



DOI: 10.5380/abclima

AVALIAÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIÇÃO DIÁRIO PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU - SÃO PAULO - BRASIL

*Assessment of models for estimating daily net radiation for the
city of Botucatu - São Paulo - Brazil*

*Evaluación de modelos de estimación del radiación líquida diaria
para el municipio de Botucatu - São Paulo - Brasil*

Marcus Vinicius Contes Calca  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
mcontes@outlook.com

Marina Sbardella  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
marina.sbardella@unesp.br

Jose Rafael Franco  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
jose.franco@unesp.br

Matheus Rodrigues Raniero  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
matheus.raniero@unesp.br

Alexandre Dal Pai  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
dal.pai@unesp.br

Enzo Dal Pai  

Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista de Botucatu, São Paulo, Brasil
enzo-dal.pai@unesp.br

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar 5 modelos clássicos (baseados em medições meteorológicas) e 1 modelo de sensoriamento remoto de estimativa do saldo de radiação para Botucatu (SP) - Brasil. A avaliação dos modelos de Linacre (1968); Doorenbos e Pruitt (1977); Funari, Tarifa e Simpson (1985); Allen *et al.* (1998) e Pereira,

Sentelhas e Villa Nova (1998), assim como dos valores do GLDAS-2.1, foi realizada em comparação a medições observacionais de um radiômetro (CNR1/Kipp&Zonen) da Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp (22°54'S, 48°27'O e 786m). Os valores gerados foram avaliados pelos indicadores estatísticos rMBE, rRMSE e R. No geral, o modelo de Allen *et al.* (1998), recomendado pela FAO/UN, apresentou a melhor correlação (R: 97%), e os menores erros (rMBE: 9,54% e rRMSE: 13,66%), comparado as medições. Sazonalmente, o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) apresentou resultados satisfatórios para o verão (R: 95%; rMBE: 8,04% e rRMSE: 18,55%), inverno (R: 94%; rMBE: 8,04% e rRMSE: 18,55%) e outono (R: 96,50%; rMBE: 2,62% e rRMSE: 9,42%), considerando os erros e a correlação com as medições, já o de Allen *et al.* (1998), apresentou melhores resultados para a primavera (R: 94%; rMBE: 8,27% e rRMSE: 10,28%). Portanto, para o clima de Botucatu (SP), baseando-se nas medições utilizadas, o modelo de Allen *et al.* (1998) gerou o melhor resultado. Sazonalmente, para o verão, inverno e outono o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa nova (1998), bem como o de Allen *et al.* (1998) para a primavera, apresentaram resultados mais satisfatórios.

Palavras-chave: Saldo de radiação. Saldo radiômetro. Modelagem de dados. Evapotranspiração de referência (ET_o).

Abstract: The aim of this study was to evaluate 5 classical models (based on meteorological measurements) and 1 remote sensing model to estimate the net radiation for Botucatu (SP) - Brazil. The evaluation of Linacre (1968); Doorenbos and Pruitt (1977); Funari, Tarifa and Simpson (1985); Allen *et al.* (1998) and Pereira, Sentelhas and Villa Nova (1998) models, as well as the GLDAS-2.1 data, was performed in comparison with observational measurements from a radiometer (CNR1/Kipp&Zonen) of the School of Agricultural Sciences - UNESP (22°54'S, 48°27'W and 786m). The values generated were evaluated by the following statistical indicators: rMBE, rRMSE and R. In a general context, the model by Allen *et al.* (1998), recommended by FAO/UN, showed the best correlation (R: 97%), and the smallest errors (rMBE: 9.54% and rRMSE: 13.66%), compared to measurements. Seasonally, the Pereira, Sentelhas and Villa Nova (1998) model showed good results for summer (R: 95%; rMBE: 8.04% and rRMSE: 18.55%), winter (R: 94%; rMBE: 8.04% and rRMSE: 18.55%) and autumn (R: 96.50%; rMBE: 2.62% and rRMSE: 9.42%), considering the errors and the correlation with the measurements, and Allen *et al.* (1998) showed better results for spring (R: 94%; rMBE: 8.27% and rRMSE: 10.28%). Therefore, for the climate of Botucatu (SP), based on the measurements used, the model by Allen *et al.* (1998) generated the best result. Seasonally, for summer, winter and autumn, the model by Pereira, Sentelhas and Villa nova (1998), as well as that of Allen *et al.* (1998) for spring, showed good results.

Keywords: Net radiation. Net radiometer. Data modeling. Reference evapotranspiration (ET_o).

Resumen: El objetivo de estudio fue evaluar 5 modelos clásicos (basados en medidas meteorológicas) y 1 modelo de teledetección para estimar la radiación líquida para Botucatu (SP)/Brasil. La evaluación de los modelos de Linacre (1968); Doorenbos y Pruitt (1977); Funari, Tarifa y Simpson (1985); Allen *et al.* (1998) e Pereira, Sentelhas y Villa Nova (1998), así como los datos de GLDAS-2.1, fue hecha en comparación con medidas observacionales de un radiómetro (CNR1/Kipp&Zonen) de la Facultad de Ciencias Agrarias - UNESP (22°54'S , 48°27'O y 786m). Los valores generados fueron evaluados por los indicadores estadísticos rMBE, rRMSE y R. En total, el modelo de Allen *et al.* (1998), recomendado por FAO/UN, mostró la mejor correlación (R: 97%) y los errores más pequeños (rMBE: 9.54% y rRMSE: 13.66%), en comparación con las mediciones. Estacionalmente, el modelo de Pereira, Sentelhas y Villa Nova (1998) mostró buenos resultados para verano (R: 95%; rMBE: 8,04% y rRMSE: 18,55%), invierno (R: 94%; rMBE: 8,04% y rRMSE: 18,55 %) y otoño (R: 96,50%; rMBE: 2,62% y rRMSE: 9,42%), considerando los errores y la correlación con las mediciones, y Allen *et al.* (1998) mostró mejores resultados para la primavera (R: 94%; rMBE: 8.27% y rRMSE: 10.28%). Por tanto, para el clima de Botucatu (SP), con base en los datos, el modelo de Allen *et al.* (1998) generó el mejor resultado. Estacionalmente, para el verano, invierno y otoño, el modelo de Pereira, Sentelhas y Villa nova (1998), así como el de Allen *et al.* (1998) para primavera, resultó mejor.

Palabras clave: Radiación líquida. Radiómetro. Modelado de datos. Evapotranspiración de referencia (ET_o).

Submetido em: 23/05/2020

Aceito para publicação em: 02/12/2021

Publicado em: 24/01/2022

INTRODUÇÃO

O saldo de energia, proveniente da radiação solar, é a principal fonte energética para a manutenção de processos naturais da Terra, sendo fundamental em estudos agrometeorológicos e de monitoramento climático. Uma de suas principais aplicações está na modelagem da evapotranspiração de referência (ET_o) e, no cálculo do balanço hídrico, que contribui para a gestão racional da água em procedimentos de irrigação agrícola (ALLEN *et al.*, 1998). Como um dos componentes do balanço de energia, o saldo de radiação é resultado do balanço global da radiação, que envolve os balanços de ondas curtas e longas (SENTELHAS; NASCIMENTO, 2003). As ondas curtas são radiações emitidas no espectro de comprimentos de ondas de 0,3 e 2,8 μm e seu balanço é dado pela diferença entre as radiações global incidente e refletida. Já as ondas longas são radiações emitidas com comprimentos de onda superiores a 4 μm e seu balanço é dado pela diferença entre as radiações atmosférica e terrestre. As radiações de ondas longas apresentam forte dependência da temperatura e umidade do ar e por isso são também conhecidas como radiações termiais.

O saldo de radiação é um parâmetro que expressa a quantidade de energia disponível para uso em um determinado ambiente. Além de apresentar dependência temporal e espacial também é afetado por fatores como a cobertura vegetal, o albedo, a umidade do ar e a temperatura do solo (AGUIAR, 2007; FLUMIGNAN *et al.*, 2018; SENTELHAS; NASCIMENTO, 2003). A quantificação do saldo de radiação pode ocorrer a partir de medições, utilizando sensores automáticos, ou por meio de estimativas, utilizando modelos estatísticos, físicos ou estocásticos. É consenso que o valor do saldo de radiação obtido por sensores configura a situação mais desejável. No entanto, o investimento em equipamentos e capacitação de recursos humanos para operacionalização do sistema de medida apresenta aporte financeiro elevado, o que dificulta a implantação desse cenário em muitas estações climatológicas ao redor do Brasil (FLUMIGNAN *et al.*, 2018). Por este motivo, o saldo de radiação é, na maior parte das ocasiões, estimado a partir de métodos empíricos.

