

AJUSTE PARA A ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA EM UMA ÁREA URBANA NA AMAZÔNIA CENTRAL

Ranyelli Cunha de Figueiredo¹, Denisi Holanda Hall¹, Maria Juliana de Melo Monte¹, Carla de Souza Farias¹, Regison da Costa de Oliveira¹, Joice de Jesus Machado¹, Alacimar Viana Guedes¹, Luiz Antonio Candido¹, Leonardo Ramos de Oliveira¹, Jailson Ramos da Mata¹, Thiago de Lima Xavier¹, Bruno Takeshi Tanaka Portela¹ e Cléo Quaresma Dias-Júnior²

¹Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, INPA

²Instituto Federal do Pará, IFPA

Resumo

Através dos dados da Torre micrometeorológica do projeto IETÉ, foram realizadas estimativas de radiação de onda longa atmosférica (LW_{ar}) por meio de modelos paramétricos para uma região urbana da cidade de Manaus-AM. O período investigado foi de novembro de 2021 a outubro de 2022. Através do método dos mínimos quadrados foram realizados ajustes nos coeficientes dos modelos, para melhor desempenho desses. De maneira geral, os modelos representaram os valores de LW_{ar} medida com erros de RMSE inferiores a 20 Wm^{-2} , e subestimativas de MBE inferiores a 9 Wm^{-2} . Depois dos ajustes os modelos melhoraram seus desempenhos, reduzindo o RMSE para $11,45 \text{ Wm}^{-2}$, ainda apresentando subestimativas, porém em magnitudes de $1,1 \text{ Wm}^{-2}$, com concordância de 0,82 e R^2 de 0,49. A equação paramétrica de Prata apresentou o melhor desempenho após o ajuste, com RMSE de $11,12 \text{ Wm}^{-2}$, MBE $0,11 \text{ Wm}^{-2}$, Bias 0,11 e R^2 de 0,39.

Palavras-chave: Amazônia; Radiação de onda longa; Modelos paramétricos

Abstract

Using the data from the micrometeorological tower of the IETÉ project, estimates of atmospheric longwave radiation (LW_{ar}) were made using parametric models for an urban region of the city of Manaus-AM. The period investigated was from November 2021 to October 2022. Through the least squares method, adjustments were made to the coefficients of the models for better performance. In general, the models represented the measured LW_{ar} values with RMSE errors of less than 20 Wm^{-2} , and MBE underestimates of less than 9 Wm^{-2} . After the adjustments, the models improved their performance, reducing the RMSE to $11,45 \text{ Wm}^{-2}$, still presenting underestimates, but at magnitudes of $1,1 \text{ Wm}^{-2}$, with agreement of 0,82 and R^2 of 0,49. The Prata parametric equation presented the best performance after adjustment, with RMSE of 11.12 Wm^{-2} , MBE $0,11 \text{ Wm}^{-2}$, Bias 0,11 and R^2 of 0,39.

Keywords: Amazonia; Long-wave radiation; Parametric models

1. Introdução

A radiação de onda longa (LW) refere-se à transferência de radiação eletromagnética com comprimentos de onda mais longos ($> 400\text{nm}$), como a radiação infravermelha, através da atmosfera (PRICE et al., 2013).

Dentro do balanço radiativo do sistema climático terrestre, a LW desempenha um papel fundamental na compreensão da troca de energia entre a superfície da Terra e a atmosfera. Além disso, ela é crucial para um melhor entendimento das interações entre os gases presentes na atmosfera e o efeito estufa, assim como a medição do forçamento radiativo através da atmosfera. Essa radiação

afeta o saldo radiativo, influenciando o particionamento energético do sistema, bem como os fatores micrometeorológicos que impactam a dispersão da poluição do ar (AIMI et al., 2020).

