



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE METEOROLOGIA

**ALFREDO CESAR GONÇALVES JIMENES**

**USO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO SOLAR EM  
AMBIENTE DE FLORESTA TROPICAL NA AMAZÔNIA**

**Belém-PA  
MARÇO – 2022**

**ALFREDO CESAR GONÇALVES JIMENES**

**USO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO SOLAR EM  
AMBIENTE DE FLORESTA TROPICAL NA AMAZÔNIA**

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à Faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, para obtenção do grau Bacharel em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia

Linha de pesquisa: Agrometeorologia

Orientador: Prof. João de Athaydes Silva Junior

Belém-PA

2022

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**

**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo autor**

---

J61u Jimenes, Alfredo Cesar Gonçalves

Uso de modelos para estimativa do saldo de radiação solar em ambiente de floresta na Amazônia/ Alfredo Cesar Gonçalves Jimenes. – 2022.

33 f. : il. color.

Orientador: João de Athaydes Silva Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, 2022.

1. Modelo de estimativa. 2. Radiação solar. 3. Floresta. I. Título.

CDD 551.5271

---

**ALFREDO CESAR GONÇALVES JIMENES**

**USO DE MODELOS PARA ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO SOLAR EM  
AMBIENTE DE FLORESTA TROPICAL NA AMAZÔNIA**

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado à  
Faculdade de Meteorologia do Instituto de  
Geociências da Universidade Federal do Pará -  
UFPA, para obtenção do grau de Bacharel em  
Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia  
Linha de pesquisa: Agrometeorologia

Data de aprovação: 25 / 03 / 2022

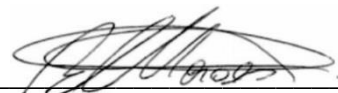
Conceito: BOM

**Banca Examinadora**



---

Prof. João de Athaydes Silva Junior - Orientador  
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. Bergson Cavalcanti de Moraes - Membro  
Doutor em Agronomia  
Universidade Federal do Pará



---

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro  
Doutor em Meteorologia  
Universidade Federal do Pará

Dedico este trabalho aos meus pais, que fizeram o meu estudo ser possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por ter iluminado o meu caminho, e me dado força para continuar estudando nos momentos de cansaço, e sensatez para fazer o que deveria ser feito.

Aos meus pais, pelo esforço em tornar possível que eu me mantivesse estudando, mesmo nos momentos difíceis, durante todos esses anos de faculdade.

Ao meu orientador e professor, João de Athaydes, pela sua orientação, apoio, paciência e disposição a responder todas minhas dúvidas, mesmo as mais simples que fossem.

Aos meus familiares e amigos, meus irmãos Adriano e Anderson, por terem me apoiado, e também a minha cunhada Naiane pelos conselhos e por ter sido quem me incentivou a começar o curso.

Aos professores da Faculdade de Meteorologia da Universidade Federal do Pará, que contribuíram para minha formação como Meteorologista, em especial ao professor Carvalho pelos seus grandes ensinamentos.

A todos os colegas que conheci no curso de Meteorologia, em especial a minha turma de 2017 por terem me acompanhado nessa trajetória.

A todos que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

*"Simples pode ser mais fácil do que o complexo, você tem que trabalhar duro para obter seu pensamento limpo para torna-lo simples".*

*(Steve Jobs).*

## RESUMO

O presente trabalho tem como área de estudo uma amostra da Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã, localizada no município de Melgaço, estado do Pará, no leste da Amazônia. As informações meteorológicas foram obtidas do projeto Estudo da Seca da Floresta (ESECAFLOR). A área do experimento está situada nas coordenadas  $1^{\circ} 44' 12.6942''$  S de latitude, e  $51^{\circ} 27' 43.0049''$  W de longitude, aproximadamente, a 15 m acima do nível médio do mar, onde encontra-se uma estação meteorológica automática, instalada junto ao topo de uma torre micrometeorológica de 40 m de altura entre as árvores. Foram obtidos por sensores, dados de radiação solar global, temperatura do ar e umidade relativa e saldo de radiação. Os registros foram feitos em intervalos de 30 minutos e armazenados em um datalogger, no período de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2019. A partir dessas informações foram utilizados os métodos de Allen e Brunt-Penman para estimar o saldo de radiação e por meio de análise estatística determinar o método com melhor aplicação na área de estudo, bem como aquele que apresentou a maior correlação entre o medido e estimado.

**Palavras-chave:** modelo de estimativa; radiação solar; floresta.

## ABSTRACT

The present work has as its study area a sample of the National Forest of Caxiuanã, located in the municipality of Melgaço, state of Pará, in the east of the Amazon. The meteorological information was obtained from the ESECAFLOR project. The experiment area is located at coordinates  $1^{\circ} 44' 12.6942''$  S latitude, and  $51^{\circ} 27' 43.0049''$  W longitude, approximately 15 m above the mean sea level, where there is an automatic meteorological station, installed next to the top of a 40 m high micrometeorological tower among the trees. Data on global solar radiation, air temperature and relative humidity and net radiation were obtained by sensors. The records were made at 30-minute intervals and stored in a datalogger, from January 1 to December 31, 2019. Based on this information, the Allen and Brunt-Penman methods were used to estimate the net radiation and for means of statistical analysis to determine the method with the best application in the study area, as well as the one that presented the highest correlation between the measured and the estimated.

