

**UNIVERSDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO  
A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS MEDIDOS  
E DE REANÁLISE E PRODUTOS MODIS MCD43A,  
MOD09A1 E MOD11A2 NO PANTANAL  
DE MATO GROSSO**

**ISRAEL OLIVEIRA IVO**

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES  
ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT  
Março 2020**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO  
A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS MEDIDOS  
E DE REANÁLISE E PRODUTOS MODIS MCD43A,  
MOD09A1 E MOD11A2 NO PANTANAL  
DE MATO GROSSO**

**ISRAEL OLIVEIRA IVO**

*Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Física Ambiental  
da Universidade Federal de Mato  
Grosso, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em Física  
Ambiental.*

**PROF. DR. MARCELO SACARDI BIUDES  
ORIENTADOR**

**Cuiabá, MT  
Março 2020**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

O48e Oliveira Ivo, Israel.

ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO A PARTIR DE DADOS  
METEOROLÓGICOS MEDIDOS E DE REANÁLISE E PRODUTOS MODIS  
MCD43A, MOD09A1 E MOD11A2 NO PANTANAL DE MATO GROSSO / Israel

Oliveira Ivo. -- 2020

78 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,  
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Áreas úmidas. 2. Sensoriamento remoto. 3. Balanço de radiação. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO A PARTIR DE DADOS METEOROLÓGICOS MEDIDOS E DE REANÁLISE E PRODUTOS MODIS MCD43A, MOD09A1 E MOD11A2 NO PANTANAL DE MATO GROSSO

**AUTOR:** ISRAEL OLIVEIRA IVO

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 20 de fevereiro de 2020, pela comissão julgadora:

  
**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes**  
Orientador  
Instituto de Física – UFMT

  
**Prof. Dra. Nadja Gomes Machado**  
Examinadora Interna  
Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT

  
**Prof. Dr. Carlos Alexandre Santos Querino**  
Examinador Externo  
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA) – UFAM/Humaitá

## DEDICATÓRIA

*A Deus, por não desistir de mim, aos meus amigos e familiares, e à minha esposa Jamille, que me apoia, me ama e é presença na minha vida, sendo sempre “um” comigo.*

## **AGRADECIMENTOS**

- A minha esposa Jamille Silva de Oliveira, por me acompanhar em todos os meus projetos, nas horas felizes e tristes, por ser sempre minha amiga e parceira incondicional e por sempre sonhar comigo;
- Aos meus Pais Juarez Ivo e Maria Aparecida de Oliveira Ivo, por toda educação, amor e exemplo com que me instruíram para fazer o bem;
- Aos meus irmãos Ângela, Marcelo, Angélica e Rafael, por todo o amor, apoio e orações;
- A todos os meus irmãos do Ministério Universidades Renovadas (MUR), por serem, em Deus, meu oásis na UFMT;
- Ao Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes, pela orientação e principalmente pelo incentivo, apoio, sinceridade, confiança e grande amizade, ingredientes que possibilitaram a realização deste;
- A Profa. Dra. Nadja Gomes Machado, por sua ajuda em conhecimentos e conselhos, sem os quais este trabalho não teria a mesma qualidade;
- Aos meus parceiros do Grupo de Pesquisa Interação Biosfera-Atmosfera (GPIBA), Lucas, Pabline, Vagner, Dalila, Danielle, Elio, Armando Filho, Jonas, Luiz, Altemar, Névio, Juliana e os PBICs Luis e Emilly, do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, por todo o apoio e amizade;
- A querida funcionária e amiga Jesulina de Farias (Jô), pela presença e cuidado nos espaços do PPGFA, mas principalmente por me ensinar lições o que não cabem nos livros e artigos;
- A todos os técnicos do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, onde sua dedicação e proatividade fazem do PPGFA o que ele é;
- A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, onde transmitiram seus conhecimentos;
- A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## EPÍGRAFE

*“Vós sois o sal da terra. Se o sal perde o sabor, com que lhe será restituído o sabor?... Vós sois a luz do mundo... Assim, brilhe vossa luz diante dos homens, para que vejam as vossas boas obras e glorifiquem vosso Pai que está nos céus.” (Mt 5, 13-16)*

## SUMÁRIO

|                                                      |      |
|------------------------------------------------------|------|
| DEDICATÓRIA .....                                    | iii  |
| AGRADECIMENTOS.....                                  | iv   |
| EPÍGRAFE.....                                        | v    |
| SUMÁRIO .....                                        | vi   |
| LISTA DE FIGURAS .....                               | viii |
| LISTA DE TABELAS .....                               | x    |
| LISTA DE SÍMBOLOS.....                               | xii  |
| RESUMO .....                                         | xiv  |
| ABSTRACT.....                                        | xv   |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                  | 1    |
| 1.1    Objetivo geral .....                          | 2    |
| 1.2    Objetivos específicos.....                    | 2    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                       | 1    |
| 2.1    Saldo de radiação.....                        | 1    |
| 2.2    Dados de reanálise GLDAS .....                | 3    |
| 2.3    Produtos MODIS .....                          | 6    |
| 2.4    Sensoriamento remoto .....                    | 9    |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....                         | 1    |
| 3.1    Área de estudo .....                          | 1    |
| 3.2    Obtenção dos dados de entrada .....           | 2    |
| 3.3    Análise dos dados de entrada .....            | 4    |
| 3.4    Modelo do saldo de radiação.....              | 5    |
| 3.5    Modelo do saldo de radiação diário.....       | 7    |
| 3.6    Análises Estatísticas .....                   | 7    |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                       | 1    |
| 4.1    PPT, NDVI, e dados medidos .....              | 1    |
| 4.2    Dados meteorológicos de reanálise .....       | 8    |
| 4.3    Albedo da superfície MODIS .....              | 12   |
| 4.4    Estimativas do saldo de radiação.....         | 13   |
| 4.5    Estimativas do saldo de radiação diário ..... | 22   |
| 5. CONCLUSÃO .....                                   | 28   |

|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... | 29 |
|-------------------------------------|----|

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>FIGURA 1</b> - Sazonalidade espaço-temporal do saldo de radiação (Rn), no pantanal Mato-Grossense, considerando os diferentes períodos de 16 dias ao longo do ano de 2012.....                                                                                                                               | 2  |
| <b>FIGURA 2</b> - Evolução temporal diária das médias ( $\pm$ desvio padrão) de 30 minutos da radiação de onda longa da atmosfera (Rld), onda longa da superfície (Rlu), radiação solar global (Rg), radiação solar global refletida pela superfície (Rgr) e o saldo de radiação (Rn).....                      | 3  |
| <b>FIGURA 3</b> - Ilustração dos conceitos de sensor ativo e sensor passivo .....                                                                                                                                                                                                                               | 11 |
| <b>FIGURA 4</b> - Espectro da radiação eletromagnética conhecida.....                                                                                                                                                                                                                                           | 11 |
| <b>FIGURA 5</b> - Localização de área de estudo (A) e localização da torre meteorológica (B), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, em Poconé-MT. ....                                                                                                                                                      | 1  |
| <b>FIGURA 6</b> – Fluxograma das variáveis de entrada medidas, de reanálise e dos produtos MODIS, e entradas das estimativas do saldo de radiação (Rn), coletadas para o horário da passagem do satélite Terra (9h36min UTC-4).....                                                                             | 5  |
| <b>FIGURA 7</b> – Fluxograma das variáveis de entrada medidas, de reanálise e produtos MODIS, e entradas das estimativas do saldo de radiação diário (Rn24h).....                                                                                                                                               | 5  |
| <b>FIGURA 8</b> - Precipitação mensal (PPT), médias mensais ( $\pm$ IC) do NDVI e das variáveis meteorológicas medidas na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, as 09h36min, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco) de 2011 a 2015.....                                                                  | 2  |
| <b>FIGURA 9</b> - Correlograma entre a precipitação (PPT), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e variáveis meteorológicas medidas, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min (*valor-p < 0,05, **valor-p < 0,01, ***valor-p < 0,001).....                           | 4  |
| <b>FIGURA 10</b> – Médias mensais ( $\pm$ IC) dos dados medidos, de reanálise e produtos MODIS, das variáveis de entrada do modelo de estimativa do Rn, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco), as 09h36min .....                               | 10 |
| <b>FIGURA 11</b> - Análise de concordância por método de Bland-Altman da radiação solar global (Rg), radiação solar global diária (Rg24h), albedo da superfície temperatura do ar (Tar) por reanálise em função dos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min..... | 11 |

- FIGURA 12** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do albedo da superfície ( $\alpha$ ) do produto MCD43A e do modelo de Liang (2000), usando o produto MOD09A1, em função dos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal de 2011 a 2015, as 09h36min. .... 13
- FIGURA 13** - Médias mensais do saldo de radiação ( $R_n$ ) medido e estimado, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco), as 09h36min. .... 14
- FIGURA 14** - Desvio absoluto das médias sazonais e anuais das estimativas do saldo de radiação ( $R_n$ ), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015. .... 15
- FIGURA 15** – Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação ( $R_n$ ) estimado, em função do  $R_n$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. .... 17
- FIGURA 16** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação ( $R_n$ ) estimado, em função do  $R_n$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. .... 19
- FIGURA 17** - Médias mensais ( $\pm$  IC) do saldo de radiação diário ( $R_{n24h}$ ) estimado e medido na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco) de 2011 a 2015. .... 23
- FIGURA 18** - Desvio absoluto das médias sazonais e anuais das estimativas do saldo de radiação diário ( $R_{n24h}$ ), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015. .... 23
- FIGURA 19** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação diário ( $R_{n24h}$ ) estimado em função do  $R_{n24h}$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. .... 25

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>TABELA 1</b> – Modelos de superfície terrestre (LSM), atualmente executados no GLDAS, e os respectivos números de níveis e profundidades verticais.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 4  |
| <b>TABELA 2</b> - Variáveis produzidas pelo GLDAS/Noah. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5  |
| <b>TABELA 3</b> – Bandas espectrais do sensor MODIS direcionadas a aplicações terrestres e as respectivas resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 7  |
| <b>TABELA 4</b> – Equipamentos utilizados para medição da radiação solar incidente (Rg), saldo de radiação (Rn) radiação de onda longa da atmosfera(Rld) e suas respectivas alturas de instalação na área de estudo.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2  |
| <b>TABELA 5</b> – Produtos de reanálise da radiação solar global (Rg), albedo da superfície, radiação de onda longa da atmosfera (Rld), temperatura do ar (Tar), umidade específica do ar (UE) e precipitação (PPT), e as respectivas resoluções temporal (R. T.) e espacial (R. E.). ....                                                                                                                                                                                                         | 3  |
| <b>TABELA 6</b> – Produtos MODIS do albedo da superfície ( $\alpha$ ), temperatura da superfície (Ts) e as refletância das bandas espectrais 1,2,3,4,5 e 7 ( $\rho_\lambda$ ), e suas respectivas resoluções espectral (R. S.), temporal (R. T.) e espacial (R. E.).....                                                                                                                                                                                                                           | 3  |
| <b>TABELA 7</b> - Média sazonal ( $\pm$ IC) do NDVI, albedo da superfície ( $\alpha$ ) e dados meteorológicos medidos na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (P. seco) e chuvoso (P. chuvoso), as 09h36min. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 3  |
| <b>TABELA 8</b> - Média ( $\pm$ IC) das variáveis meteorológicas (Rg, Rg24h, Rld, Tar e UR) e albedo da superfície ( $\alpha$ ) medidos e de reanálise e os respectivos erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r) em relação aos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. ....                      | 8  |
| <b>TABELA 9</b> - Média ( $\pm$ IC) do albedo da superfície ( $\alpha$ ) estimado pelos produtos MCD43A (MODIS) e pelo modelo Liang (2000), usando o MOD43A (MODIS/Liang), e os respectivos erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS; %), índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r) em função do $\alpha$ medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. .... | 13 |
| <b>TABELA 10</b> – Médias ( $\pm$ IC) anual e sazonal do saldo de radiação (Rn) medido e estimado e respectivos valores do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de                                                                                                                                                                                                                                       |    |

Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, as 09h36min. .... 21

**TABELA 11** – Médias ( $\pm$  IC) anual e sazonal do saldo de radiação diário (Rn24h) medido e estimado e respectivos valores do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal de 2011 a 2015..... 26

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                       |                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Aw</b>                             | Clima quente e úmido - Köppen                        |
| <b>BAPP</b>                           | Base Avançada de Pesquisa do Pantanal                |
| <b>BOC</b>                            | Balanço de onda curta                                |
| <b>BOL</b>                            | Balanço de onda longa                                |
| <b>c</b>                              | Velocidade da luz                                    |
| <b>d</b>                              | Índice de concordância de Willmott                   |
| <b>DAAC</b>                           | <i>Distributed Active Archive Center</i>             |
| <b>e<sub>a</sub></b>                  | Pressão de vapor do ar                               |
| <b>ECS</b>                            | <i>EOSDIS Core System</i>                            |
| <b>EOS</b>                            | <i>Earth Observing System</i>                        |
| <b>EOSDIS</b>                         | <i>EOS Data Information System</i>                   |
| <b>GES DAAC</b>                       | <i>GES Distributed Active Archive Center</i>         |
| <b>GLDAS</b>                          | <i>Global Land Data Assimilation System</i>          |
| <b>GSFC</b>                           | <i>Goddard Space Flight Center</i>                   |
| <b>INMET</b>                          | Instituto Nacional de Meteorologia                   |
| <b>LSM</b>                            | Modelo de simulação da superfície                    |
| <b>MAE</b>                            | Erro médio absoluto                                  |
| <b>MODAPS</b>                         | <i>MODIS Adaptive Processing System</i>              |
| <b>MODIS</b>                          | <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> |
| <b>MSS</b>                            | <i>Multispectral Scanner System</i>                  |
| <b>NASA</b>                           | <i>National Aeronautics and Space Administration</i> |
| <b>NCEP</b>                           | <i>National Center for Environmental Prediction</i>  |
| <b>NDVI</b>                           | <i>Normalize Difference Vegetation Index</i>         |
| <b>NDVI<sub>max</sub></b>             | NDVI máximo                                          |
| <b>NDVI<sub>min</sub></b>             | NDVI mínimo                                          |
| <b>O<sub>i</sub></b>                  | i-ésimo valor observado                              |
| <b>ORNL</b>                           | <i>Oak Ridge National Laboratory</i>                 |
| <b>P</b>                              | Pressão atmosférica                                  |
| <b>PBIAS</b>                          | Desvio percentual                                    |
| <b>P<sub>i</sub></b>                  | i-ésimo valor estimado                               |
| <b>P<sub>M</sub></b>                  | Média dos valores estimados                          |
| <b>PPT</b>                            | Precipitação                                         |
| <b>P<sub>v</sub></b>                  | Fração de cobertura da vegetação                     |
| <b>QA</b>                             | <i>Quality Assurance</i>                             |
| <b>r</b>                              | Coefficiente de correlação de Spearman               |
| <b>REM</b>                            | Radiação eletromagnética                             |
| <b>R<sub>g</sub></b>                  | Radiação solar global                                |
| <b>R<sub>g24h</sub></b>               | Radiação solar global diária medida                  |
| <b>R<sub>g24h</sub><sub>TOA</sub></b> | Radiação solar diária no topo da atmosfera           |
| <b>R<sub>gr</sub></b>                 | Radiação solar global refletida                      |
| <b>R<sub>ld</sub></b>                 | Radiação de onda longa da atmosfera                  |
| <b>R<sub>lu</sub></b>                 | Radiação de onda longa da superfície                 |
| <b>RMSE</b>                           | Raiz do erro quadrático médio                        |

|                                  |                                                 |
|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Rn</b>                        | Saldo de radiação                               |
| <b>Rn24h</b>                     | Saldo de radiação diário                        |
| <b>SR</b>                        | Sensoriamento Remoto                            |
| <b>Tar</b>                       | Temperatura do ar                               |
| <b>TDRSS</b>                     | <i>Tracking and Data Relay Satellite System</i> |
| <b>TM</b>                        | <i>Thematic Mapper</i>                          |
| <b>TRMM</b>                      | <i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>      |
| <b>Ts</b>                        | Temperatura da superfície                       |
| <b>Ts</b>                        | Temperatura da superfície                       |
| <b>Tsw24h</b>                    | Transmissividade diária da atmosfera            |
| <b>UE</b>                        | Umidade específica do ar                        |
| <b>UFMT</b>                      | Universidade Federal de Mato Grosso             |
| <b>ZCAS</b>                      | Zona de Convergência do Atlântico Sul           |
| <b><math>\alpha</math></b>       | Albedo da superfície, Albedo médio              |
| <b><math>\alpha</math></b>       | Albedo da superfície medido                     |
| <b><math>\epsilon_0</math></b>   | Emissividade da superfície                      |
| <b><math>\epsilon_a</math></b>   | Emissividade da atmosfera                       |
| <b><math>\epsilon_g</math></b>   | Emissivida do solo                              |
| <b><math>\epsilon_v</math></b>   | Emissividade da vegetação                       |
| <b><math>\lambda</math></b>      | Comprimento de onda                             |
| <b><math>\nu</math></b>          | Frequência                                      |
| <b><math>\rho_\lambda</math></b> | Refletância espectral                           |
| <b><math>\sigma</math></b>       | Constante de Stefan-Boltzmann                   |

## RESUMO

**IVO, I. O. Estimativa do saldo de radiação a partir de dados meteorológicos medidos e de reanálise e produtos MODIS MCD43A, MOD09A1 e MOD11A2 no Pantanal de Mato Grosso.** Cuiabá, 2019, 76f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Os produtos de reanálise têm sido utilizados em regiões remotas do globo, em paralelo com técnicas de sensoriamento remoto, devido principalmente a falta de recursos para a instalação de equipamentos em campo, o que tem permitido monitorar os diferentes microclimas com baixo custo operacional e baixos erros. O presente estudo avaliou as estimativas do saldo de radiação usando dados meteorológicos medidos, de reanálise e os produtos MODIS MODIS MCD43A, MOD09A1 e MOD11A2 no Pantanal Mato-Grossense. Os dados meteorológicos medidos, de reanálise e os produtos MODIS foram obtidos na localidade da Base Avançada de Pesquisa Baía das Pedras, em Poconé, Mato Grosso, entre 15/06/2011 e 09/08/2015. Os dados meteorológicos estimados por reanálise e pelos produtos MCD43A e MOD09A1, bem como o saldo de radiação instantâneo ( $R_n$ ) e diário ( $R_{n24h}$ ), foram comparados aos valores medidos em estação meteorológica. Os produtos de reanálise tiveram baixos erros, elevada concordância (d), da qual 93,0% a 98,0% das estimativas satisfizeram os limites de concordância, e elevada correlação em relação aos valores medidos. O Erro Médio Absoluto (EMA) do  $R_n$  e  $R_{n24h}$  estimados usando dados de reanálise, em relação aos medidos, foi  $72,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $24,2 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto o erro sistemático percentual (PBIAS) foi -6,0% e 12,0% e o coeficiente de concordância 0,70 e 0,82, respectivamente. O EMA, o PBIAS e o d foram em média 8,0%, 18,0% e 27,0% menores no saldo de radiação ( $R_n$  e  $R_{n24h}$ ) estimado com dados meteorológicos de reanálise em relação ao estimado com dados medidos.

**Palavras-chave:** Áreas úmidas, sensoriamento remoto, balanço de radiação.

## ABSTRACT

**IVO, I. O. Estimation of the radiation balance from measured and reanalysis meteorological data and MODIS products MCD43A, MOD09A1 and MOD11A2 in the Pantanal of Mato Grosso.** Cuiabá, 2019, 76f. Dissertation (Master's Degree in Environmental Physics) – Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2019.

Reanalysis products have been used in remote regions of the globe, in parallel with remote sensing techniques, mainly due to the lack of resources for field equipment installation, which has allowed to monitor different microclimates with low operating cost and low errors. The present study evaluated the radiation balance estimates using measured meteorological, reanalysis data and the MODIS MODIS MCD43A, MOD09A1 and MOD11A2 products in the Mato Grosso Pantanal. The measured meteorological data, reanalysis and MODIS products were obtained at the Baía das Pedras Advanced Research Base, in Poconé, Mato Grosso, between 15/06/2011 and 09/08/2015. The meteorological data estimated by reanalysis and by the MCD43A and MOD09A1 products, as well as the instantaneous ( $R_n$ ) and daily ( $R_{n24h}$ ) radiation balance, were compared to the values measured at the meteorological station. The reanalysis products had low errors, high agreement ( $d$ ), of which 93.0% to 98.0% of estimates met the limits of agreement, and high correlation with the measured values. The Mean Absolute Error (EMA) of  $R_n$  and  $R_{n24h}$  estimated using reanalysis data, compared to the measured ones, was  $72.0 \text{ W m}^{-2}$  and  $24.2 \text{ W m}^{-2}$ , while the percentage bias (PBIAS) was -6.0% and 12.0% and the agreement coefficient 0.70 and 0.82, respectively. The EMA, PBIAS and  $d$  were on average 8.0%, 18.0% and 27.0% lower in the radiation balance ( $R_n$  and  $R_{n24h}$ ) estimated with reanalysis meteorological data than estimated with measured data.

**Palavras-chave:** Wetlands, remote sensing, radiation balance.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar é a principal fonte de energia para os processos biofísicos que ocorrem no planeta, em alguns casos, contribuindo de forma direta com até 68% do balanço energético na superfície. O saldo de radiação ( $R_n$ ) é o resultado da contabilização do balanço de radiação de onda longa (BOL) e onda curta (BOC), e a base energética dos processos que envolvem os fenômenos de troca de energia e/ou matéria, na superfície. As trocas de energia/matéria entre superfície e atmosfera, de modo geral, dependem dentre outros fatores, da heterogeneidade da superfície e da dinâmica espaço temporal do  $R_n$ .

A cobertura da superfície, por sua vez, condiciona o  $R_n$ , em que a sazonalidade da disponibilidade hídrica, através da precipitação, e ciclo fenológico da vegetação, são apontados como os principais fatores que influenciam o  $R_n$ . O conhecimento do  $R_n$  é importante para compreender os ecossistemas do globo, permitindo identificar características fitofisiológicas da vegetação e subsidiando o desenvolvimento de modelos que descrevem a dinâmica microclimática das regiões.

O estado de Mato Grosso, devido a sua localização geográfica e a sua extensão, tem elevada variação da disponibilidade energética ao longo do ano, proveniente da radiação solar. Estudos realizados na região apontam para uma correlação direta do  $R_n$  com a disponibilidade hídrica, a radiação solar global e a vegetação. Além disso, o estado apresenta uma grande diversidade de fitofisionomias, distribuída nos biomas Cerrado, Amazônia e Pantanal, condicionada principalmente pela variabilidade espacial da fertilidade do solo e da precipitação.

Regiões como o Pantanal Mato-Grossense têm como fator adicional o regime de inundações, que determina os pulsos dos processos bióticos e abióticos, além das composições das unidades de paisagem. Devido à importância, tanto de ordem biológica, ecológica e/ou climática do Pantanal Mato-Grossense, diversas pesquisas nos mais diversos contextos vêm sendo realizadas em toda a região. No aspecto climático, o principal foco das pesquisas é entender como ocorrem os processos de troca de energia entre a superfície pantaneira e a atmosfera.

Do ponto de vista ambiental, são necessários estudos que busquem avaliar espacialmente a dinâmica energética nos diversos tipos de uso e ocupação do solo na região do Pantanal. No entanto, estudos dessa natureza, supracitados, são realizados

em escala temporal, com coleta de dados pontuais, realizadas em estações meteorológicas. Atualmente, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), possui no estado de Mato Grosso 39 estações meteorológicas automáticas ativas, o que equivale a uma estação meteorológica a cada 23 mil km<sup>2</sup>. Na região do pantanal Mato-Grossense existem 3 estações meteorológicas ativas, o que equivale a 1 estação para cada 16 mil km<sup>2</sup>.

Metodologias de espacialização de diversos parâmetros meteorológicos vem sendo desenvolvidas, visando superar as atuais limitações, do ponto de vista operacional, em estudos ambientais e meteorológicos. O desenvolvimento de modelos de simulação da superfície, em paralelo com o advento do sensoriamento remoto, têm contribuído significativamente para o avanço das fronteiras de pesquisa nos locais mais remotos do globo, possibilitando estimativas que a princípio eram viáveis somente em locais providos de estações meteorológicas. Além disso, os produtos de reanálise, bem como as estimativas por sensoriamento remoto, têm sido validados em diversas regiões do globo, viabilizando estudos microclimáticos em regiões remotas.

