

## ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA NO PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE DURANTE OS PERÍODOS SECOS DE 1999 E 2000

RITA DE CÁSSIA SILVA VON RANDOW<sup>1</sup> E REGINA CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Earth System Science - Climate Change (ESS - CC), Alterra and Wageningen UR  
P.O. Box 47 6700 AA Wageningen, The Netherlands, E-mail: Rita.daSilva@wur.nl

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Centro de Previsão de Tempo e  
Estudos Climáticos (CPTEC), Divisão de Clima e Meio Ambiente (DMA).

Av. dos Astronautas, 1758, São José dos Campos, SP, Brasil, CEP 12201-970, E-mail: regina@cptec.inpe.br

Recebido Outubro 2005 - Aceito Agosto 2006

### RESUMO

O desempenho de sete formulações para estimar o fluxo de radiação de onda longa proveniente da atmosfera ( $L\downarrow$ ) para dias de céu claro foi avaliado para dados obtidos na região do Pantanal Sul Mato-Grossense ( $19^{\circ}33'48,2''S$ ;  $57^{\circ}00'53,8''W$ ). As estimativas foram comparadas com dados medidos nos períodos secos de 1999 e de 2000. Considerando separadamente os dias de céu claro de 1999 (8) e os de 2000 (16), constatou-se que as estimativas de  $L\downarrow$  para os dados de 1999 com as formulações originais concordaram razoavelmente com os valores de  $L\downarrow$  medidos, subestimando-os. O ajuste das formulações de  $L\downarrow$  às condições locais de 1999 apontou que aquela proposta por Prata deve ser preferencialmente utilizada, pois além de derivar de uma base física, apresentou tanto o maior coeficiente de determinação (0,97), quanto a melhor probabilidade segundo o algoritmo de Box e Hill ( $\Pi=0,17$ ). A validação das parametrizações ajustadas com os dados de 2000 mostrou que as de 1999 são mais representativas para condições secas do solo e com presença de aerossóis naquele ano, que para as condições de solo úmido observadas em 2000. O ajuste das parametrizações às condições de 2000 apontou aquela de Brunt como a mais representativa para o Pantanal seco sem a presença de queimadas na região.

**Palavras-chave:** radiação de onda longa atmosférica, emissividade atmosférica, fórmulas empíricas.

**ABSTRACT:** ESTIMATION OF LONG-WAVE ATMOSPHERIC RADIATION OVER PANTANAL SUL MATO-GROSSENSE DURING THE DRY SEASONS OF 1999 AND 2000.

The performance of seven parameterizations to estimate the flux of atmospheric long wave radiation ( $L\downarrow$ ) for clear sky conditions was evaluated considering micrometeorological data obtained in the Pantanal Sul Mato-Grossense region ( $19^{\circ}33'48,2''S$ ;  $57^{\circ}00'53,8''W$ ). The models were compared with data measured during the dry seasons of 1999 and 2000. Considering separately clear sky days in 1999 (8 days) and in 2000 (16 days), it was observed that the parameterizations of  $L\downarrow$  for 1999 data agreed fairly with the measurements, underestimating them. The adjustment of the parameterizations to the local conditions in 1999 indicated that the one proposed by Prata should be preferred because, besides having a physical basis, it presented both the highest coefficient of determination (0.97) and the highest probability according to the algorithm of Box and Hill ( $\Pi=0,17$ ). The validation of the adjusted parameterizations with data from 2000 showed that the ones from 1999 are more representative of the conditions of dry soil and with the presence of aerosols found during that year, than representative of the conditions of wet soil observed in 2000. The adjustment of the parameterizations for the conditions of 2000 indicated that the one proposed by Brunt is the most representative for the dry season in Pantanal with the absence of fires in the region.

**Keywords:** long-wave atmospheric radiation, emissivity of clear sky, empirical equations.

## 1. INTRODUÇÃO

O fluxo de radiação de onda longa proveniente da atmosfera ( $L\downarrow$ ) é uma importante componente da troca radiativa no nível da superfície, e esta, por sua vez, é uma importante componente do balanço de energia. O saldo de radiação de ondas longas, também chamada radiação termal ou radiação efetiva, é importante na determinação da troca de energia no período noturno, quando há ocorrência de orvalho e geadas. Por outro lado, o saldo de radiação total é importante na determinação da troca de energia durante o dia, quando ocorre a maior parte da evapotranspiração. Assim sendo, o fluxo do saldo de radiação de ondas longas é a forçante da formação de geadas, enquanto aquela da evapotranspiração é o fluxo de saldo de radiação total, a qual fornece o calor latente de vaporização exigido (embora a condução de calor e a convecção também desempenhem importante papel). Estes fluxos de radiação são de grande importância em estudos meteorológicos e climatológicos, bem como em projetos de estufas e outras construções, com a finalidade de prever seus balanços térmicos e consequentes climas internos (Jimenez et al., 1987; Heitor et al., 1991).

A radiação de onda longa proveniente da atmosfera é a componente do balanço de radiação mais difícil de ser medida. Embora haja instrumentos para sua medida, esses emitem radiação em comprimentos de onda e intensidade comparáveis àquelas da suposta medida, o que interfere no resultado. Não obstante, em muitas situações práticas em Meteorologia, pode-se estimar a radiação de onda longa através de variáveis mais facilmente medidas (Brutsaert, 1982), ou mesmo por diferença, através da equação do balanço de radiação (Manzi et al., 1986; André et al., 1988; Viswanadham et al., 1990; Bastable et al., 1993; Feitosa, 1996; entre outros).

Diferentes formulações têm sido propostas para estimar a radiação de onda longa da atmosfera à superfície terrestre. Métodos empíricos e analíticos estimam a radiação a partir de valores de temperatura do ar e da pressão de vapor ou do ponto de orvalho, medidas no nível do abrigo (Prata, 1996). A principal diferença entre os métodos analíticos e empíricos está no fato dos primeiros terem sido derivados a partir de uma base física, enquanto os últimos são obtidos a partir de correlações empíricas.

Métodos detalhados utilizam perfis específicos dos constituintes atmosféricos, e incluem o conhecimento de suas propriedades radiativas para derivar a emissão atmosférica. Em princípio, estes métodos detalhados são preferidos, embora, na prática, necessitem de informações iniciais específicas do estado da atmosfera, bem como de informações fundamentais referentes às propriedades radiativas dos constituintes atmosféricos, em especial do vapor d'água no intervalo de 8-13 $\mu$ m.

A maioria das equações que estimam a radiação de onda longa da atmosfera (Ångström, 1918; Brunt, 1932; Elsasser,

1942; Swinbank, 1963; Idso e Jackson, 1969; Brutsaert, 1975 e Satterlund, 1979) só têm validade para dias de céu claro, e apresentam melhor desempenho quando se considera base diária ou média de longo prazo. Portanto, estimativas horárias, freqüentemente exigidas em modelos de balanço de energia à superfície, são mais sujeitas a erros, sendo, muitas vezes, necessário que sejam ajustadas de acordo com a hora do dia (Alados – Arboledas e Jimenez, 1988). Em dias cobertos, devem ser efetuados ajustes para incluir os efeitos da nebulosidade.

Estimativas ou medidas da radiação de onda longa da atmosfera têm sido determinadas para algumas regiões do Brasil, em especial para a região amazônica; entretanto, pouco se conhece sobre os valores desta componente do balanço de radiação em um importante ecossistema brasileiro, o Pantanal. Assim, este trabalho tem como objetivo estimar a radiação de onda longa proveniente da atmosfera para o período seco da região do Pantanal Sul Matogrossense, a partir de sete modelos propostos na literatura, comparar as estimativas resultantes com valores medidos na estação seca de 1999, ajustar os modelos às condições locais da região e validar estes modelos com dados medidos na estação seca subsequente.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O Pantanal Mato-Grossense é um ecossistema de grande importância sócio-econômica e ecológica, destacando-se pela sua vasta biodiversidade, o que o torna uma das maiores planícies inundáveis da Terra. Como parte de um programa de estudos do Pantanal Sul Mato-Grossense, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), com a colaboração de outras Instituições, realizaram o Projeto Interdisciplinar do Pantanal (IPE), para a coleta de dados micrometeorológicos necessários para investigar a estrutura da camada limite superficial acima da região. Neste contexto, foram realizadas quatro campanhas intensivas de coleta de dados, cujos experimentos de campo ocorreram durante a estação seca de 1996 (IPE-0), no período de transição entre as estações úmida e seca de 1998 (IPE-1), na estação seca de 1999 (IPE-2) e na estação inundada de 2002 (IPE-3). Além disso, medidas contínuas de algumas variáveis micrometeorológicas vêm sendo coletadas desde o final do experimento IPE-1.

