

Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica

Maricéia Tatiana Vilani¹, Luciana Sanches²,
Mariele Regina Pinheiro¹, Osvaldo Borges Pinto Junior¹

¹Programa de Pós Graduação em Física Ambiental
Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT) - Cuiabá, MT
²Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMT - Cuiabá, MT
e-mail: mariceia@cpd.ufmt.br

Resumo

O presente trabalho estimou a radiação solar de onda longa incidente por meio dos métodos Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso e Jackson (1969), Satterlund (1979), Swinbank (1963) e Prata (1996), considerando a cobertura do céu para uma floresta de Transição Amazônia Cerrado, no norte de Mato Grosso, Brasil, entre 2007 e 2008. A cobertura do céu foi definida pelo índice de claridade (K_t) classificado em cobertura do céu nublado, parcialmente nublado e limpo. A maior média anual da radiação de onda longa incidente ($L \downarrow$) foi estimada pelo método de Satterlund ($383,17 \pm 36,49 \text{ W m}^{-2}$), seguida de Brutsaert ($382,23 \pm 36,19 \text{ W m}^{-2}$). A radiação incidente de onda longa apresentou um ciclo diário bem definido com os valores mais elevados ocorrendo durante o período diurno e os menores durante o período noturno. As estimativas de $L \downarrow$ estimadas pelos métodos Swinbank e Idso & Jackson apresentaram melhores correlações com a temperatura e umidade do ar. As médias $L \downarrow$ estimadas por Brunt e Satterlund diferiram das $L \downarrow$ estimadas pelos demais métodos.

Palavras chaves: métodos empíricos, balanço de radiação, radiação de onda longa incidente.

Abstract

The present work aims to quantify long-wave radiation incident by the Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso and Jackson (1969), Satterlund (1979), Swinbank (1963) and Prata (1996) methods, considering classification of sky conditions to a tropical semi-deciduous forest of the southern amazon basin in northern Mato Grosso, Brazil, from 2007 to

2008. The sky conditions were defined by clearness index ($L \downarrow$) (cloudy, partly cloudy and clear). Average annual of long-wave radiation incident ($L \downarrow$) was higher when estimated by the Satterlund method ($381.18 \pm 36.49 \text{ W m}^{-2}$), and by the Brutsaert method ($380.17 \pm 36.19 \text{ W m}^{-2}$). There was seasonality in daily cycle of long-wave radiation incident with higher values during the daytime and lower during the night. $L \downarrow$ estimated by the Swinbank and Idso & Jackson methods were correlated with air temperature and humidity. Average annual of $L \downarrow$ estimated by Brunt and Satterlund methods differed of $L \downarrow$ estimated by other methods.

Key words: empirical methods, radiation balance, long-wave radiation incident.

1. Introdução

Os fluxos de superfície e as estimativas de radiação de onda longa da atmosfera podem auxiliar na calibração dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs). Estes modelos requerem parametrizações realísticas de muitos processos de superfície (como a partição de energia), que são características importantes na determinação dos campos de temperatura, de vento, de umidade e de precipitação (Galvão e Fisch, 2000). Estudos envolvendo a radiação são importantes por ser esta a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera (Leitão, 1994). A radiação de onda longa é o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra. Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100 mm e por isto recebe a denominação de radiação de onda longa.

O índice de claridade (K_t) normalmente utilizado em modelos de estimativa dos componentes de radiação solar pode também ser utilizado como variável independente em modelos de estimativa da irradiância da radiação solar de ondas longas, uma vez que K_t é inversamente proporcional à umidade atmosférica. Ele pode ser definido pela razão entre a irradiância global que atinge a superfície terrestre e a irradiância que incide no topo da atmosfera ($K_t = \frac{R_g}{R_o}$) e determina a fração da irradiância global transmitida na atmosfera. Há diversos estudos para determinar com maior precisão os índices de claridade em diversas regiões do Brasil (Dallacort et al., 2004), podendo ser estimado por métodos estatísticos e por técnicas de rede neural

artificial. Baseado no índice de claridade, Ricieri (1998) determinou uma metodologia para obtenção do tipo de cobertura do céu classificando - em função do índice de claridade (K_t) como: nublado quando, tem seu valor entre 0 a 0,3, parcialmente nublado quando está entre 0,3 e 0,65, e limpo quando maior que 0,65 e menor que 1.