**Key words:** estimation model; solar radiation; forest.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquematização do Balanço de Radiação em Superfícies Vegetadas. ...	16
Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 3 – Comparação entre $R_n$ estimado e medido pelo método de Allen, (a) utilizando $R_s$ medido pelo piranômetro, (b) $R_s$ estimado pela equação 3, e pelo método de Brunt-Penman, (c) utilizando $R_s$ medido pelo piranômetro, e (d) $R_s$ estimado pela equação 3.....	26
Figura 4 – Comparação entre $R_n$ estimado e medido pelo método de Allen, na (a) estação chuvosa, (b) estação seca, e também pelo método de Brunt-Penman na (c) estação chuvosa (d) e na estação seca. ....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ )...24	24
Tabela 2 – Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa do saldo de radiação pelo índice "c".....24	24
Tabela 3 – Avaliação dos métodos de estimativa do saldo de radiação no período anual.....28	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ECFPn            Estação Científica Ferreira Penna

ESECAFLOR    Estudo da Seca da Floresta

FLONA           Floresta Nacional

GEE             Gases do Efeito Estufa

INMET          Instituto Nacional de Meteorologia

MPEG          Museu Paraense Emílio Goeldi

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$	Albedo ou coeficiente de reflexão
$\omega_s$	Ângulo horário do pôr do sol
$\omega_s$	Ângulo horário do pôr do sol
$r$	Coeficiente de correlação
$c$	Confiança ou desempenho
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$G_{sc}$	Constante solar
$\delta$	Declinação solar
$d_r$	Distância Terra-Sol relativa inversa
$\varphi$	Latitude
$O$	Média dos valores observados
$e_a$	Pressão de vapor atual
$e$	Pressão parcial de vapor
$R_s/R_{so}$	Radiação de onda curta relativa limitada
$R_{a,reg}$	Radiação no topo da atmosfera de uma estação próxima da região
$R_{s,reg}$	Radiação solar de onda curta de uma estação próxima da região.
$n/N$	Razão de insolação
$T$	Temperatura do ar
$K$	Temperatura em Kelvin
$T_{máx}$	Temperatura máxima em Kelvin
$T_{mín}$	Temperatura mínima
$T_{mín}$	Temperatura mínima em Kelvin
$P_i$	Valor estimado
$O_i$	Valor observado
$r^2$	Coeficiente de determinação
$d$	Dia
$d$	Exatidão
$h$	Hora

J	Dia juliano
<i>J</i>	Joule
M	Mega
m	Metros
min	Minuto
mm	Milímetros
<i>N</i>	Fotoperíodo
<i>n</i>	Insolação
nm	Nanômetros
°C	Graus Celsius
Pa	Pascal
Q <sub>atm</sub>	Radiação emitida pela atmosfera
Q <sub>g</sub>	Radiação solar na superfície
Q <sub>o</sub>	Radiação solar no topo da atmosfera
Q <sub>sup</sub>	Radiação emitida pela superfície
R <sub>a</sub>	Radiação no topo da atmosfera
rad	Radianos
R <sub>n</sub>	Saldo de Radiação ou Radiação líquida
R <sub>nl</sub>	Radiação de onda longa líquida
R <sub>ns</sub>	Radiação de onda curta líquida
rQ <sub>g</sub>	Parcela da radiação solar refletida pela superfície
R <sub>s</sub>	Radiação solar de onda curta
R <sub>so</sub>	Radiação de céu limpo calculada
T <sub>d</sub>	Temperatura do ponto de orvalho
W	Watts
z	Altura em relação ao nível médio do mar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>17</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Método de Allen</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Método de Brunt-Penman</b> .....	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Metodologia de avaliação</b> .....	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Estimativa anual</b> .....	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Estimativa sazonal</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Avaliação dos métodos</b> .....	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>31</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é um componente astronômico capaz de influenciar em todas as variáveis meteorológicas direta ou indiretamente, impactando nos mecanismos terrestres como o ciclo hidrológico, desenvolvimento de plantas e termodinâmica da atmosfera em suas diferentes escalas. A radiação solar que chega na superfície terrestre é constituída majoritariamente de ondas curtas, possuindo comprimentos de onda menores que 3.000 nm, e possui uma distribuição espacial e sazonal responsável por grande parte dos fenômenos meteorológicos. Parte dessa energia passa por processos de atenuação, é refletida de volta para o espaço pelas nuvens, pelos aerossóis e pela superfície terrestre, e o quantitativo restante dessa energia que permanece é conhecido como Saldo de Radiação ( $R_n$ ) ou radiação líquida (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

A relação entre as frações de energia solar que chegam ao planeta e as que saem chamamos de balanço de radiação, o  $R_n$ , é um dos componentes desse balanço, e representa a energia disponível na superfície aos processos de aquecimento do ar e do solo, à fotossíntese e calor latente (MACHADO; GALVÍNCIO; OLIVEIRA, 2010). Para cada instante há um balanço de radiação que é característico de cada superfície como por exemplo solo coberto por vegetação de floresta ou de pasto, superfície líquida, ou por qualquer outro material.

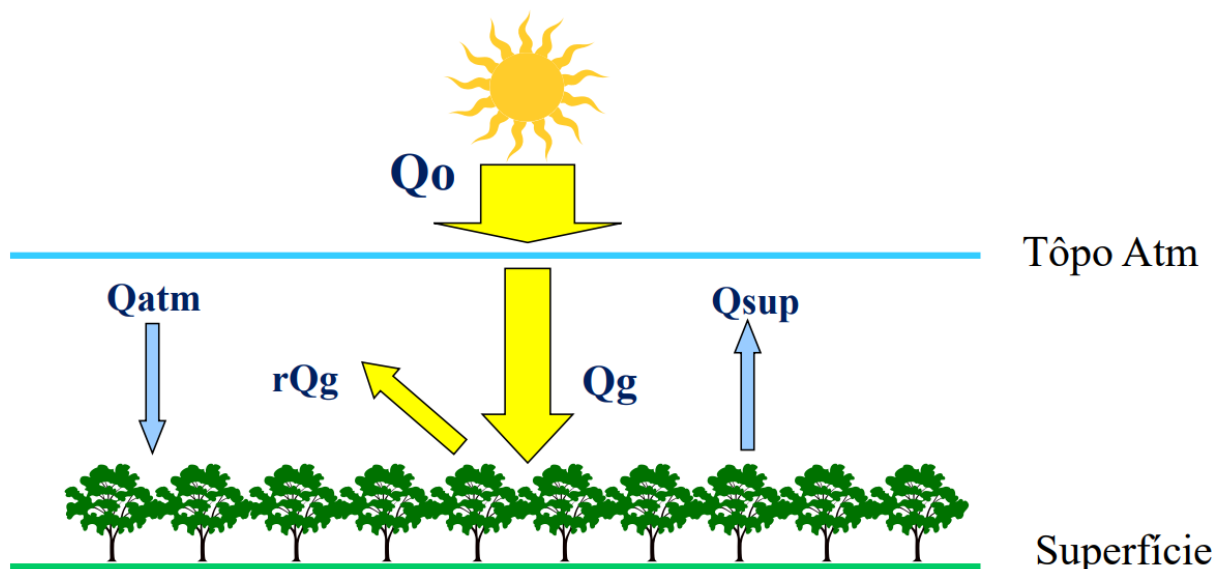
Segundo Allen et al. (1998), o  $R_n$  é a diferença entre a radiação que entra e que sai nos comprimentos de onda curtos e longos, ou seja, é o equilíbrio entre a energia absorvida, refletida e emitida pela superfície da terra ou a diferença entre a radiação de onda curta líquida de entrada ( $R_{ns}$ ) e a radiação de onda longa líquida de saída ( $R_{nl}$ ), sendo, normalmente o valor do  $R_n$  positivo durante o dia e negativo durante a noite, sendo o valor total diário quase sempre positivo.

