

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
Programa de Pós-graduação de Engenharia Ambiental

**BALANÇO DE RADIAÇÃO NA ZONA DA MATA NORTE
PERNAMBUCANA POR SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS DE
SUPERFÍCIE**

GLEIDE DE LIMA FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant de
Holanda

Recife, PE
Agosto, 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

GLEIDE DE LIMA FERREIRA

BALANÇO DE RADIAÇÃO NA ZONA DA MATA NORTE
PERNAMBUCANA POR SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS DE
SUPERFÍCIE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental para fins de obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda.

Recife, PE
Agosto, 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

G383b Ferreira, Gleide de Lima

Balanço de radiação na zona da mata norte pernambucana por
sensoriamento remoto e dados de superfície / Gleide de Lima
Ferreira. – Recife, 2018.

88f.: il.

Orientador: Bernardo Barbosa da Silva.

Coorientador: Romildo Morant de Holanda.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Recife, BR-PE, 2018.

Inclui referências.

1. Meteorologia agrícola 2. Radiação atmosférica 3.
Evapotranspiração 4. Sensoriamento remoto. Silva, Bernardo
Barbosa da, orient. II. Holanda, Romildo Morant de, coorient. III. Título

CDD 628

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

**BALANÇO DE RADIAÇÃO NA ZONA DA MATA NORTE PERNAMBUCANA POR
SENSORIAMENTO REMOTO E DADOS DE SUPERFÍCIE**

Gleide de Lima Ferreira

APROVADO EM: 31 DE AGOSTO DE 2018.

Prof. Dr. Fabrício Marcos Lopes Oliveira - UFRPE

Membro Externo - DEPA

Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa - UFRPE

Membro Interno - PPEAMB

Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva - UFRPE

Orientador - PPEAMB

Prof. Dr. José Ramon Barros Cantalice - UFRPE

Coordenador PPEAMB

DEDICATÓRIA

Dedico este maravilhoso projeto, primeiramente ao Deus todo poderoso criador dos céus e da terra, que durante esta trajetória me cingiu de forças, fé, paciência, esperança, perseverança para concluir esse tão esperado trabalho. Aos meus pais, Maria Osita de Lima, José Marinho Ferreira e aos meus irmãos Glainer de Lima Ferreira, Antônio Vicente Ferreira Neto, ao meu filho Kaio de Lima Pimentel e ao meu esposo Miguel Luiz de Araújo Gomes da Silva, pela ajuda e o amor que me dedicaram durante essa jornada. Aos meus Orientadores, Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva e o Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda pelo apoio e pelas instruções, que contribuíram para o meu aprendizado e crescimento, não só profissional, mas como pessoa durante todo este tempo do Mestrado.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter cuidado e preservado a minha vida e a de todos aqueles que fizeram parte desta caminhada, meus familiares, professores e amigos.

Aos meus queridos e amados pais, José Marinho e Maria Osita, a meus irmãos, Glainer de Lima, a Antônio Vicente, a Heide de Lima, ao meu filho Kaio de Lima, ao meu esposo Miguel Luís, as minhas tias Sandra Marinho e Sueli Marinho, a minha prima Taciana Marinho pelo incentivo e amor dispensado.

Ao professor, orientador, Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pela disponibilidade em orientar, pela força, incentivo e por seus conhecimentos compartilhados.

Ao professor, coordenador, Dr. Romildo Morant de Holanda pelo incentivo e ter dispensado condições para realização deste trabalho.

Ao prof. Dr. Fabrício Marcos Lopes, pela humildade e sempre ser tão solícito e dedicado em contribuir com ciência e a pesquisa, ao prof. Dr. Geber Barbosa por ter me instruído na graduação e colaborado durante o mestrado com sua atenção, à profa. Dra. Sheila Bittar Bretas, pelo incentivo, pelas contribuições acadêmicas desde a graduação.

A todos os meus amigos que contribuíram direto e indiretamente: Maria Tereza, Ester Rodrigues, Ana Priscila, Thaís Póvoas, Yenê Medeiros, Walquiria, Wildson Moraes, Damares Felix, João Albuquerque, Ygor Agra, Caick Martins, Daniel Sobral, Maria Carolina, Géssica Marinho, Sarah Abreu, Simone Falcão, Leide Letícia, Joseléia Peres, Maria da Conceição Patrício, Alfranke Amaral, Evaldo Gomes, José Adalberto, Gabriela Arruda, Raimundo Mainar, Fernando Joaquim, Amélia Arce, Neura Mendes, Manoel Vieira e Ednalva Gomes.

Agradeço a todos que fazem parte da II Igreja Batista pelas palavras vindas da parte de Deus e orações e a todos os que fazem parte da Escola Professora Zulmira de Paula Almeida, pela compreensão e incentivo.

A Ivaneide Feitosa, por sua grande ajuda que foi de fundamental importância para o desenvolvimento desse trabalho, pela paciência, amizade, compreensão, incentivo e força.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFRPE e a todos os professores, pela oportunidade de ingresso no Mestrado e pelos conhecimentos transmitidos.

A FACEPE (Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco), pelos recursos financeiros concedidos durante todo o curso.

Porque para Deus não há nada impossível.

Lucas 1:37

RESUMO

O saldo de radiação tem grande importância em diversas aplicações da agrometeorologia e em particular em vários modelos de determinação da evapotranspiração das culturas. Por outro lado, esse saldo tem destacada influência nas trocas de calor e massa que ocorrem na camada limite planetária. Nesse sentido, esta pesquisa tem por objetivo principal a determinação dos diferentes componentes do balanço de radiação em área de pastagem na localidade de Paudalho – PE por meio de imagens OLI/TIRS - Landsat 8 e também através de uma campanha experimental instalada no referido Município. Foram levantadas todas as imagens geradas pelos sensores OLI e TIRS cobrindo todo o período experimental, o que resultou na seleção de apenas quatro imagens. O referido experimental foi instalado em área de pastagem do município de Paudalho – PE e foi conduzido de dezembro de 2016 a março de 2018. Foram obtidos os ciclos diários da temperatura do ar e umidade relativa de cada um dos meses pesquisados, bem como os ciclos diários médios das componentes do balanço de radiação para cada mês do ano. Os valores diários da radiação de onda longa atmosférica foram confrontados com modelos destinados a estimar a $R_{ol,atm}$ para condições de céu claro e céu nublado. Todos os modelos para céu claro se mostraram pouco concordantes com as medições realizadas na campanha experimental. Dos quatro modelos de onda longa atmosférica, apenas o de Aubinet (3) apresentou boa concordância com as medidas de $R_{ol,atm}$, confirmados pelo coeficiente de determinação, pelo coeficiente de correlação de Pearson e também pelas métricas EAM, ERM e REQM.

Palavras chaves: agrometeorologia, saldo de radiação, radiação atmosférica

ABSTRACT

The radiation balance is very important in many applications of agro-meteorology and particular in various models of crop Evapotranspiration determination. Moreover, it has an outstanding influence on heat and mass exchange taking place in the planetary boundary layer. In this sense, this research has as main objective the determination of the different components of the radiation balance in pasture area in the locality of Paudalho - PE through OLI / TRIS - Landsat 8 images and through an experimental campaign installed in the mentioned city. All the images generated by OLI and TRIS sensors, covering the entire experimental period, were collected, which resulted in the selection of only four images. This experiment was installed in a pasture area of Paudalho - PE and was conducted from December 2016 to March 2018. The daily cycles of air temperature and relative humidity of each of the months surveyed were obtained, as well as the average daily cycles of the components of the radiation balance for each month of the year. The daily values of the atmospheric long wave radiation were confronted with models to estimate the $R_{ol,atm}$ for conditions of clear sky and cloudy sky. All the models for clear sky showed little concordance with the measurements made in the experimental campaign. From the four atmospheric long wave models, only the Aubinet (3) model showed good agreement with the measurements of $R_{ol,atm}$, confirmed by the coefficient of determination, by the Pearson's correlation and also by the metrics EAM, ERM and REQM.

Keywords: agrometeorology, radiation balance, atmospheric balance

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------------------|-----------------------------------------------|
| APAC | Agência Pernambucana de Águas e Clima |
| BOC | Balanço de onda curta |
| BOL | Balanço de onda longa |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| INPE | Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais |
| Landsat | Land Remote Sensing Satellite |
| MAE | Erro Médio Absoluto ($W m^{-2}$) |
| MODIS | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NDVI | Índice de Vegetação da Diferença Normalizada |
| <i>r</i> | Coefficiente de correlação de Pearson |
| R² | Coefficiente de determinação |
| REQM | Raiz do Erro Quadrático Médio ($W m^{-2}$) |
| RME | Erro Relativo Médio (%) |
| SPSS | Statistical Package for the Social Sciences |
| SR | Sensoriamento Remoto |
| TM | Thematic Mapper |

LISTA DE SIMBOLOS

| Símbolo | Significado | Unidade |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| A, B, C e D | Constantes para o cálculo da radiação de onda longa atmosférica | |
| Boc | Balanco de onda curta | Wm^{-2} |
| d_r | Correção da excentricidade da órbita terrestre | adimensional |
| d_{TS} | Distância Terra – Sol | Unidade astronômica |
| e_a | Pressão parcial do vapor d'água atmosférico | hPa |
| est_i | Radiação de onda longa estimada | Wm^{-2} |
| E | Ângulo de elevação do Sol | graus |
| E_o | Correção da excentricidade da órbita terrestre | adimensional |
| H | Ângulo horário por ocasião do nascer do Sol | graus |
| IAF | Índice de Área Foliar | $m^2 m^{-2}$ |
| K_1 e K_2 | Constantes de radiação específicas da banda 10 do TIRS | adimensional |
| K_t | Coefficiente de turbidez da atmosfera | adimensional |
| $L_{\lambda 10}$ | Radiância espectral da banda 10 | $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ |
| M | Emitância | Wm^{-2} |
| N | Número de pares de dados da variável em avaliação | adimensional |
| obs_i | Radiação de onda longa observada | Wm^{-2} |
| Pa | Pressão atmosférica | kPa |
| P_{sml} | Pressão atmosférica obtida ao nível médio do mar | hPa |
| R_{\downarrow} | Radiação solar incidente | Wm^{-2} |
| r_2, r_3, r_4, r_5, r_6 e r_7 | Reflectâncias das bandas de 2 a 7 | adimensional |
| $R_{atm, inst}$ | Radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície | Wm^{-2} |
| $Remi$ | Radiação de onda longa emitida por cada pixel da imagem | Wm^{-2} |
| $Remi,inst$ | Radiação de onda longa emitida por cada pixel da imagem | Wm^{-2} |
| $R_{g\downarrow}$ | Radiação incidente recebida | Wm^{-2} |
| R_n | Saldo de radiação | Wm^{-2} |
| $R_{n,24h}$ | Saldo de radiação em 24 horas | Wm^{-2} |

| | | |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $R_{n,inst}$ | Saldo de radiação no instante da passagem do satélite | Wm^{-2} |
| $R_{ol,atm}$ | Radiação de ondas longas atmosférica | Wm^{-2} |
| $R_{ol,sup}$ | Radiação de ondas longas na superfície | Wm^{-2} |
| $R_{r\uparrow}$ | Radiação refletida por cada pixel | Wm^{-2} |
| R_{ref} | Irradiância solar refletida pela pastagem | Wm^{-2} |
| $R_{s,inc}$ | Radiação incidente | Wm^{-2} |
| $R_{s,refl}$ | Radiação refletida | Wm^{-2} |
| $R_{s,toa}$ | Radiação solar diária no topo da atmosfera terrestre | $MJ m^{-2}$ |
| S | Constante solar | $1367 Wm^{-2}$ $0,0820 MJ m^{-2}$ |
| S_o | Constante solar | min^{-1} |
| T | Temperatura absoluta de um corpo | K |
| T_a | Temperatura do ar | $^{\circ}C$ e K |
| T_s | Temperatura superficial observada no satélite | K |
| T_{sup} | Temperatura da superfície | K |
| UR | Umidade relativa | % |
| W | Água precipitável | mm |
| X_{est} | Valor observado da variável agrometeorologia em consideração | |
| X_{obs} | Valor da variável agrometeorologias em consideração | |
| Z | Ângulo zenital solar | graus |
| A | Albedo da superfície | adimensional |
| α_{toa} | Albedo de cada pixel em todo o domínio da radiação solar | adimensional |
| Δ | Declinação solar | rad |
| E | Emissividade | adimensional |
| ϵ_0 | Emissividade do pixel | adimensional |
| ϵ_{NB} | Emissividade no domínio da banda termal | adimensional |
| $\Lambda_{m\acute{a}x}$ | Comprimento de onda máximo | μm |
| Σ | Constante de Stefan-Boltzmann | $5,67 \times 10^{-8} W m^{-2}$ K^{-4} |
| T | Transporte de momentum | adimensional |
| τ_{sw} | Transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar | adimensional |
| Φ | Latitude local | rad |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1. Esquema das Características do Programa Landsat 1, 2, 3,4,5,6,7,8..... | 24 |
| Tabela 2. Características espectrais e espaciais dos sensores OLI e TIRS do Landsat 8. | 25 |
| Tabela 3. Albedo de diferentes materiais. | 30 |
| Tabela 4. Data, dia de ordem do ano (DOA), hora (UTC), ângulo de elevação do Sol - E (grau), distância Terra-Sol em Unidade Astronômica – d_{TS} , cosseno do ângulo zenital do Sol - $\cos Z$, temperatura do ar - T_a (°C), pressão atmosférica - P_a (kPa) e umidade relativa do ar - UR (%), no momento da passagem do satélite sobre a área de estudo para os dias selecionados para o estudo. | 33 |
| Tabela 5. Modelos destinados ao cálculo da radiação de onda longa atmosférica (Rol, atm) para dias de céu claro e para dias de céu nublado. | 39 |
| Tabela 6. Temporalidade mensal dos últimos trinta anos (1987 a 2016) de precipitação na cidade de Paudalho e precipitação mensal (mm) do ano 2017..... | 42 |
| Tabela 7. Dados dos diferentes componentes do balanço de radiação obtidos com imagens Landsat 8 – OLI/TIRS e com instrumentação agrometeorológica em Paudalho – PE..... | 43 |
| Tabela 8. Valores médios, mínimos e máximos da umidade relativa - UR (%) e temperatura do ar - T_a (°C) em cada uma das estações e meses do ano..... | 45 |
| Tabela 9. Valores médios diários da radiação de onda longa atmosférica – Rol, atm (Wm^{-2}) medidos e obtidos com os modelos de céu claro de Sugita & Brutsaert (1993), Duarte; Dias e Maggiotto (2006), Kruk et al. (2010) e Santos et al. (2011) em Paudalho – PE entre maio de 2017 e março de 2018..... | 59 |
| Tabela 10. Valores médios diários da radiação de onda longa atmosférica – Rol, atm (Wm^{-2}) medidos e obtidos com os modelos de céu nublado Aubinet (1), Aubinet (2), Aubinet (3), (1994) e Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) em Paudalho – PE entre maio de 2017 e março de 2018. | 60 |
| Tabela 11. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de | |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| céu claro e nublado em comparação com os valores da $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses de outubro de 2017..... | 61 |
| Tabela 12. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses do inverno de 2017..... | 61 |
| Tabela 13. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - EPM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses da primavera d 2017..... | 62 |
| Tabela 14. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses de verão de 2018. | 62 |
| Tabela 15. Correlação de Pearson (r) aplicado para cada estação do ano e para todas as estações, as equações de dias de céu claro e diascéu nublados na do comparado com radiação atmosférica de onda estimada Sugita & Brutsaert (1993), Duarte; Dias e Maggioletto (202006), Kruk et al. (2010), Santos et al. Para dias de céu nublado (2011), Aubinet (1994) (1), Aubinet (1994) (2), Aubinet (1994) (3), Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001)..... | 63 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Elementos fundamentais para o Sensoriamento Remoto. | 23 |
| Figura 2. Espectro eletromagnético. | 27 |
| Figura 3. Localização da Zona da Mata Norte pernambucana, com destaque para o município de Paudalho – PE. | 32 |
| Figura 4. Fotografias da área experimental localizada na cidade do Paudalho-PE em (A) disposição dos equipamentos: caixa selada em (B), Datalogger e conexões em (C), painel solar em (D), saldo radiômetro CNR1 em (E), abrigo do termohigrômetro HMP45C em (F), panorâmica (G) e panorâmica (H). | 34 |
| Figura 5. Imagens da área de estudo em composição falsa cor RGB543 para os dias 8 de agosto (A), 12 de novembro (B), 14 de dezembro (C) e 30 de dezembro (D) de 2017. | 44 |
| Figura 6. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação de Outono representados pelos mês de (A) Maio, (B) Junho de 2017 em Paudalho – PE. | 47 |
| Figura 7. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação de Inverno representados pelos mese de (A) julho, (B) Agosto, (C) setembro de 2017 em Paudalho – PE. | 48 |
| Figura 8. Ciclo diário da Ta (°C) e da UR (%) para a estação da Primavera representados pelos meses de (A) Outubro, (B) Novembro, (C) Dezembro de 2017 em Paudalho – PE. | 50 |
| Figura 9. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação do Verão representado pelos meses de (A) Janeiro, (B) Fevereiro, (C) Março de 2018 em Paudalho – PE. | 51 |
| Figura 10. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação do Outono em Paudalho – PE. | 52 |
| Figura 11. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação do Inverno em Paudalho – PE. | 53 |
| Figura 12. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação da Primavera em Paudalho – PE. | 55 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 13. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação do Verão em Paudalho- PE..... | 56 |
| Figura 14. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A),Sugita&Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C)Kruket al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação de Outono de 2017 em Paudalho - PE. | 65 |
| Figura 15. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A)Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C)Aubinet (3)1994 e (D)Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Outono de 2017 em Paudalho - PE..... | 67 |
| Figura 16. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A)Sugita&Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruket al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação de Inverno de 2017 em Paudalho - PE. | 69 |
| Figura 17. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A)Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C)Aubinet (3)1994 e (D)Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Inverno de 2017 em Paudalho - PE. | 70 |
| Figura 18. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita&Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruket al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação da Primavera de 2017 em Paudalho – PE. | 72 |
| Figura 19. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A)Aubinet (1)1994 (B), Aubinet (2)1994, (C)Aubinet(3)1994 e (D)Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação da Primavera de 2017 em Paudalho - PE.... | 73 |

Figura 20. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita & Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruk et al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação de Verão de 2017 em Paudalho - PE.. 75

Figura 21. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A) Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C) Aubinet(3)1994 e (D) Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Verão de 2018 em Paudalho –PE. 76

Figura 22. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita & Brutsaert(B) (1993), Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruk et al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à todas as estações outono, inverno primavera e Verão de 2017 em Paudalho - PE..... 78

Figura 23. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A) Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C) Aubinet (3)1994 e (D) Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do outono inverno, primavera verão de 2018 em Paudalho - PE. 79

SUMÁRIO

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 20 |
| 2.1 Sensoriamento Remoto..... | 22 |
| 2.2 Satélite Landsat | 24 |
| 2.3 Radiação solar..... | 26 |
| 2.4 Saldo de Radiação à Superfície | 28 |
| 2.4.1 Componentes do Saldo de Radiação | 29 |
| 2.4.1.1 Radiação de Onda curta..... | 29 |
| 2.4.1.2 Albedo..... | 29 |
| 2.4.1.3 Radiação de onda longa..... | 30 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 Caracterização da área de estudo | 31 |
| 3.2 Imagens de satélite e dados meteorológicos | 33 |
| 3.3 Campanha Experimental..... | 33 |
| 3.4 Determinação do saldo de radiação instantâneo com imagens Landsat 8 | 35 |
| 3.4.2 Determinação da radiação de onda curta incidente | 36 |
| 3.4.3 Determinação da radiação de onda longa atmosférica e da superfície..... | 37 |
| 3.4.4 Determinação do saldo de radiação diário com imagens | 38 |
| 3.5 Determinação dos componentes do saldo com dados de superfície | 38 |
| 3.6 Valores horários, diários e sazonais das variáveis agrometeorologias estudadas .. | 38 |
| 3.7 Determinação da radiação de onda atmosférica..... | 39 |
| 3.7.1 Índice de claridade (K_t)..... | 40 |
| 3.8. Parâmetros estatísticos empregados | 40 |
| 3.8.1 Erros | 40 |
| 3.8.2 Correlação de Pearson | 41 |
| 3.8.3 Coeficiente de Regressão R^2 | 41 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 42 |
| 4.1 Precipitação..... | 42 |
| 4.2 Balanço de radiação com imagens OLI/TIRS - Landsat 8 | 43 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 Temperatura e umidade relativa do ar..... | 45 |
| 4.4 Componentes do balanço de radiação | 52 |
| 4.5 Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica | 58 |
| 4.6 Correlações..... | 63 |
| 4.7 Coeficientes de determinação associado aos modelos de onda longa..... | 65 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 81 |
| REFERÊNCIAS | 82 |

1. INTRODUÇÃO

Estudos ambientais têm se tornado cada vez mais importante no cenário atual das variações climáticas, como também na análise do uso e ocupação do solo (SILVA *et al.*, 2016). O uso do solo pode acarretar impactos significativos ao meio ambiente, por meio das modificações do ambiente natural de grandes áreas para dar lugar à agricultura, agropecuária, indústrias, comércios e casas populares, impulsionadas pelo desejo de desenvolvimento econômico, gerando benefícios, mas em contrapartida pode causar degradação do meio.

No cenário econômico, é importante destacar que segundo Lira Pedrosa (2015) crescimento econômico não significa desenvolvimento, uma vez que é importante considerar a qualidade e preservação dos recursos naturais. A ação antrópica ocasiona em ambientes heterogêneos desequilíbrios nas trocas de energias entre a superfície e a atmosfera, alterando o balanço de radiação.

O saldo de radiação representa a soma das entradas e saídas da radiação solar e terrestre na superfície terrestre, envolvendo os processos de aquecimento e resfriamento, do solo e do ar, na evapotranspiração das plantas e na fotossíntese (MACHADO *et al.*, 2014). Esses componentes são essenciais para estimar o saldo de radiação fazendo uso de dados de superfície e orbitais com técnicas de sensoriamento remoto, que pode ser algum instrumento para monitorar os espaços geoambientais (CPRM, 2018).

Alguns trabalhos sobre balanço de radiação, para distintas coberturas de solo, são de fácil acesso, como os desenvolvidos por Fausto *et al.* (2016), Machado *et al.* (2014), Sallo *et al.* (2014), Silva, Lopes e Azevedo (2005), apontando a relevância do tema e aplicabilidade.

Gomes *et al.* (2009) destacaram que o monitoramento dos componentes do saldo de radiação referentes ao albedo e a temperatura da superfície permitem a identificação de mudanças no uso do solo. Silva *et al.* (2008) apontam que o albedo da superfície possibilita a detecção de modificações que possam acontecer em diferentes biomas da Terra, sejam resultantes de processos naturais e/ou antropogênicos. O estudo apresentado por Oliveira *et al.* (2015) trabalhando com o balanço de radiação na Zona da Mata nordestina por meio de produtos MODIS dos satélites Terra, Aqua e dados meteorológicos complementares e apesar de constituir uma área com intensa presença de nebulosidade, foram apresentados resultados satisfatórios confirmando a eficiência na aplicabilidade da técnica.

Em Pernambuco, na região da Zona da Mata Norte, grande parte do bioma da Mata Atlântica foi alterado para dar lugar a atividades econômicas como produção agrícola e industrial, além do desenvolvimento urbano. De acordo com Lima (1998), a principal causa da degradação desse bioma foi a introdução da cultura da cana-de-açúcar no período colonial. No contexto agrícola, percebe-se que a cana-de-açúcar é a principal cultura em extensão de área plantada no estado de Pernambuco e a maior concentração ocorre na Zona da Mata em virtude das melhores condições de solo e clima (MACHADO; ALBUQUERQUE, 2013). Todas essas modificações do uso e cobertura do solo influenciam no balanço de radiação na localidade, sendo de fundamental importância sua medição e monitoramento em distintos períodos do ano.

Na Mata Norte de Pernambuco há a maior concentração de indústrias de cerâmica vermelha do Estado e com isso tem um dos maiores índices de extração de argila conforme os estudos de Holanda e Silva (2012). Muitas dessas áreas exploradas encontram-se degradadas e através do uso de imagens obtidas por sensoriamento remoto podem ser constatadas áreas extensas de solo sem cobertura vegetal, o que intensifica a redução das áreas de vegetação nativa na região. Conforme Lopes *et al.* (2011), o sensoriamento constitui uma ferramenta capaz de determinar índices para avaliar áreas em processo de degradação e quantificá-las, permitindo uma análise mais completa da região em questão.

Dessa forma, conforme Souza Filho *et al.* (2006), o saldo de radiação na superfície terrestre é um elemento essencial para os estudos agrometeorológicos e estudar seu comportamento e características, possibilitando o desenvolvimento de novos instrumentos de monitoramento das mudanças no uso e ocupação do solo.

O objetivo deste trabalho é investigar a variação das componentes do balanço de radiação em áreas de pastagem na região de desenvolvimento da Mata Norte de Pernambuco. Para tanto, foram usadas duas abordagens: a) instalação de um experimento no qual foram medidos *in loco* todos os componentes do balanço de radiação; b) determinação do balanço de radiação por meio de imagens Landsat 8; c) avaliação da radiação de onda longa atmosférica medida e estimada para condições de céu claro e céu nublado. Um grande desafio é imposto pelas condições de tempo e clima prevalentes na área, que dificultaram os estudos e a realização do balanço de radiação com imagens Landsat 8, em especial no período coincidente com a campanha experimental.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto (SR) tem como base de sua criação o invento da câmera fotográfica, que foi o primeiro instrumento do SR e que é utilizado até os dias atuais para tomada de fotos aéreas (FIGUEIREDO, 2005). Esse período de desenvolvimento durou de 1860 a 1960 e essas técnicas foram amplamente utilizadas durante a primeira e a segunda guerra mundial, dando ênfase às fotografias obtidas em altitudes baixas e médias. No período da guerra fria os Estados Unidos e a União Soviética, a atual Rússia, deram início ao que se denominou na época de *corrida espacial*. Já em 1957, a União Soviética protagonizou o lançamento histórico do primeiro satélite artificial, que foi o Sputiik (COTRIM, 2013).

A National Aeronautics and Space Administration EUA (NASA) em suas diversas missões deu início ao desenvolvimento de sensores espaciais enfatizando a transmissão, armazenamento e processamento, que se tornaram possíveis devido aos avanços de novas tecnologias da telecomunicação e da informática e com isso possibilitaram a obtenção de diversas informações sobre a superfície do nosso planeta (ROSA, 1990).

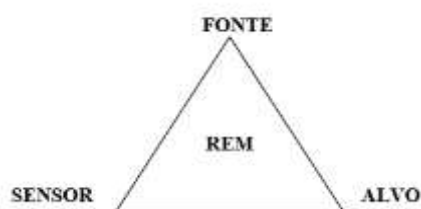
As tecnologias desenvolvidas foram empregadas para monitorar, graças ao sensoriamento remoto, diversos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012). Sendo assim, pode-se definir o SR como o meio pelo qual conseguimos obter informações de algum objeto de interesse sem entrar em contato direto com este, através de medições da radiação eletromagnética refletida e/ou emitida pela superfície, efetivada por sensores que convertem essa energia proveniente dos objetos em imagens transmitidas para uma plataforma em superfície (NOVO, 2010).

As imagens orbitais obtidas através do Sensoriamento Remoto disponibilizam dados de cobertura da terra sobre grandes áreas, em intervalos regulares e com maior rapidez e a um custo muito menor, se comparado com métodos convencionais (FERREIRA, 2004). A integração de informações relativas ao meio físico, químico, e biológico da superfície terrestre, em sistemas computacionais, com o uso do geoprocessamento e sensoriamento remoto, se apresenta como uma importante ferramenta para a elaboração de produtos que possibilitam a detecção de mudanças que venham a ocorrer na superfície do nosso planeta. De acordo com Braga *et al.* (2005), o cruzamento de tais produtos permite a geração de dados consistentes relativos à fatores ambientais.