O sítio experimental localiza-se próximo à Base de Estudos do Pantanal (BEP), da UFMS, na região Sul do Pantanal (19°33'48"S; 57°00'53"W), em Passo do Lontra, município de Corumbá, MS. A base localiza-se a aproximadamente 315 km de Campo Grande, 100 km de Corumbá e 100 km de Miranda. Os ventos predominantes são de noroeste neste local, contribuindo para trazer informações micrometeorologicamente relevantes ao sítio experimental, referentes ao Pantanal central.

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados no experimento IPE-2, realizado em setembro de 1999, e aqueles medidos durante o monitoramento realizado na estação seca (outubro-dezembro) de 2000. Estas duas estações secas caracterizaram-se por apresentar condições distintas, isto é, em 1999 o solo encontrava-se seco e coberto por gramíneas com altura média de 0,50 m, com a região apresentando muitos focos de queimadas e grande acúmulo de aerossóis na atmosfera; já na estação seca de 2000, durante o mês de outubro, havia lâminas d'água à leste da torre micrometeorológica instalada no sítio experimental, com o solo estando coberto por gramíneas mais verdes, e diminuição no número de focos de queimadas na região. Ressalta-se que o número de focos de queimadas no Estado do Mato Grosso do Sul variou de aproximadamente 4000 em setembro de 1999 para aproximadamente 500 em setembro de 2000 ([www.cptec.inpe.br/products/queimadas/graficos\\_estado\\_noaa.html](http://www.cptec.inpe.br/products/queimadas/graficos_estado_noaa.html)). Ressalta-se que a diversidade das condições ambientais determina uma grande variedade de vegetação. É comum no Pantanal a ocorrência de formações vegetais denominadas parques, nas quais sobressai uma espécie em particular. Entre elas estão os carandazais, em que o elemento predominante é a palmeira carandá, os buritizais, onde dominam a palmeira buriti e os paratudais, formados por um tipo de ipê, o paratudo (Magalhães, 1992), sendo esta última espécie a que predomina na região estudada. Ao sul da torre, a vegetação é caracterizada por um cinturão de paratudais e mata ciliar. Ao norte e à oeste encontram-se arbustos e árvores de médio porte situados em região com extensas áreas de gramíneas, enquanto que à leste predominam campos limpos, ou seja, somente com gramíneas.

Para a estimativa da radiação de onda longa consideraram-se medidas de temperatura, de pressão e de umidade relativa do ar, bem como dados de radiação de ondas curtas (para a obtenção da cobertura de nuvens) e dados de radiação de ondas longas para comparação. Todas as medidas foram feitas por instrumentos instalados à altura de 21 m em uma torre de alumínio. Os instrumentos para medidas de radiação, previamente calibrados, foram fixados em mastros com 4 m de comprimento apontados para a direção norte. Para medidas de radiação de onda longa foi utilizado um saldo radiômetro CNR1 da Kipp & Zonen, com acurácia de  $\pm 10\%$  para totais diários. O CNR1 consiste de dois piranômetros (do tipo CM3) para medida da radiação solar e de dois pirgeômetros (do tipo CG3) para medida da radiação infravermelha próxima. As medidas de radiação de onda curta foram obtidas por um piranômetro CM5, também da Kipp & Zonen. Os dados de temperatura e de umidade durante o experimento IPE-2 foram obtidos com um psicrômetro aspirado, composto por um termômetro de bulbo úmido e outro de bulbo seco de resistência de platina (Didcot Instruments, Abingdon, RU) com uma precisão

de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . A partir de 2000 passaram a ser medidos com o termo-higrômetro HMP45C da Campbell, composto de um sensor de temperatura modelo PRT/1000 $\Omega$ , IEC751 1/3 classe B, com acurácia igual a  $-0,3 + 0,005 T$  ( $T \leq 20^\circ\text{C}$ ) e  $0,1 - 0,005 T$  ( $T > 20^\circ\text{C}$ ) e um sensor de umidade modelo HUMICAP180 com precisão a  $20^\circ\text{C}$  de  $\pm 2\%$  para umidade entre 0 e 90% e de  $\pm 3\%$  para umidade entre 90 e 100%.

Para a aquisição dos dados, utilizaram-se dois sistemas de coleta CR10 da Campbell Scientific, Inc. Estes foram programados para ler os sensores a cada 10 segundos; outrossim, em 1999, era feita a cada minuto a média de cada parâmetro medido, enquanto em 2000 estas médias foram obtidas a cada trinta minutos.

Coletaram-se dados em 22 dias no período de 08 a 29 de setembro de 1999 (dias 251 a 272) durante o experimento IPE-2 e um total de 76 dias no período de 18 de setembro a 02 de dezembro de 2000 (dias 261 a 336) durante o período de monitoramento contínuo.

No presente trabalho avaliou-se o desempenho de sete modelos para estimativa da radiação de onda longa proveniente da atmosfera ( $L\downarrow$ ) para condições de céu claro isto é, os modelos de Brunt (1932), Swinbank (1963), Idso e Jackson (1969), Brutsaert (1975), Satterlund (1979), Idso (1981) e Prata (1996). As equações destes modelos são empíricas, exceto a de Brutsaert (1975), que deriva da equação de transferência radiativa de Schwarzschild para dias sem nuvens em condições atmosféricas próximas à da atmosfera padrão (porém seus coeficientes são ajustados para as condições locais) e a de Prata (1996), cuja derivação assumiu que a absorção no espectro de onda longa pode ser representada por um modelo de banda exponencial modificada, levando em conta que a contribuição para a irradiância na região da janela atmosférica (8 - 14  $\mu\text{m}$ ) pode depender da pressão parcial do vapor d'água e que a trajetória do vapor d'água deve ser modificada para representar trajetórias não homogêneas. Consideraram-se tanto suas formulações originais (Tabela 1), quanto suas adaptações para o Pantanal Sul-Matogrossense. Os dados medidos utilizados nas estimativas foram as médias horárias de 1999 e de 2000.

Conforme mencionado, como a maior parte das formulações propostas para a estimativa da radiação de onda longa é válida somente para condições de céu claro, selecionaram-se para análise, nos períodos considerados, apenas os dias claros, cuja nebulosidade foi avaliada em termos da transmissividade (Nkemdirim, 1972), a qual é obtida através da razão entre a radiação de ondas curtas recebida à superfície e a radiação global incidente no topo da atmosfera. Assim, somente dias com faixas de transmissividade superior a 0,5, correspondendo a condições sem nuvens, foram considerados.

A pressão de vapor d'água no período de 1999, necessária para a estimativa de  $L\downarrow$  em algumas formulações, foi

**Tabela 1** – Equações propostas na literatura para parametrização da radiação de onda longa proveniente da atmosfera, em que  $\xi = 46,5 (e_0/T_0)$ ;  $e$ ,  $e_0$  e  $T_a$  são a pressão de vapor d'água do ar (mb), pressão de vapor d'água (mb) e a temperatura do ar (K) próximo à superfície;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

Modelo	Parametrização
Brunt (1932)	$L \downarrow = (0,52 + 0,065 \sqrt{e}) \sigma T_a^4$
Swinbank (1963)	$L \downarrow = 9,2 \times 10^{-6} \sigma T_a^6$
Idso e Jackson (1969)	$L \downarrow = \{1 - 0,26 \exp[-7,77 \times 10^{-4} (273 - T_a)^2]\} \sigma T_a^4$
Brutsaert (1975)	$L \downarrow = [1,24 (e_a / T_a)^{1/7}] \sigma T_a^4$
Satterlund (1979)	$L \downarrow = (\sigma T_a^4) 1,08 [1 - \exp(-e_o^{T_a/2016})]$
Idso (1981)	$L \downarrow = [0,7 + 5,95 \times 10^{-5} e \exp(1500/T)] \sigma T_a^4$
Prata (1996)	$L \downarrow = [1 - (1 + \xi) \exp\{-(1,2 + 3,0 \xi)^{1/2}\}] \sigma T_0^4$

obtida em função da pressão de saturação do vapor d'água e das temperaturas de bulbo seco e úmido, como segue:

$$e = e_{su} - \lambda P (T_D - T_W) \quad (1)$$

em que  $e_{su}$  é a pressão de saturação do vapor d'água à temperatura do bulbo úmido (hPa),  $\lambda$  é a constante psicrométrica ( $\lambda = 0,00067^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $P$  é a pressão atmosférica local,  $T_D$  e  $T_W$  as temperaturas de bulbo seco e úmido, respectivamente. Para o período de 2000, esta variável foi obtida pela seguinte equação:

$$e = \frac{UR e_s}{100} \quad (2)$$

sendo  $UR$  a umidade relativa e  $e_s$  a pressão de saturação do vapor à temperatura de bulbo seco.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar o desempenho de diferentes equações propostas na literatura para a estimativa da radiação de onda longa da atmosfera ( $L\downarrow$ ) para as condições do Pantanal Sul Mato-Grossense, consideraram-se 08 dias de céu claro do período de setembro de 1999 e 16 dias do período de setembro a outubro de 2000. Os valores de  $L\downarrow$  estimados, tanto com as equações propostas na literatura quanto com as ajustadas às condições locais da região estudada, foram comparados com valores de  $L\downarrow$  medidos em 1999. Em seguida, as equações para  $L\downarrow$  ajustadas para 1999 foram validadas com dados de 2000. Devido às diferenças nas condições locais de umidade do solo entre ambos os anos avaliados, ajustaram-se também as equações dos modelos para os dados de 2000, a fim de se determinar as que melhor representassem as condições do Pantanal Sul Mato-Grossense durante a estação seca, sem a presença de focos de queimadas na região.