A medição do  $R_n$  pode ser feita por meio de instrumentos conhecidos como saldo-radiômetro, que é constituído basicamente por dois sensores dispostos horizontalmente, sendo um voltado para a superfície para receber a radiação de ondas longas e o outro no sentido oposto para receber a radiação solar de ondas curtas oriunda do sol (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A partir da esquematização do balanço de radiação em superfícies vegetadas feita por Sentelhas e Angelocci (2012), temos que na figura 1,  $Q_0$  é a radiação solar no topo da atmosfera,  $Q_g$  é a radiação solar na superfície,  $rQ_g$  é a

parcela da radiação solar refletida pela superfície, onde  $r$  é o albedo,  $Q_{atm}$  é a radiação emitida pela atmosfera,  $Q_{sup}$  é a radiação emitida pela superfície.

Figura 1 – Esquemática do Balanço de Radiação em Superfícies Vegetadas.



Fonte: Sentelhas e Angelocci (2012).

A energia solar pode ser captada por placas fotovoltaicas e transformada em energia elétrica para usos diversos, essa energia pode ser gerada a qualquer momento em que houver luz do sol seja direta ou indireta, portanto é uma fonte de energia renovável e inesgotável, devido à constante renovação da luz solar. Outra característica é a pouca emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) comparado as fontes não-renováveis (ALVES, 2019). Portanto, uma fonte de energia limpa, tendo em vista que a quantidade de poluição produzida está relacionada principalmente a produção e descarte das placas solares, que é relativamente pequena comparada as fontes fósseis.

Portanto, estudos sobre a radiação solar são de fundamental importância, tendo em vista sua influência na natureza, e na vida humana, além de ser uma fonte de energia renovável. Dessa forma, este estudo foi feito para desenvolver o conhecimento científico, proporcionando dados de estimativas de equações com soluções particulares para a área de estudo, fornecendo uma análise de 2 modelos de estimativa e seus respectivos desempenhos.

## **1.1 Justificativa**

Métodos de estimativas de radiação são importantes em situações em que não há possibilidade de se fazer a medição direta da variável solar de interesse, em estações distantes da cidade, onde por motivos antrópicos ou naturais os sensores são desativados ou passam a operar com mal funcionamento, mas que ainda possuem outras informações meteorológicas suficientes para se estimar a radiação solar. É importante ressaltar que apesar de um instrumento que meça o saldo de radiação tenha um resultado melhor do que as estimativas calculadas, os modelos ainda assim são uma boa opção tendo em vista o alto valor de mercado de um saldo-radiômetro.

## **1.2 Objetivos**

Avaliar modelos usados para estimativa do saldo de radiação solar e comparar com medições feitas por instrumentais.

