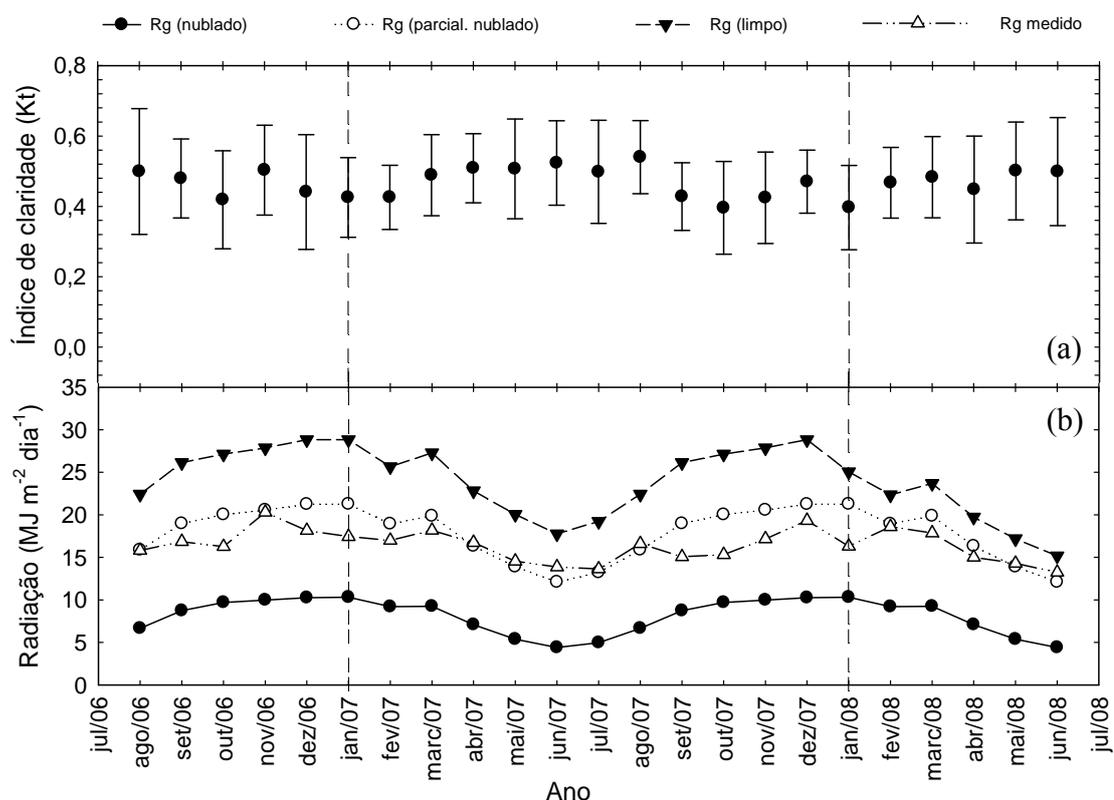


Figura 9: (a) Média mensal do índice de claridade ($\pm DP$), (b) radiação global medida ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e a radiação global estimada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para as condições de céu nublado, parcialmente nublado e limpo em perímetro urbano de agosto de 2006 a junho de 2008.

Os valores médios diários mensais medidos das duas estações juntas variaram de $13,23 \text{ MJ m}^{-2}$ em junho/2008 e até $20,28 \text{ MJ m}^{-2}$ em novembro/2006 com média de $16,41 \text{ MJ m}^{-2}$. Valores semelhantes foram encontrados por INÁCIO (2009), na UNESP, área rural de Botucatu/SP ($22,85^\circ \text{ S}$ e $48,45^\circ \text{ O}$, 786 m de altitude) com radiação global variando de $12,6 \text{ MJ m}^{-2}$ em junho a $21,0 \text{ MJ m}^{-2}$ em novembro com média de $17,62 \text{ MJ m}^{-2}$. Essa sazonalidade da radiação solar global na superfície terrestre com maiores valores próximos ao período do verão e menores no período do inverno tende a acompanhar a radiação do topo da atmosfera, decrescendo de janeiro até junho e crescendo de julho até dezembro para o hemisfério Sul.

A média mensal radiação global (Rg) estimada para cada tipo de cobertura do céu apresentou a mesma variação sazonal da Rg média mensal medida com maiores valores de janeiro a março e de setembro a dezembro e os menores de abril a agosto. E ainda, os valores para a condição de céu limpo foram sempre maiores do

que os de parcialmente nublado e esses maiores do que para céu nublado, conforme o esperado.

4.4. VERIFICAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO

4.4.1. Correlação entre variáveis meteorológicas e radiação solar difusa estimada pelo modelo em dois períodos distintos

4.4.1.1. Temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar difusa estimada pelo modelo

Para avaliar as supostas correlações entre a temperatura e umidade relativa do ar com a radiação solar difusa estimada pela ferramenta *Solar Radiation* foram selecionados 18 dias de janeiro/2007 e 18 dias de julho/2007 para representar a época chuvosa e seca, respectivamente.

A maior amplitude diária na temperatura do ar foi em julho, alcançando temperaturas máximas de 30°C e mínimas de 13°C. O mesmo não ocorreu em janeiro, em que houve uma menor amplitude de temperatura do ar 25°C e 30°C, mínima e máxima, respectivamente, em ambas as estações meteorológicas (Figura 10). Esse comportamento é concordante com a menor taxa de cobertura de nuvens em julho (estação seca), que propicia maior incidência de radiação solar durante o dia e maior perda de energia radiativa da superfície durante a noite. A temperatura do ar na estação Centro e CPA apresentam valores semelhantes tanto em janeiro quanto em julho, possivelmente devido às estações meteorológicas terem sido instaladas acima da altura das coberturas das edificações existentes nos locais, fazendo com que o calor absorvido pelas construções, próximas a estação do centro, não interferisse na temperatura do ar.