### **1.1 Objetivo geral**

Analisar as estimativas do saldo de radiação a partir de dados meteorológicos medidos e estimados por reanálise e os produtos MODIS MCD43A, MOD09A1 e MOD11A2 em uma área sazonalmente alagável no Pantanal de Mato Grosso.

### **1.2 Objetivos específicos**

- i. Avaliar a sazonalidade das variáveis meteorológicas e do albedo da superfície medidos e do NDVI na área de estudo;
- ii. Analisar os erros, a concordância e a correlação dos produtos de reanálise radiação solar global, albedo da superfície, radiação de onda longa da atmosfera, temperatura e umidade relativa do ar, em relação ao medido, na área de estudo.
- iii. Analisar os erros, a concordância e a correlação das estimativas do albedo da superfície estimado usando os produtos MODIS MCD43A e MOD09A1 em relação ao medido na área de estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Saldo de radiação

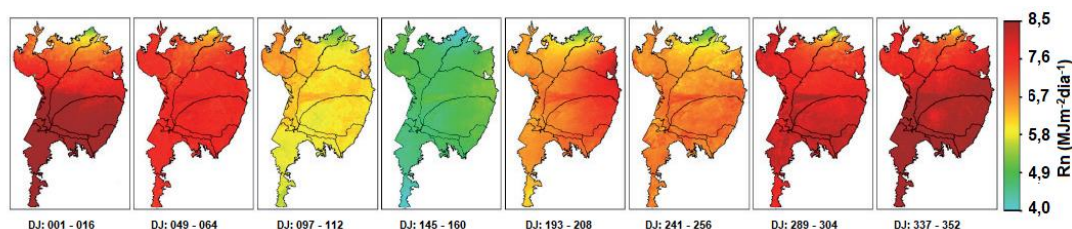
O  $R_n$  é o produto dos BOL e BOC, provenientes da interação da REM com a superfície, em que é contabilizada toda radiação que entra e sai da interface solo-planta-atmosfera, segundo Equação (1) (FAUSTO *et al.*, 2016). A radiação que chega ao topo da atmosfera, ao acessar a camada gasosa do planeta, interage com os constituintes por processos de espalhamento, transmissão (não interação) e absorção, de modo que apenas uma parcela chega à superfície (FAUSTO *et al.*, 2014). Na superfície parte dessa radiação é refletida, determinada pelo albedo da superfície, e parte é absorvida ou reemitida (QUERINO *et al.*, 2017; LOPES JUNIOR *et al.*, 2019). A reemissão é o processo pelo qual a superfície, por absorção de radiação solar, aquece e, conseqüentemente, emite radiação em comprimento de onda proporcional a temperatura, enquanto na reflexão não há aquecimento da superfície, pois a superfície não absorve a radiação solar, ao contrário, a radiação é refletida no mesmo comprimento original (BISHT *et al.*, 2005; PAVÃO *et al.*, 2018).

$$R_n = BOL + BOC \quad (1)$$

O  $R_n$  é a base energética dos diversos processos que ocorrem na superfície do planeta, para fenômenos de troca de massa ou de energia, contribuindo na manutenção da vida (VAREJÃO-SILVA, 2006). A obtenção dos valores do  $R_n$  acontece por meio de medidas diretas utilizando dispositivos sensores chamados de saldo radiômetros ou por meio de estimativas por sensoriamento remoto (MACHADO *et al.*, 2016; ANGELINI *et al.*, 2017).

O  $R_n$ , em geral, apresenta padrão variacional sazonal e diário, condicionado por fatores que, em geral, apresentam a mesma escala de variação. Sazonalmente, o  $R_n$  varia, principalmente, a partir da incidência de radiação solar, do regime hídrico e do comportamento fenológico da vegetação ao longo do ano, com padrões que variam de acordo com o tipo de vegetação, a latitude e as condições atmosféricas (BIUDES *et al.*, 2015). Em regiões tropicais, como no Pantanal Mato-Grossense, observa-se o efeito da disponibilidade de água na superfície a partir da precipitação, com maiores

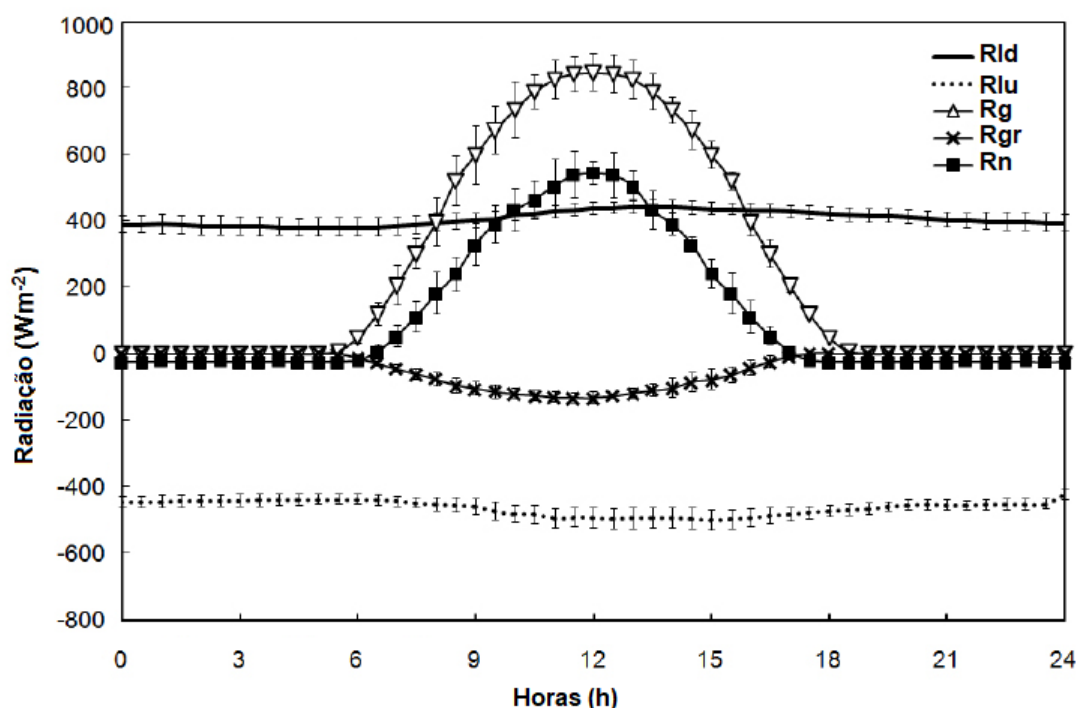
valores de Rn no período chuvoso e menores no período seco, além da contribuição da radiação, com maiores valores em áreas de vegetação densa e menores em áreas de vegetação rasteira (BIUDES *et al.*, 2015).



**FIGURA 1** - Sazonalidade espaço-temporal do saldo de radiação (Rn), no pantanal Mato-Grossense, considerando os diferentes períodos de 16 dias ao longo do ano de 2012.

**FONTE:** Adaptado de TEIXEIRA *et al.* (2014).

A variação diária do Rn ocorre de forma mais acentuada em horários próximos ao meio-dia, período em que ocorre a incidência de radiação solar sobre a superfície. Nesse período a intensidade da radiação solar varia principalmente em função cosseno do ângulo zenital, que é o ângulo menor formado entre a inclinação dos raios solares e o zênite local (VAREJÃO-SILVA, 2006). A noite o Rn é negativo, devido principalmente a ausência de radiação solar, o que torna o BOL praticamente o único componente do Rn (TEIXEIRA *et al.*, 2014)(FIGURA 2). Com disso, a superfície emite mais radiação em direção a atmosfera, devido ao gradiente térmico entre superfície e a atmosfera, tornando negativo o BOL (RANDOW & ALVALÁ, 2006; VAREJÃO-SILVA, 2006).



**FIGURA 2** - Evolução temporal diária das médias ( $\pm$  desvio padrão) de 30 minutos da radiação de onda longa da atmosfera (Rld), onda longa da superfície (Rlu), radiação solar global (Rg), radiação solar global refletida pela superfície (Rgr) e o saldo de radiação (Rn).

**FONTE:** Adaptado de MESQUITA *et al.* (2013)

Os padrões do Rn dependem espacialmente da disposição dos elementos presentes que compõem a superfície, além do relevo, da altitude, latitude e da disponibilidade hídrica no solo. Os maiores valores de Rn, em geral, são encontrados em locais com maior disponibilidade hídrica e em regiões de menor latitude (SILVA *et al.*, 2015).

## 2.2 Dados de reanálise GLDAS

O *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) é um projeto que visa gerar campos ideais de estados e fluxos da superfície terrestre a partir de produtos de dados observacionais baseados em satélite e na superfície, usando técnicas avançadas de modelagem da superfície terrestre e de assimilação de dados (RODELL *et al.*, 2004). O GLDAS foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), GSFC e pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). Através da inovação e uma constante melhoria nos conceitos físicos subjacentes aos

processos terrestres, foram desenvolvidos modelos de simulação da superfície (LSM), que continuam evoluindo e exibindo capacidade cada vez maior de simular fenômenos complexos (CHEN *et al.*, 2013). Atualmente, o aumento no poder de processamento, devido ao progresso computacional, e a facilidade de acesso aos dados estão permitindo que simulações globais, que só poderiam ser realizadas utilizando supercomputadores, possam ser realizadas rotineiramente e com menos tempo (RODELL *et al.*, 2004).

Estimulados pelos avanços no entendimento da dinâmica da água no solo, na fisiologia das plantas, na meteorologia e nas interações atmosfera-biosfera-hidrosfera, vários novos LSMs foram desenvolvidos nas últimas duas décadas com o objetivo de simular realisticamente as transferências de massa, energia e momento entre o solo, a vegetação e a atmosfera (RODELL *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2013). Atualmente, o GLDAS está em sua segunda versão (GLDAS-2) (TABELA 1) e administra três LSMs, o Catchment, Noah e o VIC. Os produtos GLDAS podem ser obtidos dos dados dos experimento 1 (1948-2008), gerados a partir de dados atualizados de Forçantes da Universidade de Princeton, LSMs atualizados e dados da superfície terrestre, e experimento 2 (2001 - presente), gerados a partir de dados forçantes baseados em observação com abrangência em torno de um mês (RUI *et al.*, 2012).

**TABELA 1** – Modelos de superfície terrestre (LSM), atualmente executados no GLDAS, e os respectivos números de níveis e profundidades verticais.

| LSM               | Nº de níveis | Camadas verticais                                                                                                                                    |
|-------------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GLDAS-1/Mosaic    | 3            | 0 – 0,02, 0,02 – 1,5 e 1,5 – 3,0 m                                                                                                                   |
| GLDAS-1/CLM2      | 10           | 0 – 0,018, 0,018 – 0,045, 0,045 – 0,091, 0,091 – 0,166, 0,166 – 0,289, 0,289 – 0,493, 0,493 – 0,829, 0,829 – 1,383, 1,383 – 2,296, e 2,296 – 3,433 m |
| GLDAS-1/Noah      | 4            | 0 - 0,1, 0,1 - 0,4, 0,4 - 1,0, 1,0 - 2,0 m                                                                                                           |
| GLDAS-1/VIC       | 3            | 0 - 0,1, 0,1 - 1,6 e 1,6 - 1,9 m                                                                                                                     |
| GLDAS-2/Noah      | 4            | 0 – 0,1, 0,1 – 0,4, 0,4 – 1,0, 1,0 – 2,0 m.                                                                                                          |
| GLDAS-2/VIC       | 3            | Superfície 0 – 0,3 m, espacialmente variável no segundo e terceiro nível.                                                                            |
| GLDAS-2/Catchment | Sem níveis   | Superfície, zona raiz e perfil em que o perfil inclui a superfície e a zona raiz e a zona raiz inclui a superfície.                                  |

**FONTE:** GLDAS, 2019. Disponível em: < [ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/specifications](https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/specifications) >, acesso em: 28/11/2019.

O GLDAS está estruturado numa rotina operacional que inclui quatro componentes:

- 1) Modelagem do solo, em que o desenvolvimento do produto é iniciado de forma modular, o que facilita o acoplamento de LSMs diferentes;
- 2) Observação da superfície, em que são utilizados dados dos sensores orbitais *TM-Landsat*, *AVHRR*, *MODIS*, *ASTER*, *SSM/I*, *TRMM-TMI*, *AMSR*, *GRACE* e *TOPEX-Poseidon*;
- 3) Assimilação de dados de superfície, em que diversos dados coletados em superfície são fundidos, fornecendo correções aos LSMs e promovendo melhores estimativas do estado natural do ambiente;
- 4) Calibração e validação, em que variáveis independentes da reprodução são comparadas com os produtos, permitindo a avaliação e, se necessário, a realização de alterações, suprimindo ou instituindo novos parâmetros para o modelo (HOUSER *et al.*, 2001).

Os dados GLDAS são relevantes para muitos programas internacionais de pesquisa, em particular os dados da superfície terrestre GLDAS-2/Noah, utilizados em experimentos globais de energia e ciclo da água (HOUSER *et al.*, 2001). Isso se deve ao rigoroso processo de calibração e validação dos dados produzidos através dos LSMs (RODELL *et al.*, 2004; CHEN *et al.*, 2013) e as resoluções dos dados produzidos, além da variedade de variáveis estimadas (WANG *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2013; QI *et al.*, 2015; YANG *et al.*, 2017). Variáveis como a radiação solar global ( $R_g$ ), o albedo da superfície ( $\alpha$ ), a temperatura do ar ( $T_{ar}$ ), radiação de onda longa da atmosfera ( $R_{ld}$ ), além da umidade específica do ar (UE) e a pressão atmosférica superficial ( $P$ ) são dados de reanálise comumente utilizados em estudos que avaliam a dinâmica das trocas de energia e matéria entre a superfície e a atmosfera (WANG *et al.*, 2011).

**TABELA 2** - Variáveis produzidas pelo GLDAS/Noah.

| Nome curto | Descrição                     | Unidade              |
|------------|-------------------------------|----------------------|
| Swnet_tavg | Net short wave radiation flux | $W\ m^{-2}$          |
| Lwnet_tavg | Net long-wave radiation flux  | $W\ m^{-2}$          |
| Qle_tavg   | Latent heat net flux          | $W\ m^{-2}$          |
| Qh_tavg    | Sensible heat net flux        | $W\ m^{-2}$          |
| Qg_tavg    | Heat flux                     | $W\ m^{-2}$          |
| Snowf_tavg | Snow precipitation rate       | $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ |
| Rainf_tavg | Rain precipitation rate       | $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ |

|                       |                                   |                                    |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Evap_tavg             | Evapotranspiration                | kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |
| Qs_acc                | Storm surface runoff              | kg m <sup>-2</sup> por 3-hour      |
| Qsb_acc               | Baseflow-groundwater runoff       | kg m <sup>-2</sup> por 3-hour      |
| Qsm_acc               | Snow melt                         | kg m <sup>-2</sup> per 3-hour      |
| AvgSurfT_inst         | Average Surface Skin temperature  | K                                  |
| Albedo_inst           | Albedo                            | %                                  |
| SWE_inst              | Snow depth water equivalent       | kg m <sup>-2</sup>                 |
| SnowDepth_inst        | Snow depth                        | m                                  |
| SoilMoi0_10cm_inst    | Soil moisture                     | kg m <sup>-2</sup>                 |
| SoilMoi10_40cm_inst   | Soil moisture                     | kg m <sup>-2</sup>                 |
| SoilMoi40_100cm_inst  | Soil moisture                     | kg m <sup>-2</sup>                 |
| SoilMoi100_200cm_inst | Soil moisture                     | kg m <sup>-2</sup>                 |
| SoilTMP0_10cm_inst    | Soil temperature                  | K                                  |
| SoilTMP10_40cm_inst   | Soil temperature                  | K                                  |
| SoilTMP40_100cm_inst  | Soil temperature                  | K                                  |
| SoilTMP100_200cm_inst | Soil temperature                  | K                                  |
| PotEvap_tavg          | Potential evaporation rate        | W m <sup>-2</sup>                  |
| ECanop_tavg           | Canopy water evaporation          | W m <sup>-2</sup>                  |
| Tveg_tavg             | Transpiration                     | W m <sup>-2</sup>                  |
| ESoil_tavg            | Direct Evaporation from Bare Soil | W m <sup>-2</sup>                  |
| RootMoist_inst        | Root zone soil moisture           | kg m <sup>-2</sup>                 |
| CanopInt_inst         | Plant canopy surface water        | kg m <sup>-2</sup>                 |
| Wind_f_inst           | Wind speed                        | m s <sup>-1</sup>                  |
| Rainf_f_tavg          | Total precipitation rate          | kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> |
| Tair_f_inst           | Temperature                       | K                                  |
| Qair_f_inst           | Specific humidity                 | kg kg <sup>-1</sup>                |
| Psurf_f_inst          | Pressure                          | Pa                                 |
| SWdown_f_tavg         | Downward short-wave radiation     | W m <sup>-2</sup>                  |
| LWdown_f_tavg         | Downward long-wave radiation      | W m <sup>-2</sup>                  |

---

**FONTE:** Adaptado de RUI & BEAUDOING (2019).

### 2.3 Produtos MODIS

O *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), é um sensor orbital composto por um scanner óptico de varredura transversal e um conjunto de elementos detetores individuais que fornecem imagens da superfície terrestre em 36 bandas espectrais. As configurações do sensor MODIS produzem uma combinação de resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal que permitem obter dados de

temperatura da Terra e do oceano (KILPATRICK *et al.*, 2015; JANATIAN *et al.*, 2017), dados para modelagem meteorológica (ZHU *et al.*, 2017), dados para monitorar mudanças na produtividade primária biológica, imagens da vegetação e uso da terra (WANG *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2017), cujo objetivo é monitorar mudanças de cobertura da Terra (GIGLIO *et al.*, 2018; ESTEL *et al.*, 2015), condições e produtividade, e dados para cobertura de nuvens (MOREIRA, 2007; TREZZA *et al.*, 2013).

O sensor MODIS é classificado como um sensor de resolução espacial moderada, com maior resolução nas bandas 1 e 2 (250 m), seguidas das bandas 3-7 (500 m) e 8-36 (1000 m). As resoluções espaciais do sensor MODIS têm possibilitado estudos de cobertura da superfície pela vegetação, além de avaliar os fluxos de radiação e calor (BISHT *et al.*, 2005; DU *et al.*, 2013; DANELICHEN *et al.*, 2016).

A resolução espectral do MODIS foi projetada para proporcionar estudos de natureza global na terra, no mar e na atmosfera. As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro situada entre 405 nm e 2155 nm, de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres (TABELA 3); as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições da atmosfera. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1360 nm a 1390 nm), cobrem a porção termal do espectro (3660 nm a 14385 nm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (ANDERSON *et al.*, 2003).

As bandas do sensor MODIS fornecem uma alta sensibilidade radiométrica, específicas para as necessidades da comunidade científica, fornecendo uma excelente resposta para estudos de ruído, ou anomalias, da superfície do mar, enquanto permite a saturação da temperatura acima de áreas focos de incêndio (LATORRE *et al.*, 2003). O sensor MODIS possui uma resolução temporal quase diária, o que lhe confere uma grande capacidade para estudos de dinâmicas ecológicas e microclimáticas tanto terrestres (TREZZA *et al.*, 2013; DANELICHEN *et al.*, 2016; CORRÊA *et al.*, 2016).

**TABELA 3** – Bandas espectrais do sensor MODIS direcionadas a aplicações terrestres e as respectivas resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica.

| Banda | Resoluções   |                |                |                    |
|-------|--------------|----------------|----------------|--------------------|
|       | Espacial (m) | Temporal (dia) | Espectral (nm) | Radiométrica (bit) |
| 1     | 250          | 2              | 620-670        | 12                 |

|   |     |   |           |    |
|---|-----|---|-----------|----|
| 2 | 250 | 2 | 841-875   | 12 |
| 3 | 500 | 2 | 459-479   | 12 |
| 4 | 500 | 2 | 545-565   | 12 |
| 5 | 500 | 2 | 1230-1250 | 12 |
| 6 | 500 | 2 | 1628-1652 | 12 |
| 7 | 500 | 2 | 2105-2155 | 12 |

---

**FONTE:** (ANDERSON *et al.*, 2003)

Após a realização das medidas, os dados produzidos pelo sensor MODIS são transferidos para estações terrestres em White Sands, Novo México, por meio do sistema *Tracking and Data Relay Satellite System* (TDRSS). Em seguida, são enviados para os Esses são então, enviados para os dados de pesquisas do *Earth Observing System* (EOS) e os sistemas de operações (EDOS) no *Goddard Space Flight Center* (GSFC). Neste centro começam os processamentos dos dados, em que ocorrem em cinco níveis (0 a 4), que variam de acordo com o grau de processamento realizado (ANDERSON *et al.*, 2003). Após o processamento do nível zero pelo sistema operacional, o centro de arquivos denominado *Goddard Space Flight Center Earth Sciences Distributed Active Archive Center* (GES DAAC) produz os níveis 1A e 1B e os produtos de geolocalização (LATORRE *et al.*, 2003). Os produtos de níveis mais elevados são, inicialmente, produzidos pelo Sistema de Processamento Adaptativo do sensor MODIS (*MODIS Adaptive Processing System*-MODAPS), e então distribuídos entre três outros centros do *Distributed Active Archive Center* (DAAC) (JUSTICE *et al.*, 2002).

O *EOS Data Information System* (EOSDIS) é o responsável pelo suporte computacional do EOS, o que inclui o processamento, distribuição e arquivamento dos dados internos e provenientes do intercâmbio com a comunidade científica (JUSTICE *et al.*, 2002). O *EOSDIS Core System* (ECS), por sua vez realiza o acompanhamento de todos esses objetivos, mantendo a qualidade dos dados por meio dos instrumentos de calibração e caracterização, além validar e gerar os produtos de garantia da qualidade (*Quality Assurance* - QA) (ANDERSON *et al.*, 2003). A QA de cada pixel é obtida pelo processamento de um software desenvolvido para esta finalidade, examinando os dados de entrada, suas associações e a documentação do histórico do processamento deste código. A QA dos metadados traz informações da aplicação dos

procedimentos de produção e pós-produção, armazenados em codificação binária (JUSTICE *et al.*, 2002).

Os produtos MODIS são utilizados pela maioria da comunidade científica em estudos das propriedades da superfície, como ecologia, uso e ocupação do solo e o balanço energético (BISHT *et al.*, 2005; PHILLIPS *et al.*, 2008; DANIELICHEN *et al.*, 2016; OLIVEIRA *et al.*, 2016). Um aspecto relevante, a respeito dos produtos MODIS e de sua aplicação, foi a contribuição para estudos sobre a cobertura global da superfície e a inferência dos parâmetros que influenciam os processos biofísicos e/ou as trocas de energia entre superfície e atmosfera (SCHAAF *et al.*, 2002; ANDERSON *et al.*, 2003; TREZZA *et al.*, 2013).

Nesse sentido, os principais produtos MODIS que são destinados a estudos da dinâmica energética na superfície são o MOD9, MOD11 e MCD43 (LATORRE *et al.*, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2016). O MOD9 é um produto de estimativa da reflectância espectral da superfície, computado a partir dos níveis 1A, nas bandas 1 a 7, com os comprimentos de onda centrados em 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, and 2130 nm, respectivamente. O MOD11 é o produto da temperatura da superfície ( $T_s$ ), sendo uma das variáveis-chaves, necessárias para se descrever os processos da superfície terrestre, sendo extremamente requisitados para diversos estudos climáticos, hidrológicos, ecológicos e biológicos (DU *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2014). O MCD43 é o produto do albedo médio ( $\alpha$ ) temporal da superfície, sendo um parâmetro importante do balanço de onda curta e apresentado como mais importante que o albedo instantâneo no cálculo do saldo de radiação (WANG *et al.*, 2015).

## 2.4 Sensoriamento remoto

O termo “Sensoriamento Remoto” (SR) foi cunhado pela primeira vez por Evelyn L. Pruitt e colaboradores na década de 1960. Atualmente se trata de uma das mais bem-sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoramento dos recursos da superfície global (MENESES *et al.*, 2012; ANGELINI *et al.*, 2017; RAMÍREZ-CUESTA *et al.*, 2018).

