

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Comparação entre dados meteorológicos estimados e observados para
utilização em modelos de estimativa da produtividade agrícola**

Marcelo Crestani Mota

Pelotas, 2015

MARCELO CRESTANI MOTA

**Comparação entre dados meteorológicos estimados e observados para
utilização em modelos de estimativa da produtividade agrícola**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rizzi
Co-Orientador: Prof. Dr. Fabrício Pereira Harter

Pelotas, 2015

MARCELO CRESTANI MOTA

**Comparação entre dados meteorológicos estimados e observados para
utilização em modelos de estimativa da produtividade agrícola**

Aprovada em 20/07/2015

Banca examinadora:

Professor Dr. Rodrigo Rizzi (Presidente)
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Professora Dr^a. Rita de Cássia Fraga Damé
Centro de Engenharias – UFPel

Professor Dr. Fioravante Jaekel dos Santos
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Pesquisador Dr. Enio Egon Sosinski Junior
Embrapa Clima Temperado

*Aos meus pais, aos meus irmãos
e a minha noiva pelo apoio e amor incondicionais,
e aos amigos por sempre estarem torcendo por mim,*

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **DEUS** por ter me agraciado com mais essa conquista e por ser meu confidente nos momentos difíceis enfrentados ao longo do caminho percorrido.

Aos meus pais, **Zelinda Crestani** e **Paulo Alberto dos Santos Mota**, que sempre estiveram ao meu lado, que me deram todas as condições possíveis para eu chegar até aqui, com muito amor, carinho, respeito e incentivo. Sem vocês esta vitória jamais seria possível. Logo, esta conquista é nossa e não minha. **Amo vocês! Meu muito obrigado de coração!**

À **Jôsie Schwartz Caldas**, minha companheira, minha amiga, meu **Amor**, pessoa tão especial na minha vida! Presente em todos os momentos, nas horas boas e ruins, sempre me apoiando e incentivando. É muito difícil descrever em tão poucas palavras o meu agradecimento a você. **Te amo guriazinha!**

Aos meus irmãos, **Marcelle** e **Michel Crestani Mota**, por me terem como exemplo e por serem amigos fantásticos.

Aos meus sogros, **Serli Caldas** e **José Fernando Caldas**, obrigado por me estenderem a mão sempre que precisei e por serem tão queridos.

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água.

Ao **Dr. Fabrício Pereira Harter**, pela co-orientação, pelo apoio e suporte de sempre.

Ao grande amigo, professor e sensacional orientador **Dr. Rodrigo Rizzi** pelo ensinamento, incentivo, compreensão e dedicação na elaboração deste trabalho e, por não medir esforços, em momento algum, para que eu pudesse concluir essa etapa da minha vida.

Especialmente para o meu Querido PAI – Meu melhor amigo, meu conselheiro, meu confidente, meu incentivador, meu motivador, meu alicerce. Figura ímpar e muito bela. Um economista extremamente alegre e inteligente. Homem íntegro, de rara conduta. Homem nobre, humilde, educado, extremamente amoroso e carinhoso, sempre pronto para me dar um beijo, um abraço e dizer: “O pai te ama, meu véio!”. Esse cara é o meu **PAI**. O cara que me forjou como homem de bem e de amor no coração. O cara que me preparou para a vida e que me ensinou que vale a pena lutar por tudo aquilo que se sonha e que nos faz feliz. O cara que vai estar sempre comigo, onde quer que eu vá. **AGRADECER-TE-EI ETERNAMENTE** por ter me escolhido para ser teu filho. Por ter me dado a oportunidade de ter convivido contigo e, principalmente por ter me dado um **AMOR INCONDICIONAL**, maior, mas muito maior do que de **PAI** para filho. **AMAR-TE-EI** para **SEMPRE** meu **PAI**, meu **HERÓI, PAULO ALBERTO DOS SANTOS MOTA**, ou simplesmente o meu “**BIGODE**”! Fica com Deus! Um dia nos reencontraremos novamente.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho. A vocês, um sincero...

Muito obrigado!

"Não deixe que a saudade sufoque, que a rotina acomode e que o medo impeça de tentar. Desconfie do destino e acredite em você. Gaste mais horas realizando que sonhando, fazendo que planejando, vivendo que esperando, porque embora quem quase morre esteja vivo, quem quase vive já morreu".

(Luiz Fernando Veríssimo)

RESUMO

CRESTANI, Marcelo. **Comparação entre dados meteorológicos estimados e observados para utilização em modelos de estimativa da produtividade agrícola.** 2015. 100f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Dada a importância da soja para a economia brasileira e do Rio Grande do Sul (RS) e a consequente necessidade de monitorar a safra agrícola, este trabalho tem por objetivo comparar os dados de variáveis meteorológicas geradas pelo modelo regional de previsão de tempo ETA e pelo sistema *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) em relação aos dados observados por estações meteorológicas convencionais no que tange a sua utilização em modelos agrônômicos de monitoramento e estimativa da produtividade agrícola da soja no RS. Utilizaram-se dados observados compondo as variáveis precipitação pluvial, temperatura média do ar, radiação solar incidente, umidade relativa média do ar, e velocidade média do vento a 2 m, observados por estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) os quais foram usados como referência para comparação com aqueles estimados pelo sistema TRMM (precipitação pluvial) e pelo modelo ETA (demais variáveis). Foram utilizadas três safras agrícolas (2006/07 a 2008/09) para comparação e geração de modelos de ajuste e as três safras subsequentes (2009/10 a 2011/12) para a validação. Para os dados de precipitação pluvial observaram-se altos coeficientes de correlação (r) entre os dados de precipitação pluvial do TRMM e do INMET para a maioria das safras, sendo que a precisão da estimativa foi pouco alterada por ocasião do ajuste dos dados pelo modelo matemático. Para as variáveis meteorológicas temperatura média do ar, radiação solar incidente e umidade relativa média do ar, observou-se, em geral, média correlação entre os dados estimados pelo modelo ETA e os observados pelo INMET. Além disso, a maioria dos dados melhorou substancialmente por ocasião da aplicação dos modelos matemáticos gerados. No que tange à variável média velocidade do vento a 2 m, as correlações entre os dados estimados pelo ETA e os observados pelas estações meteorológicas do INMET foram muito baixas.

Palavras-chave: modelo ETA, sistema TRMM, modelagem, Sistemas de Informação Geográfica, soja.

ABSTRACT

CRESTANI, Marcelo. **Comparison between estimated and observed meteorological data for using in crop yield estimation models.** 2015. 100f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Due to the importance of soybean crop for the Brazilian economy as well as for the Rio Grande do Sul State (RS) and the consequent need to monitor the crop yield conditions, this study aims to compare meteorological data generated by the regional weather forecast model ETA and the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) system versus observed data by conventional weather stations regarding their use in agronomic models in order to monitor and estimate soybean crop yield in RS. It was used original or derived data from rainfall, average air temperature, downward short wave radiation, average relative air humidity, and 2-m average wind speed observed by weather stations from INMET as reference data to compared with those estimated by the TRMM system (rainfall) and the ETA model (for other variables). It was used three crop years (2006/07 to 2008/09) for comparison and generation of the adjustment models and the three subsequent crop years (2009/10 to 2010/11) for validation. Results showed high correlation (r) between rainfall data retrieved from TRMM and INMET for most crop years and the estimate accuracy was low altered after the adjustment by the mathematical model. In general, for average air temperature, downward short wave radiation, and average relative air humidity, results showed moderate correlation between ETA and INMET data. Moreover, the majority of the ETA data was improved when the mathematical models were applied. For 2-m average wind speed, results showed very low correlation between ETA and INMET data.

Keywords: ETA model, TRMM system, modeling, Geographic Information Systems, soybean.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Mapa da produção agrícola da soja no Brasil, por estado, para municípios que produzem acima de 5.000 toneladas. | 29 |
| Figura 2. Produção mundial de soja..... | 30 |
| Figura 3. Produção, produtividade e área de soja cultivada no RS para as safras 2004/05 a 2014/15 | 31 |
| Figura 4. Calendário agrícola médio para cultura de soja no RS..... | 33 |
| Figura 5. Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de microondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR ,varredura vermelha) do satélite TRMM | 37 |
| Figura 6. Localização da área de estudo | 39 |
| Figura 7. Distribuição espacial das estações meteorológicas usadas no estudo | 40 |
| Figura 8. Distribuição espacial dos dados de precipitação gerados pelo TRMM (grade regular de 0,25° x 0,25°), para a região compreendida pelo estudo | 44 |
| Figura 9. Distribuição espacial referente aos dados gerados pelo modelo ETA (grade regular de 20 x 20 km), para a região compreendida pelo estudo | 46 |
| Figura 10. Interpolação vizinho mais próximo | 48 |
| Figura 11. Variação dos valores de precipitação observados (INMET) e estimados (TRMM) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os | |

valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....53

Figura 12. Diagrama de dispersão entre os dados de precipitação estimados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).....54

Figura 13. Diagrama de dispersão entre os dados de precipitação pluvial estimados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....55

Figura 14. a) Variação entre os dados de precipitação pluvial observados (INMET) e estimados (TRMM) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de precipitação pluvial observados (INMET) e ajustados (TRMM) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....56

Figura 15. Relação entre os dados de precipitação pluvial ajustados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....58

Figura 16. Variação dos valores de temperatura observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....61

Figura 17. Diagrama de dispersão entre os dados de temperatura estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).....62

Figura 18. Diagrama de dispersão entre os dados de temperatura do ar estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....63

Figura 19. (a) Variação entre os dados de temperatura do ar observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de temperatura do ar observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....64

Figura 20. Relação entre os dados de temperatura ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....66

Figura 21. Variação dos valores de radiação observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....68

Figura 22. Diagrama de dispersão entre os dados de radiação estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2)69

Figura 23. Diagrama de dispersão entre os dados de radiação solar incidente estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.70

Figura 24. (a) Variação entre os dados de radiação observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de radiação observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.71

Figura 25. Relação entre os dados de radiação ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*. **Significativo a 95% de probabilidade pelo teste de *t-student*.73

Figura 26. Variação dos valores de umidade observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.75

Figura 27. Diagrama de dispersão entre os dados de umidade estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).76

Figura 28. Diagrama de dispersão entre os dados de umidade estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras

(2009/10, 2010/11 e 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....77

Figura 29. (a) Variação entre os dados de umidade observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de umidade observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....78

Figura 30. Relação entre os dados de umidade ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....79

Figura 31. Variação dos valores de velocidade do vento observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....82

Figura 32. Diagrama de dispersão entre os dados de velocidade do vento estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).....83

Figura 33. Diagrama de dispersão entre os dados de velocidade do vento estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). ***Significativo a 90% de probabilidade pelo teste de *t-student*.....84