A distribuição da radiação solar, índice de claridade e o conhecimento do tipo de cobertura do céu são de suma importância para áreas urbanas e rurais do estado de Mato Grosso, influenciando diversos processos termodinâmicos e no desenvolvimento de diversas culturas.

Embora existam instrumentos para medir a radiação de incidência de onda longa da atmosfera, não é uma medida fácil de se obter. Entretanto, em muitas situações práticas em meteorologia, ainda é eficiente estimá-la baseando-se em observações de variáveis mais facilmente medidas (Brutsaert, 1982), ou por diferença e/ou resíduos, por meio da equação do balanço de radiação (saldo de radiação líquida = radiação de onda curta + radiação de onda longa) (Arya, 1988), ou estimadas por várias equações, como por exemplo, as equações de Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso e Jackson (1969), Satterlund (1979) e Swinbank (1963).

Na Amazônia praticamente não existem medidas regulares de radiação de onda longa da atmosfera, mesmo sendo uma variável importante no cálculo do balanço de radiação à superfície, pois representa a contribuição da atmosfera e engloba informações de nebulosidade e concentração de vapor d'água. Portanto, a utilização de equações empíricas para estimativa de radiação de onda longa da atmosfera tornou-se um modo alternativo largamente utilizado.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a radiação solar de ondas longas incidente da atmosfera por meio dos métodos Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso e Jackson (1969), Satterlund (1979) e Swinbank (1963) considerando a cobertura do céu para uma floresta de Transição Amazônia Cerrado, no norte de Mato Grosso, Brasil, entre 2007 e 2008.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

A área em estudo está situada a aproximadamente 50 km NE de Sinop, Mato Grosso, Brasil (lat.: 11°24,75'S; long.: 55°19,50'O), a 423 m acima do nível do mar. Esta área é constituída por uma floresta tropical de transição, que ocupa o ecótono entre a floresta Amazônica e o Cerrado. A

vegetação é constituída por espécies arbóreas cuja altura média varia de 28-30 m (Sanches et al., 2008; Priante Filho et al., 2004; Vourlitis et al., 2002; Vourlitis et al., 2001).

2.2 Instrumentação

As medidas de temperatura e umidade do ar foram realizadas por um conjunto sensor HMP-35 (Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), a radiação solar global por um piranômetro LI-200SA (Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA), o saldo de radiação por um saldo-radiômetro ($Q^*7.1$, REBS, Inc, Seattle, WA, USA), os dados de precipitação foram fornecidos pela estação meteorológica da Fazenda Continental, localizada a aproximadamente 17 km do local do experimento, que utiliza um pluviômetro fixável (Modelo 260-2530, NovaLynx Corporation, USA), instalado em área de manejo florestal, com medições diárias.

Para as medidas da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), usou-se 2 sensores (LI-190SB, LI-COR) instalados com a face sensível apontada para cima, nas alturas de 42m (PAR_{42}) e 1m (PAR_1), sendo este último correspondente a PAR da superfície, sendo que tais sensores registraram os valores parciais de PAR incidente filtrados pela ação do dossel. Um quarto sensor a 42m (PAR_1), estava disposto com sua face sensível apontada para baixo medindo a Radiação Fotossinteticamente Ativa Refletida (PAR_r).

Os dados micrometeorológicos obtidos na torre foram armazenados por um sistema de aquisição de dados, em datalogger (CRX-10, Campbell Scientific, Inc, Logan, UT, USA), com leituras das medidas a cada 30 segundos e armazenadas as médias a cada 30 minutos.

Neste trabalho considerou-se três meses de estação seca (junho-agosto), três meses de estação úmida (dezembro-fevereiro) e três meses de transição seca-úmida (setembro-novembro) e 3 meses de transição úmida-seca (março-maio), segundo classificação adotada por PRIANTE FILHO et al. (2004).

