

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Maria do Rosário Alves Patriota**

**Desempenho de Modelos para a Estimativa da Radiação de  
Onda Longa Atmosférica em Petrolina – PE**

**Campina Grande, fevereiro de 2018**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**DESEMPENHO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO  
DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA EM PETROLINA - PE**

**MARIA DO ROSÁRIO ALVES PATRIOTA**

**Campina Grande – PB**

**Fevereiro de 2018**

**MARIA DO ROSÁRIO ALVES PATRIOTA**

**DESEMPENHO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO  
DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA EM PETROLINA - PE**

Dissertação submetida ao curso de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Campina Grande, para obtenção do título de Mestra em Meteorologia, no Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, da Universidade Federal de Campina Grande.

**Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas**

**Subárea: Radiação Solar e Terrestre**

**Orientador: Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA**

**Campina Grande – PB**

**Fevereiro de 2018**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

- P314a Patriota, Maria do Rosário Alves.  
Desempenho de modelos para a estimativa da radiação de onda longa atmosférica em Petrolina – PE / Maria do Rosário Alves Patriota. – Campina Grande-PB, 2018.  
79 f. : Il. color.
- Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2018..  
"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva".  
Referências.
1. Equações de Onda Longa Atmosférica. 2. Parâmetros Estatísticos. 3. SONDA. 4. Petrolina-PE. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 551.521.31(043)

MARIA DO ROSÁRIO ALVES PATRIOTA

DESEMPENHO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DE  
ONDA LONGA ATMOSFÉRICA EM PETROLINA-PE

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 26/02/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. IRAMI BUARQUE DO AMAZONAS  
Departamento de Matemática  
Universidade de Pernambuco

## ***1 Coríntios 13***

1. *Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, e não tivesse amor, seria como o metal que soa ou como o sino que tine.*
2. *E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência, e ainda que tivesse toda a fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse amor, nada seria.*
3. *E ainda que distribuísse toda a minha fortuna para sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, e não tivesse amor, nada disso me aproveitaria.*
4. *O amor é sofredor, é benigno; o amor não é invejoso; o amor não trata com leviandade, não se ensoberbece.*
5. *Não se porta com indecência, não busca os seus interesses, não se irrita, não suspeita mal;*
  6. *Não folga com a injustiça, mas folga com a verdade;*
  7. *Tudo sofre, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.*
8. *O amor nunca falha; mas havendo profecias, serão aniquiladas; havendo línguas, cessarão; havendo ciência, desaparecerá;*
9. *Porque, em parte, conhecemos, e em parte profetizamos;*
10. *Mas, quando vier o que é perfeito, então o que o é em parte será aniquilado.*
11. *Quando eu era menino, falava como menino, sentia como menino, discorria como menino, mas, logo que cheguei a ser homem, acabei com as coisas de menino.*
12. *Porque agora vemos por espelho em enigma, mas então veremos face a face; agora conheço em parte, mas então conhecerei como também sou conhecido.*
13. *Agora, pois, permanecem a fé, a esperança e o amor, estes três, mas o maior destes é o amor.*

***Coríntios 13:1-13***

## ***DEDICATÓRIA***

*Este trabalho é dedicado a Deus, pelo dom da vida, pela saúde, pela fé, pela persistência. A minha Mãe (Edna) e a minha Avó (Maria).*

## **PENSAMENTOS**

*Um pessimista vê dificuldades em cada oportunidade; um otimista vê uma oportunidade em cada dificuldade.*

**(Winston Churchill)**

*A persistência é o menor caminho do êxito.*

**(Charles Chaplin)**

*Cai um milhão de vezes, Deus me levantou um milhão e uma, porque para Deus não importou quantas vezes cai e sim quantas vezes eu decidi levantar.*

**(Leone Curado)**

*Aquele que se exaltar será humilhado, e aquele que se humilhar será exaltado.*

**(Lucas 14:11)**

*Quando nos tiram o chão, descobrimos que temos asas.*

**(Padre Fabio de Melo)**

*Mas vale o desconforto da verdade que a comodidade da mentira.*

**(Padre Fabio de Melo)**

## AGRADECIMENTOS

- ✚ Em sentido de oração elevo meus pensamentos aos céus e agradeço à Divina Trindade (*Pai, Filho e Espírito Santo*): vos agradeço pelo dom da vida, por me fazer renascer, por todos os favores, todas as graças com que enriquecesteis minha alma e à *Imaculada Conceição de Maria*, lhe agradeço por toda intercessão feita a seu filho Jesus em meu favor.
- ✚ Ao meu irmão, **Francisco Patriota** e a minha tia, **Cícera Alves**, ao meu tio, **Francisco Farias**.
- ✚ Ao Professor **Bernardo Barbosa da Silva**, meu orientador de mestrado, pela amizade, pelas críticas e sugestões sempre oportunas, demonstradas durante todas etapas da construção desta obra.
- ✚ Ao Professor **Willames de Albuquerque Soares**, meu orientador da Graduação em Matemática, pelas orientações, dedicação, amizade, demonstradas em toda minha trajetória acadêmica.
- ✚ Ao Coordenador do Mestrado em Meteorologia, **Enio Pereira de Souza**, pela amizade, ajuda, por aceitar fazer parte da minha banca de qualificação, por sanar minhas dúvidas no processo de construção desta obra.
- ✚ A Professora **Werônica Meira de Souza**, pela amizade, ajuda, por aceitar fazer parte da banca de qualificação deste trabalho, contribuindo com suas sugestões enriquecedoras na construção deste trabalho. Ademais, por ter me inspirado a fazer Mestrado em Meteorologia, através do evento **Workshop de Mudanças climáticas e Recursos Hídricos do estado de Pernambuco e Workshop Internacional sobre Mudanças Climáticas e Biodiversidade**.
- ✚ Ao Professor **Carlos Antonio Costa dos Santos**, pela amizade, ajuda, e por aceitar fazer parte da banca deste trabalho nas etapas de qualificação e defesa, contribuindo de forma enriquecedora, por meio das sugestões de correções.
- ✚ A Professora **Josefina Moraes Arraut**, pela amizade, ajuda, por sanar minhas dúvidas durante o curso de Mestrado na disciplina de Meteorologia Sinótica.
- ✚ A professora **Celia Campos Braga**, pela amizade, ajuda, e avaliação do meu desempenho no mestrado, através da sua avaliação dos relatórios semestrais de acompanhamento discente.
- ✚ Ao Professor **Irami Buarque do Amazonas**, pela amizade, conselhos, empenho, demonstrados em minha trajetória acadêmica, por aceitar fazer parte da banca de defesa deste trabalho.
- ✚ A Professora **Janaina Viana Barros**, pela amizade, cartas de recomendação e conselhos, demonstrados durante minha graduação em Matemática.

- ✚ Aos secretários da Pós-Graduação em Meteorologia, **Arilene de Almeida Lucena e Dannilo Victor Gomes**, pela amizade, ajuda, companheirismo e excelentes trabalhos prestados durante o mestrado.
- ✚ Aos meus amigos da Universidade de Pernambuco - Campus Garanhuns, **Marta Michelle de Oliveira Lima, Taciana Pereira Oliveira, Cícera Diedja Cordeiro da Silva, Magno Siqueira Salustiano, Deividy Ferreira da Silva, Demétrius Siqueira, Genilza Pessoa de França, Michelly Mibsa Beserra de Moura, Susane Oliveira**, pela amizade, apoio e companheirismo.
- ✚ Ao meu amigo, **Maurício Rebouças Rocha**, pela fidelidade, amizade demonstradas durante o mestrado, bem como ter sido meu professor nos estudos da Língua Inglesa.
- ✚ A minha amiga, **Fernanda Gonçalves Rocha** pela amizade, companheirismo, fidelidade demonstradas durante o mestrado.
- ✚ Aos pesquisadores do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia - LABREM integrante do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST), responsáveis pela criação e desenvolvimento do projeto SONDA – Sistema Organizacional Nacional de Dados Ambientais.
- ✚ Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste projeto.
- ✚ A todos que fazem parte do **Departamento de Ciências Atmosféricas**, pelo excelente convívio.
- ✚ Enfim a todos que contribuíram direta e indiretamente para realização deste trabalho.

*Mas vale a tentativa, que a vitória, quem não tentar não é digno da conquista.*

*(Rosário Patriota, 2018)*

## DESEMPENHO DE MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA EM PETROLINA - PE

### RESUMO

A radiação de onda longa atmosférica é de suma importância em estudos de balanços energéticos na interação Biosfera-Atmosfera, constituindo-se, decisiva em pesquisas relativas as mudanças climáticas a nível regional e global, uma vez que está diretamente relacionada com a temperatura da atmosfera. É parâmetro de entrada de diversos modelos de circulação atmosférica e previsão do tempo. Porém, raramente é medida nas redes observacionais do Brasil, por ser um dos componentes do balanço de radiação mais caro e difícil de ser monitorado em estudos micrometeorológicos. Assim, historicamente muitos esforços veem sendo realizados, para a criação de modelos empíricos e analíticos para estimar essa componente radiativa através de variáveis mais facilmente medidas. Este trabalho teve como principal objetivo avaliar o desempenho de doze modelos para a estimativa da radiação de onda longa atmosférica em Petrolina – PE utilizando dados do projeto SONDA. Os cálculos foram processados em médias horárias e diárias para diferentes condições de nebulosidade (céu claro, céu parcialmente nublado e céu nublado) e sazonalidade (período seco e chuvoso), utilizando as variáveis meteorológicas de pressão de vapor d' água e temperatura do ar à superfície como parâmetros de entrada dos modelos. O período de estudo compreendeu o ano de 2015. Os parâmetros estatísticos para validação dos modelos, consistiram em: Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Erro Médio Absoluto (EMA) e Erro Percentual Relativo Médio (EPRM). Ademais, coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Portanto, os modelos que apresentaram os melhores resultados a partir da análise estatística, sendo os mesmos indicados para as medições da radiação de onda longa atmosférica em Petrolina foram os de: Brunt (1932), Brutsaert (1975) Prata (1996), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984), Angstrom (1918), Idso (1982) e Lommer *et al.* (2007).

**PALAVRAS - CHAVE:** equações de onda longa atmosférica; parâmetros estatísticos; SONDA; Petrolina.

# PERFORMANCE OF MODELS FOR THE ATMOSPHERIC LONGWAVE RADIATION ESTIMATE IN PETROLINA - PE

## ABSTRACT

Atmospheric longwave radiation is of paramount importance in studies of energy balances in the Biosphere-Atmosphere interaction, being decisive in research on climate change at regional and global level, since it is directly related to the temperature of the atmosphere. It is the input parameter of several models of atmospheric circulation and weather forecasting. However, it is rarely measured in Brazilian observational networks because it is one of the components of the most expensive and difficult radiation balance to be monitored in micrometeorological studies. Thus, historically many efforts have been made to create empirical and analytical models to estimate this radiative component through more easily measured variables. The main objective of this work was to evaluate the performance of twelve models for the estimation of atmospheric longwave radiation in Petrolina - PE using data from the SONDA project. The calculations were processed in hourly and daily averages for different cloud conditions (clear sky, partly cloudy sky and cloudy sky) and seasonality (dry and rainy period), using the meteorological variables of water vapor pressure and air temperature as input parameters of the models. The study period comprised the year 2015. The statistical parameters for validation of the models consisted of: Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and Percent Mean Relative Error (PMRE). In addition, Pearson correlation coefficient ( $r$ ) and coefficient of determination ( $R^2$ ). Therefore, the models that presented the best results from the statistical analysis, being the same indicated for the measurements of the long-wave atmospheric radiation in Petrolina were: Brunt (1932), Brutsaert (1975) Prata (1996), Berdahl and Martin (1984), Berger et al. (1984), Angstrom (1918), Idso (1982) and Lommer et al. (2007).

**KEYWORDS:** longwave atmospheric equations; statistical parameters; SONDA; Petrolina.

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMO</b> .....	ix
<b>ABSTRAC</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xvi
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	xvii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....	xviii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	19
1.1 Problemática.....	19
1.2 Justificativa.....	20
1.3 objetivos.....	22
1.3.1 Geral.....	22
1.3.2 Específicos.....	22
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	22
2.1 Origem da Radiação Solar.....	22
2.2 O Sol.....	23
2.3 Espectro da Radiação Solar.....	24
2.4 Interação da Radiação Solar Global com a Atmosfera Terrestre.....	26
2.5 Radiação de Onda Longa Atmosférica.....	29
2.6 Índice de Claridade (Kt).....	31
2.7 Emissividade Atmosférica.....	32
2.8 Parâmetros Atmosféricos de Entrada dos Modelos da Radiação de Onda Longa Atmosférica.....	33
2.8.1 Pressão de Vapor d' Água na Atmosfera.....	33
2.8.2 Temperatura do Ar à Superfície.....	34
2.9 Modelos de Estimava da Radiação de Onda Longa Atmosférica.....	35
2.9.1 Modelo de Angstrom (1918).....	35

2.9.2 Modelo de Brunt (1932).....	35
2.9.3 Modelo de Efimosa (1961).....	36
2.9.4 Modelo de Swinbank (1963).....	36
2.9.5 Modelo de Idso e Jacson (1969).....	37
2.9.6 Modelo de Zillman (1972).....	38
2.9.7 Modelo de Brutsaert (1975).....	38
2.9.8 Modelo de Idso (1981).....	38
2.9.9 Modelo de Berger <i>et al.</i> (1984).....	39
2.9.10 Modelo de Berdahl e Martin (1984).....	39
2.9.11 Modelo de Prata (1996).....	39
2.9.12 Modelo de Lhommer <i>et al.</i> (2007).....	40
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
3.1 Caracterização Geográfica e Climatológica de Petrolina.....	41
3.2 Vegetação.....	42
3.3 Relevo.....	42
3.4 Solos.....	42
3.5 Hidrografia.....	43
3.6 Estação SONDA de Petrolina- Climatologia Local.....	43
3.7 Caracterização da Área de Estudo: Petrolina no Contexto Estadual e Regional..	45
3.8 Informações Agrometeorológicas de Petrolina para o Período de 1968 a 2009...	47
3.8.1 Radiação solar global.....	48
3.8.2 Temperatura do ar.....	48
3.8.3 Umidade Relativa do ar.....	49
3.8.4 Velocidade do vento.....	50
3.8.5 Evaporação.....	51
3.8.6 Precipitação.....	52
3.9 Obtenção dos Dados Meteorológicos .....	52
3.10 Cobertura do Céu.....	55

3.10.1 Cálculo do Índice Claridade – Kt.....	55
3.11 Estimativa dos Parâmetros Atmosféricos de Entrada dos Modelos da Radiação de Onda Longa Atmosférica.....	56
3.11.1 Pressão d' vapor da água.....	56
3.11.2 Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica.....	56
3.12 Parâmetros Estatísticos de avaliação dos modelos.....	57
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
4.1 Desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica para todas as condições de nebulosidade e sazonalidade.....	58
4.2 Análise Sazonal para o Período Seco e Chuvoso em Petrolina.....	64
4.3 Desempenho dos Modelos da Radiação de Onda Longa atmosférica para Diferentes Condições de Nebulosidade.....	68
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>70</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1:</b> Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.....	25
<b>Figura 2:</b> Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível médio do mar comparadas com a da emissão de um corpo negro a 6000K (corrigida para compensar a distância média terra-sol).....	26
<b>Figura 3:</b> Espectro eletromagnético da radiação solar.....	28
<b>Figura 4:</b> Processos de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos.....	29
<b>Figura 5:</b> Mapa da Localização de Petrolina.....	42
<b>Figura 6:</b> Médias mensais climatológicas para Petrolina – PE.....	43
<b>Figura 7:</b> Classificação climática para o Brasil segundo Köppen.....	44
<b>Figura 8:</b> Normal climatológica de precipitação anual.....	44
<b>Figura 9:</b> Localização do polo frutícola de Petrolina.....	45
<b>Figura 10:</b> Vista do rio São Francisco e áreas irrigadas em Petrolina.....	46
<b>Figura 11:</b> Normais de radiação solar global do período de 1968 a 2009 em Petrolina.....	48
<b>Figura 12:</b> Normais de temperatura máxima 12(a), temperatura média 12(b) e temperatura mínima 12(c) para o período de 1965/2009 das estações agrometeorológicas de Bebedouro (Petrolina, PE) e de Mandacaru (Juazeiro, BA).....	49
<b>Figura 13:</b> Normais de umidade relativa do ar do período de 1964/ 2009 da estação agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE).....	50
<b>Figura 14:</b> Normais de velocidade do vento do período de 1965/2009 da estação agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE).....	51
<b>Figura 15:</b> Histograma de evaporação do tanque Classe “A” no período de 1963/2009 das estações agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE) e de Mandacaru (Juazeiro,BA).....	51
<b>Figura 16:</b> Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica .....	52

<b>Figura 17:</b> Mapa de distribuição das estações da rede SONDA.....	53
<b>Figura 18:</b> Torre anemométrica ao fundo e pluviômetro (Abril /2007).....	54
<b>Figura 19:</b> Vista do rastreador solar da estação meteorológica de Petrolina, com os três rastreadores solares: o pirgeômetro, o piranômetro e o pireliômetro.....	54
<b>Figura 20:</b> Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos para todas as condições de nebulosidade, média horária para 2015.....	61
<b>Figura 21:</b> Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos para todas as condições de nebulosidade, média diária para 2015.....	63
<b>Figura 22:</b> Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos, média horária para o período seco.....	65
<b>Figura 23:</b> Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos, média horária para o período chuvoso.....	67

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabela 1:</b> Informações Geográficas de Petrolina.....	41
<b>Tabela 2:</b> Coordenadas geográficas de Petrolina.....	42
<b>Tabela 3:</b> Caracterização Hidrográfica de Petrolina .....	43
<b>Tabela 4:</b> PIB e VAP de Petrolina - PE.....	47
<b>Tabela 5:</b> Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica .....	57
<b>Tabela 6:</b> Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica.....	57
<b>Tabela 7:</b> Critérios estatísticos para a avaliação do desempenho dos modelos de radiação de onda longa atmosférica. Onde os sufixos Pi e Oi representam respectivamente a radiação estimada e medida.....	58
<b>Tabela 8:</b> Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, médias diárias e horárias para o ano de 2015.....	64
<b>Tabela 9:</b> Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, média horária para o período seco e chuvoso.....	68
<b>Tabela 10:</b> Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, média diária para o período seco e chuvoso.....	67
<b>Tabela 11:</b> Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de céu parcialmente nublado, média diária.....	68
<b>Tabela 12:</b> Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de céu claro, média diária.....	69
<b>Tabela 13:</b> Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de nublado, média diária.....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{m}$	micrometro
Å	ångström
°C	escala Celsius
DJ	dia Juliano
E	energia
dr	fator de correção da excentricidade da órbita terrestre
ea	pressão de vapor d'água no ar próximo a superfície
EMA	Erro Médio Absoluto
EPRM	Erro Percentual Relativo Médio
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
H	hidrogênio
Hz	hertz
K	kelvin
Kt	índice de claridade
$L_d$	radiação de onda longa atmosférica
$O_3$	gás ozônio
OC	ondas curtas
$O_i$	valores medidos
$P_i$	valores estimados pelos modelos
r	coeficiente de correlação de Pearson
$R_o$	irradiação no topo da atmosfera
$R^2$	coeficiente de determinação
$R_g$	radiação solar global
UR	umidade relativa do ar
$T_{ar}$	temperatura do ar próximo à superfície
$\delta$	declinação solar em graus
$\varepsilon$	emissividade do corpo.
$\lambda$	comprimento de onda
$\sigma$	constante de Stefan-Boltzmann
$\varphi$	latitude local em graus

## ABREVIATURAS

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

NEB - Região Nordeste do Brasil

PIB – Produto Interno Bruto

RD – Região de Desenvolvimento

SONDA - Sistema Organização Nacional de Dados Ambientais

ZCIT- Zona de Convergência Intertropical

TSM- Temperatura da Superfície do Mar

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática

As acentuadas atividades antrópicas vigentes nos sistemas ambientais, dentre elas, o desmatamento, queimadas, têm acarretado alterações nos ecossistemas terrestres, causando, a perda dos solos por erosão, poluição hídrica e atmosférica, perda da biodiversidade e alterações nos microclimas locais. Tais ações podem estar, possivelmente, alterando os fluxos de matéria e energia no Sistema Solo - Planta - Atmosfera - SSPA.

Conforme Silva *et al.* (2012) os padrões apresentados por diferentes componentes do balanço de radiação à superfície sobre diferentes alvos terrestres são controlados por características da superfície, como albedo, índice de área foliar e capacidade fotossintética, que controlam a temperatura e umidade do ar, a velocidade do vento e evapotranspiração. Neste sentido, o aumento das áreas degradadas pode estar modificando intensamente o albedo da superfície, originando o aumento da temperatura da superfície e, conseqüentemente, impacto na temperatura do ar. Para Moura *et al.* (2012) a quantificação das trocas de radiação em superfícies vegetadas é essencial para o entendimento do funcionamento dos agroecossistemas e para avaliar possíveis mudanças na interação entre estes e a atmosfera, na partição de energia e nos ciclos de água e carbono, decorrentes de mudanças ambientais e climáticas.

Neste contexto encontra-se a região Nordeste do Brasil (NEB) que é caracterizada climatologicamente pela irregularidade espaço/temporal da precipitação e alto potencial evaporativo da água, em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas anuais, constituindo-se, uma região anômala. Conforme Patriota e Soares (2014) a NEB tem sido apontada como a região que deverá experimentar as maiores mudanças em seu clima, com aumento da temperatura do ar e redução da precipitação. A vegetação predominante é a Caatinga, que apesar de possuir rica biodiversidade em sua fauna e flora, ações de conservação para sua preservação são raras e ineficientes, por parte de organizações de fomento da pesquisa nacional. Este bioma está entre os mais vulneráveis no cenário do aumento das temperaturas globais (OYAMA, 2003)

Pernambuco ganhou importância no aspecto ambiental, uma vez que, pesquisas realizadas por Sá *et al.* (2006) apontam o mesmo como o estado brasileiro, mais vulnerável aos efeitos das mudanças climáticas. Com implicações específicas em seu território e em diferentes setores socioeconômicos (PERNAMBUCO, 2011).

Estudos realizados por Nobre (2011) revelam um aumento de 4 °C na temperatura máxima diária no período de 1961 a 2009, na estação meteorológica de Araripina e diminuição média de 275 mm dos totais pluviométricos. Desse modo, é essencial que Pernambuco esteja preparado para enfrentar os impactos negativos decorrentes das mudanças em seu clima, assim como desenvolver estratégias de mitigação das possíveis consequências (PATRIOTA & SOARES, 2014).

No município de Petrolina - PE encontra-se a região do polo agrícola Juazeiro - Petrolina, que historicamente apresenta expressivo crescimento socioeconômico, decorrente do desenvolvimento de seus polos irrigados frutícolas, com exportações em escala nacional e internacional. Entretanto, nesta região as precipitações registradas nos últimos sessenta anos são da ordem dos 560 mm anuais, com evapotranspiração potencial superior aos 2000 mm anuais, decorrentes do elevado potencial solar. Essas características inserem a região na categoria de clima semiárido (SONDA, 2018)

De acordo com o exposto, faz-se necessário o conhecimento do comportamento dos fluxos das variáveis agrometeorológicas, para que se tenha um desenvolvimento sustentável das atividades agrícolas desenvolvidas em Petrolina, evitando o esgotamento dos recursos naturais e, em especial dos recursos hídricos, já que a demanda hídrica é um dos maiores problemas das regiões semiáridas.