Uma das componentes de LW é a radiação de onda longa atmosférica LW_{ar} . A medição dos valores de LW_{ar} não é muito trivial (AGUIAR et al., 2011). Existem sensores que podem medir LW_{ar} diretamente, porém possuem um custo muito elevado. Contudo, na ausência desses sensores existem técnicas de estimativas que permitem encontrar os valores de LW_{ar} , a partir dos valores de temperatura do ar e pressão de vapor d'água medidos ao nível do abrigo meteorológico. Essas técnicas nunca foram usadas em regiões urbanas da Amazônia, e, portanto, esse estudo visa investigar quais as melhores parametrizações de LW_{ar} que podem ser usadas para uma região urbana da região amazônica.

2. Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo e Dados

O presente estudo foi realizado durante o período de novembro de 2021 a outubro de 2022, para área urbana circunvizinha do Corpo de bombeiros Militar do Amazonas (CBMAM) (lat -3.117944 lon -60.000731), Manaus-AM.

Os dados micrometeorológicos foram medidos por uma torre micrometeorológica de 30m de altura, com frequência de 5 min, e processados em média de 30 min e 1 h, conforme descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis micrometeorológicas e seus respectivos sensores.

Variável	Unidade	Sensor	Altura
Temperatura do ar	$^{\circ}C$	S-THC-M002 HOBO®	30m
Umidade relativa do ar	%	S-THC-M002 HOBO®	30m
Pressão atmosférica	hPa	HWS S-BPA-CM10	30m
Radiação solar incidente	Wm^{-2}	S-LIB-M003 HOBO®	30m
Radiação de ondas longas atmosférica	Wm^{-2}	CNR4 Campbell Scientific	30m

2.2 Índice de Claridade - Kt

As equações de estimativas de radiação atmosférica são aplicadas para condições de pouca ou na ausência de nebulosidade. Durante o período de estudo, foi observada uma significativa variabilidade sazonal e intrassazonal, influenciada pelas condições de larga escala associadas ao fenômeno La Niña, totalizando poucos dias de céu aberto. Para isso foi calculado o índice de claridade (Kt) horária, entre as 06:00 às 18:00 UTC, por meio da razão da radiação solar incidente horária ($radin - MJm^{-2}h^{-1}$) e a radiação solar extraterrestre horária ($Q_o - MJm^{-2}h^{-1}$), descrita na equação 1.

$$Kt = \frac{radin}{Q_o} \quad (1)$$

Q_o foi calculada com base em Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) e Kt contabilizada para cada dia, sendo classificados os dias com $Kt > 0.55$ (KUYE; JAGTAP, 1992) como céu claro e céu aberto, totalizando 40 dias.

2.3 Radiação de ondas longas atmosféricas - LW_{ar}

Para o cálculo da radiação de ondas longas atmosféricas, foram escolhidas parametrizações clássicas utilizadas para região tropical, descritas na Tabela 2.

Essas equações são baseadas na equação geral retratada por Stefan-Boltzmann, que considera a emissividade do ar e a temperatura absoluta para obtenção de LW_{ar} . Os modelos de parametrização ajustam por meio de coeficientes a emissividade da atmosfera, em relação à temperatura do ar e à umidade relativa do ar.

LW_{ar} foi calculada para os 40 dias de céu claro e céu aberto, em frequência de 30 min e comparadas com a radiação de ondas longas Atmosférica medida pelo CNR4.

A fim de compreender o desempenho dos modelos de parametrização, foram aplicadas as estatísticas indicativas RMSE (Root mean square error), MBE (Mean Bias Error), Bias%, R^2 e d de Willmott et al. (1985), que representa o grau de concordância da estimativa quando comparados com os valores medidos, descritas nas Equações 2,3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 2 – Parametrizações de estimativa de ondas longas atmosféricas.

Parametrização	Equação	Coeficientes
Brutsaert (1975)	$LW_i = [a_1 * (\frac{e_{ar}}{t_{ar}})^{\frac{1}{7}}] \sigma t_{ar}^4$	$a_1 = 1,2$
Prata (1996)	$LW_i = \{1 - [(1 + \omega) \exp(-(a_1 + a_2 \omega))^{0.5}]\} \sigma t_{ar}^4$	$a_1 = 1,2, a_2 = 3$
Brunt (1932)	$LW_i = [a_1 + (a_2 e_{ar}^{0.5})] \sigma t_{ar}^4$	$a_1 = 0,5, a_2 = 0,065$
Berger, Buriot e Garnier (1984)	$LW_i = [a_1 + a_2 (e^{0.5})] \sigma t_{ar}^4$	$a_1 = 0,66, a_2 = 0,04$
Berdahl e Martin (1982)	$LW_i = [a_1 + a_2 (e^{0.5})] \sigma t_{ar}^4$	$a_1 = 0,56, a_2 = 0,059$