Segundo Novo (2010), o SR apresenta quatro elementos fundamentais que são: a fonte (Sol), a radiação eletromagnética (REM) que é de fundamental importância para que ocorra a

transmissão e geração de informações, o sensor que é o instrumento responsável em receber as informações e transmitir e o alvo o qual se deseja obter informações, conforme a representação da Figura 1.

Figura 1. Elementos fundamentais para o Sensoriamento Remoto.



Fonte: ARAÚJO (2006).

A partir da ilustração acima, observa-se que as fontes primárias da radiação provem do Sol; no centro se apresenta a REM, que é a energia que se move com velocidade da luz em forma de ondas. À direita se encontra o alvo, que pode ser uma superfície vegetada, o solo sem cobertura vegetal, uma cidade, um corpo d'água, ou outro etc; esses são elementos que podem ser identificados pelos sensores e à esquerda se destaca o sensor, que recebe as informações que são posteriormente enviadas para uma plataforma terrestre. As informações geradas pelo SR podem ser obtidas por radiômetros de campo, por balões com câmeras fotográficas, sensores embarcados em aviões e helicópteros, ou ainda, por sensores a bordo de satélites artificiais (GOMES *et al.*, 2009).

As técnicas de sensoriamento remoto têm auxiliado no desenvolvimento de diversos trabalhos, cujas imagens e produtos derivados podem ser usados para se estimar produtividade agrícola, eficiência de uso de água na irrigação, evapotranspiração de cultivo, produtividade primária bruta, albedo da superfície e, em especial, o saldo de radiação (BERKA; RUDORFF, 2003; SILVA *et al.*, 2015b; LOPES; AZEVEDO, 2005). O SR tem sido usado também para se detectar focos de incêndio, contribuindo para a conservação ambiental e facilitar o trabalho das autoridades competentes (VASCONCELOS; NOVO; DONALISIO, 2006), além de favorecer o mapeamento do uso da terra e estimar a capacidade agrícola, favorecendo investimentos, trazendo clareza e ampliando o potencial de planejamento (SANO *et al.*, 2008).

2.2 Satélite Landsat

O Programa Landsat representa uma importante missão do sensoriamento remoto na área de recursos naturais (NOVO, 2010). Sua formulação foi iniciada há 46 anos, em 1972 Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS, 2016). No Brasil as primeiras imagens desse programa foram recebidas em 1973 através do Instituto de Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que desde então vem fornecendo dados de alta resolução espacial calibrados da superfície da terra, para uma ampla e variada comunidade, que inclui vários seguimentos da sociedade como pessoas relacionadas ao agronegócio, pesquisadores, governos estaduais e locais como também, usuários comerciais, agências de segurança nacional, comunidade internacional, negócios, ciência, educação (USGS, 2016). Os produtos Landsat são fornecidos para os usuários gratuitamente em diferentes plataformas, inclusive uma no DGI/INPE.

Atualmente, o único satélite em operação é o Landsat 8, no entanto, as imagens do Landsat 5 ainda são empregadas em diversos estudos, e o mesmo leva a bordo o sensor TM (Thematic Mapper) e muito contribuiu para o mapeamento temático da superfície terrestre (GUSMÃO *et al.*, 2012). O Landsat 8 possui dois importantes sensores: o OLI e o TIRS, sendo o satélite mais recente do programa e foi lançado em 23 de fevereiro de 2013, de acordo com a Tabela 1. Esses sensores possuem uma resolução radiométrica de 16 bits, portanto muito maior que aquela do TM, que é de apenas 8 bits. Esses sensores têm por objetivo fornecer imagens no visível e infravermelho de alta qualidade, contribuindo para o monitoramento de diversos fenômenos que se desenvolvem no nosso planeta segundo a Empresa Imagem de Satélite e Geotecnologia (ENGESAT, 2018).

Tabela 1. Esquema das Características do Programa Landsat 1, 2, 3,4,5,6,7,8.

| Sistema | Operação | Sensores | Resolução | Comunicação | Altura/ órbita (Km) | Revisita dias |
|------------------|----------|----------|-----------|-------------------|------------------------|------------------|
| Landsat 1 | 23/07/72 | RBV | 80 | Telemetria | 917 | 18 |
| | 01/06/78 | MSS | 80 | Gravador de Bordo | | |
| Landsat 2 | 22/01/75 | RBV | 80 | Telemetria | 917 | 18 |
| | 25/02/82 | MSS | 80 | TDRS | | |
| Landsat 3 | 05/05/78 | RBV | 30 | Telemetria | 917 | 18 |
| | 31/03/83 | MSS | 80 | TDRS | | |
| Landsat 4 | 16/07/82 | MSS | 30 | Telemetria | 705 | 16 |
| | | TM | 80 | TDRS | | |
| Landsat 5 | 01/03/84 | MSS | 80 | Telemetria | 705 | 16 |

| Sistema | Operação | Sensores | Resolução | Comunicação | Altura/ órbita (Km) | Revisita dias |
|------------------|----------|----------|-------------|---------------------|------------------------|------------------|
| | | TM | 30 | TDRS** | | |
| Landsat 6 | 10/05/93 | ETM | 15 (pan) 30 | Telemetria | 705 | 16 |
| | 10/05/93 | + | (ms) | Gravador Abordo | | |
| Landsat 7 | 04/04/99 | ETM | 15 (pan) | Telemetria Gravador | 705 | 16 |
| | a 2007 | + | 30 (ms) | Abordo | | |
| Landsat 8 | 23/02/13 | OLI | 15 (pan) | Telemetria | 705 | 16 |
| | | TIRS | 30 (m) | Gravador Abordo | | |

Fonte: Novo (2010) adaptada do USGS (2016).

O satélite Landsat 8 tem uma vida útil de cinco anos, possui dez anos consumíveis de combustível como também fornece continuidade ao banco de dados do Landsat 4, 5 e 7. O sistema L8 é robusto, de alto desempenho e fornece coleta sistemática de dados multiespectrais globais, de alta resolução e qualidade. A entrada de dados no sistema é suficientemente consistente com os arquivos apresentados, em termos de geometria de aquisição, calibração, cobertura e características espectrais para permitir a comparação de detecção de mudanças globais e regionais, bem como sua caracterização do (USGS, 2016).

As características espectrais e espaciais do Landsat 8 compõe-sede 11 bandas conforme informações da Tabela 2. Assim como os demais satélites do programa Landsat, este proporciona relevante contribuição para as pesquisas e estudos científicos voltados ao monitoramento dos diferentes ecossistemas do planeta Terra. Silva *et al.* (2016) apresentaram, em seu trabalho, os procedimentos para cálculo do albedo com imagens OLI - Landsat 8, uma vez que há pouca informação acerca desses procedimentos, diferentemente do registrado para o TM – Landsat 5.

Tabela 2. Características espectrais e espaciais dos sensores OLI e TIRS do Landsat 8.

| Bandas | Comprimentos de onda (micrômetro) | Resolução espacial (m) |
|----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Banda 1 - CoastalAerosol | 0,43-0,45 | 30 |
| Banda 2 –Azul | 0,45-0,51 | 30 |
| Banda 3 – Verde | 0,53-0,59 | 30 |
| Banda 4 –Vermelho | 0,64-0,67 | 30 |
| Banda 5 - Infravermelho Próximo | 0,85-0,88 | 30 |

| Bandas | Comprimentos de onda (micrômetro) | Resolução espacial (m) |
|----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|
| (NIR) | | |
| Faixa 6 - SWIR 1 | 1,57-1,65 | 30 |
| Banda 7 - SWIR 2 | 2,11-2,29 | 15 |
| Banda 8 – Pancromática | 0,50-0,68 | 30 |
| Banda 9 – Cirros | 1,36-1,38 | 30 |
| Banda 10 - Infravermelho Termal | 10,60-11,19 | 100 |
| (TIRS) | | |
| Banda 11 - Infravermelho Termal | 11,50-12,51 | 100 |
| (TIRS) | | |

Fonte: USGS (2016).

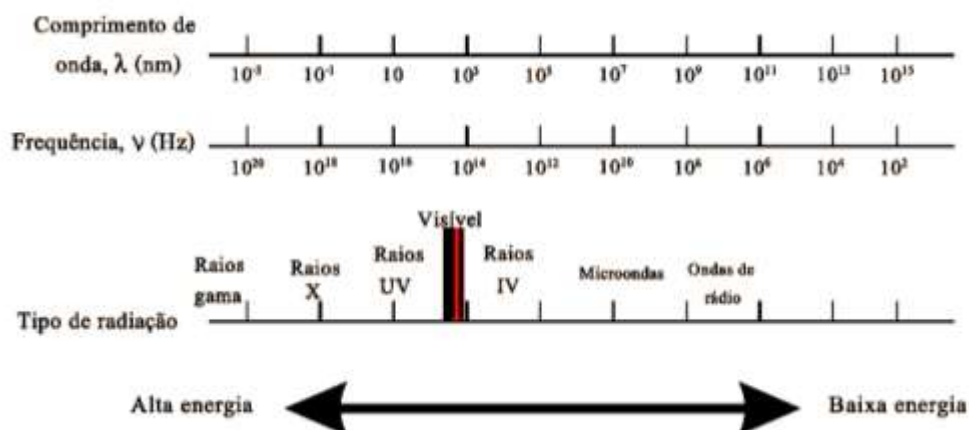
As imagens geradas pelos sensores disponíveis na série Landsat são usadas para se avaliar impactos que as mudanças no uso e ocupação do solo promovem nas trocas de calor e massa na camada limite planetária. Algumas das variáveis estudadas são: a temperatura da superfície, o albedo e mais recentemente a evapotranspiração, em especial dos grandes perímetros irrigados do Brasil e também no mundo.

2.3 Radiação solar

A radiação solar é conceituada como a energia radiante emitida pelo Sol e transmitida sob forma de ondas eletromagnética, que compreende raios gama, raios X, raios ultravioletas, luz visível, calor, micro-ondas, ondas de TV e ondas de rádio (SELLERS, 1965).

O espectro eletromagnético é a composição de todos os tipos de radiação eletromagnética existentes. Nele cada tipo de energia é ordenado de acordo com o seu comprimento de onda ou frequência, conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2. Espectro eletromagnético.



Fonte: Figueiredo (2005) adaptado pela autora (2018).

Para compreender o comportamento da radiação eletromagnética existem leis fundamentais, dentre elas a lei de Wien que possibilita identificar o comprimento de onda associado ao valor da emitância máxima produzida por um corpo negro - CN que se encontra a uma dada temperatura absoluta T . Antes mesmo de ser obtida a Lei de Planck, Wien experimentalmente deduziu que o produto do comprimento de onda - $\lambda_{\text{máx}}$ (μm) associado à máxima emissão da emitância monocromática de um CN, pela temperatura $T(\text{K})$ do corpo se mantinha constante. Portanto, a Lei de Wien é dada pela equação:

$$T \times \lambda_{\text{máx}} = \text{constante} = 2898 \mu\text{m K} \quad (1)$$

A Lei de Wien é fundamental para se entender o balanço de radiação na superfície da Terra. A Terra é um corpo cuja temperatura média está ao redor de 300 K, enquanto que o Sol, o principal fornecedor de energia para a Terra tem uma temperatura aproximada de 6000 K. Pela lei de Wien deduz-se que o máximo de energia emitida pela Terra corresponde ao comprimento de onda $\lambda_{\text{máx}} \approx 10 \mu\text{m}$ (radiação de onda longa), enquanto que a energia emitida pelo Sol apresenta o seu máximo valor para $\lambda_{\text{máx}} \approx 0,50 \mu\text{m}$ (faixa visível do espectro eletromagnético).

Além da Lei de Wien, a Lei de Stefan-Boltzmann é muito importante para as aplicações com balanço radiativo. De acordo com o princípio de Prescott (IQBAL, 1983), todo corpo que se encontrar com temperatura acima de 0 K emite radiação (energia) eletromagnética e a Lei de Stefan-Boltzmann estabelece que a densidade de fluxo de energia emitida por um CN com temperatura T (K) é proporcional à quarta potência de sua

temperatura. Com base nessa lei, pode-se determinar a emitância M (W m^{-2}) produzida pela superfície de um corpo real com emissividade ε , com base na seguinte equação:

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

Em que $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann, T (K) é a temperatura da superfície e ε (adimensional) a sua emissividade.

Para a maioria dos objetos naturais, a emissividade ε se situa entre 0,95 e 1,0. Em algumas aplicações agrometeorológicas, adota-se o valor unitário sem se incorrer em grandes erros; no entanto, em estudos de balanço de radiação por imagens satelitárias se faz necessário determinar a emissividade dos diferentes tipos de uso da terra. Nesse sentido, existem diferentes parametrizações destinadas ao cômputo da emissividade (ε), algumas das quais empregam o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada NDVI), enquanto outras usam o índice de área foliar (IAF) (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; SILVA *et al.*, 2015b). No caso da atmosfera, como sua composição básica varia com o teor de umidade no ar, o valor de ε deverá ser estimado levando-se em consideração a quantidade de vapor d'água presente e a literatura dispõem de várias expressões, algumas destinadas a condições de céu claro (ARAÚJO *et al.*, 2010; BASTIAANSEN *et al.*, 1998; DUARTE; DIAS; MAGGIOTTO, 2006; SANTOS *et al.*, 2010.) e outras para condições de céu encoberto (AUBINET *et al.*, 1994).

2.4 Saldo de Radiação à Superfície

O balanço de radiação em dado sistema pode ser entendido como um processo no qual se efetua a contabilização dos ganhos e perdas da radiação de onda curta e de onda longa pelo sistema. Em inúmeras aplicações, considera-se um volume de controle que consiste na primeira camada do solo, vegetação e atmosfera envolvente. A radiação de onda curta compreende a radiação solar que atinge o volume de controle e radiação solar refletiva pelo mesmo. O domínio espectral dessa radiação de onda curta vai de 0,3 a 3,0 μm . Já a radiação de onda longa compreende o intervalo de 4,0 a 100 μm . A síntese do balanço radiativo constitui o saldo $-R_n$, que em inúmeras aplicações em sensoriamento remoto se apresenta sob a forma instantânea $-R_{\text{inst}}$ (Wm^{-2}) mas quando subsidia a determinação da evapotranspiração deve cobrir todo o período diário $-R_{n,24h}$ (Wm^{-2}). Nesses casos ele aparece na determinação do balanço de energia e fica evidenciada que o saldo de radiação é a fonte responsável pelo aquecimento do solo, do ar e ainda do processo evapotranspirativo (SILVA *et al.*, 2015b;

SILVA; LOPES; DE AZEVEDO, 2005). Entender e caracterizar o saldo de radiação de uma determinada região de interesse se faz necessário para os estudos e monitoramentos agrometeorológicos.

Alguns instrumentos são capazes de medir com precisão o saldo de radiação, alguns deles, considerados convencionais, proporcionam medidas pontuais do saldo de radiação, e são representativos de pequenas áreas homogêneas (DEBASTIANI *et al.*, 2018). Por ser dispendiosa a sua medição normalmente as estações meteorológicas não são providas de saldo radiômetro, e nesse sentido a sua determinação por sensoriamento remoto se mostra oportuna e de grande importância.

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) dispõe de 321 estações meteorológicas convencionais. Dessas, 232 na superfície medem a insolação e somente 58 (18,1%) a radiação solar incidente (R_{\downarrow}), por meio de actinógrafos (POLO *et al.*, 2011). Portanto, quando há necessidade de estimativa do saldo de radiação em grandes áreas, as técnicas baseadas em medições realizadas por sensores orbitais são mais apropriadas porque reúnem grande cobertura espacial e têm baixo custo operacional.

2.4.1 Componentes do Saldo de Radiação

2.4.1.1 Radiação de Onda curta

A radiação de onda curta é a aquela advinda do Sol e seu comprimento de onda no espectro eletromagnético (REM) são inferiores a $4,0 \mu\text{m}$ (VIANELLO; ALVES, 2006). O balanço é processado por meio da radiação global ou incidente que é composta pela radiação direta e radiação difusa e do albedo. Conforme a seguinte expressão:

$$Boc = R_{\downarrow} \times (1 - \alpha) \quad (4)$$

em que “ α ” é o albedo da superfície admissional e R_{\downarrow} a radiação solar incidente sua unidade W.m^{-2} .

2.4.1.2 Albedo

Segundo Gusmão *et al.* (2012) o albedo é uma fração da radiação solar incidente sobre uma dada superfície que é refletida por esta e que pode ser chamado de coeficiente de reflexão. De acordo com a composição e características química, física e biológica de cada superfície, e também do ângulo zenital solar ao longo do dia, o albedo representa um coeficiente diferenciado. Na Tabela 3 é apresentado o albedo de diferentes tipos de superfície.

Tabela 3. Albedo de diferentes materiais.

| Superfície | Coefficiente de reflexão |
|-----------------|--------------------------|
| Água | 0,05 |
| Areia seca | 0,35 a 0,45 |
| Areia Úmida | 0,20 a 0,30 |
| solo claro seco | 0,25 a 0,45 |
| Solo cinza | 0,10 a 0,20 |
| Solo escuro | 0,05 a 0,15 |
| Gramado | 0,20 a 0,30 |

Fonte: Oliveira (2016) adaptado pela autora (2018).

Segundo Santos (2011), o albedo α é obtido pela razão da radiação refletida ($R_r\uparrow$) por cada pixel e a radiação incidente ($R_g\downarrow$). Sua localização espectral encontra-se na faixa compreendida entre 0,3 e 3,0 μm , sendo matematicamente representado por:

$$\alpha = R_r \uparrow / R_g \downarrow \quad (5)$$

Uma das importâncias do albedo está atrelada ao saldo de radiação e nas aplicações para sua estimativa. Portando, nos últimos anos pesquisas têm sido desenvolvidas a fim de estimar o albedo da superfície e alguns autores têm se utilizando do sensoriamento remoto para determinar o albedo, a exemplo de Braga *et al.* (2017), Silva *et al.* (2010), Silva *et al.* (2016), Schirmbeck *et al.* (2018), Hovi, Lukes e Rautiainen (2017), Wang *et al.* (2016), Wang *et al.* (2018), Qin *et al.* (2017), dentre outros.

2.4.1.3 Radiação de onda longa

O intervalo espectral da radiação emitida pela atmosfera e pela superfície terrestre, também denominada em Ciências Ambientais de radiação de onda longa, compreende a faixa de 4,0 μm a 100 μm . Esse tipo de radiação é um dos componentes do saldo de radiação da superfície que apresenta mais dificuldade de determinação (GUSMÃO *et al.*, 2012). O conhecimento da radiação de onda longa encontra na agrometeorologia muitas aplicações, bem como também na previsão do tempo e variações na radiação diurna, sendo responsável pelo resfriamento radiativo durante a noite.

O componente de radiação de onda longa atmosférica é de fundamental importância, segundo Querino *et al.*, (2011), no balanço energético faz-se uma interação entre a biosfera e a

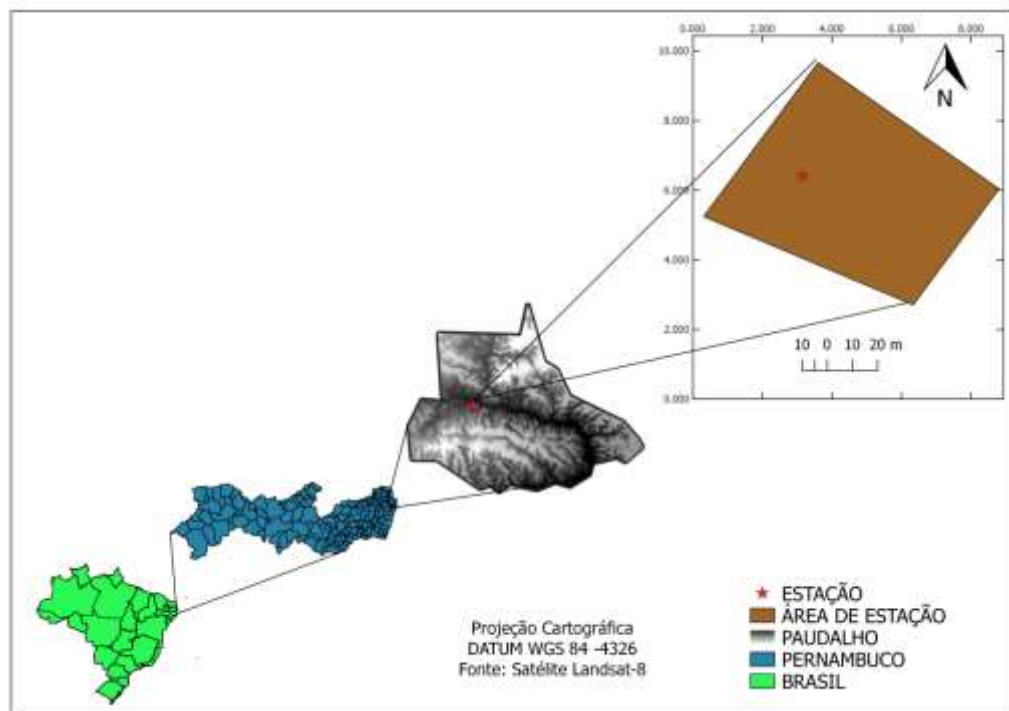
atmosfera. Diante disso, têm se desenvolvido diversos estudos utilizando modelos de equações para estimar esse componente em diversas regiões brasileiras como os modelos desenvolvidos e utilizados nas áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. Estimativa de radiação de ondas longas tem sido utilizado como: Aguiar et al. (2011). Brunt (1932), Brutsaert (1975), Idso (1981), Idso e Jackson (1969), Prata (1996), Satterlund (1979), Swinbank (1963). Como também estudos desenvolvidos por Carrilho Sobrinho *et al.* (2013), na região do cerrado Mato-Grossense, estimando radiação de onda longa atmosférica utilizando 107 equações entre elas para dias de céu claro, dias de céu nublado e parcialmente nublado. As que se adequaram melhor com a realidade do lugar foram os seguintes modelos de equações. Bignami *et al.* (1995), Idso e Jackson (1969), Viswanadham e Ramanadham (1970), e, após a parametrização, os modelos de Andreas e Ackley (1982) (céu nublado), Aubinet (1994) (céu parcialmente nublado) e Bárbaro et al. (2010) (céu claro).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A área selecionada para realizar a campanha experimental situa-se na região da Zona da Mata Norte, especificamente na cidade de Paudalho – PE. A cidade do Paudalho localiza-se na mesorregião da Mata Norte e na microrregião Mata Setentrional do Estado de Pernambuco, com uma população estimada de 55.942 habitantes segundo IBGE (2018), limitando-se ao norte com Tracunhaém, a sul com São Lourenço Mata, Chã Alegria, Glória de Goitá e Camaragibe, a leste com Paulista e Abreu e Lima e a oeste com Lagoa de Itaenga e Carpina. A área municipal ocupa 269,2 km² e representa 0,27% do estado de Pernambuco. “A sede do município localiza-se em torno das coordenadas de latitude 07°53’48” Sul e longitude 35°10’47” Oeste, com altitude média de 69 metros (BELTRÃO *et al.*, 2005), como ilustra a Figura 3.

Figura 3. Localização da Zona da Mata Norte pernambucana, com destaque para o município de Paudalho – PE.



Fonte: Própria autora.

A vegetação predominantemente da área é do tipo floresta subperenifólia, com partes de floresta subcaducifólia e cerrado/floresta. Os solos dessa unidade geoambiental são representados pelos Latossolos e Podzólicos nos topos de chapadas e topos residuais; já nas pequenas depressões dos tabuleiros são constituídos pelos Podzólicos com Fregipan; as áreas dissecadas e encostas, por sua vez, apresentam solos Podzólicos Plínticos e Podzóis e nas áreas de várzeas são encontrados Gleissolos e Solos Aluviais (BELTRÃO *et al.*, 2005).

O município de Paudalho encontra-se inserido nos domínios da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, que tem como seus principais tributários os rios Capibaribe, Sampaio e Goitá, além dos riachos: Gameleira, Pau Amarelo, Barrigão, dos Macacos, Araçá, Piação, Murioga, Fortaleza, Dendê, Cavalcante, Vargem Grande, Caipora, Caiana, Jacaré, do Cajueiro, Tabaruma Tabatinga, Pitangueiras, Camurim e Córrego Verde. Os principais corpos de acumulação são os açudes: Cursái (7.624.000 m³), Pau Amarelo, Zumbi, Tabaruma, Bicopeba, Carvalho e as barragens do Ora e do Goitá. Os principais cursos d'água no município têm regime de escoamento perene e o padrão de drenagem é o dendrítico (BELTRÃO *et al.*, 2005).

3.2 Imagens de satélite e dados meteorológicos

No período compreendido entre a instalação da campanha experimental, que ocorreu no dia 20 de dezembro de 2016, ao final da referida campanha, que foi encerrada em 20 de março de 2018, foram identificadas as imagens Landsat 8 que apresentaram presença de nuvens inferior a 60 % da cena. Os dias com menor presença de nuvens e, portanto, os que foram selecionados para se efetivar o balanço de radiação, estão apresentados na Tabela 4, na qual estão representadas todas as variáveis empregadas no cálculo do saldo de radiação, tanto o instantâneo – $R_{n,inst}$ (Wm^{-2}), quanto o diário – R_n , 24h (Wm^{-2}). Algumas dessas variáveis se encontram disponíveis no metadados de cada uma das quatro imagens selecionadas, e as demais foram obtidas na área experimental.

3.3 Campanha Experimental

Uma área localizada no município de Paudalho - PE foi selecionada para instalação de uma campanha experimental agrometeorológica que consistiu na demarcação de uma área de 10 m x 10 m, no interior de uma área de pastagem na qual foram instalados um saldo radiômetro (modelo CNR1 da Kipp-Zonen, Delf, Holanda), um termohigrômetro (modelo HMP45C, da Vaisala, Helsink, Finlândia) e um datalogger (modelo CR23X, Campbell, Logan, Estados Unidos), que foi programado para efetuar leitura dos sensores a cada 5 segundos e extrair média dos sinais a cada 10 minutos (Tabela 4).

Tabela 4. Data, dia de ordem do ano (DOA), hora (UTC), ângulo de elevação do Sol - E (grau), distância Terra-Sol em Unidade Astronômica – d_{TS} , cosseno do ângulo zenital do Sol - $\cos Z$, temperatura do ar - T_a ($^{\circ}C$), pressão atmosférica - P_a (kPa) e umidade relativa do ar - UR (%), no momento da passagem do satélite sobre a área de estudo para os dias selecionados para o estudo.