## **1.2 Justificativa**

Medições da Radiação de Onda Longa Atmosférica – ( $L_d$ ) são raras e estão disponíveis apenas para alguns sites, uma situação que reflete não só o custo da instrumentação necessária, mas também os problemas de manutenção e a calibração de sensores de radiação (BLONQUIST Jr. *et al.*, 2009; SANTOS *et al.* 2011).

Diversas pesquisas tais como: (Von Randow e Alvalá, 2006; Duarte, 2006; Silva *et al.* 2010; Sobrinho, 2011; Santos, 2011; Curado, 2011; Carrilho, 2011; Dias Neto, 2014; Luiz, 2014; Andrade, 2016, Querino, 2016; Patriota e Silva, 2017; Patriota *et al.* 2017) apontam a  $L_d$  como um dos componentes do balanço de radiação mais difícil de ser medida, pois, embora haja instrumento para sua medição, este emite radiação de comparável comprimento de onda e intensidade do que está sendo medido, necessitando assim, de correções realizadas a partir da temperatura desse instrumento.

O Pirgeômetro é o instrumento que mede diretamente a  $L_d$ , no entanto, apresenta alta sensibilidade, elevado custo financeiro de operacionalização em comparação com o Piranômetro que mede radiação de onda curta (DUARTE *et al.*, 2006).

Neste contexto, modelos empíricos e analíticos historicamente veem sendo desenvolvidos para estimar a  $L_d$  em função de variáveis meteorológicas mais mensuráveis, a exemplo da temperatura do ar ( $T_a$ , K) e pressão de vapor d' água ( $mb$ ) medidas ao nível do abrigo (Prata, 1996; Brutsaert, 1982). Em que, os métodos analíticos são provenientes de uma base física, que utilizam perfis específicos dos constituintes atmosféricos, incluindo o conhecimento de suas propriedades radiativas para derivar a emissão atmosférica, enquanto os modelos empíricos são obtidos a partir de correlações empíricas.

Para Vilani *et al.* (2010) os fluxos de superfície e as estimativas da  $L_d$  podem auxiliar na calibração dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs), pois estes requerem parametrizações realísticas de muitos processos de superfície, como a partição de energia. Os campos emergentes da  $L_d$  contribuem para a análise da dinâmica de regiões com convecção intensa, já que, séries temporais destes campos permitem a análise climatológica da distribuição regional e da evolução da convecção (CEBALLOS, 2004).

Philipona *et al.* (2004) ratificaram que o uso das medidas da  $L_d$  em superfície combinadas com modelos de transferência radiativa possibilitam avaliar o efeito estufa para uma determinada região. Com isso, variações de  $L_d$  refletem o processo de alterações na temperatura da atmosfera, funcionando como um *proxi* para esse fenômeno.

Segundo Aimir *et al.* (2016) a  $L_d$  descreve o balanço regional de energia, onde a diferença com o balanço esperável em situações de céu claro permite avaliar a forçante radiativa devida à presença de nuvens, bem como estudar a influência destas no clima local, sendo utilizada em modelagem atmosférica. Aguilar *et al.* (2015) citam a extrema importância desta componente radiativa para estudos envolvendo mudanças climáticas, por estar conectada as mudanças na temperatura do ar, uma vez que, alterações no seu comportamento médio sobre diferentes biomas, pode estar vinculada a mudanças no clima regional (QUIRINO, 2016).

Assim, foi criado o projeto SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, resultado do esforço conjunto do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia-LABREM, que monitora variáveis meteorológicas mais usuais, como temperatura do ar, umidade relativa do ar, mas em especial a radiação de onda longa.

Os resultados encontrados nesta pesquisa podem contribuir para uma melhor compreensão do balanço de radiação à superfície, uma vez que é fundamental para aplicações na agricultura, biologia, ecologia, climatologia e hidrologia. Desse modo, estimar a  $L_d$  para Petrolina vai colaborar para uma melhor compreensão do comportamento sazonal das variáveis micrometeorológicas.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o desempenho de doze modelos que estimam a radiação de onda longa atmosférica, com dados do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais – SONDA da estação de Petrolina - PE.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analisar os ciclos diário e sazonal da  $L_d$ ;
- Avaliar o comportamento dos modelos da  $L_d$  em diferentes condições de nebulosidade;
- Determinar os parâmetros estatísticos associados ao desempenho de cada modelo e condições de nebulosidade.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Origem da Radiação Solar**

Kolling (2001) define a radiação solar como a quantidade de energia que chega à superfície terrestre proveniente do Sol, constituindo-se como o principal processo de transferência de energia, na forma de energia eletromagnética. Para Santos *et al.* (2014) a radiação solar é uma das principais variáveis nas mais diversas áreas da atividade humana, tais como: agricultura, climatologia, energias renováveis, além de ser a principal fonte de energia para todos os fluxos energéticos no SSPA.

A Radiação Solar Global -  $R_g$  representa a maior fonte de energia nos processos fotossintéticos e evaporativos, constituindo-se uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, a energia proveniente do Sol não é

renovável, mas é uma fonte inesgotável levando-se em consideração a escala de tempo da vida no planeta Terra.

A Rg absorvida pelas folhas afeta o crescimento vegetativo e o período de maturação das plantas, pois as folhas no interior de copas densas recebem baixos níveis de radiação, reduzindo a disponibilidade de carboidratos, afetando o desenvolvimento dos frutos e a produção final de culturas agrícolas (SINGH, 1977). A distribuição da vegetação e particularmente das culturas agrícolas, bem como dos animais, está condicionada pelos parâmetros climáticos como a radiação solar, temperatura do ar, umidade atmosférica e umidade do solo, determinantes nas atividades fotossintéticas e consumo hídrico de culturas (COSTACURTA; ROSELLI, 1980).

Moura *et al.* (2001) comprovam que estudos sobre a Rg são indispensáveis para compreender os processos físico-químicos e biológicos, que ocorrem na biosfera, sendo a radiação solar determinante para dinâmica das florestas e para produção da biomassa (VILANI *et al.*, 2007).

## **2.2 O Sol**

Segundo Moreira (2005) o Sol é conceituado como estrela de quinta grandeza, constituída por um plasma, contendo cerca de 71% de hidrogênio e 26% de hélio. Sua superfície aparente é denominada fotosfera, cujo diâmetro é aproximadamente de  $1,39 \times 10^6$  km. Possui uma massa em torno de  $1,99 \times 10^{30}$  KJ, da qual cerca de 90% se concentra na metade interna do seu raio.

A energia irradiada pelo Sol é consequência das reações de fusão nuclear dos átomos de Hidrogênio (representam cerca de 75% da composição do Sol) para formar Hélio (cerca de 25% da composição do Sol). Segundo Sakurai (1984) a energia produzida por esta estrela é emitida continuamente e se origina basicamente devido a fusão entre 4 átomos de hidrogênio e um átomo de hélio ocorrida no núcleo solar, em que a variação da quantidade de energia produzida está acoplada a atividade solar, que reflete processos nucleares em seu interior (RUSIN & ZVERKO, 1990).

A taxa de energia emitida pelo Sol é aproximadamente constante há bilhões de anos com uma potência atual da ordem de  $3,86 \times 10^{26}$  W. A temperatura efetiva na superfície do Sol é da ordem de 5778 K (5505° C), sendo considerado a principal fonte de energia para a vida terrestre, já que é a estrela, que se encontra mais próxima da Terra (a distância média Terra –

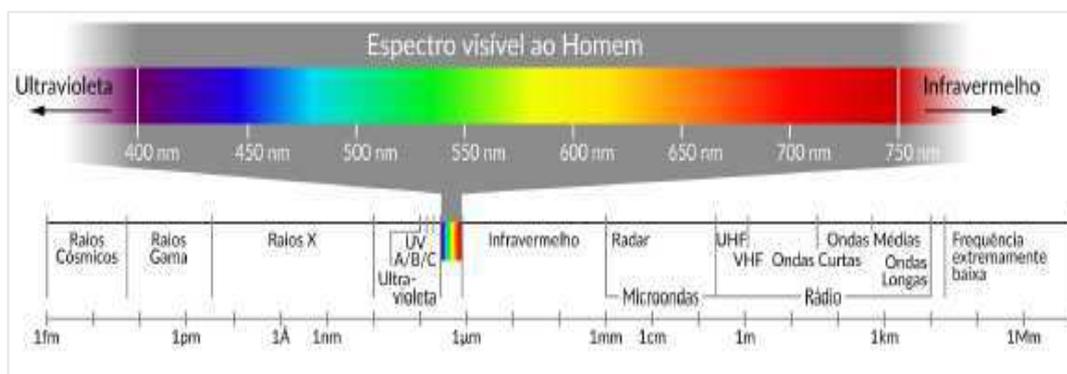
Sol, uma Unidade Astronômica – 1 U.A ou  $1,5 \times 10^8$  km), em que, a redistribuição da sua energia é em parte responsável pelos movimentos oceânicos e atmosféricos (IQBAL, 1983; SUN & WU, 2005).

Seu núcleo se caracteriza por concentrar a maior parte da massa solar e por ser o local onde ocorrem as reações termonucleares; a Zona de Convecção destaca-se por transportar a energia produzida no núcleo para a superfície solar; a Fotosfera é a região visível e de onde vem a maior parte da energia radiante que chega à Terra; a Cromosfera é a camada avermelhada de espessura estimada entre 6000 e 15000 km e que só pode ser observada durante eventos de eclipse solar e a Coroa, a camada mais externa do Sol, tem sua espessura dependente do nível de atividade solar (VIANELO & ALVES, 2000).

### 2.3 Espectro da Radiação Solar

Vianelo e Alves (2000) definem o espectro da radiação solar como o conjunto de radiação emitida pelo Sol, sendo ordenado conforme o comprimento e frequência de ondas, constituindo-se um importante fator na determinação de parâmetros físicos, em que, cerca de 81% da energia que chega ao Sistema Terra - Atmosfera está em uma faixa de comprimentos de onda que vai do visível ao infravermelho próximo.

Essa energia alimenta todos os processos térmicos, dinâmicos e químicos, sejam eles naturais ou artificialmente desenvolvidos, com aplicação do conhecimento científico e tecnológico produzido pela sociedade. Dentre os processos naturais, a fotossíntese (produção de biomassa), o ciclo hidrológico (evaporação/precipitação), a dinâmica da atmosfera e oceanos (ventos e correntes oceânicas) são exemplos com os quais estamos interagindo de forma rotineira (Pereira *et al.* 2017). A energia irradiada pelo Sol cobre uma ampla faixa do espectro eletromagnético, conforme ilustra a (Figura 1).



**Figura 1** - Espectro da radiação solar incluindo um detalhamento da faixa visível humana.  
**Fonte:** Pereira *et al.* 2017.

Segundo Varejão (2006) a presença de flares, fáculas dentre outras denuncia perturbações de diferentes magnitudes e evidencia que a emissão radiativa pelo sol deve ser mais complexa que a preconizada pelo modelo do corpo negro, em que o espectro de emissão do Sol seria o conjunto de todas essas contribuições, tornando-se, necessariamente, bem mais complicado que o previsto para um corpo negro emitindo a temperatura média da atmosfera.

As reações nucleares que ocorrem no Sol produzem várias radiações eletromagnéticas, com diferentes comprimentos de onda contidos no intervalo entre 0.3  $\mu\text{m}$  e 4.0  $\mu\text{m}$ . Por esta razão, elas são denominadas radiações de ondas curtas, enquanto aquelas produzidas pela emissão de energia da Terra são chamadas de radiações de ondas longas (SOBRINHO, 2011).

Conforme Rabello (2016) o Sol emite desde raios gama até ondas de rádio, em que 99% encontram-se no comprimento de ondas curtas, que vão desde os raios gama até o infravermelho próximo. Conforme Sellers (1965) dentro do comprimento de ondas curtas, o Sol emite aproximadamente 9% no espectro ultravioleta, 45% no visível e 46% infravermelho e sua máxima emitância ocorre para o comprimento de onda de 0,5 $\mu\text{m}$ .

A **radiação ultravioleta**: é constituída por um conjunto de radiações compreendidas na faixa espectral de 0,01 a 0,40  $\mu\text{m}$ . Estas radiações são produzidas durante as reações nucleares no Sol.

A **radiação visível (luz)**: é o conjunto de radiações eletromagnéticas compreendidas entre os comprimentos de ondas de 0,39  $\mu\text{m}$  à 0,70  $\mu\text{m}$ . As radiações contidas nesta faixa de comprimento de onda ao incidirem no sistema visual humano, são capazes de provocar uma sensação de cor no cérebro (MOREIRA,2005). Wallace e Hobbs (2006) explica que o comprimento de onda na região visível é assim definido por ser a faixa que os olhos humanos são sensíveis e, com isso, capazes de identificar as cores, sendo o violeta o menor e o vermelho o maior comprimento de onda.

A **radiação infravermelha**: são radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda variam de 0,7  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$ . Situam-se no espectro eletromagnético entre a luz vermelha e as microondas. Esta radiação é dividida em três faixas espectrais: IV próximo (0,7 a 1.1  $\mu\text{m}$ ), IV médio (1,1 a 3,0  $\mu\text{m}$ ) e IV distante (3,0 a 1000  $\mu\text{m}$ ).

A análise da curva que representa a radiação recebida ao nível médio do mar conforme explicitada na (Figura 2), mostra a ausência quase completa da energia ultravioleta, absorvida pelo oxigênio e ozônio na atmosfera superior (VAREJÃO, 2006).



**Figura 2** - Distribuição espectral da radiação solar no topo da atmosfera e ao nível médio do mar comparadas com a da emissão de um corpo negro a 6000K (corrigida para compensar a distância média terra-sol).

**Fonte.** Varejão (2006).

#### 2.4 Interação da Radiação Solar Global com a Atmosfera Terrestre

A atmosfera terrestre é constituída por gases atmosféricos e aerossóis (particulados). A fração seca da atmosfera (sem vapor d'água) é formada por 99% de Nitrogênio ( $N_2$ ) e Oxigênio ( $O_2$ ), 1% de Argônio (Ar) e outros gases. Os demais constituintes gasosos da atmosfera são os chamados gases-traço ( $CO_2$ ,  $O_3$ , entre outros), que apesar de sua baixa concentração possuem papel importante nos processos radiativos (WALLACE E HOBBS, 2006).

Moreira (2005) ratifica que a atmosfera terrestre é indispensável a vida em virtude dos gases que contém e por ser o filtro protetor de radiações solares com alto poder de penetração. Possui uma massa que corresponde a 0,001% do total do planeta Terra e é constituída por uma mistura gasosa, vapor d' água e aerossóis. A interação da radiação com a atmosfera só pode ser entendida se for considerada a sua composição química, pois esta é um meio complexo, através da qual a energia eletromagnética, proveniente do sol, atravessa até atingir a superfície da terra (ANDRADE, 2016).

O fluxo total de energia no topo da atmosfera é de aproximadamente  $1400\text{Wm}^{-2}$ , o que equivale a  $2\text{ cal cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$  (SZEICZ, 1974; GARDNER *et al.* 1985). Quando a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre, sofre atenuações causadas por reflexão, espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, por partículas dispersas e nuvens. Isso faz com que a radiação global que chega a superfície terrestre seja fortemente atenuada.

A  $R_g$  que atravessa a atmosfera é constituída pela radiação solar direta e difusa (CORREIA, 2000). A radiação solar global direta é o componente da  $R_g$  proveniente diretamente do sol e que não sofre mudança alguma de direção, além da provocada pela refração atmosférica (SANTOS & POLYDORO, 2002).

Já a radiação solar difusa chega a superfície terrestre através do espalhamento da radiação por gases e partículas suspensas na atmosfera. Pereira *et al.* (2007) explicam que esse processo é mais facilmente percebido em condições de céu nublado e em dias com alto teor de poeira, uma vez que a radiação solar terá maior dificuldade para atingir diretamente a superfície.

Liou (1980) destaca que a radiação eletromagnética emitida pelo Sol e que atinge a Terra é chamada Radiação Solar no Topo da Atmosfera ( $R_o$ ). O conhecimento da sua distribuição é indispensável para estudos climáticos, balanço de radiação e comportamento dinâmico da atmosfera terrestre (VAN HEMELRIJCK & VERCHEVAL, 1981).

Segundo Moreira (2005) a  $R_g$  que volta para o espaço sideral corresponde a 37%, sendo 26% refletida pelas nuvens e 11% pela dispersão das partículas que se encontram na atmosfera. Os gases e vapor d' água são responsáveis pela absorção de 16% da radiação, com isso, somando-se as quantidades de radiação que voltam para ao espaço mais aquela que foi absorvida pelos gases e vapor d' água tem-se um total de 53% de perda de radiação global.

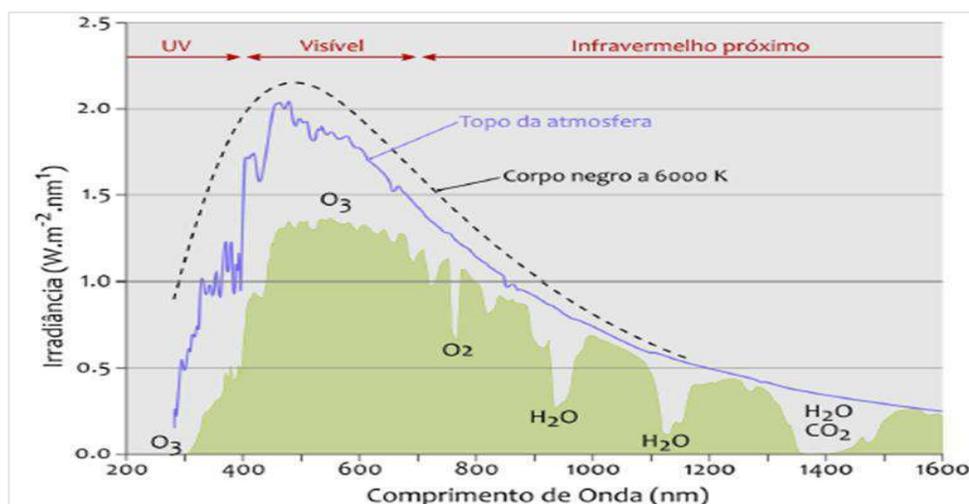
Do total que chega no topo da atmosfera somente 47% atinge a superfície terrestre. Sendo composta de raios solares diretos 19% e raios difusos 26%. A energia solar que incide no topo da atmosfera e atinge a superfície terrestre é modulada primordialmente pelas nuvens, sendo o processo de interação nuvens-radiação um dos mais importantes no controle climático (LI *et al.* 1995). Em ambientes de florestas, a penetração da radiação na copa das plantas depende de vários fatores como: a arquitetura das plantas, ângulo de inclinação das folhas, idade e história da planta (ROSENBERG *et al.*, 1983).

Os fatores astronômicos estabelecem a variabilidade da radiação solar incidente no topo da atmosfera. No entanto, a energia solar incidente na superfície do planeta também sofre a

influência dos processos físicos que reduzem a intensidade da radiação ao longo do percurso. A transferência radiativa é o mecanismo pelo qual o sistema Terra-Atmosfera interage e atenua a intensidade da radiação solar ao longo de seu percurso até incidir na superfície terrestre (Pereira *et al.*, 2017).

Os processos físicos de espalhamento da radiação solar são produzidos por moléculas de gases atmosféricos e particulados em suspensão. Os processos físicos de absorção ocorrem com moléculas de ozônio ( $O_3$ ), vapor d' água, oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Geralmente, os processos físicos atenuam a  $L_d$  solar fazendo com que a irradiância incidente na superfície da Terra atinja seu valor máximo de aproximadamente  $1.000 \text{ W/m}^2$  no meio dia solar (momento do dia em que o Sol está na posição mais elevada de modo que a radiação solar percorre a menor espessura de atmosfera) em condições de céu claro (Pereira *et al.*, 2017).

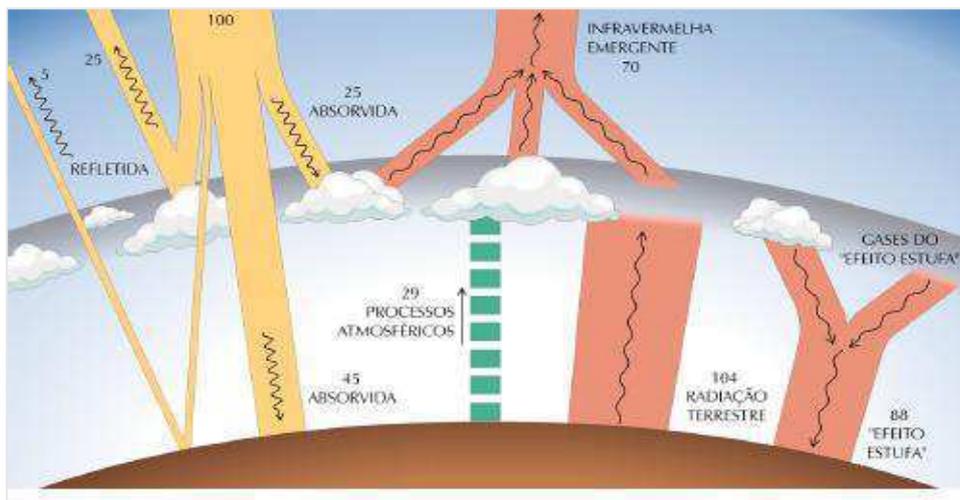
A (Figura 3) representa de forma simplificada os principais processos radiativos que acontecem na atmosfera terrestre, em que a área entre as curvas representa a atenuação da radiação solar incidente durante sua passagem através da atmosfera. Para comparação é apresentada uma curva de emissão de um corpo negro a 6000 K (linha tracejada).



**Figura 3** - Espectro eletromagnético da radiação solar.  
**Fonte:** Pereira *et al.*, 2017.

Rüther *et al.* (2017) observaram para o território brasileiro valores da irradiância global horizontal de até  $1822 \text{ W/m}^2$ . A (Figura 4) esboça o espectro contínuo de radiação eletromagnética emitido pelo Sol que atinge o topo da Atmosfera e a superfície terrestre após a atenuação pelos processos radiativos na atmosfera. Pode-se observar que alguns comprimentos

de onda da radiação solar são totalmente atenuados pela atmosfera e não incidem na superfície terrestre.



**Figura 4** - Processos de interação da radiação solar com os principais constituintes atmosféricos. **Fonte:** Pereira *et al.*, 2017.

## 2.5 Radiação de Onda Longa Atmosférica

Conforme Viswanadham (1981) a  $L_d$  tem sua origem na energia das moléculas dos constituintes atmosféricos, como o vapor d' água (constituindo-se o componente mais abundante), dióxido de carbono e o ozônio e gotas de água das nuvens, assim sendo, função da temperatura do ar, constituindo-se por duas componentes: a radiação de onda longa oriunda do aquecimento da atmosfera, chamada radiação de onda longa atmosférica e radiação solar de onda longa terrestre, oriunda do aquecimento da superfície, solo ou solo mais cultura (Lenz, 2016). Bastiaanssen *et al.* (1998) explicam que a equação do balanço de radiação é descrita em termos do balanço de onda curta e do balanço de onda longa, sendo o saldo de radiação de onda longa função da temperatura do ar e da temperatura da superfície.

Convencionou-se o uso de sinais na explicação do direcionamento do fluxo dessas radiações: a radiação de onda longa atmosférica leva o sinal positivo, pois na superfície sua presença é predominantemente no sentido para baixo ↓ (ganho de energia da superfície). A radiação solar de onda longa terrestre leva o sinal negativo por seu sentido ser preferencialmente para cima ↑ (perda de energia).