A umidade relativa do ar (UR) apresentou maiores variações em julho, com maiores amplitudes diárias na estação CPA. Os maiores picos de umidade relativa foram registrados em janeiro (período chuvoso) à noite com máxima média diária de 87,1% na estação Centro e 84,6% na estação CPA. No centro houve um aumento da temperatura do ar e uma diminuição da UR podendo ser ocasionada por diversos

fatores, como menor área verde, maior densidade construtiva e pela poluição proveniente dos veículos automotores.

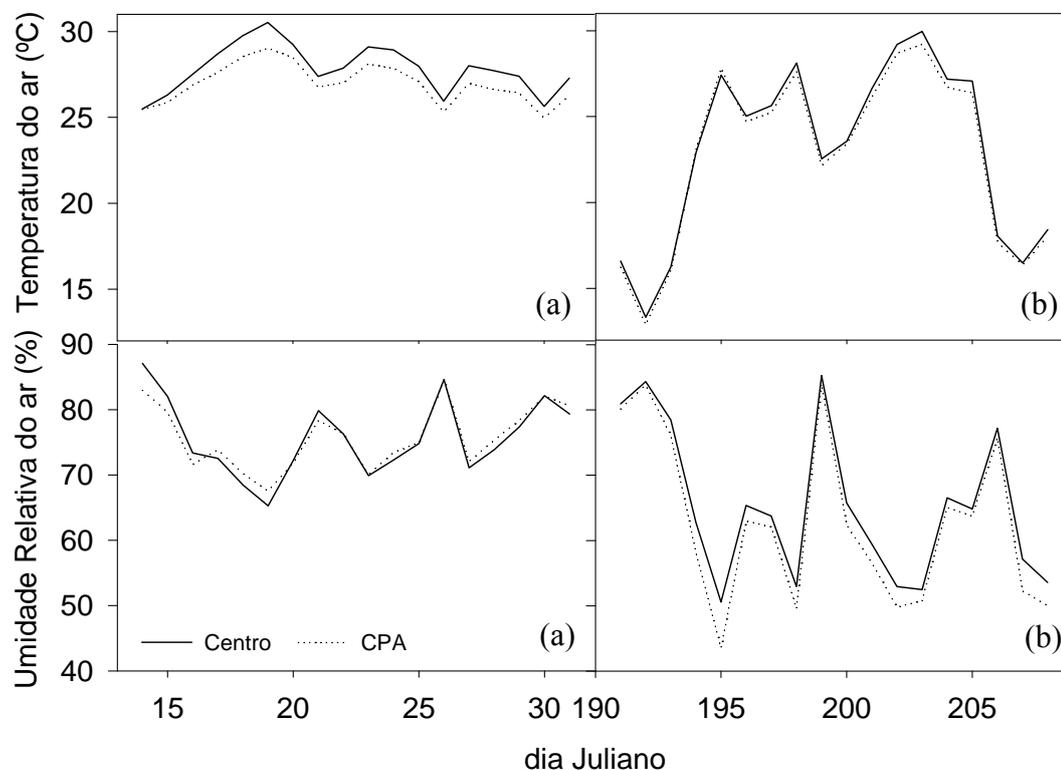


Figura 10: Média diária da temperatura e umidade relativa do ar nas estações Centro e CPA em (a) janeiro (dJ 14 a 31) e (b) julho (dJ 191 a 208) de 2007.

As radiações solar global, direta e difusa, estimadas pelo modelo com os parâmetros obtidos após a validação para cada tipo de cobertura do céu, apresentaram valores menores em julho, o mesmo aconteceu com as variáveis temperatura do ar, umidade do ar (Figura 11). Julho é um mês característico do período seco, em que os índices de precipitação são baixos, e há grande concentração de material particulado devido ao aumento de queimadas na região.

Em janeiro houve 26,36% de radiação difusa e em julho 30,93% na estação Centro, na estação CPA a radiação difusa em janeiro e julho foi, respectivamente, 26,75% e 29,37%, observa-se que a radiação difusa calculada em pontos distintos apresentou valores semelhantes.

Em janeiro, dos 18 dias analisados, foram verificados três dias nublados em que o aumento da radiação difusa foi bem significativo, e em julho foram quatro dias nublados, mas os valores de radiação difusa não variaram muito.