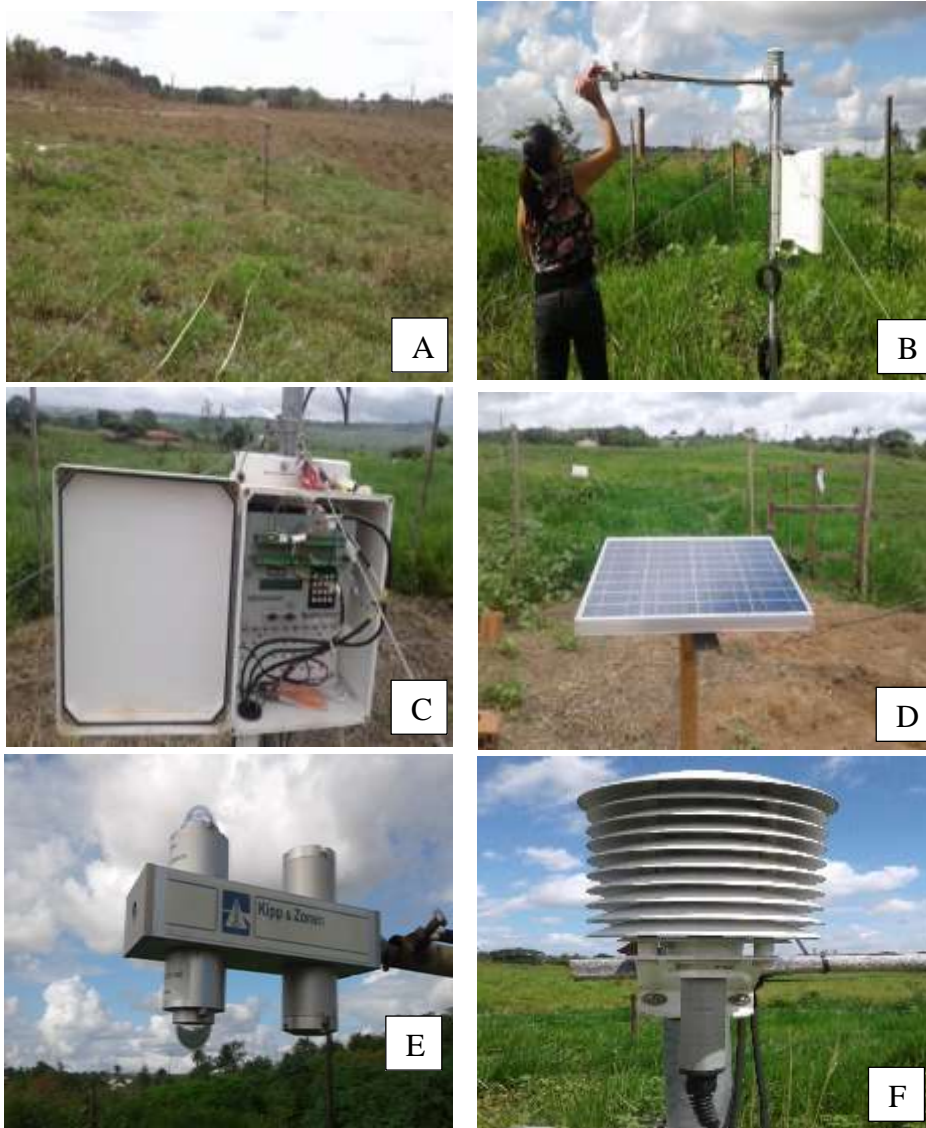
| Data | DOA | Hora (TMG) | E | d_{TS} | Cos Z | T_a | P_a | UR |
|--------------------|-----|------------|----------|-----------|---------|-------|-------|------|
| 08/Ago/2017 | 220 | 12:29:05 | 52,80505 | 1,0138862 | 0,74739 | 25,8 | 102,3 | 65,2 |
| 12/Nov/2017 | 316 | 12:29:06 | 64,38870 | 0,9897493 | 0,90175 | 30,2 | 103,1 | 55,3 |
| 14/Dez/2017 | 348 | 12:29:14 | 59,85977 | 0,9843519 | 0,90416 | 25,8 | 102,7 | 55,1 |
| 30/Dez/2017 | 364 | 12:29:14 | 58,27982 | 0,9833304 | 0,85716 | 31,5 | 103,1 | 53,1 |

Foram medidas as seguintes variáveis agrometeorológicas: irradiância solar global - $R \downarrow$ (Wm^{-2}), irradiância solar refletida pela pastagem – R_{ref} (Wm^{-2}), radiação de onda longa atmosférica – $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}), radiação de onda longa da superfície – $R_{ol,sup}$ (Wm^{-2}),

temperatura do ar – T_a ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar - UR (%), estas últimas a 1,80 m de altura. O datalogger foi alimentado com um painel solar com potência de 20 W e sistema de controle de carga que alternava a alimentação do sistema com uma bateria de 7 Ah, de modo a manter os sensores e datalogger em funcionamento.

A coleta dos dados teve início em dezembro de 2016, mas devido a problemas com o sistema os dados utilizados na pesquisa compreendem o período de 2 de maio de 2017 a 10 de março de 2018. A estação experimental se encontrava em área de propriedade da indústria Cerâmica Bom Jesus, em ponto com as seguintes coordenadas geográficas: $07^{\circ}53'40''$ Sul, $35^{\circ}11'26''$ Oeste e altitude de 88 m. Na Figura 4 estão representadas algumas fotografias da área com destaque para alguns componentes da campanha experimental.

Figura 4. Fotografias da área experimental localizada na cidade do Paudalho-PE em (A) disposição dos equipamentos: caixa selada em (B), Datalogger e conexões em (C), painel solar em (D), saldo radiômetro CNR1 em (E), abrigo do termohigrômetro HMP45C em (F), panorâmica (G) e panorâmica (H).





Fonte: Própria autora.

3.4 Determinação do saldo de radiação instantâneo com imagens Landsat 8

O saldo de radiação no instante da passagem do satélite sobre a área experimental – $R_{n,inst}$ ($W m^{-2}$) pode ser obtido com base na seguinte expressão (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; BASTIAANSSEN *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2015a):

$$R_{n,inst} = (1 - \alpha)R_{s,inst} - R_{em,inst} + \epsilon_0 R_{atm,inst} \quad (7)$$

em que α (adimensional) é o albedo da superfície, $R_{em,inst}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida por cada pixel da imagem, $R_{atm,inst}$ ($W m^{-2}$) é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície e ϵ_0 é a emissividade do pixel, no momento da passagem do satélite sobre a área de estudo.

3.4.1 Determinação do albedo da superfície com imagens Landsat 8

O albedo da superfície com correção atmosférica - α foi determinado com base na seguinte expressão (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; BASTIAANSSEN *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2016):

$$\alpha = \left(\frac{\alpha_{toa} - a}{\tau_{sw}^2} \right) \quad (8)$$

em que α_{toa} é o albedo de cada pixel em todo o domínio da radiação solar, que por sua vez foi calculado com base em combinação linear das reflectâncias espectrais das bandas b2, b3, b4, b5, b6 e b7 do OLI de acordo com procedimentos propostos por Silva *et al.* (2016):

$$\alpha_{toa} = 0.300 r_2 + 0.277 r_3 + 0.233 r_4 + 0.143 r_5 + 0.035 r_6 + 0.012 r_7 \quad (9)$$

em que r_2, \dots, r_7 representam as reflectâncias das bandas de 2 a 7 do OLI. Cada uma dessas reflectâncias foi obtida segundo expressão (SILVA *et al.*, 2016):

$$r_b = \left(\frac{\text{Add}_b + \text{Mult}_b \text{ DN}}{\cos Z \text{ dr}} \right) \quad (10)$$

em que os termos Add_b e Mult_b fazem parte do “radiometric rescaling group”, que integram os metadados que acompanham cada imagem Landsat 8 – OLI/IRTS, obtidos no site do USGS. O ângulo zenital do Sol – Z (grau) foi obtido com base no ângulo de sua elevação, que a exemplo da distância Terra-Sol (em Unidade Astronômica) também fazem partes das informações dos metadados. Para a reflectância da atmosfera – a foi adotado valor igual a 0,03, que tem sido amplamente usado em pesquisas com balanço de radiação em diferentes partes do planeta (BASTIAANSSEN, 2000; SILVA *et al.*, 2015b, 2016). Já a transmissividade atmosférica τ_{sw} presente na Equação (8), e que é válida apenas em condições de céu claro, foi obtida com base no ângulo zenital do Sol – Z , na turbidez atmosférica - k_t , na pressão atmosférica P_a (kPa), e na água precipitável W (mm), de acordo com (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; SILVA *et al.*, 2015a):

$$\tau_{sw} = 0.35 + 0.627 \exp \left[\frac{-0,00146 P_a}{K_t \cos Z} - 0.075 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0.4} \right] \quad (11)$$

em que W (mm) é determinada segundo modelo desenvolvido por Garrison e Adler (1990), qual seja:

$$W = 10 \times \left[0.14 e_a \left(\frac{P_a}{P_{sml}} \right) + 0.21 \right] \quad (12)$$

onde e_a é a pressão parcial do vapor d’água atmosférico (hPa), P_a representa a pressão atmosférica (hPa) e P_{sml} é a pressão atmosférica obtida ao nível médio do mar (hPa).

3.4.2 Determinação da radiação de onda curta incidente

A radiação solar instantânea - $R_{s, \text{inst}}$ (W m^{-2}), ou radiação de onda curta incidente, no instante da passagem do satélite na área de estudo para condição de céu limpo foi estimada com base em parametrização proposta por Allen, Tasumi e Trezza (2007) – $R_{s, \text{inst}}$, qual seja:

$$R_{s, \text{inst}} = S_o \cos Z \text{ d}_r \tau_{sw} \quad (13)$$

onde Z é o ângulo zenital do Sol, obtido nos metadados de cada imagem; S_0 é a constante solar (1.367 W m^{-2}); d_r é a correção da excentricidade da órbita terrestre (adimensional); τ_{sw} é a transmissividade atmosférica para condição de céu claro (Equação 8); e_a é a pressão parcial do vapor d'água (hPa), que no caso foi obtido com base na UR (%) e T_a ($^{\circ}\text{C}$) medida a cada 5s e extraída a média em 10 min, na área experimental (Tabela 4).

3.4.3 Determinação da radiação de onda longa atmosférica e da superfície

A radiação de onda longa emitida por cada pixel da imagem selecionada - R_{em} (W m^{-2}) foi calculada por meio da Lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_{em} = \varepsilon_0 \sigma T_{sup}^4 \quad (14)$$

em que ε_0 é a emissividade de cada pixel em todo o domínio da radiação de onda longa, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), e T_{sup} (K) é a temperatura da superfície, que foi obtida com base na radiância espectral da banda 10 do TIRS - $L_{\lambda,10}$ ($\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) e na emissividade no domínio da banda termal (ε_{NB}), por meio da Lei de Planck invertida (MARKHAM, BARKEWR, 1986):

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda,10}} + 1\right)} \quad (15)$$

em que K_1 e K_2 são as constantes de radiação específicas da banda 10 do TIRS - Landsat 8, que são iguais a $774,89 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e $1.321,08 \text{ K}$, respectivamente. As emissividades ε_0 e ε_{NB} para pixel das imagens selecionadas foram determinadas em função do Índice de Área Foliar - IAF ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$) conforme parametrização proposta por Tasumi (2003).

Já a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície - R_{atm} , (W m^{-2}) foi calculada com base na lei de Stefan-Boltzmann (Equação 14), em que T_{sup} foi substituída pela temperatura do ar obtida na estação experimental de Paudalho - PE nos 10 min centrados no instante da passagem do Landsat 8 sobre a área de estudo. A emissividade atmosférica - ε_a para condição de céu claro foi determinada com base na equação proposta por Duarte, Dias e Maggioletto (2006), que tem sido confirmada como a que tem proporcionado as melhores estimativas de ε_a , conforme Silva *et al.* (2015), para condições de céu limpo.

3.4.4 Determinação do saldo de radiação diário com imagens

O saldo de radiação diário - $R_n, 24h$ ($W m^{-2}$) foi calculado de acordo com o seguinte modelo Bastiaanssen, (2000), Silva *et al.* (2015a) e Bruin (1987):

$$R_n, 24h, DeB = (1 - \alpha)R_s, 24h - 110 \tau_{sw24h} \quad (16)$$

em que α é o albedo da superfície; $R_s, 24h$ ($W m^{-2}$) é a radiação solar global diária ($W m^{-2}$) e τ_{sw} é a transmissividade média diária, que é igual à razão entre a radiação solar global diária à superfície [$R_s, 24h$ ($MJ m^{-2}$)] e a radiação solar diária no topo da atmosfera terrestre $R_{s,toa}$ ($MJ m^{-2}$).

3.5 Determinação dos componentes do saldo com dados de superfície

Para se determinar os fluxos radiativos de onda curta e de onda longa incidentes e emergentes na área experimental foi instalada uma base no interior da área delimitada para essa finalizada. Conforme apresentado em **4.3 – Campanha Experimental**, os fluxos radiativos de onda curta foram medidos com radiômetros CM3 (Kipp-Zonen, Delf, Holanda) e os de onda longa com pirgeômetros CG3 (Kipp-Zonen, Delf, Holanda). Já os dados de umidade relativa - UR e temperatura do ar T_a foram medidos com um termohigrômetro HMP45C (Vaisala, Kelsink, Finlândia).

Com base nas medidas efetuadas pelos sensores instalados na torre experimental foram elaboradas planilhas eletrônicas contendo os dados extraídos do datalogger, quais sejam: T_a ($^{\circ}C$), UR (%), $R_{s,inst}$ ($W m^{-2}$), $R_{s,ref}$ ($W m^{-2}$), albedo (α_{sup}), $R_{ol,atm}$ ($W m^{-2}$), $R_{ol,sup}$ ($W m^{-2}$) para todo o período experimental, com periodicidade de 10 min, o que resultou em 144 dados diários de cada uma das variáveis agrometeorologias mencionadas.

3.6 Valores horários, diários e sazonais das variáveis agrometeorologias estudadas

Elaborou-se um programa em Visual Basic for Applications – VBA com a finalidade de gerar o ciclo médio diário de cada uma das variáveis investigadas, para cada um dos meses estudados. Para cada mês, foram igualmente obtidos os valores horários de cada uma das variáveis envolvidas no balanço radiativo, o que resultou em 24 valores por dia e 24 x 30 ou 24 x 31 dados de cada variável por mês.

No mesmo programa, elaborou-se um algoritmo para determinar a média diária de cada uma das variáveis envolvidas no balanço de radiação: T_a ($^{\circ}C$), UR (%), $R_{s,inc}$ ($W m^{-2}$), $R_{s,refl}$ ($W m^{-2}$), $R_{ol,atm}$ ($W m^{-2}$), $R_{ol,sup}$ ($W m^{-2}$) e R_n ($W m^{-2}$). Por fim, foi requisitado que se extraísse a média horária de cada variável, para cada dia de observação. Com base nessas

informações, foram obtidos os gráficos e tabelas apresentados no capítulo de Resultados e Discussão.

Dado o grande volume de informações foram também reunidos os valores obtidos por estações do ano. Nesse sentido, considerou-se como *verão* a estação que reuniu os dados gerados nos meses de janeiro a março, *outono* os gerados nos meses de abril a junho, *inverno* os gerados de julho a setembro e *primavera* os obtidos nos meses de outubro a dezembro.

3.7 Determinação da radiação de onda atmosférica

Em virtude da falta de informações regulares da radiação de onda longa atmosférica – ($R_{ol,atm}$) medidas em estações meteorológicas das redes oficiais, são empregadas campanhas com a finalidade de geração de modelos que possibilitem estimar a ($R_{ol,atm}$) com base em variáveis medidas em estações meteorológicas, em particular T_a ($^{\circ}C$) e UR (%). Nesse sentido, foram considerados quatro modelos de estimativas da $R_{ol,atm}$ para condições de céu claro, e também mais quatro para condições de céu nublado. Os diferentes modelos avaliados se encontram representados na Tabela 5.

Tabela 5. Modelos destinados ao cálculo da radiação de onda longa atmosférica ($R_{ol, atm}$) para dias de céu claro e para dias de céu nublado.

| Autores | Equações |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sugita e Brutsaert (1993) - céu claro | $R_{ol, atm} = \left[0.714 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.0678} \right] \sigma T_a^4$ |
| Duarte; Dias e Maggiotto (2006) – céu claro | $R_{ol, atm} = \left[0.625 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.131} \right] \sigma T_a^4$ |
| Kruk et al. (2010) – céu claro | $R_{ol, atm} = \left[0.576 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.202} \right] \sigma T_a^4$ |
| Santos et al. (2011) - céu claro | $R_{ol, atm} = \left[0.6905 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{0.0881} \right] \sigma T_a^4$ |
| Aubinet (1994) (1) - céu nublado | $R_{ol, atm} = \sigma \cdot (A + B \cdot T_a - C \cdot K_t)^4$ A= -29 B = 1,09 C = 19,9 |
| Aubinet (1994) (2) - céu nublado | $R_{ol, atm} = \sigma \cdot [A + B \cdot \ln(1000 \cdot e_a) - C \cdot K_t + D \cdot T_a]^4$ A= -94 B = 12,6 C = 0,13 D = 0,341 |
| Aubinet (1994) (3) - céu nublado | $R_{ol, atm} = \sigma \cdot [A + B \cdot \ln(1000 \cdot e_a) - C \cdot K_t]^4$ A= 154 B = 17,7 C = 9,93 |

| Autores | Equações |
|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gabathuler; Marty e Hanselmann (2001) - céu nublado | $R_{ol, atm} = \left\{ \left[\frac{A \cdot (UR - 68)}{\sigma \cdot T_a^4} \right] + \left[\frac{B \cdot K_t}{T_a} + 1 \right]^4 \right\} \cdot \sigma \cdot T_a^4$ $A = 0,84 \quad B = -21$ |

3.7.1 Índice de claridade (K_t)

A transmitância atmosférica ou transmissividade atmosférica é dada pela razão entre a radiação solar global incidente $R_{s,inc}$ e a radiação solar que atingiria uma superfície horizontal no topo da atmosfera $R_{s,toa}$. No presente trabalho determinou-se a transmissividade atmosférica média diária, também designada de coeficiente de claridade – K_t para cada um dos dias do ano. Para tanto, foi empregada uma expressão bastante difundida e de uso igualmente muito utilizado, no cômputo da radiação solar diária no topo da atmosfera – ($R_{s, toa}$) ($MJ m^{-2}$), qual seja (ALLEN *et al.*, 1994; IQBAL, 1983):

$$R_{s,toa} = \frac{24 \times 60}{\pi} S_0 E_0 (H \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin H) \quad (17)$$

em que $S_0 = 0,0820 MJ m^{-2} min^{-1}$ é a constante solar, Φ é a latitude local, δ é a declinação solar e H é o ângulo horário por ocasião do nascer do Sol (por convenção negativo ao nascer do Sol e positivo ao pôr) e E_0 é a correção da excentricidade da órbita solar dada por:

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos \left[\left(\frac{2 \pi}{365} \right) DSA \right] \quad (18)$$

sendo DSA o dia sequencial do ano. Para a determinação do ângulo horário H se empregou a seguinte equação:

$$\cos H = -\operatorname{tg} \Phi \operatorname{tg} \delta \quad (19)$$

em que a declinação solar (rad) pode ser calculada por:

$$\delta = 0,409 \sin \delta \left[\left(\frac{2 \pi}{365} \right) DSA - 1,39 \right] \quad (20)$$

3.8. Parâmetros estatísticos empregados

3.8.1 Erros

Para análise dos resultados foram utilizados o Erro Médio Absoluto - MAE (Wm^{-2}), Erro Relativo Médio – RME (%) e a Raiz do Erro Quadrático Médio - REQM (Wm^{-2}), conforme as expressões abaixo:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{est} - x_{obs}| \quad (21)$$

$$RME = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{x_{est} - x_{obs}}{x_{obs}} \right| \quad (22)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_{est} - x_{obs})^2}{N}} \quad (23)$$

em que:

X_{obs} - corresponde ao valor da variável agrometeorologias em consideração;

X_{est} - corresponde ao valor observado da variável agrometeorologia em consideração;

N - Corresponde ao número de pares de dados da variável em avaliação.

3.8.2 Correlação de Pearson

Foram utilizados para os cálculos das multivariável o programa estatístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), conforme a equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(obs_i - \overline{obs})(est_i - \overline{est})]}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2][\sum_{i=1}^n (est_i - \overline{est})^2]}} \quad (24)$$

em que: obs_i representa os valores observados, \overline{obs} representa a média dos valores observados, est_i representa os valores estimados e \overline{est} representa a média dos valores estimados.

3.8.3 Coeficiente de Regressão R^2

O coeficiente de determinação ou coeficiente de regressão (R^2) mostra o percentual da variância de uma das variáveis que pode ser explicado a partir do valor da outra, ou seja, o

R² indica quanto da variância da variável estimada é explicada pela variância das variáveis medidas. Seu valor está no intervalo de 0 a 1: Quanto maior, mais explicativo é o modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitação

Para observar as características climatológicas com maior precisão foi necessário realizar um estudo temporal mensal para a precipitação pluviométrica, e assim distinguiram-se as épocas chuvosas e secas do município de Paudalho. A Tabela 6 apresenta médias mensais da precipitação pluviométrica, referente ao período 1987 a 2016, e as médias mensais do ano 2017.

Tabela 6. Temporalidade mensal dos últimos trinta anos (1987 a 2016) de precipitação na cidade de Paudalho e precipitação mensal (mm) do ano 2017.

| Mês | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Média 30 anos | 72,22 | 57,00 | 89,80 | 151,2 | 175,6 | 229,6 | 196,8 | 118,9 | 57,6 | 26,3 | 22,0 | 33,5 |
| 2017 | 3,2 | 33,3 | 110,9 | 116,3 | 124,1 | 236,2 | 283,1 | 78,8 | 46,2 | 38,3 | 3,1 | 9,8 |

Fonte: APAC (2017).

A precipitação média mensal é de 102,6 mm, com média anual de 1.230,6 mm, cuja mínima é de 621,3 mm e a máxima de 1890,8 mm. O período mais chuvoso se concentra entre os meses de abril a julho e este elevado índice pluviométrico é resultado das características do clima local, predominantemente úmido com chuvas variadas. Entre agosto e dezembro situa-se o período menos chuvoso.

Analisando de forma semelhante o comportamento da precipitação para o ano de 2017 os meses de abril a julho concentram a maior quantidade de chuvas, enquanto o inverso ocorre entre os meses de agosto a dezembro.

Segundo Silva Junior, Lopes e Ferraz (2010) apesar de existir na mesorregião da Mata Pernambucana duas zonas distintas, a Mata Norte (Mata Seca) e a Mata Sul (Mata Úmida), com diferenças, sobretudo, na vegetação, na quantidade e distribuição de chuvas e no relevo, o clima é tropical chuvoso com verão seco. Segundo a APAC a pluviosidade anual da

Zona da Mata pode variar de 1.000 mm a mais de 2.000 mm, com média de 1.500 mm e com o quadrimestre mais chuvoso entre os meses de abril a julho. A temperatura média anual se situa em torno de 24°C (TAVARES *et al.*, 2012) e a umidade relativa média anual apresenta valores no período chuvoso em torno 84% e no período menos chuvoso de 71%.

4.2 Balanço de radiação com imagens OLI/TIRS - Landsat 8

Foram avaliadas todas as imagens OLI/TIRS - Landsat 8 disponíveis no site do USGS que possuíssem condições de nebulosidade que não atingisse a área em que se localizava a base agrometeorológica, de modo que fosse possível comparar as componentes do balanço de radiação obtidas com imagens com aquelas medidas na campanha experimental.

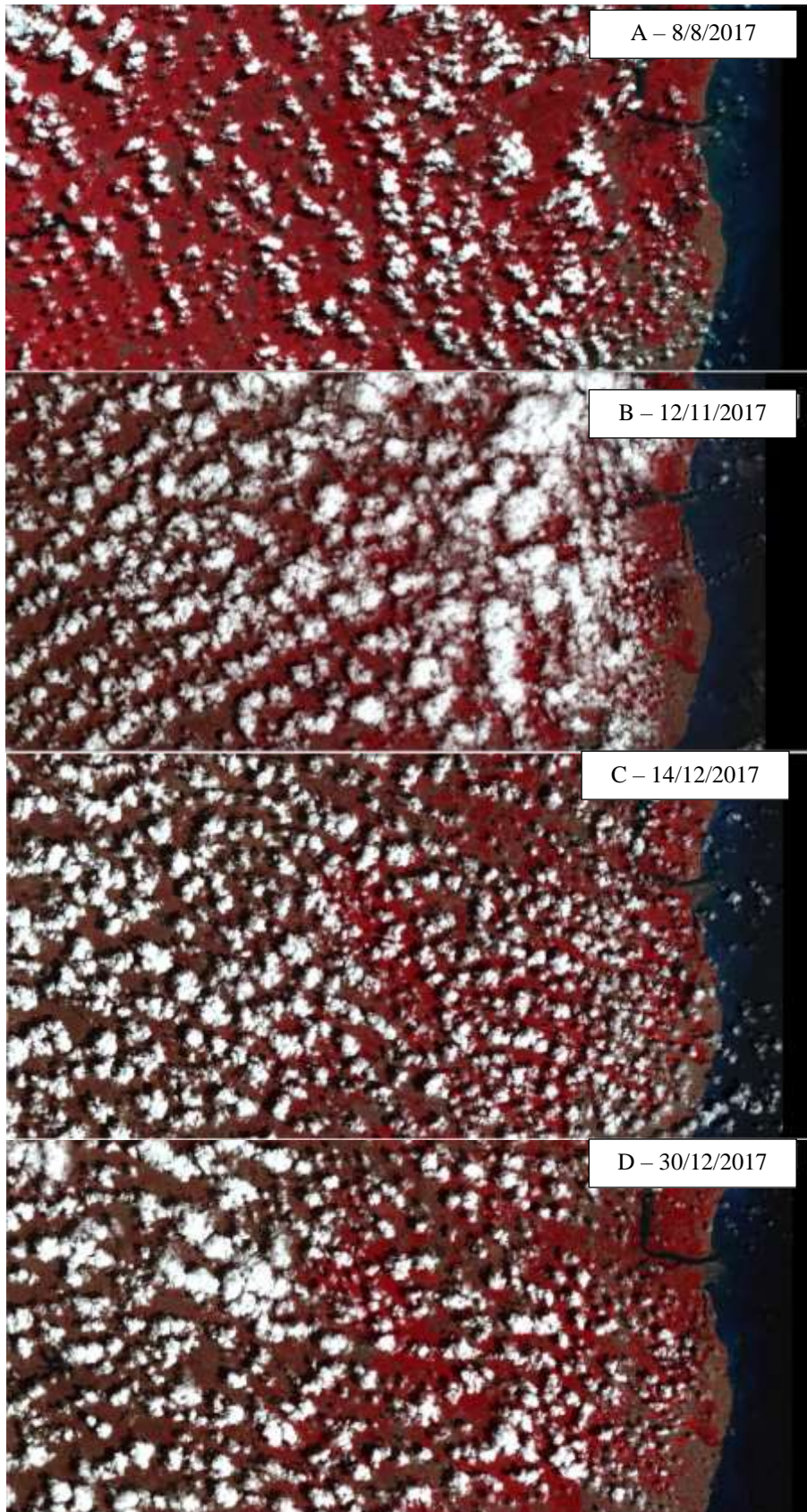
Como se pode observar na Figura 5, de todos os dias pesquisados os que apresentaram a menor cobertura de nuvens não foram suficientes para possibilitar o monitoramento do saldo de radiação nas imediações da região que vai da zona costeira até os 70 a 90 km na direção do interior. No entanto, decidiu-se aplicar o balanço de radiação para analisar os valores de algumas das componentes do balanço de radiação para que fossem confrontados com as observações de superfície na campanha experimental de Paudalho – PE (Tabela 7).

Tabela 7. Dados dos diferentes componentes do balanço de radiação obtidos com imagens Landsat 8 – OLI/TIRS e com instrumentação agrometeorológica em Paudalho – PE.

| Data | Balanço com imagens OLI/TIRS – Landsat 8 | | | | | | | |
|-------------|------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------|-------|-------|
| | Rs,ins (Wm ⁻²) | Rol,atm (Wm ⁻²) | Rn,ins (Wm ⁻²) | Rn,24h (Wm ⁻²) | Albedo (adimensional) | Tsup (K) | NDVI | eo |
| 8/ago/2017 | 778,2 | 366,9 | 534,2 | 118,9 | 0,206 | 296,6 | 0,610 | 0,965 |
| 12/nov/2017 | 879,5 | 392,9 | 645,2 | 141,7 | 0,187 | 301,0 | 0,342 | 0,954 |
| 14/dez/2017 | 845,4 | 385,7 | 507,4 | 121,4 | 0,272 | 306,2 | 0,401 | 0,957 |
| 30/dez/2017 | 817,4 | 401,2 | 507,4 | 115,4 | 0,271 | 298,7 | 0,364 | 0,955 |

| Data | Balanço em superfície com campanha agrometeorológica | | | | |
|-------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| | Rs,ins (Wm ⁻²) | Rol,atm (Wm ⁻²) | Rn,ins (Wm ⁻²) | Rn,24h (Wm ⁻²) | Albedo (adimensional) |
| 8/ago/2017 | 560,0 | 388,6 | 390,3 | 141,3 | 0,181 |
| 12/nov/2017 | 566,6 | 452,0 | 429,4 | 164,4 | 0,164 |
| 14/dez/2017 | 568,8 | 438,8 | 413,1 | 149,0 | 0,193 |
| 30/dez/2017 | 639,0 | 430,4 | 455,7 | 149,1 | 0,181 |

Figura 5. Imagens da área de estudo em composição falsa cor RGB543 para os dias 8 de agosto (A), 12 de novembro (B), 14 de dezembro (C) e 30 de dezembro (D) de 2017.