Figura 34. (a) Variação entre os dados de velocidade do vento observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados

de velocidade do vento observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.....85

Figura 35. Relação entre os dados de velocidade do vento ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. **Significativo a 95% de probabilidade pelo teste *t* de student. ^{NS}Não significativo.....86

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Comparativo de área, produtividade e produção de soja estimada para a safra 2014/15 para os maiores estados produtores do Brasil. | 29 |
| Tabela 2. Localização das estações meteorológicas | 41 |
| Tabela 3. Precipitações pluviométricas médias observadas (INMET) e ajustadas (TRMM) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12 | 57 |
| Tabela 4. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a precipitação pluviométrica entre os dados do TRMM estimados e ajustados frente aos dados do INMET..... | 58 |
| Tabela 5. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do sistema TRMM, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a precipitação pluviométrica | 59 |
| Tabela 6. Temperaturas do ar médias observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12 | 65 |
| Tabela 7. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a temperatura do ar entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET | 66 |
| Tabela 8. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a temperatura média do ar..... | 67 |
| Tabela 9. Média da radiação solar incidente observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12 | 72 |
| Tabela 10. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a radiação solar incidente entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Tabela 11. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a variável radiação solar incidente..... | 74 |
| Tabela 12. Umidades do ar médias observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12 | 79 |
| Tabela 13. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a umidade relativa do ar entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET..... | 80 |
| Tabela 14. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a variável umidade relativa do ar..... | 80 |
| Tabela 15. Média das velocidades dos ventos observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12..... | 86 |
| Tabela 16. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a velocidade do vento média entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET | 87 |
| Tabela 17. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a variável velocidade do vento..... | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

CERES – *Sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens*

COLA – *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies*

CONAB – *Companhia Nacional de Abastecimento*

CPTEC – *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos*

ETA – *Modelo numérico de meso-escala de previsão do tempo*

GrADS – *Grid Analysis and Display System*

GV – *Ground Validation*

FAO – *Food and Agriculture Organization*

IGES – *Institute of Global Environment and Society*

INMET – *Instituto Nacional de Meteorologia*

JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*

LIS – *Sensor para imageamento de relâmpagos*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NCEP – *National Meteorological Center atualmente National Center for Environmental Prediction*

PR – *Radar de precipitação*

RMS – *Raiz do Erro Médio Quadrático*

RMSE – *Erro Relativo Médio Quadrático*

SPRING – *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas*

TMI – *Imageador de microondas*

TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission*

UTC – *Coordinated Universal Time*

VIRS – *Radiômetro nas bandas do visível e do infravermelho*

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 23 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 27 |
| 2.1. | Histórico da soja | 27 |
| 2.2. | Produção e produtividade da soja no Rio Grande do Sul..... | 30 |
| 2.3. | Bioclima favorável à produção de soja | 31 |
| 2.4. | Emprego de modelos no monitoramento da atividade agrícola | 34 |
| 2.5. | Modelo ETA..... | 35 |
| 2.6. | Estações meteorológicas..... | 36 |
| 2.7. | Projeto TRMM | 36 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS | 39 |
| 3.1. | Caracterização do local de estudo..... | 39 |
| 3.2. | Dados de estações meteorológicas..... | 40 |
| 3.3. | Dados do TRMM..... | 43 |
| 3.4. | Dados do modelo ETA..... | 44 |
| 3.5. | Compatibilização espacial dos dados..... | 47 |
| 3.6. | Geração dos modelos matemáticos de ajuste..... | 48 |
| 3.7. | Testes estatísticos de comparação dos resultados | 49 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 52 |
| 4.1. | Comparação e análise dos resultados de precipitação pluvial a partir de dados estimados pelo TRMM e observados pelas estações do INMET..... | 52 |
| 4.1.1. | Modelagem matemática de ajuste da precipitação pluvial dos dados estimados pelo TRMM a partir dos dados observados pelas estações do INMET.... | 54 |
| 4.1.2. | Estimativa de precipitação pluvial a partir do ajuste dos dados estimados pelo sistema TRMM..... | 55 |
| 4.1.3. | Avaliação estatística do ajuste dos dados de precipitação pluvial estimados pelo sistema TRMM em comparação com os observados (INMET)..... | 59 |
| 4.2. | Comparação e análise dos resultados de temperatura média do ar a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET.. | 61 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.1. Modelagem matemática de ajuste da temperatura média do ar dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET | 62 |
| 4.2.2. Estimativa de temperatura média do ar a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA..... | 63 |
| 4.2.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de temperatura média do ar estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET) | 67 |
| 4.3. Comparação e análise dos resultados de radiação solar incidente média a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET | 68 |
| 4.3.1. Modelagem matemática de ajuste da radiação solar incidente dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET..... | 69 |
| 4.3.2. Estimativa de radiação solar incidente a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA..... | 70 |
| 4.3.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de radiação solar incidente estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET)..... | 74 |
| 4.4. Comparação e análise dos resultados de umidade relativa média do ar a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET | 75 |
| 4.4.1. Modelagem matemática de ajuste dos dados de umidade relativa média do ar estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET... .. | 76 |
| 4.4.2. Estimativa de umidade relativa média do ar a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA..... | 77 |
| 4.4.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de umidade relativa média do ar estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET) | 80 |
| 4.5. Comparação e análise dos resultados de velocidade média do vento a partir de dados estimados pelo ETA e observados das estações do INMET | 82 |
| 4.5.1. Modelagem matemática de ajuste da velocidade média do vento dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET..... | 83 |
| 4.5.2. Estimativa de velocidade média do vento a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA..... | 84 |
| 4.5.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de velocidade média do vento estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET) | 87 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 89 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6. | CONCLUSÕES | 92 |
| 7. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |
| 8. | ANEXOS | 100 |
| | ANEXO A. Radiação extraterrestre diária (r_a) em diferentes latitudes para o 15° dia do mês..... | 100 |
| | ANEXO B. Horas de luz do dia (n) em diferentes latitudes para o 15° dia do mês..... | 100 |

1. INTRODUÇÃO

A agricultura possui grande importância econômica e social para o Brasil. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, o país cultivou na safra 2014/15 cerca de 57 milhões de hectares de grãos, com uma produção em torno de 200 milhões de toneladas (CONAB, 2015).

Em se tratando da cultura da soja, o Rio Grande do Sul (RS) destaca-se, pois é responsável por aproximadamente 15% de toda a produção do grão no país, com uma área cultivada de 5 milhões de hectares na safra 2014/15. Os acréscimos observados na área cultivada (5,6%) e na produtividade (8,1%), em relação à safra anterior (2013/14), possibilitaram ao estado alcançar, nessa safra, o recorde de produção da oleaginosa (CONAB, 2015).

Porém, quando a produção de grãos de soja diminui consideravelmente, ocorrem prejuízos econômicos à balança comercial do RS, principalmente caso tenha redução substancial de produtividade. Afora isso, dependendo da intensidade dessa redução, pode-se ter a diminuição da renda no campo, a elevação do preço final dos produtos e derivados ao consumidor, bem como o aumento de gastos com programas governamentais de indenização aos produtores.

Por isso, Farias et al. (2009) afirma que um dos principais fatores de risco para qualquer atividade agrícola é o clima, sendo que dentre as variáveis climáticas que interferem na produtividade destacam-se a temperatura do ar, a radiação solar e, principalmente, a precipitação pluvial.

No caso da soja, a temperatura do ar, a radiação solar incidente e a precipitação pluvial agem diretamente sobre os processos de desenvolvimento da cultura. Sabe-se que mesmo em uma safra de fortes adversidades climáticas, estas não são uniformes ao longo do tempo e do espaço para uma dada região agrícola. Ainda assim, seu impacto pode variar consideravelmente dependendo da variedade em questão, do estágio fenológico das plantas e da duração do ciclo, bem como da cultivar utilizada, entre outros fatores. Isto dificulta o acompanhamento da safra e a quantificação da produtividade final pelos órgãos responsáveis por tais informações.

Portanto, uma alternativa a ser considerada é a realização de monitoramento das condições climáticas das regiões, uma vez que essas

informações podem gerar estimativas da produtividade de grandes cultivos agrícolas quando empregadas em modelos agronômicos. Além disso, o monitoramento permite que se avaliem as relações entre a resposta da planta às variáveis climáticas durante todo o seu ciclo fenológico (BERKA et al., 2003).

Outra alternativa é acoplar os modelos agronômicos aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (HARTKAMP et al., 1999), que permitem o acompanhamento espacial das condições definidoras da produtividade, podendo apontar os períodos e as regiões em que estas foram adversas ao cultivo.

Todavia, a aplicação desses modelos em grandes regiões agrícolas esbarra na escassez de estações meteorológicas e na dificuldade de acesso aos dados coletados em tempo real, principalmente em regiões de fronteira agrícola, o que dificulta sua aplicação para a tomada de decisões no momento oportuno. Uma opção aos dados coletados pelas estações meteorológicas é o emprego de dados oriundos de modelos numéricos de previsão de tempo, os quais fornecem previsão do tempo para vários dias, simulando matematicamente a evolução de processos físicos da atmosfera a partir de um conjunto de equações diferenciais e apropriadas condições iniciais e de fronteira.

O modelo numérico para previsão de tempo operacional, adotado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), é o modelo ETA (CHOU, 1996), assim chamado devido ao seu sistema de coordenadas. Alguns estudos já demonstraram a possibilidade de utilização dos dados fornecidos pelo ETA no monitoramento da safra e na estimativa da produtividade de cultivos agrícolas, como o café em Minas Gerais (ROSA et al., 2010), a cana-de-açúcar em São Paulo (SUGAWARA, 2010; PÍCOLLI et al., 2009) e a soja no Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo (RIZZI et al., 2006). Os dados do modelo ETA são disponibilizados diariamente pelo CPTEC para boa parte da América do Sul em uma resolução espacial horizontal de 20 x 20 km para diversas variáveis meteorológicas.

Outra ferramenta muito importante para estimativas de precipitação pluvial é o sistema TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), que realiza

estimativas para as regiões tropicais e subtropicais do globo terrestre, compreendidas entre 50° N e 50° S (KAWANISHI et al., 2000) em uma resolução espacial de 0,25° x 0,25° (aproximadamente 25 x 25 km).

A possibilidade da utilização operacional desses dados em modelos agrônômicos vem ao encontro da necessidade crescente de informações sobre a variabilidade espacial e temporal da produção agrícola no Brasil, especialmente em regiões suscetíveis a instabilidades do clima que causam consideráveis variações interanuais na produtividade dos cultivos, como o RS.

Ressalta-se, que os modelos de previsão de tempo ETA e o sistema TRMM não irão substituir as estações meteorológicas convencionais, mas sim, fornecer novas alternativas de acesso às informações das condições meteorológicas para as regiões que cultivam a soja e outros cultivos.