2.3 Índice de claridade

A cobertura do céu foi determinada pelo índice de claridade (K_t) (eq. 1), definida como a razão entre a radiação solar incidente (R_g) ($MJ m^{-2} dia^{-1}$) e a irradiação no topo da atmosfera (R_o) ($MJ m^{-2} dia^{-1}$).

$$K_t = \frac{R_g}{R_o} \quad (1)$$

A classificação da cobertura do céu foi definida como intervalo de $0 < K_t < 0,3$ céu nublado, entre $0,3 > K_t > 0,65$ céu parcialmente nu-

blado e entre $0,65 < K_t < 1,0$ céu limpo.

A irradiação no topo da atmosfera (R_o) ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi calculada por meio da eq. (2).

$$R_o = \frac{24}{\pi} 1367 E_o \left(\frac{\pi}{180} W_s \text{sen} \varphi \text{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta \text{sen} W_s \right) \quad (2)$$

em que, E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (eq. 3), W_s é o ângulo solar (graus) (eq. 4), φ é a latitude local (graus) e δ é a declinação solar (graus) (eq. 6).

$$E_o = 1,000110 + 0,034221 \cos \Phi + 0,00128 \text{sen} \Phi + 0,000719 \cos 2 \Phi \quad (3)$$

em que, Φ é definido pela eq. (4) em função do dia Juliano (dJ).

$$\Phi = \frac{2\pi(dJ - 1)}{365,242} \quad (4)$$

$$W_s = \text{arc cos}(tg \varphi tg \delta) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + DJ) \right] \quad (6)$$

2.4 Estimativa de radiação solar de onda longa incidente ($L \downarrow$)

Para a estimativa de radiação incidente solar de ondas longas ($L \downarrow$) utilizou-se as variáveis meteorológicas de umidade relativa do ar, temperatura do ar e pressão de vapor d'água. A pressão de vapor d'água (e) foi estimada por meio da eq. 7.

$$e = \frac{UR_{e_s}}{100} \quad (7)$$

em que, UR é a umidade relativa do ar (%).

A radiação solar de onda longa incidente foi estimada partir das equações empíricas, 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).

Estimativa de $L \downarrow$ por Brunt (1932)

A equação proposta por Brunt (1932), que relaciona a radiação de ondas longas incidentes da atmosfera com a temperatura do ar T (K), e a pressão de vapor e (mb), é definida pela eq. 8

$$L \downarrow = \sigma T^4 (0,52 + 0,065 e^{1/2}) \quad (8)$$

Em que, σ a Constante de Stefan-Boltzmann ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

Estimativa de $L \downarrow$ por Swinbank

Swinbank (1963) propôs uma equação para estimar a radiação de ondas longas para céu claro em função apenas da temperatura do ar T_a (K), de acordo com eq. 9.

$$L \downarrow = 9,2 \times 10^{-6} \sigma T^6 \quad (9)$$

Estimativa de $L \downarrow$ por Idso e Jackson (1969)

A equação proposta por Idso e Jackson (1969), integrada sobre todos os comprimentos de onda, é função apenas da temperatura do ar em $^{\circ}\text{C}$.

$$L \downarrow = \sigma T^4 < 1 - \{0,26 \exp[-7,77 \times 10^{-4} (273 - T)^2]\} > \quad (10)$$

Estimativa de $L \downarrow$ por Brutsaert (1975)

Brutsaert (1975) deduziu uma equação para estimar a irradiância de onda longa da atmosfera em dias de céu claro e condições atmosféricas próximas à atmosfera padrão, a partir da integração da equação de Schwarzschild sobre todas as direções e todos os comprimentos de onda, segundo eq. 11.

$$L \downarrow = 1,24 \sigma T^4 (e/T)^{1/7} \quad (11)$$

Sendo e e T (mb) e (K), respectivamente.