Galvão e Fisch (2000) definem a  $L_d$  como o fluxo radiante de energia resultante da emissão dos gases atmosféricos e de superfícies líquidas e sólidas da Terra. Todos os materiais sobre a Terra possuem uma temperatura mais baixa que a do Sol, tal que a radiação que eles emitem tem comprimentos de ondas maiores que a da radiação solar global.

Esta componente radiativa é decisiva em estudos meteorológicos, bem como aqueles que envolvem o aquecimento global, uma vez que, está relacionada aos gases atmosféricos e, portanto, a temperatura do ar. Seu fluxo é elemento fundamental na troca radiativa ao nível da superfície e importante componente nos modelos de previsão do tempo (AGUILAR *et al.*, 2015).

Sobrinho (2011) evidencia que para se medir e identificar os efeitos que as atividades antropogênicas podem provocar no tempo e no clima são utilizados estudos de trocas radiativas no nível da superfície, sendo essas, de essencial importância no que se refere a regiões que abrangem importantes biomas, como o Cerrado, Caatinga. Estudos envolvendo a radiação solar são importantes por esta ser a principal fonte de energia para os processos físicos e biológicos que ocorrem na biosfera e, em particular, nas florestas (LEITÃO, 1994).

Pai e Escobedo (2015) destacam que na agricultura a relevância da  $L_d$  consiste na sua relação com o consumo hídrico de culturas. Por ser de natureza térmica sua magnitude está relacionada com a quantidade de água que passa da fase líquida em lagos, no solo e nas plantas para a fase gasosa na atmosfera. Sua estimativa pode auxiliar na calibração dos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGAs), pois estes requerem parametrizações realísticas de muitos processos de superfície, como a partição de energia (VILANI *et al.*, 2010). Para Jimenez *et al.* (1987) o conhecimento desta componente, se faz necessário na previsão de variações diurnas de temperatura, geadas e nevoeiros noturnos, assim como em avaliações do resfriamento radiativo noturno de construções.

Ademais, segundo Kjaersgaard *et al.* (2007) é normalmente utilizada em estudos nas áreas de agricultura, engenharias, sendo determinante em pesquisas que envolvam o crescimento de plantas, planejamento do uso de recursos hídricos, por meio de modelos empíricos. Fundamental para o entendimento do balanço energético superficial e para as trocas de calor na interface Superfície-Atmosfera, uma vez que é necessária para se calcular a energia disponível para o ambiente (AGUIAR *et al.*, 2011).

As primeiras equações desenvolvidas para a estimativa da  $L_d$  foram feitas em função da temperatura do ar próximo a superfície e da pressão de vapor d' água. Sua estimativa é resultante da equação de Stefan-Boltzmann que considera a emissividade ( $\epsilon$ ) e a temperatura da superfície de um corpo, como por exemplo da atmosfera onde a temperatura e a pressão de vapor d' água não são constantes.

A  $L_d$  refletida interage com a atmosfera e com a superfície, que ao adquirirem essa energia na forma de calor passam a emití-la, estando disponível para processos biológicos e térmicos do metabolismo vegetal, principalmente ao fornecimento de energia para o processo de evapotranspiração (RANA & KATERJI, 2000; PEREIRA *et al.*, 2007).

Tem esse nome, pois sua irradiância está em uma faixa do espectro distante da faixa do espectro da luz solar, sendo originada do aquecimento da atmosfera. A maior parte da radiação emitida pela Terra e pela atmosfera está contida no intervalo de 4 a 100  $\mu\text{m}$  (BRUTSAERT, 1982).

Seu principal gás absorvedor é o vapor d' água (Radél *et al.*, 2015), sendo peça fundamental no balanço radiativo devido a sua abundância na atmosfera, sensibilidade a mudança de temperatura. Segundo Varejão (2006) a atmosfera e a superfície terrestre emitem a  $L_d$  comportando-se, aproximadamente como um corpo negro às respectivas temperaturas. Dessa forma, conhecendo-se as temperaturas, as densidades dos fluxos emitidos, a mesma pode ser estimada através da equação de Stefan-Boltzmann.

Seu fluxo é um mecanismo controlador da formação de geadas, enquanto a força dirigente da evapotranspiração é o fluxo líquido de radiação total (saldo de radiação), que fornece o calor latente de vaporização exigido (Heitor *et al.*, 1991). O saldo de radiação total é importante na determinação da troca de energia durante o dia, quando ocorre a maior parte da evapotranspiração (VON RANDOW & ALVALÁ, 2006).

## **2.6 Índice de Claridade (Kt)**

O Índice de Claridade - Kt é um indicador geral dos processos de absorção e espalhamento da radiação por nuvens, aerossóis, vapor d' água, que intervêm na transmissão da radiação solar global através da atmosfera. Também é conhecido na literatura por expressar as condições de nebulosidade (ESCOBEDO *et al.*, 2009). Valores baixos do Kt indicam grande presença de nuvens, ou baixa radiação solar global em relação à extraterrestre. Já valores altos indicam céu limpo ou com pouca nebulosidade. É importante para o cálculo da  $L_d$  em qualquer condição de cobertura de céu já que é um bom indicador da presença de água na atmosfera.

As nuvens são o principal fator modulador da radiação solar que incide na superfície em razão de suas propriedades óticas que produzem um espalhamento eficiente da radiação solar. O espalhamento da radiação solar por nuvens depende de sua espessura ótica, da distribuição

de tamanhos das gotículas, do conteúdo e do estado físico da água (PALTRIDGE & PLATT, 1976), características estas que variam de acordo com o tipo de nuvem.

A radiação solar difusa está relacionada com a presença de água na atmosfera. A variação na cobertura do céu influi em outras radiações como a radiação solar infravermelha próxima e nas radiações de ondas longas (Butt *et al.* 2010). Andrade (2016) explica que a radiação solar incidente no topo da atmosfera varia basicamente com a latitude a declinação solar, ângulo horário e excentricidade da órbita terrestre, fatores que dependem do movimento de rotação da terra e translação do sol. Santos *et al.* (2003) esclarecem que a radiação por apresentar variabilidade dependendo da hora do dia, da época do ano e da latitude, existe a dificuldade de se comparar dados da radiação solar em seus valores brutos, principalmente, entre localidades climaticamente diferentes.

Neste contexto, o Kt tem a finalidade de eliminar a dependência astronômica, dividindo a radiação global pela radiação solar extraterrestre, eliminam-se as unidades, e é obtido um valor adimensional variando entre 0 e 1. Seu valor representa a transmissividade atmosférica, a quantidade de energia solar que de fato atingiu a superfície do planeta. Viúdez-Mora (2011) explicam que a maioria das transferências de energia entre o sistema climático e o espaço é realizada através de fluxos de radiação. Investigações detalhadas sobre a influência de diversas condições atmosféricas sobre fluxos radiativos necessitam de uma distinção bem definida das condições de nebulosidade.

## **2.7 Emissividade Atmosférica**

A emissividade atmosférica, segundo a Lei de Stefan-Boltzmann, é a uma propriedade da atmosfera que define a sua capacidade de emitir energia, ela depende das propriedades atmosféricas, bem como da temperatura. A qual pode ser calculada a partir da razão entre a energia emitida e absorvida pela atmosfera. Constitui-se um fator determinante na radiação de onda longa, muitos trabalhos têm se empenhado no estudo do comportamento da atmosfera no que diz respeito a sua emissividade para maior compreensão deste fenômeno.

Para Curado (2011) a emissividade atmosférica pode ser apresentada como uma função cuja variação depende do conteúdo de vapor d'água na atmosfera, umidade relativa e temperatura do ar. Segundo a Lei de Stefan-Boltzmann a energia emitida por uma superfície natural depende da sua temperatura e de sua emissividade, sendo essa última, um índice que

define a capacidade de emissão de uma superfície, que é calculada pela razão entre a energia emitida pela superfície e a energia absorvida por ela. O valor da emissividade varia de 0 a 1, sendo o valor zero um indicador que a superfície não emite radiação, e o valor 1 indicando que toda energia absorvida é reemitida (Corpo Negro).

A equação 1 é usada para obtenção da emissividade da superfície, que consiste na razão entre a energia emitida pela superfície e a energia absorvida por ela.

$$\varepsilon = \frac{R}{\sigma T^4} \quad (1)$$

Em que:

R: energia emitida por unidade de área e unidade de tempo ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$\varepsilon$ : emissividade do corpo que emite a radiação (adimensional)

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

T: temperatura da superfície emissora (K)

## **2.8 Parâmetros Atmosféricos de Entrada dos Modelos da Radiação de Onda Longa Atmosférica**

### **2.8.1 Pressão de Vapor d' Água na Atmosfera**

Segundo Yamasoe e Correa (2016) o vapor d' água é um dos constituintes cuja concentração apresenta grande variabilidade temporal e espacial. Nos trópicos, representa mais do que 4% do volume da baixa atmosfera, enquanto que sobre os desertos e regiões polares pode atingir concentrações da ordem de apenas 1%. Atua como absorvedor de radiação infravermelha, reemitindo-a à sua temperatura. Com isso desempenha o papel de um agente termorregulador, impedindo que a camada de ar junto ao solo se esfrie em demasia durante a noite (VIANELLO e ALVES, 2000).

Nas regiões tropicais quentes e úmidas o vapor d' água é um dos mais importantes constituintes atmosféricos. Exerce papel de destaque no balanço de energia próximo a superfície do solo. Além disso, sua presença é absolutamente indispensável para toda espécie de vida na terra. É elemento decisivo no ciclo hidrológico, que transfere água da superfície para atmosfera, que retorna, sob a forma líquida, como chuva. Possui máximas concentrações nas regiões tropicais e equatoriais úmidas e mínimas concentrações nas latitudes elevadas e polares,

acaba por estabelecer um fluxo de vapor d' água das baixas para as altas latitudes e, ao condensar e precipitar, aquece aquelas regiões.

Quando o ar é forçado a subir para as camadas superiores da atmosfera, o que é mais intenso nas regiões tropicais e equatoriais, o vapor de água ao condensar, desempenha duplo papel: forma pesadas nuvens e transfere calor para atmosfera superior, alimentando assim, não apenas chuvaradas intensas, mas alguns dos mais temíveis fenômenos atmosféricos (os tufões e os furacões). Por tanto, o vapor d' água é a maior fonte de energia latente da atmosfera tropical.

Teixeira (2010) evidencia que na evaporação a remoção do vapor d' água depende, em grande parte, do vento e da turbulência do ar. Nesse processo, o ar acima da superfície vai se tornando gradativamente saturado com vapor d' água. Se não há reposição de ar seco, o fluxo hídrico decresce.

### **2.8.2 Temperatura do Ar à Superfície**

Em Meteorologia o termo temperatura do ar à superfície é usado, de modo equivalente, para traduzir a temperatura reinante em um ponto da atmosfera próximo à superfície da Terra. Para os propósitos da análise sinótica do estado da atmosfera, as observações da temperatura do ar à superfície devem ser efetuadas a uma altura de 1,25 a 2,00 m acima do terreno (Varejão, 2006). São observações simultaneamente realizadas em todas as estações integrantes da rede sinótica mundial, de conformidade com horários estabelecidos por acordo entre os países partícipes (O.M.M., 1971).

Conforme Varejão (2006) para fins climatológicos, as observações da temperatura do ar poderiam ser feitas de acordo com a hora solar média local, já que pode haver uma grande defasagem entre está e a hora legal. Esta recomendação prende-se ao fato de ser o Sol o principal responsável pelo comportamento temporal da temperatura do ar. A pequena diferença (em geral de poucos minutos) existente entre a hora solar verdadeira e a hora solar média local não deve introduzir erros apreciáveis.

A temperatura do ar, atua no processo de evaporação, porque o ar aquecido próximo à superfície de água transfere energia, na forma de fluxo de calor sensível aumentando as taxas evaporativas. O ar aquecido próximo da copa das plantas transfere energia para as folhas, aumentando a taxa de transferência de vapor d' água para a atmosfera. Na fotossíntese, é

também importante, pois este processo envolve reações bioquímicas, que são função da temperatura (NUNEZ-ELISEA; DAVENPORT, 1995).

## **2.9 Modelos de Estimava da Radiação de Onda Longa Atmosférica**

Estudos envolvendo modelos da  $L_d$  ainda são limitados devido a magnitude das incertezas de suas estimativas (IZIOMON & MAYER, 2002). Essas improbabilidades das modelagens são, por vezes, devido à parametrização dos modelos terem sido feitas utilizando medidas indiretas da radiação de onda longa, que no geral, é estimada a partir de saldo de radiômetros (SOBRINHO, 2011).

### **2.9.1 Modelo de Angstrom (1918)**

Em 1918 Angstrom foi um dos primeiros a desenvolver uma obra significativa sobre o cálculo da irradiância de onda longa atmosférica, utilizando uma abordagem empírica, em função da pressão de vapor d' água e temperatura do ar em (K) próximas à superfície.

A equação de Angstrom assume a forma:

$$L_d = (0.82 - (0.25 * 10^{-0.168*ea}) * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$$

### **2.9.2 Modelo de Brunt (1932)**

A equação desenvolvida por Brunt em 1932, para condições de céu claro, relaciona a  $L_d$  com a pressão d' vapor de água em (*mb*) e a temperatura do ar em (K). Em sua criação as variáveis de entrada foram obtidas a partir de observações realizadas no interior do abrigo de instrumentos, em estações meteorológicas convencionais, acerca de dois metros de altura da superfície do solo.

Este modelo é amplamente utilizado, devido a sua simplicidade e apresenta desempenho favorável. Seus coeficientes apresentam sensibilidade aos locais aonde são avaliados, ou seja, refletem as condições locais em que as medidas dos parâmetros micrometeorológicos de pressão do vapor d' água e temperatura do ar foram obtidas (VISWANADHAM & MASCARENHAS, 1978; DUARTE *et al.* 2006; SILVA *et al.* 2006).

Pesquisas realizadas por Vilani *et al.* (2010) obtiveram que esta equação foi a que resultou na menor média da irradiância de onda longa atmosférica para o período diurno e noturno. Já Sobrinho (2011) constatou que esta equação foi uma das melhores que se adaptou para as condições de céu claro em sua formação original, apresentando um ótimo resultado conforme os parâmetros estatísticos aplicados para o Cerrado Mato-Grossense.

A equação de Brunt (1932) assume a forma:

$$L_d = 0.065 * \sqrt{ea} + 0.52 * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 2.9.3 Modelo de Efimosa (1961)

Em 1961 Efimosa desenvolve um modelo em função dos parâmetros micrometeorológicos da pressão d' vapor da água em (*mb*) e temperatura do ar próximo a superfície em (K) para dias de céu claro.

A equação de Efimosa (1961) assume a forma:

$$L_d = (0.746 + 0.0066 * ea) * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 2.9.4 Modelo de Swinbank (1963)

Swinbank em 1963 desenvolveu um modelo em função somente da temperatura do ar próximo a superfície. Os dados de temperatura utilizados foram provenientes da Austrália, Oceano Índico, Inglaterra e França para condições de céu claro. Sua verificação foi limitada a estações de superfície, devido ao forte espectro de absorção do vapor d' água e do dióxido de carbono que se originam imediatamente acima da superfície e decaem com a altitude.

Diversos estudos em diferentes regiões já foram realizados para avaliar o desempenho deste modelo. Dentre estes estão os testes realizados por Sobrinho (2011) para o cerrado mato-grossense o qual avaliou 107 modelos para a estimativa da  $L_d$  e constatou que o modelo de Swinbank (1963) apresentou um ótimo desempenho para condições de céu claro.

Vilani *et al.* (2010) constaram ao realizarem testes de avaliações de modelos para a região central do Mato Grosso, que este modelo foi o que melhor se correlacionou com a temperatura e umidade do ar.

Porém, nos experimentos realizados em Ponta Grossa - PR por Duarte *et al.* (2006) obtiveram que o mesmo não apresentou bons resultados, estes autores atribuíram este resultado ao fato deste modelo não incluir em sua formulação o parâmetro de vapor d' água.

Querino (2016) ao avaliar cinco modelos no estado do Mato Grosso, obteve péssimo desempenho para esta equação, após a parametrização para as situações de análise de dados gerais, pois apresentou os piores parâmetros estatísticos: EMA, REMQ, EPRM e menor valor de correlação de Pearson.

### **2.9.5 Modelo de Idso e Jacson (1969)**

Em 1969 Idso e Jacson desenvolveram uma equação para condições de céu claro integrando todos os comprimentos de onda em função apenas da temperatura do ar em graus (°C). A qual leva em consideração a relação entre água precipitável, pressão de vapor de saturação e temperatura do ar.

Vilani *et al.* (2010) concluíram que este seria um dos modelos com menores erros e com melhor correlação entre a temperatura e a umidade relativa do ar. Sobrinho (2011) verificou que o mesmo apresentou um bom resultado para diferentes condições de nebulosidade, mas não se apresentou como uma das melhores opções após a parametrização.

Sedlar e Hock (2009) avaliaram vários modelos em Storglaciaren, norte da Suécia. Os autores ratificaram que modelos, que levam em consideração além da temperatura do ar o vapor d' água, tendem a se destacar quando comparados com aqueles que consideram apenas a temperatura do ar, como é o caso da equação de Idso e Jacson (1969).

A equação de Idso e Jacson (1969) assume a forma:

$$Ld = (1 - 0.26 * EXP(-7.77 * 10^{-4} * (273 - Ta)^2 * 5.67 * 10^{-8} * Ta))$$

### **2.9.6 Modelo de Zillman (1972)**

Em 1972 Zillman desenvolveu uma equação em função apenas da temperatura do ar em (K). Sobrinho (2011) obteve um péssimo desempenho para a mesma.

A equação de Zillman (1972) assume a forma:

$$Ld = 9.2 * 10^{-6} * Ta^2 * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$$

### 2.9.7 Modelo de Brutsaert (1975)

Em 1975 Brutsaert desenvolveu um modelo para dias de céu claro e condições atmosféricas próximas à atmosfera padrão, a partir da integração da equação de Schwarzschild sobre todas as direções e todos os comprimentos de onda. Em função dos parâmetros micrometeorológicos de temperatura do ar em (K) e pressão de vapor d' água em (*mb*). Sobrinho (2011) obteve que esta equação em sua formação original, para condições de céu claro apresentou um ótimo resultado. Já para as condições de céu parcialmente nublado e nublado apresentou um péssimo desempenho.

A equação de Brutsaert (1975) assume a forma:

$$L_d = 1.24 * \frac{ea^{\frac{1}{7}}}{T_a} * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 2.9.8 Modelo de Idso (1981)

Idso em (1981) desenvolveu uma equação empírica para estimar a  $L_d$  para condições de céu claro, em função da pressão de vapor d' água em (*mb*) e temperatura do ar próximo a superfície. O autor destacou a necessidade de se considerar moléculas de água na atmosfera e propôs um modelo baseado em dados coletados em Phoenix, Arizona, que leva em consideração o vapor d' água na estimativa da  $L_d$  além de ser aplicável para qualquer região que se encontre numa faixa de temperatura entre -10 e +45°C (IDSO, 1981).

Sobrinho (2011) verificou que para as condições de céu claro em sua formulação original a equação de Idso (1982) apresentou um resultado muito bom para a irradiância de onda longa para as condições meteorológicas do cerrado mato-grossense.

Querino (2016) obteve que este modelo apresentou os menores erros antes da parametrização, e pouca diferença entre os erros pós-parametrização, o que indica que o mesmo poderia ser aplicado mesmo sem a reparametrização. Duarte *et al.* (2006) concluíram que o mesmo tende a superestimar quando aplicado em condição de céu claro. Já Santos *et al.* (2011) observaram que este modelo tende a subestimar os valores medidos.

A equação de Idso (1981) assume a forma:

$$L_d = 0.7 + 5.95 * 10^{-5} * \left( ea * \exp\left(\frac{1500}{T_a}\right) \right) * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 2.9.9 Modelo de Berger *et al.* (1984)

Berger *et al.* (1984) desenvolveram um ajuste para o modelo de Brunt (1932) e obtiveram uma equação para condições de céu claro dependente da temperatura do ar próximo a superfície em (K) e da pressão de vapor d' água em (*mb*).

A equação de Berger *et al.* (1984) assume a forma:

$$L_d = (0.66 + 0.04 * ea^{\frac{1}{2}}) * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 2.9.10 Modelo de Berdahl e Martin (1984)

Em 1984 Berdahl e Martin criaram um modelo em função da temperatura do ar em (K) e da pressão de vapor d' água em (*mb*). Para tanto, projetaram um radiômetro de maneira especial para obter dados em 6 regiões por 57 meses, com distribuição angular e espectral da radiação atmosférica. Concluíram que, para médias mensais, a emissividade atmosférica, em condições de céu claro, é dependente da temperatura do ponto de orvalho (*TDP*).

A equação de Berdahl e Martin (1984) assume a forma:

$$L_d = 0.56 + 0.059 * ea^{\frac{1}{2}} * 5.67 * 10^{-8} * T_a^4$$

### 3.9.11 Modelo de Prata (1996)

Em 1996 utilizando dados de sondagem na Austrália Prata desenvolveu um modelo em função da temperatura do ar e da pressão do vapor d' água em (*mb*) para dias de céu claro. O autor estimou a emissividade levando-se em consideração que uma aproximação razoável para representar o espectro de onda longa, deve ser um modelo de banda exponencial modificada. Em seguida, realizou testes usando dados observados, em regiões polares, o que possibilitou testar o modelo sob condições de temperaturas abaixo de zero e baixa pressão de vapor d' água, bem como em regiões de deserto, o que permitiu avaliar a performance do novo modelo considerando altas temperaturas e elevadas concentrações de aerossóis (QUERINO, 2016).

Prata concluiu que a  $L_d$  pode ser estimada utilizando um modelo simples exponencial e que a equação pode ser aplicada em atmosferas de latitudes polar, temperadas e tropical. Kjaersgaard *et al.* (2007) ao avaliarem equações durante 32 anos obtiveram que a mesma é uma das quatro indicadas para ser utilizada na estimativa da  $L_d$  em regiões de clima temperado.

Sobrinho (2011) obteve para o modelo de Prata (1996) um ótimo desempenho para os dias de céu claro. Já nos experimentos realizados por Querino (2016) foi verificado subestimação do valor medido em mais de 10 Wm<sup>-2</sup> durante a madrugada e superestimação a tarde.

A equação de Prata (1996) assume a forma:

$$L_d = (1 - (1 + \xi) * \exp[-(1.2 + 3 * \xi)^{\frac{1}{2}}])$$

Em que:  $\xi = 46.5 * \frac{ea}{Ta}$

### 2.9.12 Modelo de Lhommer *et al.* (2007)

Ao desenvolverem um estudo sobre as transferências radiativas em várias regiões dos Andes entre Bolívia e o Peru, estes autores obtiveram um modelo para estimar L<sub>d</sub> em função dos parâmetros micrometeorológicos da pressão d' vapor de água em (mb) e temperatura do ar próximo a superfície em (K) para condições de céu claro. Nas avaliações de Sobrinho (2011) esta equação apresentou um ótimo resultado para diferentes condições de nebulosidade.

A equação de Lhommer *et al.* (2007) assume a forma:

$$L_d = 1.18 * \left(\frac{ea^{\frac{1}{7}}}{Ta}\right) 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$$

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Caracterização Geográfica e Climatológica de Petrolina

O município de Petrolina está localizado na região semiárida do estado de Pernambuco, a qual faz parte da Região de Desenvolvimento - RD, do Sertão do São Francisco, a qual se constitui, uma das doze regiões do desenvolvimento. Distante 712 Km<sup>2</sup> da capital Recife.