É importante ressaltar, que medidas diretas de variáveis fornecidas por estações meteorológicas de superfície, tem baixa resolução espacial e são escassas em regiões remotas, tais como florestas tropicais. Portanto, dados de satélites, com TRMM, e de modelos numéricos, como o ETA, são uma alternativa viável de alta resolução espacial e temporal. Entretanto, os satélites são medidas remotas, portanto menos precisas do que medidas diretas e modelos numéricos, por sua vez, fornecem as variáveis para um volume de atmosfera de acordo com a resolução espacial da grade. Contudo, a comparação de dados calculados por modelo são médias dentro de uma grade volumétrica e não devem ser comparados diretamente com dados pontuais de estações de meteorológicas.

Tendo em vista o tamanho da complexidade em se modelar os processos atmosféricos e o fato destes não serem retratados de maneira fiel, quando modelados, os dados observados são importantes para conhecimento de erros associados aos modelos, validação e calibração (DERECZYNSKI et al., 2000).

Apesar de modelos numéricos de previsão de tempo e clima gerarem estimativas cada vez mais precisas, estas nunca serão exatas, devido à natureza caótica da atmosfera. Porém, estas previsões podem dar suporte à estimativa de produtividade agrícola da soja no RS, se calibradas através de técnicas estatísticas, com dados de outras fontes, o que não foi realizado para

os trabalhos de ROSA et al. (2010), SUGAWARA (2010), PÍCOLLI et al. (2009) e RIZZI et al. (2006).

Hipótese

No âmbito da sua utilização em modelos agronômicos de monitoramento e estimativa da produtividade agrícola da soja, a hipótese do presente trabalho é que dados meteorológicos gerados pelo modelo regional de previsão de tempo ETA e pelo sistema TRMM podem ser utilizados para estimar aqueles observados por estações meteorológicas convencionais no Rio Grande do Sul.

Objetivo geral

Comparar os dados de variáveis meteorológicas geradas pelo modelo regional de previsão de tempo ETA e pelo sistema TRMM com dados observados por estações meteorológicas convencionais no que tange a sua utilização em modelos agronômicos de monitoramento e estimativa da produtividade agrícola da soja.

Objetivos específicos

a) comparar estatisticamente os dados meteorológicos estimados pelo ETA e pelo TRMM com os observados pelas estações convencionais para as safras de 2006/07 a 2008/09, visando a geração de modelos matemáticos de ajuste;

b) ajustar os parâmetros do modelo ETA e do sistema TRMM a partir dos dados obtidos no item a, para as safras de 2009/10 a 2011/12;

c) comparar estatisticamente os dados meteorológicos estimados pelo ETA e pelo TRMM e ajustados pelos modelos em relação aos observados pelas estações convencionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Histórico da soja

Conforme a classificação botânica, a soja pertence à família Fabaceae, subfamília Faboideae, gênero *Glycine*, espécie *Glycine max* (L.) Merrill. Trata-se de uma planta nativa da Ásia, considerada uma das culturas mais antigas daquela área. Com base na distribuição de *Glycine ussuriensis*, provável progenitor da soja atualmente cultivada, a origem seria na China, entre latitudes de 30° a 45° N, nas regiões norte e central (COSTA, 1996; MUNDSTOCK e THOMAS, 2005).

A mais antiga referência sobre soja na literatura aparece em um livro de medicina intitulado "Pen Ts'ao Kang Mu" (Matéria Médica), escrito pelo Imperador Shen Nung. Na literatura, as referências a esta obra aparecem com seis datas diferentes de publicação, entre os anos de 2838 a 2383 a.C. (ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA, 2000).

Até aproximadamente 1894, término da guerra entre a China e o Japão, a produção de soja ficou restrita à China. Apesar de ser conhecida e consumida pela civilização oriental por milhares de anos, só foi introduzida na Europa no final do século XV, como curiosidade, nos jardins botânicos da Inglaterra, França e Alemanha (COSTA, 1996; EMBRAPA, 2007).

Na segunda década do século XX, o teor de óleo e proteína do grão começou a despertar o interesse das indústrias mundiais. No entanto, as tentativas de introdução comercial do cultivo do grão na Rússia, Inglaterra e Alemanha fracassaram, provavelmente, devido às condições climáticas desfavoráveis (EMBRAPA, 2007).

No Brasil, a soja parece ter sido primeiramente introduzida na Bahia, em 1882. Em 1908 foi introduzida em São Paulo, por imigrantes japoneses, e em 1914 foi introduzida no RS pelo professor Craig, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Foi no RS que a soja começou a ser cultivada em grande escala. O município de Santa Rosa foi o pólo de disseminação da cultura, que inicialmente expandiu-se pela região das missões. Até meados dos anos 1930,

esta era a região produtora de soja (MUNDSTOCK e THOMAS, 2005; SCHUSTER, 2007).

A explosão do preço da soja no mercado mundial, em meados de 1970, despertou ainda mais o interesse dos agricultores e do próprio governo brasileiro. O país se beneficia de uma vantagem competitiva em relação aos demais países produtores: o escoamento da safra brasileira ocorre na entressafra americana, quando os preços atingem as maiores cotações (ARAUJO, 2008).

Além disso, o baixo custo de produção em relação ao alto valor nutritivo, principalmente em proteínas especiais, faz da soja uma das melhores e mais baratas fontes de alimento energético em termos de calorias por unidade de custo de produção. Desde então, o país passou a investir em tecnologia para adaptação da cultura às condições brasileiras, processo liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (MARION, 2004; EMBRAPA, 2007).

Investimentos em pesquisa levaram à "tropicalização" da soja, permitindo, pela primeira vez na história, que o grão fosse plantado com sucesso, em regiões de baixas latitudes, entre o Trópico de Capricórnio e a Linha do Equador. Essa conquista dos cientistas brasileiros revolucionou a história mundial da soja e seu impacto começou a ser notado pelo mercado a partir do final da década de 1980 e mais notoriamente na década de 1990, quando os preços do grão começaram a cair.

Até a década de 1980, as lavouras de soja concentravam-se nos estados da região Sul do Brasil. Com o desenvolvimento de cultivares adaptados aos solos e ao clima das diferentes regiões brasileiras, a soja se espalhou também pelas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Atualmente, os principais estados produtores de soja são Mato Grosso (28%), Paraná (19%), Rio Grande do Sul (15%), Goiás (11%), Mato Grosso do Sul (7%) e outros estados totalizam 20% (TABELA 1). A Figura 1 apresenta as produções por estado somente para municípios que produzem acima de 5.000 toneladas.

Tabela 1 - Comparativo de área, produtividade e produção de soja estimada para a safra 2014/15 para os maiores estados produtores do Brasil

| UF | ÁREA (em mil ha) | PRODUT. (em kg ha ⁻¹) | PROD. (em mil ton) |
|----|------------------|-----------------------------------|--------------------|
| MT | 8.805,2 | 3.165 | 27.868,5 |
| RS | 5.216,0 | 2.816 | 14.688,3 |
| PR | 5.203,7 | 3.293 | 17.135,8 |
| GO | 3.241,3 | 2.685 | 8.702,9 |
| MS | 2.300,5 | 3.060 | 7.039,5 |

Adaptado da CONAB (2015)

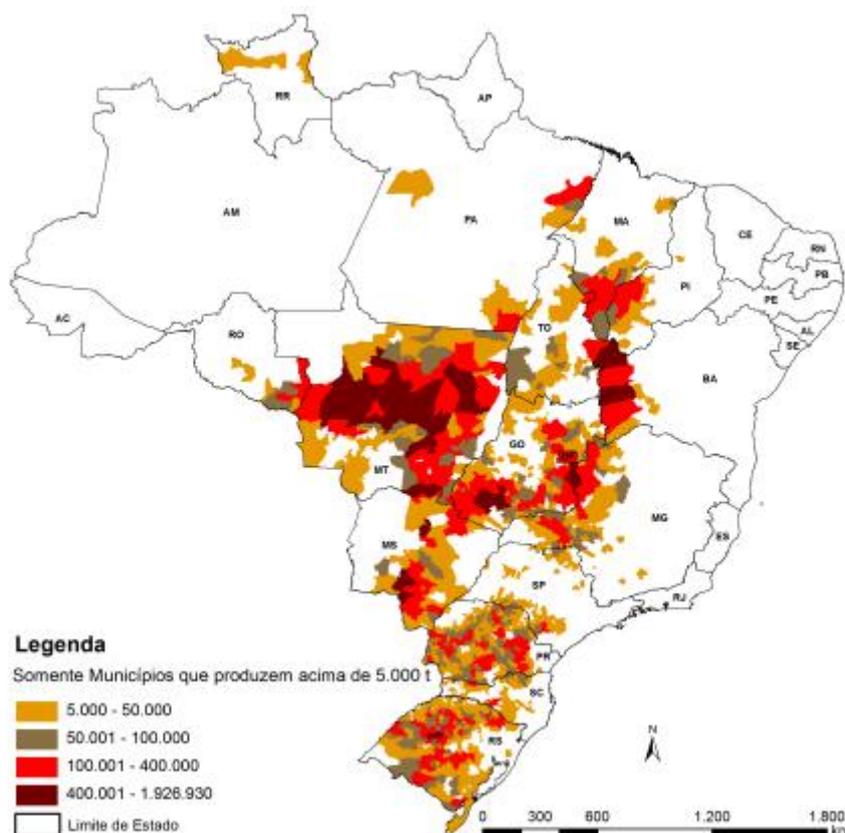


Figura 1 – Mapa da produção agrícola da soja no Brasil, por estado, para municípios que produzem acima de 5.000 toneladas.

Fonte: CONAB (2015)

Essa expansão e o desenvolvimento por ela gerado possibilitou ao Brasil tornar-se o segundo maior produtor mundial de soja da atualidade (FIGURA 2), sendo responsável por aproximadamente 30% da produção mundial. Além disso, passou a ocupar o posto de segundo maior exportador, com 45,65 milhões de toneladas, o que representa cerca de 39% do total das exportações

mundiais do grão (USDA, 2015). E, ostenta a posição de maior produtor do Hemisfério Sul, com 28 milhões de hectares cultivados (IBGE, 2015).