Neste sentido, existem na literatura diversos modelos de estimativa do saldo de radiação para uma determinada localidade. A principal diferença entre os modelos é a complexidade de suas variáveis de entrada e a partição de tempo utilizada (SENTELHAS; GILLESPIE, 2008). Recentemente, se tem implementado modelagens a partir de dados de sensoriamento

remoto, utilizando informações oriundas de satélites de monitoramento ambiental na estimativa do saldo de radiação (PAIVA, 2005). Nesta classe pode-se encontrar modelos baseados no Sistema Global de Assimilação de Dados (Global Land Data Assimilation System - GLDAS) da Agência Espacial Americana (National Aeronautics and Space Agency - NASA), o qual utiliza uma nova geração de sistemas de observação terrestre e espacial. As radiações (incidente, refletida e de ondas longas) são estimadas no GLDAS a partir de procedimentos da Agência Meteorológica da Força Aérea (AFWA) em conjunto com produtos de nuvens e neve do Sistema de Modelagem Agrometeorológica (AGRMET), utilizando os algoritmos de Shapiro (1987) e Idso (1981) em três camadas da atmosfera (RODELL *et al.*, 2004).

Portanto, o objetivo deste estudo foi testar 5 modelos clássicos de estimativa do saldo de radiação, desenvolvidos a partir de medidas meteorológicas, e 1 modelo proveniente de produtos de sensoriamento remoto. Os valores de saldo de radiação dos modelos clássicos foram obtidos com base em medições de uma estação meteorológica do município de Botucatu, São Paulo, Brasil. Enquanto os valores para o modelo baseado em sensoriamento remoto foram obtidos a partir do Google Earth Engine (GEE). Os resultados foram comparados com valores de saldo de radiação medidos com um radiômetro.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e Clima

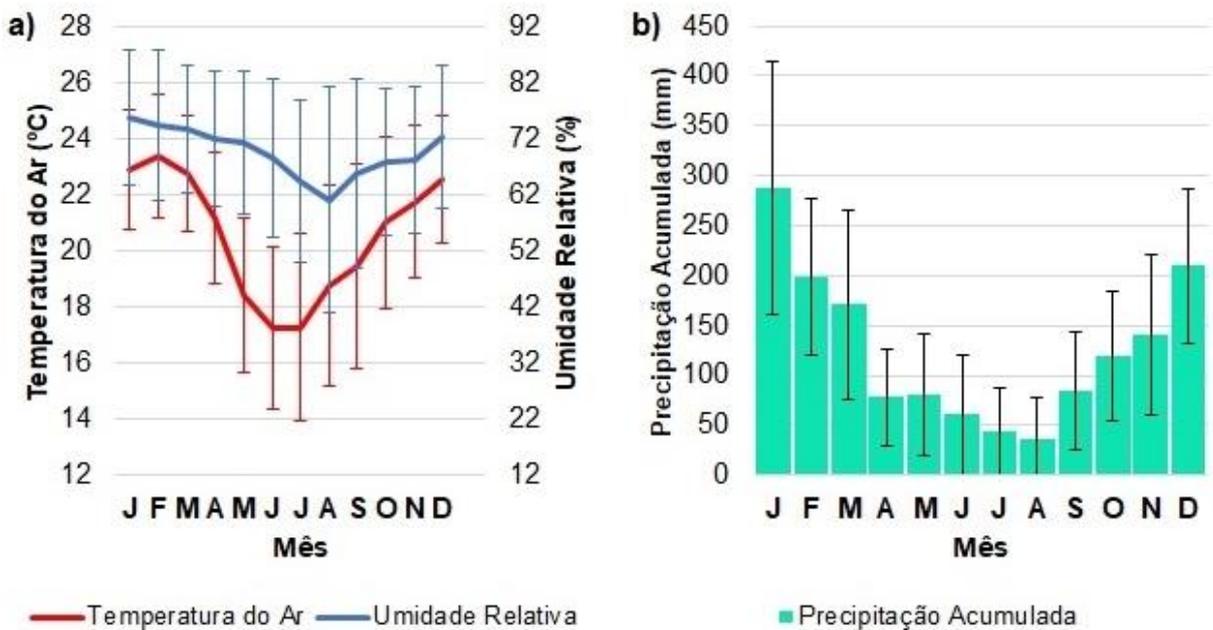
O estudo foi elaborado a partir das medições realizadas pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (22°54'S de latitude, 48°27'O de longitude e 786m de altitude) da Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) de Botucatu, São Paulo, Brasil. Cidade situada na região centro-sul do estado de São Paulo, Botucatu possui clima temperado, compreendendo inverno seco (junho a agosto) e verão quente e úmido (dezembro a fevereiro).

A série meteorológica histórica para a cidade (Figura 1), aferida pela Estação Meteorológica Lageado (2019), indica que fevereiro é o mês mais quente (média de 22,5 °C) e julho o mais frio (média de 16,8 °C). Tal que janeiro é o mês com maior índice pluviométrico (300 mm na média) e agosto com o menor (50 mm na média). Conseqüentemente, janeiro se



caracteriza como o mês mais úmido (75,6% na média) e agosto como o menos (61,20% na média).

Figure 1 - Série histórica da Estação Meteorológica Lageado (2019) contendo a temperatura média e a umidade relativa do ar (a) e a precipitação acumulada (b) de Botucatu, São Paulo, Brasil no período de 1971 a 2013.

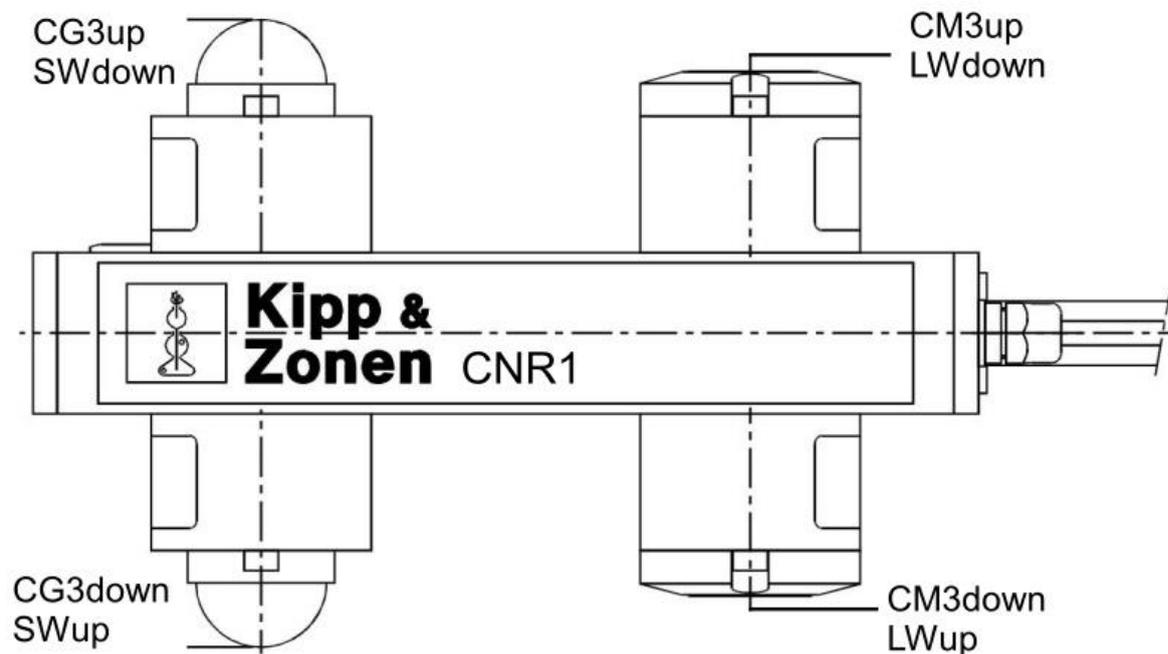


Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Medidas do Saldo de Radiação

Foram utilizadas medições diárias das radiações solares de ondas curtas incidente (SW_{\downarrow}) e refletida (SW_{\uparrow}), além das radiações de ondas longas atmosférica (LW_{\downarrow}) e terrestre (LW_{\uparrow}), do período de janeiro a dezembro de 2015 em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$. As radiações incidente e refletida foram obtidas por meio de piranômetros CM3 e as radiações atmosférica e terrestre por meio de pirgeômetros CG3, ambos acoplados a um radiômetro modelo CNR1 (Figura 2) da Kipp&Zonen (CAMPBELL SCIENTIFIC, 2011).