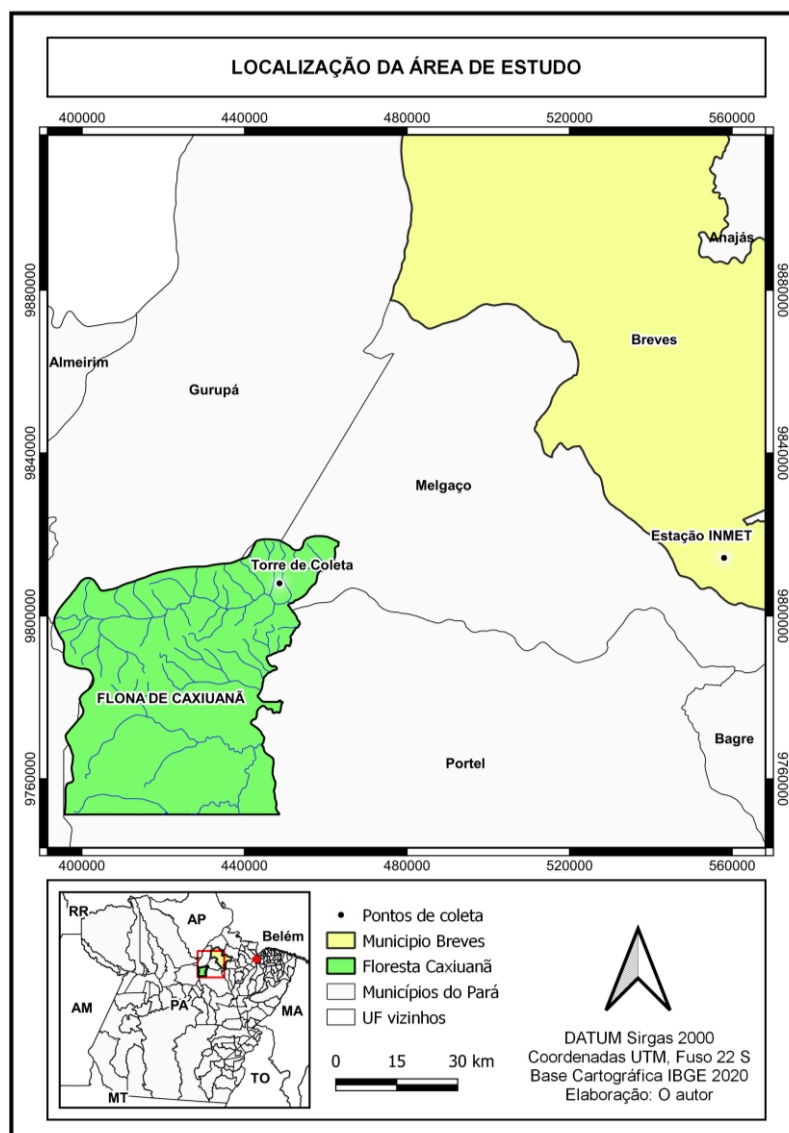
## **1.3 Objetivos específicos**

- Analisar a sazonalidade do saldo de radiação medido e estimado.
- Avaliar os dados estimados com os dados medidos de saldo de radiação.
- Avaliar a confiança dos modelos de estimativa de saldo de radiação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho tem como área de estudo a Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã, localizada no município de Melgaço, estado do Pará, no leste da Amazônia, figura 2. A floresta é extensa (33.000 hectares), representativa de um ecossistema tropical e praticamente intocada, sendo reserva desde meados da década de 1970, e está classificada como sendo de terra firme, com 35 m de altura média do dossel (LISBOA; FERRAZ, 1999 apud CARSWELL, 2002).

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: O Autor.

As informações meteorológicas foram obtidas do projeto Estudo da Seca da Floresta (ESECAFLOR) que é desenvolvido nas proximidades da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), localizada na FLONA de Caxiuanã e administrada pelo Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). A área do experimento está situada nas coordenadas  $1^{\circ} 44' 12.6942''$  S de latitude, e  $51^{\circ} 27' 43.0049''$  W de longitude, aproximadamente, a 15 m acima do nível médio do mar. (BINKS, 2016). A descrição com mais detalhes sobre a estrutura do experimento já foi descrita por Oliveira (2014).

No que se refere a climatologia do local, a umidade relativa do ar média anual é cerca de 80%, a temperatura média anual do ar é de  $25,7 \pm 0,8$  °C e a precipitação média anual é de  $2.272 \pm 193$  mm, a média anual da radiação solar global é de  $286,1 \text{ W.m}^{-2}$ , e brilho solar com valores maiores que 2.100 horas no ano. (MORAES et al., 1997; SILVA JÚNIOR et al., 2013; ROWLAND et al., 2015; apud COSTA, 2016). Sobre os regimes pluviométricos, temos o período chuvoso na ECFPn ocorrendo entre dezembro e maio (1.871,2 mm, representando 84,6% do total anual) e o período seco, entre junho e novembro (340,4 mm, representando 15,4% do total anual) (MOLION, 1987; FISCH et al., 1996, apud COSTA, 2009).

Também foram utilizados dados da estação meteorológica de Breves, mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada nas coordenadas  $1^{\circ} 40' 48.997''$  S de latitude, e  $50^{\circ} 28' 40.922''$  W de longitude, com altitude de 9,8 m, e atualmente encontra-se operante. os dados de Radiação de onda curta (Rs) foram obtidos a partir do piranômetro da estação, e Radiação no topo da atmosfera (Ra) pela Equação 4, o período de dados foi o mesmo do ano de referência 2019, excluindo os dias nos quais a estação na FLONA de Caxiuanã esteve inoperante.

Os dados meteorológicos foram obtidos por sensores de uma estação meteorológica automática, instalada junto ao topo de uma torre micrometeorológica de 40 m de altura, localizada em uma área de floresta tropical preservada. Durante o período de estudo, esses dados foram coletados a cada 30 minutos diariamente ininterruptamente, com exceção dos dias: 05 de março, e 20 a 22 de agosto, que foram os dias nos quais a estação esteve inoperante.

Em relação aos equipamentos, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, um datalogger de medição e controle modelo CR-1000 (Campbell Scientific, Inc. Logan, Utah, EUA) e os sensores utilizados para mensurar os elementos meteorológicos foram: piranômetro, modelo CM3 (Kipp & Zonen), para radiação

solar global; Sonda, modelo HMP155AL (Vaisala), para temperatura e umidade relativa do ar e Saldo radiômetro modelo NR-LITE2-L (Kipp & Zonen), para saldo de radiação. Os registros foram feitos em intervalos de 30 minutos e armazenados no datalogger, desde 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2019.

## 2.1 Método de Allen

O primeiro método para estimativa do  $R_n$  são as equações propostas por Allen et al., (1998), no qual a Equação 1 representa um balanço dado por:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (1)$$

Onde o  $R_n$  é o saldo de radiação calculado como a diferença entre a radiação de onda curta líquida que entra ( $R_{ns}$ ) e a radiação de onda longa líquida que sai ( $R_{nl}$ ).

A estimativa da radiação de onda curta líquida ( $R_{ns}$ ) foi dada pela Equação 2:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (2)$$

Onde,  $R_{ns}$  é a radiação líquida de ondas curtas ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ );  $\alpha$  é o albedo ou coeficiente de reflexão do dossel (adimensional);  $R_s$  a radiação solar incidente ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ ).

Culf, Fish e Hodnett (1994), em seu estudo sobre albedo em regiões de floresta tropical, definiram o albedo como a razão entre a radiação solar refletida e a radiação solar recebida, encontraram o valor médio anual igual a 0,134 para três sítios florestais em diferentes regiões da Amazônia, então, no presente estudo optou-se pelo valor de albedo médio anual de 0,13.

Devido à ausência de dados de insolação ( $n$ ), foi utilizado um método alternativo para a estimativa de  $R_s$  do local de estudo, o método consiste basicamente em se obter dados de  $R_s$  de uma estação meteorológica próxima, com características climáticas semelhantes ao local do estudo, e que não se distanciem mais que 50 km em distância latitudinal, além de estimarmos o  $R_a$  usando a equação 4. A estação escolhida foi a de Breves, por ser a estação do INMET mais próxima do local de estudo, e ser a que melhor corresponde com os requisitos da técnica. A partir dessas informações utilizamos a Equação 3, que representa ( $R_s$ ) dada por:

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a \quad (3)$$

Onde  $R_s$  é a radiação solar de onda curta;  $R_{s,reg}$  é a radiação solar de onda curta de uma estação próxima da região;  $R_{a,reg}$  é a radiação no topo da atmosfera de uma estação próxima da região e  $R_a$  é a radiação no topo da atmosfera.