Estimativa de $L \downarrow$ por Satterlund (1979)

Satterlund (1979) propôs uma equação para estimar a irradiância de onda longa, para condições de céu claro, com base em dados de temperatura do ar e da pressão de vapor ao nível do abrigo. Esta equação (eq. 12) foi proposta visando obter melhor ajuste para os dados medidos em condições extremas de temperatura e umidade.

$$L \downarrow = 1,08 \sigma T^4 [1 - \exp(-e^{T/2016})] \quad (12)$$

em que, T é a temperatura do ar (K), e (mPa) e s a Constante de Stefan-Boltzmann ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

Estimativa de $L \downarrow$ por Prata (1996)

Prata (1996) propôs uma fórmula para estimar a radiação de ondas longas para condições de céu claro, considerando dependência da temperatura do ar e da pressão de vapor d'água medidas em abrigo, segundo eq. 13.

$$L \downarrow = \left[1 - (1 + \zeta) \exp \left\{ -(1,2 + 3,0\zeta)^{1/2} \right\} \right] \sigma T_o^4 \quad (13)$$

Em que, $\zeta = 46,5 \left(\frac{e}{T} \right)$

Sendo T a temperatura do ar (K), e a pressão de vapor (mb).

3. Resultados e discussões

As condições de cobertura do céu estão diretamente relacionadas com a precipitação devido à formação de nuvens que influenciam na refletância e transmitância da atmosfera. Na área em estudo, a precipitação apresentou uma sazonalidade característica com maiores precipitações em janeiro e fevereiro (Tabela 1) e menores precipitações em junho a agosto, totalizando 69 mm durante a estação seca (de maio a setembro) em 2008, enquanto na estação úmida (de outubro a abril), totalizou 2161 mm em 2007 valor próximo ao encontrado por Villani et al. (2006), 2171 mm, para a mesma área em estudos. Os valores concordam com os padrões Amazônicos, em que, segundo Liebmann & Marengo (2001) a média anual de precipitação na Amazônia Brasileira varia de < 2000 mm na parte sul a > 3000 mm na parte leste e extremo norte. O clima das regiões de floresta tropical úmida exibe claramente uma variação considerável nos padrões de precipitação concordante com o mencionado por Malhi et al. (2004) em que a média de precipitação anual da floresta tropical de 2180 mm, com uma estação seca de 3 a 4 meses, correspondendo a uma temperatura média anual de 25,2°C com uma variação sazonal de 3,2°C. A média de precipitação para a bacia Amazônica é 5,9 mm dia⁻¹ (Marengo, 2004).

A temperatura e umidade relativa do ar estão diretamente relacionadas com a radiação, variando sazonalmente durante o ano (Tabela 1). A média mensal de temperatura do ar apresentou maior valor em agosto (28,3°C) e menor valor em janeiro (24,4°C), com média anual de 26,3°C. Essas temperaturas foram superiores a temperatura média anual na Floresta Tropical em Manaus e Marabá que apresentaram valores entre 24,5 e 26,6°C e em Ji-Paraná com temperaturas médias entre 22,1 e 25,7°C (Culf et al., 1996). Geralmente a temperatura e as condições de umidade dentro e acima de uma floresta são resultado da reflexão da transmissão e absorção

da energia solar na superfície do dossel, a sua conversão em calor sensível e latente e a alocação da luz e calor dentro de uma floresta (Motzer, 2005).

Tabela 1. Média mensal da temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e precipitação acumulada mensal de out/07 e set/08. Os dados de precipitação foram cedidos pela Fazenda Continental a 17 Km do sítio experimental.

Estação	Mês	T (°C)	RH (%)	Precipitação (mm)	
				2007	2008
Transição seca-úmida	Out/07	27,47 ± 4,04	52,92 ± 27,52	123	116
	Nov/07	26,07 ± 3,52	79,78 ± 15,09	358	242
Úmida	Dez/07	25,34 ± 3,08	82,87 ± 13,34	249	-
	Jan/08	24,44 ± 2,91	85,68 ± 11,58	558	398
	Fev/08	-	-	546	346
Transição úmida-seca	Mar/08	24,87 ± 2,84	85,36 ± 11,95	243	274
	Abr/08	25,48 ± 3,00	84,29 ± 13,30	84	99
	Mai/08	25,41 ± 3,70	79,41 ± 16,14	0	49
Seca	Jun/08	25,68 ± 4,54	71,44 ± 21,52	0	0
	Jul/08	26,43 ± 4,92	60,42 ± 22,61	0	0
	Ago/08	28,34 ± 5,28	56,49 ± 23,75	0	0
Seca-úmida	Set/08	28,28 ± 4,64	67,47 ± 21,56	0	20
	Total	26,30 ± 4,56	71,50 ± 23,09	2161	-

Estimou-se a transmitância (t) com dados de medições de campo, entre as alturas de 42m e 1m, através da equação, $t = \frac{PAR_1}{PAR_{42}}$, sendo PAR_1 a radiação fotossinteticamente ativa a 1m e PAR_{42} a radiação fotossinteticamente ativa a 42m. A refletância (r) foi estimada pela equação $r = \frac{PAR_r}{PAR_{42}}$, sendo PAR_r a radiação fotossinteticamente ativa refletida.