O SR pode ser definido como um conjunto de atividades que permitem a obtenção de informações dos objetos ou fenômenos da superfície terrestre, ou mesmo

planetária, sem a necessidade de contato direto com os mesmos (MORAES, 2002). O SR representa uma emergência da interação entre duas grandes linhas de pesquisas. De um lado, os avanços no campo da aerofotogrametria e fotointerpretação, na qual se obtém dados topográficos por meio de fotografias aéreas da superfície. Do outro lado, existe a fundamental contribuição da pesquisa espacial e os avanços tecnológicos, por ela incentivados, que resultaram em novos sensores baseados em fotodetectores espectrais e na possibilidade de obter informações a respeito da superfície não somente a partir de aviões, mas também de satélites (NOVO, 2008; IVO *et al.*, 2018).

Outro fator de grande importância para o avanço do SR e do sistema de processamento de imagens foi o advento tecnológico da informática, com o desenvolvimento de microcomputadores, que possibilitou análises mais rápidas e com maior capacidade de processamento e armazenamento de dados. Além disso, a criação dos sistemas operacionais permitiu maior popularização da informática, uma vez que qualquer pessoa, com pouco conhecimento de linguagem computacional, se tornou capaz de manusear um computador sem grandes problemas (MOREIRA, 2007).

A obtenção de imagens por SR, em sua maioria, ocorre por meio de sensores acoplados aos satélites. Os sensores absorvem a energia proveniente da radiação eletromagnética (REM) e a transformam em informação digital que em seguida é processada e convertida em parâmetros que são relacionados ao alvo do imageamento (MORAES, 2002; DANELICHEN *et al.*, 2016). O processo de imageamento por SR depende do registro realizado pelo sensor das medições da radiação eletromagnética. Ou seja, nenhum outro tipo de sensor que obtenha imagens que não seja pela detecção da REM deve ser classificado como sensoriamento remoto (MORAES, 2002; NOVO, 2008). Atualmente, o SR encontra-se definido como a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da REM com os materiais terrestres (MENESES *et al.*, 2012).

A REM medida pelos sensores tem sua origem em três principais fontes: no próprio satélite, em que o sensor é quem emite e posteriormente recebe a REM; no alvo do imageamento, que emite a REM em direção ao sensor; ou numa fonte externa, que emite a REM e em seguida o alvo a reflete em direção ao sensor (MORAES, 2002; NOVO, 2008). Define-se como sensor ativo, o sensor que produz a radiação utilizada

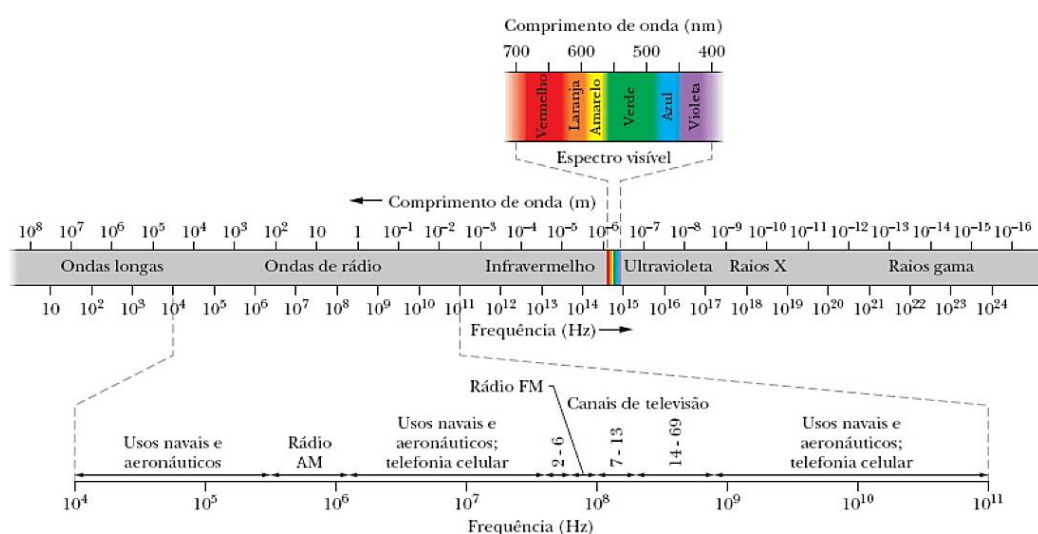
no imageamento, e sensor passivo, o sensor que não é a fonte da radiação eletromagnética envolvida no imageamento (FIGURA 3) (MOREIRA, 2007; PAVÃO *et al.*, 2018).



**FIGURA 3** - Ilustração dos conceitos de sensor ativo e sensor passivo

**FONTE:** Os autores.

A REM pode ser definida como a propagação de energia sem a necessidade de um meio material, caracterizada pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) e pela frequência ( $\nu$ ). No vácuo, o produto do comprimento de onda pela frequência é igual a velocidade de propagação da radiação ( $c = 299\,792\,458,0\text{ m s}^{-1}$ ). A faixa da REM conhecida pelo homem, em termos do  $\lambda$  e/ou  $\nu$ , é denominada de espectro eletromagnético (FIGURA 4) (VAREJÃO-SILVA, 2006).



**FIGURA 4** - Espectro da radiação eletromagnética conhecida.

**FONTE:** HALLIDAY *et al.*, (2016).

Os avanços na área da Física e da Química permitiram o desenvolvimento de novos materiais, que foram incorporados as tecnologias espaciais, resultando em sensores com maior capacidade de medição da REM. A capacidade de imageamento de um sensor é dada pelas suas resoluções espacial, espectral e radiométrica (MOREIRA, 2007; NOVO, 2008; ZHU *et al.*, 2016).

A resolução espacial, ou resolução geométrica, representa a capacidade do sensor de distinguir objetos na superfície. Cada imagem produzida por um sensor possui uma precisão máxima detalhamento da superfície, dada pela dimensão real dos pixels da imagem. A dimensão real, ou a representação real de cada pixel, depende do detector, da altura e do posicionamento do sensor em relação a superfície. Quanto maior for a resolução espacial, menores serão as dimensões dos elementos da superfície representáveis pelas imagens do sensor (MORAES, 2002; ZHU *et al.*, 2016).

A resolução espectral é definida pelo número de bandas espectrais, que opera o sensor, num intervalo espectral. Quanto maior for o número de bandas espectrais em função do intervalo espectral, maior será a resolução espectral. O sensor *Thematic Mapper* (TM - Landsat 5) apresenta algumas bandas espectrais mais estreitas do que o sensor *Multispectral Scanner System* (MSS - Landsat 1, 2 e 3), portanto nestas bandas o TM apresenta melhor resolução espectral do que o MSS (NOVO, 2008; ZHU *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2018).

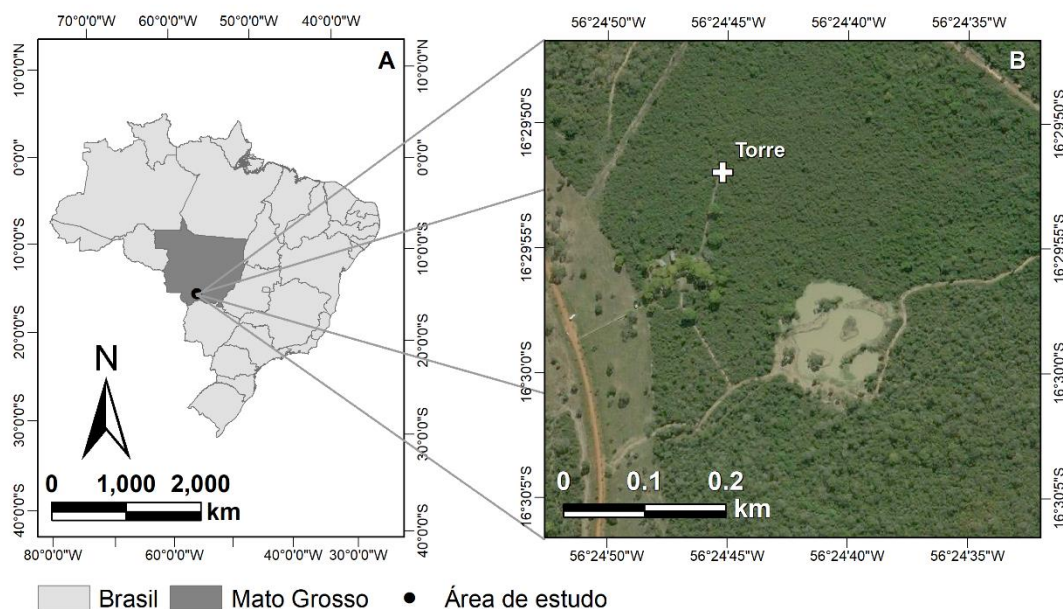
A resolução radiométrica é a capacidade do sensor em detectar pequenas variações energéticas na REM refletida, devido a sua interação com os elementos que compõem a superfície (rochas, solos, vegetações, águas, etc.). Nas imagens produzidas pelos sensores, a resolução radiométrica é representada pelo número de “tons de cinza” distintos que a imagem possui (MORAES, 2002).

Além disso, a frequência de imageamento de um sensor num mesmo ponto do globo é definida como resolução temporal. Quanto maior for a resolução temporal do sensor maior será a capacidade de detectar mudanças rápidas na superfície (BORGES, *et al.*, 2015). Dados produzidos por sensores com alta resolução temporal, em geral, são utilizados em estudos de monitoramento ambiental e meteorológico, devido a capacidade de acompanhar a evolução temporal dos parâmetros associados aos eventos ocorridos na superfície e/ou na atmosfera (MORAES, 2002).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal (BAPP), da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), no município de Poconé – MT, distante 160 km de Cuiabá – MT, em que foi instalada uma torre meteorológica de 32 metros de altura ( $16^{\circ}29'52.84''\text{S}$ ;  $56^{\circ}24'45.60''\text{O}$ ) (FIGURA 5). A vegetação na área de estudo é composta em sua maioria pela espécie *Combretum laxum* Pohl, localmente conhecida como “pombeiro”, que são arbustos de pequeno-médio porte que crescem em agrupamentos muito densos (BIUDES *et al.*, 2015). O solo é classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico (MACHADO *et al.*, 2016).



**FIGURA 5** - Localização de área de estudo (A) e localização da torre meteorológica (B), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, em Poconé-MT.

A topologia da região é caracterizada por planícies alagáveis durante o período chuvoso, com altitude média de 120 m acima do nível do mar (MACHADO *et al.*, 2016). O clima é classificado como Aw, na classificação de Köppen, com período chuvoso ocorrendo de outubro a abril e período seco de maio a setembro. A precipitação anual é de 1400 mm e a temperatura média anual variando entre  $29^{\circ}\text{C}$  e  $32^{\circ}\text{C}$  e entre  $17^{\circ}\text{C}$  e  $20^{\circ}\text{C}$  (BIUDES *et al.*, 2014).

Os padrões sazonais climáticos da região são condicionados por sistemas de grande e média escala, de origem tropical e subtropical (MACHADO *et al.*, 2016).

Durante o período chuvoso é formada na região amazônica a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), caracterizada pela convergência de umidade e nebulosidade, estendendo-se da Amazônia até a região sudeste do Brasil (SETTE, 2005). Nesse período, a ZCAS avança pela região Mato-Grossense em direção à região sudeste do Brasil, por ventos divergentes em altos níveis da atmosfera, podendo causar eventos extremos de precipitação nessa região (SOUZA *et al.*, 2013).

Durante o período seco ocorre uma supressão dos eventos de precipitação, ocasionada principalmente pela mudança do padrão estacional da atmosfera na América do Sul e o fortalecimento do sistema de alta pressão, conhecido como “Alta da Bolívia” (MACHADO *et al.*, 2016). No mesmo período, ocorre um aumento da intensidade e frequência de eventos de ondas de ar polar que adentram o continente pela região sudeste do Brasil e avançam pela região passando por Mato Grosso e modificando as propriedades termodinâmicas da atmosfera na região (SETTE, 2005).

### 3.2 Obtenção dos dados de entrada

Os dados medidos foram coletados por sensores, instalados numa torre meteorológica na área de estudo (FIGURA 5), e armazenados em um datalogger (CR1000, Campbell Scientific Inc. Logan, UT, USA) (QUERINO *et al.*, 2017). A alimentação do sistema foi realizada com a instalação de um conjunto de baterias mantidas carregadas por meio de painéis solares com reguladores de tensão (SP 65 Campbell Scientific Inc. Logan UT USA) (MACHADO *et al.*, 2016). Foram medidos dados de radiação solar global incidente ( $R_g$ ), radiação solar global refletida ( $R_{gr}$ ), radiação de onda longa da atmosfera ( $R_{ld}$ ),  $R_n$ , temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e umidade relativa do ar ( $UR$ ) (TABELA 4). Os dados foram coletados ininterruptamente de 15/06/2011 a 10/08/2015.

**TABELA 4** – Equipamentos utilizados para medição da radiação solar incidente ( $R_g$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ) radiação de onda longa da atmosfera ( $R_{ld}$ ) e suas respectivas alturas de instalação na área de estudo.

| Variável | Equipamento                              | Altura de inst. (m) |
|----------|------------------------------------------|---------------------|
| $R_g$    | LI200X, LI-COR, Lincoln, NE, USA         | 20                  |
| $R_{gr}$ | LI200X, LI-COR, Lincoln, NE, USA         | 20                  |
| $R_{ld}$ | CNR4, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands   | 20                  |
| $R_n$    | NRLITE, Kipp & Zonen, Delft, Netherlands | 20                  |

|     |                                         |    |
|-----|-----------------------------------------|----|
| Tar | HMP-45AC, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA | 22 |
| UR  | HMP-45AC, Vaisala Inc., Woburn, MA, USA | 31 |

Os dados de reanálise GLDAS/Noah (TABELA 5) foram desenvolvido pelas universidades de Princeton e de Washington, produzidos pela NASA, GSFC e pelo NCEP, e disponibilizados gratuitamente para download na plataforma GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, acessado em 03/07/2018). Foram baixados dados das variáveis  $\alpha$ , Rld, Rg, Tar, UE e P. Também foram baixados da plataforma GIOVANNI estimativas da precipitação (PPT), do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), fornecidas pelo DAAC. Os dados foram obtidos para o período de 15/06/2011 a 10/08/2015 e ajustados para a horário local (UTC -4).

**TABELA 5** – Produtos de reanálise da radiação solar global (Rg), albedo da superfície, radiação de onda longa da atmosfera (Rld), temperatura do ar (Tar), umidade específica do ar (UE) e precipitação (PPT), e as respectivas resoluções temporal (R. T.) e espacial (R. E.).

| Variável | Produto                            | R. T. (h) | R. E. (°) |
|----------|------------------------------------|-----------|-----------|
| Rg       | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_SWdown_f_tavg | 3         | 0,25      |
| $\alpha$ | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_Albedo_inst   | 3         | 0,25      |
| Rld      | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_LWdown_f_tavg | 3         | 0,25      |
| Tar      | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_Tair_f_inst   | 3         | 0,25      |
| UE       | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_Qair_f_inst   | 3         | 0,25      |
| P        | GLDAS_NOAH025_3H_2_1_Psurf_f_inst  | 3         | 0,25      |
| PPT      | TRMM_3B42_7_precipitation          | 3         | 0,25      |

Os dados MODIS de temperatura da superfície ( $T_s$ ),  $\alpha$  e refletância espectral ( $\rho_\lambda$ ) das bandas 1,2,3,4,5 e 7, foram obtidos por meio dos respectivos produtos do sensor MODIS (TABELA 6), a bordo do satélite Terra. Os produtos MODIS foram obtidos da plataforma do DAAC do *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) (<https://modis.ornl.gov/>, acesso em 08/07/2018), já tendo sido aplicadas as devidas correções e etapas de pré-processamento. Os produtos foram baixados para o período 15/06/2011 a 10/08/2015, com horários correspondentes à hora da passagem do satélite (9h36min, UCT -4).

**TABELA 6** – Produtos MODIS do albedo da superfície ( $\alpha$ ), temperatura da superfície ( $T_s$ ) e as refletância das bandas espectrais 1,2,3,4,5 e 7 ( $\rho_\lambda$ ), e suas respectivas resoluções espectral (R. S.), temporal (R. T.) e espacial (R. E.).

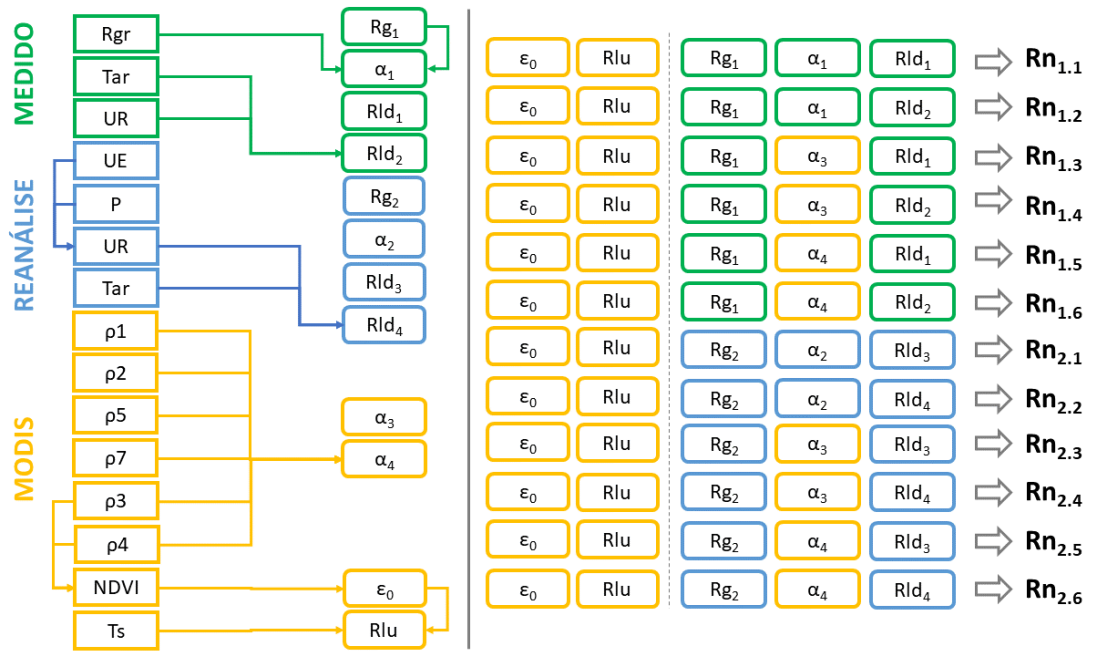
| Variável | Produto | R. S. (nm) | R. T. (dia) | R. E. (m) |
|----------|---------|------------|-------------|-----------|
| $\alpha$ | MCD43A  | -          | 1           | 500       |
| Ts       | MOD11A2 | -          | 8           | 1000      |
| $\rho_1$ | MOD09A1 | 620-670    | 8           | 500       |
| $\rho_2$ | MOD09A1 | 841-875    | 8           | 500       |
| $\rho_3$ | MOD09A1 | 459-479    | 8           | 500       |
| $\rho_4$ | MOD09A1 | 545-565    | 8           | 500       |
| $\rho_5$ | MOD09A1 | 1230-1250  | 8           | 500       |
| $\rho_7$ | MOD09A1 | 2105-2155  | 8           | 500       |

Foram realizados os procedimentos de seleção dos dados seguindo os procedimentos de determinação da qualidade descrito pela documentação do ORNL DAAC. Foi adotada a variável “sur\_refl\_day\_of\_year” do produto MOD09A1 para a data dos demais produtos, que corresponde a data do imageamento do sensor MODIS/Terra.

### 3.3 Análise dos dados de entrada

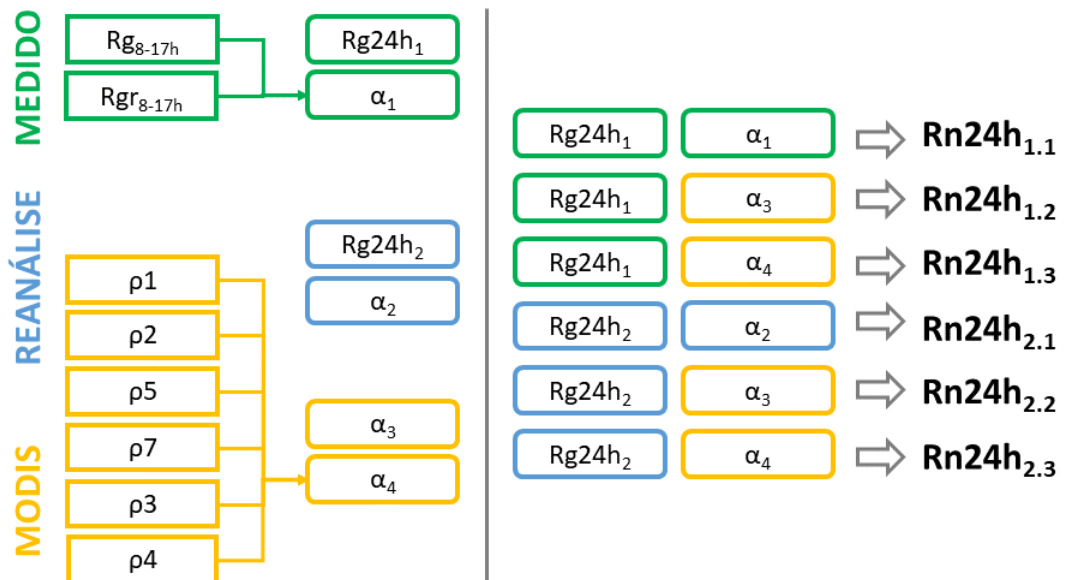
A  $R_g$ ,  $R_{ld}$  e o  $\alpha$  foram inseridos no modelo do  $R_n$ , a partir dos dados medidos, de reanálise e produtos MODIS. As estimativas do  $R_n$  foram realizadas para cada combinação possível entre os dados de  $R_g$ ,  $R_{ld}$  e  $\alpha$ . As nomenclaturas das estimativas do  $R_n$  foram definidas considerando os dados de entrada em cada estimativa. Em que albedo da superfície medido foi obtido pela razão entre as médias da radiação solar global refletida e incidente medidas das 8 às 17 horas. Além disso, foram utilizadas em todas estimativas do  $R_n$  a emissividade da superfície ( $\epsilon_0$ ) e a radiação de onda longa da superfície ( $R_{lu}$ ) (FIGURA 6).

$R_{g1}$  foi obtida por medidas e  $R_{g2}$  por reanálise. O  $\alpha_1$  foi calculado através das medidas de  $R_{g1}$  e  $R_{gr}$ ,  $\alpha_2$  foi obtido por reanálise,  $\alpha_3$  foi obtido pelo produto MODIS MCD43A e  $\alpha_4$  pelo produto MODIS MOD09A1.  $R_{ld1}$  foi obtida por medidas,  $R_{ld2}$  foi calculada através das medidas de Tar e UR,  $R_{ld3}$  foi obtida por reanálise e  $R_{ld4}$  calculada a partir dos dados de reanálise Tar e UE.



**FIGURA 6** – Fluxograma das variáveis de entrada medidas, de reanálise e dos produtos MODIS, e entradas das estimativas do saldo de radiação ( $R_n$ ), coletadas para o horário da passagem do satélite Terra (9h36min UTC-4).

O  $R_{n24h}$  foi estimado utilizando os dados de entrada medidos, de reanálise e dos produtos MODIS (FIGURA 7).



**FIGURA 7** – Fluxograma das variáveis de entrada medidas, de reanálise e produtos MODIS, e entradas das estimativas do saldo de radiação diário ( $R_{n24h}$ ).

### 3.4 Modelo do saldo de radiação

O  $R_n$  foi estimado a partir da Equação (2), por meio do computo das contribuições energéticas da radiação de onda longa e onda curta e de suas interações com a superfície.

$$R_n = R_g(1 - \alpha) + R_{ld} - R_{ld}(1 - \varepsilon_0) - R_{lu} \quad (2)$$

Além dos valores medidos e de reanálise, o  $\alpha$  e a  $R_{ld}$  foram estimados segundo as equações (3) (LIANG, 2000) e (4), respectivamente.

$$\alpha = 0,160\rho_1 + 0,291\rho_2 + 0,243\rho_3 + 0,116\rho_4 + 0,112\rho_5 + 0,081\rho_7 - 0,0015 \quad (3)$$

$$R_{ld} = \varepsilon_a \sigma T_{ar}^4 \quad (4)$$

$$R_{lu} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (5)$$

em que  $\varepsilon_a$  é a emissividade da atmosfera, calculada pela Equação (6) (IDSO, 1981) e  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ).

$$\varepsilon_a = 0,7 + 5,95 \times 10^{-7} e_a \exp\left(\frac{1500}{T_{ar}}\right) \quad (6)$$

em que  $e_a$  (kPa) é a pressão de vapor do ar.