**Tabela 1.** Informações Geográficas de Petrolina

<b>Unidade Federativa</b>	<b>Pernambuco (PE)</b>
<b>Mesorregião</b>	Sertão Pernambucano
<b>Microrregião</b>	Petrolina
<b>Região de Desenvolvimento</b>	Sertão do São Francisco

<b>Municípios Limítrofes</b>	Dormentes (N); estado da Bahia (S), Lagoa Grande (L) estado da Bahia e Afrânio (O)
<b>Acesso Rodoviário</b>	BR232/110; PE360; e BR316/428/122
<b>Data da Instalação</b>	21/09/1970.
<b>Gentílico</b>	Petrolinense

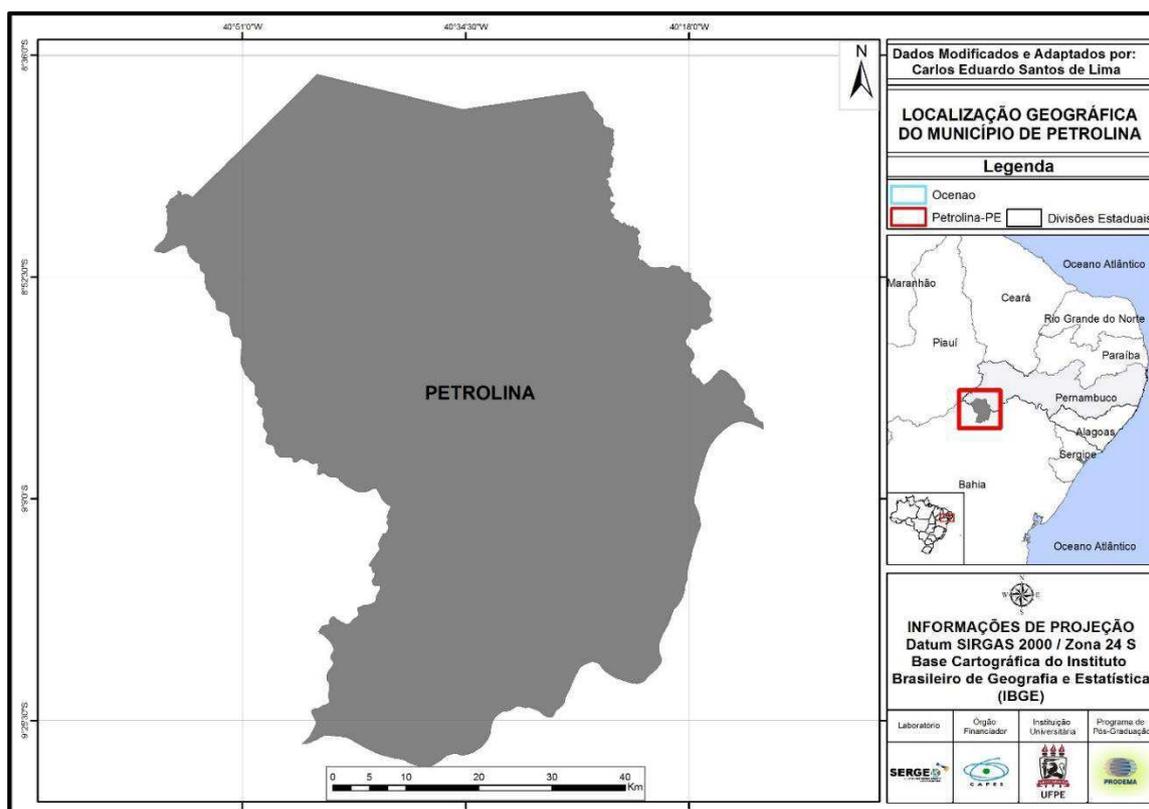
**Fonte:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2012; Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, 2010.

**Tabela 2.** Coordenadas geográficas de Petrolina

COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE PETROLINA

Território	4.558,40 Km <sup>2</sup>
Altitude	376 m
Latitude	09°23'55" S
Longitude	40°30'03" O

**Fonte:** IBGE, 2017.



**Figura 5 -** Mapa da Localização de Petrolina

### 3.2 Vegetação Característica

A vegetação nativa e predominante em Petrolina é a Caatinga, que é composta por espécies hiperxerófilas, com forte presença de arbustos com galhos retorcidos e com raízes profundas. As espécies em abundância são os cactos, caroá, angico, juazeiro, mandacaru e xique-xique (PERNAMBUCO, 2012).

### 3.3 Relevo

Petrolina está inserida na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, com paisagem típica do semiárido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Elevações residuais, cristas e/ou outeiros pontuam a linha do horizonte.

### 3.4 Solos

Os solos encontrados em Petrolina são dos tipos: Planossolos, Solonetz Solodizados, Areias Quartzosas, Cambissolos, Latossolos Amarelos, Brunos Não Cálcicos, Podzólicos Amarelos, Podzólicos Vermelho-Escuros, Cambissolos. Bons solos e abundância de recursos hídricos para irrigação, sendo mais de 70 mil hectares irrigados, com capacidade para 200 mil hectares irrigáveis, com insolação de 3.000 horas/ano (EMBRAPA, 1999).

### 3.5 Hidrografia

Petrolina encontra-se inserida nos domínios da Macro Bacia do Rio São Francisco, da Bacia Hidrográfica do Rio do Pontal e do Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores.

**Tabela 3.** Caracterização Hidrográfica de Petrolina

<b>Características Hidrográficas de Petrolina</b>	<b>Unidades</b>
Demanda Urbana de Água	985 Lts/s.
Precipitação Pluviométrica	281,60 mm em 2011.
Participação do Manancial na oferta de Água	100%.
Situação do Manancial	Requer Ampliação.

**Fonte:** Agência Nacional de Águas – ANA, 2011.

### 3.6 Estação SONDA de Petrolina- Climatologia Local

O clima em Petrolina é do tipo tropical semiárido seco e quente na parte norte e semiárido quente estépico na parte sul. Caracteriza-se pela escassez e irregularidade

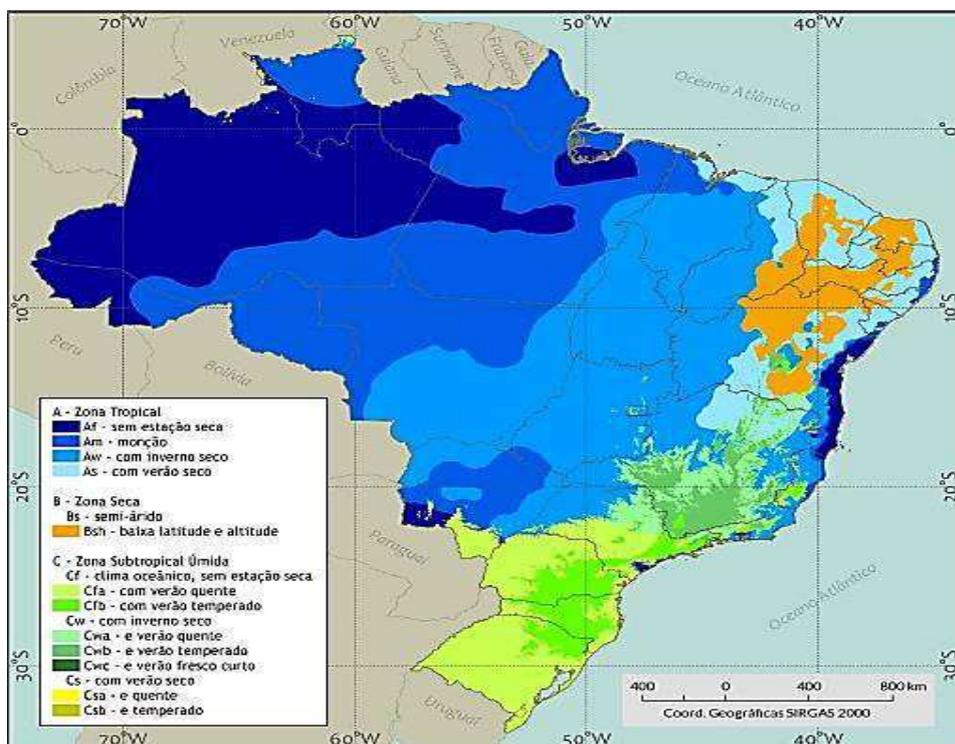
pluviométrica, forte evaporação em consequência das altas temperaturas no verão. O total anual médio de precipitação pluvial é da ordem de 560mm. As chuvas ocorrem de janeiro a abril devido ao deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em direção ao Hemisfério Sul, que influencia na convergência de umidade e da convecção local. Março e agosto são os meses com a maior e a menor precipitação, com totais médios de 136 mm e 5mm, respectivamente. A Figura 6 ilustra as Médias mensais climatológicas para Petrolina.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Máxima (°C)	32,5	32,5	32,0	31,5	31,0	30,0	29,7	31,0	32,8	34,0	34,0	33,5
Temperatura Mínima (°C)	21,5	21,5	21,5	21,0	20,0	19,0	18,0	18,5	20,0	21,2	22,0	22,0
Temperatura Média (°C)	27,0	27,0	26,4	26,0	25,4	24,5	24,0	25,0	26,5	27,8	28,0	27,5
Precipitação Média (mm)	88,0	79,0	130,0	75,0	20,0	12,0	18,0	18,5	20,0	10,0	45,0	64,0
Umidade Relativa (%)	68,0	68,0	72,0	73,0	70,0	69,0	67,0	62,0	58,0	56,0	58,0	63,0

**Figura 6** - Médias mensais climatológicas para Petrolina – PE.

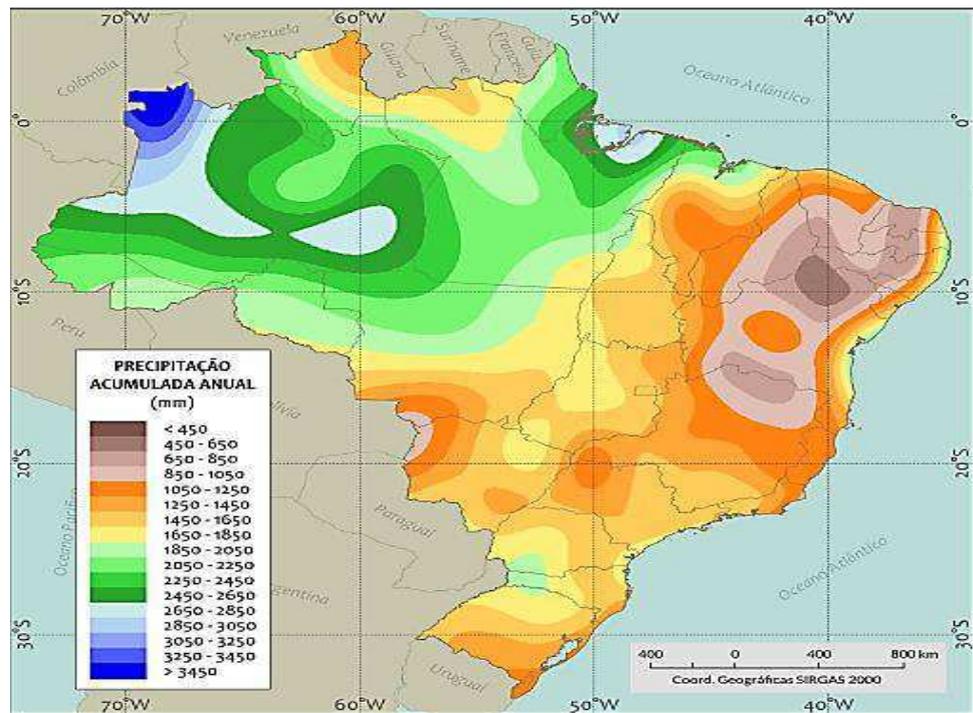
**Fonte:** SONDA, 2018.

Nos meses mais úmidos, a umidade relativa do ar varia, em média, entre 66% e 72%. Os menores valores acontecem nos meses mais quentes, de setembro a novembro, quando a umidade atinge valores abaixo de 55%. A umidade relativa atinge os maiores valores em abril, que corresponde ao fim do período chuvoso. A temperatura do ar apresenta variações médias entre 24°C e 28°C, sendo julho o mês mais frio e novembro o mês mais quente do ano.



**Figura 7**- Classificação climática para o Brasil segundo Köppen.

**Fonte:** Vianello e Alves, 2013.

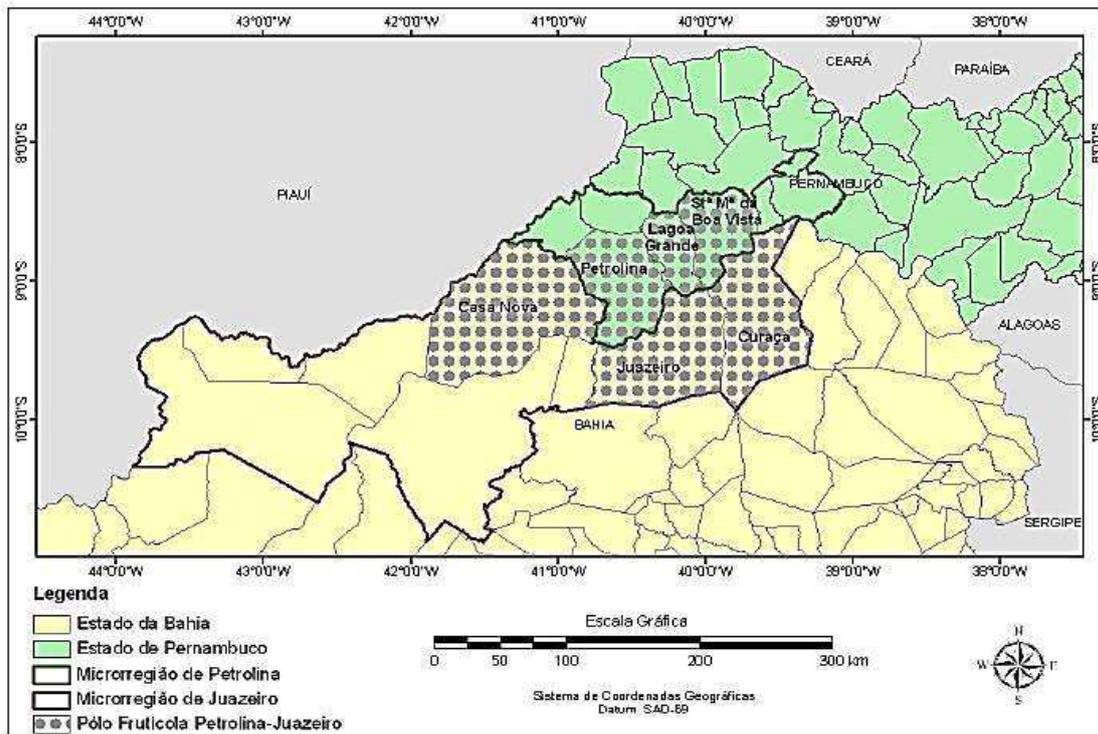


**Figura 8** - Normal climatológica de precipitação anual.  
**Fonte:** INMET, 2016.

### 3.7 Caracterização da Área de Estudo: Petrolina no Contexto Estadual e Regional

O Submédio do rio São Francisco (Polo Juazeiro-BA e Petrolina-PE) tem na agropecuária o setor mais importante na base socioeconômica, proporcionando a geração de empregos, decorrentes das vantagens oferecidas pelos recursos do solo, clima e da própria presença deste rio. Neste contexto, criou-se um ambiente propício para implantação de vários perímetros irrigados, responsáveis pela concretização agrícola no contexto agroindustrial, com exportações em rede nacional e internacional.

Este município a partir dos anos sessenta vem passando por uma expansão em todos os âmbitos socioeconômicos, com destaque para a agricultura irrigada, que está transformando as áreas semiáridas da caatinga em áreas de grande produção de frutas. O total de área irrigável é de 44. 106 hectares, do qual se destaca o projeto Senador Nilo Coelho, com cerca de 18. 563 hectares. Dessa forma, a fruticultura irrigada se tornou a principal fonte de renda em Petrolina, conferindo ao município o reconhecimento de um expressivo polo de exportação de frutas tropicais (SOUSA CRUZ, 2013).



**Figura 9** - Localização do polo frutícola de Petrolina.

**Fonte:** IBGE, malha municipal, 2001.

Relacionada a esta questão Silva (2001) explica que a própria forma de condução das políticas públicas criou as condições propícias para que Petrolina, viesse a adquirir a devida centralidade socioeconômica. Em que, a concentração de investimentos públicos em perímetros irrigados, adequou este município a infraestrutura necessária para seu desenvolvimento, bem como a forte presença de várias instituições públicas, a exemplo: a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e da Parnaíba- CODEVASF. Constituindo-se, juntamente com Juazeiro da Bahia, o polo de irrigação mais desenvolvido dos 24 perímetros irrigáveis do Vale do São Francisco (COELHO, 2007).

De acordo com a CODEVASF existe a produção de vinte e nove tipos de frutas, com destaque para: acerola, banana, coco, goiaba, graviola, limão, mamão, manga, maracujá, pinha e uva. A produção de frutas no total das áreas cultivadas nos perímetros varia entre 98% e 100%. A fruticultura é expressa em um conjunto de atividades inter-relacionadas, compondo-se de diversos atores, culturas e formas de organização. Os produtores de frutas, são tanto os pequenos produtores dos projetos públicos de irrigação com propriedades de 6,5 hectares em média, como também grandes empresários, com mais de 500 hectares irrigados.



**Figura 10** - Vista do rio São Francisco e áreas irrigadas em Petrolina.

**Fonte:** Disponível em: [www.contrafluxo.com.br](http://www.contrafluxo.com.br).

Em termos logísticos, destacam-se as rodovias, os portos marítimos e aeroportos. Também há opção para transporte ferroviário e hidroviário. Para o transporte rodoviário, há rodovias permitindo boa capilaridade. O transporte hidroviário possibilita o escoamento da produção de grãos do oeste baiano até os portos de Petrolina e Juazeiro. A hidrovía liga mais de 1.300 km, desde Pirapora – MG até Santa Maria da Boa Vista (PE). O Rio São Francisco é navegável por mais 100 km à jusante de Petrolina e Juazeiro.

Conforme explicitado na (Tabela 4) Petrolina apresenta um Produto Interno Bruto- PIB de R\$ 3. 149 milhões, representando a sexta maior economia do estado de Pernambuco.

**Tabela 4.** PIB e VAP de Petrolina-PE.

Produto Interno Bruto (PIB) - 2010	Petrolina	RD	Pernambuco
PIB (em R\$ milhões)	3.149	4.156	95.187
PIB per capita (em R\$ 1,00)	10.712	9.557	10.822
Participação no PIB do estado (%)	3,31	4,37	100,00
% da Agropecuária no VAB	21,54	24,38	4,49
% da Indústria no VAB	14,46	13,32	22,14
% dos Serviços no VAB	64,00	62,30	73,37

**Fonte:** Agencia CONDEPE/FINDEM (2013).

### 3.8 Informações Agrometeorológicas de Petrolina para o Período de 1968 a 2009

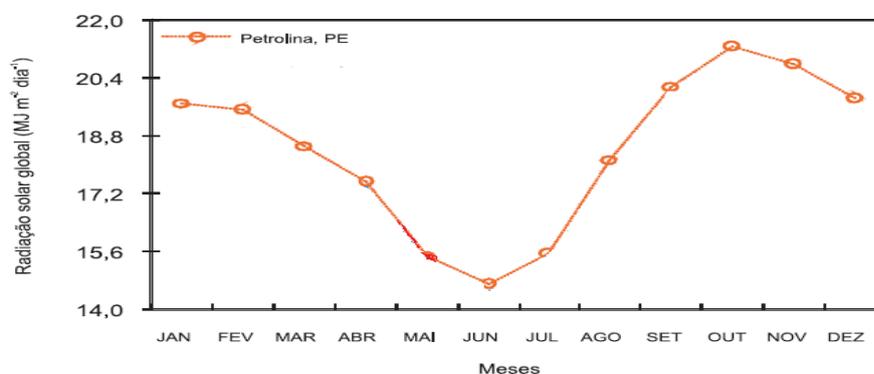
Excluindo locais de altitude elevada, todo o centro de desenvolvimento de Petrolina, apresenta médias anuais de temperatura do ar acima de 24 °C, e até maiores que 26 °C nas

depressões de 200 m a 250 m de altitude (TEIXEIRA, 2009). O clima da região que compreende o centro de desenvolvimento, é do tipo BSw, correspondendo a uma região de clima árido.

Sua homogeneidade térmica contrasta fortemente com a heterogeneidade espaço/temporal do regime pluviométrico, mesmo, apresentando uma pequena amplitude térmica e elevadas taxas de radiação solar em conjunto com elevadas temperaturas nos momentos de culminação do Sol são significantes, pela intensificação da evapotranspiração (TEIXEIRA, 2010).

### 3.8.1 Radiação solar global

Conforme explicitado na (Figura 10) os maiores valores da radiação solar global para o período de 1965 a 2009 em Petrolina são  $21.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ( $508 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $20.6 \text{ MJ m}^{-2}$  registrados no mês de outubro, enquanto os menores acontecem no mês de junho, em torno de  $14,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  ( $351 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ).

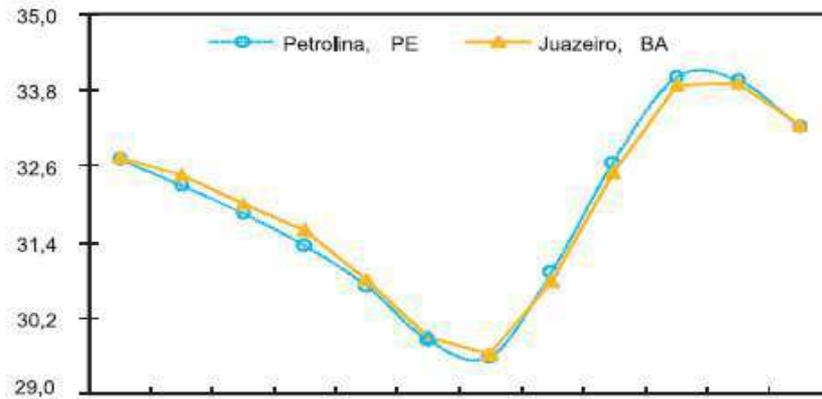


**Figura 11** - Normais de radiação solar global do período de 1968 a 2009 em Petrolina.  
**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

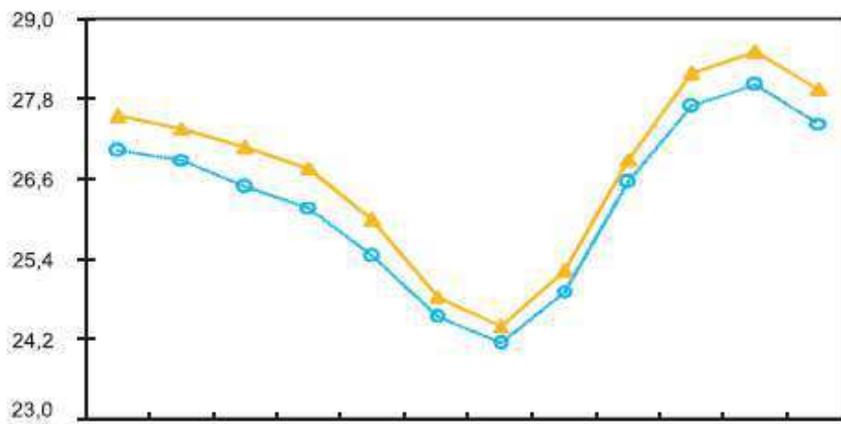
### 3.8.2 Temperatura do ar

A variação anual média dos dados de temperatura máxima, média e mínima do ar na estação de Petrolina para o período de 1965 a 2009 variaram de  $24,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $28,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , enquanto que as de temperatura máxima e mínima variaram de  $29,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $34,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e de  $18,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $22,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

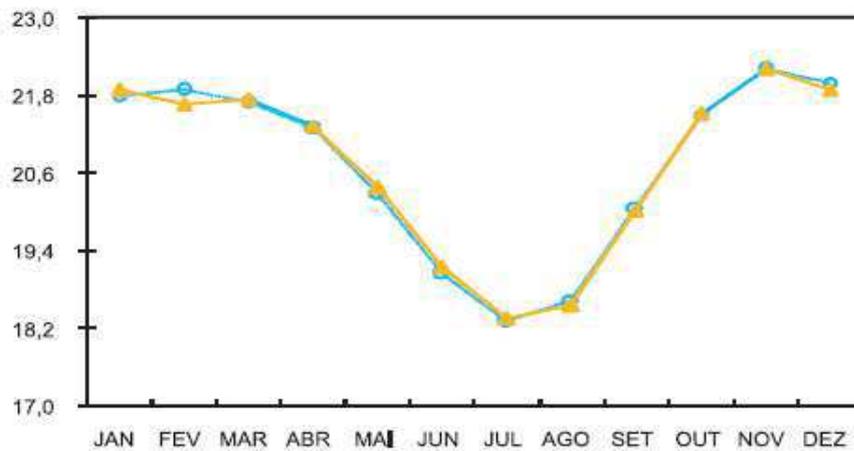
Configurou-se uma pequena amplitude térmica anual, atribuída à proximidade da região em relação ao equador terrestre, com desvio padrão menor que  $2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  e coeficiente de variação máximo  $6.0$ . Os meses mais quentes são outubro e novembro, que coincidem com a época em que o Sol está culminando na região e os mais frios são junho e julho, quando o Sol está culminando no Trópico de Câncer.