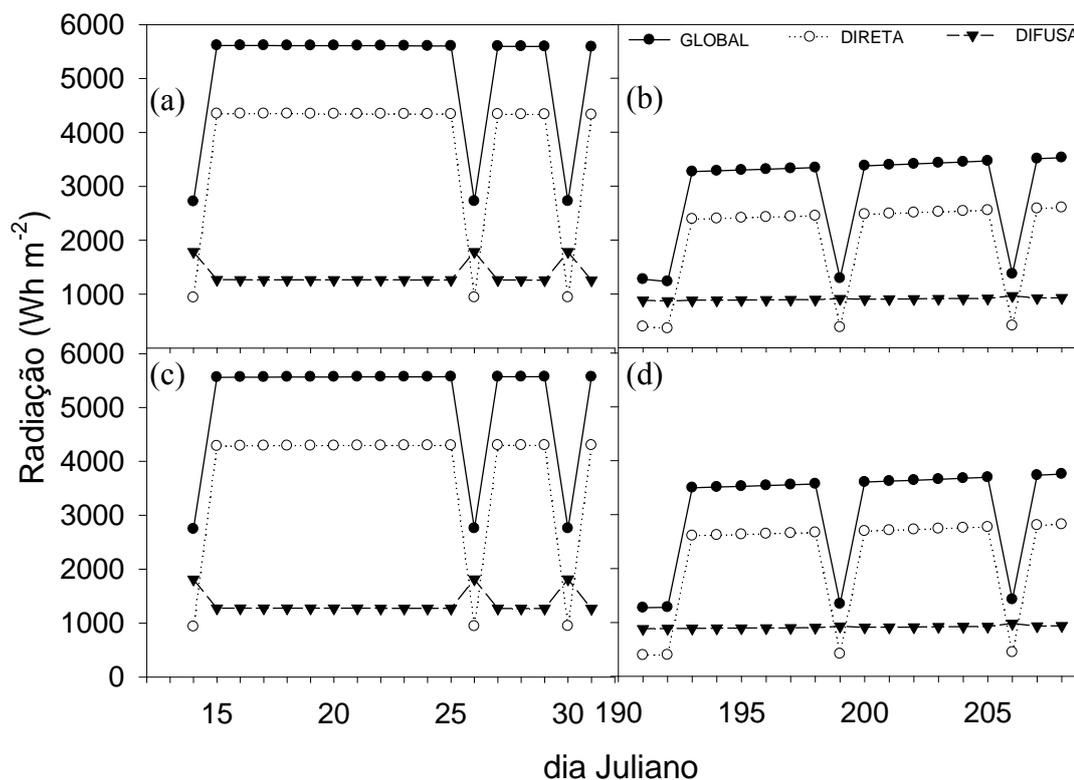


Figura 11: Radiação solar global, direta e difusa, estimada pelo *Spatial Analyst* em função de um MDE para a estação Centro em (a) janeiro (dJ 14 a 31), (b) julho (dJ 191 a 208) e estação CPA (c) janeiro e (d) julho de 2007.

Ocorreu uma maior disponibilidade da radiação solar global, e de suas componentes direta e difusa, em janeiro do que em julho, sendo que a componente direta foi a que apresentou maior contribuição. Em julho a intensidade de radiação foi atenuada, seguindo o comportamento da radiação que chega no topo da atmosfera para a latitude local. Essa variabilidade sazonal da radiação global evidencia a influência do movimento de translação da Terra sobre esta região. Devido a esse movimento, no local de análise o período de janeiro corresponde a uma época de máxima elevação solar (ângulo zenital pequeno), solstício de verão e menor no período de julho, solstício de inverno. Isso evidencia a influência da latitude, estação do ano e hora do dia na radiação local.

4.4.1.2. Correlação entre radiação solar difusa e variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas foram comparadas entre si para verificar até que ponto elas dependem uma da outras, sabendo-se que as alterações climáticas em um determinado ecossistema são acarretadas por vários fatores isolados ou decorrentes de uma série de parâmetros.

No período chuvoso a radiação difusa apresentou correlação significativa negativa com a temperatura do ar e positiva com a umidade relativa ($r=0,69$) na estação Centro (Tabela 7). Na estação CPA a correlação também foi significativa com o mesmo comportamento, no entanto os valores não foram os mesmos, da radiação difusa entre a temperatura ($r=0,67$) e entre a umidade relativa ($r=0,69$) (Tabela 4).

Em julho a radiação difusa não apresentou correlação significativa ($r < 0,28$) ($CI \pm 95\%$) com temperatura do ar e umidade relativa tanto na estação Centro quanto na estação CPA (Tabela 4).

As correlações entre a radiação difusa e as variáveis meteorológicas nas estações Centro e CPA não foram significativas, uma das explicações para este fato pode ser devido a grandes áreas construídas, podendo alterar os dados medidos pelo SRTM talvez considere esses obstáculos como sendo da topografia do terreno e altas taxas de material em suspensão devido à poluição atmosférica (particulados em suspensão).

Tabela 4: Matriz de correlação entre a radiação difusa (Rd), temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) nas estações Centro e CPA. Os coeficientes de correlação foram calculados para um intervalo de 18 dias consecutivos de janeiro e julho/2007, com médias diárias. Os valores em negrito apresentam correlação significativa ($p < 0,05$).

			Rd	T	UR
Estação Centro	janeiro	Rd	1		
		T	-0,694	1	
		UR	0,698	-0,947	1
	julho	Rd	1		
		T	0,039	1	
		UR	-0,144	-0,638	1
Estação CPA	janeiro	Rd	1		
		T	-0,679	1	
		UR	0,696	-0,920	1
	julho	Rd	1		
		T	-0,022	1	
		UR	-0,040	-0,620	1

4.4.2. Distribuição espacial da radiação solar global estimada

A topografia condiciona fortemente a variabilidade espacial da incidência da radiação solar. Os fatores topográficos que influenciam na distribuição da radiação sobre um determinado terreno tais como a altitude, a declividade (inclinação do relevo) (Figura 12a) e a orientação das vertentes (aspecto) (Figura 12b) apresentaram diferentes distribuições espaciais na área em estudo.

A distribuição da orientação das vertentes apresentou áreas delimitadas de predomínio das vertentes voltadas ao Norte e voltadas ao Sul. Comportamento semelhante foi encontrado por Machado et al. (2009), em uma área de vegetação densa no sul de Goiás, em que a incidência dos raios solares se fazem presentes nas vertentes orientadas para o norte na maior parte do ano, enquanto as vertentes voltadas para o sul ficam expostas aos raios solares somente em janeiro. Também para Juiz de Fora/MG na maioria do ano as vertentes estão orientadas para o Norte e essa orientação faz com que recebam uma quantidade maior de energia do Sol durante o ano (TORRES et al., 2009).