A  $\varepsilon_0$  foi calculada através da Equação (7) baseado no modelo de cobertura da vegetação (VALOR & CASELLES, 1996).

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_g (1 - P_v)(1 - 1.74 P_v) + 1.7372 P_v (1 - P_v) \quad (7)$$

em que  $\varepsilon_v$  e  $\varepsilon_g$  são as emissividades da vegetação e do solo puro, cujos valores utilizados são 0,985 e 0,960, respectivamente.  $P_v$  é a fração de cobertura da vegetação calculada pela Equação (8) em função do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (8)$$

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (9)$$

em que  $NDVI_{\max}$  e  $NDVI_{\min}$  são os valores de NDVI máximos e mínimos, respectivamente.

### 3.5 Modelo do saldo de radiação diário

O saldo de radiação diário ( $Rn24h$ ) foi estimado por meio da Equação (10) (PAVÃO *et al.*, 2018).

$$Rn24h = Rg24h(1 - \alpha) - 65 \times Tsw24h \quad (10)$$

em que  $Tsw24h$  é a transmissividade diária da atmosfera, obtida pela Equação (11).

$$Tsw24h = \frac{Rg24h}{Rg24h_{TOA}} \quad (11)$$

em que  $Rg24h_{TOA}$  é a radiação solar diária no topo da atmosfera.

### 3.6 Análises Estatísticas

Os dados foram analisados pelo cálculo das médias ( $\pm$  IC) anuais, sazonais e mensais dos dados de entrada (medido, reanálise e MODIS) e das estimativas do  $Rn$ . A análise da variação temporal foi realizada por meio dos gráficos das séries temporais dos dados medido, de reanálise, MODIS e das estimativas do  $Rn$ , em escala instantânea (09h36min UTC -4) e diária (24h). Os dados medidos, o NDVI e a PPT foram avaliados, em termos da suas correlações, por meio da análise do correlograma, utilizando o método de Spearman, no software R, pacote “PerformanceAnalytics” (PETERSON & CARL, 2018).

A PPT foi avaliada por meio da comparação das médias dos acumulados anuais, sazonais e mensais, em relação a normal climatológica. A normal climatológica utilizada foi produzida para os anos de 1981 a 2010, com dados de PPT da estação

meteorológica Padre Ricardo Remetter (15° 51' 16,7"S 56° 04' 14,3"O), do INMET (Código OMM: 83364), localizada no município de Santo Antônio do Leverger-MT, a aproximadamente 80 km da área de estudo (INMET, 2019).

As estimativas dos produtos de reanálise foram avaliadas, em relação as medidas da torre meteorológica, por meio do Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Sistemático Percentual (PBIAS), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT *et al.*, 1985). O MAE e o PBIAS, foram calculados através das equações (12) e (13), estimando o desvio médio absoluto das estimativas e a tendência que a média das estimativas tem em relação aos valores medidos em termos percentuais, respectivamente. Um caso ideal ocorre quando os valores do EMA e o PBIAS são iguais a zero (OLIVEIRA *et al.*, 2016; PAVÃO *et al.*, 2018).

$$EMA = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (12)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (14)$$

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)}{\sum (|O_i - P_M| + |P_i - P_M|)^2} \quad (15)$$

em que  $P_M$  é a média dos valores estimados,  $O_i$  e  $P_i$  são os  $i$ -ésimos valores medidos e estimados, respectivamente.

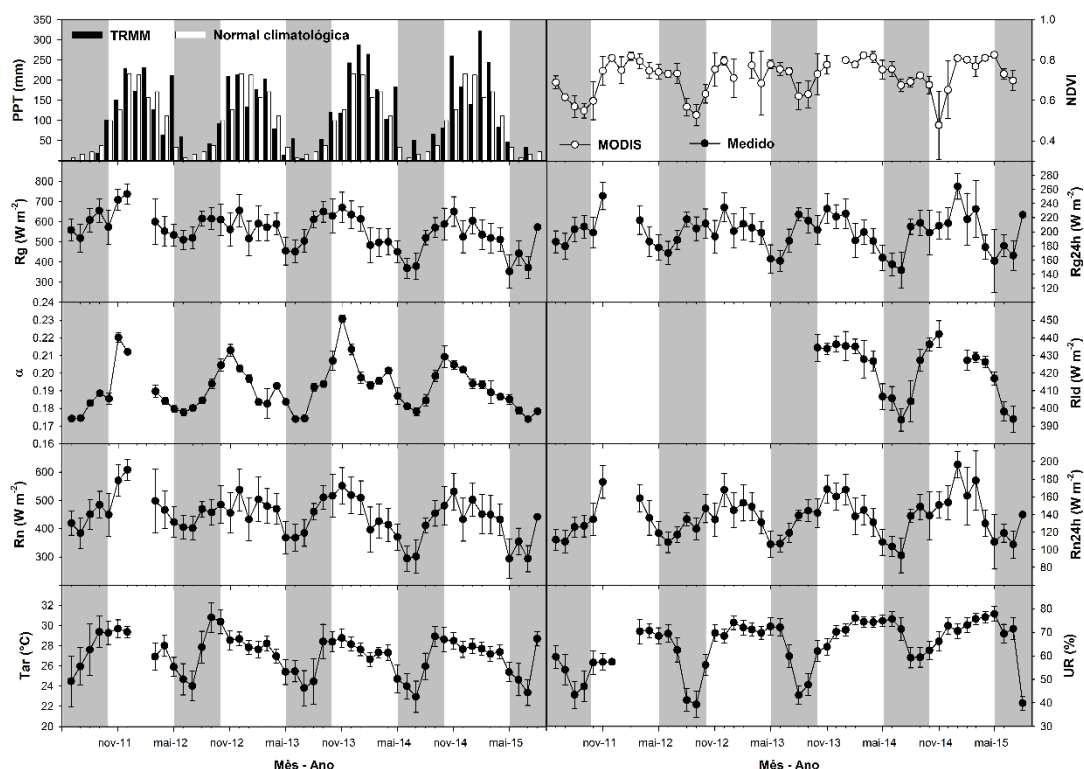
A correlação entre as estimativas por reanálise, produtos MODIS e o modelo do  $R_n$  com os dados medidos foi avaliada pelo coeficiente de correlação de Spearman ( $r$ ). A concordância das estimativas foi avaliada por meio da estatística de Bland-Altman e dos gráficos de concordância em função dos dados medidos (ALTMAN & BLAND, 1983; BLAND & ALTMAN, 1995). A estatística de Bland-Altman foi aplicada utilizando o software R, versão 3.5.1, pacote “blandr” (DATTA, 2017).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PPT, NDVI, e dados medidos

A média da PPT anual acumulada na área de estudo foi 1438,7 mm, 226,1 mm acima da normal climatológica para a região (INMET, 2019). A PPT foi significativamente maior durante o período chuvoso, representando 84,1% de toda água precipitada na área de estudo durante os anos analisados. O período seco teve baixos índices pluviométricos, sem precipitação em junho e julho (FIGURA 8), o que é consistente com a duração de 4-5 meses do período seco na região (BIUDES *et al.*, 2015; MACHADO *et al.*, 2016). Além disso, a precipitação no período chuvoso e seco foram 133,2 mm e 115,3 mm acima da normal climatológica, respectivamente. A diferença positiva da PPT anual e sazonal em relação a normal climatológica indica que os anos ocorreram acima dos padrões normais (QUERINO *et al.*, 2017).

As anomalias positivas da PPT registradas no período seco ocorreram devido à atuação de cavalos em níveis médios da atmosfera e a intensificação de jatos de baixos níveis em meses mais secos (QUERINO *et al.*, 2017). Por outro lado, as anomalias da PPT no período chuvoso estão relacionadas aos episódios de ZCAS que atuaram nos meses de mais chuvosos, principalmente em janeiro, organizando máximos movimentos verticais ascendentes e máximas divergências de vento em altos níveis da atmosfera, ocasionando, na área de estudo, os maiores volumes de chuva (DIVMET, 2018). Além disso, o retorno da Alta da Bolívia e do Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis às suas posições climatológicas, a partir do mês de fevereiro, favoreceu a organização da ZCAS, elevando os volumes de chuva na área de estudo (INPE, 2018).



**FIGURA 8** - Precipitação mensal (PPT), médias mensais ( $\pm$  IC) do NDVI e das variáveis meteorológicas medidas na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, às 09h36min, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco) de 2011 a 2015.

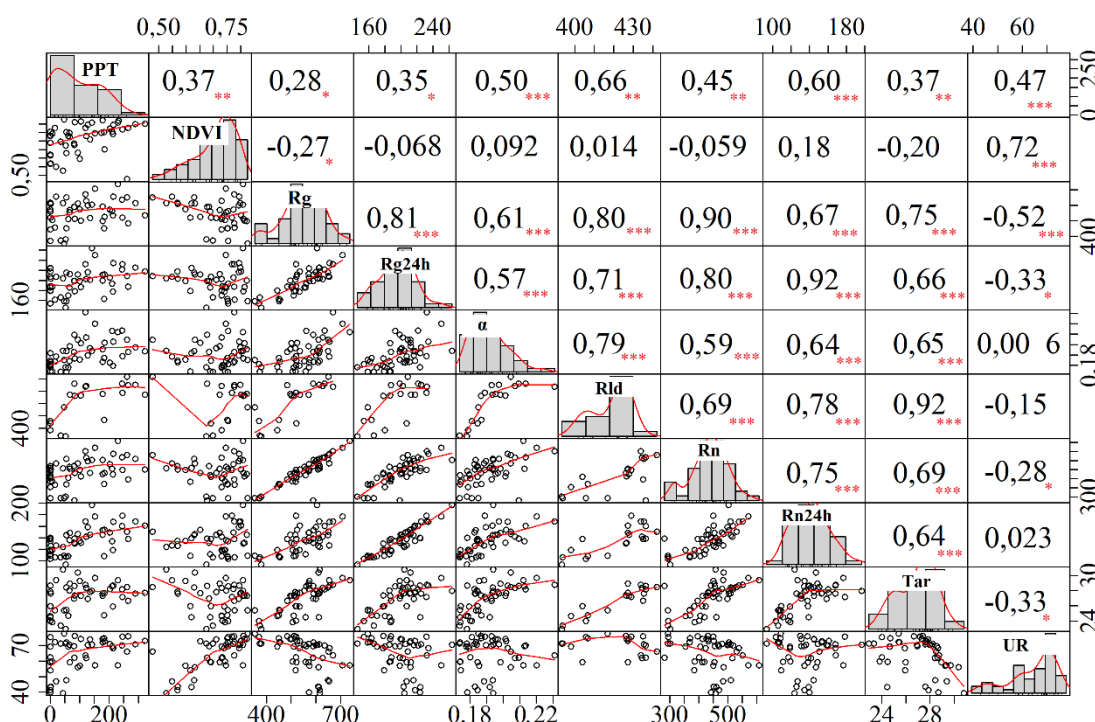
O NDVI teve média anual  $0,75 \pm 0,02$ , com valor mínimo registrado em setembro ( $0,61 \pm 0,04$ ) e máximo em fevereiro ( $0,80 \pm 0,02$ ) (FIGURA 8). A correlação entre o NDVI e a PPT foi significativa (FIGURA 9), com média e amplitude no período seco 8,0% e 33,0% menores que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7), indicando uma limitação do desenvolvimento da vegetação em relação a disponibilidade de água proveniente da chuva (MACHADO *et al.*, 2016).

O NDVI diminuiu e aumentou acentuadamente no fim do período seco e início do período chuvoso, respectivamente. As primeiras chuvas, que ocorreram na transição do período seco para o chuvoso causaram o rebrotamento da vegetação e, consequentemente, o aumentando a densidade de folhas (FIGURA 8). Os baixos valores de precipitação no período seco diminuem a disponibilidade hídrica no solo e, consequentemente, limitam o crescimento da vegetação (BIUDES *et al.*, 2014; BIUDES *et al.*, 2015). Em meses com baixos índices de precipitação, além da taxa de crescimento da vegetação ser menor ou quase nula, algumas espécies vegetacionais perdem a maior parte da folhagem, o que diminui o NDVI (IVO *et al.*, 2018).

**TABELA 7** - Média sazonal ( $\pm$  IC) do NDVI, albedo da superfície ( $\alpha$ ) e dados meteorológicos medidos na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (P. seco) e chuvoso (P. chuvoso), às 09h36min.

| Variável                   | Média            |                  |
|----------------------------|------------------|------------------|
|                            | P. seco          | P. chuvoso       |
| NDVI                       | 0,69 $\pm$ 0,02  | 0,75 $\pm$ 0,02  |
| Rg (W m <sup>-2</sup> )    | 468,8 $\pm$ 14,4 | 582,2 $\pm$ 15,7 |
| Rg24h (W m <sup>-2</sup> ) | 197,6 $\pm$ 6,9  | 212,3 $\pm$ 4,6  |
| $\alpha$                   | 0,18 $\pm$ 0,00  | 0,19 $\pm$ 0,00  |
| Rld (W m <sup>-2</sup> )   | 407,1 $\pm$ 3,4  | 431,4 $\pm$ 1,4  |
| Rn (W m <sup>-2</sup> )    | 368,8 $\pm$ 11,9 | 504,8 $\pm$ 18,2 |
| Rn24h (W m <sup>-2</sup> ) | 119,8 $\pm$ 3,7  | 155,2 $\pm$ 4,3  |
| Tar (°C)                   | 25,5 $\pm$ 0,4   | 27,7 $\pm$ 0,2   |
| UR (%)                     | 61,7 $\pm$ 2,3   | 64,3 $\pm$ 1,5   |

No período chuvoso o aumento da disponibilidade hídrica no solo faz a vegetação crescer numa taxa maior e a produzir mais folhagem, aumentando o NDVI (BIUDES *et al.*, 2014). Os eventos de inundação, frequentes no período chuvoso, afetaram o NDVI aumentando o período no qual se observam seus maiores valores (FIGURA 8). Após a estiagem das chuvas, as áreas alagadas do pantanal, no início do período seco se tornam reservatórios hídricos que fornecem água suficiente para que a vegetação mantenha sua taxa de desenvolvimento (IVORY *et al.*, 2019). A medida que a quantidade de água nas planície alagadas diminui, a vegetação reduz seu crescimento como resposta fisiológica à baixa disponibilidade hídrica do solo (MACHADO *et al.*, 2016).



**FIGURA 9** - Correlograma entre a precipitação (PPT), Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e variáveis meteorológicas medidas, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min (\*valor-p < 0,05, \*\*valor-p < 0,01, \*\*\*valor-p < 0,001).

A média anual da Rg medida foi  $591,5 \text{ W m}^{-2} \pm 12,9 \text{ W m}^{-2}$ , com valor mínimo em maio ( $448,4 \text{ W m}^{-2} \pm 65,3 \text{ W m}^{-2}$ ) e máximo em novembro ( $647,4 \text{ W m}^{-2} \pm 70,8 \text{ W m}^{-2}$ ) (FIGURA 8). A média e a amplitude da Rg medida no período seco foram 19,0% menores que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7). A Rg24h medida teve média anual  $213,0 \text{ W m}^{-2} \pm 3,5 \text{ W m}^{-2}$ , com valor mínimo em maio ( $165,4 \text{ W m}^{-2} \pm 25,1 \text{ W m}^{-2}$ ) e máximo em janeiro ( $230,2 \text{ W m}^{-2} \pm 21,1 \text{ W m}^{-2}$ ) (FIGURA 8). A média e a amplitude da Rg24h medida no período seco foram 6,0% e 22,0% menor que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7). A correlação positiva entre a Rg e Rg24h com a PPT corroborou com os resultados supracitados, com maiores valores de radiação solar incidente registrados no período de maior índice pluviométrico (FIGURA 9).

Em geral a nebulosidade durante o período chuvoso em baixas latitudes e a presença de aerossóis afetam a transmissividade da atmosfera, o que diminui a quantidade de radiação solar que incide sobre a superfície (MESQUITA *et al.*, 2013; PALÁCIOS *et al.*, 2018). Por outro lado, a densidade de aerossóis na atmosfera reduz drasticamente no início do período chuvoso em decorrência das primeiras chuvas e o

aumento da umidade relativa do ar (SANTOS *et al.*, 2016). Dessa forma, os maiores valores de radiação solar observados na transição entre o período seco e chuvoso são causados pelo efeito combinado do fator astronômico, observado pela declinação solar negativa, e as primeiras ocorrências de chuva na área de estudo, as quais reduzem a densidade de micropartículas suspensas na atmosfera (ESCOBEDO *et al.*, 2009; MACHADO *et al.*, 2016; QUERINO *et al.*, 2017).

Na metade do período seco o ângulo zenital atinge seu menor valor, em função da alta declinação solar e da latitude negativa, enquanto na metade do período chuvoso o ângulo zenital é máximo, modulando o fluxo da  $R_g$ , com maiores valores no período chuvoso e menores no período seco (PAVÃO *et al.*, 2018). Além disso, na região da área de estudo, os eventos de precipitação ocorrem, em sua maioria, no período da tarde, de modo que o acesso da radiação solar na superfície no horário da passagem do MODIS/Terra (09h36min) ocorre sem influência da nebulosidade (QUERINO *et al.*, 2017).

A média anual do  $\alpha$  medido foi  $0,19 \pm 0,00$ , com mínima obtida em julho ( $0,17 \pm 0,00$ ) e máxima em novembro ( $0,22 \pm 0,00$ ) (FIGURA 8). O  $\alpha$  teve correlação altamente significativa com a PPT, com média e amplitude no período seco 7,0% e 54,0% menores que no período chuvoso, respectivamente (FIGURA 9; TABELA 7). O  $\alpha$  começou a aumentar aproximadamente nos dois primeiros meses do período seco, enquanto a sua redução teve início nos primeiros dois meses do período chuvoso, indicando uma defasagem da sazonalidade do  $\alpha$  em relação à PPT.

A variação da cobertura da vegetação, devido aos déficits hídricos no pantanal, causados pela sazonalidade da precipitação, modifica as propriedades espectrais da superfície e a capacidade da captura da radiação solar (FAUSTO *et al.*, 2016; IVORY *et al.*, 2019). A baixa cobertura da vegetação aumenta a exposição do solo à radiação solar, em que o albedo é maior que na vegetação (MARTINS *et al.*, 2015). Dessa forma, a disponibilidade hídrica na superfície afeta a dinâmica da vegetação, e consequentemente, altera o albedo (SALLO *et al.*, 2014).

A  $R_{ld}$  medida teve média anual de  $418,9 \text{ W m}^{-2} \pm 1,6 \text{ W m}^{-2}$ , com valor mínimo em julho ( $393,6 \text{ W m}^{-2} \pm 6,8 \text{ W m}^{-2}$ ) e máximo em novembro ( $437,9 \text{ W m}^{-2} \pm 5,4 \text{ W m}^{-2}$ ) (FIGURA 8). A correlação com a PPT foi significativa (FIGURA 9), com média

e a amplitude da Rld medida no período seco 5,0% menor e 58,0% maior que no período chuvoso, respectivamente (FIGURA 9; TABELA 7).

A elevada interação do vapor de água com a radiação de onda longa e as propriedades termodinâmicas da atmosfera fazem da umidade relativa do ar e da temperatura do ar fatores importantes na determinação da emissividade da atmosfera (RANDOW & ALVALÁ, 2006). O aumento da Tar somado as condições de elevada UR no período chuvoso aumentam a taxa de emissão de radiação de onda longa pela atmosfera (FIGURA 8). Além disso, a condição de estabilidade atmosférica durante o período chuvoso em regiões tropicais, provoca os eventos de chuvas convectivas de elevada intensidade e baixa duração, o que provoca maior variabilidade da Rld (ARAUJO *et al.*, 2019).

A média anual do Rn medido foi  $507,2 \text{ W m}^{-2} \pm 12,7 \text{ W m}^{-2}$ , com valor mínimo em julho ( $353,3 \text{ W m}^{-2} \pm 49,7 \text{ W m}^{-2}$ ) e máximo em novembro ( $527,1 \text{ W m}^{-2} \pm 63,8 \text{ W m}^{-2}$ ) (FIGURA 8). A média e a amplitude do Rn medido no período seco foram 27,0% e 30,0% menor que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7). O Rn24h medido teve média anual de  $155,9 \text{ W m}^{-2} \pm 3,1 \text{ W m}^{-2}$ , com valor mínimo em julho ( $108,9 \text{ W m}^{-2} \pm 13,6 \text{ W m}^{-2}$ ) e máximo em janeiro ( $169,8 \text{ W m}^{-2} \pm 17,5 \text{ W m}^{-2}$ ). A média e a amplitude no período seco foram 22,0% e 34,0% menores que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7).

A correlação do Rn e Rn24h com a PPT, Rg, Rg24h,  $\alpha$  e Rld foi altamente significativa, indicando a dependência direta do saldo de radiação aos fatores disponibilidade hídrica, radiação solar e de onda longa da atmosfera e com a cobertura da superfície (FIGURA 9). Apesar de se observar um padrão entre as média mensais do NDVI e o saldo de radiação (Rn e Rn24h) (FIGURA 8), a correlação entre esses parâmetros não foi significativa (valor-p > 0,05), portanto, nada pode-se afirmar (FIGURA 9).

Em geral, áreas com vegetação de elevada estatura tem maior capacidade de captura de radiação, devido às múltiplas reflexões realizadas no interior dos dosséis das plantas (QUERINO *et al.*, 2017). Observa-se nesses locais os menores valores de albedo da superfície (BIUDES *et al.*, 2014). Áreas de vegetação rasteira, por sua vez, possuem maior capacidade de reflexão da radiação solar, observado no albedo da superfície, o que causa balanço de onda curta menor (FAUSTO *et al.*, 2016).

Além disso, a baixa umidade do solo reduz os processos de evapotranspiração na superfície e aumenta a temperatura da superfície, o que eleva a taxa de emissão de radiação de onda longa pela superfície (SALLO *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2015; BIUDES *et al.*, 2015). Além disso, a redução da cobertura vegetal, devido a baixa umidade do solo durante o período seco, aumenta o  $\alpha$  e, consequentemente, reduz o balanço de onda curta (FAUSTO *et al.*, 2014). Dessa forma, não só a quantidade de radiação solar incidente e refletida pela superfície modifica o a energia disponível na superfície, mas também as características termodinâmicas superfície afetam os valores do saldo de radiação (ANGELINI *et al.*, 2017).

A Tar anual medida foi  $27,7^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , com mínima em julho ( $24,0^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ ) e máxima em setembro ( $29,3^{\circ}\text{C} \pm 1,4^{\circ}\text{C}$ ) (FIGURA 8). A média e a amplitude da Tar medida no período seco foram 7,0% menor e 55,0% maior que no período chuvoso, respectivamente (TABELA 7). A UR anual medida foi  $74,4\% \pm 0,5\%$ , com valor mínimo em agosto ( $45,4\% \pm 4,3\%$ ) e máximo em fevereiro ( $73,7\% \pm 3,0\%$ ). A média e a amplitude da UR medida no período seco foram 4,0% menor e 16,0% maior que no período chuvoso, respectivamente (FIGURA 8). A correlação da Tar com a radiação solar ( $R_g$  e  $R_{g24h}$ ) e a Rld foi altamente significativa (FIGURA 9), corroborando com tendências sazonais em áreas nativas tropicais na bacia Amazônica (BIUDES *et al.*, 2015), no Cerrado (FAUSTO *et al.*, 2014; ANGELINI *et al.*, 2017), e no Pantanal (MACHADO *et al.*, 2016). A UR teve correlação negativa com a radiação solar ( $R_g$  e  $R_{g24h}$ ), mas com a Rld não foi significativa, de modo que nada pode -se afirmar a respeito da última (FIGURA 9).