12 (a)



12(b)



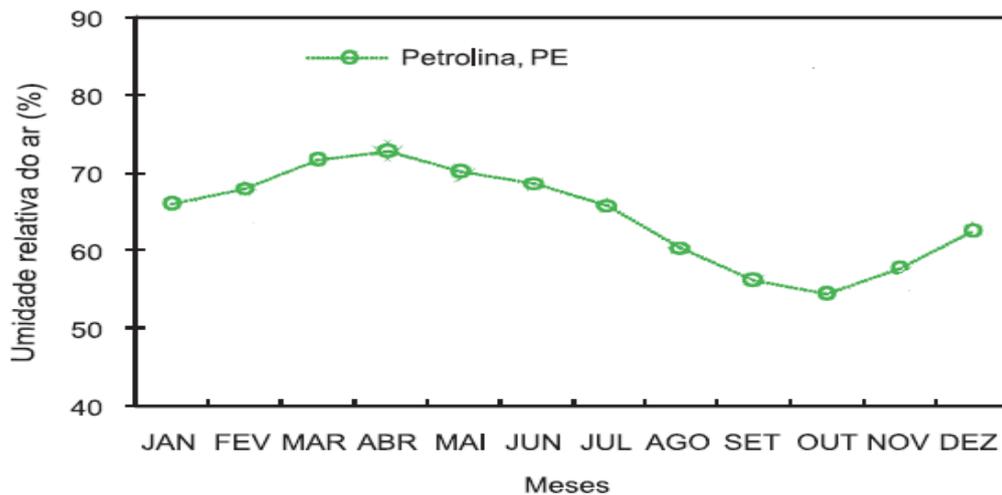
12(c)

**Figura 12** - Normais de temperatura máxima 12 (a), temperatura média 12 (b) e temperatura mínima 12 (c) para o período de 1965/2009 das estações agrometeorológicas de Bebedouro (Petrolina, PE) e de Mandacaru (Juazeiro, BA).

**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

### 3.8.3 Umidade Relativa do ar

Nas regiões semiáridas, elevados valores do déficit de pressão de vapor, que estão associados a baixos valores de umidade relativa do ar, promovem altas taxas evaporativas. Os dados de umidade relativa do ar para o período de 1964 a 2009 são apresentados na (Figura 13).



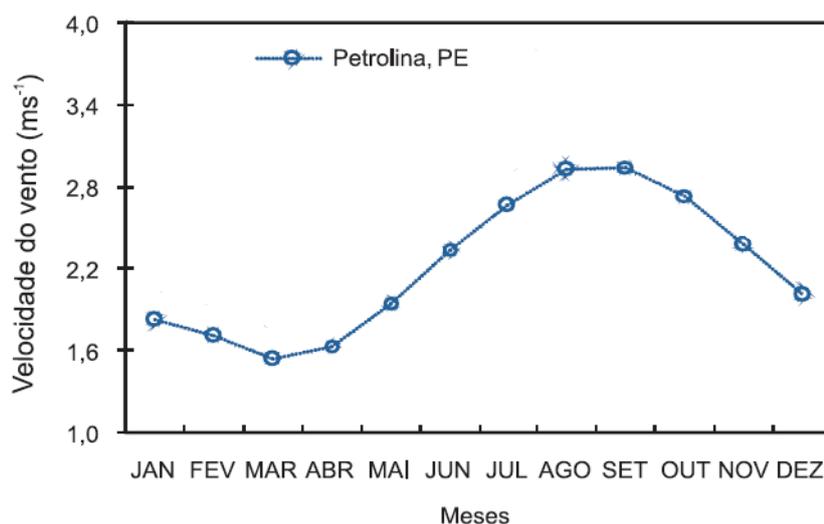
**Figura 13** - Normais de umidade relativa do ar do período de 1964/ 2009 da estação agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE).

**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

Os meses mais úmidos correspondem ao período chuvoso. Onde na estação de Bebedouro a umidade relativa do ar varia em média de 66% a 73%. Os menores valores ocorrem no período de setembro a novembro, abaixo de 55%, coincidindo com o período mais quente do ano. O mês mais úmido é abril que corresponde ao final do período chuvoso e, o mais seco é outubro, correspondendo ao final do período de ausência de chuvas. A localização da estação de Bebedouro em relação ao rio São Francisco proporciona valores mais elevados da umidade do ar.

### 3.8.4 Velocidade do vento

A (Figura 14) apresenta o comportamento das normais mensais de velocidade do vento a 2.0 m de altura em relação à superfície do solo em  $\text{ms}^{-1}$  para o período de 1965 a 2009. Em que os valores mais elevados de velocidade do vento ocorrem no período seco, entre os meses de agosto a outubro, chegando a  $3.0 \text{ ms}^{-1}$  ( $256 \text{ km dia}^{-1}$ ) em Bebedouro. Os menores valores ocorrem no período chuvoso apresentando valores médios de  $1.6 \text{ m s}^{-1}$  ( $134 \text{ km dia}^{-1}$ ) no mês de março.

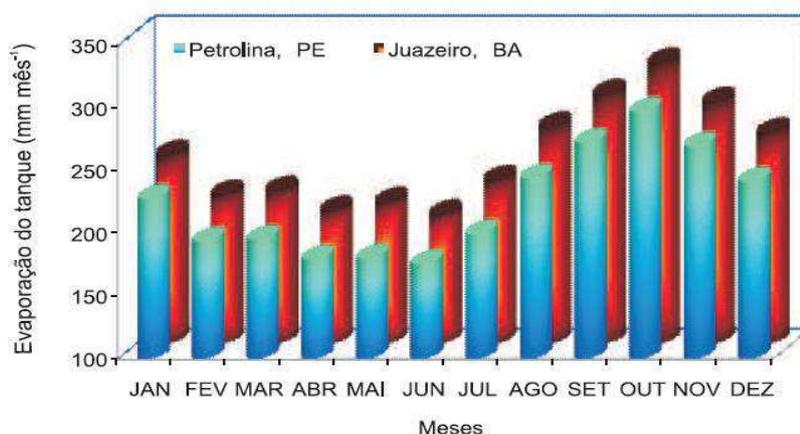


**Figura 14** - Normais de velocidade do vento do período de 1965/2009 da estação agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE).

**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

### 3.8.5 Evaporação

Os dados de evaporação são importantes para o conhecimento das reais disponibilidades hídricas da região, representando a água que é perdida para a atmosfera por uma superfície livre de água. Em Petrolina para o período de 1963 a 2009 as normais de evaporação apresentaram os menores valores entre os meses de março a julho. Neste período, em Bebedouro houve variação em média de 5.9 mm dia<sup>-1</sup> a 6.4 mm dia<sup>-1</sup>. Maiores valores evaporativos acontecem entre os meses de setembro a outubro, acima de 9,0 mm dia<sup>-1</sup>. Os totais anuais são extremamente altos com médias anuais de 2.683 mm.



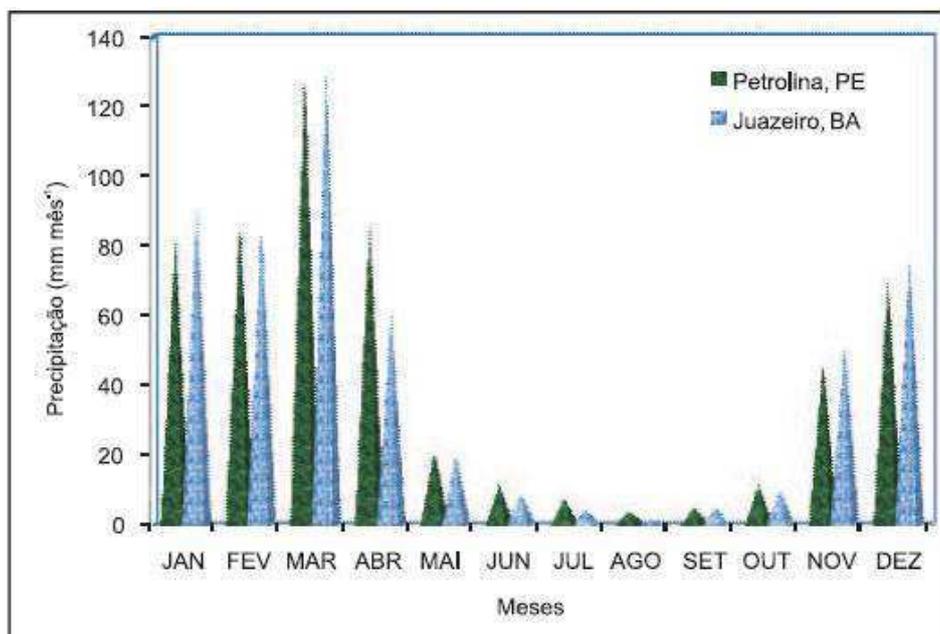
**Figura 15** - Histograma de evaporação do tanque Classe “A” no período de 1963/2009 das estações agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina, PE) e de Mandacaru (Juazeiro, BA).

**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

### 3.8.6 Precipitação

Na avaliação da disponibilidade hídrica, a precipitação representa a entrada de água para os ecossistemas naturais. Uma elevada quantidade é favorável à manutenção dos ecossistemas, incluindo o consumo humano, entretanto, excesso de precipitação pode causar danos diretos às culturas agrícolas, bem como prejudicar a produtividade. A escassez de chuvas na região semiárida sob condições de irrigação é, portanto, favorável à agropecuária.

Constituindo-se é o elemento meteorológico de maior variabilidade espaço/temporal no semiárido. Para o período de 1963 a 2009 o total anual médio foi da ordem de 549 mm. A quadra chuvosa, de janeiro a abril, contribui com 70% do total anual, destacando-se os meses de março e agosto, como o mais e o menos chuvoso, com totais médios de 128.4 mm e 4.3 mm, respectivamente.



**Figura 16** - Histogramas de precipitação pluvial do período de 1963/2009 das estações agrometeorológicas de Bebedouro (Petrolina, PE) e de Mandacaru (Juazeiro, BA).

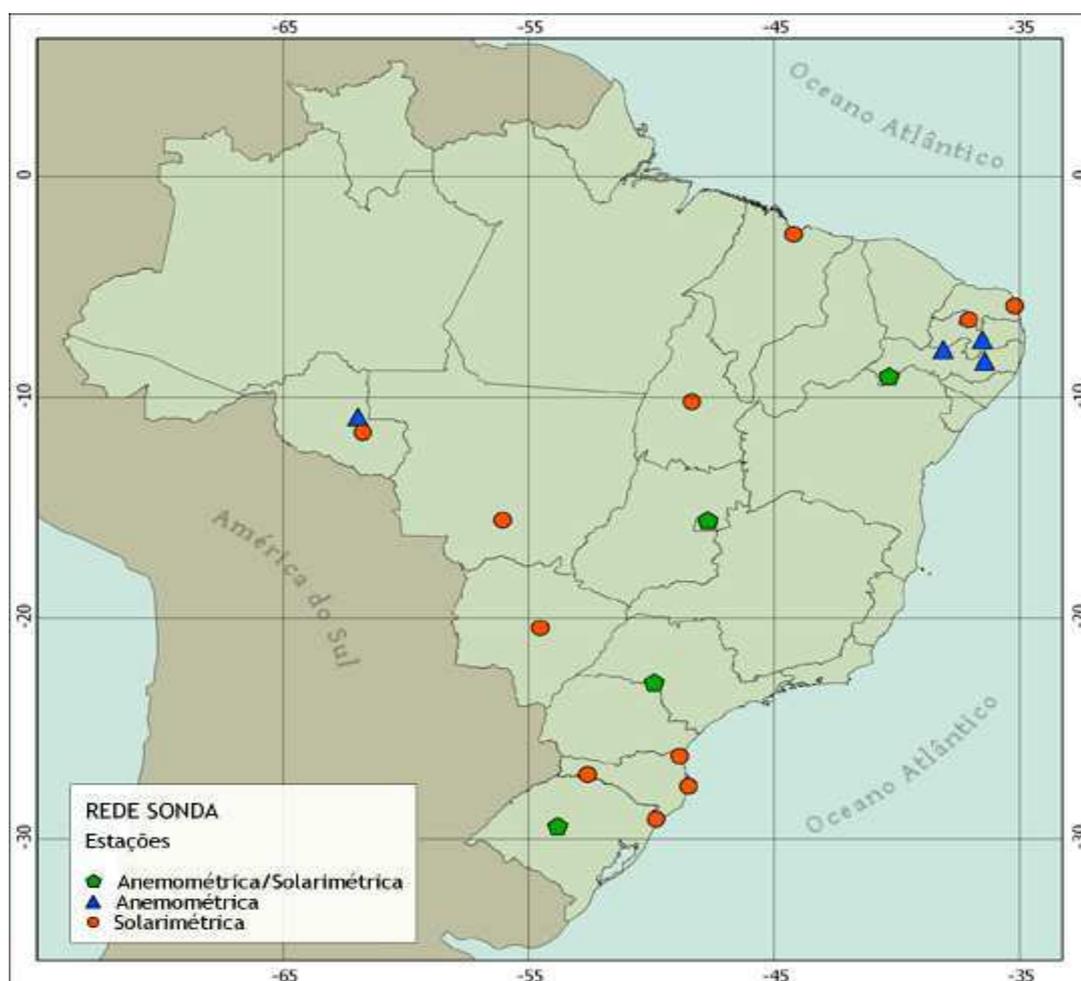
**Fonte:** EMBRAPA, semiárido 2010.

### 3.9 Obtenção dos Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram adquiridos do projeto SONDA, que tem como principal objetivo implementar uma infraestrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento dos recursos de energia solar e eólica no Brasil e consequente planejamento de seu uso. Pois, de acordo com o levantamento extensivo realizado pelo INPE e publicado no

relatório “Solar and Wind Energy Resource Assessment” (Pereira ISBN 85-17-00002-1 de novembro de 2000), a base de dados de superfície necessária a validação desses modelos é extremamente deficiente no Brasil e em toda a América Latina.

Os sensores existentes em cada estação determinam quais variáveis são medidas em cada caso. Antes de disponibilizados, os dados das estações SONDA passam por um processo de validação com o objetivo de endossar sua confiabilidade. A validação sinaliza onde pode ou não haver suspeita de incorreção através de códigos numéricos com 4 dígitos armazenados em arquivos próprios. Em que, cada dado possui um código sinalizador que o qualifica, e cada arquivo de dados possui seu arquivo de validação correspondente, os dados em si não são modificados.



**Figura 17** - Mapa de distribuição das estações da rede SONDA.  
**Fonte:** SONDA, 2018.



**Figura 18** - Torre anemométrica ao fundo e pluviômetro (Abril /2007).  
**Fonte:** SONDA, 2018.



**Figura 19** - Vista do rastreador solar da estação meteorológica de Petrolina, com os três rastreadores solares: o pirgeômetro, o piranômetro e o pireliômetro.  
**Fonte:** SONDA, 2018.

### 3.10 COBERTURA DO CÉU

#### 3.10.1 Cálculo do Índice Claridade - Kt

Com o intuito de atingir o melhor resultado nas avaliações dos modelos da  $L_d$  foi realizado o cálculo do Índice de Claridade - Kt para o período estudado, já que em sua maioria estes modelos só têm validade para condições de céu claro, dessa forma foram selecionados os dias de céu claro, céu parcialmente nublado e céu nublado.

A cobertura do céu pode ser expressa em termos do índice de transmissividade atmosférica (Nkemdirim,1972). Definida como a razão entre a radiação solar global incidente ( $R_g$ ) em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e a irradiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ) dada em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

A equação usada foi a de Iqbal (1983) que assume a forma:

$$Kt = \frac{R_g}{R_o} \quad (2)$$

A classificação da cobertura do céu (Kt) foi feita de acordo com Dallacor *et al.* (2004) que no intervalo de  $0 \leq KT \leq 0,3$  foi definido como céu nublado, entre  $0,3 \leq KT \leq 0,65$  como céu parcialmente nublado e entre  $0,65 \leq KT \leq 1$  céu claro.

A irradiação no topo da atmosfera ( $R_o$ ) em ( $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) foi calculada pela (Eq. 3). Que depende da latitude ( $\phi$ ), da correção da excentricidade da órbita terrestre ( $dr$ ) (Eq. 4), da declinação solar ( $\delta$ ) (Eq. 5) e do ângulo horário ( $h$ ) (Eq. 6).

$$R_o = \frac{1367}{\pi} * 86400 * dr * \left( \left( \frac{\pi}{180} \right) * h * \text{sen}\phi * \text{sen}\delta + \text{cos}\phi * \text{cos}\delta * \text{sen}h \right) \quad (3)$$

$$dr = 1 + 0,033 * \left( \frac{360 * dn}{365} \right) \quad (4)$$

Em que:

dn é o dia de ordem do ano de acordo com o calendário juliano.

$$\delta = 23,45 * \sin \left( \frac{360}{365} * (dn + 284) \right) \quad (5)$$

$$h = \cos^{-1}(-\text{tg}\phi * \text{tg}\delta) \quad (6)$$

### 3.11 Estimativa dos Parâmetros Atmosféricos de Entrada dos Modelos da Radiação de onda longa atmosférica.

#### 3.11.1 Pressão d' vapor da água

A pressão d' vapor da água foi um dos parâmetros atmosféricos de entrada dos modelos para estimativa da  $L_d$ , exceto (Swinank 1963, Idso e Jacson 1969 e Zillman 1972). Para tanto, foi calculada em função da umidade relativa do ar (UR) e pressão de vapor de saturação ( $es$ ). Radel *et al.* (2015) destacam a importância do vapor d' água para atmosfera, pois consiste em um dos principais gases absorvedores e emissores da  $L_d$ , sendo peça fundamental no balanço radiativo.

A pressão d' vapor de água é sempre menor que a pressão de saturação do vapor d' água ( $es$ ) em  $mb$  é expressa pela equação polinomial desenvolvida por Tetens (1930) com a temperatura do ar em graus Celsius, que assume a forma:

$$es = 6,108 * 10 \left[ \frac{7,5*ta}{237,3+ta} \right] \quad (7)$$

A equação para expressar a pressão de vapor foi:

$$ea = \frac{UR*es}{100} \quad (8)$$

Onde, UR é a umidade relativa do ar.

#### 3.11.2 Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica

A equação geral para o cálculo da Radiação de Onda Longa Atmosférica é dada pela equação de Stefan-Boltzmann que considera a emissividade do ar e a temperatura absoluta, assume a forma:

$$Ld = \sigma * \varepsilon * Ta^4 \quad (9)$$

Em que:  $\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$  é a constante de Stefan- Boltzmann e  $\varepsilon$  é a emissividade do ar.

Neste estudo foram avaliados 12 modelos em sua formulação original para a estimativa da  $L_d$ , conforme explicitados na (Tabela 5). Os cálculos foram feitos utilizando-se médias horárias e diárias das variáveis meteorológicas de (temperatura do ar à superfície, umidade relativa do ar, radiação global horizontal e radiação de onda longa atmosférica) para os dados

meteorológicos da estação SONDA de Petrolina. O período de Estudo compreendeu o ano de 2015, exceto o mês de novembro, uma vez que se teve aproximadamente (80%) de dados faltosos.

**Tabela 5:** Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica.

Autor:	Equação:	N°
Angstrom (1918)	$L_d = 0.82 - (0.25 * 10^{-0.168*ea}) * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(1)
Brunt (1932)	$L_d = 0.065 * \sqrt{ea} + 0.52 * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(2)
Efimos (1961)	$L_d = (0.746 + 0.0066 * ea) * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(3)
Swinbank (1963)	$L_d = 9 * 10^{-6} * Ta^6 * 5.67 * 10^{-8}$	(4)
Idso e Jacson (1969)	$L_d = (1 - 0.26 * \exp(-7.77 * 10^{-4} * (273 - Ta)^2 * 5.67 * 10^{-8} * Ta))$	(5)
Zillman (1972)	$L_d = 9.2 * 10^{-6} * Ta^2 * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(6)
Brutsaert (1975)	$L_d = 1.24 * \frac{ea^{\frac{1}{7}}}{Ta} * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(7)
Idso (1981)	$L_d = 0.7 + 5.95 * 10^{-5} * \left( ea * \exp\left(\frac{1500}{Ta}\right) \right) * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(8)
Berger <i>et al.</i> (1984)	$L_d = 0.66 + 0.04 * ea^{\frac{1}{2}} * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(9)
Berdal e Martin (1984)	$L_d = 0.56 + 0.059 * ea^{\frac{1}{2}} * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(10)
Prata (1996)	$L_d = (1 - (1 + \xi) * \exp\left[-(1.2 + 3 * \xi)^{\frac{1}{2}}\right])$	(11)
Lommer <i>et al.</i> (2007)	$L_d = 1.18 * \left(\frac{ea^{\frac{1}{7}}}{Ta}\right) * 5.67 * 10^{-8} * Ta^4$	(12)

### 3.12 Parâmetros Estatísticos de avaliação dos modelos

Para avaliar a concordância entre os valores estimados pelos modelos da  $L_d$  e os valores medidos na estação SONDA – Petrolina, foram utilizados diferentes critérios estatísticos : o coeficiente de correlação de Pearson (r); coeficiente de determinação-  $R^2$ , que variam entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita; Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM); Equação do Erro Médio Absoluto (EMA); Equação do Erro Percentual Relativo Médio (EPRM). Os valores de coeficiente de correlação encontrados foram classificados de acordo com a metodologia proposta por Hopkins (2008) conforme a Tabela 6.