Fonte: Própria autora.

Comparando as componentes de radiação das imagens do satélite Landsat 8 dos sensores OLI/TIRS, com as componentes medidas para os dias 08/08/2017, 12/11/2017, 14/12/2017 e 30/12/2017 demonstrado na Tabela 7. Observa-se que, mesmo com os resultados que sofreram interferências da nebulosidade apresentada na Figura 5. Nas imagens A, B, C e D destacam-se alguns valores que podem ser confrontados com os valores medidos. A radiação de onda longa da imagem, e a radiação de onda longa medida na estação experimental, os valores para o dia 08/08/2017 foram de $366,9 \text{ wm}^{-2}$ e $388,6 \text{ wm}^{-2}$. Da mesma forma observam-se os valores do albedo nos dias 08/08/2017 e 12/11/2017, da imagem 0,206, 0,187 e da superfície 0,181 e 0,164. Segundo Matos, Azevedo e Candeias (2016) o albedo nas áreas vegetadas são menores do que nas áreas antropizadas. Já nas áreas de solo exposto os valores estão entre 20 a 40% e nas áreas vegetada entre 15 a 19%.

4.3 Temperatura e umidade relativa do ar

Na Tabela 8 estão representadas as temperaturas e umidade relativas do ar médias, mínimas máximas de cada uma das estações do ano e seus meses respectivos, obtidos com base nas medições da campanha experimental realizada na cidade de Paudalho no período experimental.

Tabela 8. Valores médios, mínimos e máximos da umidade relativa - UR (%) e temperatura do ar - Ta (°C) em cada uma das estações e meses do ano.

| ESTAÇÕES | UR | T (°C) | UR | T (°C) | UR | T (°C) |
|------------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
| | (%) | | (%) | | (%) | |
| OUTONO | ABR | | MAI | | JUN | |
| MÉDIA | — | — | 80,49 | 25,34 | 81,83 | 24,47 |
| MÍNIMA | — | — | 63,29 | 22,30 | 65,84 | 21,86 |
| MÁXIMA | — | — | 91,25 | 29,34 | 91,34 | 28,15 |
| INVERNO | JUL | | AGO | | SET | |
| MÉDIA | 82,61 | 22,95 | 74,94 | 24,88 | 77,04 | 23,62 |
| MÍNIMA | 71,14 | 20,92 | 51,82 | 20,95 | 56,03 | 19,81 |
| MÁXIMA | 90,02 | 26,02 | 91,28 | 29,98 | 91,32 | 28,39 |
| PRIMAVERA | OUT | | NOV | | DEZ | |
| MÉDIA | 74,94 | 24,88 | 71,77 | 25,39 | 80,49 | 25,34 |
| MÍNIMA | 51,82 | 20,95 | 46,77 | 20,31 | 63,29 | 22,30 |
| MÁXIMA | 91,28 | 29,98 | 91,87 | 31,32 | 91,25 | 29,34 |

| ESTAÇÕES | UR | T (°C) | UR | T (°C) | UR | T (°C) |
|---------------|------------|--------|------------|--------|------------|--------|
| | (%) | | (%) | | (%) | |
| VERÃO | JAN | | FEV | | MAR | |
| MÉDIA | 73,31 | 26,26 | 76,78 | 26,12 | 78,90 | 26,17 |
| MÍNIMA | 49,67 | 21,78 | 56,08 | 22,16 | 56,64 | 22,36 |
| MÁXIMA | 91,95 | 31,65 | 92,48 | 30,83 | 93,20 | 31,53 |

Na estação do outono, formada pelos meses de abril, maio e junho por motivo de problemas operacionais com o sistema de aquisição de dados não foi possível coletar os dados de temperatura do ar e umidade relativa no mês de abril), as médias mensais da Ta ficaram entre 22,86 °C (mês de julho) e 24,88 °C (mês de agosto), com mínimas entre 19,81 °C e 20,95 °C, enquanto a Ta máxima apresentou seu maior valor no mês de maio, sendo igual a 29,98°C. Os valores da umidade relativa média, mínima e máxima situaram-se entre 74,94 e 82,61 %, 51,86 % e 71,14%, e entre 90,02 % e 91,32 5, respectivamente.

Na primavera, correspondente aos meses outubro, novembro e dezembro, as temperaturas do ar mínima, média e máxima estiveram respectivamente entre 20,31°C e 22,30 °C, 24,88 °C e 25,39 °C, e entre 31,32 e 29,34 °C. A umidade relativa mínima, média e máxima, por sua vez, variou de 46,77 % e 63,29 %, 71,77 % a 80,49 %, e de 91,25 % a 91,87 %, respectivamente.

Para o período do verão os valores da temperatura do ar mínima, média e máxima atingiram 21,78°C, 26,12°C e 31,65°C, respectivamente, ocorrendo todos esses valores em janeiro. Já a umidade relativa do ar mínima, média e a máxima registraram respectivamente 49,67% (janeiro), 73,31% (janeiro) e 93,20% (março).

Verificou-se, como um todo, no município de Paudalho, que as estações que tiveram valores menores e os valores da temperatura do ar foram o inverno e o verão, respectivamente. Concorreram para isso a sazonalidade da radiação solar, com seus maiores valores no verão, e por ser o período com maior quantidade de precipitações, conforme resultados apresentados na Tabela 6, e outros registros da Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC, 2017).

Conforme dados da Tabela 9, a umidade relativa do ar apresentou seu menor valor na estação da primavera 46,77% no mês de novembro e seu maior valor no verão, sendo de 93,20% e tendo ocorrido no mês de março.

Nas Figuras 6, 7 e 8 estão representados os ciclos diários da temperatura do ar e da umidade relativa, que consistem dos valores médios de cada um dos 144 intervalos de 10 minutos contidos em cada dia um dos dias de cada mês.

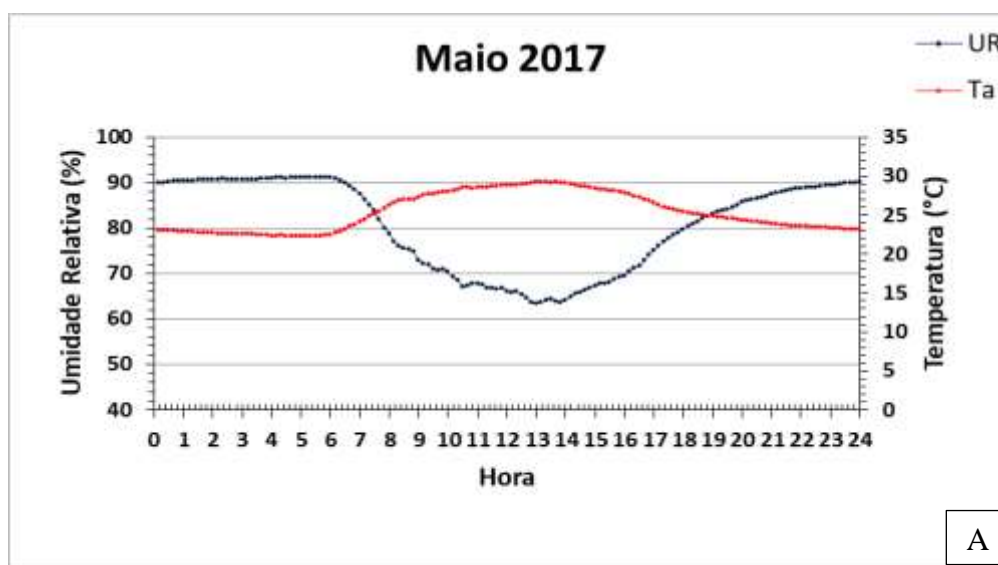
Os padrões apresentados em todos os meses e estações revelam claramente que nos momentos de maior Ta ocorrem os menores valores da UR. Fica claro que a UR se situou em torno de 90% nos extremos noturnos, e entre 60-70% no período diurno. Já a temperatura do ar nessa mesma estação do ano, ficou entre 25 °C e 30 °C em maio e entre 24 °C e 28,5 °C em junho.

Os limites alcançados pela temperatura do ar e umidade relativa naturalmente que coincidem com os resumidos na Tabela 8, e por essa razão dispensam que sejam repetidos nessa seção.

De acordo com as pesquisas de Medeiro *et al.* (2009), foram encontradas na Zona da Mata Norte Pernambucanas valores médios anuais de temperaturas mínimas de 22,6°C a 23,2 °C e máximas entre 26,0°C e 26,3°C nos municípios de Primavera, São Loureço da Mata, Igarassu. No município de Paudalho foram encontrados valores de Temperatura entre 22,86 °C e 24,88 °C para os meses de julho e agosto. Os resultados encontrados corroboram com a eficácia dos dados medidos na Região.

Nas Figuras 6 a 9 estão representados o ciclo médio diário temperatura do ar e umidade relativa, durante todo período da campanha experimental, levando em consideração a sazonalidade, separando os meses por estações do ano outono, inverno, primavera, verão.

Figura 6. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação de Outono representados pelos mês de (A) Maio, (B) Junho de 2017em Paudalho – PE.





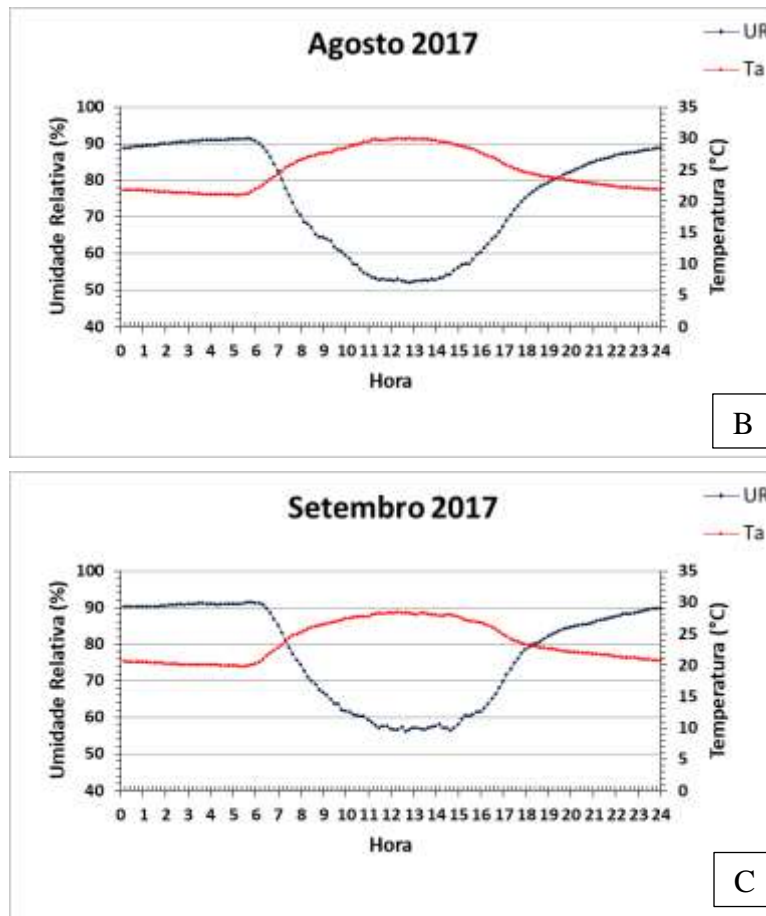
Fonte: Própria autora.

O ciclo diário da Ta e UR na estação do outono, que está representado nos meses de maio e junho. Observa-se que teve as maiores temperaturas nestes meses. De acordo com o Figura (A), foram nos horários de 8 às 16 horas. Confrontado com os dados da Figura 10, dos componentes do saldo de radiação para a estação do outono, observa-se que a radiação solar global nestes meses, teve maior intensidade solar nos horários de 8 horas às 16 horas e a UR houve uma diminuição, encontrando-se dentro da normalidade temporal, por ser um período para região da zona da Mata Norte, chuvoso de acordo com a (APAC, 2017) como mostra a Tabela 7. Nos horários menores de temperatura foram encontrados no início do dia e o de maior temperatura às 12 horas coincidindo com a umidade relativa que é a maior no início do dia e menor às 12 horas.

A Figura 7 representada pelos meses de julho, agosto e setembro são meses que ainda são considerados inverno. A partir do dia 23 de setembro inicia-se a primavera.

Figura 7. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação de Inverno representados pelos meses de (A) julho, (B) Agosto, (C) setembro de 2017 em Paudalho – PE.



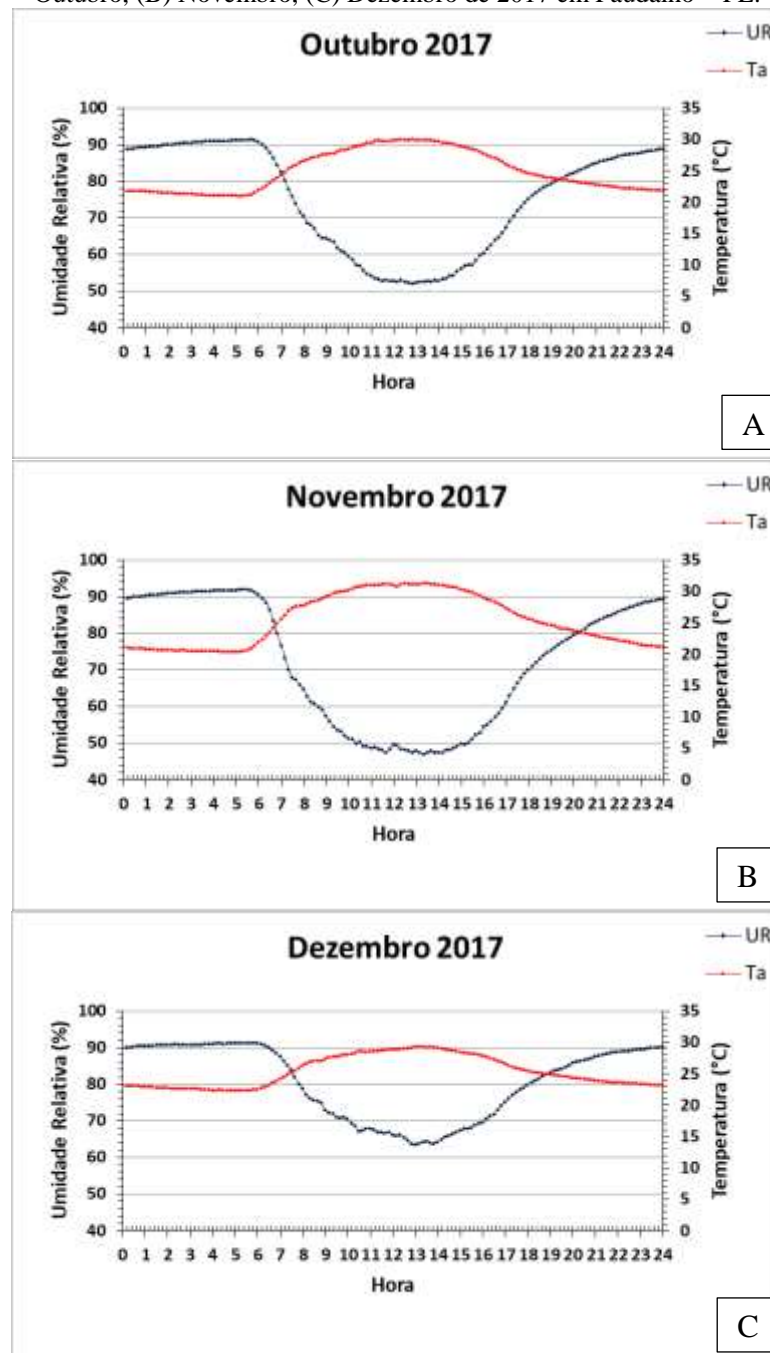


Fonte: Própria autora.

Na Figura 7 observa-se que, no inverno, a temperatura se manteve alta ao longo do dia nos horários de 9 as 15 horas nos meses de agosto e setembro e a UR amenas neste período se mantendo dentro da normalidade. No mês de julho se confirmando com a tabela 7, observamos que houve neste período uma quantidade expressiva de precipitação de 283.1 mm comparado com os meses chuvosos para o mês de julho, alterando o comportamento do gráfico ocorrendo uma diminuição expressiva na Ta e um aumento na UR. De acordo com a Figura 11, observa-se que no período de julho a radiação incidente, alcançou os menores valores do período, no mês de julho de 513,4 (Wm^{-2}).

A Figura 8 é composta pelos meses de outubro, novembro, dezembro representando a estação da primavera e dia 21 de dezembro iniciando o solstício de verão.

Figura 8. Ciclo diário da Ta (°C) e da UR (%) para a estação da Primavera representados pelos meses de (A) Outubro, (B) Novembro, (C) Dezembro de 2017 em Paudalho – PE.



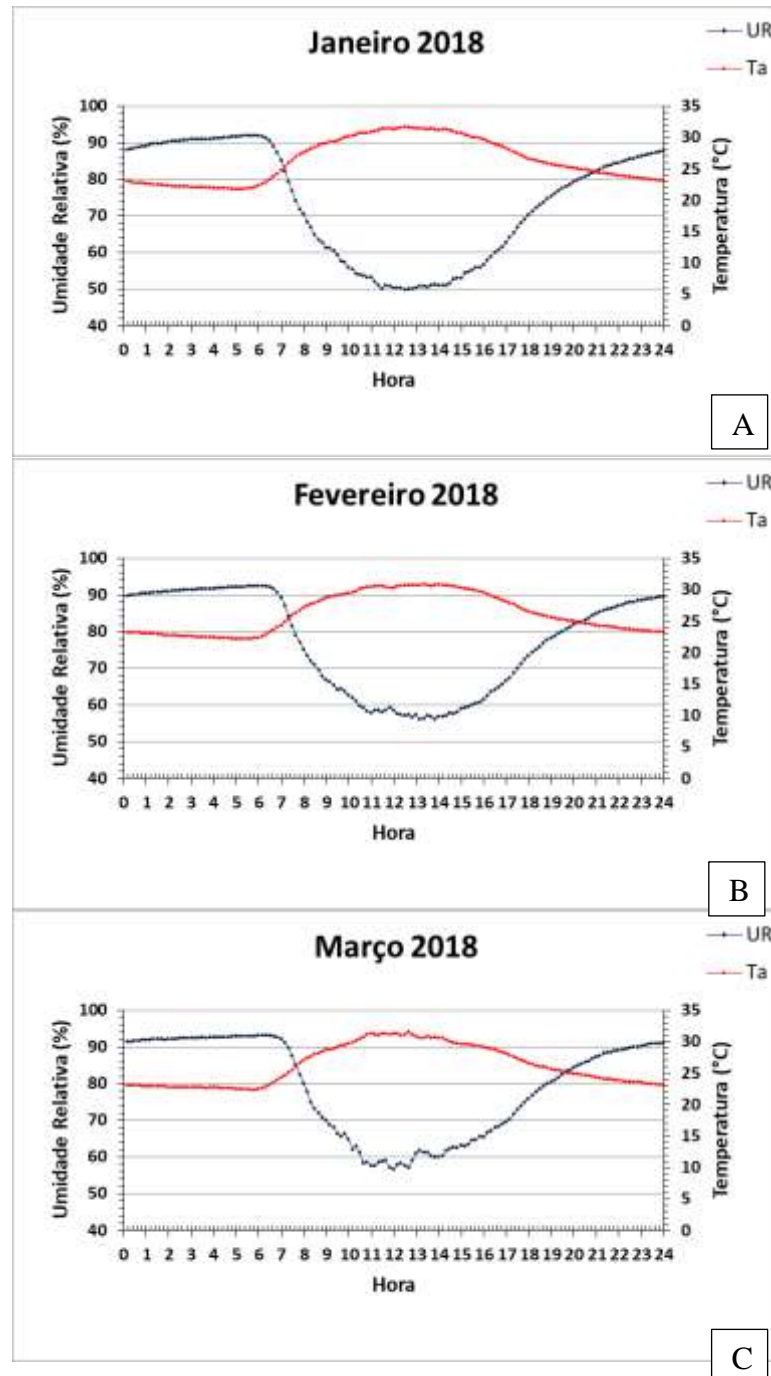
Fonte: Própria autora.

Observa-se que no mês de outubro, novembro e dezembro, de acordo com a Figura 8 houve uma variação da temperatura e umidade, iniciando os primeiros horários do dia, com a temperatura a menos e a umidade relativa alta e ao longo do dia, nos horários de 8h as 17h a temperatura se manteve alta e a umidade relativa baixa. Implicará dizer, com esses resultados que a temperatura e umidade estão dentro da normalidade. Segundo a tabela 7, nesse período, houve uma quantidade de chuva dentro da normalidade considerando a Região da Zona da

Mata Norte Pernambucana. A radiação solar incidente nos meses de dezembro apresentou no pico diário um resultado de $797,8 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ e novembro $722,4 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$.

Na Figura 9 os meses de janeiro, fevereiro e março são considerados o período da estação do verão.

Figura 9. Ciclo diário da Ta (oC) e da UR (%) para a estação do Verão representado pelos meses de (A) Janeiro, (B) Fevereiro, (C) Março de 2018 em Paudalho – PE.



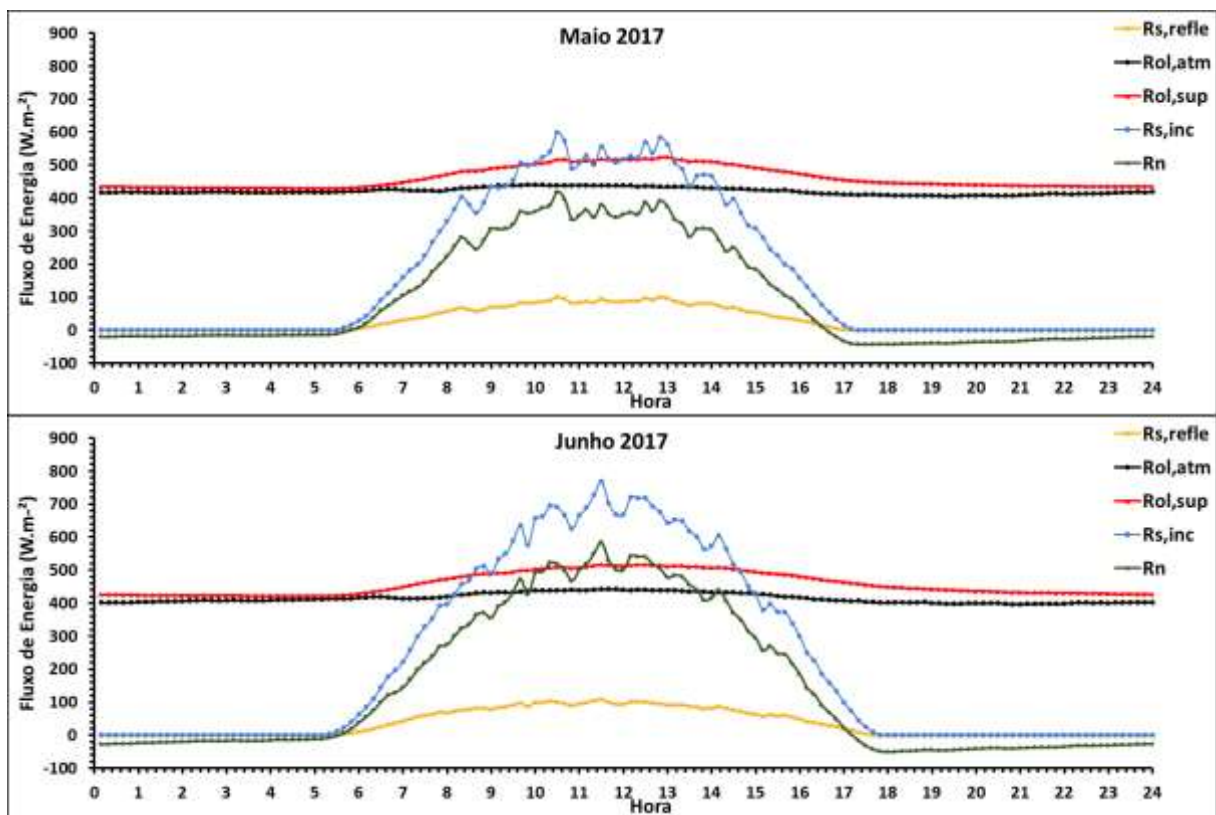
Fonte: Própria autora.

Observa-se que no mês de janeiro há uma variação da Ta e da UR dentro da normalidade para o período e em fevereiro e março houve uma variação ao longo do dia expressiva tanto para a Ta como UR. Os maiores valores de radiação solar ao longo do dia foram no mês de março com o pico de $907,7 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ de acordo com a Figura 13.

4.4 Componentes do balanço de radiação

Os componentes do balanço de radiação que se referem ao balanço de onda curta (Boc) e ao balanço de onda longa (Bol) foram analisados por estação do ano, atendendo o período da sazonalidade, que compreende o outono (abril, maio, junho), inverno (julho, agosto, setembro), primavera (outubro, novembro dezembro) e verão (janeiro, fevereiro, março). De acordo com os dados coletados na campanha experimental na cidade de Paudalho – PE, foram determinados quais as maiores e menos valores das médias, nos horários de maior incidência solar, que de acordo com as Figuras 10 a 13, foram observados na cidade de Paudalho entre os horários de 8h as 16h, tempo local.

Figura 10. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação do Outono em Paudalho – PE.