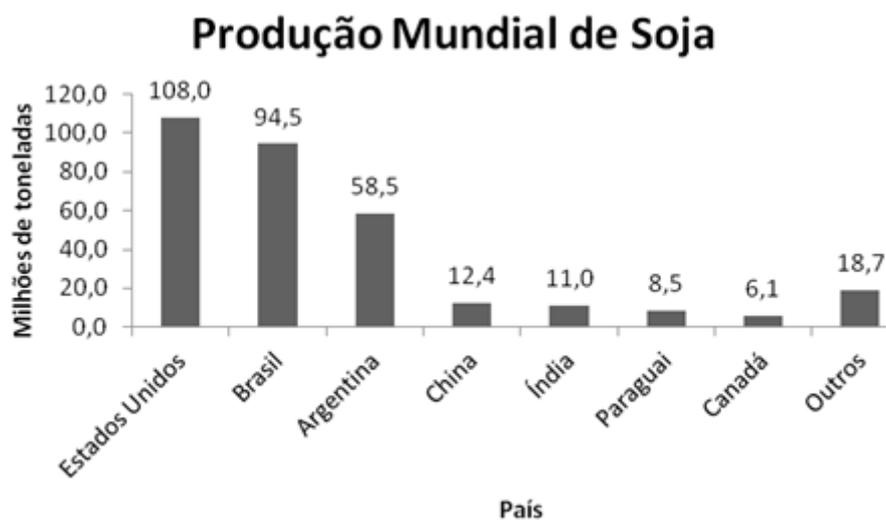


Figura 2 – Produção mundial de soja.

Fonte: Adaptado USDA (2015)

2.2. Produção e produtividade da soja no Rio Grande do Sul

A partir de 2005, percebeu-se uma expansão de áreas cultivadas no estado (FIGURA 3), impulsionada pela estabilidade e alta de preços do mercado da soja, bem como pela tecnificação adotada na cultura, colocando o RS entre os maiores produtores do grão no Brasil, com uma produção de 14.688,3 milhões de toneladas e uma produtividade de 2.816 kg ha⁻¹ na safra 2014/15 (CONAB 2015).

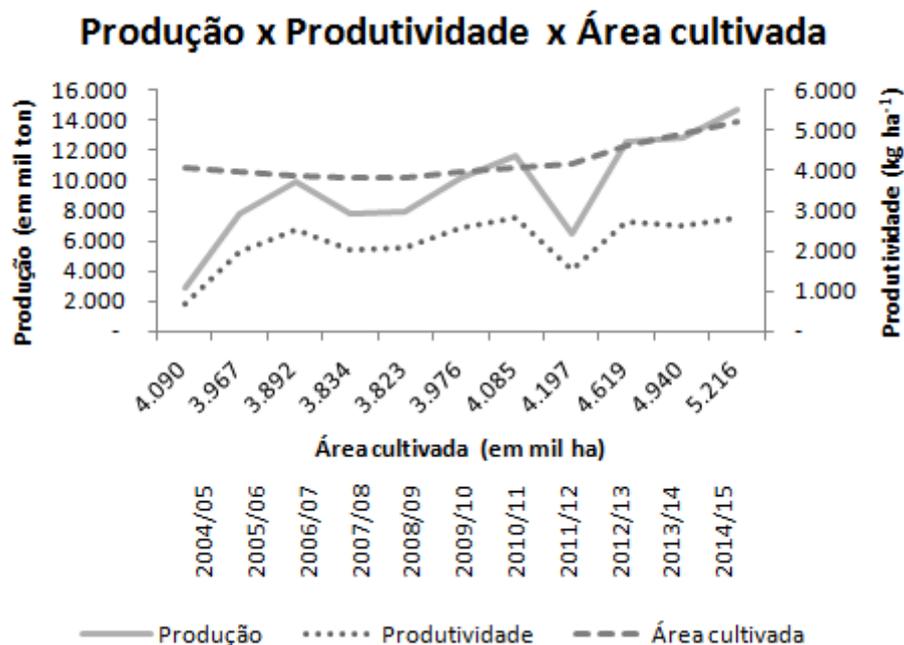


Figura 3 – Produção, produtividade e área cultivada de soja no RS para safras 2004/05 a 2014/15.

Fonte: Adaptado CONAB (2015)

Entretanto, percebe-se que as condições climáticas nem sempre são favoráveis ao cultivo da safra de soja na RS. Como exemplo, pode-se citar as estiagens, que interferem diretamente nos principais estádios de desenvolvimentos dessa cultura (item 2.3), fazendo com que a produtividade e, conseqüentemente, a produção diminuam.

Essa situação, provavelmente, justifique a queda de produtividade observada nas safras 2007/08 (2028 kg ha⁻¹) e 2008/09 (2070 kg ha⁻¹) - quando comparadas com o crescimento das três safras anteriores - e, principalmente, na safra 2011/12 (1555 kg ha⁻¹), que apresentou a menor produtividade do estado na última década.

2.3. Bioclima favorável à produção de soja

Sabe-se que a soja pode ser cultivada em diversas áreas do globo, desde regiões de clima temperado-frio, como é o caso do norte dos Estados Unidos, até regiões equatoriais quentes como o Centro-Oeste do Brasil. Mas segundo Farias (2006), a imprevisibilidade das variações climáticas a tornam o principal fator de insucesso na exploração das culturas e de todos os fatores

inerentes à produção agrícola, já que é de difícil controle e de maior ação limitante sobre as máximas produtividades.

Embora a área plantada de soja tenha se ampliado nos últimos anos, as adversidades climáticas, aliadas aos problemas causados por pragas e doenças como a ferrugem asiática ainda provocam frustrações nas safras dessa cultura. Um dos fatores de sucesso da produtividade da cultura está na dependência de se utilizar variedades adaptadas às condições climáticas da região. Dentre os principais elementos do clima que podem influenciar no desenvolvimento da cultura tem-se a disponibilidade hídrica e a temperatura, porém existem outras secundárias, como o fotoperíodo e a umidade do ar (MOTA, 1983).

Consideram-se quatro fases para a cultura da soja: desenvolvimento vegetativo, florescimento, enchimento de grãos e maturação, sendo que seu ciclo fenológico pode variar de 75 a 200 dias, contados do desenvolvimento vegetativo até a maturação (SEDIYAMA et al., 1996). Entretanto, uma mesma cultura pode atingir diferentes ciclos conforme as condições de manejo e, principalmente, das condições edáficas e climáticas entre regiões distintas. No Brasil, o período de semeadura pode variar entre os meses de outubro a dezembro, mas geralmente 90% da semeadura ocorre até o mês de novembro, pois é neste mês que se concentram as condições termofotoperiódicas ideais e o início da estação chuvosa em grande parte do país, permitindo assim, um melhor desenvolvimento da cultura. Conforme Costa (1996), a maioria das cultivares registradas no RS estão classificadas como ciclo médio (133 a 142 dias) e semiprecoce (129 a 138 dias).

A falta de água em momentos críticos de desenvolvimento das plantas pode influenciar direta e negativamente na produção de grãos. A disponibilidade de água para a cultura de soja é importante, principalmente em dois períodos de desenvolvimento: entre germinação - emergência e floração - enchimento dos grãos. Praticamente entre os meses de janeiro e fevereiro é que se identificam possíveis impactos que podem atingir a produtividade dessa cultura (FIGURA 4). De acordo com Farias et al. (2007), para a obtenção da produtividade máxima, a necessidade de água para a cultura da soja, durante todo o seu ciclo, varia entre 450 e 800 mm dependendo das condições

climáticas, do manejo da cultura e da duração do seu ciclo. Evidencia-se que uma das principais causas da variação da produtividade da soja no Brasil tem sido a ocorrência de déficit hídrico.

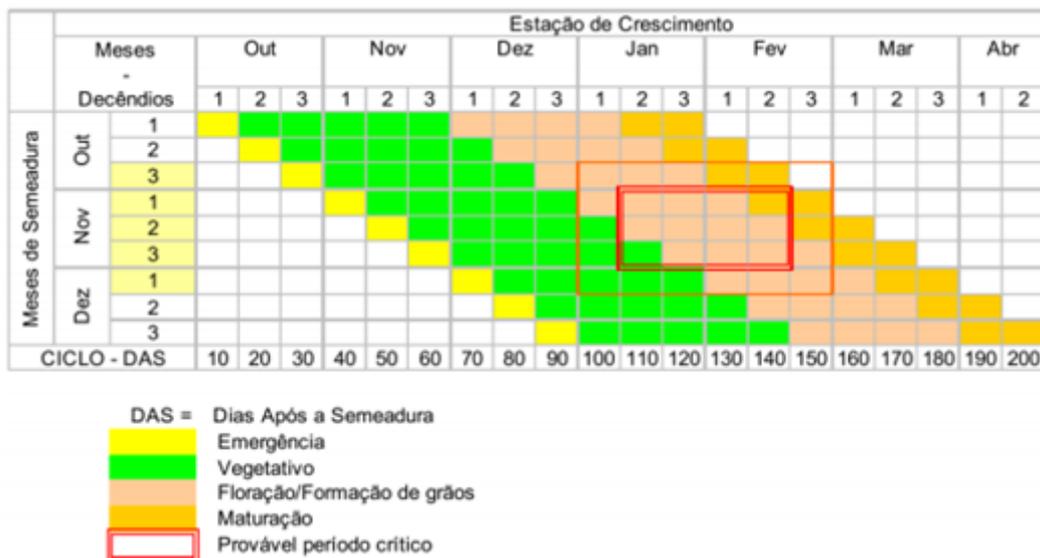


Figura 4 – Calendário agrícola médio para cultura de soja no RS.

Fonte: Almeida (2000)

No período vegetativo a deficiência hídrica prolongada submete a planta de soja a estresse, manifestando-se na forma de plantas de porte reduzido, menor índice de área foliar, influenciando o metabolismo geral da planta (NEUMAIER et al., 2000). Os efeitos da deficiência hídrica sobre o potencial da produtividade de soja irão depender da intensidade, duração, época de ocorrência e interação com outros fatores determinantes para a produtividade de grãos.

No caso da temperatura do ar, sua principal influência sobre a cultura dá-se na fase de desenvolvimento da cultura. A temperatura ideal para o seu crescimento e desenvolvimento é igual a 30 °C, porém se adapta em temperaturas menores até 20 °C. De maneira geral, o regime térmico não consiste em um fator tão limitante para a produtividade de grãos quanto à precipitação.

2.4. Emprego de modelos no monitoramento da atividade agrícola

As previsões do tempo geradas por modelos numéricos devem ser verificadas, para que possa ser determinado seu índice de acerto. Junior et al. (2009) avaliaram a aptidão do modelo ETA com resolução espacial de 40 x 40 km, para um horizonte de 120 dias, como *input* de modelos de estimativa de produção agrícola para a região Centro-Sul do Brasil. Os autores concluíram que embora ocorram limitações do modelo em reproduzir o estado da circulação geral da atmosfera e suas interações com a topografia da área analisada, o que por sua vez provoca erros nas estimativas dos parâmetros avaliados, o modelo pode ser empregado para esse fim, porém recomendam extrair os erros sistemáticos encontrados nas previsões.