A Figura 1 apresenta os valores de  $L\downarrow$  calculados com cada modelo, a partir das equações originais mostradas na Tabela 1, versus os valores medidos em 1999 (médias horárias). Nota-se que as equações, apesar de utilizar coeficientes específicos às regiões para as quais foram desenvolvidas, estimam razoavelmente os valores medidos ( $0,92 \leq R^2 \leq 0,96$ ), sendo a equação de Brunt (1932) a que mais subestima os mesmos, o que também pode ser visto na Figura 2, que apresenta a variação média diária dos valores de  $L\downarrow$  medidos e estimados. A Tabela 2 apresenta as estatísticas correspondentes, mostrando que os valores (negativos) do erro médio absoluto (EMA) variaram de  $-29,25 \text{ W m}^{-2}$  a  $-2,01 \text{ W m}^{-2}$ , o que indica que para a maioria das equações propostas na literatura, exceto para a proposta por Idso ( $0,11 \text{ W m}^{-2}$ ), os resultados estimados foram inferiores aos medidos, independentemente de cada equação levar em consideração a pressão de vapor e a temperatura do abrigo, ou somente a temperatura do abrigo. Isto pode estar relacionado com os coeficientes utilizados nas equações, os quais foram ajustados para outras regiões, diferentes daquela aqui estudada. Os valores do desvio médio quadrático (DMQ) obtidos com as parametrizações foram razoavelmente elevados, variando de  $7,40 \text{ W m}^{-2}$  a  $30,05 \text{ W m}^{-2}$ . Ressalta-se que os valores de EMA e de DMQ encontrados foram menores que aqueles encontrados por Galvão (1999), para uma região de pastagem em Rondônia, e por Silva Correia (2001), para uma área de policultivos na Amazônia, o que mostra que os coeficientes ajustam-se mais às condições do Pantanal do que às condições da Amazônia, por exemplo, o que pode estar relacionado com o fato do Pantanal estar situado em latitude mais próxima daquelas para as quais os modelos foram originalmente desenvolvidos. A melhor adequação em função da latitude é uma consequência da temperatura da região e, mais fortemente, da umidade do ar, que na Amazônia é muito alta, diferentemente do Pantanal na estação seca.

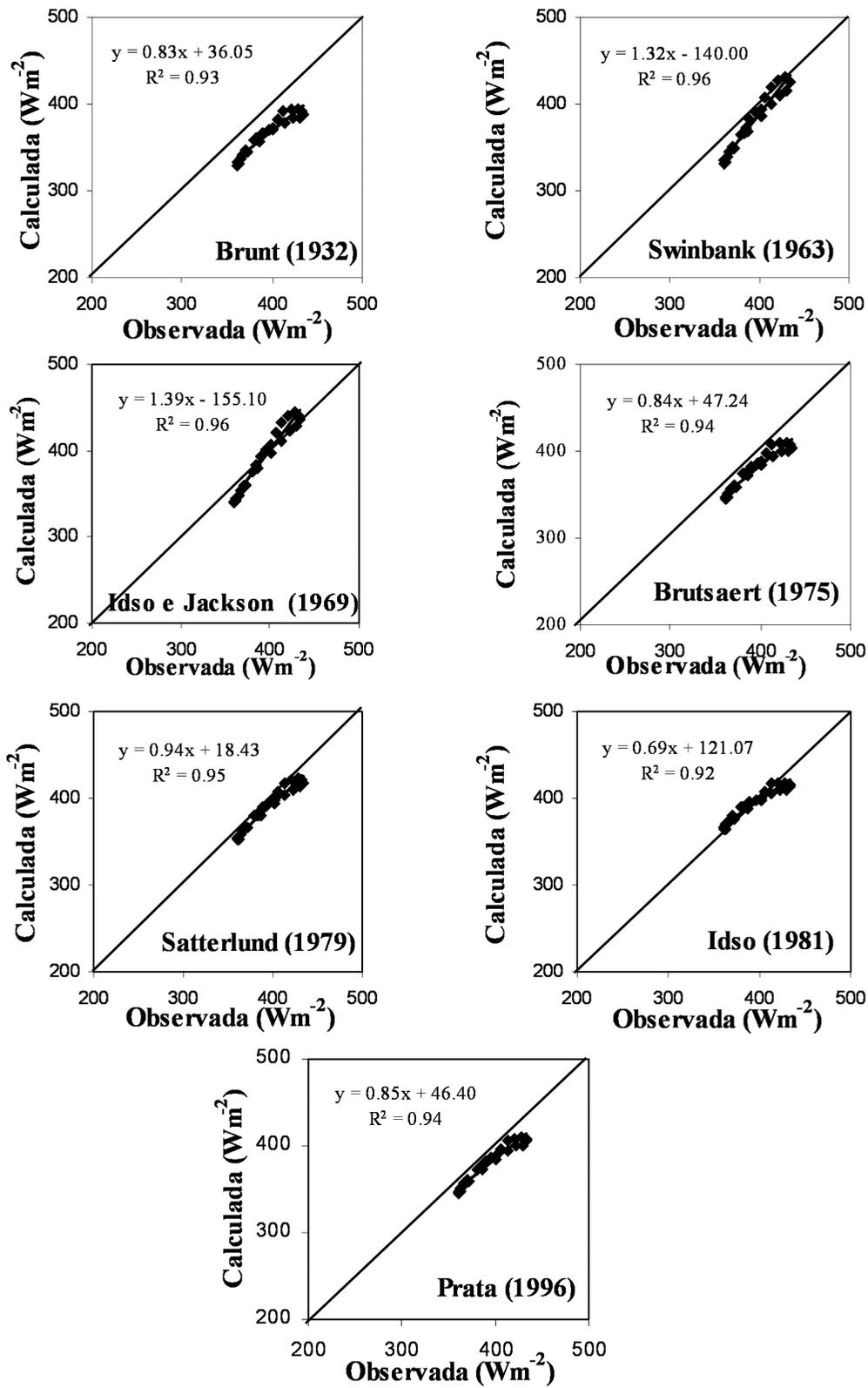
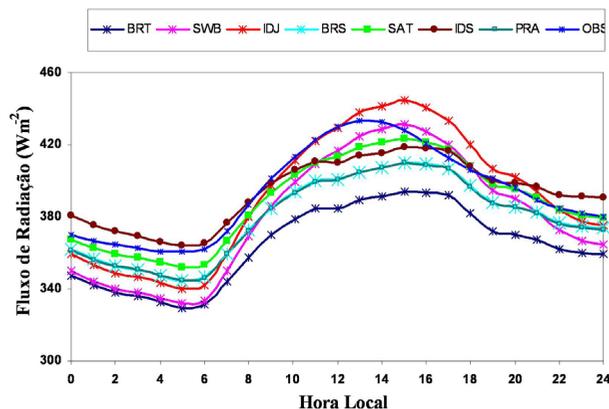


Figura 1 – Comparação entre os valores medidos de  $L_{\downarrow}$  e os valores estimados pelos modelos de Brunt (a), Swinbank (b), Idso e Jackson (c), Brutsaert (d), Satterlund (e), Idso (f) e Prata (g), considerando-se os dados de 1999.



**Figura 2** – Variação média horária da radiação de ondas longas da atmosfera observada ( $L\downarrow$ ) e calculada pelos modelos propostos na literatura, para os dias de céu claro do período de 1999.

**Tabela 2** – Estatísticas relacionando os valores de  $L\downarrow$  estimados e os medidos em 1999, em que EMA = Erro Médio Absoluto e DMQ = Desvio Médio Quadrático.