Figure 2 - Radiômetro CNR1 do Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu, São Paulo, Brasil.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Os valores foram medidos a cada 5 segundos, porém somente a média do intervalo de 5 minutos ($W\ m^{-2}$) de leitura é que foi gravada por meio de um sistema de aquisição de dados Micrologger CR3000 da Campbell Scientific (2011). Após a aquisição desses valores médios foi necessário realizar uma avaliação de sua qualidade, etapa importante para validar se as medidas estão corretas. Após validadas as medidas puderam ser transformadas para a partição temporal diária, a partir de um procedimento de integração numérica. Para realizar a integração cada valor gerado (média de 5 minutos) foi multiplicado por 300, que representa



a quantidade de segundos existente no intervalo de 5 minutos que a leitura é gravada, posteriormente esses valores foram somados para o período de uma hora e convertidos para $\text{MJ m}^{-2} (\times 10^{-6})$, possibilitando sua comparação com os valores gerados pelos modelos.

O processo de avaliação da qualidade das medidas consistiu, fundamentalmente, em remover valores maiores ou menores que os limites fisicamente possíveis para cada componente de radiação (Tabela 1). Para as irradiâncias de onda curta incidente ($\text{SW}\downarrow$) e refletida ($\text{SW}\uparrow$) foi adotado como referência o procedimento criado por Tregenza *et al.* (1994) publicado pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE). Para as irradiâncias de onda longa terrestre ($\text{LW}\uparrow$) e atmosférica ($\text{LW}\downarrow$) foi adotado o procedimento do Centro Mundial de Monitoramento de Radiação - WRMC (WORLD MONITORING RADIATION CENTER, 2002), criado por Long e Dutton (2002).

Tabela 1 - Filtros de avaliação da qualidade das medições.

IRRADIÂNCIA (W m^{-2})	FILTRO DE AVALIAÇÃO DA MEDIDA
Onda Curta Incidente ($\text{SW}\downarrow$)	$0 < \text{SW}\downarrow \leq (E \cdot 1,20)$
Onda Curta Refletida ($\text{SW}\uparrow$)	$0 < \text{SW}\uparrow \leq (\text{SW}\downarrow \cdot 0,50)$
Onda Longa Terrestre ($\text{LW}\uparrow$)	$0 < \text{LW}\uparrow \leq 900$
Onda Longa Atmosférica ($\text{LW}\downarrow$)	$0 < \text{LW}\downarrow \leq 700$

Legenda: E (Irradiância Solar Extraterrestre).

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Somente foram consideradas medidas diurnas das irradiâncias de ondas curtas no procedimento de validação, bem como para as irradiâncias de ondas longas foi considerado todo o período do dia. A seguir (Tabela 2) pode-se ter uma ideia da quantidade total de medidas que foram removidas pelo procedimento, sendo consideradas não válidas.

Tabela 2 - Resultado dos filtros de avaliação da qualidade das medições.

IRRADIÂNCIA (W m^{-2})	QUANTIDADE DE MEDIDAS	
	BRUTAS	VÁLIDAS
Onda Curta Global ($\text{SW}\downarrow$)	48098	47944
Onda Curta Refletida ($\text{SW}\uparrow$)	48057	46828
Onda Longa Terrestre ($\text{LW}\uparrow$)	97289	75436
Onda Longa Atmosférica ($\text{LW}\downarrow$)	97289	72959

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Com relação a quantidade total 0,32% e 2,55% das irradiâncias de ondas curtas incidente e refletida foram removidas por não passarem no filtro de validação, respectivamente. No caso da irradiância refletida foi possível observar que aos finais de alguns dias do mês de agosto os valores estavam abaixo de zero, provavelmente por conta da baixa elevação solar e da diminuição da irradiância incidente, produzindo uma baixa reflexão pela grama. Com relação ao total de medidas das irradiâncias de ondas longas 22,46% e 25,01% também foram removidas, esse grande índice de medições errôneas se deu por problemas na fiação elétrica (exposta, devido a ação do tempo) do radiômetro nos meses de janeiro e março, implicando que os valores ficassem abaixo de zero. A resolução, após várias ações sem sucesso, foi substituir toda a fiação de ligação dos pirgeômetros.

Modelos de Estimativa do Saldo de Radiação

A utilização de modelos para estimar o saldo de radiação (SR) é comum quando não se pode medir esse parâmetro. Esses tipos de modelos, em geral, são constituídos de duas partes, uma relação usada para o balanço de ondas curtas (BOC) e outra para o balanço de ondas longas (BOL). O balanço de ondas curtas é a diferença entre a radiação solar incidente (ROC ↓) e a refletida (ROC ↑) por uma superfície específica (albedo). Tal que o balanço de ondas longas é a diferença entre a energia absorvida (ROL ↓) e a emitida (ROL ↑) pela superfície terrestre (ALLEN *et al.*, 1997).

Modelo de Linacre (1968)

O modelo de Linacre (1968) expressa a relação existente entre o saldo de radiação e a intensidade de radiação solar incidente, a partir da dependência desses parâmetros com o padrão de nebulosidade e a temperatura do ar. Portanto, é um modelo (Equação 1) que se dispõe a estimar o saldo de radiação, de forma simplificada, a partir de medições meteorológicas de maior disponibilidade, ou seja, mais comuns.

$$SR = ROC \downarrow (1 - P_v) - 0,0016 (0,2 + 0,8 n/N)(100 - TAR) \quad (1)$$

De forma que $ROC \downarrow$ é irradiação solar global ($MJ m^{-2} dia^{-1}$), P_v é o coeficiente de reflexão da superfície gramada, n é o brilho solar em horas, N é o fotoperíodo em horas e TAR é a temperatura média do ar ($^{\circ}C dia^{-1}$).

Modelo de Doorenbos e Pruitt (1977)

O modelo de Doorenbos e Pruitt (1977) é, fundamentalmente, uma modificação do modelo proposto por Penman (1948), utilizado para se estimar o balanço de ondas curtas e longas separadamente, tal que a partir de sua diferença se tenha o valor estimado de saldo de radiação. De forma que se utiliza também outras medições meteorológicas, como radiação solar incidente, brilho solar, temperatura e umidade relativa do ar, para obter valores diários estimados (Equação 4).

$$BOC = ROC \downarrow (1 - P_v) \quad (2)$$

$$BOL = - \left[4,903 \cdot 10^{-9} TAR^4 (0,56 - 0,25 \sqrt{ea}) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \right] \quad (3)$$

$$SR = BOC - BOL \quad (4)$$

De forma que BOC é o balanço de ondas curtas (Equação 2), onde $ROC \downarrow$ é a irradiação solar incidente ($MJ m^{-2} dia^{-1}$) e P_v é o coeficiente de reflexão da superfície gramada. A expressão BOL (Equação 3) representa o balanço de ondas longas, tal que TAR é a temperatura média do ar ($K dia^{-1}$), ea é a pressão parcial de vapor de água (kPa), n é o brilho solar em horas e N é o fotoperíodo em horas.

Modelo de Funari, Tarifa e Simpson (1985)

O modelo de Funari, Tarifa e Simpson (1985) expressa, basicamente, a relação entre a radiação solar incidente e a transmissividade atmosférica da localidade de interesse.

$$SR = a + b \text{ ROC } \downarrow (1 - P_v) \quad (5)$$

Onde a é o coeficiente linear, com valor de 0,253, e b o coeficiente angular, com valor de 0,465 para o município de Botucatu, de acordo com Silva *et al.* (2017), representando a transmissividade mínima e a máxima da atmosfera, respectivamente. Enquanto $\text{ROC } \downarrow$ é a irradiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e P_v é o albedo da superfície gramada.