As informações das previsões de tempo através do modelo ETA auxiliam na programação do manejo agrícola, fornecendo previsões de chuva com três dias de antecedência. Para previsões climáticas sazonais, isto é, de até 120 dias de antecedência, as avaliações apresentam índices de acerto menor que as previsões de tempo para até três dias de antecedência porque os erros de previsão crescem com o prazo da integração do modelo (CHOU et al., 2005).

Rizzi et al. (2006) monitoraram e estimaram a produtividade agrícola da cultura de soja nos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul na safra 2004/05, utilizando um modelo agrônômico integrado ao aplicativo SPRING (Sistema de PRocessamento de INformações Georeferenciadas). As variáveis meteorológicas utilizadas na execução desse modelo pelos autores (temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), velocidade do vento (km dia^{-1}), umidade relativa do ar (%), radiação solar incidente ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação pluvial diária (mm)) foram geradas utilizando as previsões do modelo numérico de previsão do tempo ETA, com resolução espacial horizontal de 40 x 40 km, devido à escassez de estações meteorológicas na área rural, para disponibilizar dados meteorológicos em melhor escala espacial para a execução do modelo agrônômico. Os autores estimaram a produtividade agrícola para cada fase da cultura de soja e compararam com os dados fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), verificando que as estimativas do modelo agrônômico adotado acompanharam aquelas disponibilizadas pelo IBGE para os três estados. Os autores concluíram ainda que as previsões fornecidas pelo

modelo ETA, apresentam um bom potencial de uso em modelos agronômicos de estimativa de produtividade agrícola, além de possibilitarem o monitoramento do desenvolvimento de culturas agrícolas em grandes regiões.

2.5. Modelo ETA

Segundo Junior et al. (2009), o modelo ETA, cujo nome é dado pela letra grega *eta* (η), foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado e o Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia e posteriormente foi operacionalizado pelo *National Meteorological Center* atualmente *National Center for Environmental Prediction* (NCEP). No Brasil, o modelo ETA foi instalado no CPTEC em 1996 (CHOU, 1996).

Atualmente os períodos de previsão são de 120 horas, mas originalmente as previsões do ETA eram de 48 horas, sendo geradas duas vezes ao dia, às 0h e às 12h UTC. Na América do Sul, o modelo ETA tem sido utilizado para estudos de diferentes fenômenos meteorológicos como, por exemplo: jatos de baixos níveis (SAULO et al., 2000), trocas de massas de ar (SELUCHI & CHOU, 2003) e vento (SELUCHI et al., 2003).

As condições iniciais e de fronteira ETA (ou os campos para tempo inicial) são fornecidas pelo CPTEC, em uma área para *download*, para os usuários cadastrados. As condições iniciais descrevem a atmosfera em três dimensões (x, y, z), com os valores de temperatura, vento, umidade, pressão atmosférica especificadas na grade do modelo. Ou seja, é a partir dessa condição inicial que o modelo é integrado no tempo para determinar a evolução temporal da atmosfera, ou para fazer previsão.

Os resultados do ETA são apresentados em uma grade cartesiana, com o posicionamento dos pontos descritos em coordenadas de latitude e longitude, em escala temporal, uma vez que os fenômenos atmosféricos e as variáveis atmosféricas como precipitação e temperatura ocorrem no espaço e tempo. O software GrADS (*Grid Analysis and Display System*) desenvolvido pelo *Institute of Global Environment and Society* (IGES) e pelo *Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies* (COLA), foi usado nesse estudo e também é muito utilizado em aplicações meteorológicas, por fornecer facilidades para trabalhar

com dados referenciados no espaço e tempo em diferentes formatos. O GrADS é de domínio público e está disponível no *site* <http://www.iges.org/grads/>.

2.6. Estações meteorológicas

Uma estação meteorológica convencional consiste num conjunto de instrumentos em que as variáveis meteorológicas são coletadas por um observador. As estações meteorológicas são úteis para análise e previsão de tempo e clima, bem como para a verificação e validação de modelos e numéricos. Ela é composta de sensores isolados que registram continuamente as variáveis meteorológicas (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação pluvial, radiação solar, direção e velocidade do vento etc.), que são lidos e anotados por um observador a cada intervalo de registro e este os envia a um centro coletor, onde os dados são armazenados (INMET, 2015).

2.7. Projeto TRMM

O satélite TRMM – *Tropical Rainfall Measuring Mission* - é um projeto em parceria entre a NASA - *National Aeronautics and Space Administration* e a JAXA – *Japan Aerospace Exploration Agency*, e foi lançado em 27 de novembro de 1997 como satélite experimental, porém seu desempenho excedeu muito as expectativas iniciais. E, em virtude disso, passou a ser considerado um satélite operacional, cujo objetivo específico era o de monitorar e estudar a precipitação nos trópicos, além de verificar como a mesma influencia o clima global (KUMMEROW et al., 2000). Ou seja, tornou-se um satélite para fins operacionais que oferece algumas das mais valiosas imagens para acompanhamento, previsão e análise de precipitação.

O satélite possui órbita oblíqua não-heliossíncrona bastante baixa (inicialmente 350 km, desde 2001 cerca de 403 km), de forma que o período de translação é bastante curto (91 minutos), permitindo resoluções espacial e temporal comparativamente eficientes (NÓBREGA, 2008). Os instrumentos a bordo do TRMM são: imageador de microondas (TMI) – sensor de microondas passivo projetado para fornecer informações quantitativas de precipitação

sobre uma ampla área sob o satélite (quantifica o vapor de água, a água de nuvens e a intensidade da precipitação na atmosfera); radar de precipitação (PR) – determina a intensidade e a distribuição da chuva, o seu tipo (convectiva ou estratiforme), e a altura pluvial; radiômetro nas bandas do visível e do infravermelho (VIRS) – trata-se de um instrumento primário do TRMM, pois é um indicador muito indireto de chuva. Assim, é capaz de delimitar a chuva e serve como referência para outras medidas feitas utilizando os satélites POES e GOES (ARAÚJO, 2006); sensor de energia radiante da superfície terrestre e das nuvens (CERES) - monitora a energia trocada entre o Sol, a atmosfera terrestre, a superfície e nuvens, e o espaço; e sensor para imageamento de relâmpagos (LIS) - é um instrumento altamente sofisticado capaz de detectar e localizar um relâmpago na região tropical do globo. A Figura 5 apresenta uma representação esquemática do processo de aquisição de dados do TRMM.

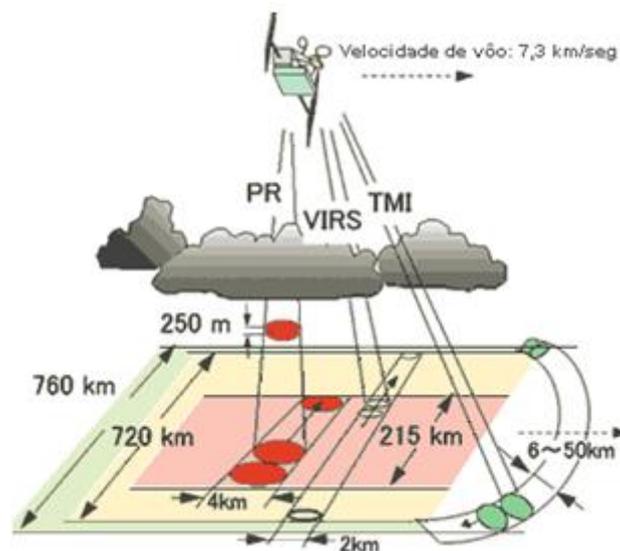


Figura 5 – Representação esquemática da aquisição de dados pelo sensor de microondas (TMI, varredura verde), radiômetro (VIRS, varredura amarela) e radar meteorológico (PR, varredura vermelha) do satélite TRMM.

Fonte: Collischonn (2006)

O projeto TRMM gera diversos produtos (estimativas) de acordo com a combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo. Para isso, utiliza estimativas de precipitação por microondas do TMI, corrigidas através de informações sobre a estrutura vertical das nuvens, obtidas do PR. Se faz valer também, para refinar as estimativas, de um programa paralelo de validação em

campo (*Ground Validation* ou GV), contando com radares meteorológicos em diversas estações ao longo da faixa intertropical (NÓBREGA, 2008).

Dessa maneira, os dados são acumulados e processados para criar imagens que mostrem a precipitação média diária em milímetros (mm dia^{-1}). Essas estimativas são convertidas para acumulados diários através de interpolação para preencher as lacunas na continuidade temporal, gerando o produto 3B42.

Assim, por gerar um produto de alta resolução temporal (3 horas) e espacial ($0,25^\circ$), na faixa entre 50° O e 50° S, e disponibilizar estimativas de precipitação em valores acumulados da quinzena, prazo que pode ser considerado relativamente curto, é que os dados provenientes do TRMM são muito empregados nos estudos climáticos atuais.

A NASA e JAXA, optaram por cessar as operações científicas e coleta de dados do TRMM no dia 8 de abril de 2015, após a nave espacial ter esgotado suas reservas de combustível.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local de estudo

A área escolhida como estudo de caso abrange todos os 497 municípios do RS (FIGURA 6). Este faz parte da Região Sul juntamente com os estados de Santa Catarina e Paraná, possuindo uma área de 282.062 km², o que corresponde a pouco mais de 3,3% do território brasileiro. Seus limites políticos situam-se aproximadamente entre os paralelos 27°03' e 33°45' de latitude Sul e entre os meridianos 49°42' e 57°40' de longitude Oeste.

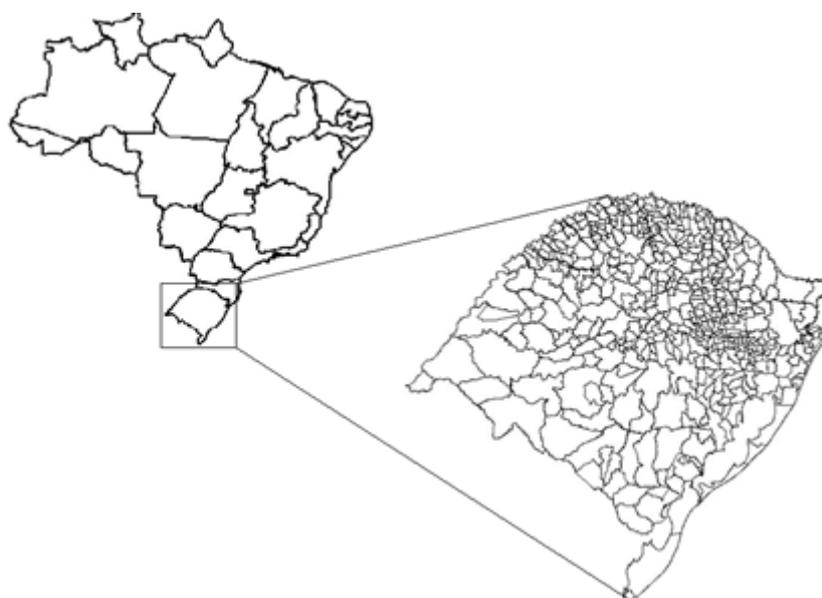


Figura 6 – Localização da área de estudo.