**Tabela 6-** Classificação da correlação de Pearson

Coefficiente de correlação de Pearson r	Correlação
0 – 0,01	Muito Baixa
0,1– 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta

0,7 -0,9	Muito Alta
0,9 – 1,0	Quase perfeita

**Tabela 7.** Critérios estatísticos para a avaliação do desempenho dos modelos de radiação de onda longa atmosférica. Onde os sufixos  $P_i$  e  $O_i$  representam respectivamente a radiação estimada e medida.

Descrição	Sigla	Equação
Raiz do Erro Médio Quadrático	REMQ	$\sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}}$
Erro Médio Absoluto	EMA	$\frac{\sum P_i - O_i }{n}$
Erro Percentual Relativo Médio	EPRM	$\frac{100}{n} \sum \left  \frac{P_i - O_i}{O_i} \right $

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica para todas as condições de nebulosidade e sazonalidade.

Neste estudo foram avaliados doze modelos em sua formulação original para a estimativa da Radiação de onda longa atmosférica para o município de Petrolina: Angstrom (1918), Brunt (1932), Efimosa (1961), Swinbank (1975), Idso e Jacson (1969), Zillman (1972), Brutsaert (1975), Idso (1982), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984), Prata (1996) e Lommer *et al.* (2007), em que a validação do desempenho destas equações foi feita com os dados medidos do projeto SONDA.

O período de estudo compreendeu onze meses, de janeiro a dezembro de 2015, o mês de novembro não foi utilizado devido a falha de dados medidos na estação SONDA. As variáveis micrometeorológicas necessárias como parâmetros atmosféricos de entrada dos modelos da  $L_d$  incluíram a temperatura do ar próximo à superfície ( $T_a$ , K) e a pressão de vapor d' água ( $mb$ ). Exceto as equações de Idso e Jacson (1969), Swinbank (1963) e Zillman (1972) que utilizam unicamente a temperatura do ar como parâmetro de entrada. Os dados foram processados em médias horárias e diárias para o período de 24 horas.

A validação dos modelos foi realizada em três categorias:

**Categoria 1:** Levando-se em consideração todas as condições de nebulosidade e sazonalidade;

**Categoria 2:** Análise sazonal para o período seco e chuvoso;

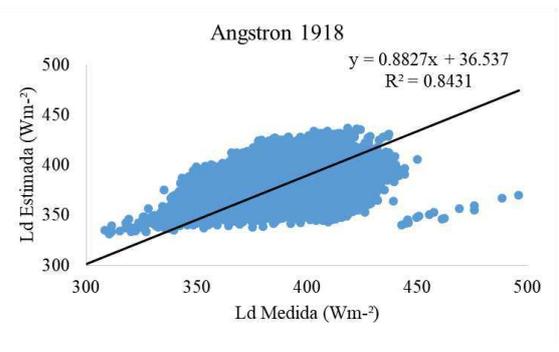
**Categoria 3:** Desempenho para diferentes condições de nebulosidade.

Para validação dos modelos foram utilizados diferentes parâmetros estatísticos, uma vez que a avaliação é uma etapa fundamental no processo de modelagem. Contudo, estes métodos foram desenvolvidos em condições climáticas específicas, existindo, portanto, a necessidade de testá-los em uma determinada região, através da comparação entre os valores estimados pelos modelos e medidos no Pirgeômetro. Dessa forma, é possível se obter os modelos apropriados a uma dada região climaticamente diferente.

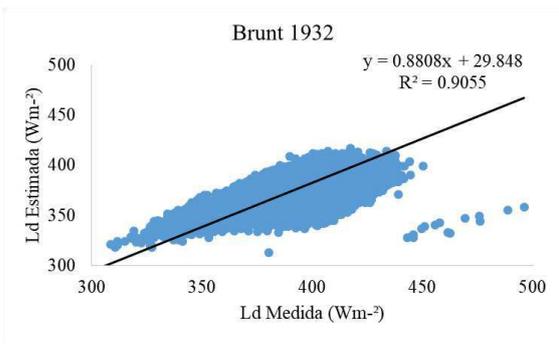
A emissão da  $L_d$  pela atmosfera depende da concentração instantânea dos constituintes radiativamente ativos, principalmente, a água seja qual for a sua fase. Com isso, a mesma sofre significativas variações causadas pelas mudanças da umidade específica e distribuição de gotículas de água. Para localidades em que a umidade relativa e precipitações são regularmente elevadas os modelos não apresentam um bom desempenho.

Neste contexto, Petrolina apresenta características climatológicas favoráveis para o bom funcionamento dos modelos, por apresentar altas temperaturas durante praticamente todo o ano e pouca presença de vapor d' água na atmosfera. Os modelos da  $L_d$  avaliados se mostraram sensíveis ao clima semiárido, refletindo de forma significativa a estimativa da radiação de onda longa atmosférica de acordo com a estatística aplicada.

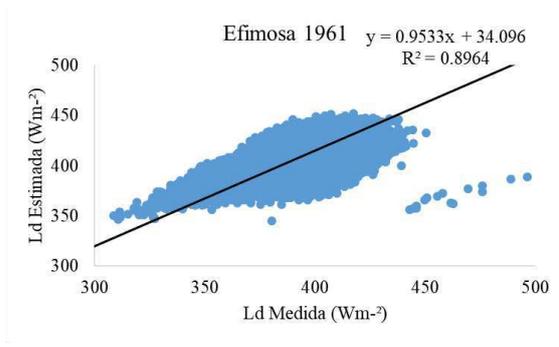
A regressão linear dos mínimos quadrados obtida entre fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados pelos modelos e os fluxos medidos, para todas as condições de nebulosidade são apresentados na (Figura 20). Em que os modelos que mais se aproximaram dos dados medidos da  $L_d$ , para média horária foram: Prata (1996), Brunt (1932), Idso (1981), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984), Brutsaert (1975), Efimosa (1961) e Lommer *et al.* (2007).



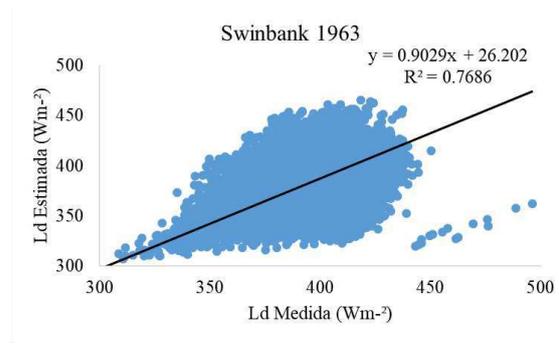
20:1



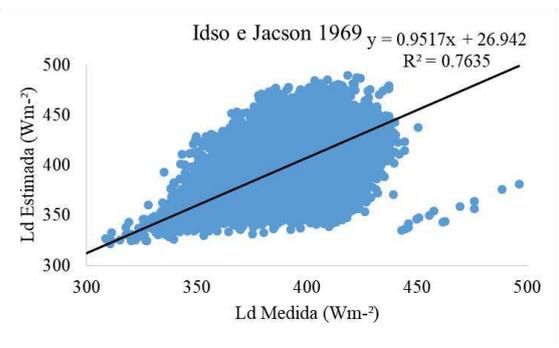
20:2



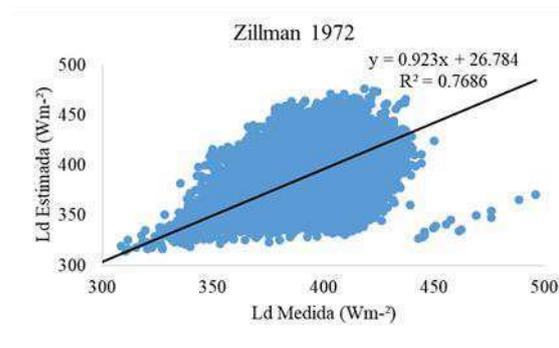
20:3



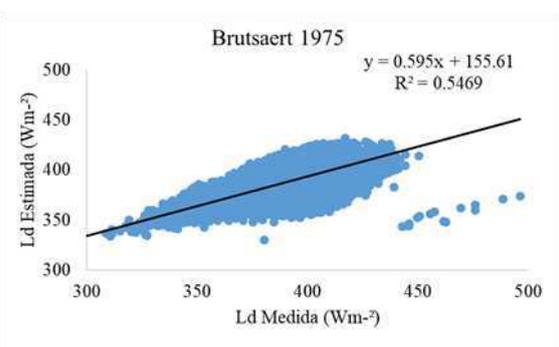
20:4



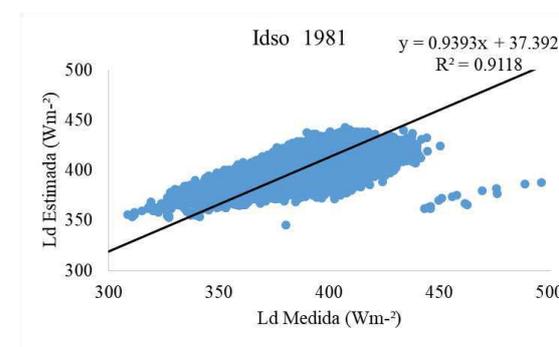
20:5



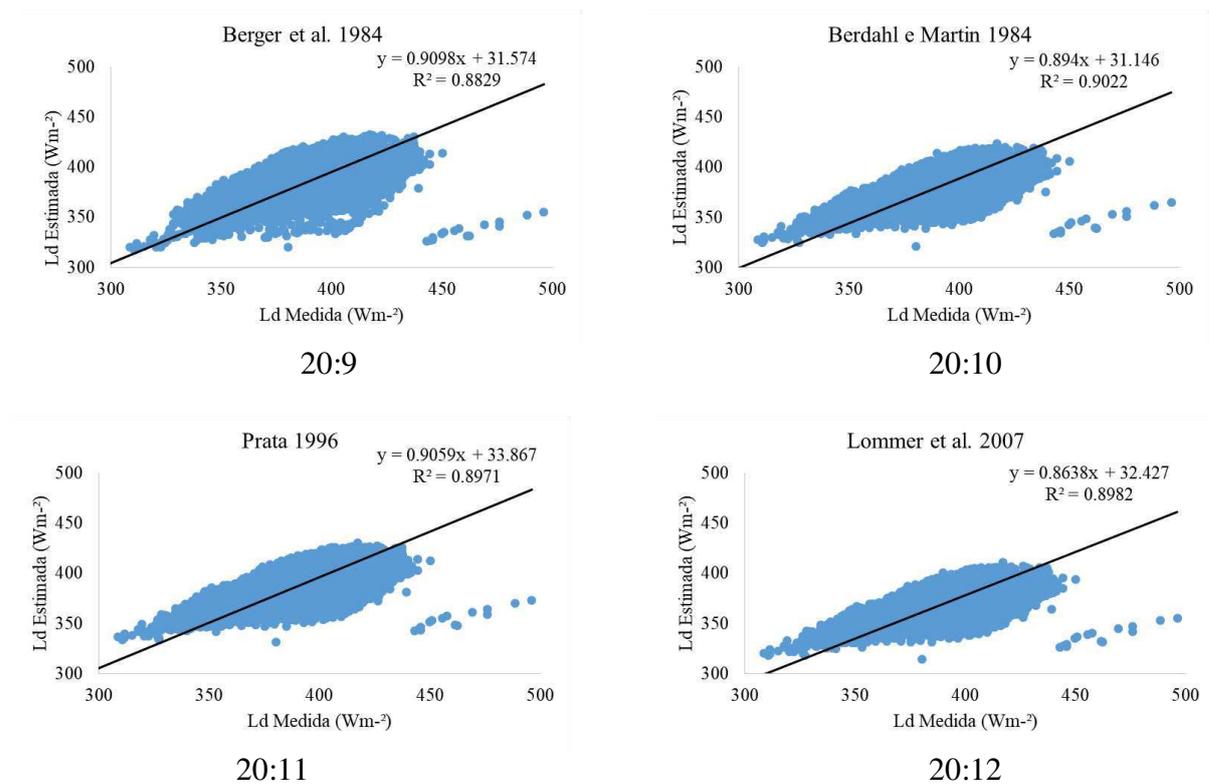
20:6



20:7

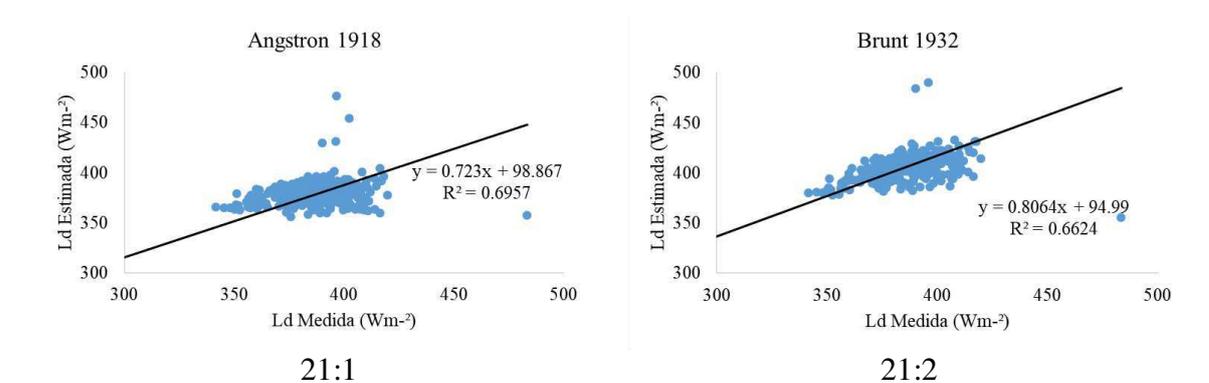


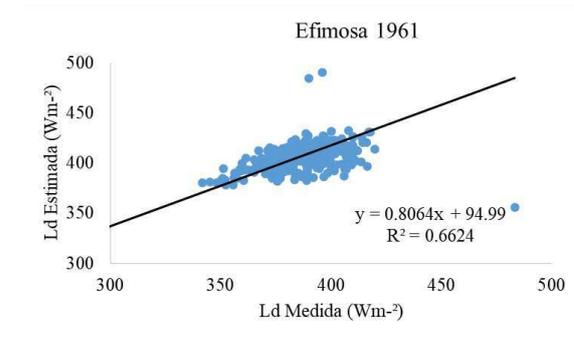
20:8



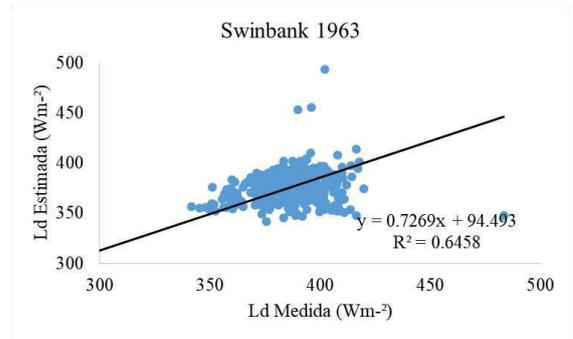
**Figura 20** - Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos para todas as condições de nebulosidade, média horária para 2015.

A (Figura 21) mostra os coeficientes de determinação para médias diárias, em que pode ser observado que o desempenho dos modelos é afetado em Petrolina, isto pode ser explicado pelo fato de que para média horária têm-se uma maior filtragem dos parâmetros atmosféricos. Contudo, isso não pode ser generalizado, por exemplo estudos realizados por (Patriota *et al.* 2017) para a estimativa da radiação de onda longa atmosférica em Brasília com estes mesmos modelos, comprovaram um melhor desempenho para médias diárias.

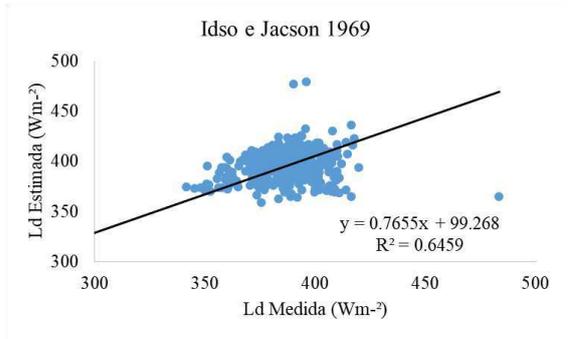




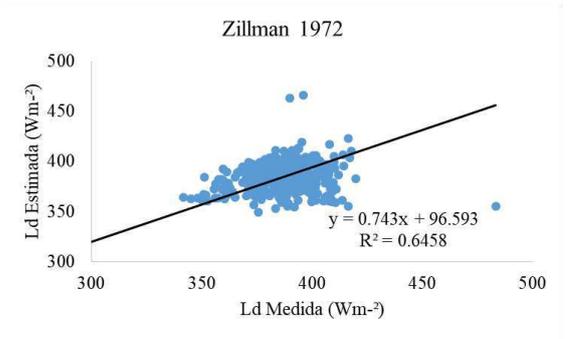
21:3



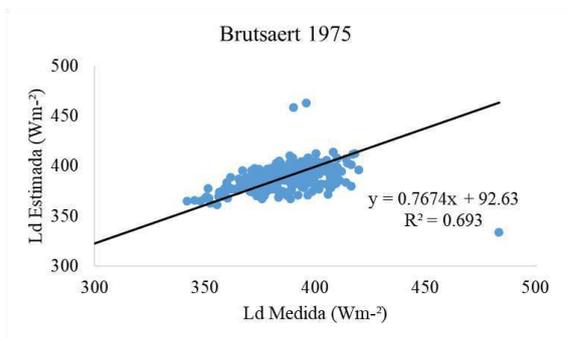
21:4



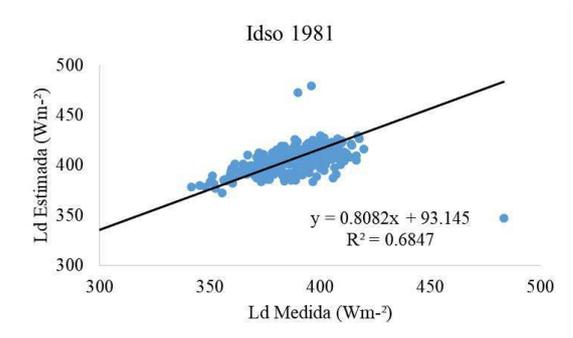
21:5



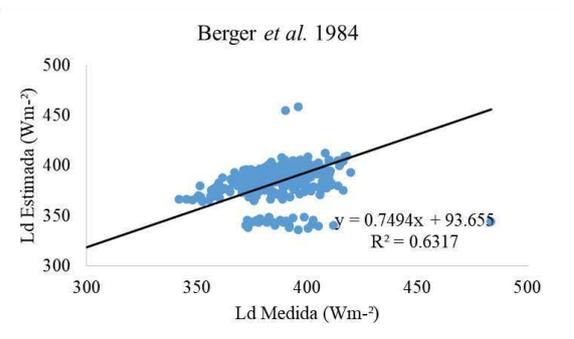
21:6



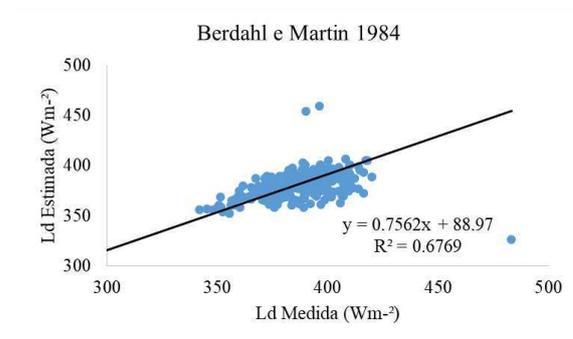
21:7



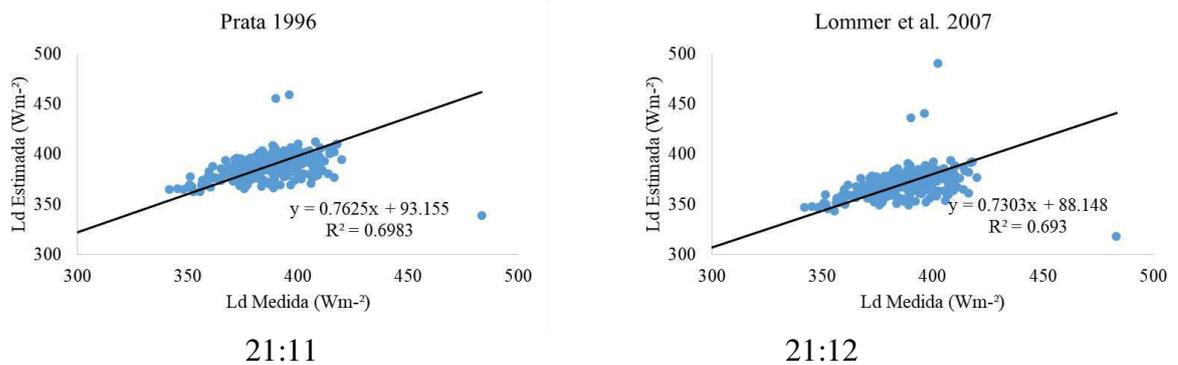
21:8



21:9



21:10



**Figura 21** - Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos para todas as condições de nebulosidade, média diária para 2015.

A Tabela 8 ilustra os parâmetros estatísticos de validação dos modelos para médias horárias e diárias. De acordo com a classificação de Pearson da (Tabela 6) as equações de Angstrom (1918), Brunt (1932), Efimosa (1961), Idso (1981), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984), Prata (1996) e Lommer *et al.* (2007) para média horária apresentaram uma correlação quase perfeita, e os modelos de Swinbank (1963), Idso e Jacson (1969) e Brutsaert (1975) apresentaram uma correlação muito alta. Já para média diária os dozes modelos apresentaram correlação muito alta.

Os melhores resultados para média horária, que resultaram nos menores REMQ, MAE e EPRM, foram obtidos pelas equações de Angstrom (1918), Brunt (1932), Efimosa (1961), Brutsaert (1975), Idso (1981), Prata (1996), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984) e Angstrom (1918) para média horária. Já para média diária foram as equações de Swinbank (1961), Zillman (1972) e Idso e Jacson (1969) que utilizam em sua formulação apenas a temperatura do ar próximo à superfície.