Os dados de  $R_a$  foram estimados a partir da Equação 4 abaixo:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4)$$

Em que,  $R_a$  é a radiação no topo da atmosfera ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ );  $G_{sc}$  é a constante solar ( $MJ m^{-2} min^{-1}$ );  $d_r$  é a distância Terra-Sol relativa inversa (rad);  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr do sol (rad);  $\varphi$  é a latitude (rad);  $\delta$  é a declinação solar (rad).

As variáveis  $d_r$ ,  $\omega_s$ ,  $\delta$  foram estimadas a partir das equações 5, 6 e 7, respectivamente:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (6)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (7)$$

Onde,  $J$  é o dia juliano.

A estimativa de  $R_{nl}$  é baseada na lei de Stefan-Boltzmann, mas esse procedimento é um pouco complicado devido aos fluxos de energia que deixam a superfície e os constituintes que absorvem e emitem radiação de ondas longas, como o vapor d'água, nuvens, dióxido de carbono e os aerossóis. Dessa forma, temos como corrigir a questão da importância da umidade e da nebulosidade na lei de Stefan-Boltzmann, e se pressupõe que as demais concentrações dos outros constituintes absorvedores são constantes. Então temos:

$$R_{nl} = \sigma \cdot \left[ \frac{(T_{máx}, K^4 + T_{mín}, K^4)}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot (1,35 \cdot \left(\frac{R_s}{R_{so}}\right) - 0,35) \quad (8)$$

Onde,  $R_{nl}$  é a radiação líquida de ondas longas ( $MJ/m^2.d$ );  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $4,903 \cdot 10^{-9} (MJ/K^4 .m^2 .d)$ ;  $T_{máx}$ ,  $K$  é a temperatura máxima em Kelvin durante o período de 24 horas (K);  $T_{mín}$ ,  $K$  é a temperatura mínima em Kelvin durante o período de 24 horas (K);  $e_a$  é a pressão de vapor atual ( $kPa$ );  $R_s/R_{so}$  é a radiação de onda curta relativa limitada a  $\leq 1$  (adimensional);  $R_s$  é a radiação solar medida ou calculada ( $MJ/m^2.d$ );  $R_{so}$  é a radiação de céu limpo calculada ( $MJ/m^2.d$ ). A estimativa de  $R_s$  foi feita segundo a Equação 4, vista anteriormente. As variáveis  $e_a$ ,  $R_{so}$  foram calculadas a partir das equações 9 e 10 a seguir:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (9)$$

Onde,  $R_a$  é estimado pela Equação 4, e  $z$  é a altura em relação ao nível médio do mar (m).

Devido a falta de dados de temperatura do ponto de orvalho ( $T_d$ ) para o cálculo de  $e_a$ , optou-se por utilizar a temperatura mínima, assumindo que  $T_d$  está próxima da  $T_{mín}$  ao nascer do sol quando a temperatura do ar está próxima de  $T_{mín}$  e o ar se encontra praticamente saturado e a umidade relativa é próxima de 100%. Então, considerando  $T_{mín} = T_d$ , temos:

$$e_a = e^0(T_{mín}) = 0.611 \exp \left[ \frac{17.27 T_{mín}}{T_{mín} + 237.3} \right] \quad (10)$$

Onde,  $e_a$  é a pressão de vapor atual ( $kPa$ );  $T_{mín}$  é a temperatura mínima ( $^{\circ}C$ ).

## 2.2 Método de Brunt-Penman

O segundo modelo utilizado para estimativa do  $R_n$  é a equação de Brunt-Penman, que foi utilizada por Pereira, Sentelhas e Villa Nova (1998) representada por:

$$R_n = R_s \cdot (1 - r) - T^4 \cdot \sigma \cdot (0.56 - 0.09 \cdot \sqrt{e}) \cdot (0.1 + 0.9 \cdot \frac{n}{N}) \quad (11)$$

Onde,  $R_s$  é a radiação de onda curta ( $MJ m^{-2} d^{-1}$ );  $r$  é o albedo da superfície (adimensional);  $e$  a pressão parcial de vapor ( $kPa$ );  $\sigma$  a constante de Stefan-

Boltzmann =  $5,67 \times 10^{-8} (Wm^{-2}K^{-4})$ ;  $T$  é a temperatura absoluta do ar (K);  $n$  é a insolação (h);  $N$  é o fotoperíodo (h);  $n/N$  é chamado de razão de insolação (adimensional). A variável  $N$  foi obtida pela Equação 12:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (12)$$

Onde,  $\omega_s$  é o ângulo horário do pôr do sol (rad).

### 2.3 Metodologia de avaliação

Para avaliação dos métodos, foi aplicado a metodologia utilizada por Camargo e Sentelhas (1997), onde se leva em consideração: a precisão através do coeficiente de correlação “ $r$ ”; a exatidão por meio do índice “ $d$ ” de Willmott et al. (1985), e a confiança ou desempenho “ $c$ ”. Os valores do índice variam de 0 a 1, no qual 1 significa concordância perfeita e 0 que não temos concordância.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (13)$$

Onde,  $P_i$  é o valor estimado;  $O_i$  o valor observado; e  $O$  a média dos valores observados.

O índice de confiança ou desempenho “ $c$ ” que demonstra o desempenho dos métodos, é dado pelo produto dos índices de precisão “ $r$ ” e de exatidão “ $d$ ” é dado pela equação:

$$c = r.d \quad (14)$$

Onde,  $r$  é o coeficiente de correlação; e  $d$  a exatidão.

Os resultados dos coeficientes de correlação encontrados foram classificados de acordo com Hopkins (2002) (Tabela 1). Para endossar à análise dos índices estatísticos foram utilizados os critérios de interpretação que se encontram na Tabela 2.

Tabela 1 – Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ).

Coeficiente de correlação ( $r$ )	Classificação
0,0 a 0,1	Trivial
0,1 a 0,3	Pequeno
0,3 a 0,5	Médio
0,5 a 0,7	Grande
0,7 a 0,9	Muito grande
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: Hopkins (2002).

Tabela 2 – Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa do saldo de radiação pelo índice "c".