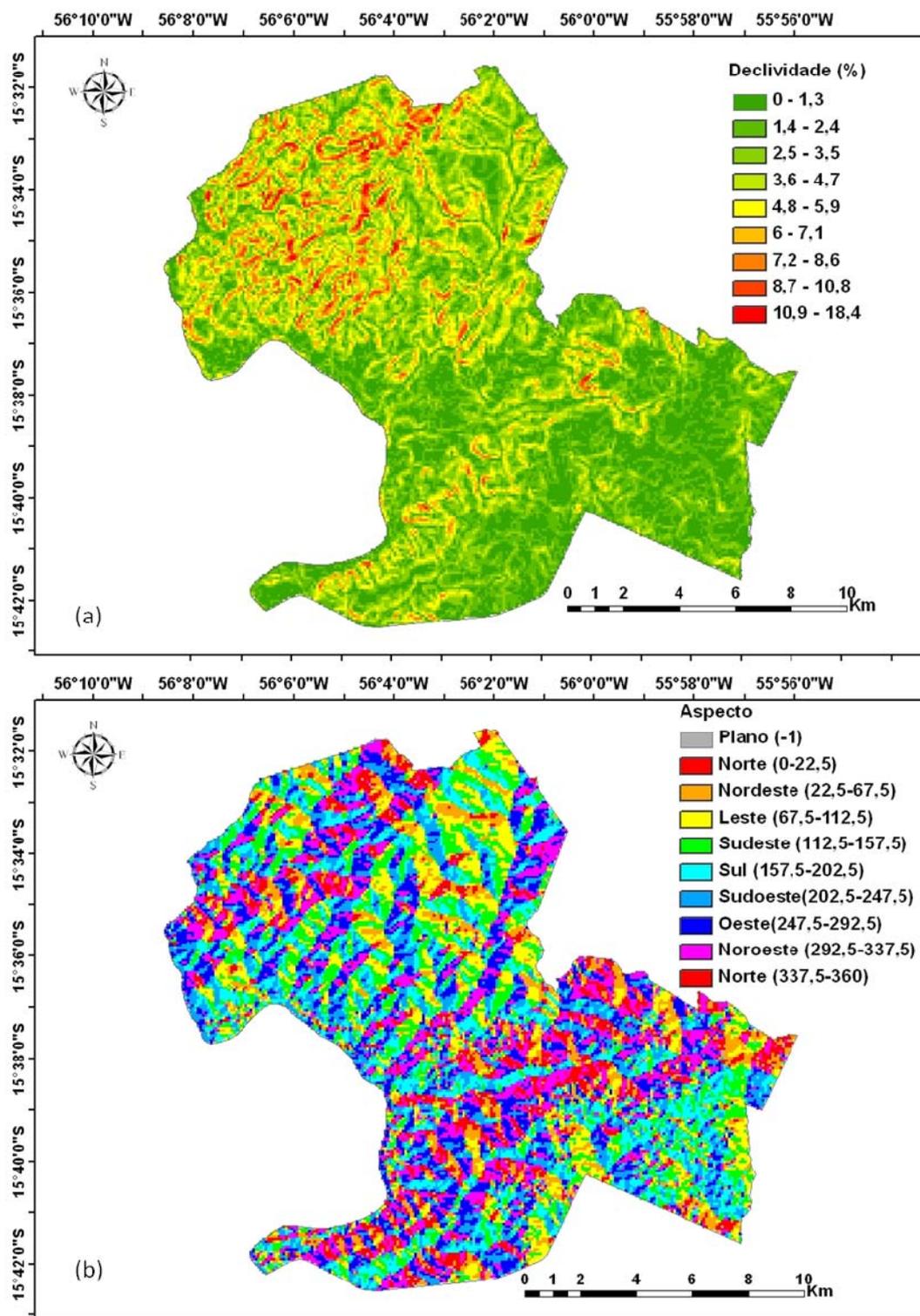


Figura 12: (a) Declividade (inclinação do relevo), (b) orientação das vertentes (aspecto) para o perímetro urbano de Cuiabá-MT.

A representação da distribuição espacial da R_g média diária estimada durante os períodos úmido e seco (Figura 13), em que no perímetro urbano de Cuiabá tem uma variação de altitude de 146 a 250 m, houve uma tendência a apresentar valores mínimos em altitudes menores em diferentes declividades (0 a 18,4%) (Figura 12a).

MARTÍNES-DURBÁN et al. (2009) verificaram que a R_g estimada em um local de menor altitude e outra de maior altitude apresentaram um elevado nível de radiação estimada, em que os efeitos dependentes do horizonte foram insignificantes.

Os níveis de radiação são mais relacionadas com as características topográficas da área de estudo do que à altitude, por exemplo, BATLLES et al. (2008) verificaram ainda que diferenças de altitude foram menos importantes do que outras variáveis topográficas, como as sombras produzidas por montanhas adjacentes. Os autores observaram que não houve uma clara dependência entre radiação solar global e a altitude e declividade. DE SOUZA et al. (2005) mencionaram que apenas uma pequena parte da variação anual da radiação solar é atribuída a declinação solar, isto é, a nebulosidade entre as estações seca e chuvosa é a maior causa de a alta variação na radiação solar global.