Menores transmitâncias da radiação incidente ocorreram na estação seca, com aumento dos valores ao atingir a estação úmida, apresentando uma média anual 1,20%. (Tabela 2). A refletância apresentou valor máximo de 3,5% em julho (estação seca) e mínimo de 2,0% em dezembro, (estação úmida). Em julho, com a maior presença de clareiras no dossel, ocorreu uma maior passagem de radiação incidente em determinadas horas

do dia, fato este que ocasiona uma refletância maior neste mês, em consequência de uma transmitância menor, com radiação média mensal maior nos meses da estação seca (Vilani et al., 2007).

Tabela 2. Média mensal da radiação solar global (Rsg), refletância (R), transmitância (t) de out/07 e set/08.

Mês	Rsg (W m^{-2})	r (%)	t (%)
Out/07	543,80	3,30	1,70
Nov/07	523,42	2,20	1,10
Dez/07	486,94	2,00	1,80
Jan/08	454,83	3,00	0,90
Fev/08	-	-	-
Mar/08	479,52	2,40	0,90
Abr/08	461,56	2,50	1,40
Mai/08	454,12	3,10	0,90
Jun/08	541,10	3,30	0,90
Jul/08	580,36	3,50	1,00
Ago/08	638,05	3,30	0,90
Set/08	583,13	2,90	1,20
Total	491,03	2,90	1,20

Os maiores valores de Rsg no ciclo diurno foram observados nas estações seca, e seca úmida (Tabela 2), com valores máximos entre as 12 e 13 horas, aproximadamente de $817,58 \text{ W m}^{-2}$

Para a estimativa da radiação de onda longa incidente foram definidos os dias de céu claro, nublado e parcialmente (Tabela 3). Durante 2007 e 2008, houve maior percentual para os dias parcialmente nublados (59%), seguido de dias nublados (34%) e céu limpo (7%) (Tabela 3). Houve poucos dias de céu claro, concentrados, principalmente em agosto, mês de estação seca.

A maior média anual de Radiação de Onda Longa Incidente foi estimada pelo método de Satterlund ($381,18 \pm 36,49 \text{ W m}^{-2}$), seguida de Brutsaert ($380,17 \pm 36,19 \text{ W m}^{-2}$), Idso & Jackson ($375,58 \pm 35,82 \text{ W m}^{-2}$), Prata ($368,47 \pm 37,07$), Swinbank ($365,35 \pm 34,02 \text{ W m}^{-2}$), Brunt ($349,96 \pm 52,89 \text{ W m}^{-2}$), Bastable et al. (1993), em experimento realizado acima da vegeta-

ção na Reserva Florestal Ducke-AM, utilizando dados obtidos no período de 01 a 10/12/90, correspondente à estação chuvosa e no período de 12 a 21/10/90, correspondente à estação seca, obtiveram valores de radiação de onda longa atmosférica, (a partir de resíduo do balanço de radiação), da ordem de 418,2 W m⁻² e 411,1 W m⁻² respectivamente.

Tabela 3. Contagem de dias de céu nublado, parcialmente nublados e céu limpo e média de radiação solar de ondas longas incidentes pelos métodos Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso e Jackson (1969), Satterlund (1979), Prata (1996) e Swinbank (1963). (-) significa que não houve estimativa de radiação de onda longa incidente.