Índice de desempenho (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq$ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

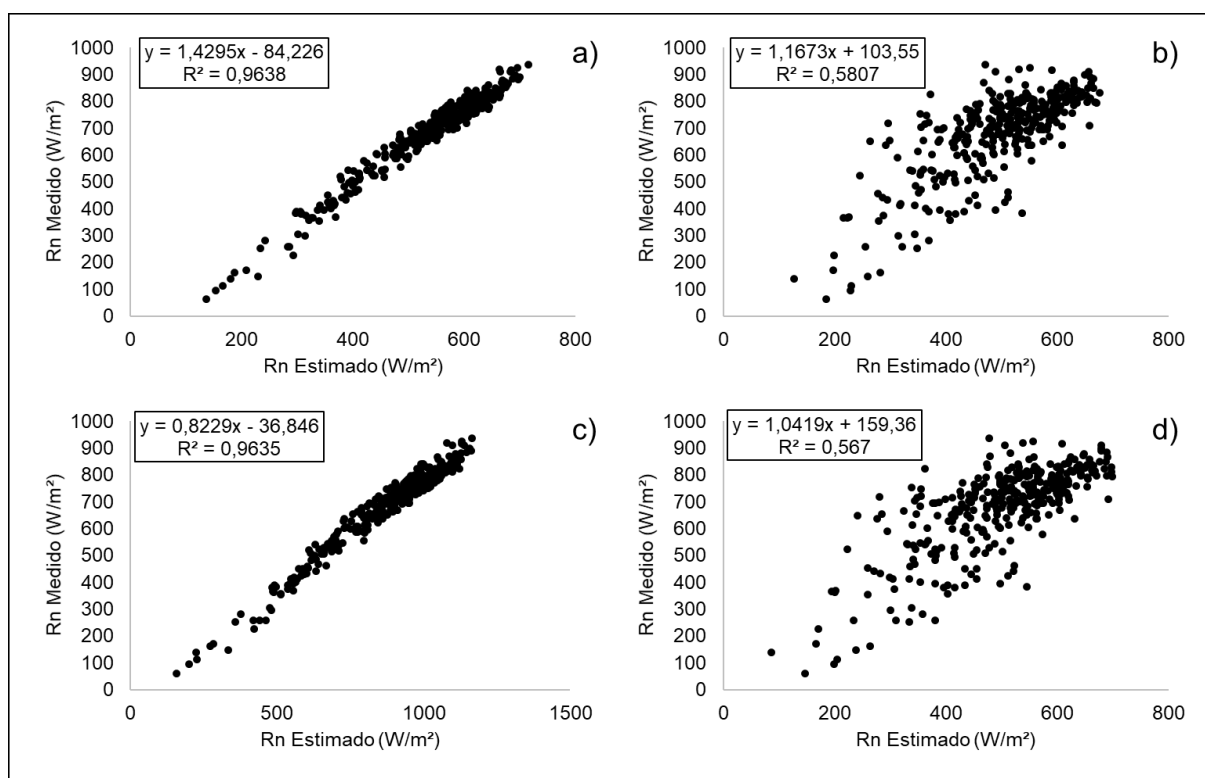
### 3 RESULTADOS

O resultado das metodologias de estimativa do saldo de radiação propostas, em comparação com as medições feitas pelo saldo radiômetro, para as condições climáticas da localidade e período estudado, foram descritos adiante. A figura 3, mostra a comparação entre os saldos de radiação medidos e estimados, pelos 2 métodos utilizados na pesquisa, onde é possível observar diferentes resultados para o mesmo método alterando apenas o  $R_s$  utilizado.

#### 3.1 Estimativa anual

Nas figuras 3a e 3b, temos a comparação entre o  $R_n$  medido e estimado pelo método de Brunt-Penman. Na figura 3a observamos uma correlação de 0,96, que significa que as variáveis estão muito correlacionadas, ou seja, a variação do estimado acompanha bem a mudança real do  $R_n$  medido, logo, sendo uma boa opção para o caso de termos o  $R_s$  medido e querermos o saldo de radiação, enquanto que no caso de não ser possível o acesso a informações de  $R_s$  de uma estação com piranômetro, teríamos que utilizar métodos de estimativa de  $R_s$ .

Figura 3 – Comparação entre Rn estimado e medido pelo método de Allen, (a) utilizando Rs medido pelo piranômetro, (b) Rs estimado pela equação 3, e pelo método de Brunt-Penman, (c) utilizando Rs medido pelo piranômetro, e (d) Rs estimado pela equação 3.



Fonte: O autor.