Parametrizações	EMA ( $Wm^{-2}$ )	DMQ ( $Wm^{-2}$ )	R	R <sup>2</sup>
Brunt (1932)	-29,25	30,05	0,97	0,94
Swinbank (1963)	-13,04	16,66	0,98	0,96
Idso e Jackson (1969)	-2,01	12,06	0,98	0,96
Brutsaert (1975)	-14,07	15,54	0,97	0,94
Satterlund (1979)	-5,11	7,40	0,98	0,95
Idso (1981)	0,11	9,72	0,96	0,92
Prata (1996)	-14,44	15,81	0,97	0,94

### 3.1. Ajuste dos parâmetros das equações propostas na literatura às condições locais, para os dados de 1999

Para determinar o ajuste dos parâmetros das equações empíricas às condições locais do Pantanal, analisou-se a correlação entre a emissividade atmosférica, estimada a partir da relação  $L\downarrow = \epsilon \sigma T_a^4$ , e as variáveis utilizadas em cada equação empírica.

Para o ajuste dos parâmetros do modelo de Prata (1996) a análise foi feita a partir do pacote “Statistica”, com o ajuste do

valor constante (46,5) do parâmetro  $\xi$  para o Pantanal obtido a partir da estimativa da relação entre a água precipitável ( $u$ ) e a razão entre a pressão de vapor e a temperatura ( $e_0/T_0$ ). A água precipitável foi calculada pela fórmula de Hann ( $u = 2,5 e$ ) citada por Vianello e Alves (1991), considerando-se a média diária entre os oito dias de céu claro. Assim, considerou-se  $\xi = 75,03 (e_0/T_0)$ . A Tabela 3 apresenta as equações ajustadas, enquanto a Figura 3 apresenta os coeficientes das equações ajustadas para o Pantanal Sul Mato-Grossense.

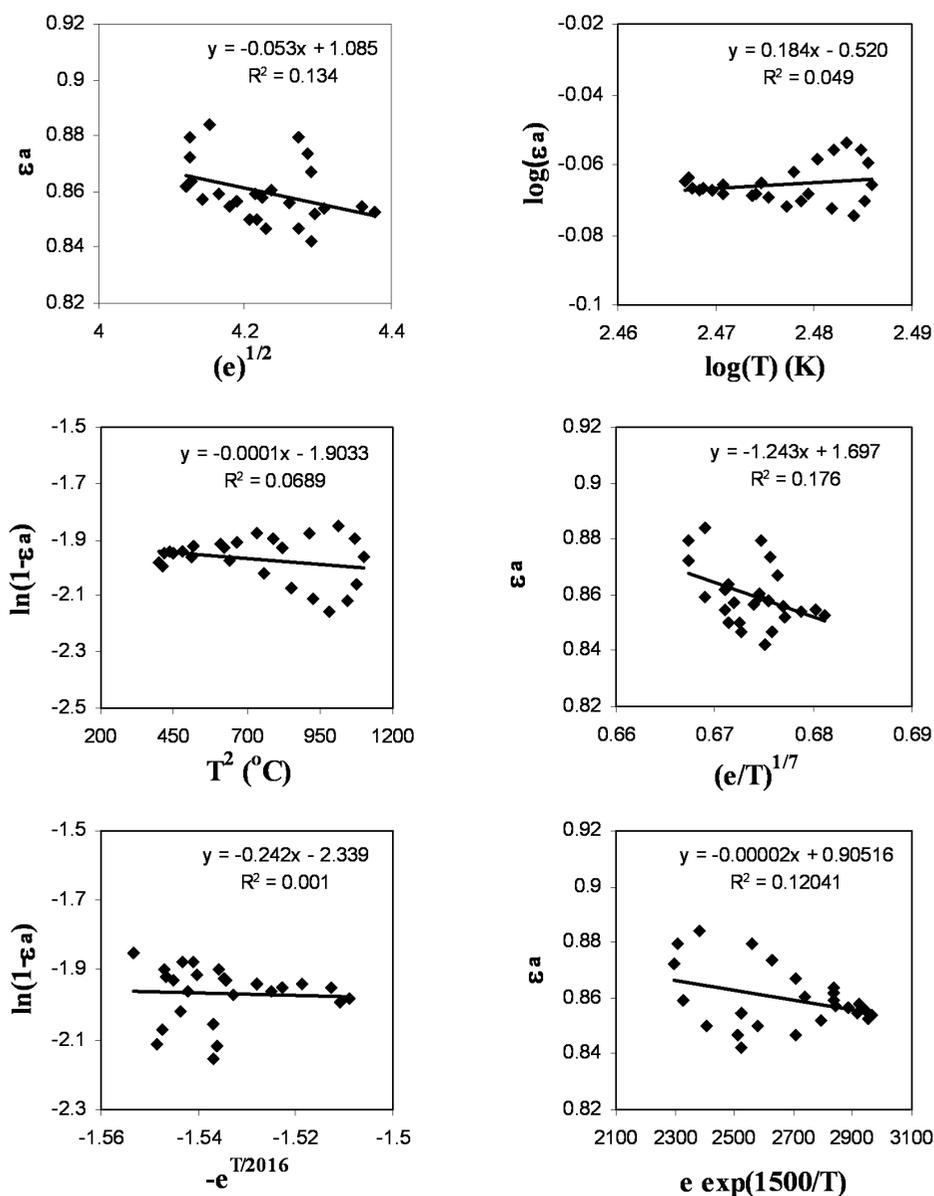
**Tabela 3** – Equações com os coeficientes ajustados às condições do pantanal para os dados de 1999.

Parametrizações	Equações
Brunt (1932)	$L\downarrow = [-0,053(e^{0,5}) + 1,085] \sigma T^4$
Swinbank (1963)	$L\downarrow = [10^{(0,184 \log(T) - 0,520)}] \sigma T^4$
Idso e Jackson (1969)	$L\downarrow = [1 - \exp(-0,0001 T^2 - 1,903)] \sigma T^4$
Brutsaert (1975)	$L\downarrow = [1,697 - 1,243 (e/T)^{1/7}] \sigma T^4$
Satterlund (1979)	$L\downarrow = \{1 - \exp[-0,242(-e^{T/2016}) - 2,339]\} \sigma T^4$
Idso (1981)	$L\downarrow = [0,905 - 2 \times 10^{-5} (e \exp(1500/T))] \sigma T^4$
Prata (1996)	$L\downarrow = \{1 - (1 + \xi) \exp[-(13,72 - 0,069\xi)^{0,5}]\} \sigma T^4$

Observa-se que os pontos de cada gráfico contido na Figura 3 não se ajustam perfeitamente a uma reta. Mesmo assim, os coeficientes encontrados através destas equações geraram resultados que possibilitam explicar o desempenho de cada equação. Com os ajustes, as maiores diferenças entre os valores calculados pelas equações e aqueles medidos, tanto para o período diurno quanto para o noturno, caíram respectivamente de  $45,12 \text{ W m}^{-2}$  e  $31,20 \text{ W m}^{-2}$  (com a equação de Brunt) para  $12,82 \text{ W m}^{-2}$  e  $11,84 \text{ W m}^{-2}$ , obtidas com as parametrizações ajustadas de Idso e de Brutsaert, para os períodos diurno e noturno, respectivamente.

A comparação entre os valores observados e aqueles calculados com os modelos ajustados pode ser vista na Figura 4, com  $R^2$  variando entre 0,96 e 0,97. A variação média horária de  $L\downarrow$  observada e aquela calculada pelos modelos ajustados pode também ser observada na Figura 5.

Na Tabela 4 nota-se que, após os ajustes, os valores de DMQ diminuíram significativamente, o que também foi observado com o EMA, exceto com a parametrização de Idso, a qual subestimou os valores medidos que eram superestimados anteriormente ao ajuste. As equações ajustadas de Brunt, de Brutsaert e de Prata, cujas emissividades são dependentes da pressão do



**Figura 3** – Ajuste local dos parâmetros das equações de Brunt (a), Swinbank (b), Idso e Jackson (c), Brutsaert (d), Satterlund (e) e Idso (f), a partir dos dados observados (médias horárias), para dias de céu claro de 1999.