Mês	Cobertura do céu (cc)	Dias (cc)	Radiação de Onda Longa Incidente (Wm ⁻²)					
			Brunt	Swinbank	Idso & Jackson	Brutsaert	Prata	Satterlund
Jan	Céu limpo	0	-	-	-	-	-	-
	Nublado	31	328,6	356,16	365,88	388,57	358,6	385,28
	Parc. Nublado	0	-	-	-	-	-	-
Mar	Céu limpo	0	-	-	-	-	-	-
	Nublado	20	230,1	359,65	369,59	-	294,4	-
	Parc. Nublado	9	229,5	358,60	368,48	-	293,8	-
Abr	Céu limpo	1	367,3	362,43	372,55	381,00	378,6	381,11
	Nublado	19	373,8	370,00	372,06	379,30	383,5	374,83
	Parc. Nublado	12	369,2	362,14	372,22	370,24	380,5	366,72
Mai	Céu limpo	1	370,3	368,60	379,03	378,92	382,2	378,77
	Nublado	4	371,1	355,36	365,20	382,71	379,9	378,67
	Parc. Nublado	26	368,1	360,92	370,94	380,29	378,9	379,33
Jun	Céu limpo	0	-	-	-	-	-	-
	Nublado	0	-	-	-	-	-	-
	Parc. Nublado	30	352,9	359,88	369,87	368,46	367,2	374,40

(continua)

Tabela 3. Contagem de dias de céu nublado, parcialmente nublados e céu limpo e média de radiação solar de ondas longas incidentes pelos métodos Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso e Jackson (1969), Satterlund (1979), Prata (1996) e Swinbank (1963). (-) significa que não houve estimativa de radiação de onda longa incidente.

(continuação)

Jul	Céu limpo	1	341,2	356,58	366,46	357,34	357,4	367,77
	Nublado	0	-	-	-	-	-	-
	Parc. Nublado	30	-	-	-	-	-	-
Ago	Céu limpo	20	352,3	374,46	385,08	370,31	369,2	381,33
	Nublado	0	-	-	-	-	-	-
	Parc. Nublado	11	362,0	374,14	384,76	377,86	376,4	384,37
Set	Céu limpo	6	367,4	382,29	393,24	382,99	381,8	390,36
	Nublado	2	350,1	360,03	369,98	390,42	368,4	386,15
	Parc. Nublado	22	374,5	379,54	390,44	388,39	387,2	389,83
Out	Céu limpo	0	-	-	-	-	-	-
	Nublado	4	311,5	354,36	363,93	387,09	359,5	384,68
	Parc. Nublado	58	340,1	369,77	380,24	390,77	381,2	388,74
Nov	Céu limpo	0	-	-	-	-	-	-
	Nublado	4	366	349,74	359,07	378,23	375,3	374,36
	Parc. Nublado	26	374,8	362,89	382,00	387,03	384,1	383,95

(conclusão)

Para Arya (1988), espera-se obter valores mais elevados de L_{\downarrow} em dias nublados, já que as nuvens são as maiores contribuidoras de L_{\downarrow} para a superfície, pois irradiam como corpo negro ($\varepsilon \cong 1$) a partir da base das nuvens, o que concorda com nossos dados, pois os maiores valores observados foram para os dias parcialmente nublados e nublados.

O ciclo diurno da radiação de onda longa da atmosfera (Figura 1) é determinado essencialmente pela evolução da temperatura do ar, a qual decresce a partir do meio da tarde até o final da madrugada.

A menor média da radiação de onda longa diurna foi estimada pelo método de Brunt ($365,95 \pm 13,64 \text{ W m}^{-2}$) e maior pelo método de Idso & Jackson ($400,27 \pm 24,09 \text{ W m}^{-2}$), durante o período noturno a menor média da L_{\downarrow} também foi pelo método de Brunt ($335,15 \pm 11,40 \text{ W m}^{-2}$) e maior pelo Brutsaert ($364,71 \pm 11,68 \text{ W m}^{-2}$) (Figura 1).

A variação entre os máximos e mínimos valores de radiação de onda longa incidente estimada pelos métodos depende das variáveis e parâmetros utilizados nas equações para estimativa. Por exemplo, a diferença entre os valores máximos de Idso & Jackson foi aproximadamente 20 W m^{-2} que representa aproximadamente 5% do valor máximo da radiação de onda longa incidente durante o dia. Dentre os métodos empíricos estudados os que melhor se correlacionaram com a temperatura e a umidade (Tabela 4), foram Swinbank e Idso & Jackson, e entre os métodos Brunt e Prata, assim como Swinbank e Idso & Jackson, pois tais métodos possuem parâmetros de entrada semelhantes.