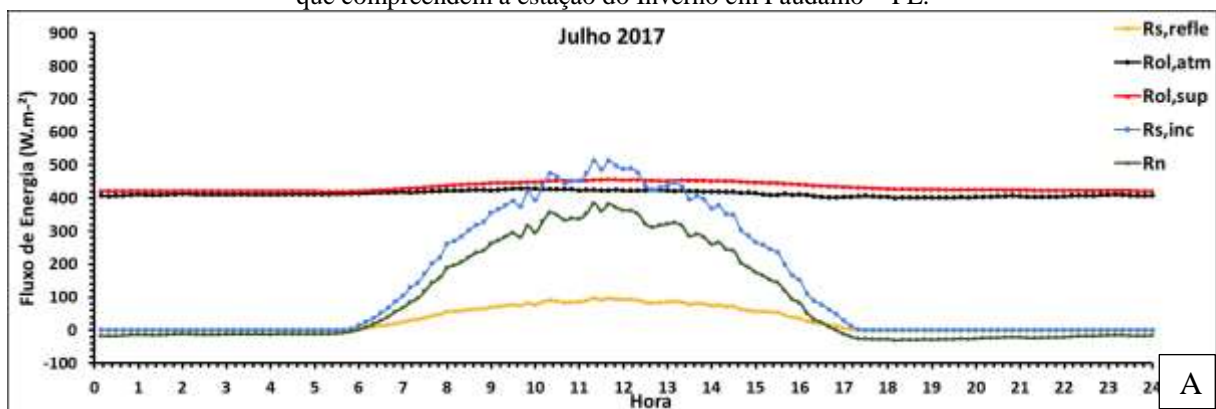


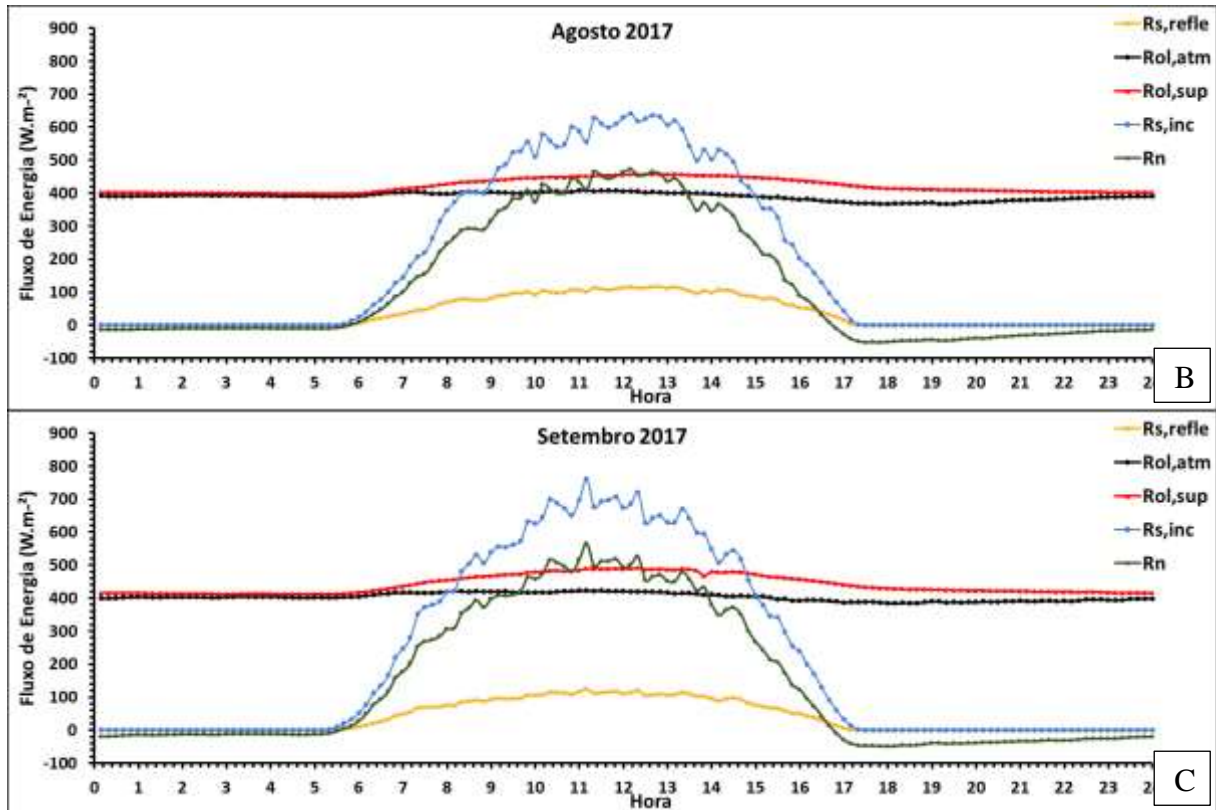
Fonte: Própria autora.

Observa-se, na Figura 10, uma acentuada variabilidade dos componentes do balanço de radiação, representados pelas médias extraídas a cada dez minutos e que resultam em 144 intervalos por dia. Depreende-se, da referida figura, que os componentes de onda longa resultam em médias diárias superiores à radiação solar incidente $R_{s,inc}$ (Wm^{-2}); no entanto, como a radiação de onda longa atmosférica – $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) e a radiação de onda longa da superfície – $R_{ol,sup}$ (Wm^{-2}) possuem valores muito próximos, o saldo de onda longa resulta em valores muito baixos. Já as componentes de onda curta produzem um saldo muito elevado e que terminam por definir o padrão do saldo de radiação – R_n (Wm^{-2}). As maiores médias da $R_{s,inc}$ ocorreram no mês de junho, e ficaram em torno de $768,6 Wm^{-2}$ enquanto as menores ocorreram no mês de maio, com valores por volta dos $598,8 Wm^{-2}$. Para a radiação de onda curta refletida $R_{s,ref}$ (Wm^{-2}), os maiores valores foram de $109,4 Wm^{-2}$ no mês de maio e os menores valores, com médias de $101,2 Wm^{-2}$ em junho.

Para a radiação de onda longa atmosférica - $R_{ol,atm}$ as maiores médias foram de $439,8 Wm^{-2}$ em junho e as menores médias ocorreram no mês de maio, próximas de $441,3 Wm^{-2}$. Sistemáticamente, a radiação de onda longa da superfície – $R_{ol,sup}$ se mostraram maiores que a $R_{ol,atm}$, o que se explica pelo fato de a temperatura do ar se manter em geral menor que a temperatura da superfície. Os valores do $R_{ol,sup}$ foram de $523, Wm^{-2}$ no mês de maio e as menores médias ocorreram no mês de junho, iguais a $516,3 Wm^{-2}$. A síntese do balanço de radiação é representada pelo saldo de radiação – R_n (Wm^{-2}), que nessa estação registram os maiores valores por volta de $585,6 Wm^{-2}$ em junho e $418,6 Wm^{-2}$ em maio.

Figura 11. Componentes do balanço de radiação nos meses de (A) Julho, (B) Agosto, (C) Setembro de 2017, que compreendem a estação do Inverno em Paudalho – PE.



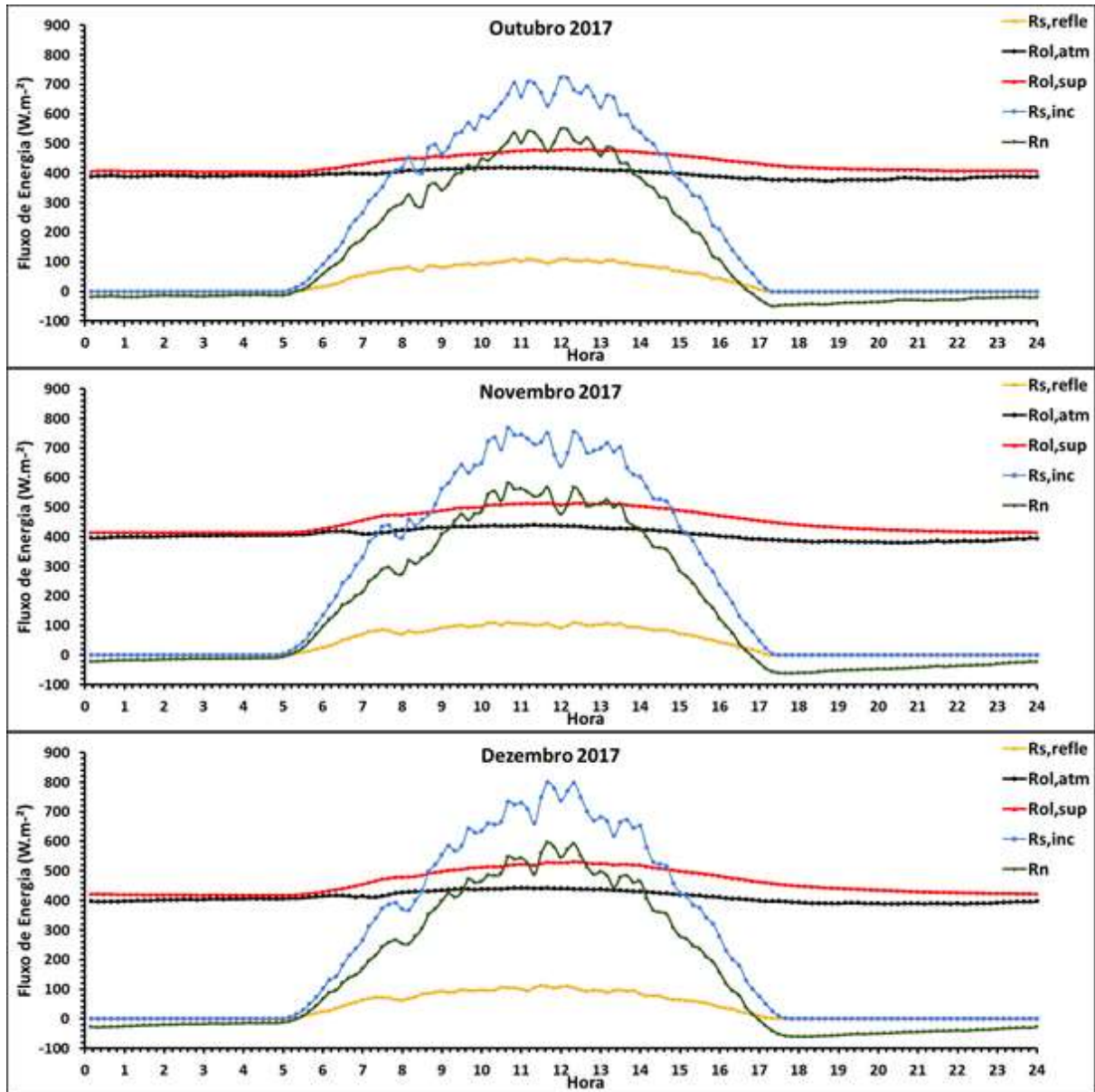


Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 11 observa-se que na estação do inverno os maiores valores de radiação solar incidente – R_{inc} foram de $759,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, e que ocorreram no mês de setembro, enquanto a mínima foi registrada no mês de julho, com valor igual a $513,4 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$.

Analisando a radiação de onda curta refletida – R_{refl} verifica-se que os seus valores ficaram entre $126,1 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, no mês de setembro, e $97,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, no mês de julho. Para a radiação de onda longa atmosférica - R_{atm} os maiores valores foram de $428,8 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, obtidos no mês de julho e os menores no mês de agosto, com $407,2 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Por sua vez, a radiação de onda longa da superfície - R_{sup} no período do inverno, atingiu os maiores valores no mês de setembro, chegando a registrar $491,6 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, enquanto os menores valores foram detectados no mês de julho, com mínimo de $456,6 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. O saldo de radiação – R_n nessa estação do ano registrou as maiores médias no mês de setembro, sendo de $565,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ e as menores médias encontradas foram de $384,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, no mês de julho.

Figura 12. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação da Primavera em Paudalho – PE.

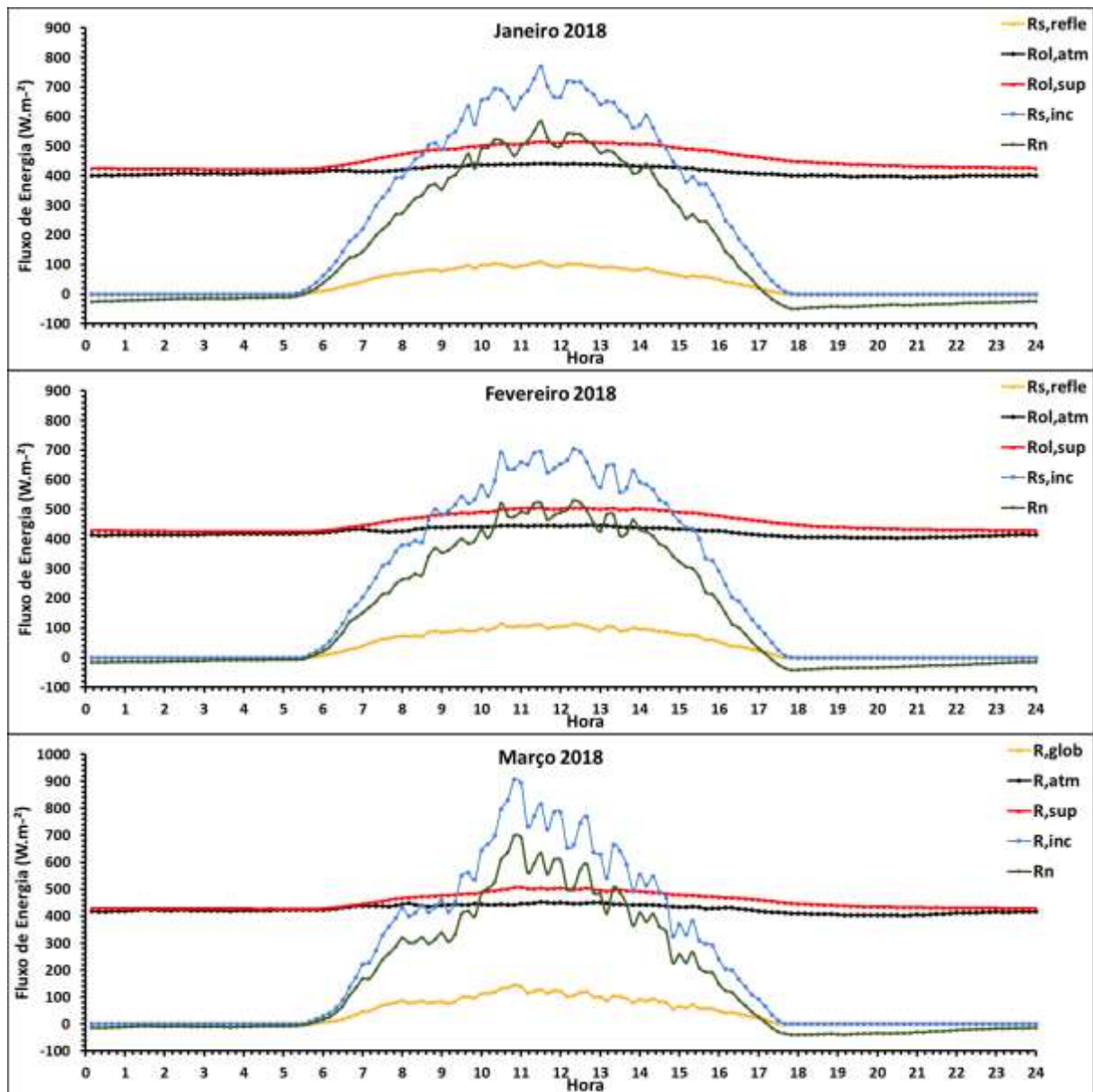


Fonte: Própria autora.

Na Figura 12 estão representados os dados do balanço de radiação da estação da primavera, em que se observa que as maiores médias para a radiação de onda curta incidente são de 797,8 (Wm^{-2}) encontrados no mês de dezembro e as menores médias chegaram a 722,4 (Wm^{-2}), contabilizadas no mês de outubro. Os maiores valores da radiação de onda curta refletida foram de 112,7 Wm^{-2} , observados no mês de dezembro, e os menores valores foram de 100,0 Wm^{-2} , medidos no mês de outubro. Observou-se que a radiação de onda longa atmosférica chegou a registrar 441,4 (Wm^{-2}) no mês de dezembro e a menor média de 379,39 (Wm^{-2}) mês de outubro. Já a radiação de onda longa emergente da superfície atingiu média de

531,5 Wm^{-2} no mês de dezembro e seu menor valor foi de 404,1 (Wm^{-2}), ocorrido no mês de outubro. Por fim, observou-se que os resultados do saldo de radiação - R_n , a síntese do balanço radiativo, proporcionaram média de 595,7 (Wm^{-2}) no mês de dezembro e os menores valores foram contabilizados em outubro, com 112,8 (Wm^{-2}).

Figura 13. Componentes do balanço de radiação nos meses que compreendem a estação do Verão em Paudalho-PE.



Fonte: Própria autora.

Observa-se, na Figura 13, a representação dos componentes do balanço de radiação na estação do verão. Constata-se que os maiores valores da radiação de onda curta incidente - R_{inc} (Wm^{-2}) ocorreram no mês março, com a média de 907,7 (Wm^{-2}) e que as menores médias, no período, foram registradas no mês de janeiro, com valor de 768,6 (Wm^{-2}). Para a

radiação de onda curta refletida (R_{refl}) foram encontrados os maiores valores de no mês de fevereiro, com $115,6 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ e as menores médias ocorreram em março, com densidade de potência igual a $27,5 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Analisando os valores de radiação de onda longa da atmosférica ($R_{ol,atm}$), constatou-se que as maiores médias obtidas foram de $451,5 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, no mês de março, enquanto que os menores valores ocorreram em janeiro, com $441,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Já a radiação de onda longa da superfície ($R_{ol,sup}$) registrou os maiores valores no mês de março, com $567,7 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ e os menores valores ocorreram mês de janeiro, com $422,9 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Para saldo de radiação (R_n) foram contabilizados $698,8 \text{ Wm}^{-2}$ no mês de março e as menores médias encontradas ocorreram no mês de fevereiro, com valores de $529,3 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Verificou-se que a estação do verão foi a que apresentou o maior valor da radiação solar incidente (R_{inc}), que atingiu $907,7 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, que por coincidir com a estação menos chuvoso do ano provocar também os maiores valores da radiação de onda longa da superfície. Para o inverno foram encontrados valores de $639,8 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Estudo desenvolvidos por Souza et al. (2005), realizado com dados da cidade de Maceió registraram médias da ($R_{s,inc}$) de $886,0 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$ no verão e no inverno valores de $630,2 \text{ Wm}^{-2}$. Na estação do verão e primavera de Paudalho, no período de estudo, os valores mais elevados da radiação de onda longa atmosférica ocorreram no verão, com $451,5 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$, e na primavera foram de $441,5 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$.

Observa-se que nas Figuras 10, 11, 12 e 13 ao longo da curva das componentes de R_{inc} , R_{refl} e do R_n durante o dia nos horário de maior incidência solar, há uma rugosidade nos gráficos, demonstrando que neste período a atmosfera não está completamente sem presença de nuvens Galvani e Souza *et al.* (2006). Os valores de radiação incidentes encontrados ao meio dia durante toda campanha experimental do inverno ao verão encontramos máximos valores $797,8 \text{ Wm}^{-2}$ a $907,7 \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$. Valores semelhantes foram encontrados na região sudeste em estudos desenvolvidos por Galvani e Souza (2006) na cidade de Botucatu, São Paulo.

Nota-se que no saldo de radiação, os maiores valores foram encontrados no período menos chuvoso para radiação global que corresponde aos meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de acordo com a Tabela 6. O Saldo de radiação medido se encontra dentro dos resultados esperados, segundo Silva, Lopes e Azevedo (2005). Di Pace *et al.* (2008) constataram que o saldo de radiação tem os seus maiores valores em áreas vegetada do que em áreas urbanas.

4.5 Modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica

Considerando-se a grande importância da radiação de onda longa atmosférica – $R_{ol,atm}$ em diversas aplicações e a pouca disponibilidade desse tipo de dado, foram empregados oito modelos de estimativa da $R_{ol,atm}$, sendo quatro para dias de céu claro e quatro para dias de céu nublado. Para avaliar o grau de presença de nuvens, ou de nebulosidade, empregou-se o Índice de Claridade – K_t , definido por Iqbal (1983) como sendo igual à razão entre a radiação solar global diária e a radiação que atinge uma superfície horizontal no topo da atmosfera terrestre – $R_{s,toa}$. Os dados do balanço de radiação apresentados na seção 4.3 evidenciaram que são raros os intervalos de tempo do dia em que não se registra presença de nuvens em Paudalho – PE, o que apontaria que apenas os modelos de céu nublado deveriam ser testados. No entanto, foram gerados dados da $R_{ol,atm}$ para modelos de céu claro, que são muito utilizados para situações instantâneas em estudo com balanço de radiação com imagens satelitárias (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007; BASTIAANSSEN, 2000; SILVA *et al.*, 2015a). Salientando que os modelos foram adaptados e ajustados as características do lugar em estudo.

Na Tabela 9 estão representados os valores médios diários da medidos - $R_{ol,atm}$ (Wm^{-2}) e estimados com os quatro modelos de céu claro selecionados para a pesquisa, que foram os de Sugita e Brutsaert (1993), Duarte, Dias e Maggioletto (2006), Kruk *et al.* (2010) e Santos *et al.* (2011). Depreende-se da referida tabela que todos os modelos empregados subestimam a $R_{ol,atm}$, exceto o de Kruk *et al.* (2010) em dezembro de 2017. Esses resultados de certa forma já eram esperados, uma vez que a nebulosidade produz um fenômeno chamada de *contra radiação*, que faz com que parte da radiação de onda longa emergente da superfície - $R_{ol,sup}$ seja absorvida pela base da nuvem e seja emitida na direção da superfície se somando àquela emitida pelos gases atmosféricos. Os resultados do balanço de radiação, por sua vez, demonstram que a presença de nuvem reduz o saldo R_n , mas por outro lado, aumenta a $R_{ol,atm}$ em comparação a condições de céu claro e para valores aproximados de T_a , que afeta juntamente com a emissividade os valores da $R_{ol,atm}$.

De acordo com a Tabela 10 a $R_{ol,atm}$ medida apresentou seu máximo em maio de 2017 e o seu menor valor médio diário em agosto do mesmo ano. Os modelos que apresentaram as maiores discrepâncias, ou seja, as maiores diferenças em relação aos dados medidos, foram os de Duarte, Dias e Maggioletto (2006) e Sugita e Brutsaert (1993).

Tabela 9. Valores médios diários da radiação de onda longa atmosférica – Rol, atm (Wm^{-2}) medidos e obtidos com os modelos de céu claro de Sugita & Brutsaert (1993), Duarte; Dias e Maggiotto (2006), Kruk et al. (2010) e Santos et al. (2011) em Paudalho – PE entre maio de 2017 e março de 2018.

| RADIAÇÃO DE ONDA LONGA PRA DIAS DE CÉU CLARO (Wm^{-2}) | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Meses/ano | Rol_atm | Sugita e Brutsaert (1993) | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | KruK et al. (2010) | Santos et al. (2011) |
| Maio/2017 | 420,6 | 372,9 | 373,5 | 401,4 | 376,1 |
| Junho/ 2017 | 419,9 | 367,7 | 367,6 | 394,1 | 370,6 |
| Julho/2017 | 412,5 | 358,4 | 313,7 | 380,2 | 360,7 |
| Agosto/2017 | 402,2 | 368,1 | 366,5 | 391,1 | 370,5 |
| Setembro/2017 | 402,9 | 360,9 | 358,4 | 381,3 | 363,0 |
| Outubro/2017 | 408,1 | 364,8 | 363,3 | 387,8 | 367,2 |
| Novembro/2017 | 406,5 | 370,3 | 368,4 | 392,8 | 372,7 |
| Dezembro/2017 | 410,2 | 376,2 | 375,2 | 431,7 | 378,9 |
| Janeiro/2018 | 414,5 | 376,4 | 376,1 | 402,9 | 379,3 |
| Fevereiro/2018 | 422,5 | 376,7 | 377,2 | 405,3 | 379,9 |
| Março/2018 | 402,8 | 367,5 | 366,1 | 391,3 | 370,0 |

Conforme os resultados apresentados a seguir na Tabela 10, de um modo geral os modelos de céu nublado se aproximaram bastante dos valores medidos, diferentemente dos apresentados pelos modelos de céu claro, mas com alguns superando as medições e esses mesmos ocasionalmente subestimando as medidas. O modelo Aubinet (2) foi o que apresentou os maiores valores em comparação aos demais, indo de 406,8 (Wm^{-2}) (maio de 2017) a 429,6 (Wm^{-2}) (fevereiro de 2018). O modelo de Aubinet (1) (1994) apresentou em junho média de 428,2 (Wm^{-2}) e seu menor valor em setembro de 2017, com 370,5 (Wm^{-2}), enquanto o Aubinet (3) variou de 414,8 (Wm^{-2}), registrado em janeiro de 2018, a 376,8 (Wm^{-2}), contabilizado em setembro de 2017. Segundo o modelo de Gabathuler, Marty e Hanselmann (2001) as maiores médias foram contabilizadas em janeiro de 2018, com 440,0(Wm^{-2}), janeiro com 414,8 (Wm^{-2}) de 2018 e junho 395,1 (Wm^{-2}) de 2017 e as menores ocorreram em agosto de 2017, com média igual a 380,7 (Wm^{-2}).

Tabela 10. Valores médios diários da radiação de onda longa atmosférica – Rol, atm (Wm^{-2}) medidos e obtidos com os modelos de céu nublado Aubinet (1), Aubinet (2), Aubinet (3), (1994) e Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) em Paudalho – PE entre maio de 2017 e março de 2018.

| RADIAÇÃO DE ONDA LONGA PRA DIAS DE CÉU NUBLADO (Wm^{-2}) | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Meses/ano | Rol_atm | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
| Maio/2017 | 420,6 | 387,4 | 406,8 | 394,1 | 406,8 |
| Junho/ 2017 | 419,9 | 428,2 | 424,0 | 395,1 | 433,4 |
| Julho/2017 | 412,5 | 379,2 | 415,1 | 385,9 | 401,8 |
| Agosto/2017 | 402,2 | 372,5 | 420,1 | 378,6 | 380,7 |
| Setembro/2017 | 402,9 | 370,5 | 414,3 | 376,8 | 423,9 |
| Outubro/2017 | 408,1 | 376,1 | 418,7 | 382,3 | 427,9 |
| Novembro/2017 | 406,5 | 379,7 | 420,2 | 379,6 | 434,0 |
| Dezembro/2017 | 410,2 | 386,2 | 425,4 | 384,3 | 439,8 |
| Janeiro/2018 | 414,5 | 387,8 | 427,1 | 414,8 | 440,0 |
| Fevereiro/2018 | 422,5 | 389,7 | 429,6 | 392,9 | 439,9 |
| Março/2018 | 402,8 | 382,8 | 418,7 | 382,3 | 432,3 |

Na Tabela 11 estão representadas as métricas empregadas para se avaliar a precisão dos modelos usados na estimativa do Rol,atm no outono por meio de quatro modelos de céu claro e quatro de céu nublado. Conforme se depreende na análise dos resultados, o pior desempenho dentre os modelos de céu claro ocorreu com o modelo de Sugita & Brutsaert (1993), que apresentou $EAM = 49,95 Wm^{-2}$ e $ERM = 11,83 \%$. O melhor desempenho para céu claro foi apresentado pelo modelo de Kruk *et al.*(2010), que apresentou EAM , ERM e $REQM$ respectivamente iguais a $22,49 Wm^{-2}$, $5,3 \%$ e $25,56 Wm^{-2}$. Observa-se que dentre os modelos de céu nublado aquele que apresentou os melhores resultados foi o de Aubinet (2), com $EAM = 9,52 Wm^{-2}$, $ERM = 2,29 \%$ e $REQM = 11,64 Wm^{-2}$. Já o pior desempenho foi verificado com o modelo de Aubinet (1) 1994.

Tabela 11. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da Rol,atm (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses de outubro de 2017.

| OUTONO | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Modelo | DIAS DE CÉU CLARO | | | | DIAS DE CÉU NUBLADO | | | |
| | Sugita e Brutsaert | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | KruK, et al (2010) | Santos, et al. (2011) | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
| EAM (W/m^{-2}) | 49,95 | 49,70 | 22,49 | 46,90 | 31,13 | 9,52 | 25,63 | 13,94 |
| ERM(%) | 11,83 | 11,77 | 5,30 | 11,10 | 8,27 | 2,29 | 6,08 | 3,34 |
| REQM(W/m^{-2}) | 51,40 | 51,30 | 25,56 | 48,44 | 29,34 | 11,64 | 26,22 | 15,95 |

Para os meses do inverno foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 12. Fica evidenciado que mais uma vez o modelo de céu claro com melhor desempenho foi o de Kruk *et al.* (2010), que apresentou $EAM = 21,16 Wm^{-2}$, $ERM = 9,61 \%$ e $REQM = 25,29 Wm^{-2}$. Para céu nublado o de Aubinet (2) mais uma vez se destacou dentre todos os demais, $EAM = 12,9 Wm^{-2}$, $ERM = 3,22 \%$ e $REQM = 15,5 Wm^{-2}$.

Tabela 12. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da Rol,atm (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses do inverno de 2017.

| INVERNO | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Modelo | DIAS DE CÉU CLARO | | | | DIAS DE CÉU NUBLADO | | | |
| | Sugita e Brutsaert | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | KruK, et al (2010) | Santo, et al. (2011) | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
| EAM (W/m^{-2}) | 43,39 | 59,81 | 21,16 | 41,14 | 31,86 | 12,90 | 26,14 | 18,19 |
| ERM(%) | 10,63 | 14,59 | 9,61 | 10,06 | 8,06 | 3,22 | 6,40 | 4,49 |
| REQM(W/m^{-2}) | 45,33 | 66,70 | 25,29 | 43,15 | 33,47 | 15,50 | 26,50 | 21,36 |

Observa-se, na Tabela 13, que na estação da primavera todas as médias para dias claros registraram valores menores que 10% para todos os modelos, sendo que os melhores valores para dias de céu claro foram aqueles derivados do modelo Kruk *et al.* (2010), que

apresentou *EAM* de 18,65 Wm^{-2} , *ERM* de 4,54% e *REQM* de 23,57 Wm^{-2} , o de Santos et al. (2011) que apresentou *EAM* de 35,32 Wm^{-2} , *ERM* de 8,63% e *REQM* de 37,77 Wm^{-2} . Para condições de céu nublado os melhores modelos na primavera foram os de Aubinet (2) com *EAM*, *ERM* e *REQM* respectivamente de 14,09 Wm^{-2} , 3,47% e 15,16 Wm^{-2} .