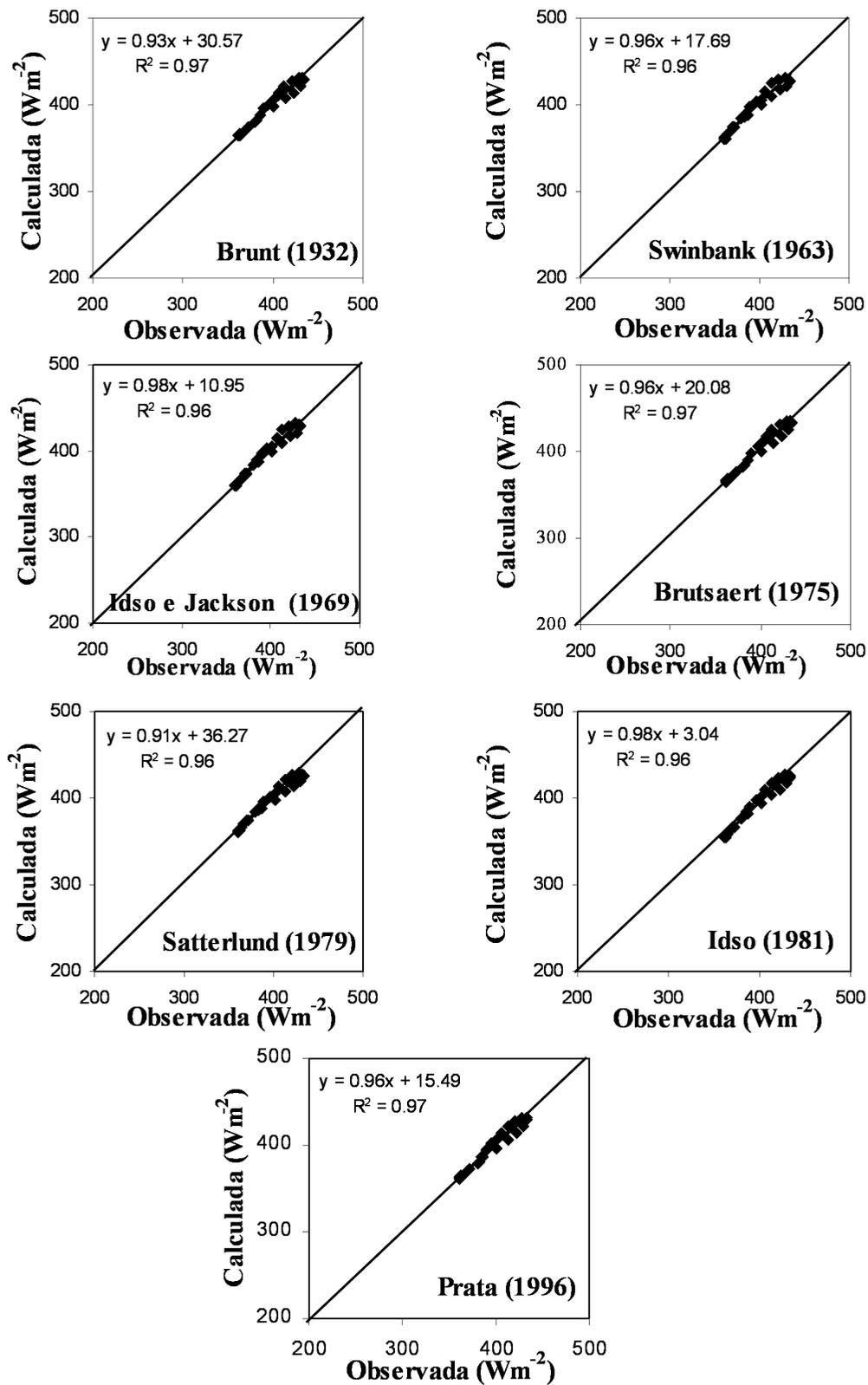
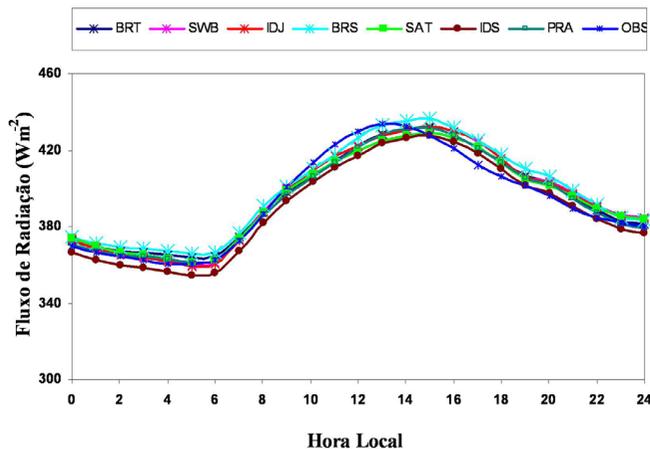


Figura 4 – Comparação entre os valores medidos de  $L\downarrow$  em 1999 e os valores estimados pelos modelos ajustados de Brunt (a), Swinbank (b), Idso e Jackson (c), Brutsaert (d), Satterlund (e), Idso (f) e Prata (g).



**Figura 5** – Variação média horária da radiação de ondas longas da atmosfera observada ( $L\downarrow$ ) e aquelas calculadas pelos modelos ajustados aos dados de 1999, considerando-se os dias de céu claro selecionados.

vapor em todas elas e da temperatura nas duas últimas, geraram os maiores coeficientes de determinação ou explicação (0,966), tornando-se estas as parametrizações que melhor se ajustaram aos dados do Pantanal. Levando-se em consideração que as equações de Brutsaert e de Prata foram derivadas a partir de uma base física, estas devem ser preferencialmente utilizadas, embora a diferença entre os coeficientes de determinação esteja restrita à terceira casa decimal, o que, de modo geral, indica que todas as equações apresentaram ajustes satisfatórios para as condições do Pantanal Sul Mato-Grossense.

Por outro lado, com a finalidade de discriminar entre os sete modelos avaliados o que melhor represente a região do Pantanal, utilizou-se o algoritmo de Box e Hill (Box e Hill, 1967; Silva Filho, 1976; Gielow et al., 1997), algoritmo que se baseia no teorema de Bayes e no conceito de entropia da informação, onde cada modelo é inicialmente considerado equiprovável, seguindo-se a comparação entre as estimativas calculadas com os modelos e os dados observados, neste caso  $L\downarrow$ , resultando na probabilidade de cada modelo representar estes dados. A

vantagem de utilizar este algoritmo está em se analisar ponto a ponto cada dado ajustado com aquele medido, considerando o erro da medida.

No presente estudo, sendo o desvio padrão médio dos dados observados de  $L\downarrow$  igual a  $25 \text{ W m}^{-2}$  e a precisão do sensor utilizado para medir  $L\downarrow$  (CNR1) igual a  $\pm 10\%$ , a melhor parametrização ajustada foi obtida com o modelo de Prata ( $\Pi = 0,17$ ). Os demais valores das probabilidades obtidas com o algoritmo de Box e Hill, juntamente com os resultados estatísticos das equações ajustadas, estão apresentados na Tabela 4. Deste modo, com o algoritmo de Box e Hill confirmou-se o resultado obtido com base no coeficiente de determinação ou explicação, que apontou a equação de Prata como uma das três que apresentaram o maior valor de  $R^2$ .

### 3.2. Validação das parametrizações ajustadas às condições locais em 1999 com dados obtidos em 2000

A fim de verificar se as equações ajustadas para os dados de 1999 podem ser consideradas representativas do Pantanal na estação seca, as mesmas foram validadas com dados obtidos na estação seca de 2000 (16 dias de céu claro).

A Tabela 5 apresenta os resultados estatísticos das equações ajustadas às condições do Pantanal em 1999, aplicadas aos dados de 2000. Nota-se que os coeficientes de correlação e de determinação foram pouco inferiores àqueles encontrados para as equações ajustadas aos dados de 1999, porém superiores a 0,90, o que ressalta a confiabilidade dos coeficientes das equações. A diferença pode ser explicada devido à maior presença de aerossóis na atmosfera no ano de 1999, o que influenciou a radiação de onda longa.

Ao aplicar as equações ajustadas para os dados de 1999 aos dados de 2000, todas elas subestimaram os valores medidos, o que pode ser comprovado observando-se os valores de EMA, os quais foram todos negativos (Tabela 5); outrossim, os valores do DMQ também foram razoavelmente altos.