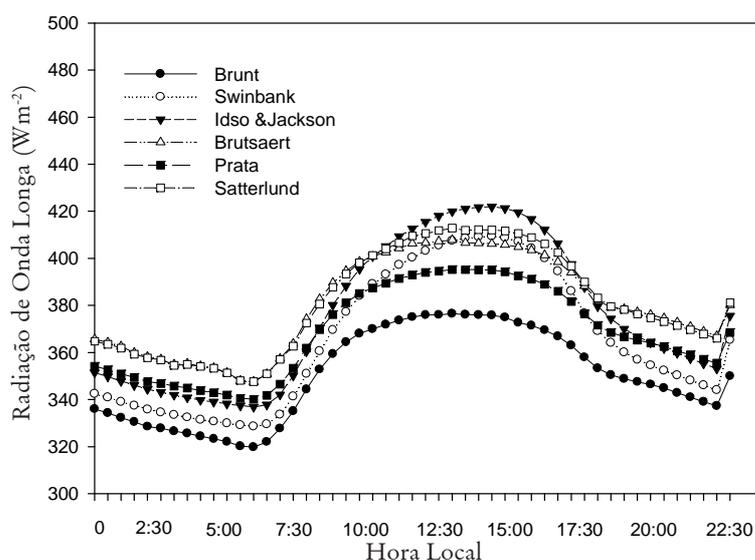


Figura 1. Média horária da radiação de ondas longas da atmosfera (L_{\downarrow}) calculada pelos modelos propostos na literatura, para o período de 2007 e 2008.

Tabela 4. Matriz de correlação entre radiação solar global (Rsg), temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR), radiação de onda longa estimada por Brunt, Swinbank, Idso & Jackson, Brutsaert, Prata e Satterlund. Valores em negrito são estatisticamente significantes ($p < 0,05$).

Variáveis	Rsg	T	UR	L↓ (Brunt)	L↓ (Swinbank)	L↓ (Idso & Jackson)	L↓ (Brutsaert)	L↓ (Prata)	L↓ (Satterlund)
Rsg	1,00								
T	0,88	1,00							
UR	-0,84	-0,84	1,00						
L↓(Brunt)	0,17	0,27	-0,09	1,00					
L↓(Swinbank)	0,73	0,96	-0,71	0,23	1,00				
L↓(Idso & Jackson)	0,73	0,96	-0,71	0,23	0,99	1,00			
L↓(Brutsaert)	-0,22	0,12	0,07	-0,06	0,35	0,35	1,00		
L↓(Prata)	0,18	0,31	-0,10	0,99	0,29	0,29	0,01	1,00	
L↓(Satterlund)	0,36	0,62	-0,47	0,13	0,74	0,74	0,81	0,19	1,00

As médias das radiações estimadas por Brunt e Satterlund diferiram das $L\downarrow$ estimadas pelos demais métodos.

Tabela 5. Média anual e intervalos de confiança (superior e inferior) da radiação de onda longa estimada por Brunt, Swinbank, Idso & Jackson, Brutsaert, Prata e Satterlund.

Radiação de onda longa ($W m^{-2}$)	Média	Limite Superior	Limite Inferior
$L\downarrow$ (Brunt)	361,39 ^b	385,81	279,99
$L\downarrow$ (Swinbank)	364,95 ^a	387,35	344,38
$L\downarrow$ (Idso & Jackson)	375,15 ^a	398,68	353,39
$L\downarrow$ (Brutsaert)	382,23 ^a	405,24	357,78
$L\downarrow$ (Prata)	375,24 ^a	395,23	327,44
$L\downarrow$ (Satterlund)	383,17 ^b	366,10	403,28

Conclusões

As estimativas de $L\downarrow$ estimadas pelos métodos Swinbank e Idso & Jackson apresentaram melhores correlações com a temperatura e umidade do ar.

As médias $L\downarrow$ estimadas por Brunt e Satterlund diferiram das $L\downarrow$ estimadas pelos demais métodos.