A radiação solar afeta diretamente os fenômenos climáticos de grande escala, devido a sazonalidade da declinação solar, modulando a oferta energética nas diferentes latitudes, gerando gradientes horizontais de temperatura e pressão (QUERINO *et al.*, 2017). Fenômenos de grande escala como a ZCAS a “Alta da Bolívia” e as ondas de frio no hemisfério sul são afetados diretamente pela distribuição da radiação solar e, por sua vez, condicionam variáveis meteorológicas como a Tar e UR (MACHADO *et al.*, 2016).

Por outro lado, a quantidade de radiação emitida pela atmosfera é afetada pela Tar e pela UR, na forma da equação de Stefan-Boltzmann (CURADO *et al.*, 2011; ANGELINI *et al.*, 2017). Dessa maneira, a interação dos constituintes da atmosfera

com a radiação solar, pode ter causado o aumento da temperatura do ar e, consequentemente, a emissão de Rld em direção à superfície (AGUIAR *et al.*, 2011; LOPES JUNIOR *et al.*, 2019).

#### 4.2 Dados meteorológicos de reanálise

A média anual da Rg por reanálise foi 10,2% maior que a Rg medida, com médias no período seco e chuvoso 15,0% e 7,0% maiores, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais da Rg por reanálise tiveram desvio médio de 4,9%, em relação a Rg medida, com desvios máximo em março (14,3%) e mínimo em setembro (4,4%) (FIGURA 10). O percentual da Rg por reanálise que satisfizeram os limites de concordância, a partir da estatística de Bland-Altman foi 94,4%, com desvio médio -  $56,0 \text{ W m}^{-2} \pm 8,1 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 11). As estimativas da Rg por reanálise apresentaram melhor desempenho para valores de Rg acima de  $750,0 \text{ W m}^{-2}$ , em que todas as estimativas satisfazem os limites de concordância (FIGURA 11).

A média anual da Rg24h por reanálise foi 9,6% maior que a Rg24h medida, com médias no período seco e chuvoso 8,8% e 8,2% maiores, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais da Rg24h por reanálise tiveram desvio médio de 8,3%, em relação a Rg24h medida, com desvios máximo em setembro (15,1%) e mínimo em outubro (3,3%) (FIGURA 10). O percentual dos valores da Rg24h por reanálise que satisfizeram os limites de concordância foi 87,8%, com desvio médio -  $17,0 \text{ W m}^{-2} \pm 2,1 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 11).

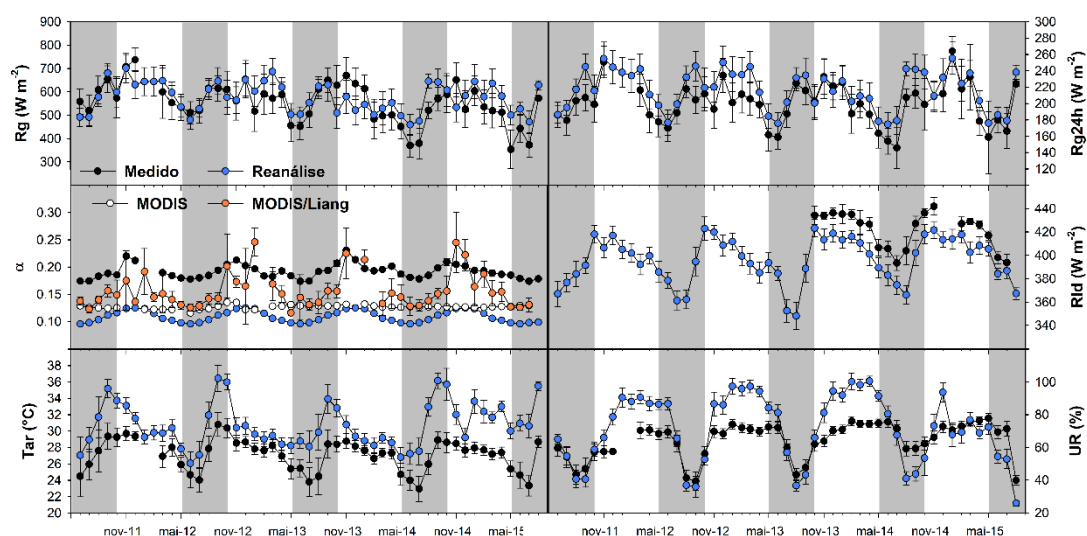
**TABELA 8** - Média ( $\pm$  IC) das variáveis meteorológicas (Rg, Rg24h, Rld, Tar e UR) e albedo da superfície ( $\alpha$ ) medidos e de reanálise e os respectivos erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r) em relação aos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

| Anual    |                  |                 |       |       |       |      |      |
|----------|------------------|-----------------|-------|-------|-------|------|------|
|          | Medido           | Reanálise       | MAE   | RMSE  | PBIAS | d    | r    |
| Rg       | 553,8 $\pm$ 12,6 | 610,2 $\pm$ 9,6 | 127,8 | 161,0 | 9,3   | 0,78 | 0,64 |
| Rg24h    | 197,8 $\pm$ 3,7  | 217,0 $\pm$ 3,1 | 31,0  | 39,7  | 8,7   | 0,86 | 0,79 |
| $\alpha$ | 0,19 $\pm$ 0,00  | 0,11 $\pm$ 0,00 | 0,08  | 0,08  | -43,5 | 0,23 | 0,77 |
| Rld      | 422,4 $\pm$ 2,5  | 395,9 $\pm$ 1,8 | 23,4  | 29,1  | -4,7  | 0,70 | 0,58 |
| Tar      | 27,0 $\pm$ 0,2   | 30,2 $\pm$ 0,2  | 3,4   | 4,2   | 11,6  | 0,76 | 0,71 |
| UR       | 65,3 $\pm$ 0,9   | 75,5 $\pm$ 1,6  | 16,2  | 19,7  | 15,5  | 0,76 | 0,73 |

| Período seco    |              |              |       |       |       |      |      |
|-----------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|------|------|
| Rg              | 519,2 ± 14,5 | 598,7 ± 10,6 | 108,9 | 143,3 | 15,6  | 0,80 | 0,71 |
| Rg24h           | 188,5 ± 4,2  | 205,1 ± 3,7  | 25,5  | 35,3  | 10,4  | 0,87 | 0,86 |
| $\alpha$        | 0,18 ± 0,00  | 0,10 ± 0,00  | 0,08  | 0,08  | -44,8 | 0,15 | 0,62 |
| Rld             | 406,3 ± 2,9  | 380,1 ± 2,1  | 20,3  | 25,6  | -4,5  | 0,70 | 0,68 |
| Tar             | 25,9 ± 0,3   | 30,3 ± 0,3   | 4,4   | 5,0   | 16,7  | 0,79 | 0,83 |
| UR              | 59,9 ± 1,3   | 59,0 ± 1,9   | 11,2  | 14,1  | -1,5  | 0,87 | 0,80 |
| Período Chuvoso |              |              |       |       |       |      |      |
| Rg              | 584,4 ± 15,3 | 625 ± 12,1   | 140,3 | 174,4 | 5,6   | 0,76 | 0,60 |
| Rg24h           | 209,4 ± 4,5  | 226,5 ± 3,9  | 35,6  | 44,2  | 6,8   | 0,84 | 0,74 |
| $\alpha$        | 0,20 ± 0,00  | 0,12 ± 0,00  | 0,08  | 0,08  | -42,0 | 0,22 | 0,53 |
| Rld             | 431,6 ± 1,4  | 409,8 ± 1,5  | 23,2  | 29,4  | -4,4  | 0,39 | 0,20 |
| Tar             | 28,1 ± 0,1   | 30,9 ± 0,2   | 3,3   | 4,1   | 10,1  | 0,61 | 0,57 |
| UR              | 68,6 ± 0,8   | 82,3 ± 1,5   | 18,0  | 21,5  | 19,9  | 0,59 | 0,59 |

As estimativas por reanálise do GLDAS possuem resolução espacial (footprint) de 0,25° (aproximadamente 771,7 km<sup>2</sup>) (TABELA 5), enquanto as medidas de superfície foram realizadas de forma pontual, gerando erros nas estimativas, uma vez que a área correspondente ao “footprint” das estimativas por reanálise é heterogênea (RODELL *et al.*, 2004). Em estudo do balanço de radiação na floresta amazônica com dados de radiação solar global do GLDAS, foi identificado o desvio percentual entre 10,0% e 11,0% da radiação solar global (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Estimativas da radiação solar global realizadas pelo GLDAS para a China de 2008 a 2014 tiveram desvio percentual de 15,0% em relação aos medidos (YANG *et al.*, 2017).

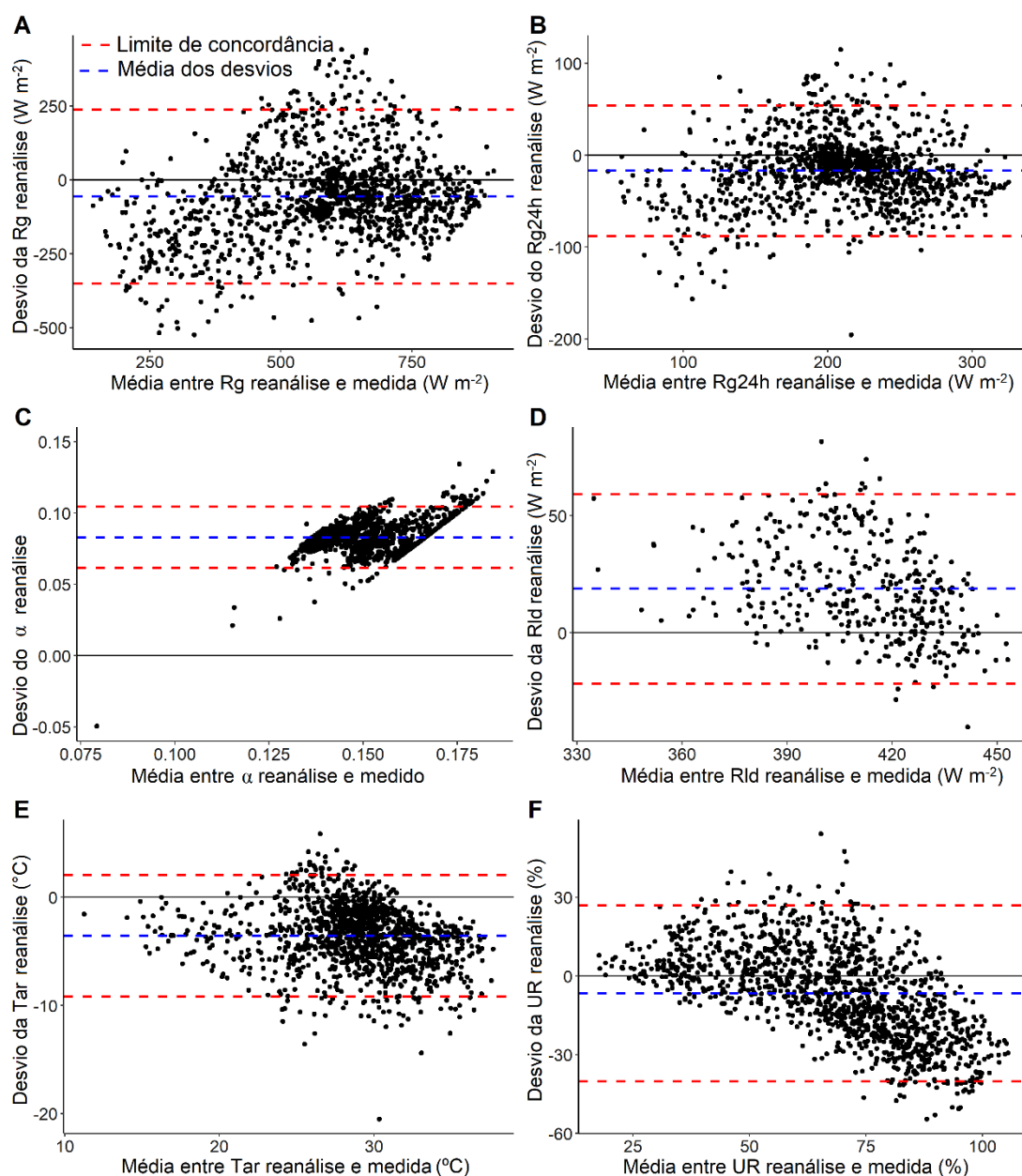
Além disso, a frequente condição de alta nebulosidade da atmosfera no período chuvoso pode favorecer o aumento dos desvios de Rg por reanálise em relação ao Rg medido Rg, caracterizadas pelo curto intervalo de tempo entre o início do desenvolvimento, com transporte vertical turbulento de umidade, e o desenvolvimento de precipitação convectiva, com duração menor que 6 horas (QUERINO *et al.*, 2017).



**FIGURA 10** – Médias mensais ( $\pm$  IC) dos dados medidos, de reanálise e produtos MODIS, das variáveis de entrada do modelo de estimativa do Rn, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco), às 09h36min .

A média anual do  $\alpha$  por reanálise foi 43,2% menor que o  $\alpha$  medido, com médias no período seco e chuvoso 44,8% e 41,8% menores, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais do  $\alpha$  por reanálise tiveram desvio médio de -43,0%, em relação ao medido, com desvios máximo em maio (-46,8%) e mínimo em janeiro (-37,0%) (FIGURA 10). O percentual do  $\alpha$  reanálise que satisfizeram o limite de concordância foi 96,0%, com desvio médio  $0,08 \pm 0,00$  (FIGURA 11).

A média anual da Rld por reanálise teve um desvio negativo de 6,3% em relação ao medido, com médias no período seco e chuvoso 6,5% e 5,0% menores, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais da Rld por reanálise tiveram desvio médio de -5,9%, em relação ao medido, com desvio percentual máximo em agosto (-9,5%) e mínimo em outubro (-3,4%) (FIGURA 10). O percentual dos valores de Rld reanálise que satisfizeram o limite de concordância foi 98,2%, com desvio médio  $18,7 \text{ W m}^{-2} \pm 2,0 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 11).



**FIGURA 11** - Análise de concordância por método de Bland-Altman da radiação solar global (Rg), radiação solar global diária (Rg24h), albedo da superfície temperatura do ar (Tar) por reanálise em função dos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

A Tar por reanálise teve média anual 11,7% maior que a Tar medida, com médias nos períodos seco e chuvoso 16,8% e 10,1% maiores, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais da Tar por reanálise tiveram desvio médio de 13,0%, em relação ao medido, com desvios máximo em setembro (20,6%) e mínimo em dezembro (6,1%) (FIGURA 10). A estatística de Bland-Altman indicou 95,0% das

estimativas dentro dos limites de concordância, com desvio médio  $-3,6^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  (FIGURA 11).

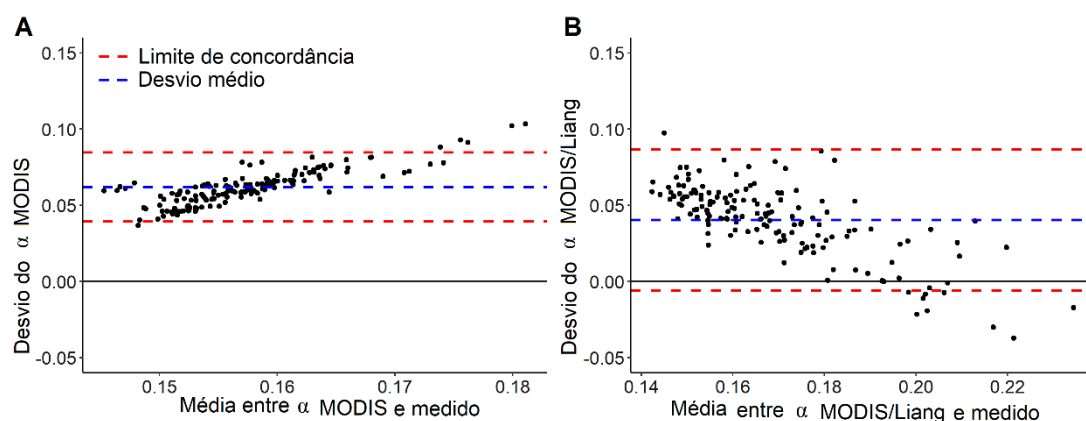
A média anual da UR por reanálise foi 15,5% maior que a UR medida, com médias nos períodos seco e chuvoso 1,5% menor e 19,9% maior, respectivamente (TABELA 8). As médias mensais da Tar por reanálise tiveram desvio médio de 9,3%, em relação ao medido, com desvios máximo em dezembro (31,3%) e mínimo em outubro (-2,8%) (FIGURA 10). O percentual dos valores da UR reanálise que satisfizeram o limite de concordância foi 99,0%, com desvio médio  $-6,7\% \pm 0,9\%$ . Os resultados da estatística de Bland-Altman indicaram um melhor desempenho para estimativas de UR abaixo de 30,0% e Tar abaixo de  $22,0^{\circ}\text{C}$ .

Os resultados obtido na análise estatística dos parâmetros de entrada do modelo do Rn, obtidos por reanálise (TABELA 8), compatíveis com estudos realizados na bacia amazônica (OLIVEIRA *et al.*, 2016), no estado de São Paulo (RAMPAZO *et al.*, 2019), na China (YANG *et al.*, 2017; QI *et al.*, 2015) e em 33 e 24 estações micrometeorológicas distribuídas no globo (BISHT *et al.*, 2005; DECKER *et al.*, 2012).

### 4.3 Albedo da superfície MODIS

A média anual do  $\alpha$  estimado pelo produto MCD43A foi 43,2% menor que o  $\alpha$  medido, com médias no período seco e chuvoso 31,0% e 36,5% menores, respectivamente (TABELA 9). As médias mensais do  $\alpha$  MCD43A tiveram desvio médio de -33,2%, em relação ao medido, com desvios máximo em novembro (-39,3%) e mínimo em julho (-28,2%) (FIGURA 10). O percentual do  $\alpha$  MCD43A que satisfizeram o limite de concordância foi 95,5%, com desvio médio  $0,06 \pm 0,00$  (FIGURA 12).

A média anual do  $\alpha$  estimado segundo Liang (2000) usando o produto MOD09A1 foi 34,6% menor que o  $\alpha$  medido, com médias no período seco e chuvoso 26,6% e 17,0% menores, respectivamente (TABELA 9). As médias mensais do  $\alpha$  MCD43A tiveram desvio médio -14,6%, em relação ao medido, com desvios máximo em fevereiro (92,0%) e mínimo em novembro (-5,5%) (FIGURA 10). O percentual das estimativas do  $\alpha$  MCD43A que satisfizeram o limite de concordância foi 92,9%, com desvio médio  $0,04 \pm 0,00$  (FIGURA 12).



**FIGURA 12** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do albedo da superfície ( $\alpha$ ) do produto MCD43A e do modelo de Liang (2000), usando o produto MOD09A1, em função dos valores medidos, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal de 2011 a 2015, às 09h36min.

As estimativas do  $\alpha$  por meio dos produtos MCD43A e MOD09A1 (TABELA 9) apresentaram valores característicos para áreas de Cerrado nativo (FAUSTO *et al.*, 2016) e Pantanal (QUERINO *et al.*, 2017). No entanto as estimativas por reanálise do  $\alpha$  tiveram valores identificados em estudos na região em áreas de pastagem (FAUSTO *et al.*, 2014), enquanto  $\alpha$  medido corroborou com valores obtidos para a mesma área (TABELA 8) (PAVÃO *et al.*, 2018). Os valores próximos entre o  $\alpha$  de reanálise e do produto MCD43A vem do fato de o modelo de superfície Noah (GLDAS 2) assimila os dados MODIS em sua estrutura de processamento (RODELL *et al.*, 2004).

**TABELA 9** - Média ( $\pm$  IC) do albedo da superfície ( $\alpha$ ) estimado pelos produtos MCD43A (MODIS) e pelo modelo Liang (2000), usando o MOD43A (MODIS/Liang), e a análise de erro e correlação em função do  $\alpha$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

| Anual           |                 |      |      |       |      |       |
|-----------------|-----------------|------|------|-------|------|-------|
| $\alpha$        | Média $\pm$ IC  | MAE  | RMSE | PBIAS | d    | r     |
| MODIS           | 0,11 $\pm$ 0,00 | 0,06 | 0,07 | -33,7 | 0,23 | 0,26  |
| MODIS/Liang     | 0,13 $\pm$ 0,00 | 0,06 | 0,07 | -33,7 | 0,23 | 0,26  |
| Período seco    |                 |      |      |       |      |       |
| MODIS           | 0,13 $\pm$ 0,00 | 0,06 | 0,06 | -30,5 | 0,17 | -0,11 |
| MODIS/Liang     | 0,13 $\pm$ 0,00 | 0,05 | 0,05 | -26,1 | 0,21 | 0,49  |
| Período Chuvoso |                 |      |      |       |      |       |
| MODIS           | 0,13 $\pm$ 0,00 | 0,07 | 0,07 | -35,4 | 0,20 | 0,42  |
| MODIS/Liang     | 0,17 $\pm$ 0,01 | 0,04 | 0,04 | -16,2 | 0,34 | 0,33  |

#### 4.4 Estimativas do saldo de radiação

As estimativas do  $Rn_{1,1}$  e  $Rn_{1,2}$  tiveram média anual 15,6% e 24,5% menores que o  $Rn$  medido, com médias no período seco 17,7% e 25,2% menores e no período chuvoso 8,9% e 18,0% menores, respectivamente (FIGURA 14; TABELA 10). As médias mensais do  $Rn_{1,1}$  e  $Rn_{1,2}$  tiveram desvios médios de 1,5% e -13,2%, em relação ao medido, com desvios máximos em maio (9,4%) e em agosto (-26,3%), e mínimos em abril (-2,3%) e em março (-2,1%), respectivamente (

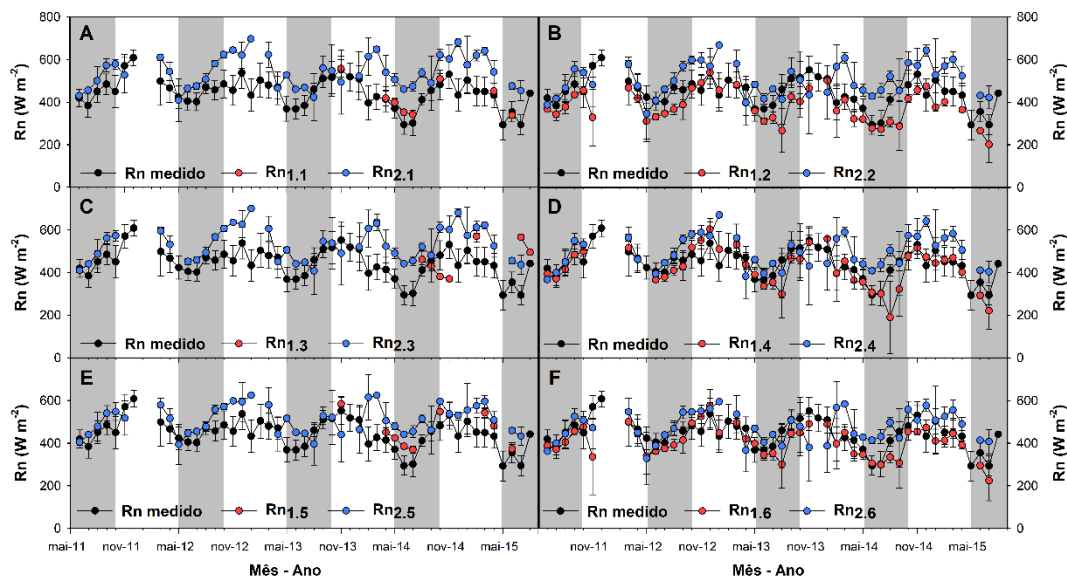
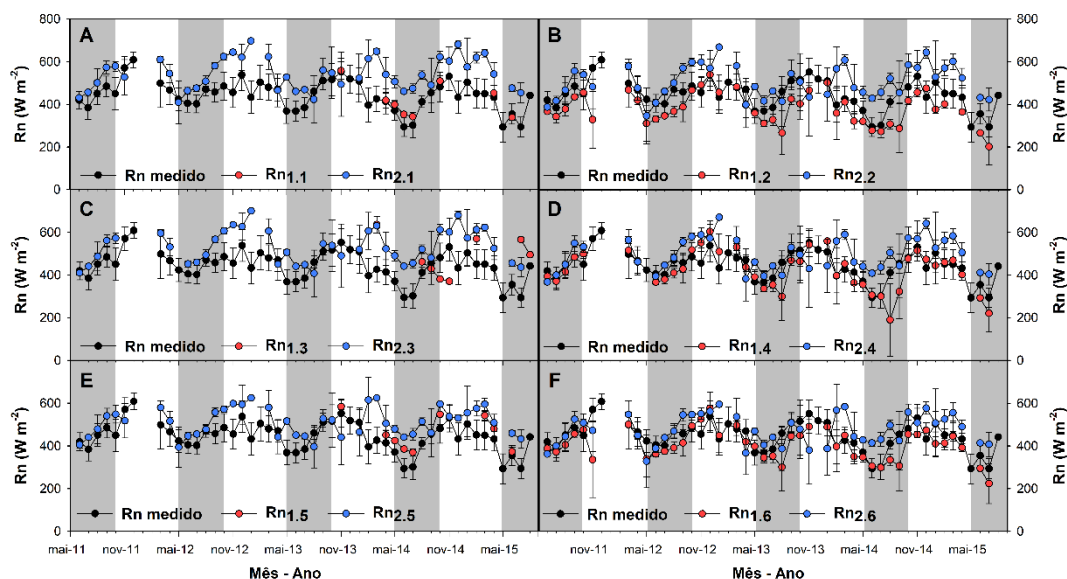


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 96,5% das estimativas do  $Rn_{1,1}$  e  $Rn_{1,2}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $81,8 \text{ W m}^{-2} \pm 9,1 \text{ W m}^{-2}$  e  $155,6 \text{ W m}^{-2} \pm 5,6 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 15).