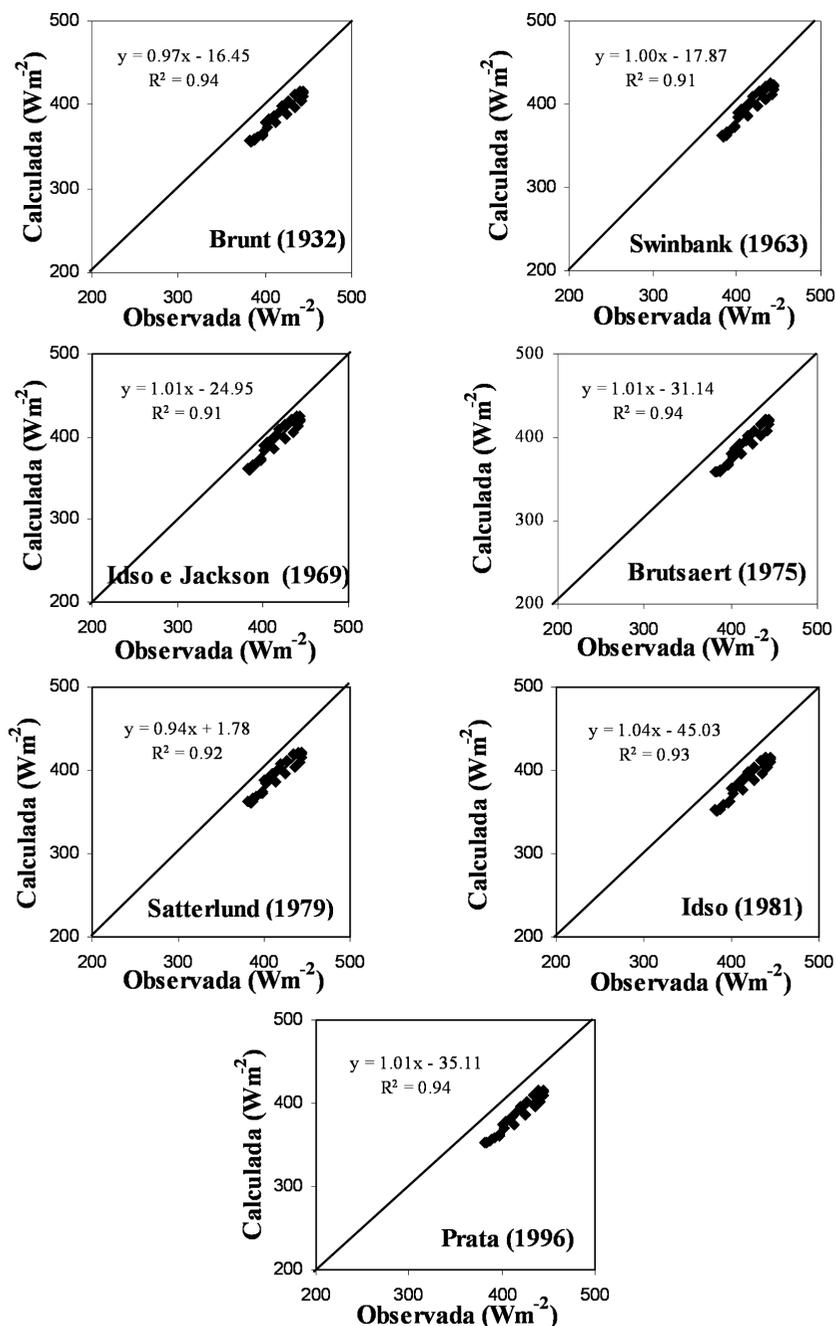
**Tabela 4** – Resultados estatísticos referentes às estimativas de  $L\downarrow$  para as parametrizações ajustadas às condições do pantanal em 1999.

Parametrizações	EMA $\text{Wm}^{-2}$	DMQ $\text{Wm}^{-2}$	R	$R^2$	$\Pi$ Box e Hill
Brunt (1932)	1,84	5,05	0,98	0,97	0,16
Swinbank (1963)	2,29	4,23	0,98	0,96	0,13
Idso e Jackson (1969)	1,93	4,75	0,98	0,96	0,14
Brutsaert (1975)	4,76	5,48	0,98	0,97	0,13
Satterlund (1979)	1,19	4,44	0,98	0,96	0,14
Idso (1981)	-3,77	5,38	0,98	0,96	0,14
Prata (1996)	0,55	4,3	0,98	0,97	0,17

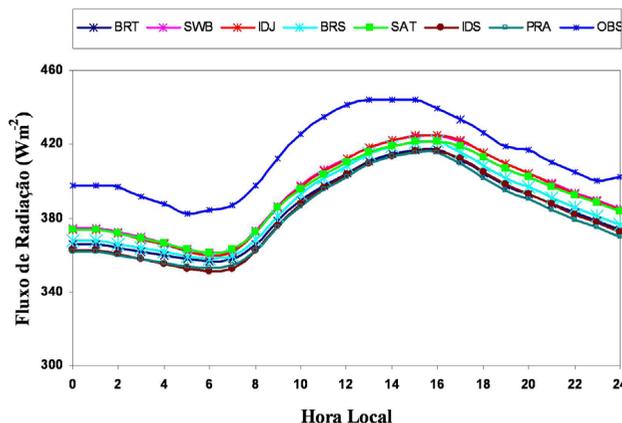
As maiores diferenças entre os valores de  $L\downarrow$  estimados e os medidos não foram encontradas para os mesmos modelos observados com os dados de 1999. As maiores diferenças diurna ( $39,65 \text{ W m}^{-2}$ ) e noturna ( $36,70 \text{ W m}^{-2}$ ) foram obtidas com o modelo de Prata.

A comparação entre os valores medidos e os calculados com os modelos aplicados aos dados de 2000 mostra que as parametrizações subestimaram os dados observados em todos os

horários do dia (Figura 6), o que também pode ser visto na Figura 7, confirmando as informações do EMA. Logo, as equações ajustadas aos dados de 1999, aplicadas aos dados de 2000, geraram resultados que se aproximam menos dos valores medidos que os resultados obtidos para 1999, o que indica que as equações ajustadas para este ano são mais representativas da região do Pantanal em condições secas, com presença de aerossóis devido às queimadas nas redondezas da torre de medições.



**Figura 6** – Comparação entre os valores medidos de  $L\downarrow$  em 2000 e os valores estimados de  $L\downarrow$  pelos modelos ajustados aos dados de 1999: Brunt (a), Swinbank (b), Idso e Jackson (c), Brutsaert (d), Satterlund (e), Idso (f) e Prata (g), usando-se os dados de 2000.



**Figura 7** – Variação média horária da radiação de ondas longas da atmosfera observada ( $L_{\downarrow}$ ) e aquelas calculadas pelos modelos ajustados aos dados de 1999 aplicadas para 2000.

Considerando-se que o desvio padrão médio dos dados observados foi aproximadamente igual a  $21,2 \text{ W m}^{-2}$  e assumindo-se um erro de 10% nas medidas, na aplicação do algoritmo de Box e Hill, a melhor probabilidade para os dados de 2000 atribuí-se ao modelo de Swinbank ( $\Pi=0,23$ ), apesar deste modelo ter gerado o menor coeficiente de determinação. As probabilidades dos demais modelos estão apresentadas na Tabela 5.

### 3.3. Ajuste dos parâmetros das equações para estimativa de $L_{\downarrow}$ às condições locais de 2000

Considerando as diferenças nas condições atmosféricas observadas nos anos de 1999 e 2000, ajustaram-se as equações dos modelos para os dados de 2000, a fim de se obter aquelas que melhor representassem as condições do Pantanal Sul Mato-Grossense durante a estação seca, sem grande número de focos de queimadas, e com a presença de lâminas d'água nas proximidades da torre de medições. Para tal, utilizaram-se os mesmos procedimentos mencionados para o ajuste com os dados de 1999, cujos coeficientes ajustados estão apresentados na Tabela 6. Neste caso, o parâmetro  $\xi$  da equação de Prata foi estimado através da equação  $\xi = 74,98 (e_0/T_0)$ .

A Tabela 7 apresenta as estatísticas das equações ajustadas para os dados de 2000, cujos coeficientes de correlação foram maiores que aqueles apresentados na Tabela 5 somente em duas das sete parametrizações (Idso e Jackson e Satterlund). O menor (maior) valor absoluto do EMA foi obtido com a equação ajustada de Swinbank (Brutsaert), enquanto aquele encontrado com os dados de 1999 foi obtido com a equação ajustada de Prata. Quanto ao DMQ, o menor (maior) valor absoluto foi obtido com a equação ajustada de Prata (Brutsaert), considerando os dados de 2000.

Conforme mencionado anteriormente, considerando o desvio padrão médio dos dados observados e um erro de 10% nas

medidas para aplicação do algoritmo de Box e Hill, obteve-se que o melhor modelo ajustado aos dados de 2000 foi o de Brunt ( $\Pi=0,16$ ), o que concorda com o resultado estatístico expresso pelo coeficiente de determinação que também mostrou que o modelo de Brunt gerou o melhor ajuste. As probabilidades dos demais modelos, obtidas considerando os dados médios horários, também estão apresentadas na Tabela 7, variando entre 0,12 e 0,15.