Modelo de Allen *et al.* (1998)

O modelo de Allen *et al.* (1998), recomendado pelo relatório 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO/UN) é amplamente utilizado, principalmente, para a determinação da evapotranspiração de referência (E_{To}). Possui expressões que utilizam medições meteorológicas para a determinação do saldo de radiação (Equação 8), tornando-o um modelo mais completo.

$$BOC = (1 - P_v) \text{ ROC } \downarrow \quad (6)$$

$$BOL = \sigma \left[\frac{TAR_{max, K^4} + TAR_{min, K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{\text{ROC } \downarrow}{\text{RSO } \downarrow} - 0,35 \right) \quad (7)$$

$$SR = BOC - BOL \quad (8)$$

De forma que BOC é o balanço de ondas curtas, onde $\text{ROC } \downarrow$ é a irradiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e P_v é o coeficiente de reflexão da superfície gramada. A expressão BOL representa o balanço de ondas longas, tal que TAR_{max} é a temperatura máxima do ar (K dia^{-1}), TAR_{min} é a temperatura mínima do ar (K dia^{-1}), ea é a pressão de vapor (kPa) e $\text{RSO } \downarrow$ é a irradiação solar incidente em condições de céu aberto ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998)

O modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) se propõe a estimar os valores diários do saldo de radiação a partir de medições meteorológicas amplamente disponíveis em estações automatizadas. Neste caso, a expressão (Equação 9) foi adaptada para as condições

climáticas da cidade de Piracicaba (SP), distante aproximadamente 115 km do município de Botucatu (SP).

$$SR = -7,1739 + 0,6432 \text{ ROC} \downarrow + 4,2579 \sqrt{ea} + 0,0047 \text{ TAR} \quad (9)$$

De forma que $\text{ROC} \downarrow$ é a irradiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ea é a pressão parcial do vapor d'água na atmosfera (kPa) e TAR é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C dia}^{-1}$).

Produtos do GLDAS-2.1 (NASA)

O GLDAS (Global Land Data Assimilation System) da NASA (National Aeronautics and Space Administration/EUA) é um sistema global de incorporação de produtos baseados em satélites e observações terrestres. O GLDAS possui altas resoluções (2,5° a 1 km), e utiliza quatro modelos de superfície terrestre (LSMs): Noah, Catchment (CLSM), o Community Land Model (CLM) e o Variable Infiltration Capacity (VIC). O GLDAS-2.1 tem disponível produtos com medidas de albedo, evapotranspiração, balanço de ondas longas, balanço de ondas curtas, precipitação, temperatura do ar, direção do vento e outros componentes climáticos, desde 01 de janeiro de 2000 a cada 3 horas (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2021).

Os balanços de ondas curtas (BOC_{SAT}) e longas (BOL_{SAT}) em W m^{-2} do GLDAS-2.1 foram obtidos a partir do Google Earth Engine (GEE) para cada 3 horas de cada um dos 365 dias do ano de 2015 para a localidade de Botucatu (SP), onde foram avaliados os modelos (GOOGLE EARTH ENGINE, 2020). A GEE é uma plataforma desenvolvida pela Google que permite executar análises geoespaciais sem fins lucrativos. Para que fosse possível analisar os valores em comparação com os valores medidos foi necessário a realização de uma integração numérica, resultando em valores diários do saldo de radiação (SR_{SAT}) em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, similarmente ao procedimento feito para as medições.

$$\text{SR}_{\text{SAT}} = \text{BOC}_{\text{SAT}} + \text{BOL}_{\text{SAT}} \quad (10)$$

Indicativos Estatísticos

O desempenho dos modelos foi avaliado por meio dos indicativos estatísticos Mean Bias Error (MBE), Relative Mean Bias Error (rMBE), Root Mean Square Error (RMSE) Relative Root Mean Square Error (rRMSE) e Coeficiente de Correlação (R). O MBE (Equação 11) quantifica a diferença entre os pares de dados, comparando-os a fim de identificar uma tendência significativa em superestimar ou subestimar sistematicamente os valores. O RMSE (Equação 13) estima o erro absoluto indicado pelas diferenças entre os pares de dados avaliados, dando um maior peso para grandes erros. Os valores relativos (rMBE e rRMSE) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação. Enquanto o R (Equação 15) fornece o grau de correlação entre os pares de dados comparados (RINCÓN *et al.*, 2018). Para os indicativos MBE, rMBE, RMSE e rRMSE valores próximos de zero são desejáveis, porém para o R é mais interessante um valor próximo de um.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (11)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\underline{Y}} \times 100 \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\underline{Y}} \times 100 \quad (14)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \underline{Y}') (Y_i - \underline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y'_i - \underline{Y}')^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \underline{Y})^2}} \quad (15)$$

O parâmetro \underline{Y}' das equações representa os valores para comparação (valores modelados) e \underline{Y} representa os valores de referência (valores medidos). Tal que \underline{Y}' é a média dos valores para comparação e \underline{Y} é a média dos valores de referência (ANIS *et al.*, 2019; DAS; PARK; PARK, 2015; EL-METWALLY, 2004; SILVA *et al.*, 2017).

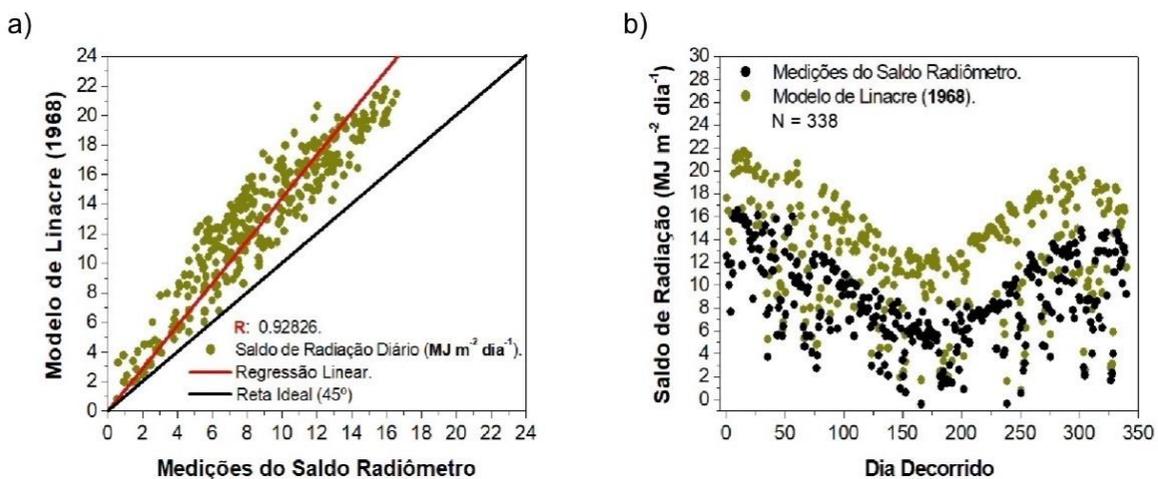
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelos de Estimativa do Saldo de Radiação

Modelo de Linacre (1968)

Os valores de saldo de radiação gerados a partir do modelo proposto por Linacre (1968), apresentaram uma correlação de 92% (R de 0,92826) com relação as medições do radiômetro (Figura 3a). Percebe-se, de acordo com a evolução temporal dos valores (Figura 3b), que o modelo possui uma tendência em superestimar o saldo de radiação durante todas as estações do ano (49,29 % ou 4,284 MJ m⁻² dia⁻¹), com maior destaque para a primavera (53,30% ou 4,874 MJ m⁻² dia⁻¹) e inverno (38,36% ou 3,459 MJ m⁻² dia⁻¹).

Figure 3 - Resultado da avaliação do modelo de Linacre (1968) demonstrando a correlação entre os valores modelados e os medidos (a) e sua evolução temporal (b).