Tabela 13. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - EPM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da *Rol,atm* (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses da primavera d 2017.

| PRIMAVERA | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Modelo | DIAS DE CÉU CLARO | | | | DIAS DE CÉU NUBLADO | | | |
| | Sugita e Brutsaert | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | KruK, et al. (2010) | Santo, et al. (2011) | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
| EAM (W/m^{-2}) | 37,83 | 39,30 | 18,65 | 35,32 | 27,60 | 14,09 | 26,14 | 27,96 |
| ERM(%) | 9,24 | 9,61 | 4,54 | 8,63 | 6,08 | 3,47 | 6,4 | 6,87 |
| REQM(W/m^{-2}) | 40,14 | 41,42 | 23,57 | 37,77 | 31,29 | 15,16 | 26,43 | 29,80 |

Para dias de céu claro no período do verão, verificou-se que os menores valores encontrados foram mais uma vez aqueles produzidos pelo modelo de Kruk *et al.* (2010) seguido do modelo proposto por Santos et al. (2011), com Erro Médio Absoluto de 40,07 Wm^{-2} , Erro Relativo Médio de 9,83% e *REQM* igual a 41,59 Wm^{-2} .

Para dias de céu nublado todas as equações propostas para o verão ficaram com *ERM* abaixo de 10 % e as que tiveram os melhores resultados foram a proposta por Aubinet (2), com *EAM* = 12,28 Wm^{-2} , *ERM* = 3,39% e *REQM* = 17,75 Wm^{-2} , e o de Aubinet (3), com *EAM* = 18,98 Wm^{-2} , *ERM* = 4,8 % e *REQM* = 24,38 Wm^{-2} (Tabela 15).

Tabela 14. Valores do Erro Absoluto Médio – EAM (Wm^{-2}), Erro Percentual Médio - ERM (%) e Raiz do Erro Quadrático Médio – REQM (Wm^{-2}) associados aos diferentes modelos de céu claro e nublado em comparação com os valores da *Rol,atm* (Wm^{-2}) medidos em Paudalho nos meses de verão de 2018.

| VERÃO | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Modelo | DIAS DE CÉU CLARO | | | | DIAS DE CÉU NUBLADO | | | |
| | Sugita e Brutsaert | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | KruK, et al. (2010) | Santos, et al. (2011) | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
| EAM (W/m^{-2}) | 43,21 | 42,62 | 15,24 | 40,07 | 32,34 | 12,28 | 18,98 | 23,11 |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| ERM(%) | 10,60 | 10,36 | 3,79 | 9,83 | 8,27 | 3,39 | 4,80 | 6,27 |
| REQM(W/m⁻²) | 44,70 | 43,74 | 18,13 | 41,59 | 229,34 | 17,75 | 24,38 | 30,79 |

Em trabalhos desenvolvidos no Nordeste do Brasil, de acordo com Santos *et al.* (2010) parametrizando radiação de onda longa atmosféricas, foram encontrados valores do erro para os modelos de Sugita e Brutsaert, (2010) para dias de céu claro $EMA=3,5(Wm^{-2})$, $ERM= 0,9\%$ $REQM = 6,2 (Wm^{-2})$ menores que 10% Duarte,(2006) $EMA = 4.9$, $ERM = 1,3\%$, $REQM = 7,9 (Wm^{-2})$, Kruk, (2010), $EMA = 7,4$, $ERM = 2,0\%$, $REQM = 11,0 (Wm^{-2})$ o mesmo ocorrendo na cidade de Paudalho para os modelos Duarte, Dias e Maggiotto (2006), de Sugita e Brutsaert, (2010), Kruk *et al.* (2010), na estação da primavera da mesma forma o modelo de Kruk *et al.* (2010) para outono, verão e inverno com o erro menor que 10% (Tabela 13, 14,15,16).

Em diferentes biomas brasileiros, como no Mato Grosso segundo Querino *et al.* (2016) modelos de Duarte, Dias e Maggiotto (2006) valores do erro encontrados foram $EMA = 39,1$, $ERM = 9,43\%$, $REQM = 42,6 (Wm^{-2})$ para dias de céu claro com valores menores de 10%. Da mesma forma, encontramos modelos com excelentes resultados para os dias de céu nublados no Cerrado Mato-Grossense, de acordo com Carrilho Sobrinho (2011). Aubinet (1), Aubinet (2), Aubinet (3) 1994.

4.6 Correlações

A correlação entre a radiação atmosférica de ondas Longa medida e as radiação atmosféricas de ondas longas estimadas aplicadas as equações para dias de céu claro e dias de céu nublados (Tabela 6).

Tabela 15. Correlação de Pearson (r) aplicado para cada estação do ano e para todas as estações, as equações de dias de céu claro e dias céu nublados na do comparado com radiação atmosférica de onda estimada. Sugita & Brutsaert (1993), Duarte; Dias e Maggiotto (202006), Kruk *et al.* (2010), Santos *et al.* Para dias de céu nublado (2011), Aubinet (1994) (1), Aubinet (1994) (2), Aubinet (1994) (3), Gabathuler; Marty e Hanselmann (2001).

CORRELAÇÃO DE PEARSON (R_{ol,atm})

| Estação do ano | Sugita e Brutsaert (1993) | Duarte; Dias e Maggiotto (2006) | Kruk et al. (2010) | Santos et al. (2011) | Aubinet (1994) (1) | Aubinet (1994) (2) | Aubinet (1994) (3) | Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001) |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|
| Outono | -0,195 | -0,070 | 0,011 | -0,156 | 0,773** | 0,215 | 0,847** | 0,358** |
| Inverno | -0,113 | -0,361** | 0,055 | -0,060 | 0,510** | 0,209* | 0,578** | 0,198 |
| Primavera | 0,459** | 0,530** | 0,475** | 0,492** | 0,737** | 0,693** | 0,858** | 0,588** |

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|----------------|----------------|---------|
| Verão | -0,096 | 0,134 | 0,328** | -0,050 | 0,565** | 0,626** | -0,072 | 0,108 |
| Todas Estações | 0,286** | 0,165** | 0,298** | 0,324** | 0,716** | 0,595** | 0,630** | 0,333** |
| Correlação significativa de 0.01** | | | | | | | | |
| Correlação significativo de 0.05* | | | | | | | | |

O coeficiente de correlação Pearson da radiação de onda longa medida com a radiação de onda longa estimada, aplicada nas equações para dias de céu claro e para dias céu nublado, estão apresentados na Tabela 6. As correlações significativas a 1% de probabilidade e que apresentaram $r > 50\%$ na estação do outono foram Aubinet (1) ($r = 0,773$) 1994, e Aubinet (3) 1994, ($r = 0,847$). No outono, as equações que se adequam para trabalhar com radiação de ondas longas para a cidade de Paudalho foram as equações para céu nublado.

Na estação do inverno, as correlações Pearson significativas a 1% foram resultantes das equações de Duarte ($r = -0,367$), Aubinet (1)1994, ($r = 0,510$) e Aubinet (3)1994, ($r = 0,578$), entretanto, apenas em Aubinet (2)1994, a correlação foi significativa a 5% de probabilidade com $r = 0,209$ (Tabela 6).

Os valores significativos a 1% na estação da primavera para dias de céu claro foram Surgita ($r = 0,459$), Duarte ($r = 0,530$), Kruk ($r = 0,475$) e Santos ($r = 0,492$), enquanto para dias de céu nublado foram Aubinet (1) ($r = 0,737$), Aubinet (2) ($r = 0,693$), Aubinet (3) ($r = 0,858$) e Gabathuler ($r = 0,588$). Apesar de todas as equações serem significativas a 1% de probabilidade, apenas as equações de céu nublado foram maiores que 50%, excetuando o modelo de Duarte para dias de céu claro (Tabela 6).

Aplicando a correlação de Pearson para a estação do verão para dias de céu claro e para dias de céu nublados foram observados de acordo com a (tabela 6) que para dias de céu claro a equação que foi significativa a 1% foi a proposta por Kruk $r = 0,328$ sendo que os valores menores de 50%. As correlações para dias de céu nublados foram as seguintes equações: Aubinet (1) $r = 0,565$ e Aubinet (2) $r = 0,626$ maiores de 50%.

Nesta análise por estação, podemos observar que o modelo de estimativa da radiação de onda longa atmosférica para condições de céu claro que apresentou os melhores índices estatísticos e, portanto, aquele que melhor se adapta às condições da área de pastagem na cidade de Paudalho/PE, para o período estudado, foi o modelo de Duarte (2006) na estação da primavera, da mesma forma encontramos para dias céu nublados, a que melhor se adaptou na

estação do outono; Aubinet (1) e Aubinet (2), inverno Aubinet (1) e Aubinet (2), primavera; Aubinet (1) e Aubinet (2) e Aubinet (3), verão; Aubinet (1) e Aubinet (2).

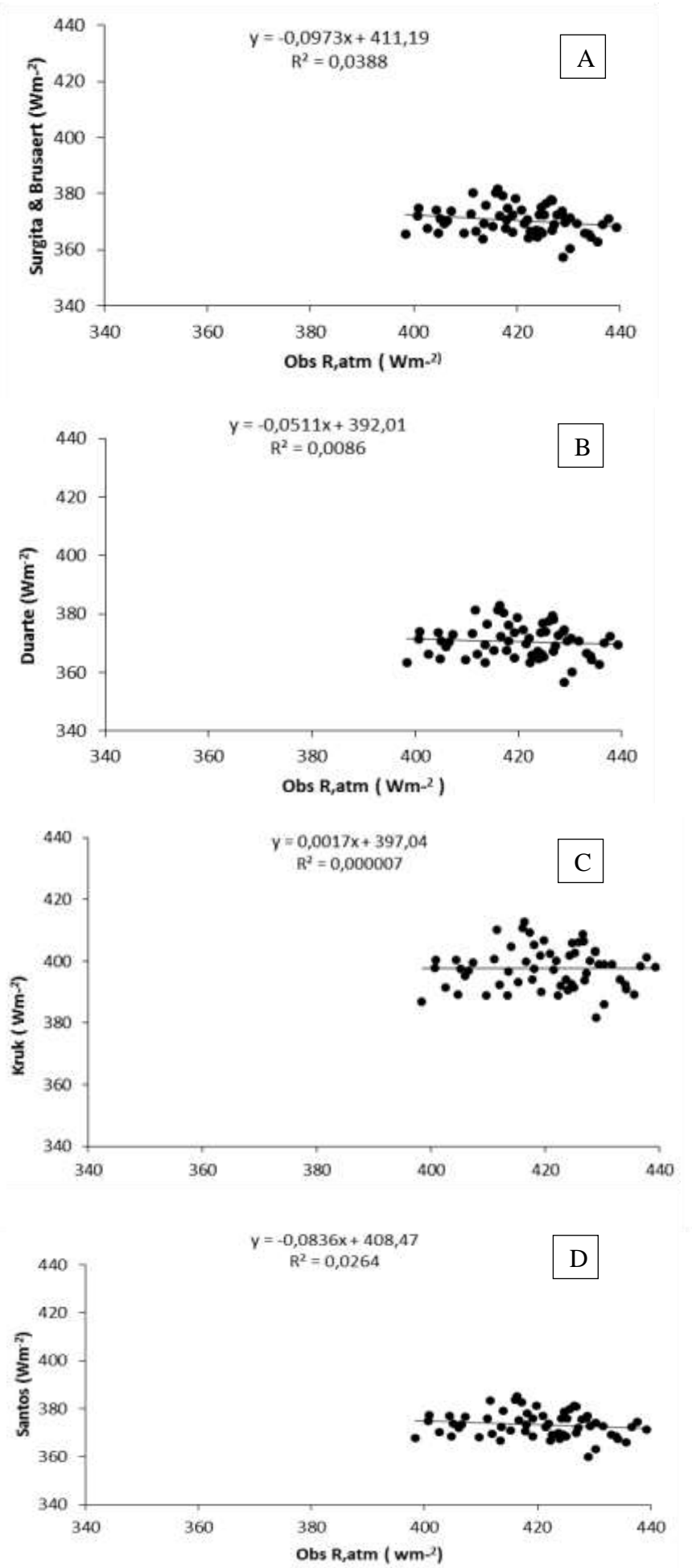
As equações empregadas para parametrizar a radiação de onda longa atmosférica estimada, a todas as estações do ano outono, inverno, primavera e verão, avaliadas os modelos aplicando o método estatístico de Pearson observada na Tabela 6. Sendo assim as que mostraram significância acima de 1% e menor que 50% para dias de céu claro Surgita $r = 0,286$, Duarte $r = 0,165$, Kruk $r = 0,298$, Santos $r = 0,324$ e para dias de céu nublado Gabathuler $r = 0,324$. Os resultados mostrados para dias de céu nublados maiores do que 50% Aubinet (1) $r = 0,716$ Aubinet (2) $r = 0,595$ Aubinet $r = 0,630$. Sendo assim as analisadas para todas as estações do ano as melhores foram Aubinet (1), Aubinet (2) e Aubinet (3) Tabela 6.

Conforme Carrilho Sobrinho (2011), estudos desenvolvidos no Mato Grosso utilizando modelos encontrados valores para (A) Aubinet (1), (B) Aubinet (2), (1994) para dias de céu nublado nesta análise foram encontrados valores estatísticos de significância de 1% obtendo valores do $r > 50\%$. Observando a Tabela 6 os modelos de (A) Aubinet (1), (B) (2) e (C) (3) 1994 confirma a eficácia desses dados para radiação atmosférica de onda longa para Zona da Mata Norte.

4.7 Coeficientes de determinação associado aos modelos de onda longa

Como forma de se avaliar os modelos de estimativa da radiação de onda longa atmosférica foram elaborados diagramas de dispersão entre a $R_{ol,atm}$ medida e cada um dos modelos de céu claro e também para céu nublado. Os resultados estão representados nas Figuras 14 a 21. Para cada situação foi traçada a reta de regressão linear e determinado o coeficiente de determinação - R^2 . Quatro modelos de equações, para dias de céu claro (A) Sugita e Brutsaert (1993); (B) Duarte, Dias e Maggiotto (2006); (C) Kruk *et al.* (2010); (D) Santos *et al.* (2011), e quatro equações, para dias de céu nublado (A) Aubinet (1) 1994, (B) Aubinet (2) 1994, (C) Aubinet (3) 1994, (D) Gabathuler; Marty e Hanselmann (2001). Levando em consideração as estações do ano.

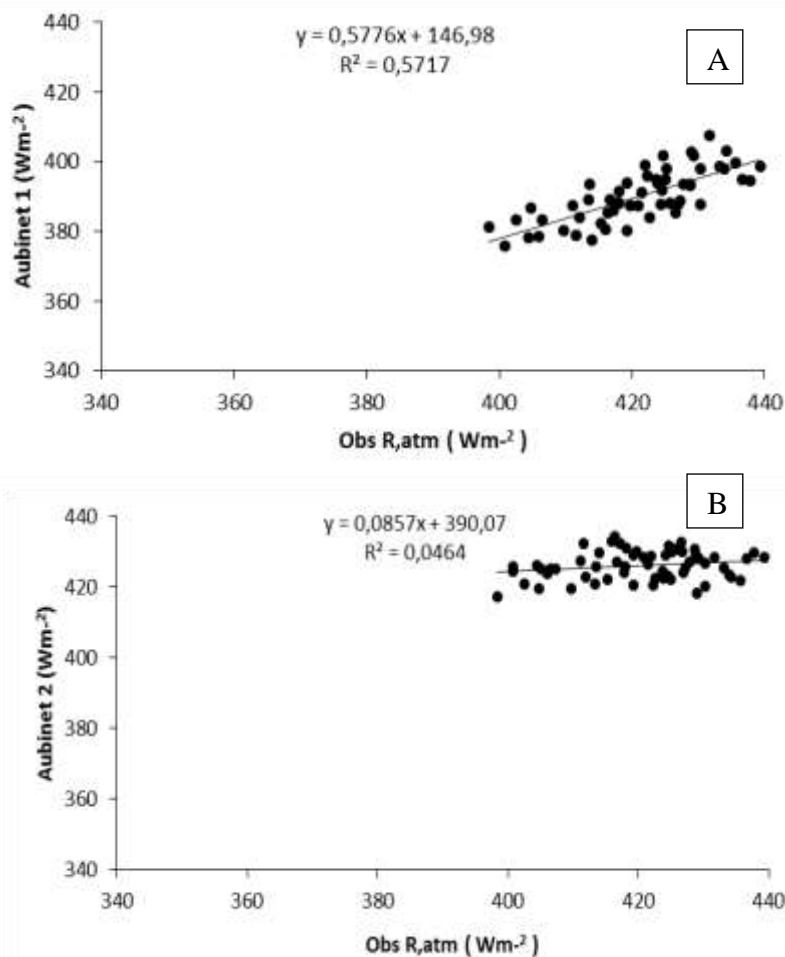
Figura 14. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A), Sugita & Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruk *et al.* (2010) e (D) Santos *et al.* (2011), referentes à estação de Outono de 2017 em Paudalho - PE.

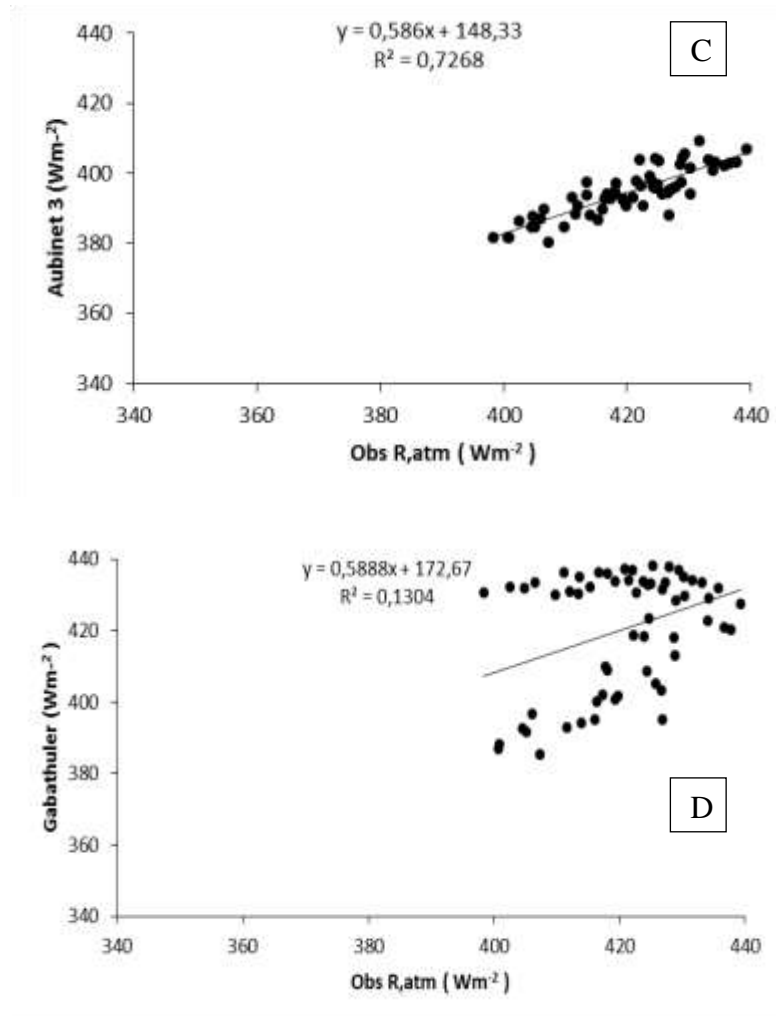


Pode-se observar, de acordo com a Figura 14, que todos os modelos para dia de céu claro na estação de outono não apresentaram bons resultados, vez que os valores de R^2 se mostraram muito baixo, o que indica um reduzido valor do coeficiente de correlação.

Na Figura 15 estão representados os modelos destinados às estimativas da radiação de onda longa atmosférica – $R_{l,atm}$ (Wm^{-2}) para dias de céu nublado de Paudalho – PE na estação do Outono. Pode-se observar que, diferentemente do que ocorreu com os modelos para situação de céu claro, que alguns modelos apresentaram coeficientes de determinação bastante significativos, caso dos modelos de (A) Aubinet (1) (1994) e (C) Aubinet (3) 1994, que produziram coeficiente de determinação respectivamente iguais a 0,5717 e 0,7268. Os outros dois modelos não produziram bons ajustes com os dados medidos, vez que os valores de R^2 obtidos foram muito baixos, quais sejam, o de (B) Aubinet (2) (1994) apresentou $R^2 = 0,0464$ e o de (D) Gabathuler, Marty e Hanselmann (2001) um pouco maiores, mas de apenas 0,1304.

Figura 15. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A)Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C)Aubinet (3)1994 e (D)Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Outono de 2017 em Paudalho - PE.

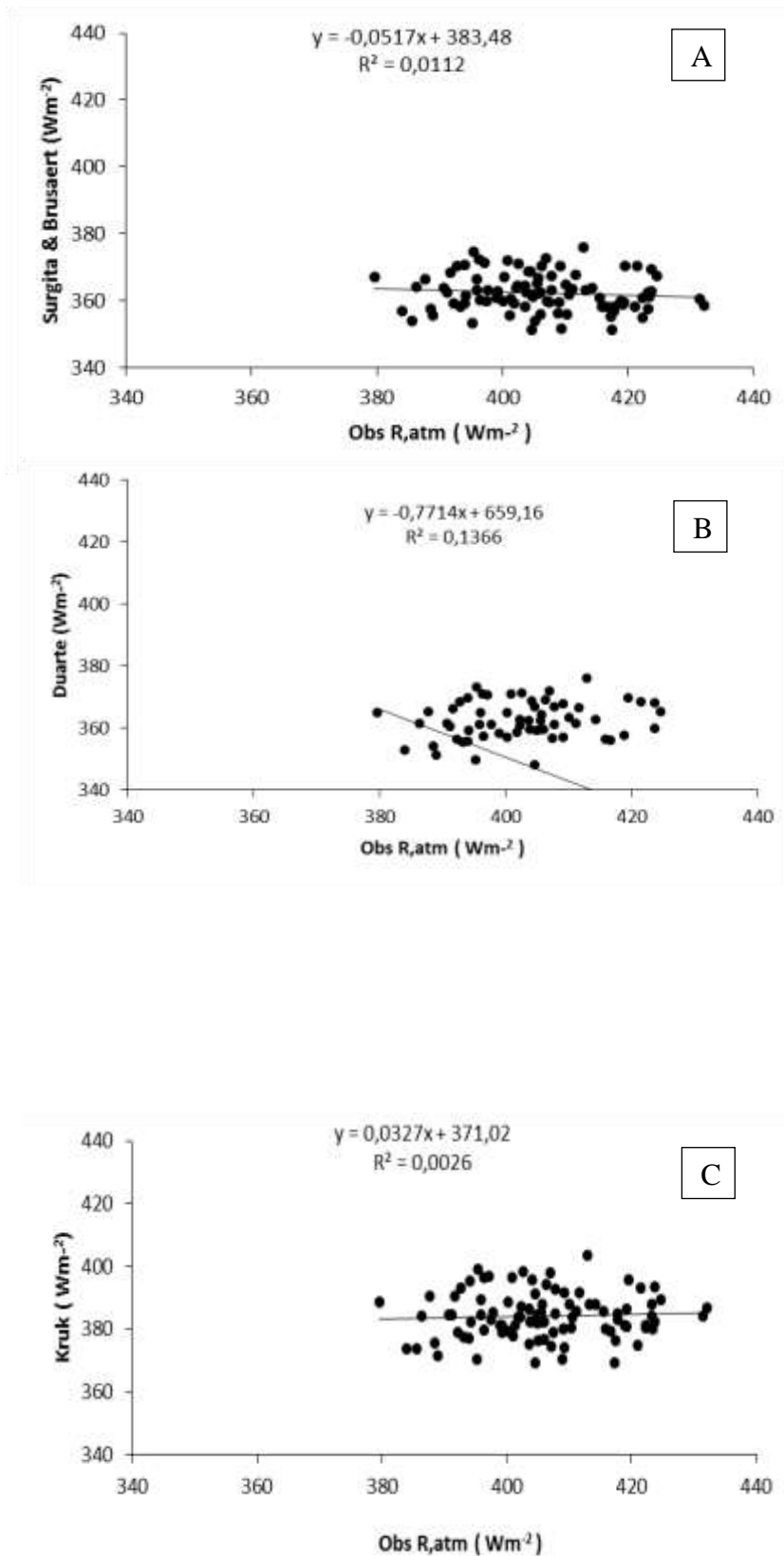


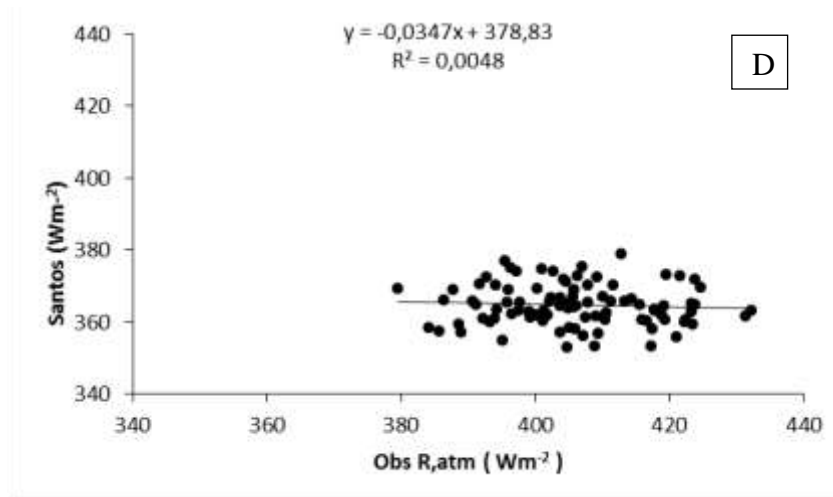


Fonte: Própria autora.

Nas Figuras 16 e 17, foram representados os diagramas de dispersão com as retas de regressão e correspondentes coeficientes de determinação associados para a estação do ano correspondente ao Inverno. Como pode se observar na Figura 16, o modelo de céu claro de (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006) produziu um $R^2 = 0,1336$, sendo o maior dentre os quatro para essa condição de nebulosidade, mas com baixa significância estatística. Os demais modelos resultaram em R^2 respectivamente iguais a 0,0112, 0,0026 e 0,0048 para (A) Sugita e Brutsaert (1993), (C) Kruk et al. (2010), e (D) Santos *et al.* (2011). Para essa estação do ano, por sua vez, os resultados foram mais expressivos, conforme se depreende da Figura 17, embora menores que os obtidos no Outono. Os valores de R^2 relacionados com os modelos de (A) Aubinet (1) 1994, (B) Aubinet (2) 1994, (C) Aubinet (3) 1994 e (D) Gabathuler; Marty e Hanselmann (2001) foram iguais a 0,2594, 0,0439, 0,3401 e 0,0396, respectivamente. Nessa estação do ano se destacou, portanto, o modelo de (C) Aubinet (3) 1994.