Tanto as menores quanto as maiores diferenças diurnas e noturnas entre  $L_{\downarrow}$  observadas e  $L_{\downarrow}$  calculadas, após o ajuste com base nos dados de 2000, foram inferiores às diferenças das equações ajustadas para 1999 aplicadas a 2000, apesar dos coeficientes de determinação terem diminuído em alguns casos. As maiores diferenças diurna ( $15,83 \text{ W m}^{-2}$ ) e noturna ( $14,53 \text{ W m}^{-2}$ ) foram encontradas com a parametrização de Brutsaert.

A Figura 8 apresenta os valores de  $L_{\downarrow}$  medidos versus os estimados para 2000, bem como a Figura 9 apresenta a variação média horária de  $L_{\downarrow}$  medida e a estimada pelos diferentes modelos. Observa-se na Figura 9 que a maioria dos modelos ajustados aos dados de 2000 superestima os valores medidos de  $L_{\downarrow}$  a partir das 12 HL. Isto pode ser explicado pelo fato da atmosfera estar mais seca a partir deste horário. Portanto, a menor concentração de vapor d'água na atmosfera acabaria absorvendo menos  $L_{\uparrow}$ ; logo, a temperatura da atmosfera seria menor. Conseqüentemente, menor contra-irradiação em direção à superfície seria emitida pela atmosfera.

Embora nem todos os coeficientes de correlação e de determinação tenham melhorado seus valores com os ajustes das equações para os dados de 2000, se comparados com os resultados dos ajustes dos dados de 1999 aplicados aos dados de 2000, o fato dos valores de EMA e de DMQ terem diminuído mostra que as equações mostradas na Tabela 6 aplicam-se melhor aos dados de 2000 que as anteriormente apresentadas.

**Tabela 5** – Resultados estatísticos referentes às estimativas de  $L\downarrow$  para as parametrizações ajustadas às condições do pantanal em 1999 validadas com os dados de 2000.

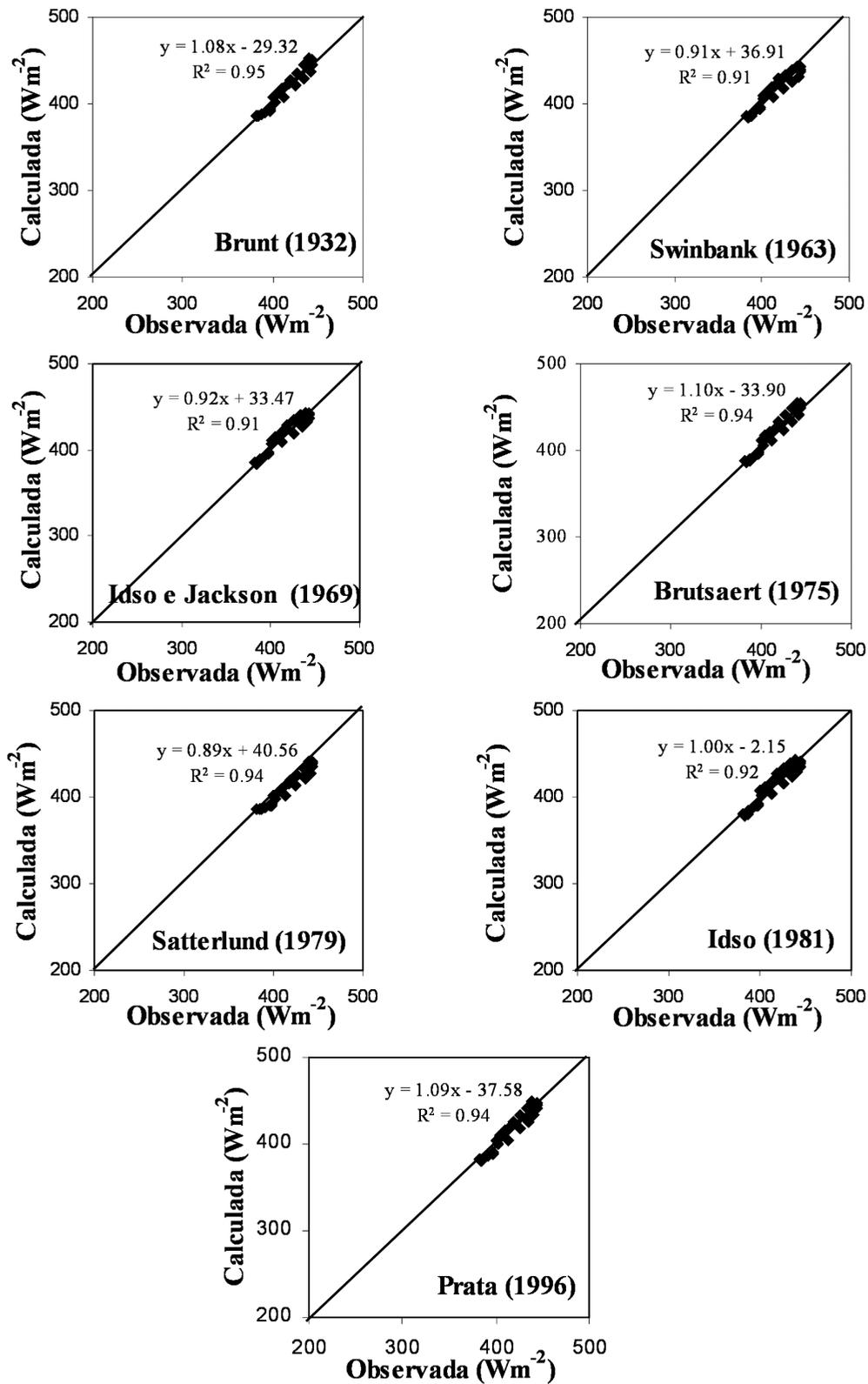
Parametrizações	EMA Wm <sup>-2</sup>	DMQ Wm <sup>-2</sup>	R	R <sup>2</sup>	Π Box e Hill
Brunt (1932)	-28,06	28,53	0,97	0,94	0,09
Swinbank (1963)	-19,59	20,58	0,96	0,91	0,23
Idso e Jackson (1969)	-19,97	20,97	0,95	0,91	0,22
Brutsaert (1975)	-25,09	25,65	0,97	0,94	0,10
Satterlund (1979)	-21,11	21,96	0,96	0,92	0,21
Idso (1981)	-29,99	30,58	0,96	0,93	0,09
Prata (1996)	-30,96	31,40	0,97	0,94	0,07

**Tabela 6** – Equações com coeficientes ajustados às condições do pantanal em 2000.

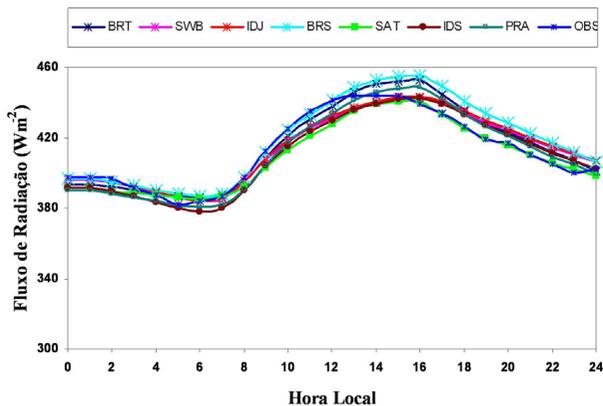
Parametrizações	Equações
Brunt (1932)	$L\downarrow = [-0,094 (e^{0,5}) + 1,339] \sigma T^4$
Swinbank (1963)	$L\downarrow = [10^{(-0,355 \log(T) + 0,837)}] \sigma T^4$
Idso e Jackson (1969)	$L\downarrow = [1 - \exp(0,0002T^2 - 2,5424)] \sigma T^4$
Brutsaert (1975)	$L\downarrow = [1,840 - 1,353 (e/T)^{1/7}] \sigma T^4$
Satterlund (1979)	$L\downarrow = \{1 - \exp[-8,60 (-e^{T/2016}) - 15,908]\} \sigma T^4$
Idso (1981)	$L\downarrow = [0,904 - 1 \times 10^{-6} (e \exp(1500/T))] \sigma T^4$
Prata (1996)	$L\downarrow = \{1 - (1 + \xi) + \exp[-(23,75 - 1,142\xi)^{0,5}]\} \sigma T^4$

**Tabela 7** – Resultados estatísticos referentes às estimativas de  $L\downarrow$  para as parametrizações ajustadas às condições do pantanal de 2000.