A análise dos métodos de estimativa da radiação de ondas longas incidentes permitirá que esta variável possa ser empregada em modelos de clima possibilitando melhores respostas dos mesmos.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências bibliográficas

- ARYA, S.P.S. **Introduction to micrometeorology**. London : Academic Press, Inc. 1988. 307 p.
- BASTABLE, H.G.; SHUTTLEWORTH, W.J.; DALLAROSA, R.L.G. et al. Observation o climate, albedo and surface radiation over cleared undisturbed Amazonian forest. **Int. J. Climatol., Chicester**, v. 13, p. 783-96, 1993.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 58, n. 247, p. 389-418, 1932.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, Washington, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. Dordrecht, **D. Reidel Publishing Company**, p. 299 , 1982.
- CULF, A.D., Esteves, J.L., Marques Filho, A.O., Ocha, H.R.. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M (Eds). **Amazonian Deforestation and Climate**. J.M. Wiley and Sons, New York. p. 175-191, 1996.
- DALLACORT, R.; RICIÉRI, R.P.; SILVA, S. de L.; PAULO, S.L. de F.; SILVA, F.F da; Análises do comportamento de um actinógrafo bimetálico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, vol.26, n 4, p.413-419, 2004,
- GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000.
- IDSO, S. B., JACKSON, R. D. Thermal radiation from atmosphere. **Journal Geophysical esearch**, Washington, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, 1969.
- IDSO, S. B. A set of equations for full spectrum and 8 to 14 μm and 10.5 to 12.5 μm thermal radiation from cloudless skies. **Water Resour. Res.**, v. 17, n. 2, p. 295 304, 1981.
- LEITÃO, M. M. V. B. R. **Balanço de Radiação em três ecossistemas da Floresta Amazônica**: campina, campinarana e mata densa. São José dos Campos. 135p. (INPE 5587 - TDI/549). (Dissertação) – Pós Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- LIEBMANN, B.; MARENGO, J.A. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **J. Climate**, v. 14, p.

4308-4318, 2001.

MALHI, Y.; WRIGHT, J. Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. **The Royal Society**, Londres, Inglaterra, v. 359, p. 311-329, 2004

MARENGO, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburg, Germany, v. 78, p. 79-96, 2004.

MOTZER, T. Micrometeorological aspect of a tropical mountain forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, p.230-240, 2005

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.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G. L.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S. CAMPELO JR, J. H.; NUNES, P. C.; SANCHES, L.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.; SILVEIRA, M. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, Illinois, USA, v. 10, p. 863-876, 2004.

RICIERI, R.P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**, UNESP, Botucatu, 1998. 81 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1998.

SANCHES L., VALENTINI C. M. A., PINTO JUNIOR O. B., NOGUEIRA J. S., VOURLITIS G. L., BIUDES M. S., SILVA C. J., BAMBI P., LOBO F. A. (2008) Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. **Journal of Geophysical Research**. 113:G04007, doi:10.1029/2007JG000593.

SATTERLUND, D. R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. **Water Resources Res.**, Washington, v. 15, n. 6, p. 1649-1650, 1979.

SWINBANK, W. C. Long-Wave Radiation from clear skies. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 89, n. 381, p. 339-348, 1963.

VILANI, M.T.; SANCHES, L.; COSTA, M. H.; GAIO, D. C.; NOGUEIRA, J. S. Estimativa da absorvância da radiação fotossinteticamente ativa de uma vegetação de transição floresta Amazônica-Cerrado por três métodos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, Brasil, v.15, n. 3, p. 289-298, 2007.

VILANI, M. T.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. S.; PRIANTE FILHO, N. Sazonalidade da Radiação, Temperatura e Umidade em uma Floresta de Transição Amazônia Cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, Brasil, v.21, n. 3b, p. 331-343, 2006.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F. T.; CAMPELO JR, J. H. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerradão). **Functional Ecology**, Boston, USA, v. 15, p. 388-395, 2001.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F.; CAMPELO JR, J. H. Seasonal variations in evapotranspiration of a transitional tropical Forest of Mato Grosso, Brasil. **Water Resources Research**, St. Louis, USA, v. 38, n. 6, p. 1-30, 2002.

Submetido em: 15/outubro/2009

Aceito em: 17/fevereiro/2010