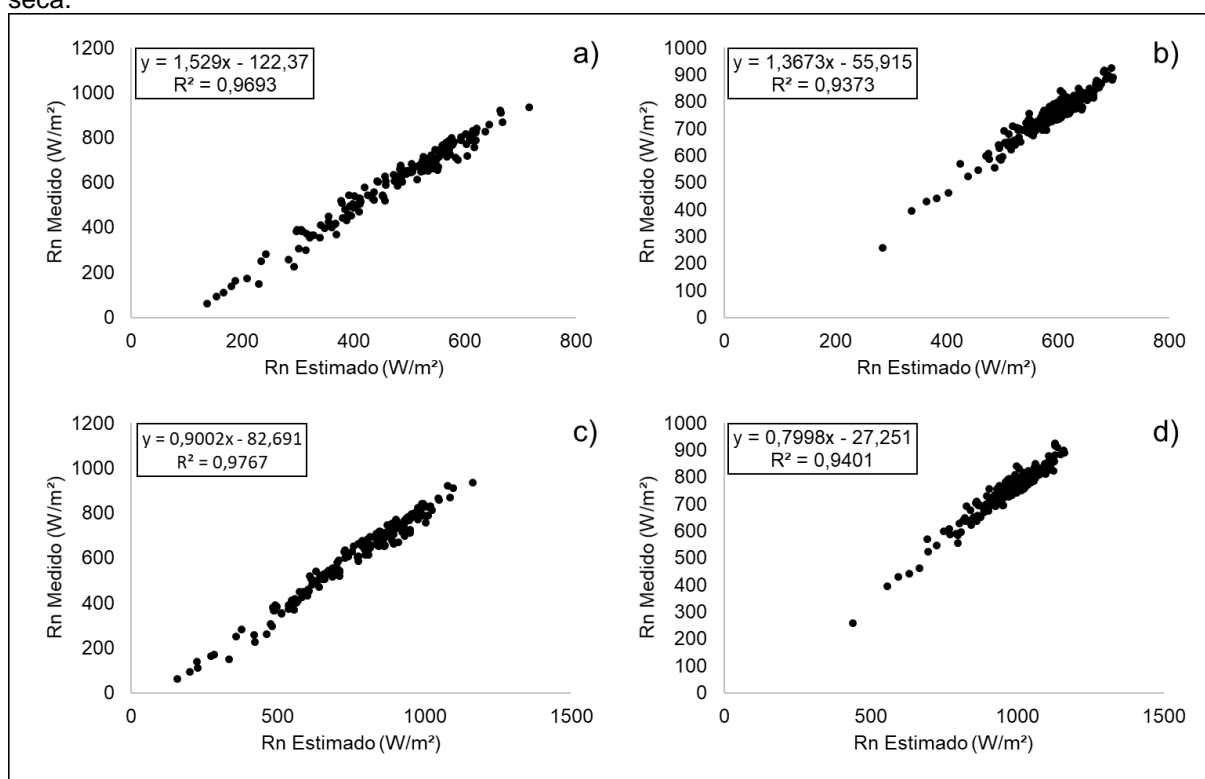
Considerando o caso de não termos dados de Rs na estação, utilizamos métodos de estimativa de Rs como mostrado na figura 3b, que mostra o método de Allen, usando as estimativas de Rs comparadas a uma estação do INMET mais próxima, e obtivemos uma correlação de 0,58, que revelou ser um resultado não muito satisfatório considerando que a estação de referência possui uma área urbanizada diferente da área de estudo que é cercada de floresta.

Nas figuras 3c e 3d, temos a comparação entre o Rn medido e estimado pelo método de Brunt-Penman. Na figura 3c, temos o método utilizando o Rs medido na estação, onde vemos que a correlação foi de 0,96, enquanto que para o mesmo método utilizando Rs estimado a correlação foi igual a 0,56, como mostra a figura 3d. Este resultado nos mostrou que as sucessivas estimativas feitas acabaram por influenciar significativamente nas correlações.

### 3.2 Estimativa sazonal

Com base nos resultados obtidos citados anteriormente, foi feita a análise sazonal vista na figura 4, onde temos a comparação entre os métodos de estimativa de Rn feitos com Rs do piranômetro para o regime chuvoso e seco, entretanto foram utilizados somente os dados de Rs medidos pelo piranômetro, ao invés de estima-lo, por ter sido o melhor resultado.

Figura 4 – Comparação entre Rn estimado e medido pelo método de Allen, na (a) estação chuvosa, (b) estação seca, e também pelo método de Brunt-Penman na (c) estação chuvosa (d) e na estação seca.



Fonte: O autor.

Podemos observar que na figura 4a a correlação entre o Rn medido e estimado pelo método de Allen foi de 0,96 no período chuvoso e igual a 0,93 no período seco, como pode ser visto na figura 4b, ambas podem ser classificadas como “Quase Perfeita”, porém com uma ligeira diferença que torna a estimativa melhor no período chuvoso.

Nota-se também que a reta está mais afastada do ponto de origem 0 no período seco, apresentando apenas um ponto com valor entre 100 e 200  $W/m^2$ , enquanto que no período chuvoso já é possível observar alguns valores entre 100 e 200  $W/m^2$ . Esse fato tem relação com a estação do ano predominante na região,

onde durante o período seco observamos quantidades menores de radiação solar incidente devido ao inverno austral, enquanto que no período chuvoso o oposto acontece, a quantidade de radiação solar incidente é maior por conta do verão austral.

Na figura 4c e 4d temos a sazonalidade de  $R_n$  analisada pelo método de Brunt-Penman, onde podemos observar que na figura 2c a correlação foi de 0,97 no período chuvoso, enquanto que no período seco, mostrado na figura 4d, foi igual a 0,94. A partir destes resultados nota-se que em ambos os métodos temos uma melhor estimativa de  $R_n$  para o período chuvoso.

### 3.3 Avaliação dos métodos

Ao analisar os valores que indicam as precisões das estimativas anual (Tabela 3), observou-se que o coeficiente de correlação ( $r$ ), no método de Brunt-Penman foi de 0,99, com coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,97, Exatidão ( $d$ ) igual a 0,83 e índice de desempenho ( $c$ ), 0,81. De acordo com o que mostra a tabela 1 e tabela 2, o resultado de  $r$  está classificado como sendo “Quase perfeita”, e o desempenho ( $c$ ) como “Muito bom”.

Para o método de Allen, foram obtidos resultados menos expressivos em relação ao método anterior, o coeficiente de correlação ( $r$ ) foi de 0,76, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,58, com Exatidão ( $d$ ) igual a 0,64, e desempenho ( $c$ ), 0,48. Pelo que foi visto nas tabelas 1 e tabela 2, o resultado para  $r$  está classificado como sendo “Grande”, e o desempenho ( $c$ ) como “Mau”.

Tabela 3 – Avaliação dos métodos de estimativa do saldo de radiação no período anual.

Método	$r$	$r^2$	$d$	$c$
Allen	0,76	0,58	0,64	0,48
Brunt-Penman	0,99	0,97	0,83	0,81

Fonte: O Autor.

Esse resultado deve-se ao fato de que o  $R_s$  utilizado na equação de Brunt-Penman ter sido aquele medido pelo piranômetro instalado na estação, enquanto

que o  $R_s$  utilizado nas equações de Allen ter sido estimado pela Equação 3, que faz uso de uma aproximação, além disso, temos que a insolação ( $n$ ) utilizada foi da estação meteorológica de Breves, que está localizada dentro de uma cidade diferentemente da torre em Caxiuanã que está em uma floresta.

## 4 CONCLUSÕES

Concluimos que o método de Brunt-Penman teve melhor desempenho em relação ao método de Allen, por apresentar índice de desempenho ( $c$ ) e coeficiente de correlação ( $r$ ), considerados “Muito bom” e “Muito grande”, de acordo com a metodologia utilizada. Além disso, o método requer o uso de variáveis mais fáceis de obter em campo e o processo de cálculo é mais simples, não sendo necessário o uso de sucessivas estimativas para se chegar ao resultado final que é o saldo de radiação.