Parametrizações	EMA Wm <sup>-2</sup>	DMQ Wm <sup>-2</sup>	R	R <sup>2</sup>	Π Box e Hill
Brunt (1932)	2,75	6,13	0,97	0,95	0,16
Swinbank (1963)	0,90	6,15	0,96	0,91	0,14
Idso e Jackson (1969)	1,50	6,31	0,96	0,91	0,13
Brutsaert (1975)	6,00	8,55	0,97	0,94	0,12
Satterlund (1979)	-3,55	6,14	0,97	0,94	0,14
Idso (1981)	-2,19	6,68	0,96	0,92	0,15
Prata (1996)	0,97	6,09	0,97	0,94	0,15



**Figura 8** – Comparação entre os valores medidos de  $L_{\downarrow}$  em 2000 e os valores estimados pelos modelos ajustados de 2000 de Brunt (a), Swinbank (b), Idso e Jackson (c), Brutsaert (d), Satterlund (e), Idso (f) e Prata (g), usando-se dados de 2000.



**Figura 9** – Variação média horária da radiação de ondas longas da atmosfera observada ( $L_{\downarrow}$ ) e calculada pelos modelos ajustados aos dados de 2000, para os dias de céu claro do mesmo ano.

#### 4. CONCLUSÕES

Avaliou-se o desempenho de sete formulações para estimativa de  $L_{\downarrow}$  na região do Pantanal Sul Matogrossense, como sejam, as de Brunt (1932); Swinbank (1963); Idso e Jackson (1969); Brutasert (1975), Satterlund (1979); Idso (1981) e Prata (1996). De modo geral, as estimativas de  $L_{\downarrow}$  obtidas a partir destas formulações com dados de 1999 concordaram razoavelmente com os valores de  $L_{\downarrow}$  medidos, apesar de seus coeficientes serem específicos para as condições ambientais dos locais para os quais foram desenvolvidos. Não obstante, um ajuste local dos coeficientes das equações foi efetuado para a região estudada, concluindo-se que as equações ajustadas de Brunt, de Brutsaert e de Prata, cujas emissividades são dependentes da pressão de vapor em todas elas e da temperatura nas duas últimas, geraram os maiores coeficientes de determinação (0,97). Dentre estas parametrizações, a de Prata deve ser preferencialmente utilizada para o Pantanal Sul-Matogrossense com condições de queimadas e presença de aerossóis e condições secas do solo, como as de 1999, uma vez que ela é derivada a partir de uma base física, bem como por ter apresentado a melhor probabilidade ( $\Pi = 0,17$ ) quando da discriminação efetuada a partir do algoritmo de Box e Hill. Outrossim, estas parametrizações foram validadas com dados da estação seca de 2000, com número pequeno de queimadas e solo mais úmido, tendo sido gerados resultados que se aproximam menos dos valores medidos, o que indica que as equações ajustadas para 1999 são mais representativas da região de estudo com a presença de aerossóis de queimadas e condições secas do solo. Assim sendo, ajustaram-se as equações para os dados de 2000, tendo a formulação proposta por Brunt apresentado o maior coeficiente de determinação (0,95), e maior probabilidade ( $\Pi = 0,16$ ) de acordo com o algoritmo de Box e Hill. A parametrização de Prata ( $R^2 = 0,94$  e  $\Pi = 0,15$ ) não é significativamente diferente.

Portanto, considerando as probabilidades de cada modelo em representar os dados observados de  $L_{\downarrow}$ , salienta-se que os modelos de Prata e de Brunt, ajustados para cada situação, devem ser os escolhidos para a estimativa de  $L_{\downarrow}$  para a estação seca do Pantanal Sul Mato-Grossense com e sem a presença de queimadas na região, respectivamente; outrossim, considerando a pequena diferença observada com os resultados obtidos com a parametrização de Prata para o período seco sem queimadas, ressalta-se que este modelo deve ser preferencialmente utilizado, pois deriva de uma base física.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Aos coordenadores do Experimento Interdisciplinar do Pantanal (IPE), pelos dados cedidos para a realização deste trabalho, e à Universidade Federal do Mato-Grosso do Sul pelo suporte provido para a realização do projeto, em especial ao Dr. Amaury de Souza.

Ao Dr. Ralf Gielow pelas sugestões e colaboração dadas durante a elaboração deste trabalho e, em especial, a Dra. Elisabete Caria Moraes, pela disposição e inestimável ajuda na interpretação dos resultados.

Ao Dr. Odim Mendes Júnior, do DGE-INPE, pelas imagens cedidas para validar os cálculos de cobertura do céu deste trabalho, aos Engenheiros Jorge Luis Martins Nogueira e Paulo R. A. Arlino e ao técnico Jorge Mello, pela calibração dos instrumentos e coleta dos dados.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALADOS-ARBOLEDAS, L.; JIMENEZ, J. I. Day-night differences in the effective emissivity from clear skies. **Boundary-Layer Meteorol.**, v. 45, n. 1-2, p. 93-101, 1988.
- ANDRÉ, R.G.B.; SILVA FILHO, V.P.; MOLION, L.C.B.; NOBRE, C.A. Balanço de Radiação sobre a Floresta Amazônica (estações seca e úmida). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 3, n. 2, p. 269 – 274, Dez. 1988.
- ÅNGSTRÖM, A. A study of the radiation of the atmosphere. **Smithsonian Miscellaneous Collection**, v. 65, p. 1-159. 1918.
- BASTABLE, H.G.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DALLAROSA, R.L.G.; FISCH, G.; NOBRE, C.A. Observations of climate, albedo, and surface radiation over cleared and undisturbed amazonian forest. **Int. J. Climatol.**, v.13, n. 7, p. 783-796, Nov. 1993.

- BOX, G.E.; HILL, W.J. Discrimination among mechanistic models. **Technometrics**, v. 9, n. 1, p. 57-71, Feb. 1967.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 58, p. 389-418, 1932.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1982. 299p.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resour. Res.**, v. 11, n. 5, p. 742-744, Oct. 1975.
- FEITOSA, J.R.P. **Balço de energia e evapotranspiração em áreas de pastagem e de floresta densa na Amazônia central**. Campina Grande: UFPB, 1996. 95p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 1996.
- GALVÃO, J.A.C. **Estudo do balanço de radiação em áreas de floresta e pastagem na Amazônia**. São José dos Campos: INPE, 1999. 125p. (INPE-7236-TDI/689). Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1999.
- GIELOW, R.; MENDES, R.F.M.; BUENO, A.M. O algoritmo de Box e Hill para discriminação entre modelos competitivos: implementação e aplicação. In: Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, 20., Gramado, 1997. **Resumos**. Gramado: SBMAC, 1997. p. 522-523.
- HEITOR, A.; BIGA, A.; ROSA, R. Thermal radiation components of the energy balance at the ground. **Agric. For. Meteorol.**, v. 54, p. 29-48, 1991.
- IDSO, S.B.; JACKSON R.D. Thermal Radiation from the Atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, Oct. 1969.
- IDSO, S.B. A set of equations for full spectrum and 8 to 14  $\mu\text{m}$  and 10.5 to 12.5  $\mu\text{m}$  thermal radiation from cloudless skies. **Water Resour. Res.**, v. 17, n. 2, p. 295-304, 1981.
- JIMENEZ, J.I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; CASTRO-DÍEZ, Y.; BALLESTER, G. On the estimation of long-wave radiation flux from clear skies. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 38, p. 37-42, 1987.
- MAGALHÃES, N. W. **Conheça o Pantanal**. São Paulo, Terragraph, 1992, 390 p.
- MANZI, A.O.; VISWANADAM, Y.; SÁ, L.D.A.; ANDRÉ, R.G.B. **Um estudo sobre o balanço de radiação da floresta Amazônica**. São José dos Campos: INPE, 1986. (INPE-3956-PRE/974), Julho.
- NKEMDIRIM, L.C. A note on the albedo of surfaces. **J. Appl. Meteorol.**, v. 11, n. 5, p. 867-874, Aug. 1972.
- PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 122, p. 1127-1151, 1996.
- SATTERLUND, D.R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. **Water Resour. Res.**, v. 15, p. 1649-1650, 1979.
- SILVA CORREIA, F.W. **Estudo do Balanço de Radiação em Área de Policultivo na Amazônia**. São José dos Campos: INPE. 137p. (INPE-8176-TDI/758). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- SILVA F°, J.F. **Discriminação entre Modelos Competitivos – DISC**. São José dos Campos. 109p. (INPE-1027-TPT/051). Dissertação (Mestrados em Análise de Sistemas e Aplicações) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1976.
- SWINBANK, W.C. Long-Wave Radiation from clear skies. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 89, n. 381, p. 339-348, July. 1963.
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Impr. Univ., 1991. 449p.
- VISWANADHAM, Y.; MOLION, L.C.B.; MANZI, A.O.; SÁ, L.D.A.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRÉ, R.G.B.; NOGUEIRA, J.L.M.; SANTOS, R.C. Micrometeorological measurements in Amazon forest during GTE/ABLE 2A Mission. **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D9, p. 13669-13682, Aug. 1990.