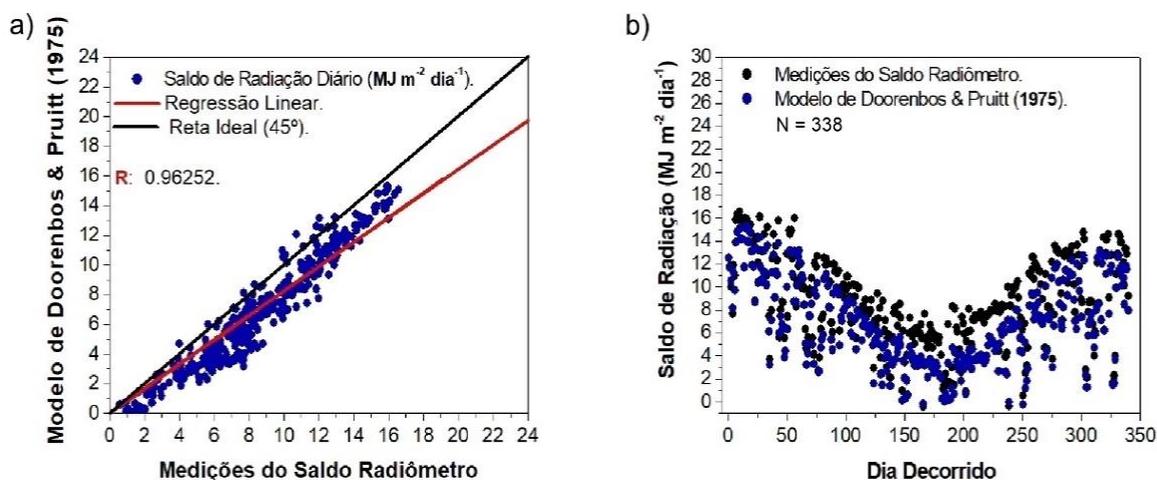


Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Modelo de Doorenbos e Pruitt (1977)

O modelo de Brunt-Penman adaptado por Doorenbos e Pruitt (1977) apresentou uma correlação de 96% (R de 0,96252) com os valores medidos (Figura 4a). Torna-se importante destacar que esse modelo foi criado para se estimar valores em regiões de clima úmido. Porém, de acordo com Pereira *et al.* (2007), os autores não estabeleceram critérios para que possa ser discriminado o clima seco do úmido. Isto indica que, possivelmente, as diferentes equações para clima úmido e seco possam ser aplicáveis em meses chuvosos ou de seca para uma mesma região.

Figure 4 - Resultado da avaliação do modelo de Doorenbos e Pruitt (1977) demonstrando a correlação entre os valores modelados e os medidos (a) e sua evolução temporal (b).



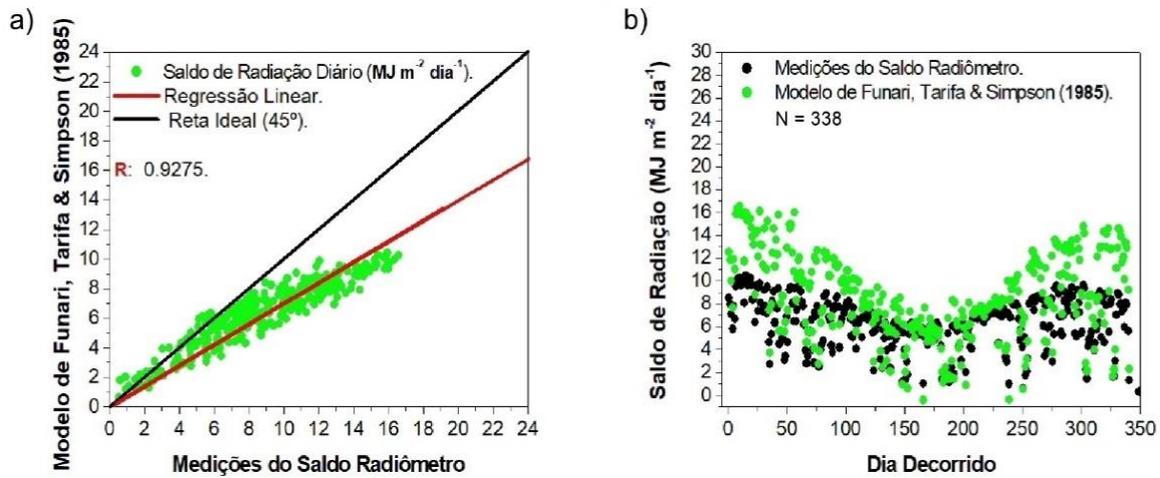
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Diferentemente do resultado apresentado no modelo anterior, o de Doorenbos e Pruitt (1977) possui uma tendência em subestimar os valores do saldo de radiação em 20,24% ou $1,759 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 4b).

Modelo de Funari, Farifa e Simpson (1985)

O modelo proposto por Funari, Tarifa e Simpson (1985) apresentou maior variação estacional, com uma correlação de aproximadamente 93% (R de 0,9275) com as medições (Figura 5a). A discrepância nos valores durante os meses de verão pode ser justificada pela ausência das variáveis de temperatura do ar, vapor de água na atmosfera e a razão de insolação (Figura 5b). Em um estudo realizado por Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998), equações para estimativa do saldo de radiação que consideram estas variáveis, apresentaram maior correlação com os valores medidos.

Figure 5 - Resultado da avaliação do modelo de Funari, Tarifa e Simpson (1985) demonstrando a correlação entre os valores modelados e os medidos (a) e sua evolução temporal (b).



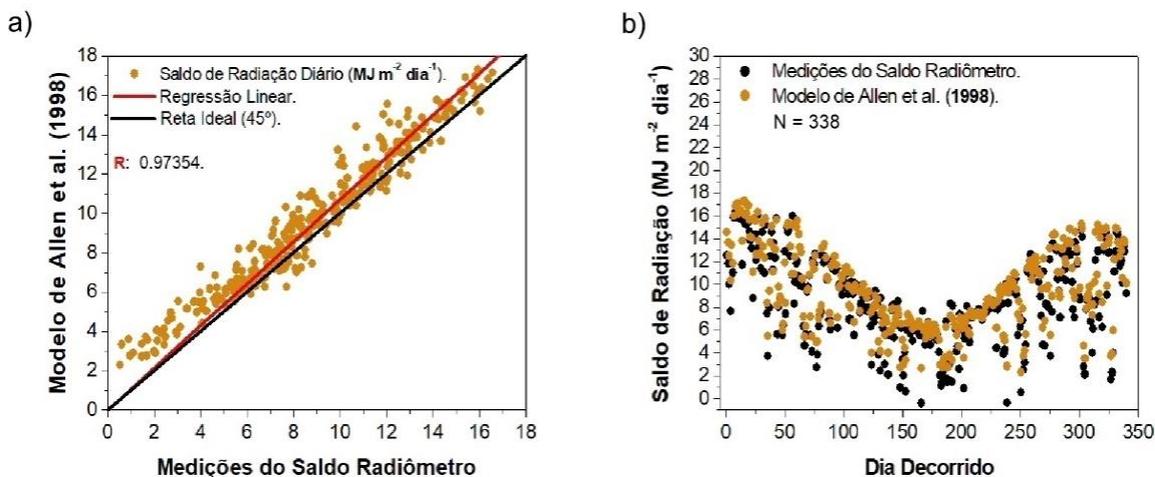
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

O desempenho relativamente baixo com relação ao anterior é justificado por causa da menor quantidade de variáveis de entrada no modelo. Em um contexto geral o modelo subestimou as medidas do saldo radiômetro em 27,14% ou $2,359 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Modelo de Allen *et al.* (1998)

A maior correlação, de 97% (R de 0,97354), entre os valores de saldo de radiação estimados e os observados, foi obtida a partir do modelo proposto por Allen *et al.* (1998), como pode-se observar na Figura 6a. Souza Filho *et al.* (2006) ao utilizarem este modelo para estimar o balanço de ondas longas no nordeste da Amazônia, encontraram valores satisfatórios, realizando apenas um ajuste entre as medições e as estimativas durante o período menos chuvoso. Este modelo, que é uma adaptação da equação de Brunt-Penman, é recomendado pela FAO/UN como uma parcela da equação para se estimar a evapotranspiração de referência (ET_o).

Figure 6 - Resultado da avaliação do modelo de Allen *et al.* (1998) demonstrando a correlação entre os valores modelados e os medidos (a) e sua evolução temporal (b).