**FIGURA 13** - Médias mensais do saldo de radiação (Rn) medido e estimado, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco), às 09h36min.

O  $Rn_{2,1}$  e  $Rn_{2,2}$  tiveram média anual 6,7% e 4,8% maiores que o Rn medido, com médias no período seco 10,3% e 4,2% maiores e no período chuvoso 12,7% e 4,9% maiores, respectivamente (FIGURA 14; TABELA 10). As médias mensais do  $Rn_{2,1}$  e  $Rn_{2,2}$  tiveram desvios médios de 23,6% e 13,8%, em relação ao medido, com desvios máximos em fevereiro (37,0%) e em janeiro (38,7%), e mínimos em novembro (7,6% e 2,4%), respectivamente (

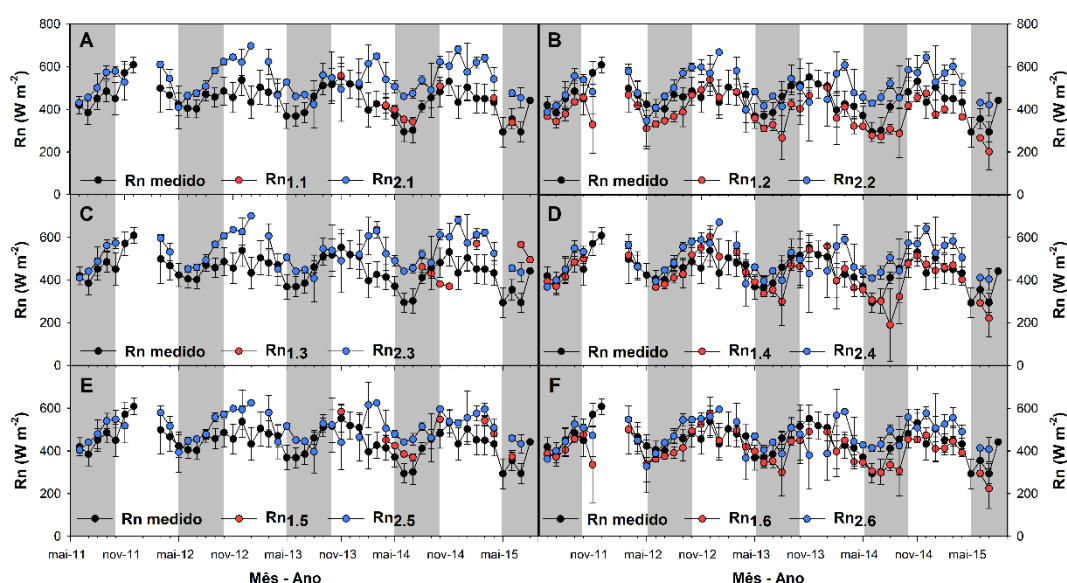
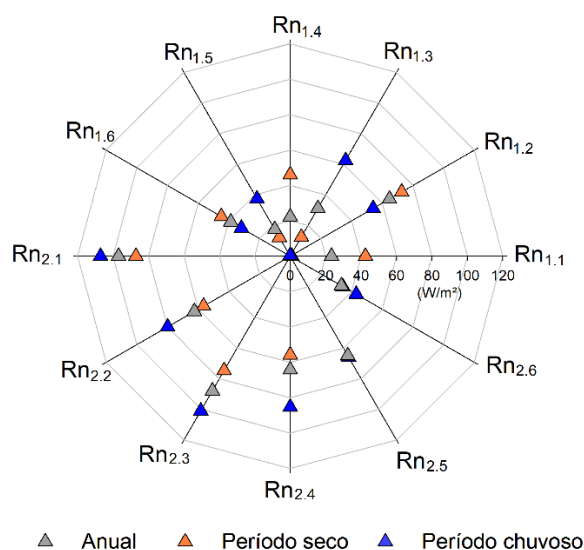


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 92,5% e 91,8% das estimativas do  $Rn_{2,1}$  e  $Rn_{2,2}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios -  $7,8 \text{ W m}^{-2} \pm 15,1 \text{ W m}^{-2}$  e  $26,1 \text{ W m}^{-2} \pm 16,7 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 15). O  $Rn_{2,1}$  e  $Rn_{2,2}$ , estimados por dados de reanálise, tiveram desvio médio menor que o  $Rn_{1,1}$  e  $Rn_{1,2}$ , apesar da distribuição dos desvios do  $Rn_{2,1}$  e  $Rn_{2,2}$  ter sido maior (FIGURA 15).



**FIGURA 14** - Desvio absoluto das médias sazonais e anuais das estimativas do saldo de radiação (Rn), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015.

Em geral, a Tar é apontada como o principal fator que afeta a estimativa da Rld e, conseqüentemente, o Rn (RANDOW & ALVALÁ, 2006). No período chuvoso houveram menores desvios, causados principalmente pela diminuição da amplitude térmica em função da precipitação (RANDOW & ALVALÁ, 2006; AGUIAR *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2018). Além disso, o produto MOD11A2 e os dados de reanálise possuem resolução espacial de 1,0 km e 27,78 km, enquanto a estação meteorológica realiza medidas pontuais (RODELL *et al.*, 2004).

Dessa forma, há uma redução do desempenho das estimativas do Rn<sub>1.1</sub>, Rn<sub>1.2</sub>, Rn<sub>2.1</sub> e Rn<sub>2.2</sub>, decorrente principalmente da diferença na resolução espacial da Ts (MOD11A2). Por outro lado, a resolução espacial da Rg,  $\alpha$  e Tar, por reanálise, afetam as estimativas do Rn<sub>2.1</sub> e Rn<sub>2.2</sub>, enquanto a sazonalidade da Tar medida diminuiu a qualidade das estimativas do Rn<sub>1.2</sub> (FIGURA 9; FIGURA 14).

O Rn<sub>1.3</sub> e Rn<sub>1.4</sub> tiveram média anual 6,7% e 15,6% menores que o Rn medido, com médias no período seco 18,8% e 15,6% menores e no período chuvoso 7,7% e 3,4% menores, respectivamente (FIGURA 14; TABELA 10). As médias mensais do Rn<sub>1.3</sub> e Rn<sub>1.4</sub> tiveram desvios médios de 13,3% e -3,8%, em relação ao Rn medido, com desvios máximos em março (22,1%) e em agosto (-26,4%), e mínimos em junho

(2,0%) e em outubro (1,3%), respectivamente (

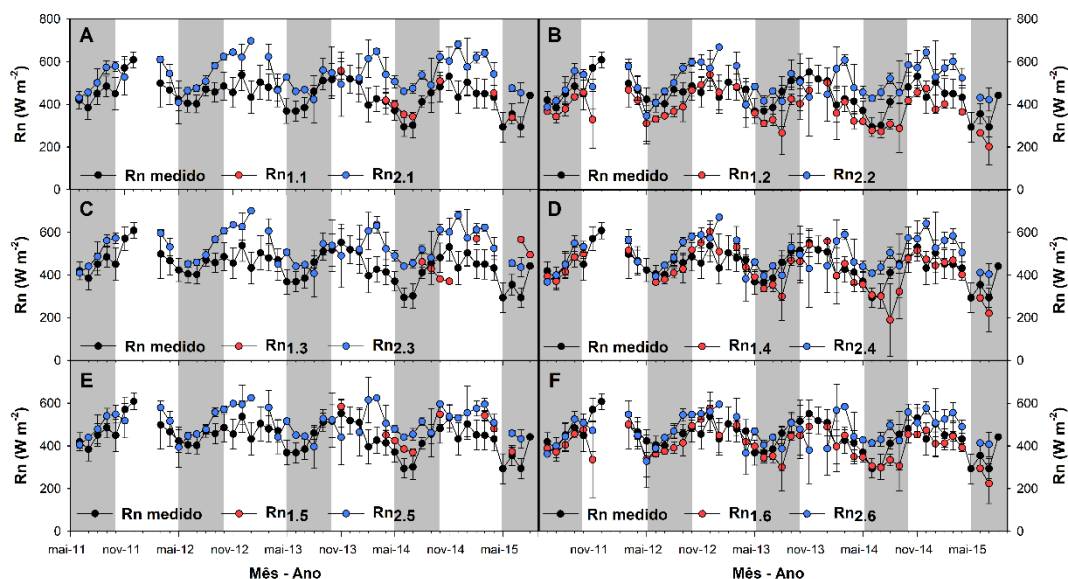


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 94,1% e 95,7% das estimativas do  $Rn_{1,3}$  e  $Rn_{1,4}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $39,4 \text{ W m}^{-2} \pm 4,3 \text{ W m}^{-2}$  e  $114,1 \text{ W m}^{-2} \pm 4,4 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 15), respectivamente.

As estimativas do  $Rn_{2,3}$  e  $Rn_{2,4}$  tiveram média anual 4,8% maior e 1,8% maior que o  $Rn$  medido, com médias no período seco 7,1% e 1,3% maiores e no período chuvoso 11,6% e 3,6% maiores, respectivamente (FIGURA 14;TABELA 10). As médias mensais do  $Rn_{2,3}$  e  $Rn_{2,4}$  tiveram desvios médios de 21,9% e 14,6%, em relação ao  $Rn$  medido, com desvios máximos em abril (36,9%) e em janeiro (39,3%), e mínimos em agosto (6,7%) e em junho (3,5%), respectivamente (

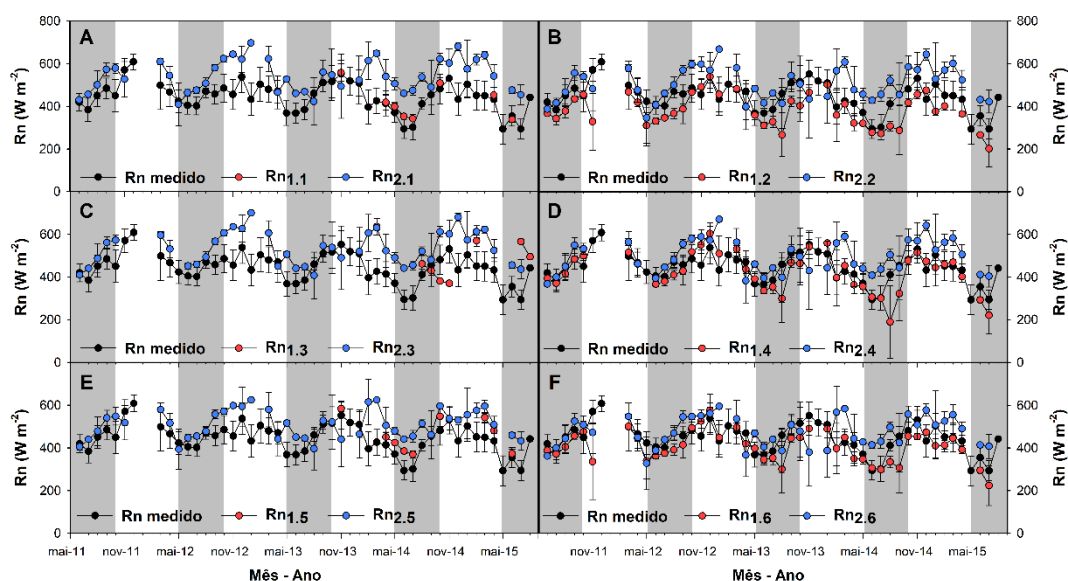
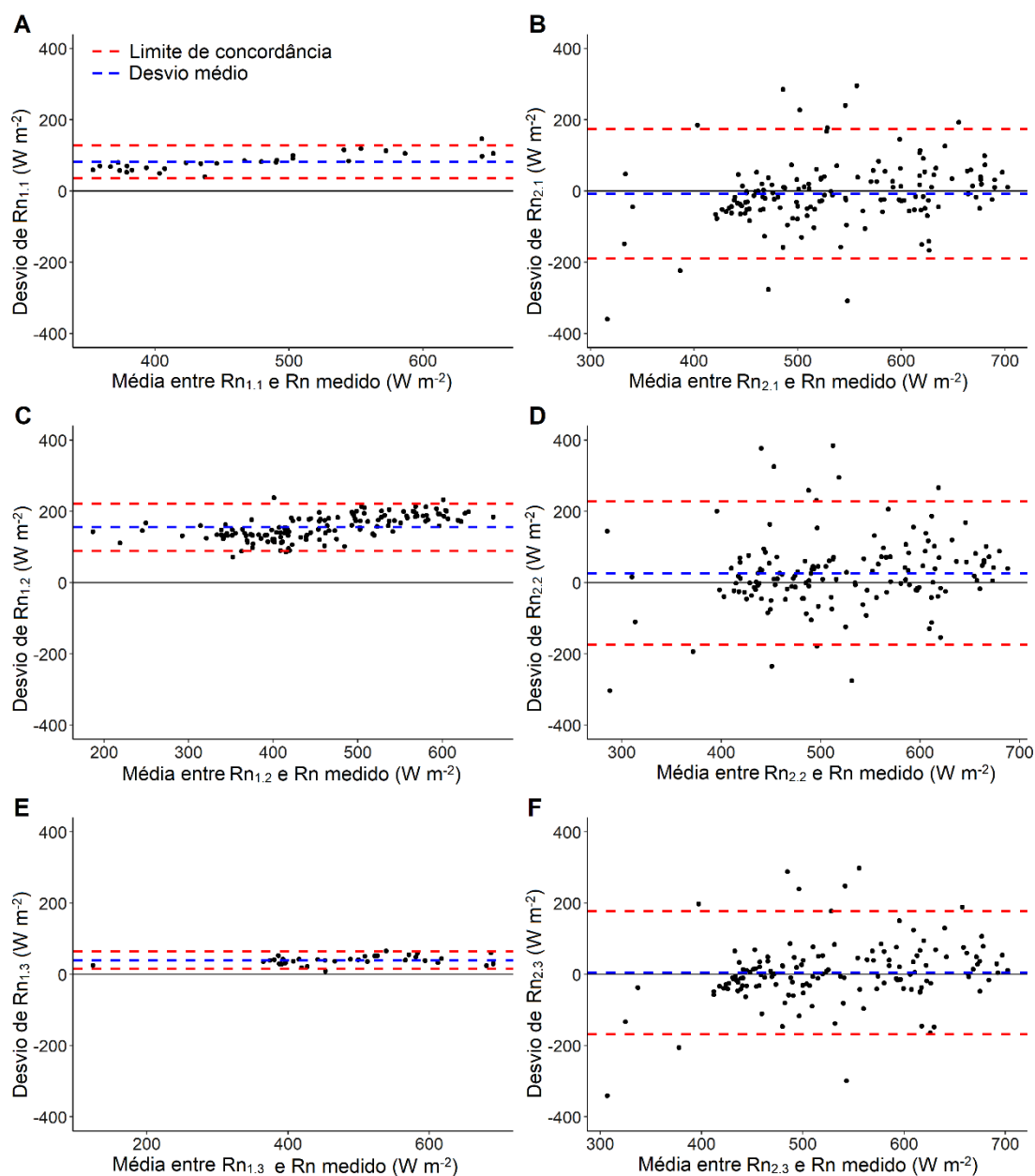


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 92,9% das estimativas do  $Rn_{2,3}$  e  $Rn_{2,4}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $4,1 \text{ W m}^{-2} \pm 14,7 \text{ W m}^{-2}$  e  $37,3 \text{ W m}^{-2} \pm 16,4 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 15), respectivamente.



**FIGURA 15** – Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação ( $Rn$ ) estimado, em função do  $Rn$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

O  $Rn_{1,5}$  e  $Rn_{1,6}$  tiveram média anual 10,0% e 19,3% menores que o  $Rn$  medido, com médias no período seco 15,6% e 20,0% menores e no período chuvoso 3,4% e 14,0% menores, respectivamente (FIGURA 14; TABELA 10). As médias mensais do  $Rn_{1,5}$  e  $Rn_{1,6}$  tiveram desvios médios de -3,8% e 10,0%, em relação ao  $Rn$  medido,

com desvios máximos em março (17,0%) e em agosto (-19,9%), e mínimos em junho (2,9%) e em dezembro (0,1%), respectivamente (

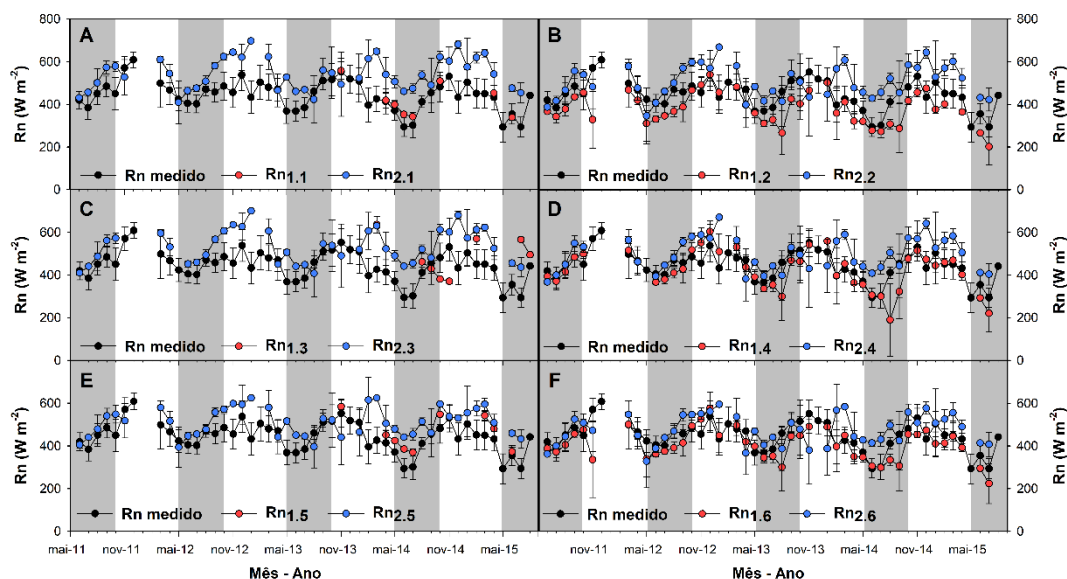


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 97,1% e 95,3% das estimativas do  $Rn_{1.5}$  e  $Rn_{1.6}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $55,3 \text{ W m}^{-2} \pm 9,5 \text{ W m}^{-2}$  e  $131,2 \text{ W m}^{-2} \pm 6,3 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 16), respectivamente.

As estimativas do  $Rn_{2.5}$  e  $Rn_{2.6}$  tiveram média anual 0,7% maior e 6,0% menor que o  $Rn$  medido, com médias no período seco 5,2% maior e 0,8% menor e no período chuvoso 5,2% maior e 2,8% menor, respectivamente (FIGURA 14; TABELA 10). As médias mensais do  $Rn_{2.5}$  e  $Rn_{2.6}$  tiveram desvios médios de 16,1% e 7,1%, em relação ao  $Rn$  medido, com desvios máximos em fevereiro (32,1%) e em janeiro (23,6%), e mínimos em novembro (-0,7%) e em abril (0,9%), respectivamente (

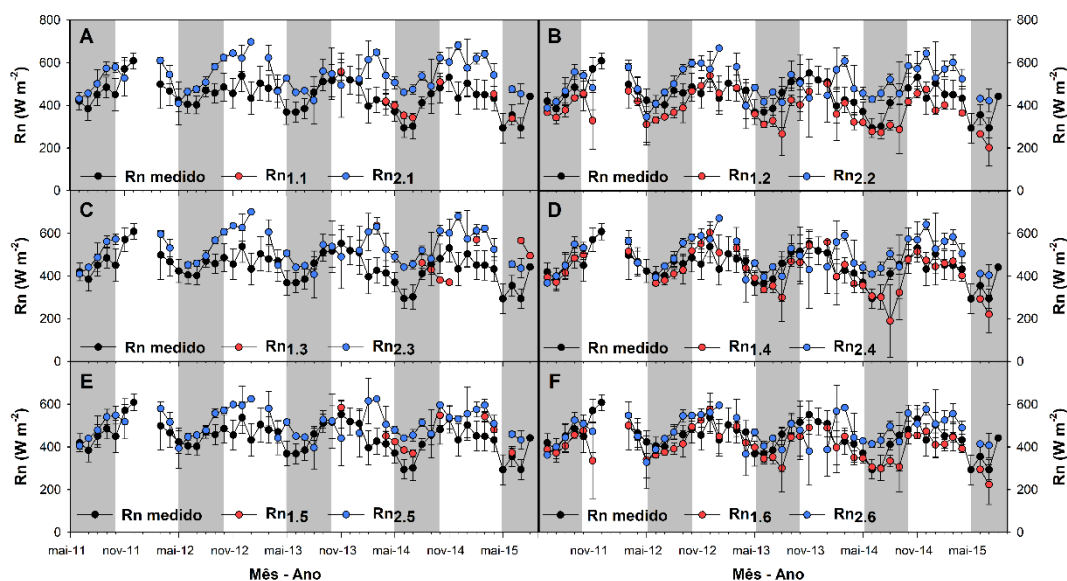
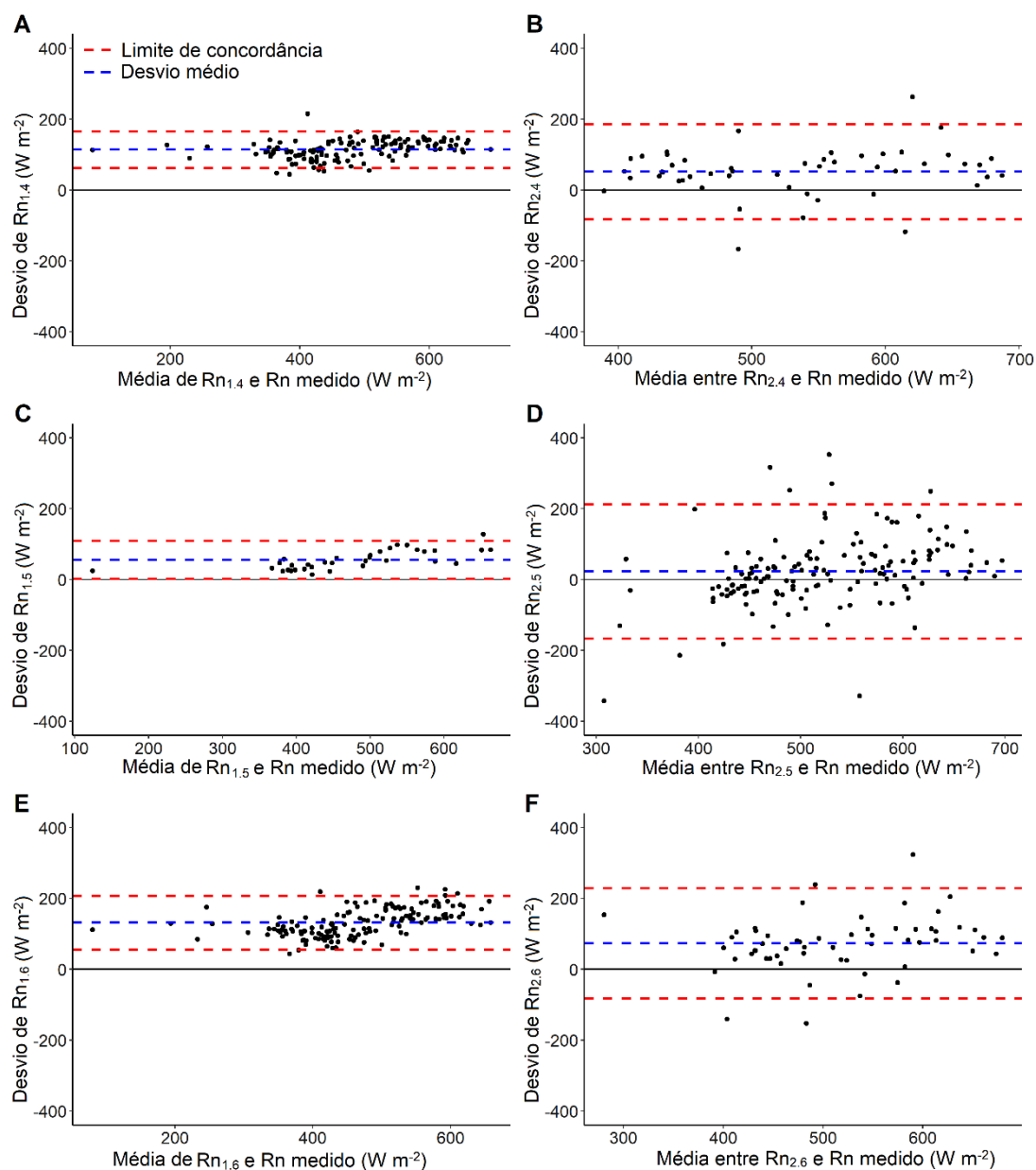


FIGURA 13). A estatística de Bland-Altman indicou 93,9% e 93,2% das estimativas do  $Rn_{2.5}$  e  $Rn_{2.6}$  dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $22,8 \text{ W m}^{-2} \pm 15,8 \text{ W m}^{-2}$  e  $56,8 \text{ W m}^{-2} \pm 17,3 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 16), respectivamente.