Ao observar a variação da radiação em função da orientação das vertentes houve uma diferença nos locais com maior disponibilidade energética em que no período de janeiro as vertentes voltadas ao Sul, Sudeste e Sudoeste foram as que tiveram maiores valores de R_g , enquanto que em julho as vertentes mais favoráveis foram as voltadas ao Norte, Nordeste e Noroeste. No hemisfério Sul, encostas orientadas para o Norte recebem maior insolação do que as voltadas para o Sul (HUGGET, 1995).

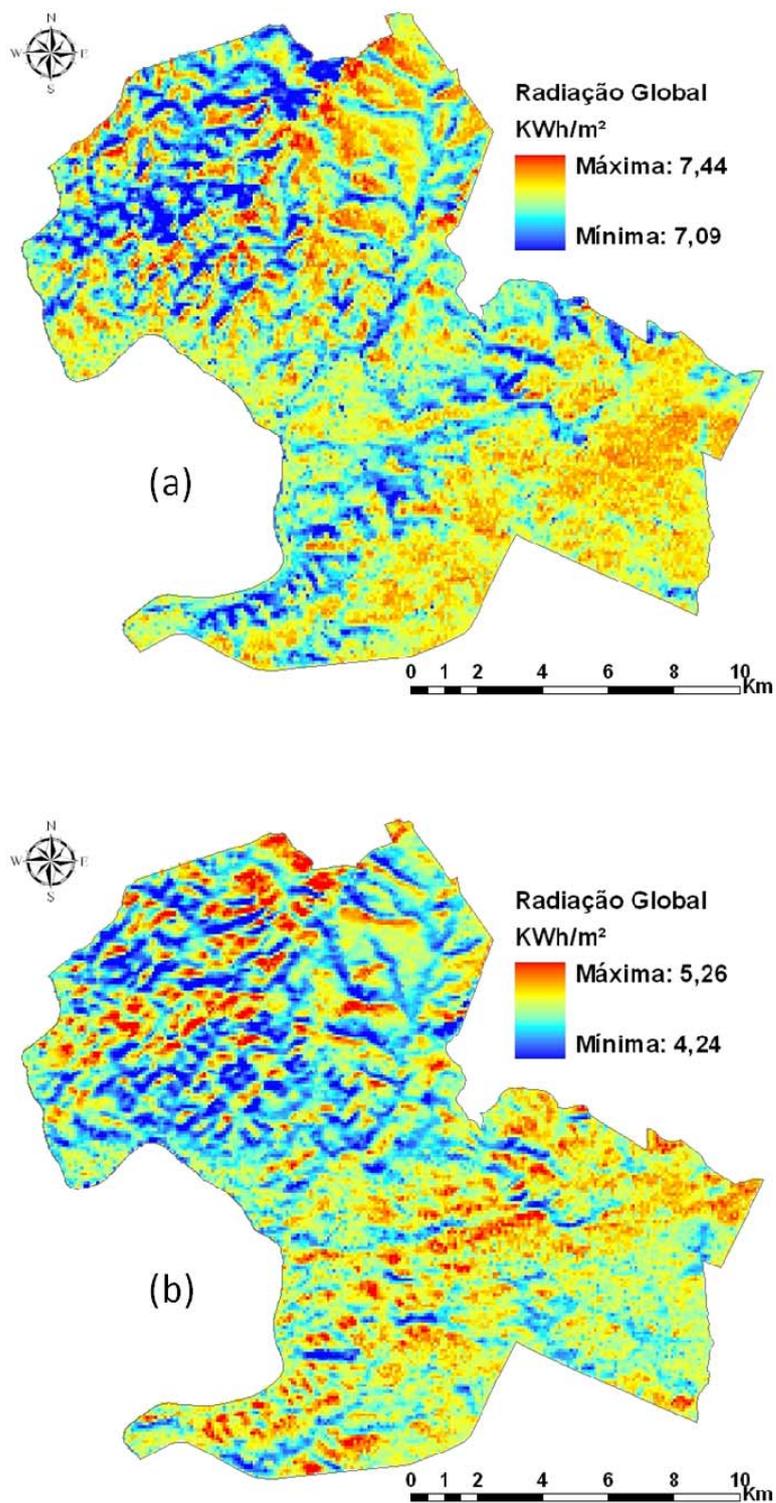


Figura 13: Distribuição espacial da radiação solar global (KWh m⁻²) para a condição de céu limpo em (a) Janeiro e (b) Julho de 2007 no perímetro urbano de Cuiabá-MT.

A distribuição espacial da Rg estimada apresentou intervalos de acordo com a latitude, com maiores médias diárias variando de 7,09 a 7,44 KWh/m² (período úmido) e 4,24 a 5,26 KWh/m² (período seco). MARTINS et al. (2005) elaboraram mapas da radiação global média mensal com valores semelhantes ao presente estudo com variação em torno de 6,0 a 7,5 KWh/m² em janeiro e 4,0 a 5,0 KWh/m² em julho para a região Centro-Oeste.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como a radiação solar é uma fonte de energia renovável a sua estimativa com uso de um MDE para o perímetro urbano de Cuiabá é uma alternativa de obter valores estimados com custo relativamente baixo.

Ao determinar a variabilidade da cobertura do céu houve variação do K_t de 0,002 a 0,69 com média de 0,47. Do total de dados, 58,61% possuem valores superiores a média de K_t e 41% inferior. Na estação Centro obteve-se 13,03% dias nublados, 84,57% parcialmente nublados e 2,40% limpos. Na estação CPA houve uma pequena diminuição de dias parcialmente nublados (82,83%) e um ligeiro aumento de dias nublados (14,14%) e limpos (3,03%).