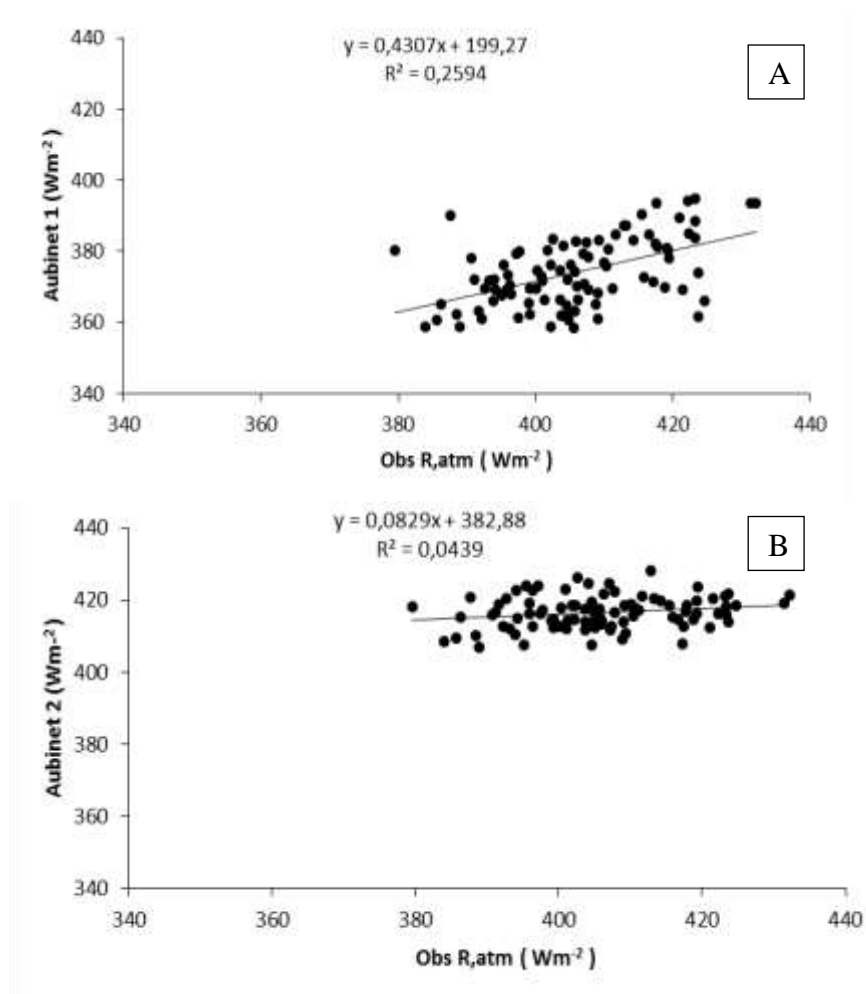
Figura 16. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita & Brusaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruk et al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação de Inverno de 2017 em Paudalho - PE.

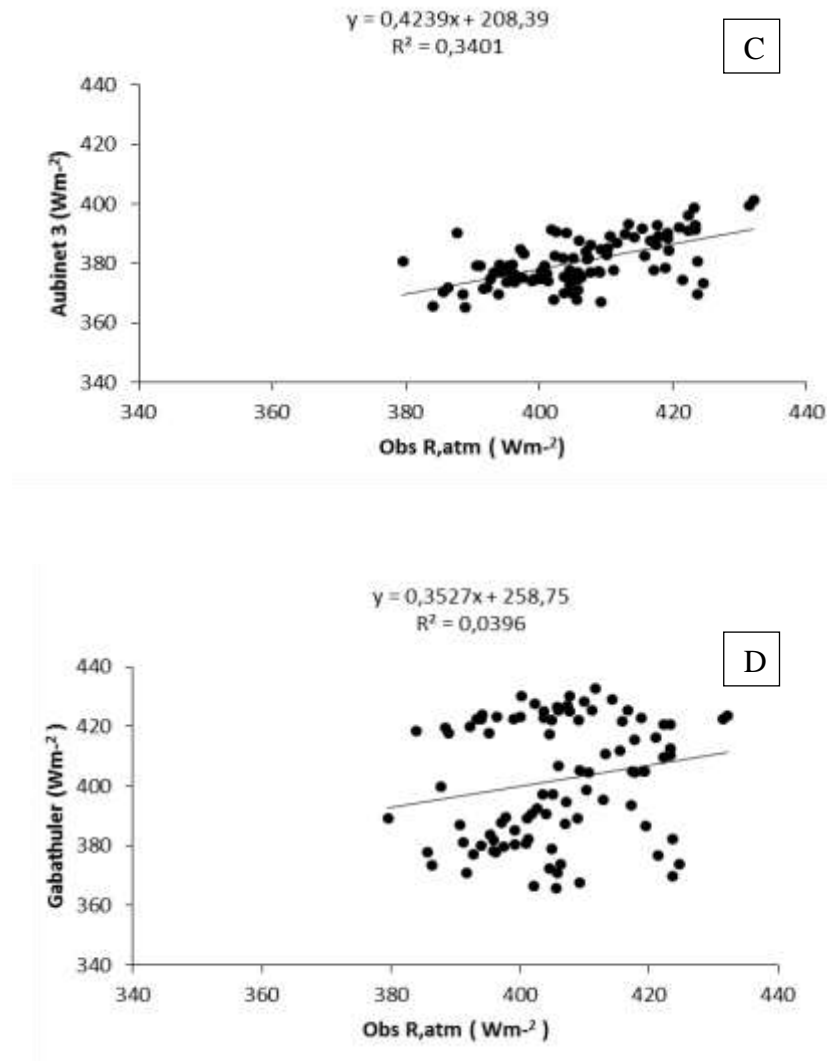




Fonte: Própria autora.

Figura 17. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A) Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C) Aubinet (3)1994 e (D) Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Inverno de 2017 em Paudalho - PE.

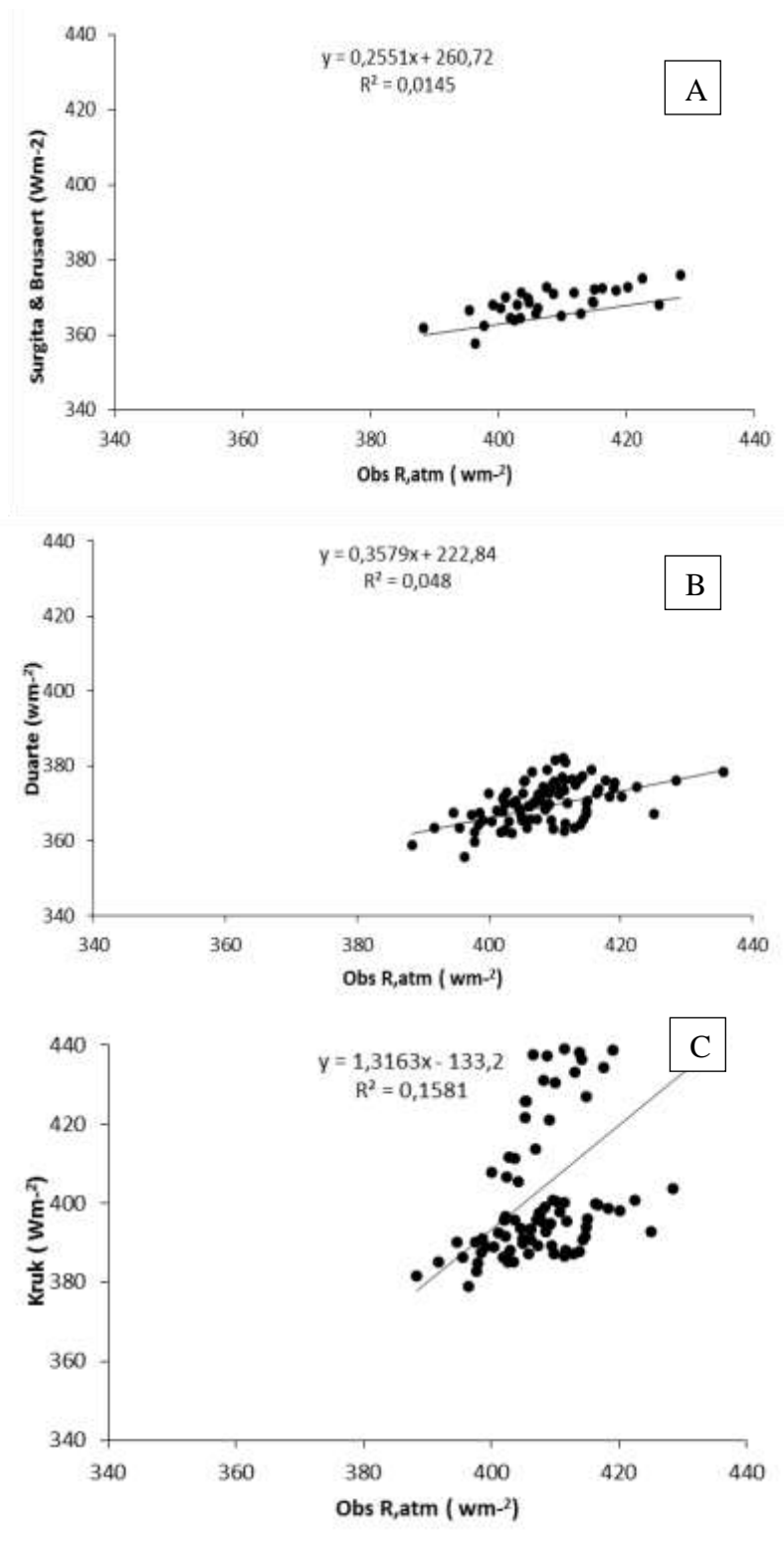


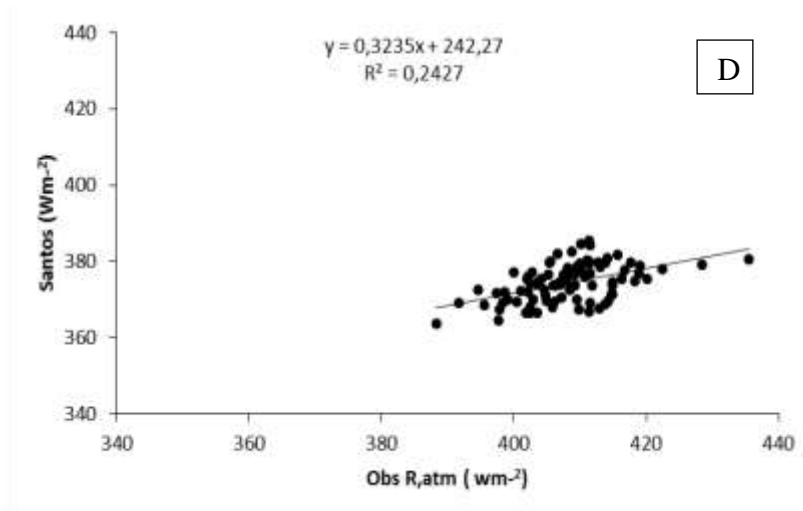


Fonte: Própria autora.

Nas Figuras 18 e 19, foram representados os diagramas de dispersão com as retas de regressão e correspondentes coeficientes de determinação associados para a estação do ano correspondente à Primavera. Para dias de céu claro, de acordo com a Figura 18, os valores estimados não se ajustaram satisfatoriamente aos dados medidos, vez que os valores de R^2 ficaram todos abaixo de 0,10. Os modelos de (A) Sugita e Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggionto (2006), (C) Kruk *et al.* (2010) e (D) Santos *et al.* (2011) proporcionaram valores de R^2 respectivamente iguais a 0,0145, 0,048, 0,1581 e 0,2427. Os resultados apresentados pelos modelos para as condições de céu nublado estão representados na Figura 19. Destacou-se dentre os quatro modelos, o de (B) Aubinet (2) 1994, (C) Aubinet (3) 1994, e (D) Gabathuler Marty e Hanselmann (2001), que apresentou um grau de concordância com as medições da Rol, atm muito significativo, acima de 50% qual seja, um $R^2 = 0,6851$, $0,7244$ $0,645$, enquanto que (A) Aubinet (1) 1994 ficou abaixo de 50%.

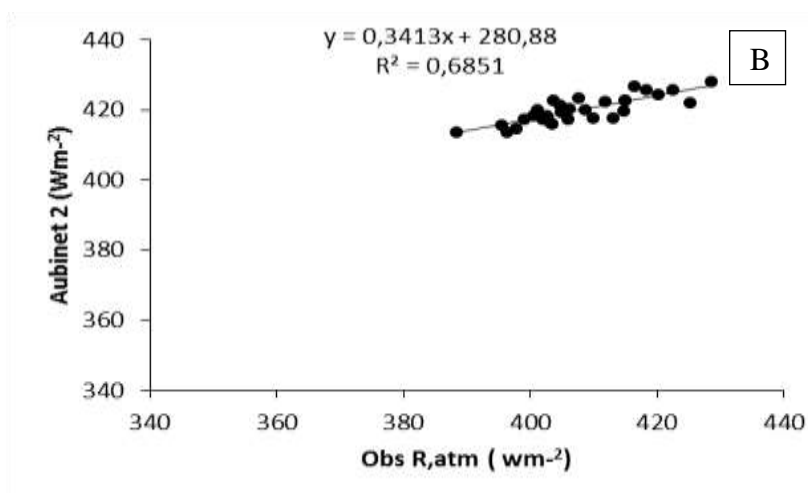
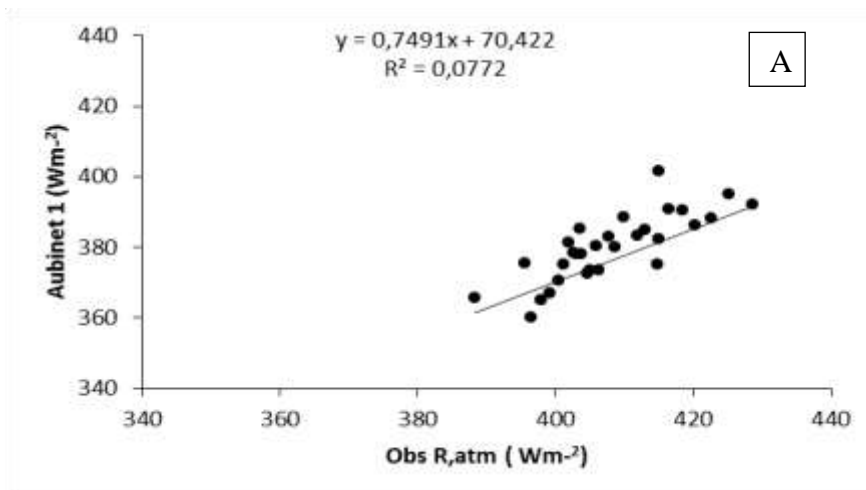
Figura 18. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita&Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggiotto (2006), (C) Kruk et al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação da Primavera de 2017 em Paudalho – PE.

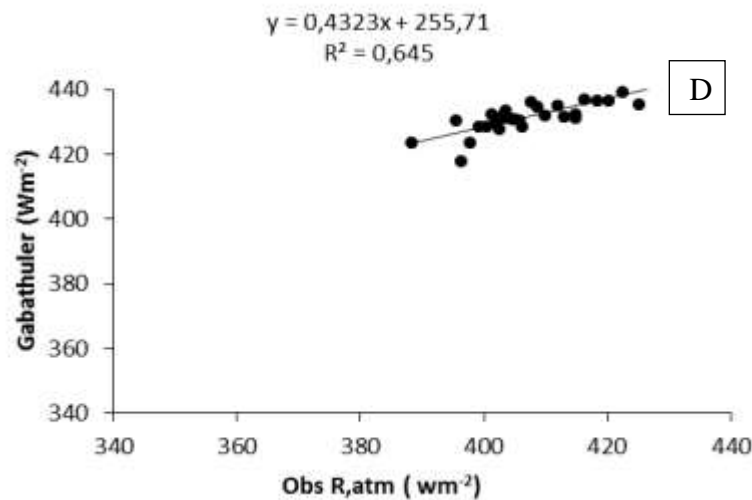
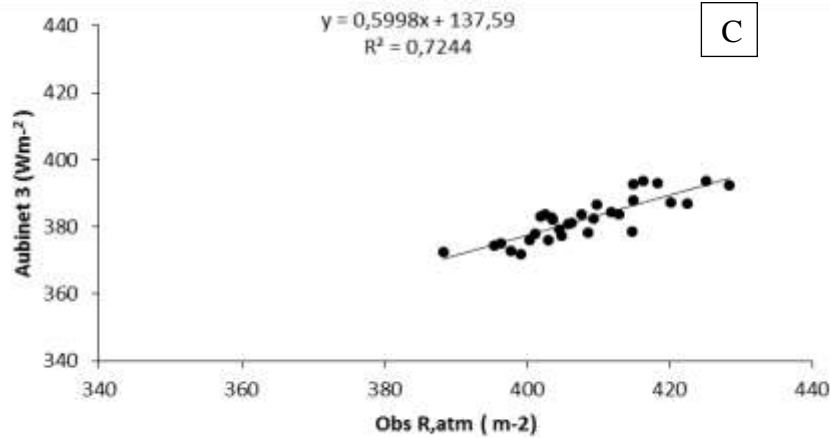




Fonte: Própria autora.

Figura 19. Diagramas de dispersão, com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A)Aubinet (1)1994 (B), Aubinet (2)1994, (C)Aubinet(3)1994 e (D)Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação da Primavera de 2017 em Paudalho - PE.





Fonte: Própria autora.

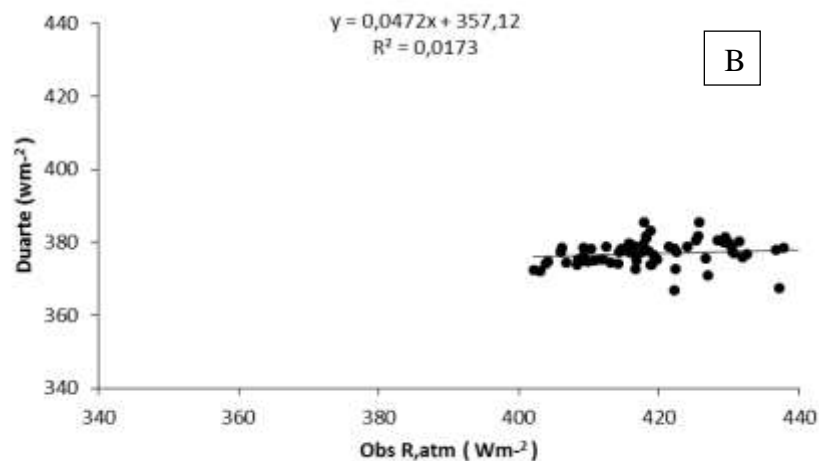
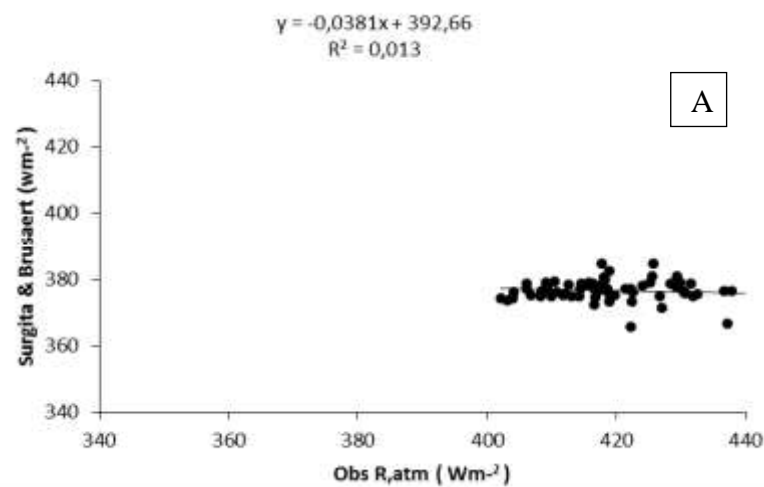
Observa-se que para os dias de nublado (Figura 20) o modelo que produziu melhor ajuste com as medições foi o modelo de (C) Aubinet (3) (1994), que apresentou $R^2 = 0,702244$. Os que se seguiram não tiveram correlação significativa, quais sejam, os modelos de (A) Aubinet (1) 1994, com $R^2 = 0,1059$ e o de (B) Aubinet (2) 1994, que resultou em $R^2 = 0,1373$ evidenciando não haver boa relação com as medições empreendidas na área experimental de Paudalho – PE.

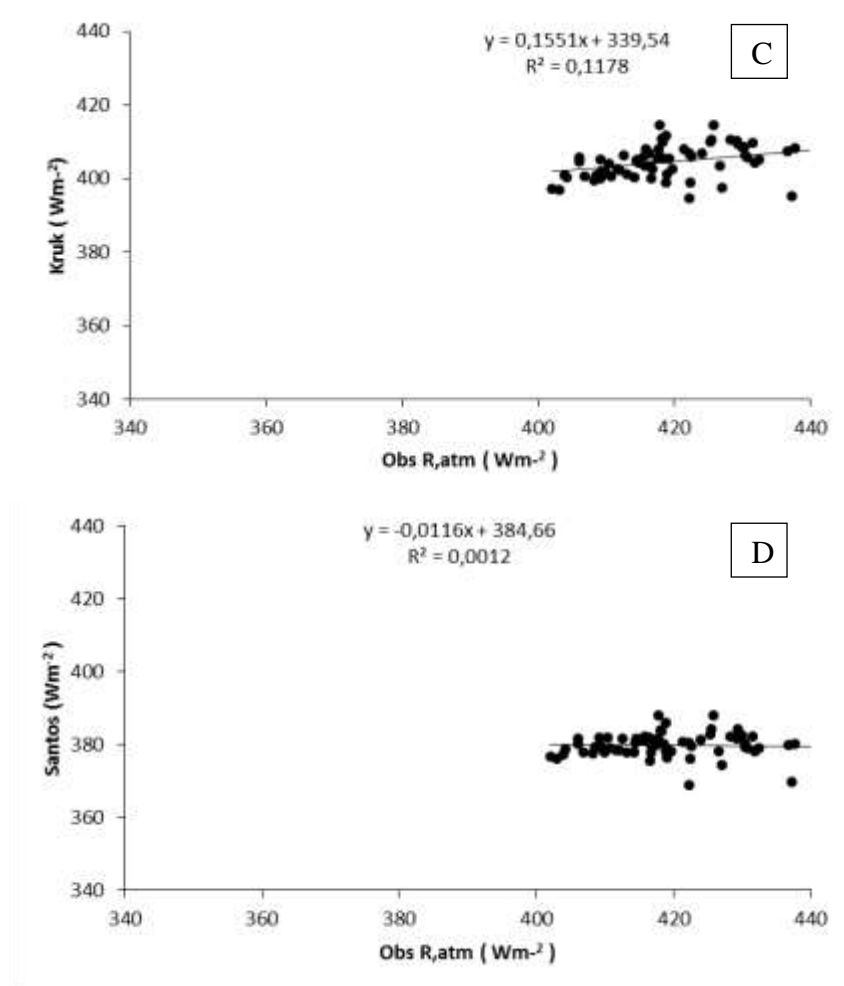
De acordo com a Figura 21, pode-se observar que para dias de céu claro no Verão, a variabilidade dos dados se mostra bem elevada em todas as equações. Para dias de céu nublado (Figura 21) destacou-se a equação de (A) Aubinet (1) 1994, com $R^2 = 0,3241$ e (B) Aubinet (2) 1994, com $R^2 = 0,4119$, com diagrama apresentando muita dispersão.

Verifica-se que as melhores equações com menor variabilidade são as equações de (C) Aubinet 3 (1994), no período do Outono, para dias de céu nublado, enquanto na estação da primavera o modelo de (C) Aubinet (3) 1994, foi o que resultou em maior ajuste com as medições.

Observa-se que para dias de céu claro em todas as estações do ano o modelo de (C) Kruk et al. (2010) foi o que mais se destacou, mas com ajuste muito baixo, como era de se esperar em virtude da grande presença de nuvens em todo o período experimental realizado na localidade de Paudalho –PE. Já para dias de céu nublado observou-se que o modelo de (C) Aubinet (3) 1994, foi o que apresentou o melhor ajuste.

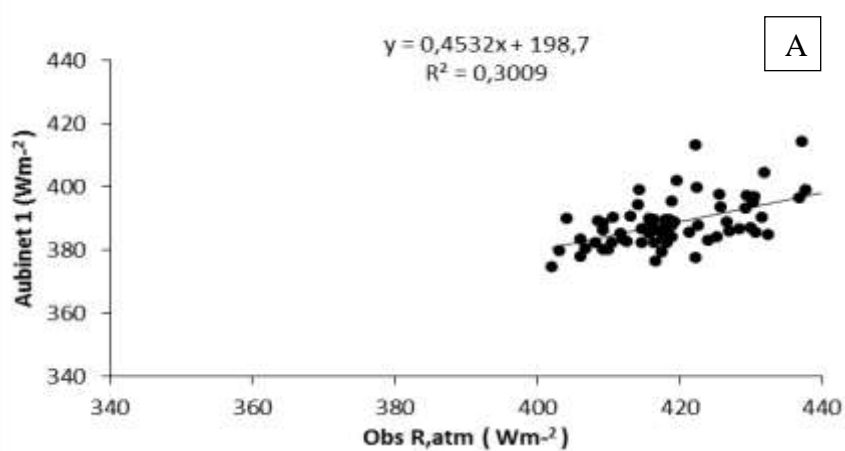
Figura 20. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita & Brutsaert (1993), (B) Duarte; Dias e Maggionto (2006), (C) Kruk et al. (2010) e (D) Santos et al. (2011), referentes à estação de Verão de 2017 em Paudalho - PE.

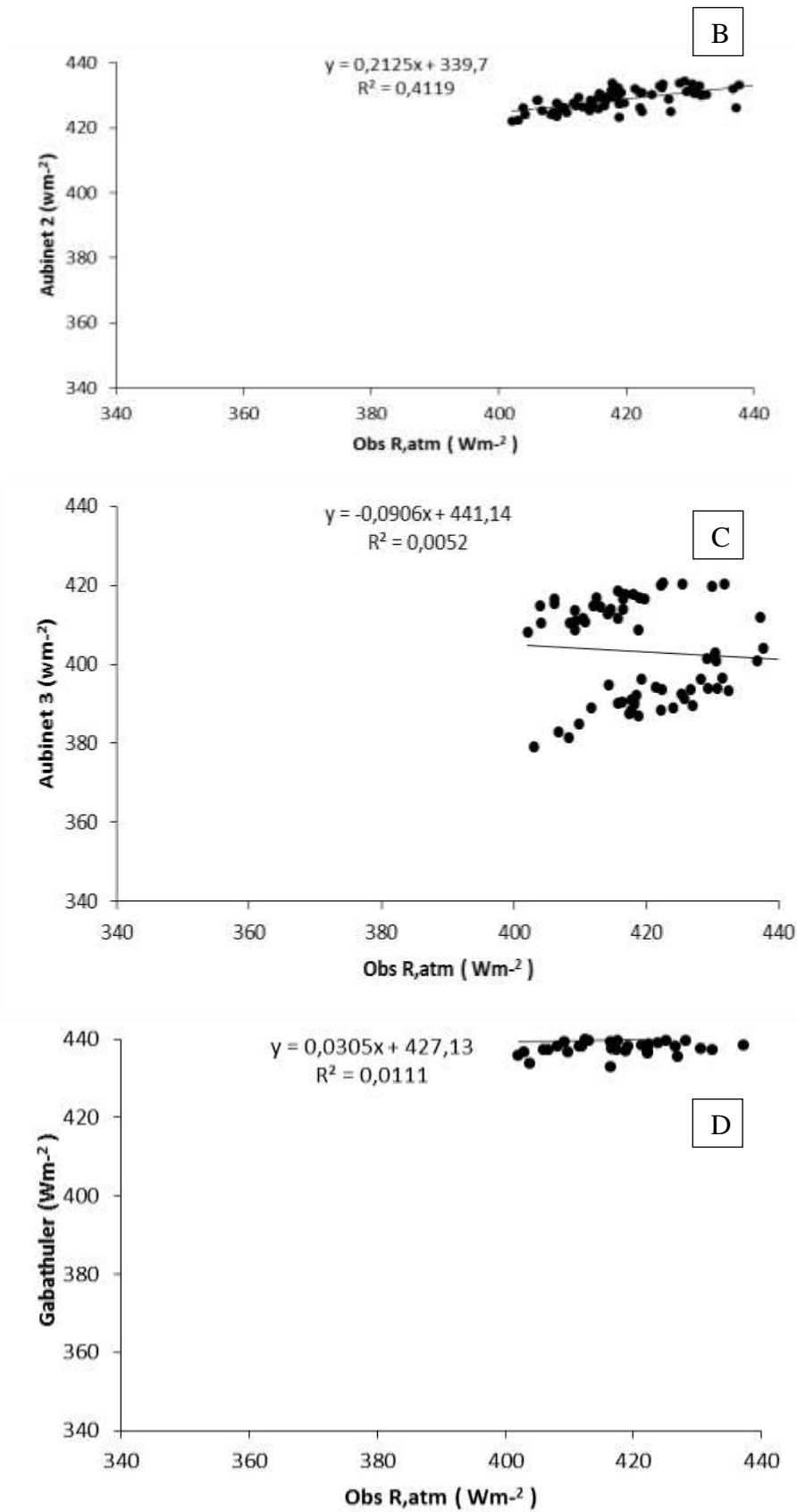




Fonte: Própria autora.