**FIGURA 16** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação ( $Rn$ ) estimado, em função do  $Rn$  medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

As estimativas do  $Rn$  usando os produtos MOD09A1, MOD11A2 e MCD43A tiveram os menores PBIAS em relação as estimativas com  $\alpha$  medido, com valores entre -25,0% e -0,8%, enquanto nas demais estimativas o os valores do PBIAS esteve entre

1,5% e 30,0% (TABELA 10). O MAE nas estimativas do  $R_n$ , usando dados MODIS, teve valores entre  $40,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $130,0 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto para as demais estimativas o MAE esteve entre  $64,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $155,6 \text{ W m}^{-2}$ . O RMSE nas estimativas com produtos MODIS teve valores entre  $41,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $137,0 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto nas demais estimativas o RMSE teve valores entre  $85,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $160,0 \text{ W m}^{-2}$ . Além disso a análise de concordância teve os maiores valores de  $d$  para o  $R_n$  estimado com produtos MODIS, com  $d$  entre 0,63 e 0,97, enquanto as demais estimativas tiveram valores de  $d$  entre 0,64 e 0,82. Não foram identificados efeitos na correlação das estimativas do  $R_n$  devido ao uso dos produtos MODIS (TABELA 10).

As estimativas do  $R_n$  a partir de dados de reanálise tiveram os menores PBIAS, com valores entre -11,0% e 2,0%, enquanto o saldo de radiação estimado a partir de dados medidos teve PBIAS entre -25,0% e -0,7% (TABELA 10). No entanto, os dados de reanálise causaram maior erros nas estimativas do  $R_n$ , a análise de erro apontou MAE com valores entre  $58,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $86,0 \text{ W m}^{-2}$ , e RMSE, entre  $87,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $121,0 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto o  $R_n$  estimado com dados medidos teve MAE entre  $39,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $156,0 \text{ W m}^{-2}$  e RMSE entre  $41,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $160,0 \text{ W m}^{-2}$ . Além disso a análise de concordância e correlação apontaram os menores valores de  $d$  e  $r$  para o  $R_n$  estimado por dados de reanálise, com  $d$  entre 0,63 e 0,78 e  $r$  entre 0,52 e 0,65, enquanto o  $R_n$  estimado com dados medidos teve  $d$  entre 0,64 e 0,97 e  $r$  entre 0,94 e 0,99 (TABELA 10).

As diferenças metodológicas entre as estimativas do  $\alpha$ , afetaram as estimativas do  $R_n$ , na qual o uso do albedo de banda estreita, em outros estudos, têm gerado resultados importantes para o desenvolvimento do sensoriamento remoto (LIANG, 2000; FAUSTO *et al.*, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2016; QUERINO *et al.*, 2017). Por outro lado, o  $R_n$  é fonte primária dos fenômenos meteorológicos no planeta e a principal informação usada em modelos de previsão meteorológica (RODELL *et al.*, 2004). Desse modo, o uso dos dados de reanálise nos atuais modelos de previsão meteorológica pode contribuir para o aumento dos erros relacionado as estimativas produzidas, em particular as estimativas do  $R_n$  usando o  $\alpha$  por reanálise.

As estimativas do  $R_n$  usando dados GLDAS e produtos MODIS, comparada as estimativas dos produtos MERRA (2,9%), NCEP (2,5%), ERA-40 (3,1%), ERA-Interim (3,2%), CFSR (3,4%), apresentou o menor PBIAS (TABELA 10) (DECKER

*et al.*, 2012). Em estimativas do Rn com uso de dados de reanálise e produtos MODIS na floresta amazônica brasileira, autores observaram erros percentuais entre 12,0% e 17,0% e RMSE entre 68,0 W m<sup>-2</sup> e 89,0 W m<sup>-2</sup> (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

**TABELA 10** – Médias ( $\pm$  IC) anual e sazonal do saldo de radiação (Rn) medido e estimado e respectivos valores do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de Wilmott (d) e coeficiente de correlação de Spearman (r), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

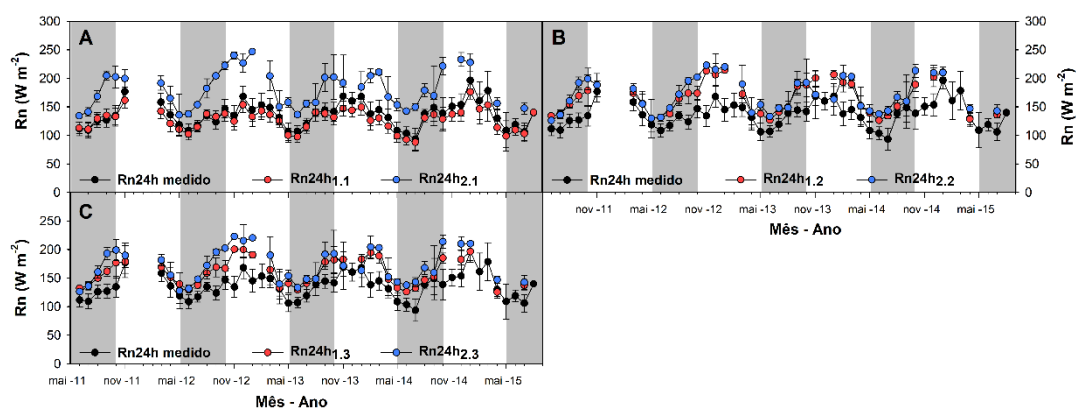
| Anual             |                  |       |       |       |      |      |
|-------------------|------------------|-------|-------|-------|------|------|
|                   | Média            | MAE   | RMSE  | PBIAS | d    | r    |
| <b>Rn medido</b>  | 509,1 $\pm$ 30,7 | -     | -     | -     | -    | -    |
| Rn <sub>1,1</sub> | 429,7 $\pm$ 33,2 | 0,1   | 0,1   | -33,7 | 0,23 | 0,26 |
| Rn <sub>1,2</sub> | 384,4 $\pm$ 15,9 | 83,3  | 86,8  | -16,2 | 0,83 | 0,98 |
| Rn <sub>1,3</sub> | 474,9 $\pm$ 39,3 | 158,2 | 161,1 | -29,2 | 0,64 | 0,97 |
| Rn <sub>1,4</sub> | 429,7 $\pm$ 18,0 | 38,0  | 40,0  | -7,4  | 0,96 | 0,98 |
| Rn <sub>1,5</sub> | 458,3 $\pm$ 33,1 | 115,1 | 117,1 | -21,1 | 0,76 | 0,98 |
| Rn <sub>1,6</sub> | 410,6 $\pm$ 15,8 | 54,6  | 61,1  | -10,7 | 0,90 | 0,97 |
| Rn <sub>2,1</sub> | 543,4 $\pm$ 17,5 | 132,1 | 137,2 | -24,3 | 0,69 | 0,96 |
| Rn <sub>2,2</sub> | 509,3 $\pm$ 17,6 | 61,8  | 89,3  | 0,3   | 0,77 | 0,62 |
| Rn <sub>2,3</sub> | 533,3 $\pm$ 17,5 | 72,0  | 107,5 | -6,0  | 0,70 | 0,55 |
| Rn <sub>2,4</sub> | 500,0 $\pm$ 19,7 | 59,2  | 88,7  | -2,0  | 0,78 | 0,63 |
| Rn <sub>2,5</sub> | 512,6 $\pm$ 15,7 | 74,5  | 109,9 | -8,1  | 0,70 | 0,56 |
| Rn <sub>2,6</sub> | 478,5 $\pm$ 16,7 | 68,9  | 101,0 | -5,4  | 0,70 | 0,57 |
| Período seco      |                  |       |       |       |      |      |
| <b>Rn medido</b>  | 447,7 $\pm$ 25,4 | -     | -     | -     | -    | -    |
| Rn <sub>1,1</sub> | 368,5 $\pm$ 18,7 | 64,0  | 65,1  | -14,8 | 0,57 | 0,92 |
| Rn <sub>1,2</sub> | 335,1 $\pm$ 13,3 | 133,8 | 136,2 | -28,5 | 0,55 | 0,90 |
| Rn <sub>1,3</sub> | 381,2 $\pm$ 40,8 | 33,1  | 34,8  | -8,0  | 0,95 | 0,94 |
| Rn <sub>1,4</sub> | 363,5 $\pm$ 17,5 | 100,6 | 103,8 | -21,7 | 0,70 | 0,90 |
| Rn <sub>1,5</sub> | 377,8 $\pm$ 37,7 | 36,5  | 38,8  | -8,8  | 0,94 | 0,93 |
| Rn <sub>1,6</sub> | 357,9 $\pm$ 16,3 | 106,4 | 110,0 | -22,9 | 0,68 | 0,89 |
| Rn <sub>2,1</sub> | 493,8 $\pm$ 11,9 | 50,0  | 73,5  | 6,3   | 0,68 | 0,58 |
| Rn <sub>2,2</sub> | 466,7 $\pm$ 15,4 | 48,4  | 69,7  | 0,5   | 0,73 | 0,57 |
| Rn <sub>2,3</sub> | 479,4 $\pm$ 12,6 | 44,7  | 68,4  | 3,3   | 0,69 | 0,59 |
| Rn <sub>2,4</sub> | 453,5 $\pm$ 14,5 | 48,4  | 68,3  | -2,3  | 0,73 | 0,57 |
| Rn <sub>2,5</sub> | 471,2 $\pm$ 11,5 | 47,2  | 69,5  | 1,5   | 0,65 | 0,54 |
| Rn <sub>2,6</sub> | 444,1 $\pm$ 12,9 | 53,9  | 73,2  | -4,4  | 0,68 | 0,55 |
| Período chuvoso   |                  |       |       |       |      |      |
| <b>Rn medido</b>  | 529,5 $\pm$ 50,0 | -     | -     | -     | -    | -    |

|                   |              |       |       |       |      |      |
|-------------------|--------------|-------|-------|-------|------|------|
| Rn <sub>1,1</sub> | 482,4 ± 37,2 | 98,4  | 100,2 | -16,9 | 0,74 | 0,97 |
| Rn <sub>1,2</sub> | 434,2 ± 17,7 | 183,4 | 184,4 | -29,7 | 0,53 | 0,97 |
| Rn <sub>1,3</sub> | 538,5 ± 37,6 | 45,0  | 46,3  | -7,7  | 0,93 | 0,99 |
| Rn <sub>1,4</sub> | 488,6 ± 18,8 | 130,9 | 131,7 | -21,1 | 0,61 | 0,98 |
| Rn <sub>1,5</sub> | 511,5 ± 31,9 | 72,0  | 76,1  | -12,3 | 0,79 | 0,96 |
| Rn <sub>1,6</sub> | 455,4 ± 18,1 | 161,1 | 163,4 | -26,1 | 0,56 | 0,92 |
| Rn <sub>2,1</sub> | 597,7 ± 19,2 | 81,8  | 111,8 | -3,0  | 0,38 | 0,18 |
| Rn <sub>2,2</sub> | 555,3 ± 23,5 | 101,2 | 137,6 | -9,9  | 0,34 | 0,14 |
| Rn <sub>2,3</sub> | 591,1 ± 21,4 | 77,0  | 107,4 | -4,6  | 0,44 | 0,21 |
| Rn <sub>2,4</sub> | 548,5 ± 25,3 | 101,3 | 137,5 | -11,5 | 0,37 | 0,17 |
| Rn <sub>2,5</sub> | 557,0 ± 19,9 | 95,6  | 126,3 | -9,6  | 0,37 | 0,14 |
| Rn <sub>2,6</sub> | 514,7 ± 23,3 | 125,1 | 160,0 | -16,5 | 0,33 | 0,11 |

#### 4.5 Estimativas do saldo de radiação diário

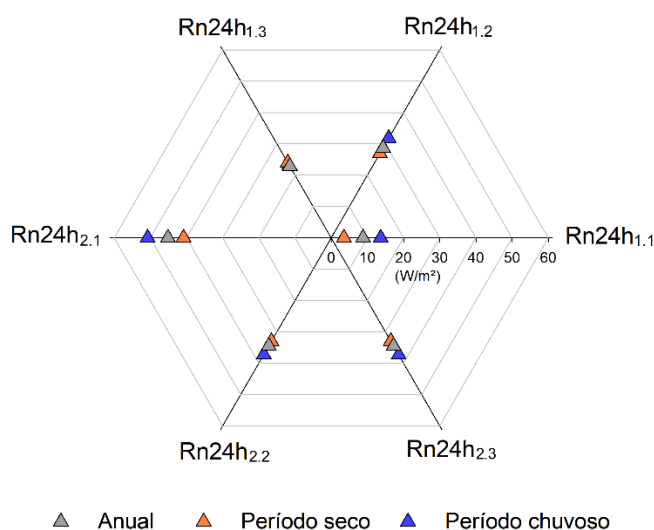
As estimativas do Rn24h<sub>1,1</sub> tiveram média anual 21,7% menor que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 16,1% e 26,6% menores, respectivamente (FIGURA 18;TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>1,1</sub> tiveram desvio médio de -6,6% em relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em março (-10,8%) e mínimo em agosto (0,1%) (FIGURA 17). O Rn24h<sub>1,2</sub> teve média anual 0,8% maior que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 4,2% maior e 2,1% menor, respectivamente (FIGURA 18;TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>1,2</sub> tiveram desvio médio de 22,7% em relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em novembro (31,1%) e mínimo em abril (8,9%) (FIGURA 17).

As estimativas do Rn24h<sub>1,3</sub> tiveram média anual 3,1% menor que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 2,5% maior e 6,8% menor, respectivamente (FIGURA 18;TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>1,3</sub> tiveram desvio médio de 18,4% em relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em fevereiro (28,9%) e mínimo em abril (5,5%) (FIGURA 17). A estatística de Bland-Altman indicou 97,7 %, 96,8% e 97,0% das estimativas do Rn24h<sub>1,1</sub>, Rn24h<sub>1,2</sub> e Rn24h<sub>1,3</sub> dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $12,6 \text{ W m}^{-2} \pm 1,9 \text{ W m}^{-2}$ ,  $3,3 \text{ W m}^{-2} \pm 2,2 \text{ W m}^{-2}$  e  $3,3 \text{ W m}^{-2} \pm 2,2 \text{ W m}^{-2}$  (FIGURA 19).



**FIGURA 17** - Médias mensais ( $\pm$  IC) do saldo de radiação diário (Rn24h) estimado e medido na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, nos períodos seco (cinza) e chuvoso (branco) de 2011 a 2015.

As estimativas do Rn24h<sub>2.1</sub> tiveram média anual 11,6% maior que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 15,3% e 9,2% maiores, respectivamente (FIGURA 18; TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>2.1</sub> tiveram desvio médio de 34,2% em relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em outubro (51,1%) e mínimo em abril (20,9%) (FIGURA 17).

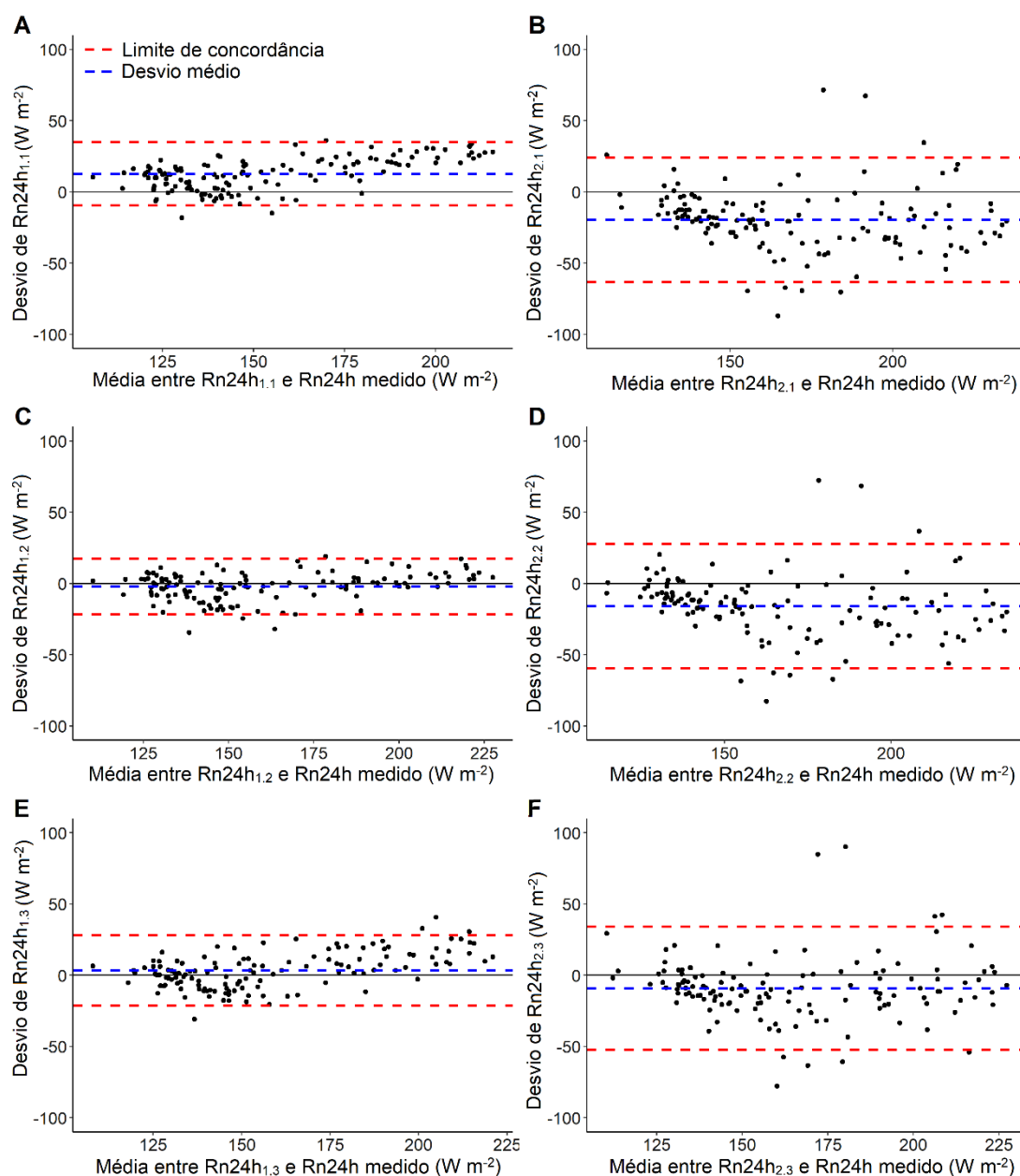


**FIGURA 18** - Desvio absoluto das médias sazonais e anuais das estimativas do saldo de radiação diário (Rn24h), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015.

O Rn24h<sub>2.2</sub> teve média anual 9,5% maior que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 12,0% e 7,5% maiores, respectivamente (FIGURA 18; TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>2.2</sub> tiveram desvio médio de 26,7% em

relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em outubro (43,8%) e mínimo em abril (12,3%) (FIGURA 17).

As estimativas do Rn24h<sub>2.3</sub> tiveram média anual 5,0% maior que o Rn24h medido, com médias no período seco e chuvoso 9,7% e 1,7% maiores, respectivamente (FIGURA 18; TABELA 11). As médias mensais do Rn24h<sub>2.3</sub> tiveram desvio médio de 26,7% em relação ao Rn24h medido, com desvios máximo em outubro (43,8%) e mínimo em abril (12,4%) (FIGURA 17). A estatística de Bland-Altman indicou 93,2 %, 93,6% e 93,2% das estimativas do Rn24h<sub>2.1</sub>, Rn24h<sub>2.2</sub> e Rn24h<sub>2.3</sub> dentro dos limites de concordância, com desvios médios  $-19,6 \text{ W m}^{-2} \pm 3,8 \text{ W m}^{-2}$ ,  $-15,9 \text{ W m}^{-2} \pm 3,9 \text{ W m}^{-2}$  e  $-9,2 \text{ W m}^{-2} \pm 3,8 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente (FIGURA 19).



**FIGURA 19** - Análise de concordância por método de Bland-Altman do saldo de radiação diário (Rn24h) estimado em função do Rn24h medido, na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal, de 2011 a 2015, às 09h36min.

As estimativas do Rn24h usando os produtos MOD09A1 e MCD43A tiveram os menores PBIAS em relação as estimativas com  $\alpha$  medido, com valores entre 1,0% e 10,0%, enquanto nas demais estimativas o PBIAS teve valores entre -8,0% e 13,0% (TABELA 11). O MAE nas estimativas do Rn24h, usando dados MODIS, teve valores entre 7,0  $\text{W m}^{-2}$  e 21,0  $\text{W m}^{-2}$ , enquanto para as demais estimativas o MAE esteve entre 14,0  $\text{W m}^{-2}$  e 25,0  $\text{W m}^{-2}$ . O RMSE nas estimativas com produtos MODIS teve valores

entre  $10,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $28,0 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto nas demais estimativas o RMSE teve valores entre  $16,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $30,0 \text{ W m}^{-2}$ . Além disso a análise de concordância teve os maiores valores de  $d$  para o Rn24h estimado com produtos MODIS, com  $d$  entre 0,83 e 0,97, enquanto as demais estimativas tiveram valores de  $d$  entre 0,82 e 0,92. Não foram identificados efeitos na correlação das estimativas do Rn24h devido ao uso dos produtos MODIS (TABELA 11).

As estimativas do Rn24h a partir de dados de reanálise tiveram os menores PBIAS, com valores entre 5,0% e 13,0%, enquanto o Rn24h estimado a partir de dados medidos teve PBIAS entre -8,0% e 2,0% (TABELA 11). No entanto, os dados de reanálise causaram maior erros nas estimativas do Rn24h, o MAE teve valores entre  $17,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $25,0 \text{ W m}^{-2}$  e o RMSE entre  $23,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $30,0 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto o Rn24h por dados medidos teve MAE entre  $7,0 \text{ W m}^{-2}$  e  $15,0 \text{ W m}^{-2}$ . Além disso a análise de concordância e correlação apontaram os menores valores de  $d$  e  $r$  para o Rn24h, estimado por dados de reanálise, com  $d$  entre 0,82 e 0,86 e  $r$  entre 0,78 e 0,81, enquanto o Rn24h estimado com dados medidos teve  $d$  entre 0,92 e 0,97 e  $r$  entre 0,91 e 0,93 (TABELA 11).