Ao parametrizar os dados de entrada do modelo, tanto os valores adotados quanto os valores parametrizados, mostraram representar a sazonalidade da radiação nos pontos observados. A proporção da radiação difusa e a transmissividade foram os parâmetros que precisaram de maior ajuste já que os valores obtidos levaram em consideração as condições atmosféricas caracterizadas pelo K_t .

A média mensal da R_g medida foi $16,41 \text{ MJ m}^{-2}$ sendo que as condições de céu nublado, parcialmente nublado e limpo, a média foi $8,15 \text{ MJ m}^{-2}$, $17,97 \text{ MJ m}^{-2}$ e $24,35 \text{ MJ m}^{-2}$, indicando que houve variações na energia recebida pela superfície terrestre com relação ao tipo de cobertura do céu.

O modelo da extensão *Spatial Analyst*, ferramenta *Solar Radiation* apresentou melhor aplicabilidade para simular a radiação solar em condições de céu limpo. A simulação dessa variável para esse tipo de cobertura do céu apresentou melhores ajustes entre os dados estimados e medidos, com melhores índices estatísticos, menores *RMSE* e *MBE* e maiores coeficientes (*r* e *d*) do que para outros tipos de cobertura do céu, parcialmente nublado e nublado.

A comparação de variáveis, temperatura e umidade do ar, com a radiação difusa, apresentou correlação significativa somente no período úmido, em ambas as

estações, reforçando a influência da quantidade de material particulado no ar, durante o período seco, no comportamento das variáveis em estudo e na estimativa com o uso do MDE.

Ao observar a variação espacial da R_g para os períodos (úmido e seco) foi possível verificar que os maiores valores, em janeiro, foram para as vertentes orientadas ao Sul, Sudeste e Sudoeste e, em julho, as voltadas ao Norte, Nordeste e Noroeste. Essa variação espacial observada com uso do MDE dificilmente seria observada com medição de dados *in loco*.

6. RECOMENDAÇÕES

Na elaboração deste, foi verificado que não há estudos que determinem os intervalos do índice de claridade para caracterizar a condição meteorológica no local em estudo, podendo assim ter informações sobre a quantidade de nuvens presente na atmosfera, isso pode ser devido ao alto custo em disponibilizar estações meteorológicas para medir os dados da radiação solar global e suas componentes em vários pontos do local de interesse. Deste modo, foram adotados os intervalos do índice de claridade encontrados por Riciere (1998) para a cidade de Botucatu-SP, com latitude e condições climáticas diferentes, o que pode ter ocasionado um número muito baixo de ocorrências de dias limpos para Cuiabá.

Assim, para trabalhos futuros envolvendo estimativas da radiação solar, pode-se realizar a caracterização da cobertura do céu do local de estudo para encontrar o K_t caracterizando os limites da claridade de Cuiabá, ou ainda, utilizar outros intervalos proposto por outros autores, pode-se também utilizar outros pontos com altitudes variáveis; modelo de elevação com diferente resolução espacial derivado de outros satélites e sensores e avaliar os resultados, tanto de Cuiabá como de outras áreas para melhorar a qualidade dos mapas gerados com o uso da *Solar Radiation* e alcançar uma melhor parametrização e validação do modelo testando a aplicabilidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C.; ALVES, L. S. **Application of geomatic science for solar radiation estimates in Cuiaba, Mato Grosso, Brazil, using SRTM digital elevation model.** XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia - Minas Centro, Belo Horizonte, MG, 2009.

BARRETO, R.; ELS, R. H. V. **O uso de SIG para identificar áreas potenciais para sistemas descentralizados de geração de energia elétrica.** IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético – Itajubá, MG, 2004.

BATLLES, F.J.; BOSCH, J.L.; TOVAR-PESCADOR, J.; MARTÍNEZ-DURBÁN; 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, p. 336 - 345, 2008.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. **Introdução à Ciência da Geoinformação.** São José dos Campos, INPE, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>> Acesso em 17/01/2011.

CHIEN, P. Endeavour maps the world in three dimensions. **Geoworld**, n. 37, p. 32 – 38. 2000.

COOPER, P. I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, London, v. 12, n. 3, p. 333-346, 1969.

CUIABÁ. Prefeitura Municipal de Cuiabá. **Legislação Urbana de Cuiabá.** IPDU – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Urbano. Cuiabá: Entrelinhas, 2004.

DALLACORT, R.; RICIERI, R.P.; SILVA, S. L.; PAULO, S.L.F.; SILVA, F.F. Análises do comportamento de um actinógrafo bimetálico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.26, n 4, p.413-419, 2004.

DE SOUZA, J. L.; NICÁCIO, M. R.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1203-1220, 2005.

DIEZ-MEDIAVILLA, M.; DE MIGUEL, A.; BILBAO, J. Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). **Energy Conversion and Management**, v.46, p.2075-2092, 2005.

DINCER I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 4. p. 157-175. 2000.

DOZIER, J.; FREW, J. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation model data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 28: 963 – 969, 1990.

DRECHMER, P. A. O. **Comportamento e correção da radiação difusa obtida com o anel de sombreamento**. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2005.

DUARTE, D. H. S. **O Clima como Parâmetro de Projeto para a Região de Cuiabá**. 1995. 214f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

DUBAYAH R.; LOECHEL S. Modeling Topographic Solar Radiation Using GOES Data. **American Meteorological Society**. 1997.

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation model for GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 09, n. 04, p. 405-419, 1995.