As estimativas de  $R_n$  utilizando o  $R_s$  estimado pela equação 3 não obtiveram resultados satisfatórios, pois apresentaram desempenho ( $c$ ) e correlação ( $r$ ) considerados como “sofrível” e “grande” respectivamente. Por outro lado, as estimativas feitas utilizando o  $R_s$  medido pelo piranômetro da estação mostraram resultado melhor, portanto foram utilizadas no cálculo da sazonalidade de  $R_n$ . A partir disso foi possível concluir que os modelos de estimativa atuam melhor durante o período chuvoso onde predomina o verão austral.

Enfatiza-se que nem sempre a estação meteorológica terá disponível e operante um saldo-radiômetro, por conta do seu alto valor de aquisição no mercado, em virtude disso, cabe ao pesquisador encontrar métodos alternativos mais baratos para realizar sua pesquisa, os modelos de estimativa de radiação são uma solução de baixo custo para suprir a ausência de dados.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food and Agriculture Organization**, Rome, 1998. p. 43. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 05 fev. 2022.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Food and Agriculture Organization**, Rome, 1998. p. 46 - 53. Disponível em: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ALVES, Marliana de Oliveira Lage. **Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid**. 2019. 75 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica, João Monlevade, 2019. Disponível em: [https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA\\_EnergiaSolarEstudo.pdf](https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2019/6/MONOGRAFIA_EnergiaSolarEstudo.pdf). Acesso em: 09 mar. 2022.

BINKS, O.; MEIR, P.; ROWLAND, L.; COSTA, A. C. L. da; VASCONCELOS, S. S.; OLIVEIRA, A. A. R. de; FERREIRA, L.; MENCUCCINI, M. Limited acclimation in leaf anatomy to experimental drought in tropical rainforest trees. **Tree Physiology**, v. 36, ed. 12, dez. 2016, p. 1550–1561. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpw078>. Acesso em: 09 mar. 2022.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89–97, 1997. Disponível em: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/124.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2022.

CARSWELL, F. E.; COSTA, A. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, J. DE P. R.; RUIVO, M. DE L.; LEAL, L. DO S. M.; COSTA, J. M. N.; CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O flux at an eastern Amazonian rain Forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p.8076, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2000JD000284>. Acesso em: 14 mar. 2022.

COSTA, A. C. L.; ALMEIDA, S. S.; CARVALHO, C. R.; MEIR, P.; MALHI, Y.; COSTA, R. F.; SILVA JUNIOR, J. A.; COSTA, M. C.; TANAKA, B. T.; FISHER, R. A.; SOTTA, E. D.; OLIVEIRA, L. L.; GONÇALVES, P. H. L.; BRAGA, A. P.; BARRETO, P. N. Experimento ESECAFLOL-LBA em Caxiuanã. *In*: LISBOA, P. L. B. (org.). **Caxiuanã: desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia**. Belém, PA: Museu Paraense Emílio Goedi, 2009. p. 45-90. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/175364/1/Experimento-pt-1-2.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2022.

COSTA, A. C. L. da; SILVA JÚNIOR, J. D. A. S.; OLIVEIRA, A. A. R.de; COSTA, C. L. R. da; ROWLAND, L. M.; MEIR, P.; RODRIGUES, H. J. B. Variabilidade mensal e horária de elementos meteorológicos na área experimental do Projeto ESECAFLOR na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Naturais, v.11, n.3, p. 365-375, 2016. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v11i3.421>. Acesso em: 11 mar. 2022.

CULF, A. D.; FISH, G.; HODNETT, M. G. The albedo of amazonian forest and ranch land. **Journal of Climate**. Institute of Hydrology, Wallingford, United Kingdom, v. 8, p. 1544-1554, 1994. Disponível em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/8/6/1520-0442\\_1995\\_008\\_1544\\_taoafa\\_2\\_0\\_co\\_2.xml?tab\\_body=pdf](https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/8/6/1520-0442_1995_008_1544_taoafa_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf). Acesso em: 11 mar. 2022.

HOPKINS, W. G. **A new view of statistics: the complete scale**. 2002. Disponível em: <https://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>. Acesso em: 02 mar. 2022.

MACHADO, C. C.C.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, T. H. Estimativa dos valores de saldo de radiação e de fluxo de calor no solo no município de São José do Sabugi – PB (Brasil), utilizando o algoritmo SEBAL. *In*: SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 6., 2010, Coimbra. **Actas[...]** Coimbra: [s.n], 2010, p.13. Disponível em: [https://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema2/celia\\_sebal](https://www.uc.pt/fluc/cegot/VISLAGF/actas/tema2/celia_sebal). Acesso em: 09 mar. 2022.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. Aula 5: Radiação solar, balanço de energia. Arquivos de aula LEB 306. *In*: **Meteorologia agrícola**, USP/ESALQ, 33p, 2012. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/Aula5\\_2012.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/Aula5_2012.pdf). Acesso em: 25 mar. 2022.

OLIVEIRA, Alex Antonio Ribeiro de. **Estudo de respiração do solo na floresta nacional de Caxiuanã, Projeto ESECAFLOR/LBA**. 2014. 62 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/bitstream/123456789/217/1/Dissertacao\\_Estudo\\_sdeRespiracaodoSolo.pdf](https://repositorio.ufopa.edu.br/jspui/bitstream/123456789/217/1/Dissertacao_Estudo_sdeRespiracaodoSolo.pdf). Acesso em: 09 mar. 2022.

PEREIRA, A R; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Apostila de curso. USP/ESALQ, 2007. 65p. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola\\_Apostila2007.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf). Acesso em: 09 mar. 2022.

PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 2, p. 201-206, 1998. Disponível em: <http://sbgro.org/files/biblioteca/181.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2022.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2ª Versão Digital. Recife, 2006. 198p. Disponível em: [https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf). Acesso em: 2 mar. 2022.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M.; O'DONNELL, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995–9005, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>. Acesso em: 10 mar. 2022.