Para comparar os dados de variáveis meteorológicas geradas pelo modelo regional de previsão de tempo ETA e pelo sistema TRMM em relação aos observados por estações meteorológicas convencionais, foi utilizado um conjunto de dados temporais de 2006/07 a 2011/12 (seis safras).

As variáveis meteorológicas utilizadas foram temperatura média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (km dia⁻¹), precipitação pluvial (mm) e radiação solar incidente (cal cm⁻² dia⁻¹). Analisaram-se 13 quinzenas de 01 de outubro a 15 de abril, obedecendo o calendário agrícola da soja no RS, uma vez que o estado pode apresentar tanto áreas de semeadura

precoce (em meados de outubro), em que a senescência ocorre em meados de fevereiro, quanto tardios, ocorrendo entre janeiro e maio.

Tendo em vista que os modelos agronômicos de monitoramento e estimativa de produtividade geralmente são utilizados em uma resolução temporal de 15 dias, optou-se por organizar todos os dados meteorológicos diários em médias quinzenais, salvo os dados referentes à precipitação pluvial, que foram somados quinzenalmente. Esta escala temporal permite o acompanhamento da produtividade da soja ao longo dos seus estádios de crescimento e desenvolvimento, o que engloba o período compreendido desde a implantação da cultura até a sua senescência.

3.2. Dados de estações meteorológicas

Foram utilizados dados diários de precipitação (mm), umidade relativa média (%), temperatura máxima e mínima ($^{\circ}\text{C}$), velocidade média do vento (m s^{-1}) e insolação (horas), obtidos a partir de 19 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas na área de estudo (FIGURA 7). Os referidos dados serviram para gerar médias quinzenais para todas as variáveis, exceto para a precipitação, a qual foi feito o somatório quinzenal.

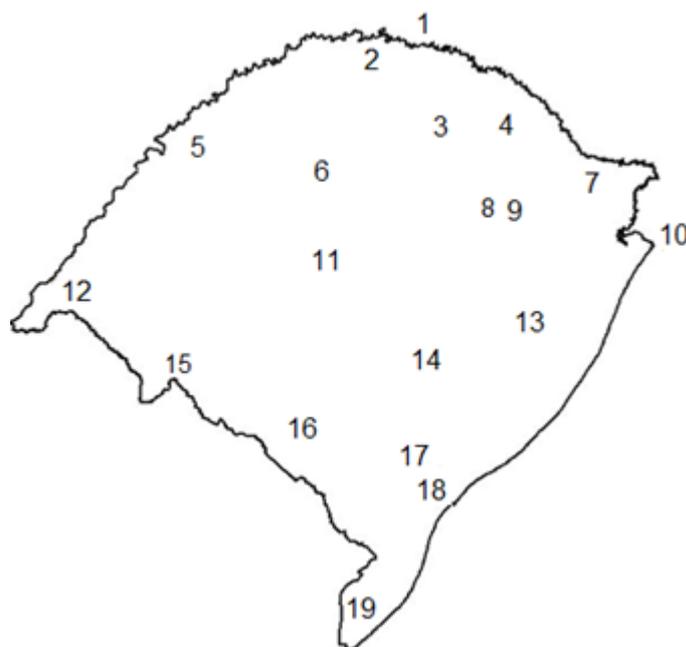


Figura 7 – Distribuição espacial das estações meteorológicas usadas no estudo.

As estações meteorológicas que não apresentaram dados e/ou tinham um número de dados insuficientes para a avaliação foram excluídas. As estações utilizadas são identificadas pelo código do INMET, município de localização, longitude e latitude, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Localização das estações meteorológicas

| Ponto | Estação | Cidade - RS | Longitude (°O) | Latitude (°S) |
|-------|---------|-------------------------|----------------|---------------|
| 1 | 83883 | Chapecó | -52,61 | -27,11 |
| 2 | 83881 | Iraí | -53,23 | -27,18 |
| 3 | 83914 | Passo Fundo | -52,4 | -28,21 |
| 4 | 83916 | Lagoa Vermelha | -51,5 | -28,21 |
| 5 | 83907 | São Luiz Gonzaga | -55,01 | -28,4 |
| 6 | 83912 | Cruz Alta | -53,6 | -28,63 |
| 7 | 83919 | Bom Jesus | -50,43 | 28,66 |
| 8 | 83941 | Bento Gonçalves | -51,51 | -29,15 |
| 9 | 83942 | Caxias do Sul | -51,2 | -29,16 |
| 10 | 83948 | Torres | -49,73 | -29,35 |
| 11 | 83936 | Santa Maria | -53,7 | -29,7 |
| 12 | 83927 | Uruguaiana | -57,08 | -29,75 |
| 13 | 83967 | Porto Alegre | -51,16 | -30,05 |
| 14 | 83964 | Encruzilhada do Sul | -52,51 | -30,53 |
| 15 | 83953 | Santana do Livramento | -55,6 | -30,83 |
| 16 | 83980 | Bagé | -54,1 | -31,33 |
| 17 | 83985 | Pelotas | -52,41 | -31,78 |
| 18 | 83995 | Rio Grande | -52,11 | -32,03 |
| 19 | 83997 | Santa Vitória do Palmar | -53,35 | -33,51 |

Adaptado INMET (2015)

Os dados observados referentes à velocidade do vento e insolação sofreram alterações nas unidades para efeito de comparação com aqueles estimados pelo modelo ETA. A velocidade do vento foi transformada de $m s^{-1}$ para $km dia^{-1}$ a partir de um fator de conversão multiplicativo (86,4). A insolação (horas) foi transformada para radiação solar incidente ($cal cm^{-2} dia^{-1}$). Para tanto, utilizou-se a Equação 3.1 (ANGSTRÖN, 1924; PRESCOTT, 1940).

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a \quad (3.1)$$

em que: R_s é a radiação solar de onda curta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); n é o número de horas observadas de duração do sol (horas); N é o número máximo de horas de luminosidade do dia (horas); n/N relação de luminosidade entre as horas observadas e o número máximo de horas de sol; R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); $a_s + b_s$ é a fração da radiação extraterrestre que atinge a Terra em dias claros ($n=N$) – a_s e b_s são parâmetros de correção adotados em locais onde não existem dados reais de radiação solar. Os valores de a_s e b_s são, respectivamente, 0,25 e 0,5.

Os valores de R_a e N para diferentes latitudes estão listados nos Anexos A e B, respectivamente. Para a obtenção dos valores referentes ao 30º dia do mês houve a necessidade de se realizar interpolações com os valores de R_a e N desse dia com os valores de R_a e N do 15º dia do mês seguinte. O fator de conversão empregado na transformação do R_s de ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) para ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi 23,9, segundo Allen et al. (1998).

Os dados observados de temperatura do ar precisaram ser transformados de diários para médias quinzenais. Para tanto, o primeiro passo consistiu em utilizar as temperaturas do ar máximas e mínimas do dia, disponibilizadas pelo INMET, para se obter a temperatura média diária, a partir da realização de uma média aritmética entre elas (EQUAÇÃO 3.2).

$$T_{\text{média diária}} = \frac{T_{\text{máxima diária}} + T_{\text{mínima diária}}}{2} \quad (3.2)$$

em que: $T_{\text{média diária}}$ é a temperatura média do dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{máxima diária}}$ é a temperatura máxima do dia ($^{\circ}\text{C}$); $T_{\text{mínima diária}}$ é a temperatura mínima do dia ($^{\circ}\text{C}$).

Já no segundo passo, realizou-se uma média aritmética com os dados médios diários de temperatura para cada uma das 13 quinzenas da safra agrícola da soja, o que permitiu que se obtivessem as temperaturas médias quinzenais (EQUAÇÃO 3.3).

$$T_{\text{média quinzenal}} = \frac{\sum_{i=1}^{15} T_{\text{média diária}}}{15} \quad (3.3)$$

em que: $T_{\text{média quinzenal}}$ é a temperatura média da quinzena (°C); $T_{\text{média diária}}$ é a temperatura máxima do dia (°C).

3.3. Dados do TRMM

Para a precipitação estimada foram utilizados dados do algoritmo 3B42 do satélite TRMM, obtidos a partir do endereço: http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=TRMM_3B42_Daily&gsid=TRMM_3B42_Daily_2804:0:2000:161::191_1425321747&selectedWSID=&app=&selectedMap=&hiddenResults=142532186618294.

O produto 3B42 gera estimativas de precipitação de três em três horas com resolução espacial de 0,25° x 0,25° graus, sendo os dados disponibilizados no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) em mm dia⁻¹, ou acumulados no período estabelecido pelo usuário.

Tendo em vista que para a precipitação considerou-se o somatório das precipitações diárias da quinzena, os dados foram organizados em valores acumulados de precipitação quinzenal, de acordo com o descrito no item 3.1. Em seguida, os dados foram distribuídos espacialmente na região de estudo em grades regulares de 0,25° x 0,25° (FIGURA 8).



Figura 8 – Distribuição espacial dos dados de precipitação gerados pelo TRMM (grade regular de 0,25° x 0,25°), para a região compreendida pelo estudo.

3.4. Dados do modelo ETA

Utilizaram-se as variáveis meteorológicas disponibilizadas pelo CPTEC/INPE em <http://bdg.cptec.inpe.br/>, para previsão de 36 horas do modelo regional ETA, disponibilizados nos horários de 00:00, 06:00, 12:00, 18:00, 24:00 e 30:00 horas UTC (*Coordinated Universal Time*), com condição inicial às 00:00 UTC, resolução espacial horizontal de 20 x 20 km e altura geoespacial de 1000 hPa (hectoPascal). Foram empregados os dados meteorológicos de temperaturas do ar máxima e mínima (°C), componente U e V do vento a 10 metros de altura ($m s^{-1}$), umidade relativa do ar (%) e radiação solar incidente ($W m^{-2}$).

Na primeira fase, transformaram-se os dados correspondentes aos horários de 06:00, 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC para dados diários, com início as 12:00 horas UTC e término no horário 06:00 horas UTC. Neste trabalho, optou-se por utilizar os dados de previsão a partir das 12:00 horas UTC e não da 00:00 hora UTC, uma vez que estes estão associados a menores incertezas.

Os cálculos realizados para adequação dos dados foram realizados por meio do aplicativo GRADs e estão descritos a seguir nas Equações 3.4 a 3.8.