ELLIOTT, D. Renewable energy and sustainable futures. **Futures**, v.32, p.261-274, 2000.

EL-SEBAII A.A.; TRABEA A.A. Estimation of horizontal diffuse solar-radiation in Egypt. **Energy Convers Manage**, v. 44(15): 2471–2482, 2003.

EL-SEBAII, A.A.; AL-HAZMI, F.S.; AL-GHAMDI, A.A.; YAGHMOUR, S.J. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v.87, p.568-576, 2010.

ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; OLIVEIRA, A.P.; SORAES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v.86, p.299-309, 2009.

EVSEEV, E.G.; KUDISH, A.I. The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south. **Solar Energy**, v.83, p.377-388, 2009.

FU, P., RICH, P. M. **Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales.** Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, USA. 1999.

FU P, RICH P. M. **The Solar Analyst user manual.** Helios Environmental Modeling Institute, LLC, Vermont; 2000.

FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**,v.37, p. 25-35, 2002.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. Uso do sensoriamento remoto no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta Daninha**, Edição Especial, v.20, p. 7-20, Viçosa - MG. 2002.

GASTLI, A.; CHARABI, Y. Solar electricity prospects in Oman using GIS-based solar radiation maps. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14,790–797, 2010.

GATES, D.M. Biophysical Ecology. **Springer - Verlag**, New York, 1980.

HOFIERKA, J. & ŠŮRI, M. **The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications.** In: Proceedings of the Open source GIS – Grass users conference 2002 – Trento, Italy, 11-13 September 2002.

HUGGET, R. J. **Geoecology: an evaluation approach.** Londres: Editora London, 320 p., 1995.

INÁCIO, T. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu.** Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009.

INMET, 2005, **Boletim da Estação 2504600 Ministério da Agricultura e do Abastecimento**, Delegacia Federal da Agricultura – DFA/MT 9º Distrito de Meteorologia. 2005.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation.** Toronto: Academic Press, 1983. 389p.

JACOVIDES, C. P.; HADJIOANNOU, L.; PASHIARDIS, S.; STEFANOU, L. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for the island of Cyprus. **Solar Energy**, Nicosia, Cyprus, v. 56, n. 6, p. 565-572, 1996.

KOCH, A; HEIPKE,C.; LOHMANN, P. – **Analysis of SRTM DTM methodology and practical results.** ISPRS, Commission IV, WG IV/6. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications. Ottawa, 2002.

LIST, R.J. **Smithsonian meteorological tables**. Sixth revised edition, Smithsonian Miscellaneous Collections. v. 114. Smithsonian Institution Press. Washington. 1971.

LOUTZENHISER, P.G.; MANZ, H.; FELSMANN, C.; STRACHAN, P.A.; FRANK, T.; MAXWELL, G.M. Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation. **Solar Energy**, v.81, p.254-267, 2007.

MACHADO, L. E. G.; NUNES, E. D; ROMÃO. **Análise da influência da topografia na variação sazonal de fitofisionomias na bacia do Rio Veríssimo - GO**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE, p. 2817-2822, 2009.

MAITELLI, G. T. **Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá-MT**. 1994. 220f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MAITELLI, G. T.; VILANOVA, S. R. F. A importância da conservação de áreas verdes remanescentes no centro político administrativo de Cuiabá-MT. **UNICIÊNCIAS**, v. 13, 2009.

MARINO JUNIOR, E. O uso do sensoriamento remoto orbital na pesquisa socioeconômica. **Revista Científica eletrônica de Agronomia**. Ano V, n.10. Periódico Semestral. 2006.

MARQUES, K.; PEREIRA, T. P.; ASSIS, S. V. **Análise do comportamento mensal do Índice de Limpidez**. Anais Congressos Brasileiros de Meteorologia, edição XI – Rio de Janeiro. 2000.

MARTIN, T. N.; STORCK, L.; DOURADO NETO, D. Simulação estocástica da radiação fotossinteticamente ativa e da temperatura do ar por diferentes métodos. **Pesq. agropec. Bras**, vol.42, n.9, p. 1211-1219, 2007.

MARTÍNEZ-DURBÁN, M.; ZARZALEJO, L.F.; BOSCH, J.L.; ROSIEK, S.; POLO, J.; BATTLES, F.J. Estimation of global daily irradiation in complex topography zones using digital elevation models and meteosat images: Comparison of the results. **Energy Conversion and Management** 50, p.2233-2238, 2009.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, 2004.

MARTINS, E.R; PEREIRA, E.B.; ABREU, S.L.; COLLE, S. **Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 3137-3145, 2005.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; GUARNIERI, R. A.; SILVA, S. A. B.; YAMASHITA, C. S.; CHAGAS, R. C.; ABREU, S. A.; COLLE, S. **Mapeamento dos recursos de energia solar no Brasil utilizando modelo de transferência radiativa BRASIL-SR**. I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 2007.

MARTINS, J. A.; DALLACORT, R.; INOUE, M. H.; SILVA, D. J.; CARVALHO, I. F. **Caracterização da cobertura do céu na região de Tangara da Serra – MT**. XXXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Juazeiro (BA)/Petrolina (PE). 2009.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics**. 2 ed. **Edward Arnold**, London, United Kingdom, 1990.

NOTTON, G.; CRISTOFARI, C.; POGGI, P. Performance evaluation of various hourly and daily slope irradiation models using Mediterranean experimental data of Ajaccio. **Energy, Conversion and Management**, v.47, p.147-173, 2006.