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_i^n (LW_i - LW_{ar})^2}{n} \right]} \quad (2)$$

$$MBE = \left[\frac{\sum_i^n (LW_i - LW_{ar})}{n} \right] \quad (3)$$

$$Bias\% = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (LW_{ar} - LW_i)}{\sum_{i=1}^n LW_{ar}} \right] * 100 \quad (4)$$

$$d = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (LW_i - LW_{ar})^2}{\sum_{i=1}^n (|LW_{ar} - \overline{LW_{ar}}| + |LW_i - \overline{LW_{ar}}|)^2} \right] \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \left((LW_{ar} - \overline{LW_{ar}})(LW_i - \overline{LW_i}) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (LW_{ar} - \overline{LW_{ar}})^2 \sum_{i=1}^n (LW_i - \overline{LW_i})^2} \right] \quad (6)$$

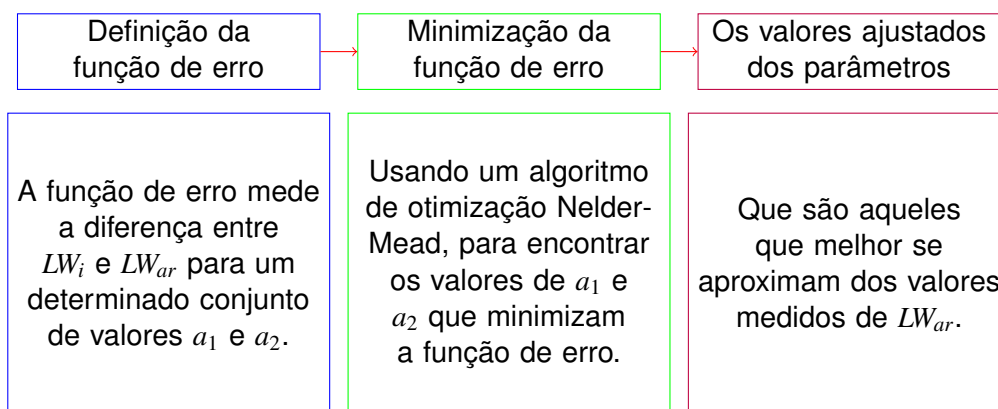
2.4 Ajuste dos coeficientes das parametrizações

Para melhores ajustes do desempenho dos modelos de parametrização de ondas longas atmosféricas, aplicou-se o método matemático dos mínimos quadrados, que é uma técnica estatística usada para encontrar a melhor linha reta que se ajusta a um conjunto de pontos em um gráfico (HELENE, 2006). A otimização foi realizada pelo software Python, retratada pelo fluxograma 2.4.

Após a obtenção dos coeficientes ajustados, realizou-se o cálculo dos modelos com os novos coeficientes (Tabela 3) e analisou-se o desempenho do ajuste pelo emprego das estatísticas já descritas.

Tabela 3 – Coeficientes a_1 e a_2 , ajustados pelo método matemático dos mínimos quadrados.

Parametrização	Brutsaert	Prata	Brunt	Berger	Berdahl e Martin
Coeficientes	$a_1 = 1.24$	$a_1 = -2,4$ $a_2 = 3,96$	$a_1 = 0.57$ $a_2 = 0,059$	$a_1 = 0.57$ $a_2 = 0,059$	$a_1 = 0.57$ $a_2 = 0,059$