Para a variável temperatura média do ar, realizou-se a média entre a temperatura observada às 18:00 horas UTC (considerada a temperatura máxima diária) e às 06:00 horas UTC (considerada a temperatura mínima diária) (ALLEN et al., 1998) de acordo com a Equação 3.4.

$$T_{med} = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) - x = \left(\frac{T_{18:00} + T_{06:00}}{2} \right) - x \quad (3.4)$$

sendo x o fator de conversão da temperatura do ar de K para °C, cujo valor é 273,15.

A magnitude da variável velocidade do vento foi obtida a partir do vetor resultante das componentes cartesianas U e V , segundo a Equação 3.5.

$$V_v = \sqrt{U^2 + V^2} \quad (3.5)$$

em que V_v é a velocidade do vento em ($m s^{-1}$) e U e V são as componentes cartesianas de vento em ($m s^{-1}$).

Já a média da velocidade do vento diária do vento obteve-se de acordo com a Equação 3.6.

$$V_{vm} = \left(\frac{V_{v12:00} + V_{v18:00} + V_{v00:00}}{3} \right) - h \cdot t \quad (3.6)$$

em que V_{vm} é a média da velocidade do vento em ($km dia^{-1}$) para os horários das 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC; h é o fator de conversão de ($m s^{-1}$) para ($km dia^{-1}$) e seu valor é 86,4; já o t corresponde ao fator de conversão da velocidade do vento de 10 para 2m de altura, sendo seu valor igual a 0,75, segundo Allen et al. (1998).

A variável umidade relativa do ar foi calculada a partir da Equação (3.7).

$$UR_{med} = \frac{(UR\%_{12:00}) + (UR\%_{18:00}) + (UR\%_{00:00})}{3} \quad (3.7)$$

sendo UR_{med} a média da umidade relativa do ar (%) e UR a umidade relativa do ar (%) para os horários das 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC.

No que tange a variável radiação solar incidente, realizou-se o somatório para os quatro horários, tendo em vista que cada previsão representa a média das últimas seis horas, de acordo com a Equação (3.8).

$$R_s = \left(\frac{R_{06:00} + R_{12:00} + R_{18:00} + R_{00:00}}{4} \right) . c \quad (3.8)$$

em que R_s é a radiação solar incidente acumulada ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) nas últimas 24 horas; R é a radiação média observada (W m^{-2}) nos horários da 06:00, 12:00, 18:00 e 00:00 horas UTC; e c é o fator de conversão da radiação solar incidente de W m^{-2} para $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 0,51624$, de acordo com Allen et al. (1998).

Em seguida, os dados foram organizados em médias quinzenais, de acordo com o descrito no item 3.1, e distribuídos espacialmente na região de estudo em grades regulares de 20 x 20 km (FIGURA 9).

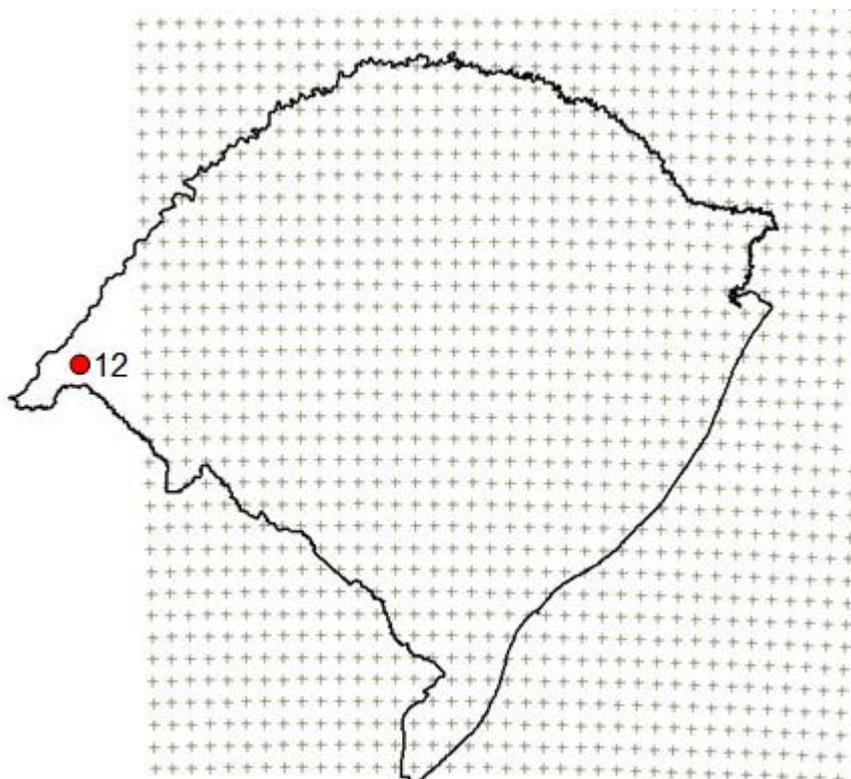


Figura 9 – Distribuição espacial referente aos dados gerados pelo modelo ETA (grade regular de 20 x 20 km), para a região compreendida pelo estudo.

A estação 12 (FIGURA 7), referente ao município de Uruguaiana, não apresentou dados espacializados de nenhuma das variáveis geradas pelo modelo ETA (FIGURA 9), tendo em vista que durante a seleção da área do RS no Banco de Dados de Grades do CPTEC/INPE (<http://bdg.cptec.inpe.br/>), esta não foi contemplada. Dessa maneira, não foi possível realizar comparações entre dados estimados pelo modelo ETA e os observados por essa estação meteorológica.

3.5. Compatibilização espacial dos dados

Tanto os dados estimados pelo sistema TRMM e pelo modelo ETA quanto os observados pelas estações meteorológicas do INMET foram inseridos no SIG SPRING no formato “modelo numérico do terreno” do tipo “amostral” (FIGURAS 8 e 9). Neste formato o SPRING armazena a localização espacial da amostra (coordenadas x e y), neste caso correspondente à localização geodésica da estação meteorológica ou da informação oriunda do TRMM e do ETA, e atrela a esta localização um valor que corresponde a uma determinada informação numérica em formato real (coordenada z), que neste caso representa a variável meteorológica em questão.

Como as estações meteorológicas encontram-se distribuídas espacialmente de maneira esparsa e em função dos dados do TRMM e do ETA apresentarem diferentes resoluções espaciais, houve a necessidade de compatibilizar tais informações, no espaço. Para tanto, utilizou-se o método de interpolação *vizinho mais próximo* do SIG do SPRING, para gerar grades retangulares em uma resolução espacial única (1 x 1 km). Através desse método, para cada ponto (x, y) dessa nova grade (pixel) o sistema atribui a cota da amostra (estação meteorológica ou local do ponto estimado pelo TRMM ou pelo ETA) mais próxima ao ponto, mantendo os valores de tais cotas sem gerar valores intermediários (FIGURA 10).

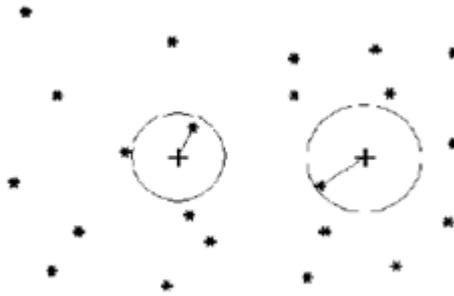


Figura 10 – Interpolação vizinho mais próximo.

Obs.: O valor de cota (+) equivale ao valor amostrado mais próximo (*).

Fonte: SPRING (2007)

3.6. Geração dos modelos matemáticos de ajuste

Para a avaliação dos modelos, primeiramente realizaram-se análises de regressão linear relacionando os dados estimados do TRMM e do ETA aos observados pelas estações meteorológicas do INMET, encontrando o coeficiente de determinação (r^2), já que este permite indicar quanto da variável dependente (observada pelas estações) pode ser explicada pela variável independente (estimada pelo TRMM e pelo ETA), conforme a Equação (3.9).

$$r^2 = \frac{\sum(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = \frac{\text{Variação explicada pelo modelo}}{\text{Variação total}} \quad (3.9)$$

em que y_i é o valor observado; \hat{y}_i é o valor estimado de y_i ; e \bar{y} é a média das observações.

Para tanto foram utilizadas as três primeiras safras em conjunto (2006/07 a 2008/09; denominadas de “safras de ajuste”), de modo a gerar uma equação de ajuste para cada variável em estudo. As equações de ajuste encontradas foram aplicadas aos dados estimados do TRMM e do ETA das três últimas safras (2009/10 a 2011/12; denominadas de “safras de validação”), a fim de produzir novos valores (aqui denominados de “ajustados”) dessas variáveis para tais safras.

3.7. Testes estatísticos de comparação dos resultados

As avaliações foram realizadas comparando as variáveis observadas pelas estações meteorológicas do INMET e aquelas estimadas pelo TRMM e pelo ETA e ajustados a partir das equações geradas no item 3.6. O procedimento fundamentou-se na plotagem dos diagramas de dispersão entre os valores ajustados e os observados, objetivando medir a intensidade ou grau de relacionamento linear entre eles a partir do cálculo do coeficiente de correlação linear (r) (EQUAÇÃO 3.10):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Ajustado - Observado) - \sum_{i=1}^n Ajustado \sum_{i=1}^n Observado}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n Ajustado - \sum_{i=1}^n Ajustado^2)} \sqrt{(n \sum_{i=1}^n Observado^2 - \sum_{i=1}^n Observado^2)}} \quad (3.10)$$

em que, n é o número de amostras utilizadas para a validação; *Observado* são as variáveis medidas pelas estações meteorológicas; *Estimado* as variáveis estimadas pelo sistema TRMM e pelo modelo ETA e ajustadas a partir das equações geradas no item 3.6.

Para a avaliação dos modelos, além da utilização da análise de regressão linear, encontrando valores de acordo com o descrito no item 3.6, foram realizados testes de significância dos valores obtidos através do teste de *t-student* e coeficiente de *Nash-Sutcliffe*, tanto para safras usadas na geração da equação de ajuste (2006/07 a 2008/09) quanto para as safras ajustadas (2009/10 a 2011/12). Além disso, procederam-se realizações de medidas de Raiz do Erro Médio Quadrático (RMS, do inglês, *Root Mean Square*) – que é a raiz quadrada da razão entre a soma das diferenças quadráticas entre os dados estimados/ajustados do TRMM e do ETA e os dados observados das estações meteorológicas do INMET, ponderado pelo número de observações consideradas, segundo a Equação (3.11); e o Erro Relativo Médio Quadrático (*RMSE*), em que o RMS é normalizado a partir dos valores médios dos dados ajustados do TRMM e do ETA, de acordo com a Equação (3.12) (WILKS, 2006).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{Estimado e Ajustado} - \text{Observado})^2}{n}} \quad (3.11)$$

em que, n é o número de amostras utilizadas para a validação; *Estimado e Ajustado* são as variáveis médias estimadas e ajustadas do modelo ETA e do TRMM; *Observado* são as variáveis médias medidas pelas estações meteorológicas.

$$RMSE = \frac{RMS}{\overline{\text{Ajustado}}} \quad (3.12)$$

em que, RMS é a medida da Raiz do Erro Médio Quadrático das variáveis ajustadas do TRMM e do modelo ETA; $\overline{\text{Ajustado}}$ é a média das variáveis ajustadas do TRMM e do modelo ETA.