**TABELA 11** – Médias ( $\pm$  IC) anual e sazonal do saldo de radiação diário (Rn24h) medido e estimado e respectivos valores do erro médio absoluto (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio sistemático percentual (PBIAS), índice de concordância de Wilmott ( $d$ ) e coeficiente de correlação de Spearman ( $r$ ), na Base Avançada de Pesquisa do Pantanal de 2011 a 2015.

| Anual                |                 |      |       |       |      |      |
|----------------------|-----------------|------|-------|-------|------|------|
|                      | Média           | MAE  | RMSE  | PBIAS | $d$  | $r$  |
| <b>Rn24h medido</b>  | 161,7 $\pm$ 6,2 | -    | -     | -     | -    | -    |
| Rn24h <sub>1.1</sub> | 126,5 $\pm$ 2,4 | 87,8 | 125,8 | -11,7 | 0,62 | 0,49 |
| Rn24h <sub>1.2</sub> | 163 $\pm$ 6,1   | 15,5 | 17,9  | -8,9  | 0,91 | 0,94 |
| Rn24h <sub>1.3</sub> | 156,7 $\pm$ 5,0 | 6,9  | 9,4   | 0,4   | 0,98 | 0,94 |
| Rn24h <sub>2.1</sub> | 180,5 $\pm$ 7,2 | 10,5 | 13,3  | -3,1  | 0,95 | 0,92 |
| Rn24h <sub>2.2</sub> | 177,1 $\pm$ 7,6 | 24,2 | 29,4  | 11,6  | 0,82 | 0,79 |
| Rn24h <sub>2.3</sub> | 169,9 $\pm$ 6,4 | 20,7 | 26,8  | 9,1   | 0,85 | 0,80 |
| Período seco         |                 |      |       |       |      |      |
| <b>Rn24h medido</b>  | 140,3 $\pm$ 3,6 | -    | -     | -     | -    | -    |
| Rn24h <sub>1.1</sub> | 117,8 $\pm$ 2,9 | 8,9  | 10,6  | -4,6  | 0,89 | 0,81 |
| Rn24h <sub>1.2</sub> | 146,2 $\pm$ 4,4 | 8,4  | 11,1  | 4,2   | 0,90 | 0,81 |
| Rn24h <sub>1.3</sub> | 143,9 $\pm$ 3,7 | 7,8  | 9,6   | 2,5   | 0,91 | 0,79 |
| Rn24h <sub>2.1</sub> | 161,9 $\pm$ 6,0 | 22,8 | 28,3  | 15,3  | 0,64 | 0,72 |

|                        |             |      |      |       |      |      |
|------------------------|-------------|------|------|-------|------|------|
| Rn24h <sub>2,2</sub>   | 157,1 ± 6,1 | 18,2 | 24,8 | 12,0  | 0,69 | 0,72 |
| Rn24h <sub>2,3</sub>   | 154 ± 5,3   | 16,2 | 22,0 | 9,8   | 0,71 | 0,70 |
| <b>Período chuvoso</b> |             |      |      |       |      |      |
| <b>Rn24h medido</b>    | 186,3 ± 7,8 | -    | -    | -     | -    | -    |
| Rn24h <sub>1,1</sub>   | 136,7 ± 3,0 | 21,6 | 22,9 | -11,3 | 0,85 | 0,97 |
| Rn24h <sub>1,2</sub>   | 182,4 ± 8,2 | 6,5  | 8,7  | -1,7  | 0,98 | 0,97 |
| Rn24h <sub>1,3</sub>   | 173,6 ± 6,7 | 13,9 | 16,5 | -6,8  | 0,92 | 0,93 |
| Rn24h <sub>2,1</sub>   | 203,4 ± 8,6 | 26,6 | 31,4 | 9,1   | 0,74 | 0,61 |
| Rn24h <sub>2,2</sub>   | 200,2 ± 9,7 | 25,1 | 30,3 | 7,9   | 0,77 | 0,64 |
| Rn24h <sub>2,3</sub>   | 189,4 ± 8,1 | 18,7 | 26,1 | 1,7   | 0,80 | 0,62 |

Em estimativas do Rn24h com imagens Landsat 8 e dados meteorológicos no Pantanal Mato-Grossense, entre abril de 2013 e agosto de 2014, o MAE e o RMSE tiveram valor 8,8 W m<sup>-2</sup> e 11,3 W m<sup>-2</sup>, além do coeficiente d igual a 0,95 (PAVÃO *et al.*, 2018). Em estudo realizado em área de floresta amazônica, o erro percentual e o RMSE de estimativas do Rn24h, usando dados de reanálise e produtos MODIS, tiveram valores entre 11,0% e 16,0% e 18,0 W m<sup>-2</sup> e 25,0 W m<sup>-2</sup>, respectivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

## 5. CONCLUSÃO

A precipitação foi maior que a normal climatológica, com 84,1% no período chuvoso. O NDVI, o  $\alpha$ , Rg, Rld, o Rn, a Tar e a UR, foram maiores no período chuvoso.

Os dados meteorológicos de reanálise tiveram menores erros, maior concordância e maior correlação no período chuvoso, com 87,0% a 99,0% de concordância.

O  $\alpha$  de reanálise teve os maiores erros e correlação em relação ao medido. As estimativas do  $\alpha$  pelos produtos MODIS MDC43A e MOD09A1 e por reanálise tiveram concordância entre 92,0% e 96,0%.

As estimativas do Rn e Rn24h usando dados medidos tiveram menores erros, maior correlação e maior concordância, enquanto tiveram os maior desvio percentual e maior desvio médio.

As estimativas do Rn e Rn24h usando o albedo MODIS tiveram menores erros.

A substituição dos dados de entrada medidos por reanálise no Rn e Rn24h aumentou o RMSE e o PBIAS e reduziu o MAE, o d, o r e o percentual de concordância.

O uso dos dados de reanálise é uma alternativa metodológica viável e eficaz para estimar o saldo de radiação, sem o uso de medidas de estação meteorológica, na região do pantanal de mato grosso e em locais com fitofisionomias semelhantes.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. J.; COSTA, J. M.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; DA COSTA, A. C.; FERREIRA, W. P. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 215-224, 2011. doi:http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862011000200006

ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. Measurement in Medicine: the Analysis of Method Comparison Studies. **The Statistician**, v. 32, p. 307-317, 1983. doi:10.2307/2987937

ANDERSON, L. O.; LATORRE, M. L.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; JÚNIOR, O. A. Sensor MODIS: Uma abordagem geral. p. 58, 2003.

ANDRADE, R. G.; SEDIYAMA, G. C.; PAZ, A. R.; LIMA, E. D.; FACCO, A. G. Geotecnologias aplicadas à avaliação de parâmetros biofísicos do Pantanal. **Pesq. agropec. bras.**, v. 47, n.9, p. 1227-1234, 2012.

ANGELINI, L. P., SILVA, P. C., FAUSTO, M. A., MACHADO, N. G., & BIUDES, M. S. Balanço de Energia nas Condições de Mudanças de Uso do Solo na Região Sul do Estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 353-363, 2017. doi:http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230003

ARAUJO, M. L.; SANTOS, J. R.; FEITOSA, F. E.; SANTOS, J. S.; SILVA, V. A.; ALMEIDA, J. L.; SILVA, F. B. Caracterização espaço-temporal dos componentes do balanço de radiação e calor na região de transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 1-19, 2019.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, L. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 52-67, 2005. doi:10.1016/j.rse.2005.03.014

BIUDES, M. S.; SOUZA, M. C.; DANIELICHEN, V. H.; MACHADO, N. G.; MUSIS, C. R.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. D. Modelling of gross primary production of the Amazon-Cerrado transitional forest by remote sensing techniques. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 01-12, 2014.

BIUDES, M. S.; SOUZA, M. C.; MACHADO, N. G.; DANIELICHEN, V. H.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. D. Modelling gross primary production of a tropical semi-deciduous forest in the southern Amazon Basin. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, p. 1540-1562, 2014. doi:10.1080/01431161.2013.878059

BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L.; MACHADO, N. G.; ARRUDA, P. H.; NEVES, G. A.; LOBO, F. d.; NOGUEIRA, J. d. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008

BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading. **Lancet**, v. 346, 1995. doi:10.1016/s0140-6736(95)91748-9

BORGES, G. M.; PACHÊCO, A. D.; SANTOS, F. K. Sensoriamento remoto: Avanços e perspectivas. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 32, 2015.

CHEN, Y.; YANG, K.; QIN, J.; ZHAO, L.; TANG, W.; HAN, M. Evaluation of AMSR-E retrievals and GLDAS simulations against observations of a soil moisture network on the central Tibetan Plateau, **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 118, p. 4466-4475, 2013. doi:10.1002/jgrd.50301

CORRÊA, P. B.; CANDIDO, L. A.; SOUZA, R. A.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Estudo do Fenômeno da Ilha de Calor na Cidade de Manaus/AM: Um Estudo a Partir de Dados de Sensoriamento Remoto, Modelagem e Estações Meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 167-176, 2016. doi:http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631220150012

CURADO, L. F.; RODRIGUES, T. R.; BIUDES, M. S.; PAULO, S. R.; NOGUEIRA, J. D. Estimativa sazonal da emissividade atmosférica através da equação de Brutsaert no norte do Pantanal Mato-grossense. **Ciência e Natura**, v. 33, p. 167-180, 2011.

DANELICHEN, V. H.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; VELASQUE, M. C.; SILVA, B. B.; NOGUEIRA, J. D. Uso do sensoriamento remoto na estimativa do índice de área foliar em floresta tropical. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 1352-1360, 2016. doi:10.5902/2179460X19917

DATTA, D. blandr: a Bland-Altman Method Comparison package. **Zenodo**, 2017. doi:DOI:10.5281/zenodo.824514

DECKER, M.; BRUNKE, M. A.; WANG, Z.; SAKAGUCHI, K.; ZENG, X.; BOSILOVICH, M. G. Evaluation of the Reanalysis Products from GSFC, NCEP, and ECMWF Using Flux Tower Observations. **Journal of Climate**, 25, pp. 1916-1944, 2012. doi:10.1175/JCLI-D-11-00004.1

DIVMET. Boletim Climático da Amazônia, 2018. **Sistema de Proteção da Amazônia**. Disponível em <http://www3.sipam.gov.br/boletim.html> Acesso em 01/07/2019

DU, J.; SONG, K.; WANG, Z.; ZHANG, B.; LIU, D. Evapotranspiration Estimation Based on MODIS Products and Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) Model in Sanjiang Plain, Northeast China. **Chin. Geogra. Sci.**, v. 23, p. 73-91, 2013. doi:10.1007/s11769-013-0587-8

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, p. 299-309, 2009.

Estel, S.; Kuemmerle, T.; Alcántara, C.; Levers, C.; Prishchepov, A.; Hostert, P. Mapping farmland abandonment and recultivation across Europe using MODIS NDVI

time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 163, p. 312-325, 2015. doi:10.1016/j.rse.2015.03.028

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**, v. 11, p. 350-361, 2016. doi:http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1843

FAUSTO, M. A.; MACHADO, N. G.; NOGUEIRA, J. d. S.; BIUDES, M. S. Net radiation estimated by remote sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 8, p. 083541, 2014. doi:http://dx.doi.org/10.1117/1.JRS.8.083541

GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D. P.; HUMBER, M. L.; JUSTICE, C. O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. v. 217, p. 72-85, 2018. doi:10.1016/j.rse.2018.08.005

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física : óptica e física moderna. **LTC**, ed.10, v. 4, 2016.

HE, T.; LIANG, S.; WANG, D.; CAO, Y.; GAO, F.; YU, Y.; FENG, M. Evaluating land surface albedo estimation from Landsat MSS, TM, ETM+, and OLI data based on the unified direct estimation approach. **Remote Sensing of Environment**, v. 204, p. 181-196, 2018. doi:10.1016/j.rse.2017.10.031

HOUSER, P. R.; RODELL, M.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; COSGROVE, B.; RADAKOVICH, J.; MENG, C.J. Global Land Data Assimilation System. **NASA Goddard Space Flight Center**, 2001. Disponível em: <http://users.monash.edu.au/~jpwalker/papers/tmp/GEWEX\_news\_01.pdf> Acesso em: 28/11/2019

IDSO, S. B. A set of equations for full spectrum and 8- to 14- $\mu$ m and 10.5- to 12.5- $\mu$ m. **Water Res. Res.**, v. 17, p. 295-304, 1981.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2019. Disponível em: inmet.gov.br/portal Acesso em: 29/11/2019.

INPE. InfoClima. **Centro de Previsão de tempo e Estudos Climáticos - CPTEC**, 2018. Disponível em: <http://infoclima.cptec.inpe.br/> Acesso em 01/08/2019

IVO, I. O.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; PAVÃO, V. M. Influência do desmatamento no índice de área foliar e temperatura da superfície. **Nativa**, v. 6, p. 364-369, 2018. doi:http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v6i4.5367

IVORY, S., MCGLUE, M., SPERA, S., SILVA, A., & BERGIER, I. Vegetation, rainfall, and pulsing hydrology in the Pantanal, the world's largest tropical wetland. **Environmental Research Letters**, 2019. doi:https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4ffe

JANATIAN, N.; SADEGHI, M.; SANAEINEJAD, S. H.; BAKHSHIAN, E.; FARID, A.; HASHEMINIA, S. M.; GHAZANFARI, S. A statistical framework for estimating air temperature using MODIS land surface temperature data. v. 37, p. 1181-1194, 2017. doi:10.1002/joc.4766

JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R.; VERMOTE, E. F.; MASUOKA, E.; WOLFE, R. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sens. Environ.**, v. 83, p. 3–15, 2002. doi:10.1016/S0034-4257(02)00084-6

KILPATRICK, K.; PODESTÁ, G.; WALSH, S.; WILLIAMS, E.; HALLIWELL, V.; SZCZODRAK, M.; EVANS, R. A decade of sea surface temperature from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 27-41, 2015. doi:10.1016/j.rse.2015.04.023

LATORRE, M. L.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E.; CARVALHO JÚNIOR, O. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. *Espaço & Geografia*, v. 6, p. 91-121, 2003.

LIANG, S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, p. 213-238, 2000.

LOPES JUNIOR, J. M.; MOURA, M. A.; QUERINO, C. A.; CARVALHO, A. L. Estimativa do balanço de radiação de ondas longas durante a estação chuvosa em área de Mata Atlântica no estado de Alagoas. **Revista Ibero-americana de Ciências Ambientais**, v. 10, p. 155-168, 2019. doi:10.6008/cbpc2179-6858.2019.002.0014

MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S.; ANGELINI, L. P.; MÜTZENBERG, D. M.; NASSARDEN, D. C.; BILIO, R. D.; NOGUEIRA, J. D. S. Sazonalidade do Balanço de Energia e Evapotranspiração. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 82-91, 2016. doi: 10.1590/0102-778620140164

MARTINS, A. L.; CUNHA, C. R.; PEREIRA, V. M.; DANELICHEN, V. H.; MACHADO, N. G.; LOBO, F. D.; BIUDES, M. S. Mudanças em índices biofísicos devido à alteração da cobertura do solo em área nativa de Cerrado em Mato Grosso. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 152-159, 2015. doi: 105902/2179460X16145

MENESES, P.; ALMEIDA, T.; ROSA, A. N.; SANO, E. E.; SOUZA, E. B.; BAPTISTA, G. M.; BRITES, R. S. Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto. **Universidade de Brasília – UNB**, 2012. Disponível em: <cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8> Acesso em: 27/11/2019

MESQUITA, F. L.; MARQUES FILHO, E. P.; KARAM, H. A.; ALVALÁ, R. C. Balanço de radiação no Pantanal Sul Mato-grossense durante a estação seca. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 65-74, 2013.

MORAES, E. C. Fundamentos de sensoriamento remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2002. Disponível em: <mtc-

m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1\_ECMoraes.pdf>  
Acesso em: 27/11/2019.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação, **Ed. UFV**, ed. 3, 2007.

NOVO, E. M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações, **Blücher**, ed. 3, 2008.

OLIVEIRA, G.; BRUNSELL, N.; MORAES, E.; BERTANI, G.; SANTOS, T. V.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. Use of MODIS Sensor Images Combined with Reanalysis Products to Retrieve Net Radiation in Amazonia. **Sensors**, v. 956, p. 1-28, 2016. doi:10.3390/s16070956

PALÁCIOS, R. D.; SALLO, F. D.; MARQUES, J. B.; SANTOS, A. C.; MENEZES, J. A.; BIUDES, M. S.; NOGUEIRA, J. D. S. Variabilidade espaço-temporal da profundidade ótica de aerossóis nos biomas. **Nativa**, v. 6, p. 56-65, 2018. doi:10.31413/nativa.v6i1.5153

PAVÃO, V. M.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, C. S. Effects of solar radiation and correction of surface temperature by net radiation estimates in northern Pantanal. **J. Appl. Remote Sens.**, v. 12(4), p. 046004-0 - 046004-14, 2018. doi:10.1117/1.JRS.12.046004

PETERSON, B. G.; CARL, P. PerformanceAnalytics: Econometric Tools for Performance and Risk Analysis. **R package version 1.5.2**, 2018. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=PerformanceAnalytics>>

PHILLIPS, L. B.; HANSEN, A. J.; FLATHER, C. H. Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MODIS primary production. **Remote Sensing of Environment**, v. 112(9), p. 3538-3549, 2008. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.04.012>

QI, W.; ZHANG, C.; FU, G.; ZHOU, H. Global Land Data Assimilation System data assessment using a distributed biosphere hydrological model. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 652–667, 2015. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.011

QUERINO, C. A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, J. K.; SANTOS NETO, L. A.; SILVA, M. J., NOGUEIRA, J. de S. Balanço de ondas curtas sobre floresta sazonalmente alagável do Pantanal Mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, p. 252-266, 2017.

Ramírez-Cuesta, J. M.; Vanella, D.; Consoli, S.; Motisi, A.; Minacapillic, M. A satellite stand-alone procedure for deriving net radiation by using SEVIRI and MODIS products. **Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation**, v. 73, p. 786-799, 2018. doi:10.1016/j.jag.2018.08.018

RAMPAZO, N. A.; PICOLI, M. C.; CAVALIERO, C. K. Comparação entre dados meteorológicos provenientes de sensoriamento remoto (modelados e de satélites) e de estações de superfície. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 412-426, 2019.

RANDOW, R. D.; ALVALÁ, R. C. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal sul Mato-grossense durante os períodos secos de 1999 e 2000. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 398-412, 2006.

RODELL, M.; HOUSER, P. R.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C. J.; LOHMANN, D. The Global Land Data Assimilation System. **American Meteorological Society**, p. 381-394, 2004.

RUI, H.; BEAUDOING, H. README Document for NASA GLDAS Version 2 Data Products. Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), p. 1-22, 2019. Disponível em: <  
[https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS\\_NOAH025\\_3H.2.1/doc/README\\_GLDAS2.pdf](https://hydro1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/GLDAS/GLDAS_NOAH025_3H.2.1/doc/README_GLDAS2.pdf)> Acesso em: 29/11/2019

RUI, H.; BEAUDOING, H.; TENG, W.; VOLLMER, B.; RODELL, M.; LEI, G. D. New and Improved GLDAS data sets and data services at NASA GES DISC. **4th WCRP**, 2012.

SALLO, F. D.; FRANCA, 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. **Ambiente & Água**, v. 9, p. 347-358, 2014. doi:10.4136/ambiente-agua.1273

SANTOS, A. A.; FINGER, A.; NOGUEIRA, J. D. S.; CURADO, L. F.; PALÁCIOS, R. D.; PEREIRA, V. R. Análise da concentração e composição de aerossóis de queimadas no Pantanal Mato-grossense. **Quim. Nova**, v. 39, p. 919-924, 2016. doi:10.5935/0100-4042.20160105

SANTOS, C. C.; WANDERLEY, R. L.; ARAÚJO, A. L.; BEZERRA, B. G. Obtenção do saldo de radiação em áreas de pastagem e floresta amazônica (estação seca) através do sensor MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 420-432, 2014. doi:http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130591

SCHAAF, C. B.; GAO, F.; STRAHLER, A. H.; LUCHT, W.; LI, X.; TSANG, T.; ROY, D. First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 135-148, 2002.

SETTE, D. M. Os climas do Cerrado do centro-oeste. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1(1), p. 29-42, 2005. doi:10.5380/abclima.v1i1.25225

SILVA, J. B.; CURADO, L. F.; MUSIS, C. R.; NOGUEIRA, J. D.; RODRIGUES, T. R. Utilização de modelos de estimativa da radiação de onda longa. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 9, p. 46-56, 2018. doi:http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2018.008.0005

SILVA, L. C.; CUNHA, J. M.; MACHADO, N. G.; CAMPOS, M. C.; BIUDES, M. S. Estimativa do balanço de radiação por sensoriamento remoto de diferentes usos de solo no sudeste da Amazônia brasileira. **Sociedade & Natureza**, v. 27, p. 341-356, 2015. doi:10.1590/1982-451320150211

SILVA, R. A.; SILVA, V. D.; CAVALCANTI, E. P., & SANTOS, D. N. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 501-509, 2010.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática de balanço hídrico climático do estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1(1), p. 34-43, 2013.

TEIXEIRA, A. H.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. D.; GALDINO, S. Dinâmica do balanço de energia em larga escala no pantanal mato-grossense, Brasil. **Anais 5º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, p. 71-80, 2014.

TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M. Estimation of Actual Evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico Using MODIS and Landsat Imagery with the METRIC Model. **Remote Sens.**, 5, pp. 5397-5423, 2013. doi:10.3390/rs5105397

VALOR, E.; CASELLES, V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. **Remote Sens. Environ.**, v. 57, p. 167-184, 1996.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia VERSÃO DIGITAL 2, 2006. Disponível em: [http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA\\_E\\_CLIMATOLOGIA\\_VD2\\_Mar\\_2006.pdf](http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf)> Acesso em: 27/11/2019

VOURLITIS, G.; LOBO, F. D.; LAWRENCE, S.; LUCENA, I. C.; PINTO JR., O. B.; DALMAGRO, H. J.; NOGUEIRA, J. D. S. Variations in Stand Structure and Diversity along a Soil Fertility Gradient in a Brazilian Savanna (Cerrado) in Southern Mato Grosso. **Forest, Range & Wildland Soils**, p. 1-10, 2013. doi:10.2136/sssaj2012.0336

WANG, D.; LIANG, S.; HE, T.; YU, Y.; SCHAAF, C.; WANG, Z. Estimating daily mean land surface albedo from MODIS data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, p. 4825-4841, 2015. doi:10.1002/2015JD023178.

WANG, F.; WANG, L.; KOIKE, T.; ZHOU, H.; YANG, K.; WANG, A.; LI, W. Evaluation and application of a fine-resolution global data set in a semiarid mesoscale river basin with a distributed biosphere hydrological model. **J. Geophys. Res.**, v. 116(D201108), p. 1-20, 2011. doi:10.1029/2011JD015990

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; ROWE, C. M. Statistics for the Evaluation and Comparison of Models. **Journal of Geophysical Research**, v. 90(C5), p. 8995-9005, 1985.

YANG, F., LU, H., YANG, K. H. J., WANG, W., WRIGHT, J.; LI, Y. Evaluation of multiple forcing data sets for precipitation and shortwave radiation over major land areas of China. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 21, p. 5805-5821, 2017. doi:https://doi.org/10.5194/hess-21-5805-2017

ZHANG, Y.; SONG, C.; BAND, L. E.; SUN, G.; LI, J. Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? **Remote Sensing of Environment**, v. 191, p. 145-155, 2017. doi:10.1016/j.rse.2016.12.018

ZHU, W.; LÜ, A.; JIA, S.; YAN, J.; MAHMOOD, R. Retrievals of all-weather daytime air temperature from MODIS products. **Remote Sensing of Environment**, 189, pp. 152-163, 2017. doi:10.1016/j.rse.2016.11.011

ZHU, X.; HELMER, E. H.; GAO, F.; LIU, D.; CHEN, J.; LEFSKY, M. A. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions. **Remote Sensing of Environment**, v. 172, p. 165-177, 2016. doi:10.1016/j.rse.2015.11.016