3. Resultado e Discussões

3.1 Variáveis meteorológicas

As condições meteorológicas vigentes durante o período do estudo está descrito na Figura 1. Observa-se a sazonalidade das variáveis entre os meses mais chuvosos (Dezembro - Maio) e os meses mais secos (Junho - Outubro). Os maiores acumulados de precipitação são no mês de abril, e os menores no mês de agosto. Embora a precipitação apresente o mínimo no mês de agosto, a temperatura apresenta o seu valor médio máximo no mês setembro 30°C , culminando com o menor valor de umidade relativa do ar de 70% (Figura 1a). Além da sazonalidade, ocorreu forte variabilidade intrassazonal, influenciadas pelas condições de larga escala associadas ao fenômeno La Niña de acordo com o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM) (2021). Essa sazonalidade também é observada no déficit de pressão de vapor (Figura 1b), ao qual como esperado no período mais seco o mês de setembro o déficit chegou a $17,69 \text{ hPa}$, mostrando que durante esse período há redução da umidade disponível na atmosfera, concomitante com a redução do acumulado de precipitação, do aumento da temperatura do ar e da redução da umidade relativa do ar.

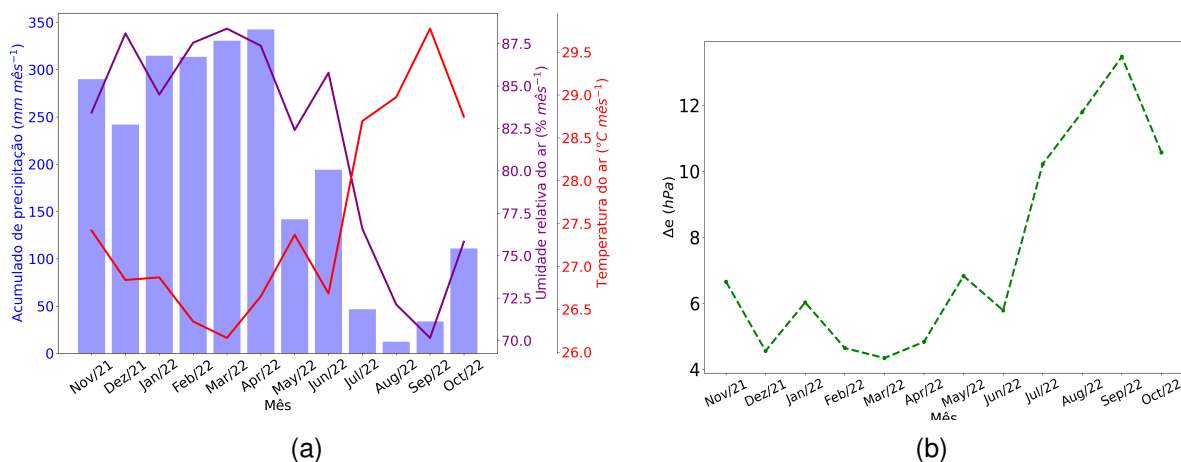


Figura 1 – Variáveis meteorológicas mensais. (a) Precipitação acumulada mensal, temperatura média mensal e umidade relativa média mensal; (b) Déficit de pressão de vapor atmosférico.

3.2 Cálculo de LW_i

O desempenho das equações paramétricas para a obtenção das radiações de ondas longas atmosférica para os dias de céu claro e céu aberto estão descritas na Tabela 4. De forma ampla, todas as parametrizações tiveram um espalhamento inferior que 15 W m^{-2} (RMSE), subestimaram as LW_{ar} em até $9,35 \text{ W m}^{-2}$ (MBE), apresentaram concordância de de 70% (d), erro inferior ha 2,2%.

Dentre as parametrizações, Brutsaert apresentou o melhor rendimento, com os melhores resultados de RMSE, MBE, d, Bias% e melhor ajuste $R^2 = 0.38$. Todavia, Brunt apresentou o pior rendimento, com maior valor de espalhamento, maior subestimativa, menor concordância e ajuste

$R^2 = -0.06$. Esse resultado mostra que este modelo de regressão ajustado não é apropriado para descrever a relação entre a parametrização e LW_{ar} .

Tabela 4 – Estatística descritiva do desempenho das parametrizações, em relação a LW_{ar} medido pelo CNR4.