**Tabela 8:** Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, médias diárias e horárias para o ano de 2015.

Ano	2015							
Média	Horária				Diária			
Modelos	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r
Angstrom (1918)	24,76	18,41	4,36	0,92	27,98	16,22	3,75	0,83
Brunt (1932)	23,78	16,99	5,98	0,95	30,29	15,05	3,69	0,82
Efimosa (1961)	25,27	22,00	5,94	0,95	36,80	22,99	5,62	0,81
Swinbank (1975)	31,54	24,34	6,32	0,88	31,21	19,07	4,96	0,80
Idso e Jacson (1969)	32,43	25,68	6,73	0,87	31,79	16,91	2,99	0,80
Zillman (1972)	30,23	23,42	6,73	0,88	30,00	17,23	4,15	0,80
Brutsaert (1975)	18,36	14,30	3,75	0,74	28,04	12,90	2,98	0,83
Idso (1982)	22,66	19,24	5,25	0,95	34,91	21,50	5,23	0,83
Berdahl e Martin (1984)	20,53	14,26	3,70	0,94	28,74	13,39	3,05	0,79

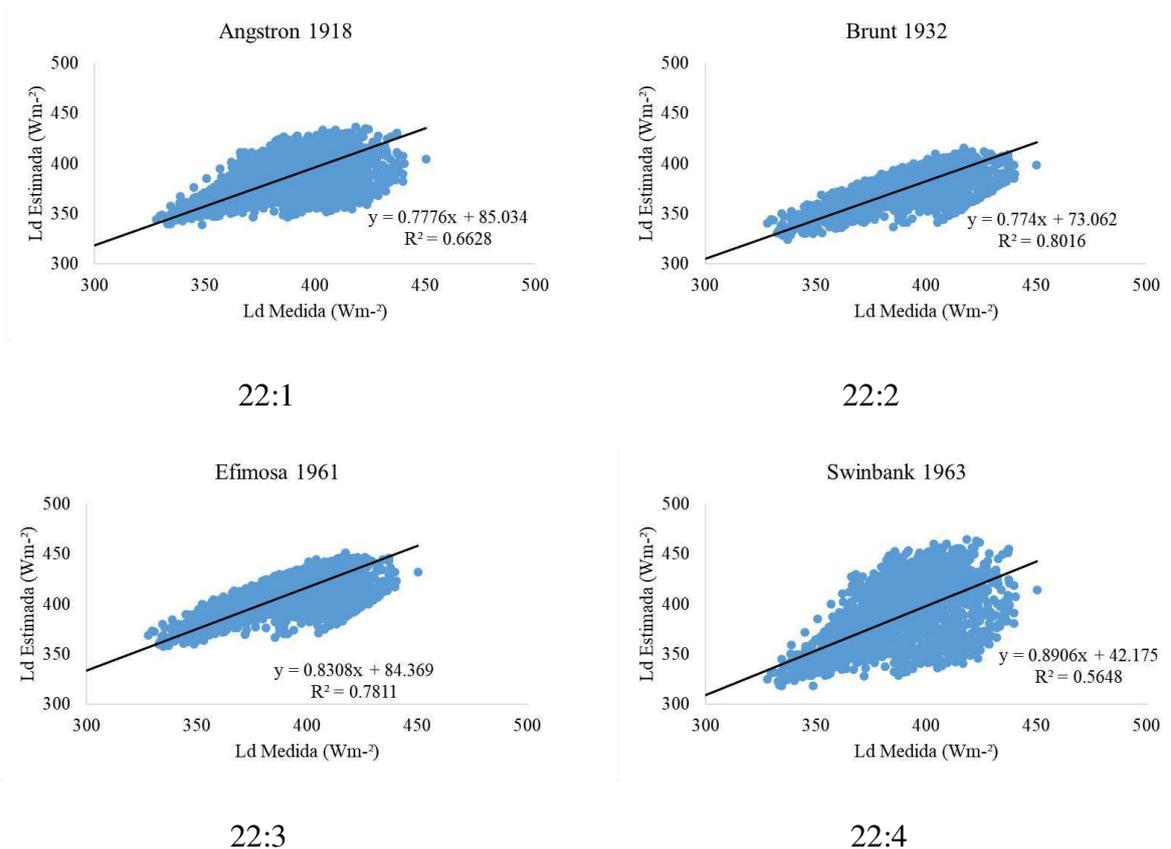
Berger <i>et al.</i> (1984)	20,37	15,26	4,03	0,95	37,48	30,66	4,83	0,82
Prata (1996)	22,12	17,52	5,54	0,95	30,98	16,67	3,94	0,84
Lommer <i>et al.</i> (2007)	26,71	20,05	5,09	0,95	30,89	19,32	4,50	0,83

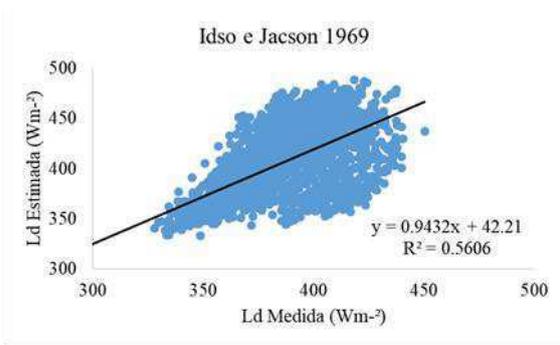
#### 4.2 Análise Sazonal para o Período Seco e Chuvoso em Petrolina

Em Petrolina o período seco corresponde ao quadrimestre que vai de setembro a dezembro, em que outubro é o mês mais seco. Devido à falta de dados medidos da estação SONDA de Petrolina para o mês de novembro, a análise sazonal para o período seco foi realizada para os meses de setembro, outubro e dezembro, quando a umidade atinge valores abaixo de 55%.

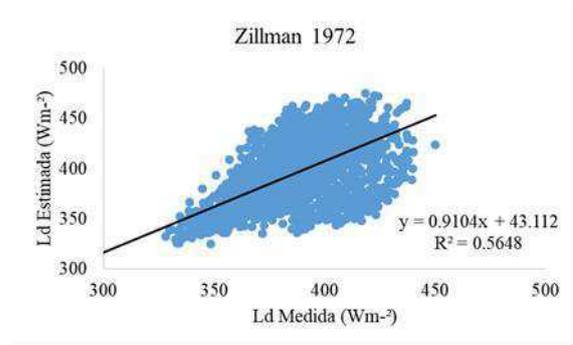
Já o Período chuvoso compreende o quadrimestre de janeiro a abril, onde março registra a maior precipitação anual com total médio de 136 mm.

A (Figura 22) ilustra os gráficos de regressão linear para o período seco, média horária, em que os modelos que mais se aproximaram dos dados medidos da  $L_d$  conforme o coeficiente de determinação foram: Prata (1996), Brunt (1932), Efimosa (1961), Berdahl e Martin (1984), Berger *et al.* (1984), Brutsaert (1975) e Lommer *et al.* (2007).

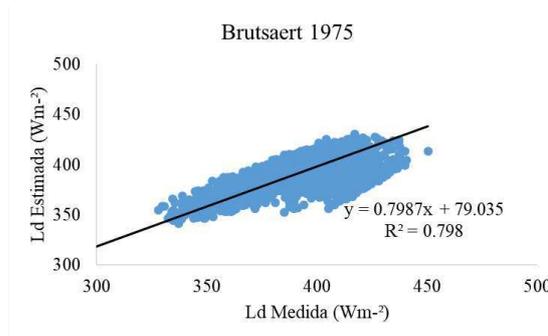




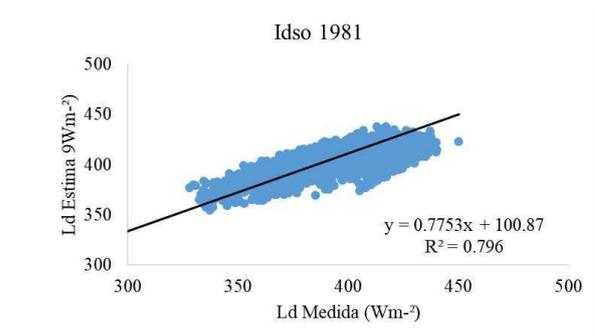
22:5



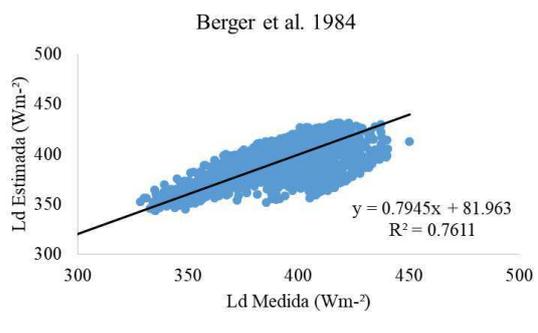
22:6



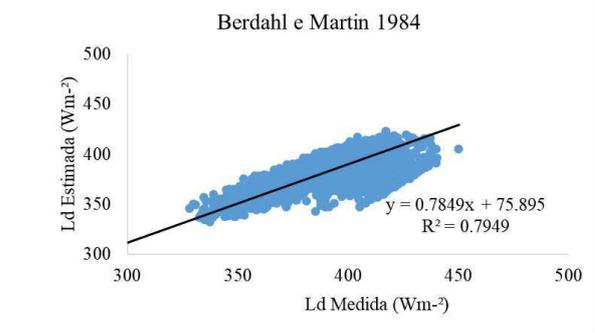
22:7



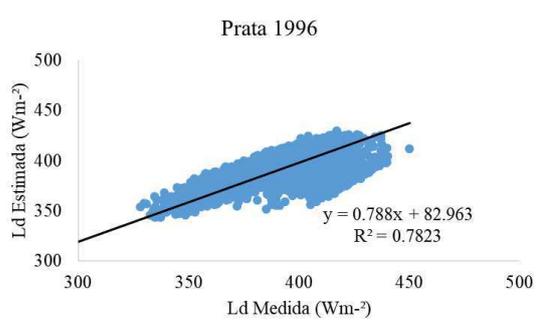
22:8



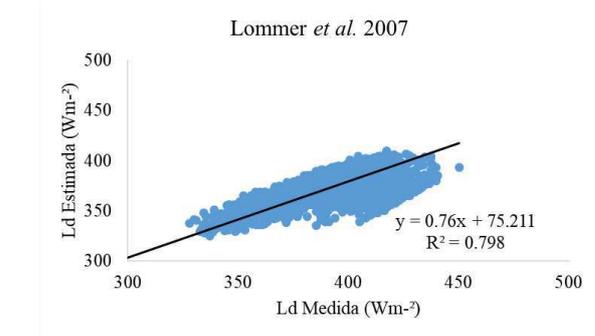
22:9



22:10



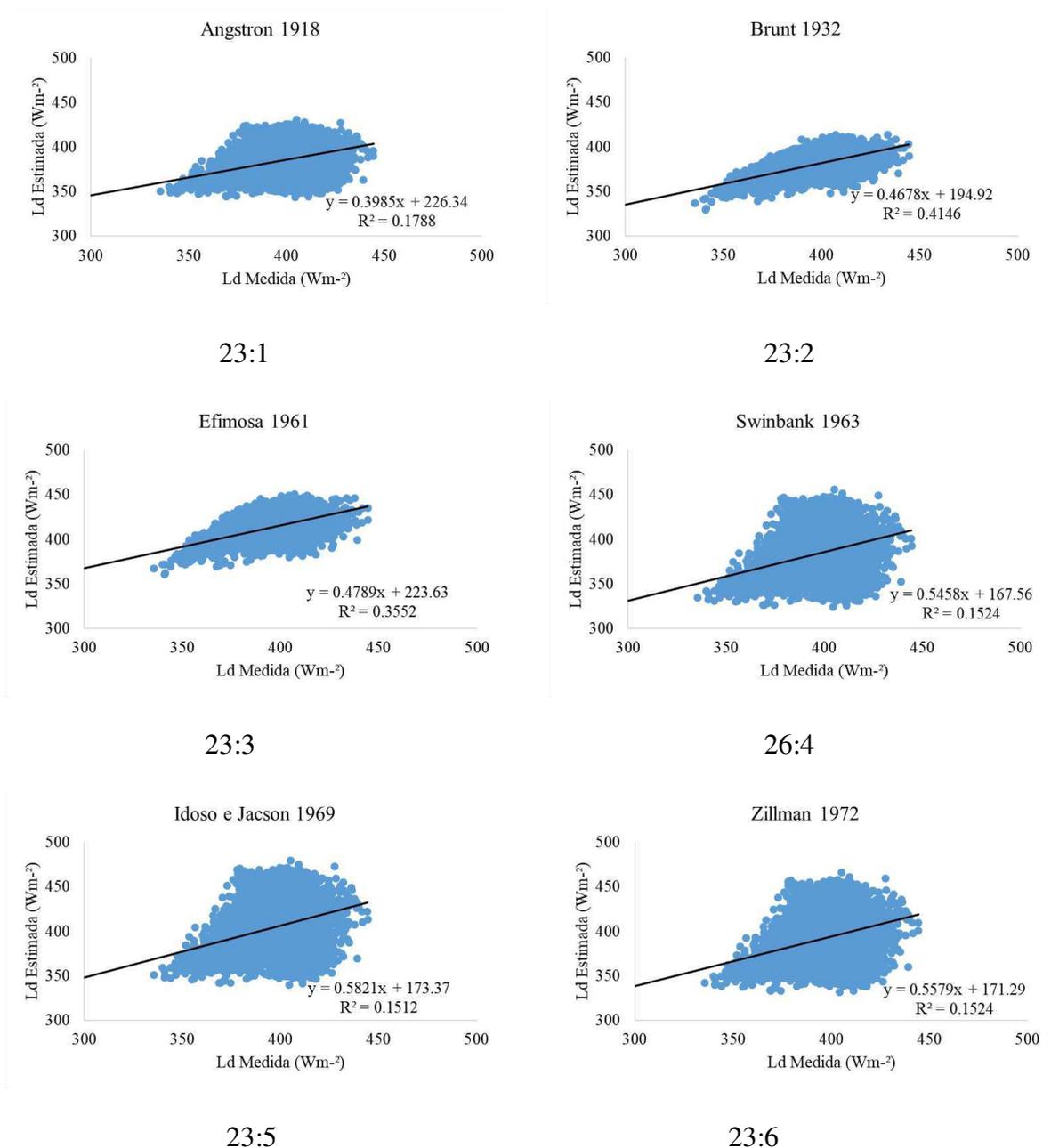
22:11

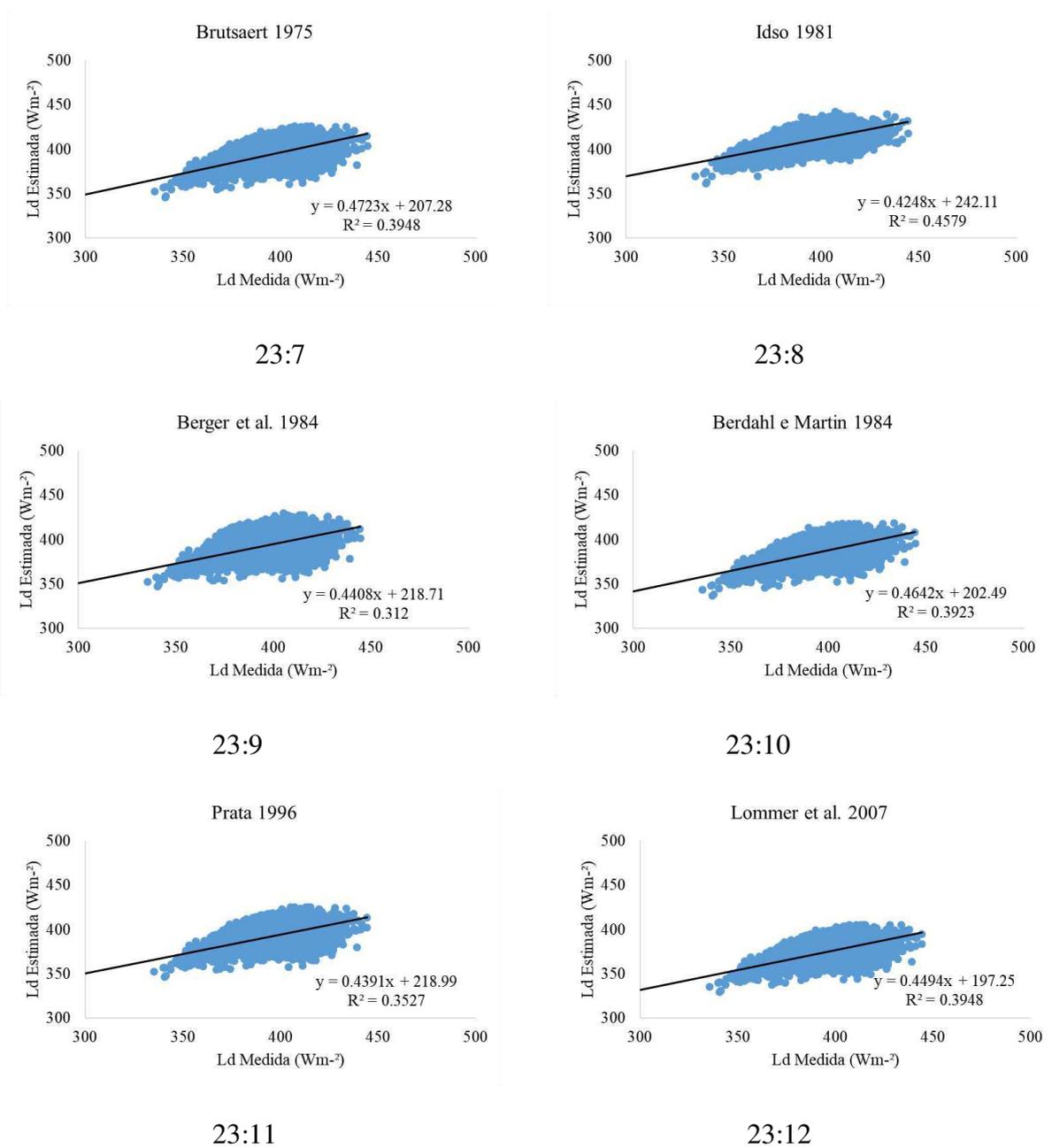


22:12

**Figura 22** - Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos, média horária para o período seco.

A (Figura 23) mostra os gráficos de regressão linear para o período chuvoso, média horária em que os modelos que mais se aproximaram dos dados medidos da  $L_d$  conforme o coeficiente de determinação foram: Brunt (1932), Brutsaert (1975), Berdahl e Martin (1984), e Lommer *et al.* (2007).





**Figura 23** - Comparações entre os fluxos de radiação de onda longa atmosférica estimados e medidos, média horária para o período chuvoso.

Conforme explicitado nas Tabelas 9 e 10 os parâmetros estatísticos de validação dos modelos da  $L_d$  apresentaram os melhores resultados para média horária para o período seco, pois quanto menor a presença de vapor d' água na atmosfera, melhor a performance dos modelos.

**Tabela 9:** Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, média horária para o período seco e chuvoso.

Ano	2015							
	Média Horária	P/Seco				P/Chuvo		
Modelos	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r
Angstrom (1918)	20,42	15,15	4,03	0,81	24,25	18,15	4,78	0,42
Brunt (1932)	20,52	14,89	3,90	0,90	21,62	15,94	4,17	0,64
Efimosa (1961)	25,22	22,76	6,21	0,88	25,71	22,06	6,06	0,60
Swinbank (1975)	26,97	20,75	5,50	0,75	30,84	24,19	6,37	0,39
Idso e Jacson (1969)	35,12	28,49	7,56	0,75	31,77	25,16	6,68	0,39
Zillman (1972)	28,83	22,43	5,94	0,75	29,42	22,98	6,07	0,39
Brutsaert (1975)	15,45	11,98	3,22	0,89	16,63	13,41	3,57	0,63
Idso (1981)	21,27	18,32	5,07	0,89	22,36	18,96	5,26	0,68
Berdahl e Martin (1984)	17,03	13,16	3,05	0,87	18,21	14,22	3,87	0,56
Berger <i>et al.</i> (1984)	16,86	11,45	3,58	0,89	18,51	13,38	3,57	0,63
Prata (1996)	16,02	12,13	3,31	0,88	17,33	13,49	3,68	0,59
Lommer <i>et al.</i> (2007)	22,90	17,49	4,54	0,89	25,29	19,72	5,07	0,63

**Tabela 10:** Estatísticas comparativas para o desempenho dos modelos da radiação de onda longa atmosférica em comparação com os dados medidos em Petrolina, média diária para o período seco e chuvoso.

Ano	2015							
	Média Diária	P/Seco				P/Chuvo		
Modelos	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r	REMQ (Wm <sup>-2</sup> )	EMA (Wm <sup>-2</sup> )	EPRM (%)	r
Angstrom (1918)	15,20	12,31	3,17	0,34	19,89	14,83	7,16	-0,12
Brunt (1932)	15,37	10,84	2,75	0,57	26,28	14,82	4,53	0,18
Efimosa (1961)	30,22	26,23	6,87	0,55	36,22	22,71	7,18	0,16
Swinbank (1975)	17,39	13,16	3,38	0,34	25,61	17,53	5,35	-0,13
Idso e Jacson (1969)	27,13	22,36	5,87	0,60	26,56	18,48	5,81	0,24
Zillman (1972)	19,50	15,41	4,02	0,54	24,14	16,23	4,99	0,15
Brutsaert (1975)	16,49	12,27	3,21	0,34	21,64	10,72	3,34	-0,12
Idso (1981)	26,67	22,92	6,01	0,56	32,90	20,82	6,57	0,17
Berdahl e Martin (1984)	16,24	12,80	3,28	0,54	31,12	19,49	6,29	0,15
Berger <i>et al.</i> (1984)	14,23	10,07	2,59	0,55	24,10	11,49	3,52	0,16
Prata (1996)	15,90	12,02	3,14	0,52	20,28	10,63	3,30	0,27
Lommer <i>et al.</i> (2007)	17,14	13,19	3,34	0,35	25,29	18,60	5,69	0,18

#### 4.3 Desempenho dos Modelos da Radiação de Onda Longa atmosférica para Diferentes Condições de Nebulosidade

O cálculo do índice de claridade foi feito para caracterizar as condições de nebulosidade, que estão diretamente relacionadas com a precipitação devido à formação de nuvens que influenciam na refletância e transmitância da atmosfera. Visto que, a maioria dos modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica foram desenvolvidos para condições de céu

claro. Embora a  $L_d$  aumente quanto maior for a nebulosidade o desempenho dos modelos diminui, principalmente, com a presença de nuvens altas do tipo Cirrus.

Ademais, segundo a literatura acredita-se que a precipitação esteja diretamente relacionada com a  $L_d$ , já que para a região tropical onde a Temperatura da Superfície do Mar - TSM varia modestamente ao longo do ciclo anual, as maiores variações desta componente radiativa resultam de mudanças na quantidade e na altura das nuvens. Essa ligação direta com nuvens fez com que a  $L_d$  passasse a ser utilizada para estimar quantitativamente a precipitação.

Do total de 335 dias avaliados em Petrolina, 226 dias foram de céu parcialmente nublado, 96 dias de céu claro e 13 dias de céu nublado. Os parâmetros estatísticos utilizados para validação dos modelos para diferentes condições de nebulosidade, consistiram na correlação de Pearson – r, EPRM, REQM e EMA para média diária.

Conforme as Tabelas 11 e 12 os melhores resultados de acordo com os parâmetros estatísticos de validação foram apresentados pelas equações de Brunt (1932), Brutsaert (1975), Prata (1996) e Lommer *et al.* (2007) para condições de céu parcialmente nublado e céu claro, que resultaram nos menores valores de REMQ, MAE e EPRM. Já para dias de céu nublado os modelos avaliados apresentaram um péssimo desempenho conforme explicitado na Tabela (13).