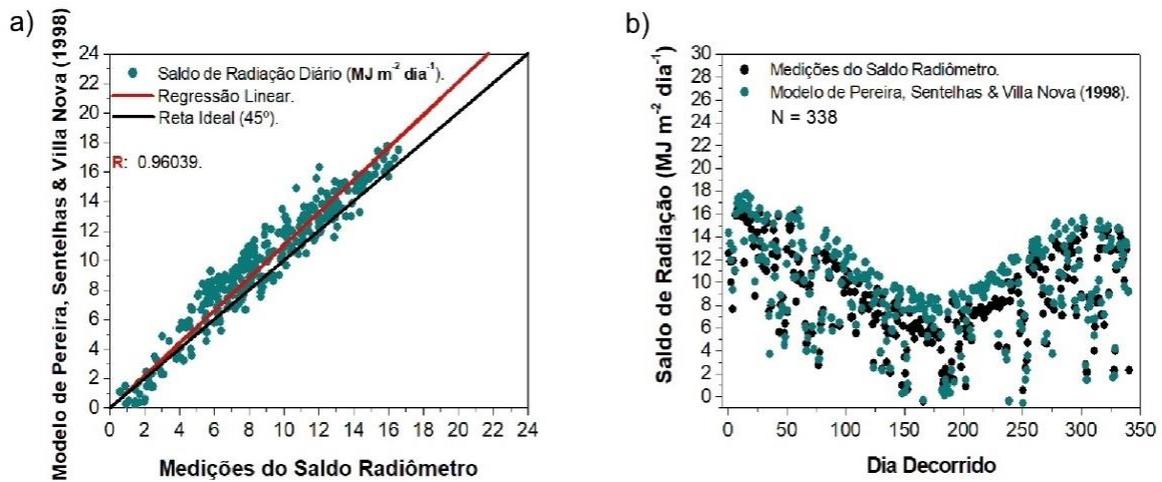
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Em um estudo realizado por Azevedo *et al.* (1990), foi apontado que modelos que utilizem simultaneamente variáveis climáticas como a temperatura do ar e a pressão de vapor no ar, para se estimar o balanço de ondas longas, geram resultados mais precisos. Pois, segundo Aguiar *et al.* (2011), as variações no déficit da pressão de vapor d'água podem influenciar na quantidade de radiação de onda longa atmosférica que é emitida para a superfície da Terra, devido a temperatura e vapor d'água presentes na atmosfera. Por esta razão é que o modelo se comporta satisfatoriamente se comparado as medições de um radiômetro. Pode-se observar, portanto, uma leve tendência em superestimar os valores (Figura 6b) do saldo de radiação em 9,54% ou 0,829 MJ m⁻² dia⁻¹.

Modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998)

O modelo proposto por Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998), para a cidade de Piracicaba (SP), foi desenvolvido em função de elementos climáticos como a irradiância solar incidente, a pressão parcial de vapor da água na atmosfera e a temperatura média diária do ar. Embora seja um modelo criado para uma região com características climáticas específicas, apresentou uma correlação de 96% (R de 0,96039) com as medidas (Figura 7a).

Figure 7 - Resultado da avaliação do modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) demonstrando a correlação entre os valores modelados e os medidos (a) e a evolução temporal (b).



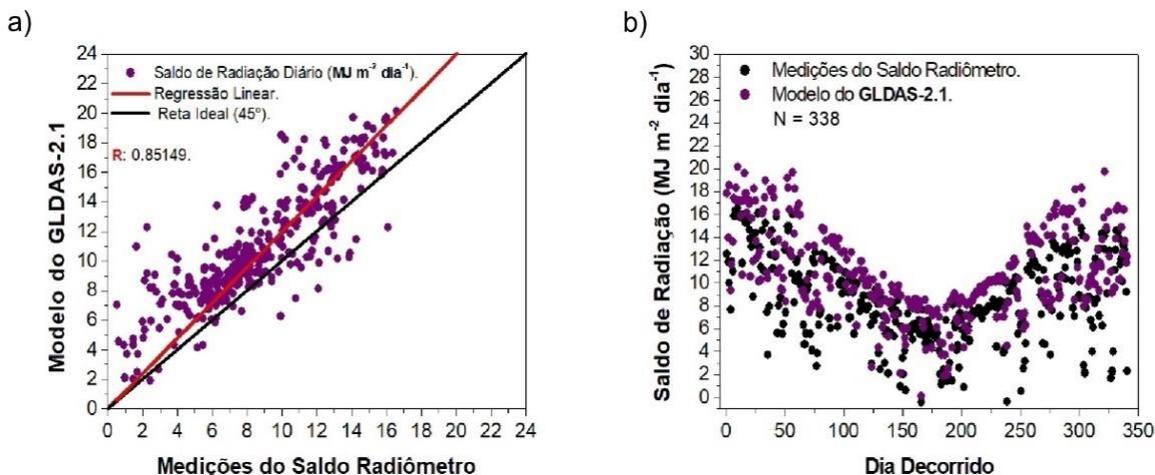
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A alta correlação dos valores estimados por esse modelo pode estar atrelada ao número de variáveis climáticas utilizadas no cálculo, uma vez que influenciam de maneira direta no saldo de radiação. No entanto, é importante destacar também que Piracicaba (SP), cidade utilizada como referência para ajuste do modelo, possui características climáticas similares ao município de Botucatu (SP), o que implica positivamente no resultado do modelo. Percebe-se, portanto, em um contexto geral, uma tendência em superestimar os valores em 11,48% ou $0,997 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Produtos do GLDAS-2.1

Os produtos do GLDAS-2.1 utilizados na estimativa do saldo de radiação apresentaram a menor correlação (Figura 8a), 85% aproximadamente (R de 0,85149), com os valores medidos. Pode-se perceber um maior espalhamento dos dados em valores mais baixos (0 a $6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e mais altos (12 a $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), indicando que os produtos do GLDAS superestimam as medições do saldo de radiação nessas situações. Para valores intermediários o resultado foi melhor. Em um contexto geral os valores do GLDAS-2.1 superestimaram (25,59% ou $2,224 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no geral) os medidos em todas as épocas do ano (Figura 8b).

Figure 8 - Resultado da avaliação do produto do GLDAS-2.1 demonstrando a correlação entre os valores gerados e os medidos (a) e sua evolução temporal (b).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

É possível que esse resultado tenha influência da quantidade de valores disponibilizados dos produtos do GLDAS-2.1, dos balanços de ondas curtas e longas, durante o dia. Uma vez que as medições do radiômetro são gravadas a cada 5 minutos e o GLDAS-2.1 fornece informações a cada 3 horas. Ou seja, se tem uma maior disponibilidade de medidas do radiômetro do que do GLDAS-2.1, possibilitando captar melhor as variações acontecidas durante o dia. Porém, para se realizar a comparação nesse estudo, ambas as fontes de dados foram processadas para se chegar aos valores diários, dessa forma se obteve uma integral das 8 medidas de cada dia do GLDAS-2.1 e outra das 288 medidas de cada dia do saldo radiômetro. Neste caso, pode-se investigar melhor o comportamento do GLDAS-2.1 em comparação com as medições do radiômetro em uma resolução temporal horária, e analisar os componentes separadamente (balanço de ondas curtas, balanço de ondas longas e saldo de radiação).

Indicativos Estatísticos

Para apontar os modelos que geraram resultados mais satisfatórios, para o universo de dados utilizado neste estudo, foi considerada a melhor relação entre os erros e a correlação com as medidas observacionais, apresentados pelos indicativos estatísticos (MBE, rMBE, RMSE, rRMSE e R). Outro fator muito importante, que também foi levado em consideração, é a quantidade de parâmetros de entrada necessários para gerar o modelo. Pois em muitos casos, onde se tem escassez de medidas climáticas para serem utilizadas, deve-se identificar

o modelo que melhor se encaixa na situação do pesquisador, considerando os fatores pontuados.

Na Tabela 3 podem ser observados os indicativos estatísticos para cada modelo de estimativa em comparação com as medições do saldo de radiação. O modelo que obteve o melhor valor de MBE (mais próximo de zero) foi o de Allen *et al.* (1998), pois apresentou uma diferença de 0,829 MJ m⁻² dia⁻¹ (rMBE de 9,54%). De forma que o modelo com o pior valor de MBE (mais elevado) foi o de Linacre (1968), uma vez que apresentou uma diferença de 4,29 MJ m⁻² dia⁻¹ (rMBE de 49,29%). Já com relação ao RMSE o modelo que apresentou o menor valor (melhor), também, foi o de Allen *et al.* (1998), compreendendo 1,19 MJ m⁻² dia⁻¹ de erro absoluto (rRMSE de 13,66%). Tal que o modelo com o pior RMSE (mais elevado), também, foi o de Linacre (1968), atingindo 4,67 MJ m⁻² dia⁻¹ de erro absoluto (rRMSE de 53,70%). Por fim o produto do GLDAS-2.1 foi o que apresentou o menor R (pior), com valor de 0,852, e o modelo que apresentou maior resultado em R (melhor) foi o de Allen *et al.* (1998), com valor de 0,974.