Parametrização	RMSE	MBE	d	Bias%	R^2
Brutsaert	11,26	-1,11	0,82	0,26	0,38
Prata	12,05	-4,39	0,80	1,03	0,29
Brunt	14,67	-9,35	0,70	2,20	-0,06
Berger	13,12	-6,40	0,77	1,5	0,15
Berdal e Martin	12,64	-5,59	0,78	1,32	0,21

A estatística das parametrizações após os ajustes, assim como o ajuste da reta de regressão, estão descritos na Figura 2. Observa-se que Brutsaert apresentou concordância com os valores estatísticos obtidos antes do ajuste, mostrando que, estatisticamente, valor do coeficiente de 1,2 é igual ao do ajuste de 1,24, entretanto, o ajuste da curva aumentou para 0.49. Porém, as demais parametrizações apresentaram ajustes favoráveis, pois o espalhamento reduziu para valores inferiores a $11,45 \text{ W m}^{-2}$, o erro médio igual ou menor que $0,81 \text{ W m}^{-2}$, com valores de concordância iguais e apresentou melhora na representação do modelo de ajuste (0.49).

Embora Brutsaert tenha apresentado constância após o ajuste, Prata apresentou o melhor desempenho após o ajuste, com RMSE de $11,12 \text{ W m}^{-2}$, subestimativa de $0,11 \text{ W m}^{-2}$, bias 0,02% e ajuste da curva de 0,49.