OLIVEIRA, A. S.; SANTOS, F. M. M.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; DURANTE, L. C. e NINCE, P. C. C. **Análise da Variação de Temperatura e Umidade em Função das Características de Ocupação do Solo em Cuiabá - MT**. Engenharia Ambiental-Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 1, p. 240-251, 2009.

OUARZEDDINE, M. S. **Generation of digital terrain models using polarimetric SAR interferometry**. 2002. 80p. Thesis (Doutorado em Geo-informação) International Institute for Geo-information Science and Earth Observation - ITC, Holanda, 2002.

PEARCY, R.W. Radiation and light measurements. In: R.W. Pearcy, J. Ehleringer, H.A. Mooney, and P.W. Rundel (eds), **Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation**. Chapman and Hall. New York. p.95-116. 1989.

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU S. L., RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 60 p., 2006. Disponível em <<http://www.cptec.inpe.br/sonda>> Acesso em setembro/2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; COLLE, S.; STUHLMANN, R. Biomass burning controlled modulation of the solar radiation in Brazil. **Adv. Space Res.**, vol. 24, n. 7, p. 971-975, 1999.

PINTO, L.I.C; MORAES, M.; MARTINS, F.; PEREIRA, E.B.; FISCH, G.F., SILVA, A. e LYRA, R. **Avaliação do Modelo BRAMS para estimativa do Vento Médio para o Aproveitamento da Energia Eólica**. XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém, PA; 2010.

REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Diffuse Fraction Correlations. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, 1990.

RICH, P.M. **A manual for analysis of hemispherical canopy photography**. Los Alamos National Laboratory Report, LA-11733-M. 1989.

RICH, P.M. Characterizing plant canopies with hemispherical photography. In: NS Goel and JM Norman (eds). Instrumentation for studying vegetation canopies for remote sensing in optical and thermal infrared regions. **Remote Sensing Reviews** 5:13-29. 1990.

RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. 1998. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1998.

RICIERE, R. P.; DALLACORT R.; GNOATTO E.; SOUZA S. N. M. **Eficiência do método de medida da radiação solar difusa medida por sombreamento em função do tipo de cobertura do céu**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4, 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC00000022002000100054&lng=en&nrm=abn> Acesso em outubro/2010.

RODRIGUES, M. **Geoprocessamento: um retrato atual**. FATOR GIS – A revista do geoprocessamento. Jul/Ago/Set/93 – nº 02 – Curitiba: SAGRES, p. 20-23, 1993.

ROSEN, P.; EINEDER, M.; RABUS, B.; GURROLA, E.; HENSLEY, S.; KNOEPFLE, W.; BREIT, H.; ROTH, A.; WERNER, M. **SRTM mission cross comparison of X and C band data properties**. In: **international Geoscience and Remote Sensing Symposium**, University of New South Wales, Sydney, Australia. II: 751-753. (2001a).

ROSEN, P. A.; HENSLEY S.; GURROLA, E.; ROGEZ, F.; CHAN, S.; MARTIN, J.; RODRIGUEZ, E. SRTM C-band topographic data: quality assessments and calibration activities. In: **international Geoscience and Remote Sensing Symposium**, University of New South Wales, Sydney, Australia. II: 739-741. (2001b).

SAMPAIO, M.M.A., **Análise do desempenho térmico e lumínico de habitações populares em Cuiabá-MT**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2006.

SANTOS, A. F.; DE MATTOS, J. G.Z.; DE ASSIS, S. V. **Frequência de dias claros com base nos valores do índice de limpidez**. Anais 1980-2006. Edição XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2000.

SATYAMURTI, P.; NOBRE, C. A.; SILVA-DIAS, P. L. Meteorology of Southern Hemisphere. Vol. 27, publicado por D. J. KAROLY e D.G. VINCENT, p. 119-139, **American Meteorological Society**, 1998.

SMITH B.; DAVID SANDWELL D. Accuracy and resolution of shuttle radar topography mission data. **Geophysical Research Letters**, vol. 30, n. 9, 1467-1470, 2003.

SOUZA, A. P. **Evoluções, frações e estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas**. 2009. 130f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual; Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2009.

SPENCER, J. W. **Fourier series representation of the position of the sun**. Search 2, v. 5, p.172, 1971.

STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**. v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

TORRES, F. T. P.; MOREIRA, L. N.; SOARES, E. A.; PIERRE, J. U.; RIBEIRO, G. A. **Exposição das vertentes e ocorrências de incêndios em vegetação no município de Juiz de Fora-MG**. XIII SBGFA Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal de Viçosa. 2009.

ULGEN K., HEPBASLI A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. **Energy Conversion and Management** 50: 149–156, 2009.

USGS Shuttle Radar Topography Mission - SRTM. Disponível em <<http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>> Acesso em maio/2010.

VALIATI, M. I. **Estimativa da irradiação solar global com diferentes partições para a região de Cascavel**. 2001. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2001.

VALIATI, M. I.; RICIERI, R. P.; SILVA, S.L.; GRIGOLETO, M. W.; SILVA, W. C. M. **Estimativa da irradiação solar global, para a região de Cascavel, com partição mensal**. Congresso e Mostra de Agroinformática, Ponta Grossa-PR. outubro de 2000.

VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. 4ª ed. Viçosa: Editora UFV, 449 p. 2006.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetros com sensores fotoelétricos**. 2008. 95f. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Meteorologia. Universidade de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Pelotas, 2008.

WEBER, M. A. **Parametrização e validação do ciclo do carbono e do nitrogênio do modelo Cnetury 4.5 com experimentos de longa duração em um argissolo do sul do Brasil**. 2010. 169f. Tese (doutorado) – Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, 2010.