Tabela 3 - Resultado total dos indicativos estatísticos dos modelos avaliados.

MODELO	MBE (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	rMBE (%)	RMSE (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	rRMSE (%)	R
ALN	0,829	9,537	1,187	13,663	0,974
DP	-1,759	-20,243	2,038	23,453	0,963
PSVN	0,997	11,476	1,511	17,392	0,960
LNC	4,284	49,292	4,667	53,703	0,928
FTS	-2,359	-27,140	3,015	34,699	0,927
GLD	2,224	25,594	3,002	34,548	0,852

Legenda: ALN (Allen *et al.*, 1998); DP (Doorenbos e Pruitt, 1975); PSVN (Pereira, Sentelhas e Villa Nova, 1998); LNC (Linacre, 1968); FTS (Funari, Tarifa e Simpson, 1985) e GLD (Global Land Data Assimilation System/GLDAS-2.1).

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Pode-se perceber, analisando os indicativos estatísticos gerados, que os modelos de estimativa que não possuem a pressão parcial de vapor d'água (ea) como um componente de entrada na equação são os que produziram os maiores erros (MBE e RMSE), apesar de apresentarem uma boa correlação, corroborando com as investigações de Aguiar *et al.* (2011), pontuando que este componente pode influenciar na quantidade de radiação de onda longa atmosférica que é emitida para a superfície terrestre, bem como no balanço de ondas longas, que também é diretamente afetado pelo conteúdo de vapor d'água atmosférico, assim como

pela temperatura do ar e nebulosidade (PEREIRA; SENTELHAS; VILLA NOVA, 1998). Ou seja, não utilizar a pressão parcial de vapor d'água na equação de estimativa do saldo de radiação pode gerar maiores erros, pois não conseguirá expressar devidamente o balanço de ondas longas.

Na Tabela 4 podem ser observados os indicativos estatísticos para cada modelo de estimativa em comparação com as medições do saldo de radiação para cada época do ano (sazonal). Para o verão o modelo que obteve o melhor desempenho foi o de Allen *et al.* (1998), com R de 0,957, e o pior foi o produto GLDAS-2.1, com R de 0,623. Para o outono o melhor resultado foi o do modelo de Doorenbos e Pruitt (1977), com R de 0,969, e o pior foi o produto GLDAS-2.1, com R de 0,785. Para o inverno o modelo que apresentou o melhor desempenho foi o de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998), com R de 0,940, e o pior foi o produto GLDAS-2.1, com R de 0,660. Por fim, para a primavera o melhor resultado foi o do modelo de Doorenbos e Pruitt (1977), com R de 0,953, e o pior foi o do produto GLDAS-2.1, com R de 0,48. Sazonalmente falando o produto GLDAS-2.1 foi o que teve o pior desempenho, superestimando as medições do radiômetro em todas as épocas do ano.

Tabela 4 - Resultado sazonal dos indicadores estatísticos dos modelos avaliados.

MODELO	ESTAÇÃO	MBE (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	rMBE (%)	RMSE (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	rRMSE (%)	R
ALN	Verão	1,068	7,764	1,295	9,41	0,957
	Outono	0,758	7,03	1,206	11,187	0,965
	Inverno	0,993	11,013	1,532	16,988	0,929
	Primavera	0,756	8,266	0,94	10,278	0,938
DP	Verão	-1,102	-8,007	1,326	9,64	0,955
	Outono	-1,388	-12,87	1,645	15,252	0,969
	Inverno	-1,234	-13,691	1,668	18,504	0,933
	Primavera	-1,725	-18,862	1,796	19,639	0,953
PSVN	Verão	0,965	7,016	1,20	8,722	0,953
	Outono	0,283	2,624	1,015	9,416	0,965
	Inverno	0,725	8,037	1,673	18,555	0,940
	Primavera	1,512	16,538	1,746	19,087	0,896
LNC	Verão	4,53	32,925	4,619	33,576	0,954
	Outono	3,133	29,058	3,457	32,062	0,961
	Inverno	3,459	38,364	4,138	45,896	0,936
	Primavera	4,874	53,301	5,086	55,619	0,850
FTS	Verão	-4,955	-36,016	5,086	36,968	0,954
	Outono	-4,018	-37,266	4,313	40	0,961
	Inverno	-2,921	-32,399	3,154	34,978	0,936
	Primavera	-2,322	-25,386	2,479	27,102	0,850
GLD	Verão	1,482	10,773	2,853	20,736	0,623
	Outono	3,751	34,789	4,381	40,629	0,785
	Inverno	2,29	25,402	3,362	37,287	0,660
	Primavera	2,008	21,954	2,522	27,578	0,648

Legenda: ALN (Allen *et al.*, 1998); DP (Doorenbos e Pruitt, 1975); PSVN (Pereira, Sentelhas e Villa Nova, 1998); LNC (Linacre, 1968); FTS (Funari, Tarifa e Simpson, 1985) e GLD (Global Land Data Assimilation System/GLDAS-2.1).

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Pode-se perceber que, apesar do melhor desempenho no verão ser o do modelo de Allen *et al.* (1998), os resultados gerados pela equação de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) foram os que apresentaram o MBE (0,965 MJ m⁻² dia⁻¹) e o RMSE (1,20 MJ m⁻² dia⁻¹) mais satisfatórios, 7,01% e 8,72, respectivamente. Isto ocorreu, provavelmente, pela similaridade climática entre Piracicaba (SP) e Botucatu (SP), conforme destacado anteriormente. Este resultado também aconteceu para o outono, de forma que o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) apresentou um MBE de 0,283 MJ m⁻² dia⁻¹ (2,62%) e um RMSE de 1.015 MJ m⁻² dia⁻¹ (9,42%), apesar de a melhor correlação ter sido a do modelo de Doorenbos e Pruitt

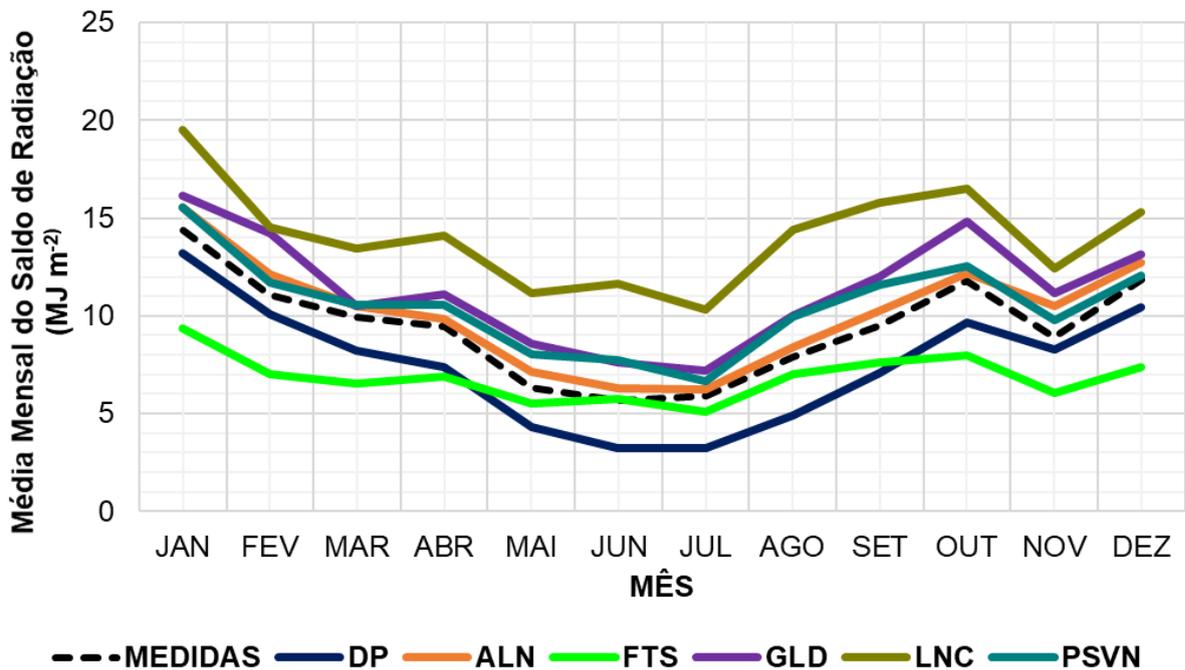
(1977). Desta forma, para o verão e outono pode ser utilizado o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) em relação aos outros, uma vez que apresentou menores erros e uma correlação satisfatória, considerando as medições utilizadas neste estudo (observacionais), bem como possui menos parâmetros de entrada para sua implementação.