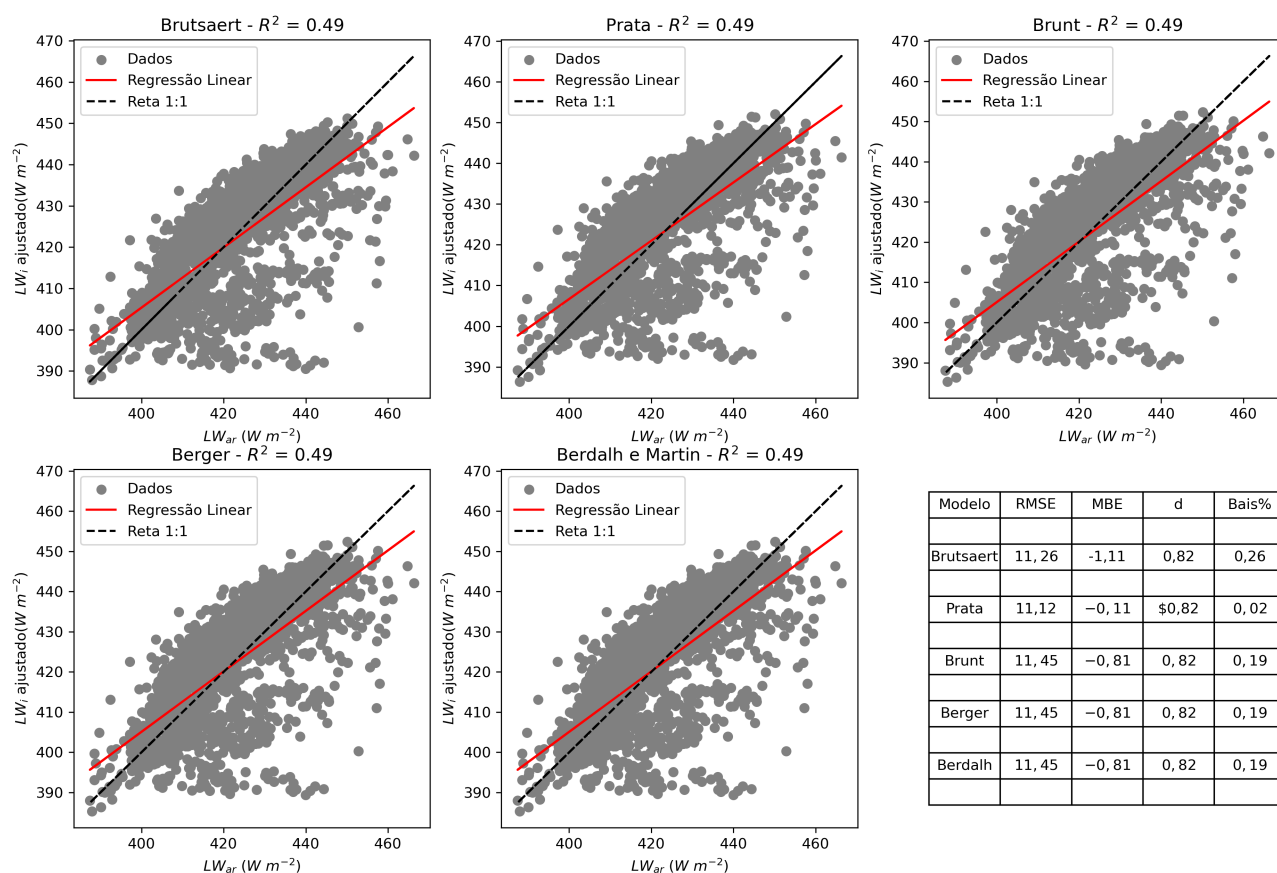


Figura 2 – Regressão Linear entre LW_{ar} e LW_i e estatística descritiva após os ajustes dos coeficientes

4. Conclusão

Os ajustes obtidos pelo método de mínimos quadrados proporcionou melhor desempenho para a obtenção da radiação de ondas longas atmosféricas. Logo, os parâmetros ajustados por esse estudo, proporcionam maior precisão para o cálculo da radiação de ondas longas atmosféricas, para a referida área de estudo.

Em relação ao modelo proposto de Brutsaert, embora seu coeficiente a_1 tenha sido ajustado de 1,2 para 1,24, não foi apresentado ajuste significativamente diferente, podendo assim ser utilizado ambos os coeficientes.

Dentre os modelos ajustados, Prata apresentou o melhor desempenho após o ajuste, sendo assim a melhor escolha para a obtenção das ondas longas atmosféricas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Micrometeorologia do LBA-INPA, ao Laboratório de Modelagem Climática e ao Corpo de Bombeiros Militar do Amazonas.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, L. J. G.; COSTA, J. M. N. d.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; COSTA, A. C. L. d.; FERREIRA, W. P. M. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 215–224, 2011. [SciELO Brasil](#).

AIMI, D.; ZIMMER, T.; BULIGON, L.; SOUZA, V. de A.; HERNANDEZ, R.; ROMIO, L.; RUBERT, G. C.; DIAZ, M. B.; MALDANER, S.; VEECK, G. P. et al. Evaluation of atmospheric downward longwave radiation in the brazilian pampa region. **Atmosphere**, v. 12, n. 1, p. 28, 2020. [MDPI](#).

BERDAHL, P.; MARTIN, M. Emissivity of clear skies. 1982.

BERGER, X.; BURIOT, D.; GARNIER, F. About the equivalent radiative temperature for clear skies. **Solar Energy**, v. 32, n. 6, p. 725–733, 1984. [Elsevier](#).

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. i. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 58, n. 247, p. 389–420, 1932. [Wiley Online Library](#).

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water resources research**, v. 11, n. 5, p. 742–744, 1975. [Wiley Online Library](#).

Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM). **Boletim Climático da Amazônia**. 2021. <www.sipam.gov.br>. [Prognóstico para janeiro-fevereiro-março 2022 – Ano 18 – Nº206 – Dezembro/2021](#).

HELENE, O. **Metodos dos Minimos Quadrados**. [S.l.: s.n.], 2006. [Editora Livraria da Física](#).

KUYE, A.; JAGTAP, S. Analysis of solar radiation data for port harcourt, nigeria. **Solar Energy**, v. 49, n. 2, p. 139–145, 1992. [Elsevier](#).

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia agricola. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 2007. [LCE 306](#).

PRATA, A. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 122, n. 533, p. 1127–1151, 1996. [Wiley Online Library](#).

PRICE, E.; MIELIKAINEN, J.; HUANG, B.; HUANG, H. A.; LEE, T. Gpu acceleration experience with rrtmg long wave radiation model.(2013). doi: [hp. dx. doi. org/10.1117/12.2031450](https://doi.org/10.1117/12.2031450), 2013. [SPIE](#).

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. [Wiley Online Library](#).