**Tabela 11:** Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de céu parcialmente nublado, média diária.

<b>Ano</b>	<b>2015</b>			
<b>Média Diária</b>	<b>Céu Parcialmente Nublado</b>			
<b>Modelos</b>	<b>REMQ (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EMA (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EPRM (%)</b>	<b>r</b>
Angstrom (1918)	20,41	16,47	4,15	0,28
Brunt (1932)	24,68	17,64	4,46	0,38
Efimoso (1961)	27,90	17,93	4,63	0,34
Swinbank (1975)	26,11	20,41	5,15	0,27
Idso e Jacson (1969)	20,31	13,96	3,57	0,28
Zillman (1972)	21,82	15,66	3,96	0,27
Brutsaert (1975)	17,58	9,82	2,51	0,40
Idso (1981)	26,20	17,54	4,53	0,39
Berdahl e Martin (1984)	21,27	13,11	3,31	0,38
Berger <i>et al.</i> (1984)	23,49	14,69	3,73	0,28
Prata (1996)	16,99	10,18	2,59	0,40
Lommer <i>et al.</i> (2007)	26,04	21,90	5,53	0,40

**Tabela 12:** Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de céu claro, média diária.

<b>Ano</b>	<b>2015</b>			
<b>Média Diária</b>	<b>Céu Claro</b>			
<b>Modelos</b>	<b>REMQ (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EMA (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EPRM (%)</b>	<b>r</b>
Angstrom (1918)	11,89	10,03	2,57	0,73
Brunt (1932)	10,90	6,36	1,66	0,74
Efimosa (1961)	33,61	31,75	8,42	0,74
Swinbank (1975)	13,23	9,54	2,53	0,72
Idso e Jacson (1969)	30,28	28,11	7,46	0,73
Zillman (1972)	19,56	16,39	4,36	0,72
Brutsaert (1975)	17,56	14,64	3,90	0,75
Idso (1981)	29,61	27,57	7,32	0,73
Berdahl e Martin (1984)	12,13	8,10	2,14	0,74
Berger <i>et al.</i> (1984)	19,38	16,23	4,32	0,53
Prata (1996)	16,68	13,85	3,69	0,75
Lommer <i>et al.</i> (2007)	10,74	7,36	1,91	0,75

**Tabela 13:** Estatísticas comparativas entre os dados estimados e medidos para condições de céu nublado, média diária.

<b>Ano</b>	<b>2015</b>			
<b>Média Diária</b>	<b>Céu Nublado</b>			
<b>Modelos</b>	<b>REMQ (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EMA (Wm<sup>-2</sup>)</b>	<b>EPRM (%)</b>	<b>r</b>
Angstrom (1918)	55,85	46,37	10,91	-0,52
Brunt (1932)	64,74	48,76	11,35	-0,73
Efimosa (1961)	43,88	22,52	5,00	-0,69
Swinbank (1975)	65,03	56,94	13,50	-0,38
Idso e Jacson (1969)	50,37	39,49	9,22	-0,38
Zillman (1972)	58,34	49,11	11,58	-0,38
Brutsaert (1975)	54,51	35,43	8,09	-0,76
Idso (1981)	46,12	20,68	4,53	-0,68
Berdahl e Martin (1984)	59,73	43,06	9,97	-0,73
Berger <i>et al.</i> (1984)	52,66	36,82	8,48	-0,74
Prata (1996)	53,87	36,40	8,35	-0,76
Lommer <i>et al.</i> (2007)	67,22	53,32	12,49	-0,76

Estes modelos podem ser usados como ferramentas de pesquisa para ajudar a melhorar a compreensão atual da fisiologia básica de crescimento e desenvolvimento das culturas, bem como apoio a decisões para ajudar a otimizar estratégias de manejo do solo, constituindo-se decisivos para o aprimoramento e manejo das atividades agrícolas desenvolvidas em Petrolina.

## 5. CONCLUSÕES

- Os modelos que melhor se adaptaram as características climáticas de Petrolina, destacando-se com bons resultados a partir da análise estatística, foram os de Brunt (1932), Brutsaert (1975), Prata (1996), Idso (1982), Berdahl e Martin (1984) e Lommer *et al.* (2007). Sendo, portanto, os mais indicados para a estimativa da radiação de onda longa atmosférica;
- As equações que levam em consideração a pressão de vapor d'água e a temperatura do ar tiveram melhor desempenho na estimativa da radiação de onda longa atmosférica para média horária;
- Já para média diária os melhores resultados foram apresentados pelos modelos que utilizam apenas a temperatura do ar como parâmetro de entrada: Swinbank (1963), Idso e Jacson (1969) e Zillaman (1972);
- Na análise sazonal o melhor desempenho foi para o período seco, média horária.
- Para diferentes condições de Nebulosidade os melhores resultados foram apresentados para condições de céu claro;
- No entanto, torna-se evidente, a necessidade de novas parametrizações e calibração dos modelos já existentes para estimativa da radiação de onda longa atmosférica, que possam ser utilizados para todas as condições de nebulosidade e período chuvoso.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANGSTROM, A. A study of the radiation of the atmosphere. Smithsonian Miscellaneous Collection, v. 65, p. 1-159, 1918.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements, Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Atlas de Abastecimento Urbano de Água. Brasília, 2010.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA (APAC). Climatologia da Precipitação. Recife, 2012. Boletim Pluviométrico 2011.
- AGUIAR, L. J. G.; DA COSTA, J. M. N.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; DA COSTA, A. C. L.; 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**, 26, n. 2, p. 215 - 224, 2011.
- AGUILAR, J. L.C.; GENTLE, A. R.; SMITH, G. B.; CHEN, D. A method to measure total atmospheric long-wave down-welling radiation using a low cost infrared thermometer tilted to the vertical. *Energy*, 81, p. 233 - 244, 2015.
- AIMI, D. M; ROBERTI, D. R; MALDANER, S; DEGRASIA, G; DIAZ, M; SEBASTIANY, E. W; RUBERT, G. C. Calibração de equações Clássicas para radiação de onda longa na Região de Pampa em dias de céu claro. **Ciência e Natura**. Santa Maria v.38 Ed. Especial-IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 2016, p. 367 – 371.
- ANDRADE, A. M. D. Estimativa da Radiação de Ondas Longas Incidente na Amazônia: Uma Análise Espectral. 2016 (Tese de Doutorado em Meteorologia) Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Pós-Graduação em Meteorologia, 69 p. 2016.
- Atlas Brasileiro de Energia Solar. PEREIRA, E. B; MARTINS, F. R; GONÇALVES, A. R; COSTA, R. S; LIMA, F. J. L; RUTHER, R; ABREU, S. L; TIEPOLO, G. M; PEREIRA, S. V; SOUZA, J. G. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88p.: il. (E-BOOK).
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v. 58, n. 247, p. 389-418, 1932.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- BRUTSAERT, W. Evaporation into the atmosphere: theory, history and applications. Dordrecht: D. Reidel, 299p, 1982.
- BERDAHL, P., MARTIN, M. Emissivity of clear skies. **Solar Energy**, v. 32, p. 663–664, 1984.
- BERGER, X., BURIOT, D., GARNIER, F. **About the equivalent radiative temperature for clear skies**. *Solar Energy*, v. 32, p. 725–733, 1984.
- Bastiaanssen, W. G. M.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1: Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.198–212, 1998.
- BLONQUIST Jr, J. M.; Tanner, B.D.; BUGBEE, B. Evaluation of measurement accuracy and comparison of two new and three traditional net radiometers. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, p. 1709- 1721, 2009.

- BISHT, G.; BRAS, R. L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.7, p.1522-1534, 2010.
- BUTT, N.; NEW, M.; MALHI, Y.; COSTA, A. C. L.; OLIVEIRA, P.; SILVA ESPEJO, J. E. Diffuse radiation and cloud fraction relationships in two contrasting Amazonian rainforest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, p. 361-368, 2010.
- COSTACURTA, A.; ROSELLI, G. Critères climatiques et edaphiques pour l'établissement des vignobles. Bulletin de L'O.I.V, Paris, v. 53, n. 596, p. 783-786, 1980.
- CORREIA, F. W. S. Estudo do balanço de radiação em área de policultivo na Amazônia. São José dos Campos. INPE, 2000. 137p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).
- CEBALLOS, J. C; Souza, J. M. Fluxos de Onda Longa Descendente a Superfície: Conceitos e Parametrizações para Estimativas por Satélite. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2004, Fortaleza. Anais..., Cachoeira Paulista, SP. CPTEC/INPE. 2004.
- DALLACORT, R., RICIERI, R. P., SILVA, S. L., FREITAS, P. S. L., SILVA, F. F. Análise do comportamento de um actinógrafo bimetalico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.26, n.4, p.413-419, 2004.
- DUARTE, H. F., DIAS, N. L., MAGGIOTTO, S. R. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**. 2006, vol. 139, p. 171-181.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Recursos Hídricos Subterrâneos 2011. Brasília, 2012. Serviço Geológico do Brasil: Recursos Minerais 2010.
- CURADO, L. F. A. Estimativa Sazonal da Emissividade Atmosférica do Pantanal Mato-Grossense. 2011 (Dissertação de Mestrado em Física Ambiental) Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-Graduação em Física Ambiental, 56 p. 2011.
- CARRILHO, S. B. P. Avaliação de Modelos Para Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica no Cerrado Mato-Grossense. (Dissertação de Mestrado em Física Ambiental) Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-Graduação em Física Ambiental, 124 p. 2011.
- DOS SANTOS, C. M.; DE SOUZA, J. L.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; TIBA, C.; DE MELO, R. O.; LYRA, G. B.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; LEMES, M. A. M. On Modeling on Global Solar Radiation Using Air Temperature for Alagoas State, Northeastern Brazil. **Energy**, 71, p. 388 - 398, 2014.

- EFIMOVA, N. A. On methods of calculating monthly values of net longwave radiation (in Russian), *Meteorol. Gidrol.* v. 10, p. 28– 33, 1961.
- ELLIS, J.; VALENÇA, A. S. Desvio padrão de temperatura média no Brasil. Instituto Nacional de Meteorologia. Boletim técnico, 1982.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. G.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling Hourly and Daily Fractions of UV, PAR and NIR to Global Solar Radiation Under Various Sky Conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, 86, p. 299 - 309, 2009.
- GARDNER, P. E; PEARCE, R. B, Mitchell, R.I. Physiology of erop plants. Iowa: Iowa State University Press, 1985. 337p.
- GALVÃO, J. A. C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2000.
- HEITOR, A., BIGA, A. J., ROSA, R. Thermal Radiation Componentes of the Energy Balance at the Ground. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, n. 1, p. 29-48, 1991.
- IDSO, S. B.; JACKSON, R. D. Thermal radiation from the atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, 74, n. 23, p. 5397 - 5403, 1969.
- IDSO, S. B. 1981. A set of equations for full spectrum and 8 to 14  $\mu\text{m}$  and 10.5 to 12.5  $\mu\text{m}$  thermal radiation from cloudless skies. **Water Resources Research**, v. 17, n. 2, p. 295-304, 1981.
- IQBAL, M. An Indroduction to Solar Radiation. Vancouver: AP., 1983. 389 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cadastro Nacional de Empresas: 2011. Brasília, 2012. Cadastro Nacional das Empresas 2011. IBGE 2012.
- IBGE. Banco de Dados Séries Estatísticas & Séries Históricas, 2017. Disponível em <[http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista\\_tema.aspx?op=1&no=1](http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/lista_tema.aspx?op=1&no=1)>. Acesso em: 15 de outubro de 2017.
- INMET. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. 2016. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>> :Acesso em 05 junho 2017.
- IBGE. Base Cartográfica Contínua do Brasil ao Milhonésimo (BCIM 2014). Disponível em <http://mapas.ibge.gov.br/bases-ereferenciais/bases-cartograficas/cartas.html>. Acessado em 15 de setembro de 2017.

- JIMENEZ, J. I.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; CASTRO-DIÉZ, Y; BALLESTER, G. On the estimation of long-wave radiation flux from clear skies. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 38, n. 1, p. 37-42, 1987.
- KOLLING, E. M. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. Cascavel: UNIOESTE, 2001. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola).
- KJAERGAARD, J. H.; PLAUBORG, F. L.; HANSEN, S. Comparasion of Models for Calculating Daytime Long-Wave Irradiance Using Long Term Data Set. **Agricultural and Forest Meteorology**, 143, p. 49 - 63, 2007.
- LEITÃO, M. M. V. B. R. Balanço de Radiação em três ecossistemas da Floresta Amazônica: campina, campinarana e mata densa. São José dos Campos. 135p. (INPE 5587 - TDI/549). (Dissertação) – Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.
- LI, Z.; BARKER, H. W.; MOREAU, L. The Variable Effect of Clouds on Atmospheric Absorption of Solar Radiation. *Nature*, 376, p. 486 - 490, 1995.
- LHOMME, J. P.; VACHER, J. J.; ROCHETEAU, A. Estimating Downward long-wave radiation on the Andean Altiplano. *Agricultural and Forest Meteorology*, p. 139 - 148, 2007.
- LUIZ, E. W. Desenvolvimento de metodologias para estimativas de cobertura de nuvens. 2014 (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. 74p.
- LENZ L.C. Estufa De Polietileno: Balanço de Radiação e Parametrização De Modelos Clássicos de Estimativa da Radiação Atmosférica de Ondas Longas. 2016 (Dissertação (Mestrado em ciências agronômicas) Botucatu: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, 2016, 66p.
- NUNEZ-ELISEA, R.; DAVENPORT, T. L. Effect of leaf age, duration of coal temperature treatment, and photoperiod on bud dormancy release in floral initiation of mango. **Scientia Horticulturae**, [Amsterdam], v. 62, p. 63-73, 1995.
- MOURA, M. A. L.; LYRA, R.F.; BENINCASA, M.; TENÓRIO, R.S.; NASCIMENTO-FILHO, M. F. Comparação da radiação solar global em áreas de floresta na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.16, p.91-99, 2001.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 3ª ed. Viçosa, Editora UFV, 2005, 422p.

- MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; VON RADOW, S.; LACERDA, F. F.; SOUZA, L. S. B. Monitoramento dos Fluxos de radiação, energia, CO<sub>2</sub> e vapor de água em superfícies vegetadas. In: GALVÍNCIO, J. D. (org). **Mudanças climáticas e modelos ambientais**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2012.
- NKEMDIRIM, L. C. A note on the albedo of surfaces. **Journal of Applied Meteorology**, v. 11, n. 5, p. 867-874, 1972.
- NOBRE, C. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado brasileiro. In: LIMA, R.C.C.; CAVALCANTE, A.M.B.; MARIM, A.M.P. (Edt.). **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro**. Campina Grande: ISNA/PB, 2011, P.25-36.
- NETO, J. D. Caracterização de pirgeômetros e controle de qualidade dos dados medidos. 2014 (Dissertação de Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. 66p.
- O.M.M. **Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices**. Organização Meteorológica Mundial, Geneve, 1971.
- OYAMA, M. D., C. A. Nobre. 2003. **A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America**. Geophysical Research Letter, 30, 23, 2199.
- PALTRIDGE, G. W., PLATT, C. M. R. Radiative processes in meteorology and climatology. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 1976. 318 p.
- PRATA, A. J. 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, Part A, p. 1127-1151, 1996.
- PEREIRA, A. R.; GREEN, S.; VILLA NOVA, N. A., Relationships between single tree canopy and grass net radiations. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 142, n. 1, p. 45-49, 2007.
- PAI, E. D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação atmosférica em função dos índices radiométricos K<sub>t</sub> e K<sub>d</sub> para Batucatu- SP. *Revista Energia na Agricultura*, Botucatu, vol. 30, n.2, p.172-179, 2015.
- PHILIPONA, R.; DuRR, B.; MARTY, C. Greenhouse effect and altitude gradients over the alps - by surface longwave radiation measurements and model calculated. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 7, p. 1-7. 2004.
- PERNAMBUCO. **Plano estadual de mudanças climáticas**. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Recife, 2011.

- PATRIOTA, M. R. A; SOARES, W. A. Análise da Desertificação em Pernambuco: Implicações Climáticas. In: VI Workshop de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco e o III Workshop Internacional sobre Mudanças Climáticas e Biodiversidade – (VIWMCRHPE/IIIWIMB), 15. Recife. Anais...2014.
- PATRIOTA, M. R. A; SILVA. B. B. Avaliação de Modelos de Radiação de Onda Longa Atmosférica Para o Município de Petrolina- Pe. In: XX Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e V Simpósio de Mudanças climáticas e Desertificação no semiárido Brasileiro (CBAGRO), 12. Juazeiro da Bahia. Anais... 2017.
- PATRIOTA, M. R. A.; SILVA, B. B; RODRIGUÊS, C. C. F; CHEBLY, S. B. Evaluation of the atmospheric longwave radiation models estimated in Brasília – DF. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 7, n. 7, p. 423-431, 2017.
- QUERINO, C. A. S. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica horária no estado de mato grosso. 2016 (Tese de Doutorado em Física Ambiental) Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-Graduação em Física Ambiental, 56 p. 2016.
- ROSENBERG, N. J; BLAD, B. L; VERMA, S. B. Microclimat the biological enviroment. Ed. Wiley interscience, Estados Unidos. 1983.
- RUSIN, V.; ZVERKO, J. Periodicities in the Green Corona for the Sun as a Star. *Solar Physics*, 128, p. 261 - 268, 1990.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, vol. 13, n. 2–3, p. 125-153, 2000.
- RAMOS, Soraia de Fátima. Uso do território brasileiro e sistemas técnicos agrícolas: a fruticultura irrigada em Petrolina (PE) / Juazeiro (BA). Dissertação de Mestrado. S. Paulo: Geografia, USP 2001.
- RADEL, G.; SHINE, K. P.; PTASHNIK, I. V. Global Radiative and Climate Effect of the Water Vapour Continuum at Visible and Near-Infrared Wavelengths. *Q. J. R. Meteorol. Society*, 141, p. 727 - 738, 2015.
- RABELLO, J. C. <http://carlosrabello.org/geografia/climatologia/>. Prof. José Carlos Rabello, 2016. Disponível em: <<http://carlosrabello.org/geografia/climatologia/>>. Acesso em: 15 de junho 2017.

- RÜTHER, R., NASCIMENTO, L. R., CAMPOS, R. A. Extreme overirradiance events in Brazil: consequences on PV power plant output performance, submitted to *Solar Energy*, 2017.
- SWINBANK, W. C. Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89, p. 339 - 348, 1963.
- SZEIEZ. G. Solar radiado for plant growth, **The Journal of Applied Ecology**, v.2. n.2. p. 617-36.1974.
- SAKURAI, K. The Sun as an Inconstant Star. *Space Science Reviews*, 38, p. 243 - 279, 1984.
- SINGH, L. B. Mango. In: ALVIM, P.T.; KOZ T.T. (Ed.). *Ecophysiology of tropical crops*. New York: Academic Press, 1977. cap. 18, p. 479-485.
- SILVA, V. DE P. R. DA; GUEDES, M. J. F.; LIMA, W. F. A.; Campos, J. H. B. C. Modelo de previsão de rendimento de culturas de sequeiro, no semiárido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.83-87, 2001.
- SUN, W. Y.; WU, J. A Study of the Bremsstrahlung of Plasma at About 1 A.U. in Times of Quiet Sun and Flare Activity. **Chinese Astronomy and Astrophysics**, Beijing, 29, p. 149 - 158, 2005.
- SILVA, R. C., ALVALÁ, C. S. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal sul mato-grossense durante so períodos secos de 1999 e 2000. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 2006, vol. 21, n. 3b, p. 398-412.
- SANTOS, J. M.; PINAZO, J. M.; CANADA, J. Methodology for generating daily clearness index values Kt starting from the monthly average daily value Kt. Determining the daily sequence using stochastic models. *Renewable Energy*, v. 28, p. 1523-1544, 2003.
- SOUSA, J.M. Estimativas das componentes do Balanço Radiativo à Superfície mediante satélites meteorológicos. 2006 (Tese de Doutorado em Meteorologia) São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004.
- SÁ, I. B.; SÁ, I. I. da S.; SILVA, A. de S. Desertificação na Região de Cabrobó-PE: A Realidade Vista do Espaço. In: III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aracaju/SE, Anais... Aracaju, 25 e 27 de outubro de 2006.
- SEDLAR, J., HOCK, R. Testing longwave parameterizations under clear and overcast skies at Storglaciären, **The Cryosphere**. Sweden, 2009. v.3, p. 75-84.

- SANTOS, C.A. dos; SILVA, B. B. da; RAMANA RAO, T.V; SATYAMURT, P.; MANZI, A. O. Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n.3, p.443-450, 2011.
- SOBRINHO, F. J. C. Modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no cerrado mato-grossense. 2011 (Tese de Doutorado em Física Ambiental) Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Física, Pós-Graduação em Física Ambiental, 151 p. 2011.
- SANTOS, C. B; POLYDORO, L. A. A importância do estudo da radiação solar e nebulosidade na geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico. In: XII Congresso Brasileiro de meteorologia, 12. 2012. Foz do Iguaçu. Anais.
- SANTOS, F. A. C; SILVA, B. B; SANTOS, C. A. C; BRAGA, A. C. Diferentes modelos de estimativa da radiação de onda longa a partir de dados MODIS/TERRA. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – (SBSR),8. Foz do Iguaçu. Anais... 2013.
- SILVA, B. B; GALVÍNCIO, J. D; GUSMÃO, A. C. V. A. L; OLIVEIRA, L. M. M. Sensoriamento remoto como alternativa aos estudos dos impactos das mudanças climáticas em diferentes biomas brasileiros. In: GALVÍNCIO, J. D (org). Mudanças climáticas e modelos ambientais. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2012.
- SOUSA CRUZ, P. F. Reestruturação urbana em Petrolina (PE): um olhar a partir da implantação de novos produtos imobiliários. 2013 (Dissertação de Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, faculdade de arquitetura, Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional, 170 p. 2013.
- SONDA. Localização das Estações Sonda. 2018. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>. Acesso em: 20 de Março de 2016.
- TETENS, O. Uber cinige meteorologische Begriffe. Z. Geophys. 6, p. 297 - 309, 1930.
- TEIXEIRA, A. H. de C. Water productivity assessments from field to large scale: a case study in the Brazilian semi-arid region. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2009.226 p.
- TEIXEIRA, A. H. C. Informações agrometeorológicas do Polo Petrolina,PE/Juazeiro, BA – 1963 a 2009. Embrapa Semiárido. Documentos, 233. 2010.21 p.
- VISWANADHAM, Y.; MASCARENHAS JR, A. S., Avaliação do fluxo de radiação infravermelha da atmosfera em estações oceânicas. **Revista Brasileira de Física**.1978, vol. 08, n. 01, p. 01-34.

- VISWANADHAM, Y. Infrared flux and flux divergence in a clear tropical Southern atmosphere. **Ciência e cultura**, São Paulo, v.33, p.380-390, 1981.
- VAN HEMELRIJCK, E.; VERCHEVAL, J. Some Aspects of the Solar Radiation Incidente at the Top of the Atmospheres of Mercury and Venus. **Icarus**, 48, p. 167 -179, 1981.
- VAREJÃO SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Recife: Versão Digital 2, 2006.
- VIANELO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa: UFV, 448 p. 2000.
- VON RANDOW, R. C. S. & AVALÁ, R. C. S. Estimativa da Radiação de Onda Longa Atmosférica no Pantanal Sul Mato Grossense Durante os Períodos Secos de 1999 e 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3b, 398-412, 2006.
- VILANI, M.T.; SANCHES, L.; COSTA, M.H.; GAIO, D. C.; NOGUEIRA, J. S. Estimativa da absortância da radiação fotossinteticamente ativa de uma vegetação de transição floresta amazônica- cerrado por três métodos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 15, p.289-298, 2007.
- VILANI, M.T.; SANCHES, L.; PINHEIRO, M.R.; PINTO JUNIOR, O. B. Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. **Revista Ciência e Natura**. Santa Maria-RS, v. 32 n.1, P. 65 - 81, 2010.
- VIÚDEZ-MORA A. Atmospheric downwelling longwave radiation at the surface during cloudless and overcast conditions - measurements and modeling. Tese. p. 24-26 (Programa de Doctorat en Medi Ambient). Universitat de Girona, 2011.
- VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. S. L.: Editora UFV. 2013. 448 p.
- WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York, v. 108, n. 1, p. 57-75, 1982.
- WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. Atmospheric Science - An Introductory Survey. 2. ed. [S.l.]: **Academic Press**, v. 92, 2006. 483 p. ISBN 0-12-732951-X.
- YAMASOE, M. A., CORRÊA, M. P. **Processos radiativos na atmosfera: fundamentos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.142p.
- ZILLMAN, J. W. A study of some aspects of the radiation and heat budgets of the Southern Hemisphere oceans. Meteor. Stud. n° 26, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia, p. 562. 1972.