Para o inverno, assim como o melhor desempenho, o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) apresentou também o melhor MBE ($0,725 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Desta forma, considerando as medidas observacionais utilizadas, o modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) também gerou os melhores resultados, indicando que possui vantagem em relação aos outros, considerando também a quantidade e a facilidade de se obter os parâmetros de entrada do modelo. Já para a primavera, o modelo de Allen *et al.* (1998) foi o que apresentou o melhor MBE ($0,756 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e RMSE ($0,94 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), apesar de a melhor correlação ter sido a do modelo de Doorenbos e Pruitt (1977). Neste caso Allen *et al.* (1998) teve uma boa correlação e gerou menos erros, porém possui mais parâmetros de entrada nas equações, ou seja, em casos em que se tem a possibilidade de alimentar o modelo com todos os parâmetros necessários ele é o que irá gerar resultados mais satisfatórios.

Análise da Média Mensal

Foram calculadas as médias mensais para os valores estimados do saldo de radiação por cada modelo avaliado. Os valores resultantes foram comparados com a média mensal das medidas do radiômetro (Figura 9). Com esse raciocínio é possível observar, de forma mais acentuada, que a média mensal dos valores gerados pelo modelo de Allen *et al.* (1998), acompanha paralelamente a média mensal das medidas do saldo de radiação, com exceção dos meses de fevereiro e novembro, onde os valores médios do modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998), tiveram um resultado melhor.

Figure 9 - Análise das médias mensais dos valores estimados do saldo de radiação por cada modelo em comparação com as medidas.



Legenda: ALN (Allen *et al.*, 1998); DP (Doorenbos e Pruitt, 1975); PSVN (Pereira, Sentelhas e Villa Nova, 1998); LNC (Linacre, 1968); FTS (Funari, Tarifa e Simpson, 1985) e GLD (Global Land Data Assimilation System/GLDAS-2.1).

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

CONCLUSÃO

O saldo de radiação, componente fundamental para se calcular o balanço hídrico, é resultado do balanço global da radiação, que envolve os balanços de ondas curtas e longas. É um parâmetro importante para estudos de agrometeorologia e para o monitoramento climático, principalmente por possibilitar a modelagem da evapotranspiração de referência (ET_o), permitindo a gestão adequada de recursos em procedimentos de irrigação agrícola. Pôde-se, neste estudo, avaliar diferentes modelos de estimativa do saldo de radiação, inclusive mais antigos, pois possuem menos parâmetros de entrada, podendo auxiliar a comunidade científica em casos em que não se tenham recursos financeiros para aquisição de sensores meteorológicos. Diante do qual o modelo de Allen *et al.* (1998) apresentou o melhor resultado (R de 0,974), com valores satisfatórios. Os valores obtidos pelos produtos do GLDAS-2.1 apresentaram o pior resultado (R de 0,852) de acordo com os indicativos estatísticos, com uma tendência em superestimar (25,59%) o saldo de radiação.

Havendo a necessidade de aplicar os modelos sazonalmente, é recomendada a utilização do modelo de Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) para o verão, outono e inverno, bem como o de Allen *et al.* (1998) para a primavera, para que se possa ter melhores resultados sazonais, considerando os erros, a correlação e a quantidade de parâmetros de entrada. Em casos em que não se tenha a necessidade de trabalhar com os modelos sazonalmente, é recomendada a utilização do modelo de Allen *et al.* (1998), visto o seu resultado para o ano todo e seguindo a recomendação do relatório 56 da FAO/UN. Pode-se avaliar em futuros estudos o comportamento desses mesmos modelos para a partição temporal horária, de forma também a se investigar o desempenho de cada componente do saldo de radiação separadamente (balanço de ondas curtas, balanço de ondas longas e saldo de radiação).

REFERÊNCIAS

AGUIAR, L. J. G. **Balanço de radiação em áreas de floresta e de pastagem em Rondônia**. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/5220>. Acesso em: 19 jan. 2022.

AGUIAR, L. J. G. *et al.* Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 215-224, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/Tv8Vw43CY7GKNNWsRztTt8d/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 19 jan. 2022.

ANIS, M. S. *et al.* Generalized models for estimation of global solar radiation based on sunshine duration and detailed comparison with the existing: A case study for India. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 31, p. 179-198, 2019.

AZEVEDO, P. V. *et al.* Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 5, n. 1, p. 403-410, 1990.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CNR1 Net Radiometer: instruction manual**. 2011. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cnr1.pdf>. Acesso em: 19 jan. 2022.

DAS, A.; PARK, J.; PARK, J. Estimation of available global solar radiation using sunshine duration over South Korea. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 134, p. 22-29, 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 1977. Disponível em: <https://www.posmet.ufv.br/wp-content/uploads/2015/08/LIVRO-385->

Doorenbos-e-Pruitt-Guidelines-for-predicting-crop-water-requirements.pdf. Acesso em: 19 jan. 2022.

GOOGLE EARTH ENGINE. **GLDAS-2.1: Global Land Data Assimilation System**. 2020. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NASA_GLDAS_V021_NOAH_G025_T3H. Acesso em: 19 Fev. 2020.

EL-METWALLY, M. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt. **Atmospheric Research**, v. 69, p. 217-239, 2004.

FLUMIGNAN, D. L. *et al.* Empirical methods for estimating reference surface net radiation from solar radiation. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 1, p. 32-37. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p32-37/2018>. Acesso em: 19 jan. 2022.

FUNARI, F. L.; TARIFA, J. R.; SIMPSON, J. G. P. Estudo comparativo entre as equações de Brunt-Penman e Linacre (1968), para estimativa da radiação líquida. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA - CBAGRO, 6., 1985, Londrina. **Anais [...]**. Londrina, 1985. 77-82.

LINACRE, E. T. Estimating the net-radiation flux. **Agricultural Meteorology** v. 5, p. 49-63, 1968.

LONG, C. N.; DUTTON, E. G. **BSRN global network recommended quality control tests**. BSRN Technical Report. 2002. Disponível em: https://epic.awi.de/id/eprint/30083/1/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf. Acesso em: 19 jan. 2022.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **README document for NASA GLDAS version 2 data products**. 2021. Disponível em: https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS_NOAH025_3H.2.1/doc/README_GLDAS2.pdf. Acesso em: 22 out. 2021.

PAIVA, C. M. **Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA - AVHRR**. 2005. Tese (Doutorado em Meteorologia por Satélite) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society a Mathematical, Physical and Engineering Sciences**. p. 120-145, 1948.

PEREIRA, A. B.; SENTELHA, P. C.; NOVA, N. A. V. Estimativa de balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 6, n. 2, p. 201-206, 1998.

PEREIRA, R. A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007. Guia de estudo. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf. Acesso em 19 jan. 2022.

RINCÓN, A. *et al.* Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018.

RODELL, M. *et al.* The global land data assimilation system. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J. Estimating hourly net radiation for leaf wetness duration using the Penman-Monteith equation. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 91, n. 1, p. 205-215, 2008.

SENTELHAS, P. C.; NASCIMENTO, A.L.C. Variação sazonal da relação entre o saldo de radiação e a irradiância solar global. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.18, n. 1, p. 71-77, 2003.

SILVA, M. B. P. *et al.* Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 26, p. 11-23, 2017.

SOUZA FILHO, J. D. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; COHEN, J. C. P.; ROCHA, E. J. P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3b, p. 318-330, 2006.

TREGENZA, P. R. *et al.* **Guide to recommended practice of daylight measurement**. 1994. Disponível em: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:103820>. Acesso em: 06 nov. 2018.

WORLD RADIATION MONITORING CENTER. **Baseline surface radiation network: quality checks**. 2002. Disponível em: https://bsrn.awi.de/fileadmin/user_upload/bsrn.awi.de/Publications/BSRN_recommended_QC_tests_V2.pdf acesso em: 09 de nov. de 2019.