Figura 21. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A) Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C) Aubinet(3)1994 e (D) Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do Verão de 2018 em Paudalho –PE.

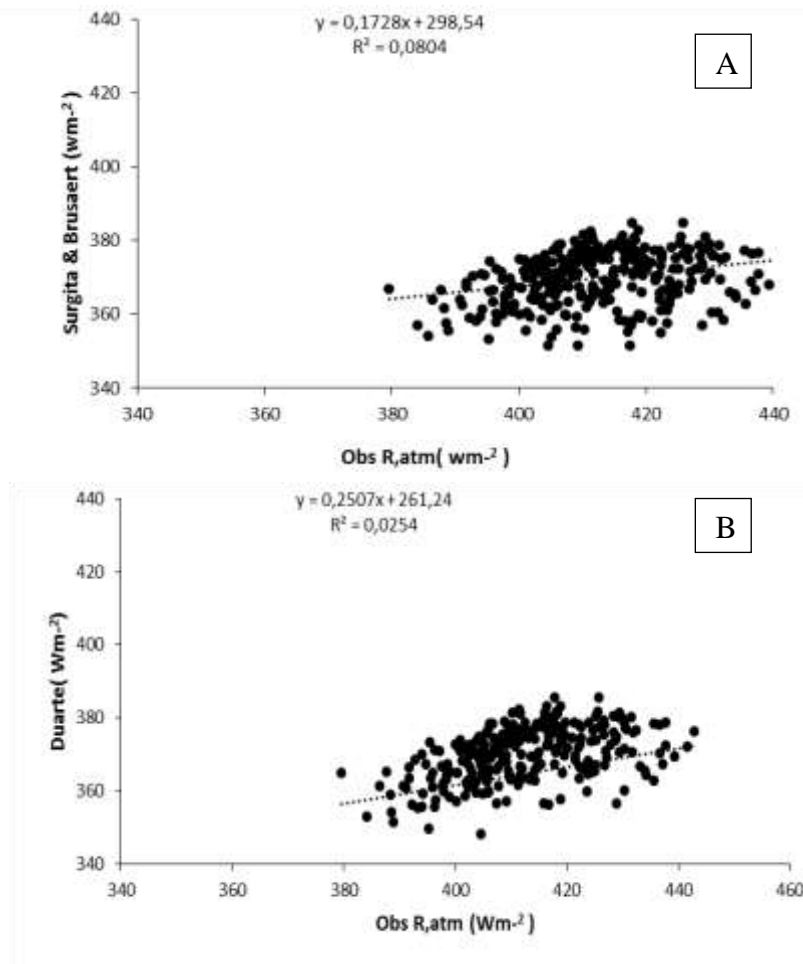


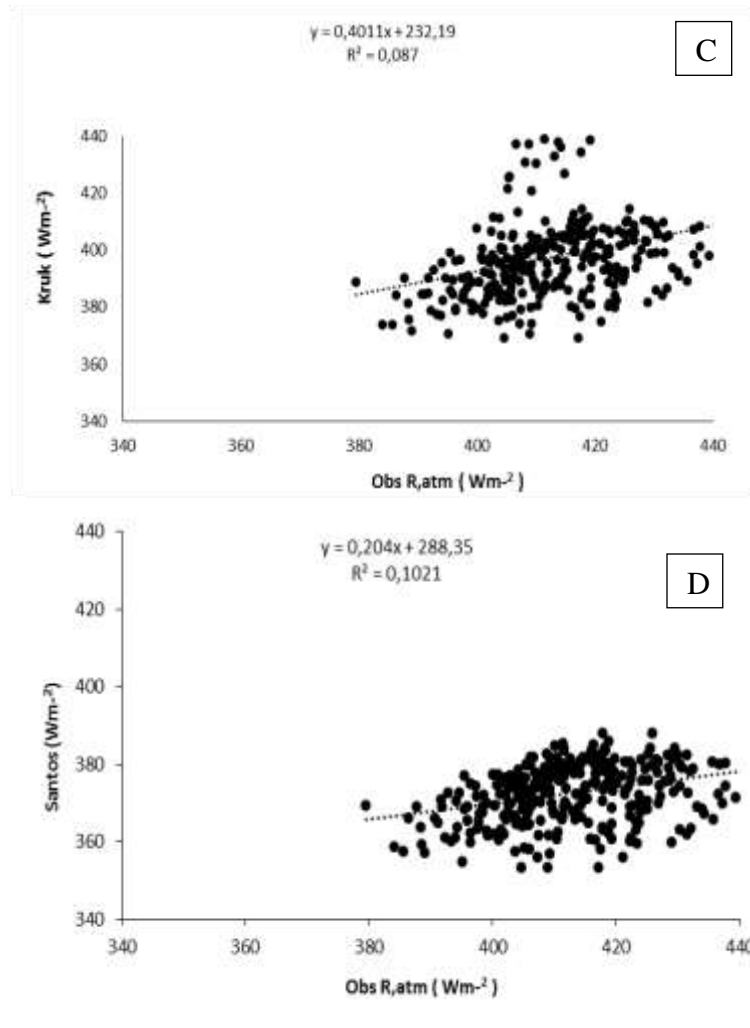


Fonte: Própria autora.

Nas figuras 22 e 23 está representada a radiação de onda longa para todas as estações e modelos empregados para dia céu claro (A) Sugita e Brutsaert (1993), (B) Duarte, Dias e Maggioletto (2006), (C) Kruk *et al.* (2010) e (D) Santos *et al.* (2011), R_2 0,0804, 0,0254, 0,087, 0,1021 e para dias de céu nublado (A) Aubinet (1) 1994, (B) Aubinet (2) 1994, (C) Aubinet (3) 1994 e (D) Gabathuler, Marty e Hanselmann (2001), referentes à estação do outono, inverno primavera verão de 2017 e Verão de 2018. Aplicou-se o diagrama de dispersão com reta de regressão linear e coeficiente de determinação observa-se que teve uma melhor interação foram (A) Aubinet (1) 1994, $R_2 = 0,5138$ valores maiores que 50% e menores que 50% (C) Aubinet (3) 1994, $R_2 = 0,4018$ para dias nublados presentes.

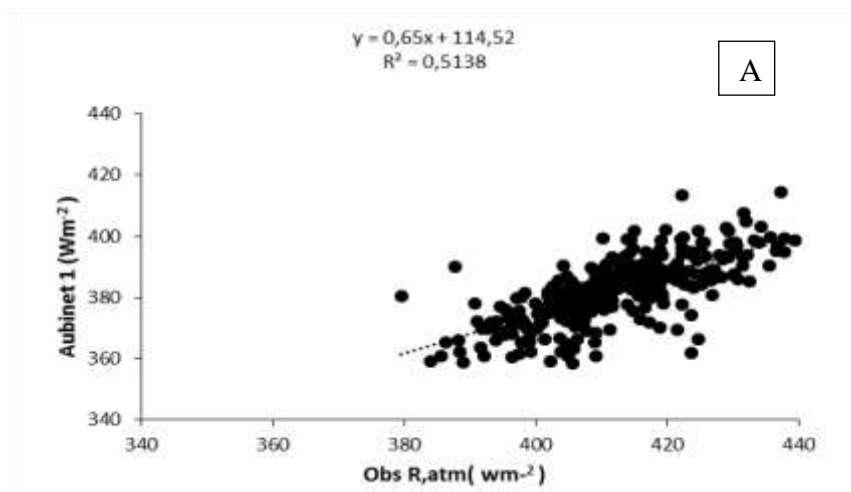
Figura 22. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu claro segundo (A) Sugita & Brutsaert (1993), (B) Duarte, Dias e Maggioletto (2006), (C) Kruk *et al.* (2010) e (D) Santos *et al.* (2011), referentes à todas as estações outono, inverno primavera e Verão de 2017 em Paudalho - PE.

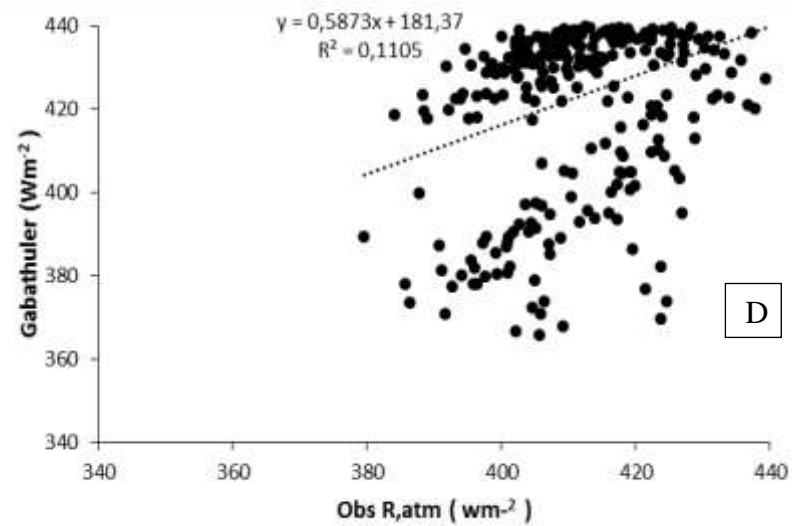
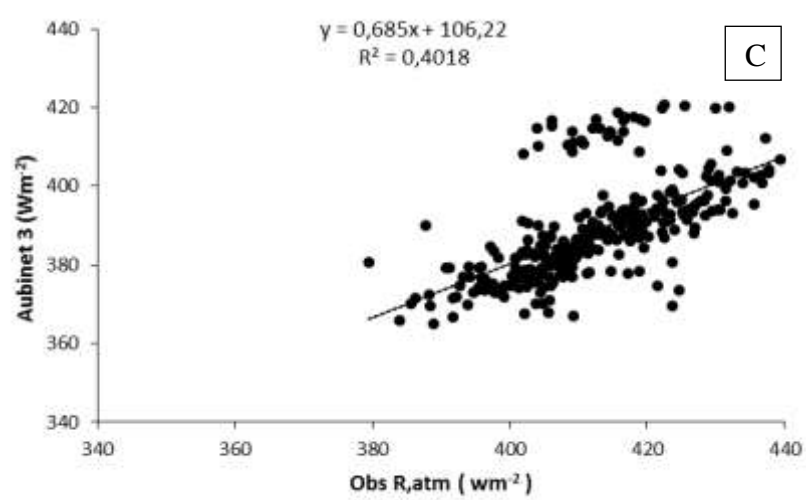
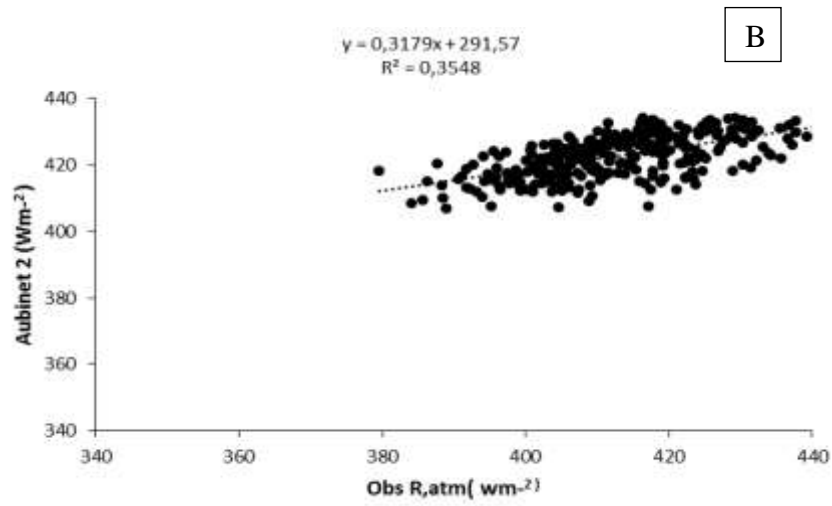




Fonte: Própria autora.

Figura 23. Diagramas de dispersão com reta de regressão linear e coeficientes de determinação - R^2 associados, de acordo com os quatro modelos para dias de céu nublado segundo (A) Aubinet (1)1994, (B) Aubinet (2)1994, (C) Aubinet (3)1994 e (D) Gabathuler; Marty; Hanselmann (2001), referentes à estação do outono inverno, primavera verão de 2018 em Paudalho - PE.





Fonte: Própria autora.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e também em consonância com os objetivos da pesquisa há de se registrar que as suas principais conclusões são os que seguem.

- a) As condições de tempo prevalentes em todos os dias e meses investigados possibilitam concluir que não é possível efetivar o monitoramento das componentes do balanço de radiação por meio de imagens OLI/IRTS, já que o Landsat 8 revisita a área de estudo uma vez a cada 16 dias;
- b) A radiação de onda longa superficial sistematicamente supera a radiação de onda longa atmosférica, mas o saldo de onda longa é muito pequeno; isso faz com que os padrões apresentados pelo ciclo diário saldo de radiação seja determinado substancialmente pela radiação de onda curta (radiação solar incidente);
- c) Os ciclos diários da temperatura do ar e umidade relativa do ar são opostos, com os maiores valores da T_a ocorrendo por ocasião em que os menores valores da UR ocorrem;
- d) Os modelos de onda longa atmosféricos específicos para condições de céu claro não se mostraram adequados para expressar a $R_{ol,atm}$, pelas razões apresentadas anteriormente;
- e) Dentre os modelos destinados para céu nublado, apenas o de Aubinet (1), (2), (3) se mostrou adequado com resultados maiores que 50%.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. J. G.; COSTA, J. M. N.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; COSTA, A. C. L.; FERREIRA, W. P. M. Estimate of the atmospheric long wave radiation in forest and pasture area in south west amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 215-224, June, 2011.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L.S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, Paris, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SatelliteBased Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 133, n. 4, p. 380–394, July/Aug. 2007.
- ANDREAS, E. L.; ACKLEY, S. F. On the differences in ablation seasons of Arctic and Antarctic sea ice. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 39, n. 2, p. 440-447, Feb. 1982.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. Monitoramento Pluviométrico: Histórico pluviométrico 2017. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 13 dez. 2017.
- ARAÚJO, A. L. **Calibração do balanço de radiação diário através de dados de superfície e de sensores orbitais**. 2010. 114 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- ARAÚJO, T. L. **Estimativa da temperatura e do saldo de radiação à superfície terrestre em Maceió – Al utilizando imagens TM/LANDSAT 5 2006** 88 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de Alagoas, 2006.
- AUBINET, M. Longwave sky radiation parametrizations. **Solar Energy**, Kidlington, v. 53, n. 2, p. 147-154, Aug. 1994.
- BÁRBARO, E.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; CODATO, G.; FERREIRA, M. J. Observational characterization of the downward atmospheric longwave radiation at the surface in the city of São Paulo. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 49, n. 12, 2574-259. 2010.
- BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 229, n. ½, p. 87–100, Mar. 2000.
- BASTIAANSEN, 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**, Amsterdam, v. 212-213, p. 198-212, Dec. 1998.
- BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; SOUZA JUNIOR, L. C.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N. (org.). **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea estado de Pernambuco: diagnóstico do município de Caruaru**. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005. 11 p. Disponível em: http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/bitstream/handle/doc/15833/Rel_Caruaru.pdf?sequence=1. Acesso em: 13 fev. 2018.
- BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T. Estimativa de área plantada com soja através de imagens Landsat em municípios do norte do Paraná. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE*

SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais [...]**.Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 27-31.

BIGNAMI, F.; MARULLO, S.; SANTOLERI, R.; SCHIANO, M. E. Longwave radiation budget in the Mediterranean sea. **Journal of Geophysical Research. Section C. Oceans**, Hoboken, v. 100, n. C2, p. 2501-2514, 1995.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 318 p.

BRAGA, C. C.; AMANAIÁS, J. C.; ALCÂNTARA, C. R.; DANTAS, M. P. Avaliação do albedo nos diferentes tipos de cobertura do cerrado do Amapá-Brasil com imagens MODIS. **Territorium: Revista Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança**, Coimbra, n. 25 (I), p. 129-134, 2017.

BRUIN, H. A. R. From Penman to Makkink. In: HOOGHART, J. C. (ed.). Proceedings and information: TNO Committee on Hydrological. Gravenhage, The Netherlands, v.39, p.5- 31, 1987.

BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. I. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 58, n. 247, p. 389-420, 1932.

BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. **Water Resources Research**, Washington, v. 11, n. 5, p. 742-744, Oct. 1975.

CARRILHO SOBRINHO, F. J. **Modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no cerrado mato-grossense**. 2011, 151 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

CARRILHO SOBRINHO, F. J.; CARRILHO, S. B. P.; NOGUEIRA, J. S.; PINTO JUNIOR, O. B. Modelos para estimativa da radiação de onda longa atmosférica no cerrado Mato-Grossense. **Revista Monografias Ambientais**, v. 12, n. 12, p. 2734-2748, 2013.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. Serviço Geológico do Brasil. **Sensoriamento remoto e geofísica**. [2018]. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Sensoriamento-Remoto-e-Geofisica-29>. Acesso em: 12 maio 2018.

COTRIM, G. **Fundamentos da filosofia: história e grandes temas**. 15. ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

DEBASTIANI, A. B.; SÁ, E. A. S.; NETO, R. P. M.; SCHIMALSKI, M. B.; Mapeamento do saldo de radiação no Parque Nacional de São Joaquim – SC. **Advances in Forestry Science**. Cuiabá, v.5, n.3, p.363-367, 2018.

Department of the Interior U.S. Geological Survey (USGS, 2016). Disponível em: <https://www.usgs.gov/>. Acesso em: 13 dez. 2018.

DI PACE, F. T.; DA SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R.; SILVA, S. T. A. Mapeamento do saldo de radiação com imagens Landsat 5 e modelo de elevação digital. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 385-392, 2008.

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**, Amsterdam, v. 139, n. 3-4, p. 171-181, 2006.

ENGESAT: soluções em imagens de satélite e geoprocessamento. Curitiba, [2018]. Disponível em: <http://www.engesat.com.br/>. Acesso em: 20 maio 2018.

FAUSTO, M. A.; ANGELINI, L. P.; MARQUES, H. O.; SILVA FILHO, A.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 350-361, Apr./June, 2016.

FAUSTO, M. A.; MACHADO, N. G.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S. Net radiation estimated by remote sensing in cerrado areas in the upper Paraguay River basin. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, USA, v. 8, n. 1, 083541, 2014.

FERREIRA, N. J. (coord.). **Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004. 271 p.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento, 2005. 30 p. Apostila.

GABATHULER, M.; MARTY, C. A.; HANSELMANN, K. W. Parameterization of incoming longwave radiation in high-mountain environments. **Physical Geography**, Milton Park, v. 22, n. 2, p. 99-114, 2001.

GALVANI, E.; SOUZA, I. A. Representação gráfica dos elementos do clima: estudo comparativo entre Maringá, PR e Botucatu, SP. **GEOUSP: Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 19, p. 131-140, 2006. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/73994/77653>. Acesso em: 10 out. 2018.

GARRISON, J. D.; ADLER, G. P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. **Solar Energy**, Kidlington, v. 44, n. 4, p. 225-241, 1990.

GOMES, H. F. B.; SILVA, B. B.; CAVALCANTI, E. P.; ROCHA, H. R. Balanço de radiação em diferentes biomas no estado de São Paulo mediante imagens Landsat 5. **Geociências**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 153-164, 2009.

GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVINCIO, J. D. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1107-1114, 2012.

HOLANDA, R. M.; SILVA, B. B. Cerâmica vermelha–desperdício na construção versus recurso natural não renovável: estudo de caso nos municípios de Paudalho/PE e Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 4, n. 4, p. 872-890, 2011.

HOVI, A.; LUKEŠ, P.; RAUTIAINEN, M. Seasonality of albedo and FAPAR in a boreal forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 247, p. 331-342, 2017.

IBGE. Paudalho. [2018]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/paudalho/panorama>. Acesso em: 10 jan. 2018.

IDSO, S. B. A set of equations for full spectrum and 8 to 14 μm and 10.5 to 12.5 μm thermal radiation from cloudless skies. **Water Resources Research**, Washington, v. 17, n. 2, p. 295–304, 1981.

IDSO, S. B., JACKSON, R. D. Thermal radiation from the atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 74, n. 23, p. 5397–5403, 1969.

- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canada: Academic Press, 1983. 408 p.
- KRUK, N. S.; VENDRAME, Í. F.; ROCHA, H. R.; CHOU, S. C.; CABRAL, O. Downward longwave radiation estimates for clear and all-sky conditions in the Sertãozinho region of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, AT, v. 99, n. 1/2, p. 115-123, 2010.
- LIMA, M. L. F.C. **Reserva da biosfera da Mata Atlântica em Pernambuco: situação atual, ações e perspectivas**. São Paulo: Conselho Nacional da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, 1998. 43 p. (Caderno, n. 12).
- LIRA, E. M. B.; PEDROSA, F. J. A. O descarte de resíduos sólidos e a consciência ambiental de moradores no bairro Alto do Mandu –Recife, PE, Brasil. **Revista da Ciência da Administração**, Recife, v.11, jan./jul. 2015.
- LOPES, H. L.; ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, F. H. B. B.; SOBRAL, M. C. M.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CANDEIAS, A. L. B. Espacialização da umidade do solo por meio da temperatura da superfície e índice de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v. 15, n. 9, p. 973-980, 2011.
- MACHADO, C. C.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. B.; GALVINCIO, J. D. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 29, n. 1, p. 55-67, 2014.
- MACHADO, M. R. I. M.; ALBUQUERQUE, M. Z. A. Nova lógica na produção de cana de açúcar na zona da mata pernambucana: transformações fundiárias para a perpetuação das relações de poder. **Revista NERA**, Presidente Prudente, a. 16, n. 22, p. 111-126, jan./jun. 2013.
- MARKHAM, B. L.; BARKEWR, J. L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**, [Lanham, MD], v. 1, p. 3-8, 1986.
- MATOS, R. C. M.; AZEVEDO, J. R. G.; CANDEIAS, A. L. B. Estimativas do saldo de radiação instantâneo no entorno do reservatório de Itaparica–PE com uso de imagens orbitais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 3, p. 641-654, mar./abr. 2016.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.
- OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B.; MOURA, A. E. S. S. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 1, p. 16-28, 2015.
- POLO, J.; ZARZALEJO, L. F.; MARCHANTE, R.; NAVARRO, A. A. A simple approach to the synthetic generation of solar irradiance time series with high temporal resolution. **Solar Energy**, Kidlington, v. 85, n. 5, p. 1164-1170, 2011.

PRATA, A. J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Berks, v. 122, n. 533, p. 1127–1151, 1996.

QIN, Y.; LONG, X.; MA, X.; HUANG, H. Theoretical models for the solar absorptivity of a roadway embankment. **Cold Regions Science and Technology**, Guangxi, v. 137, p. 30-35, 2017.

QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; MACHADO, N. G.; SILVA, M. J. G.; QUERINO, J. K. A. S.; SANTOS NETO, L. A.; BIUDES, M. S. Spatiotemporal NDVI, LAI, albedo, and surface temperature dynamics in the southwest of the Brazilian Amazon forest. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 10, n. 2, 026007, 2016.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. S.; VON RADOW, C.; MARQUES FILHO, A. O. Study of the global solar radiation and the internal and external transmissivity index in a mangrove forest in Alagoas-Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 204-214, June, 2011.

ROSA, ROBERTO. **Introdução ao sensoriamento remoto. Uberlândia; EDEFU; 1990. 136 p. Id:81311**, IBAMA ; 528.8, R788i. 41022, 19932411. 1990.

SALLO, F. S.; FRANÇA, M. S.; MORAIS, D. M.; RODRIGUES, R.; BIUDES, M. S. Estimativa de componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso e cobertura do solo. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 2, p. 347-358, 2014.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do bioma cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 1, p. 153-156, jun. 2008.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; RAO, T. V. R.; SATYAMURTY, P.; MANZI, A. O. Downward longwave radiation estimates for clear-sky conditions over northeast Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 26, n. 3, p. 443-450, 2011.

SANTOS, F. A. C. **Alterações no balanço radiativo e impactos climáticos decorrentes do uso da terra no Estado de São Paulo**. 2011. 83 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

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

SCHIRMBECK, J.; FONTANA, D. C.; ROBERTI, D. R.; SCHIRMBECK, L. W. Energy balance from images in humid climate—SEBAL and METRIC. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 25, n. 2, 2017.

SELLERS, W. D. **Physical climatology**. Chicago: University of Chicago, 1965. 272 p.

SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; BARBOSA JUNIOR, B. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; DE AZEVEDO, P. V. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Sete Lagoas, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005.

SILVA, B. B.; MENDONÇA, R. R. O.; SILVA, S. T. A.; FERREIRA, R. C. Mapeamento do albedo de áreas heterogêneas do estado do Ceará com imagens TM-Landsat 5. **Revista de Geografia**, Recife, v. 25, n. 2, p. 24-41, maio/ago. 2008.

SILVA, B. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, V. P. R.; ROCHA, H. R.; GALVÍNCIO, J. D.; OLIVEIRA, L. M. M. Determination of instantaneous and daily net radiation from TM-Landsat 5 data in a subtropical watershed. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Oxford, v. 135, p. 42-49, Dec. 2015b.

SILVA, B. B.; WILCOX, B. P.; SILVA, V. P. R.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; OLIVEIRA, L. M. M. Changes to the energy budget and evapotranspiration following conversion of tropical savannas to agricultural lands in São Paulo State, Brazil. **Ecohydrology**, New Jersey, v. 8, n. 7, p. 1272-1283, 2015a.

SILVA JUNIOR, J. F.; LOPES, G. M. B.; FERRAZ, L. G. B. (ed.). **Sistema de produção de banana para a zona da mata de Pernambuco**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. 134 p. (Sistema de produção, 3).

SOUZA, J.L. DE.; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*. v. 30, p. 1203 – 1220, 2005

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

SUGITA, M.; BRUTSAERT, W. Comparison of land surface temperatures derived from satellite observations with ground truth during FIFE. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 14, n. 9, p. 1659-1676, 1993.

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

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery**. 2003. 357 p. Tese (Doutorado em Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. 2003. 357 p. - University of Idaho, Moscow, 2003.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MAGALHÃES, A. G.; BARRETO, M. T. L. Variabilidade espacial de atributos físicos e mecânicos de um Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 11, p. 1206-1214, 2012.

VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M.; DONALISIO, M. R. Uso do sensoriamento remoto para estudar a influência de alterações ambientais na distribuição da malária na Amazônia brasileira. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 517-526, 2006.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 449 p.

VISWANADHAM, Y.; RAMANADHAM, R. Estimation of long wave radiation by an empirical method. **Pure and Applied Geophysics**, Basel, v. 81, n. 1, p. 272-278, Dec. 1970.

WANG, C.; NIE, S.; XI, X.; LUO, S.; SUN, X. Estimating the biomass of maize with hyperspectral and LiDAR data. **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 1, p. 11, 2017.

WANG, L.; LI, P.; YU, S.; MEHMOOD, K.; LI, Z.; CHANG, S.; LIU, W.; ROSENFELD, D.; FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H. Predicted impact of thermal power generation emission control measures in the Beijing-Tianjin-Hebei region on air pollution over Beijing, China. **Scientific Reports**, London, v. 8, n. 1, p. 934, Jan. 2018.