A avaliação do desempenho entre os dados ajustados (TRMM e ETA) e os observados (INMET) foi realizada segundo o critério de superestimativa ou subestimativa média e pelo coeficiente de correlação (r). Além disso, partiu-se do uso do desvio padrão (σ) calculado para as safras compreendidas entre 2009/10 a 2011/12. A análise do σ justificatifica-se pelo fato deste ser um bom estimador da amplitude dos dados (indica a variação de um conjunto de elementos), que é uma informação relevante para as estimativas dos dados geradas pelo sistema TRMM e pelo modelo ETA. A fórmula de cálculo do σ para os valores de uma amostra é a definida pela Equação 3.13.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3.13)$$

em que, σ é o desvio padrão; x_i é o valor absoluto das variáveis observadas (INMET), estimadas e ajustadas (TRMM e ETA); \bar{x} é o valor médio das variáveis observadas (INMET), estimadas e ajustadas (TRMM e ETA); n é o número de amostras utilizadas para a validação.

Aplicou-se o teste de *t-student*, seguindo Wilks (1995), para se determinar a significância estatística das correlações. Seja t um valor tabelado em função da significância pretendida, o teste das correlações é determinado pela Equação 3.14.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.14)$$

em que, t é a estatística do teste; n é o tamanho da amostra e r é a estimativa do coeficiente de correlação linear. A estatística do teste, t , segue uma distribuição t de Student com $(n - 2)$ graus de liberdade.

De acordo com Zhang et al. (2007), o valor do coeficiente Nash-Sutcliffe (NS) indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, sendo obtido segundo a Equação 3.15.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{Observado} - E_{Ajustado})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{Observado} - \bar{E}_{Observado})^2} \quad (3.15)$$

em que $E_{Observado}$ é o evento observado; $E_{Ajustado}$, o evento simulado pelo modelo; $\bar{E}_{Observado}$, a média do evento observado no período de simulação; e n , o número de eventos. Segundo Asce (1993), o NS pode variar entre $-\infty$ a 1, sendo o valor 1 indicativo de um perfeito ajuste.

Conforme Silva et al. (2008), quando o valor de NS resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de NS entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores de NS inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja considerado inaceitável.

4. Resultados e Discussão

Neste item são apresentados os resultados do estudo comparativo realizado entre os dados meteorológicos estimados pelo modelo ETA e pelo sistema TRMM, bem como aqueles ajustados pelos modelos gerados, frente aos dados observados pelas estações meteorológicas convencionais do INMET.

4.1. Comparação e análise dos resultados de precipitação pluvial a partir de dados estimados pelo TRMM e observados pelas estações do INMET

A evolução temporal dos valores de precipitação pluvial quinzenal para as safras de ajuste (FIGURA 11) destaca a tendência dos dados do sistema TRMM em superestimar os valores observados pelas estações convencionais do INMET. Esse comportamento foi mais acentuado na safra 2006/07, quando a diferença entre os dados estimados (TRMM) e observados (INMET) foi de aproximadamente 18% (14 mm), enquanto que nas safras 2007/08 e 2008/09, as diferenças foram de 10 (6,4 mm) e 3% (1,3 mm), respectivamente. Quando analisados os dados das três safras de ajuste em conjunto, os valores estimados (TRMM) foram, em média, 11% (7 mm) superiores aos observados (INMET). Essas superestimativas encontradas são consistentes com os resultados obtidos por Adeyewa e Nakamura (2003) e Adami (2006), que indicam que apesar das boas estimativas de r^2 apresentadas pelo TRMM, este tende a superestimar ligeiramente as precipitações observadas.

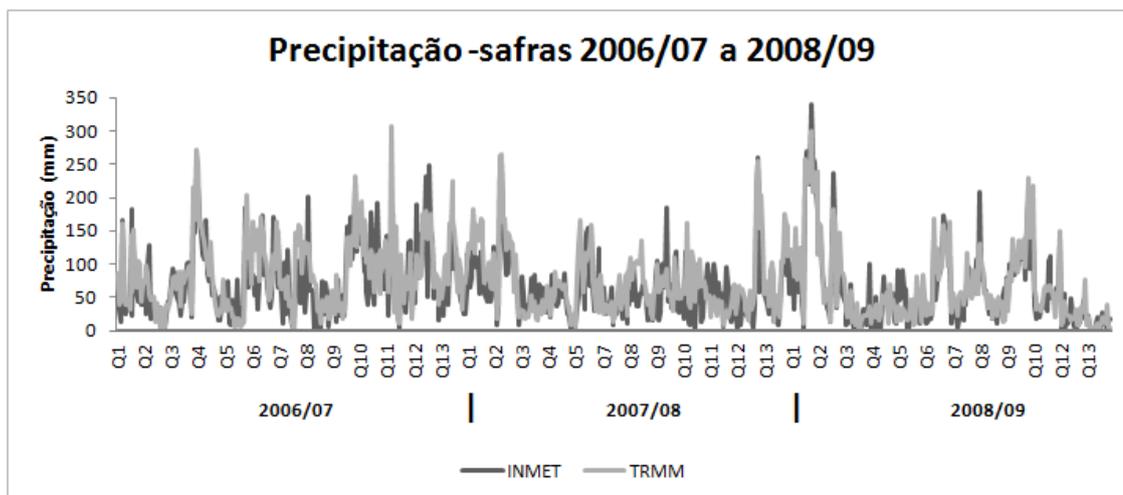


Figura 11 – Variação dos valores de precipitação observados (INMET) e estimados (TRMM) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Estas assertivas têm suporte, também, pela análise dos diagramas entre os valores estimados (TRMM) e os observados (INMET) e os altos valores dos respectivos coeficientes de determinação, especialmente para a safra 2008/09 (FIGURA 12).

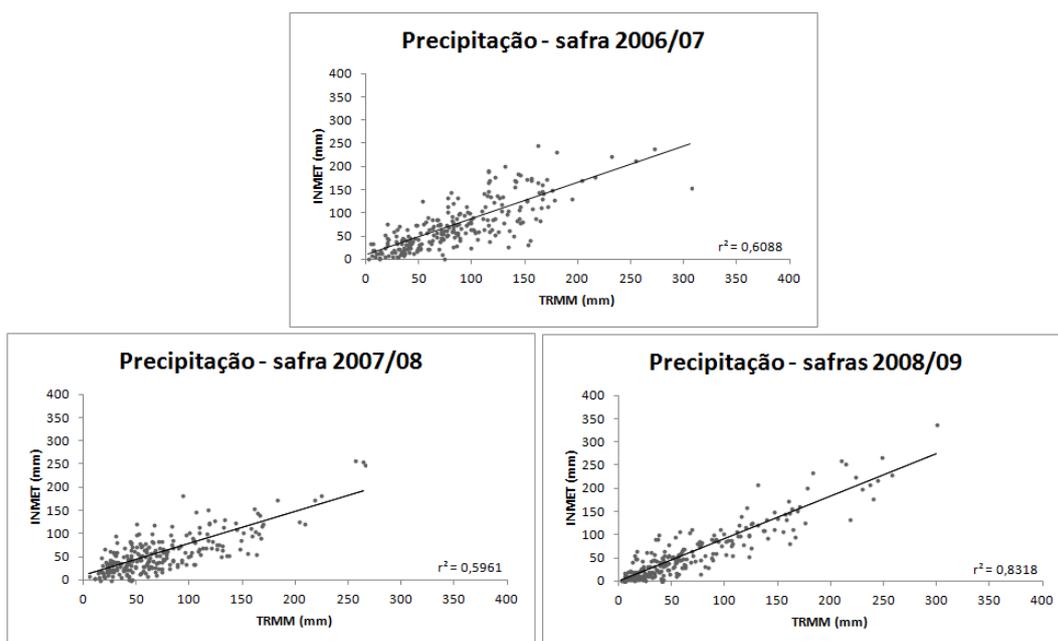


Figura 12 – Diagrama de dispersão entre os dados de precipitação estimados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

4.1.1. Modelagem matemática de ajuste da precipitação pluvial dos dados estimados pelo TRMM a partir dos dados observados pelas estações do INMET

Entretanto, como a precipitação pluvial (mais especificamente a disponibilidade hídrica) é o principal fator definidor da produtividade dos cultivos agrícolas, sua superestimativa incorre, invariavelmente, na superestimativa dos valores de produtividade obtidos a partir de um modelo agrônomo. Tal fato alentou a geração de um modelo de ajuste dos dados do TRMM para que estes melhor representassem os valores observados pelas estações do INMET. A Figura 13 contém o diagrama de dispersão entre os valores de precipitação pluvial estimados (TRMM) e os observados pelas estações meteorológicas (INMET), a equação de regressão linear e o respectivo coeficiente de determinação para as três safras de ajuste. A utilização das três safras em conjunto resultou em um coeficiente de determinação superior (0,69) aos observados para duas (2006/07 e 2007/08) das três safras utilizadas no ajuste. Além disso, o coeficiente de correlação

entre ambas as variáveis (0,83) para as três safras em conjunto foi significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

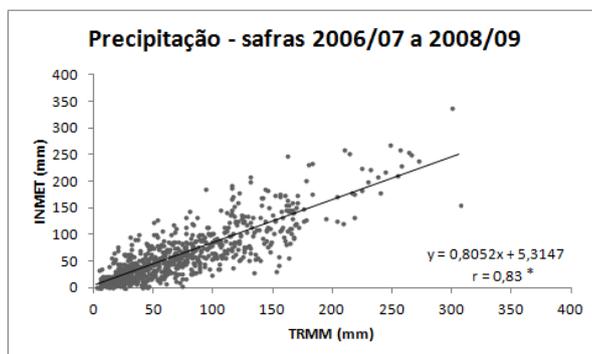


Figura 13 – Diagrama de dispersão entre os dados de precipitação pluvial estimados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10 a 2011/12).
*Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

4.1.2. Estimativa de precipitação pluvial a partir do ajuste dos dados estimados pelo sistema TRMM

Ao analisar-se a Figura 14 (a) e (b), pode-se identificar, em todas as safras modeladas (2009/10, 2010/11 e 2011/12), que os dados do TRMM, quando ajustados, passam a apresentar menores valores de precipitação pluvial, se aproximando mais dos valores observados (INMET).

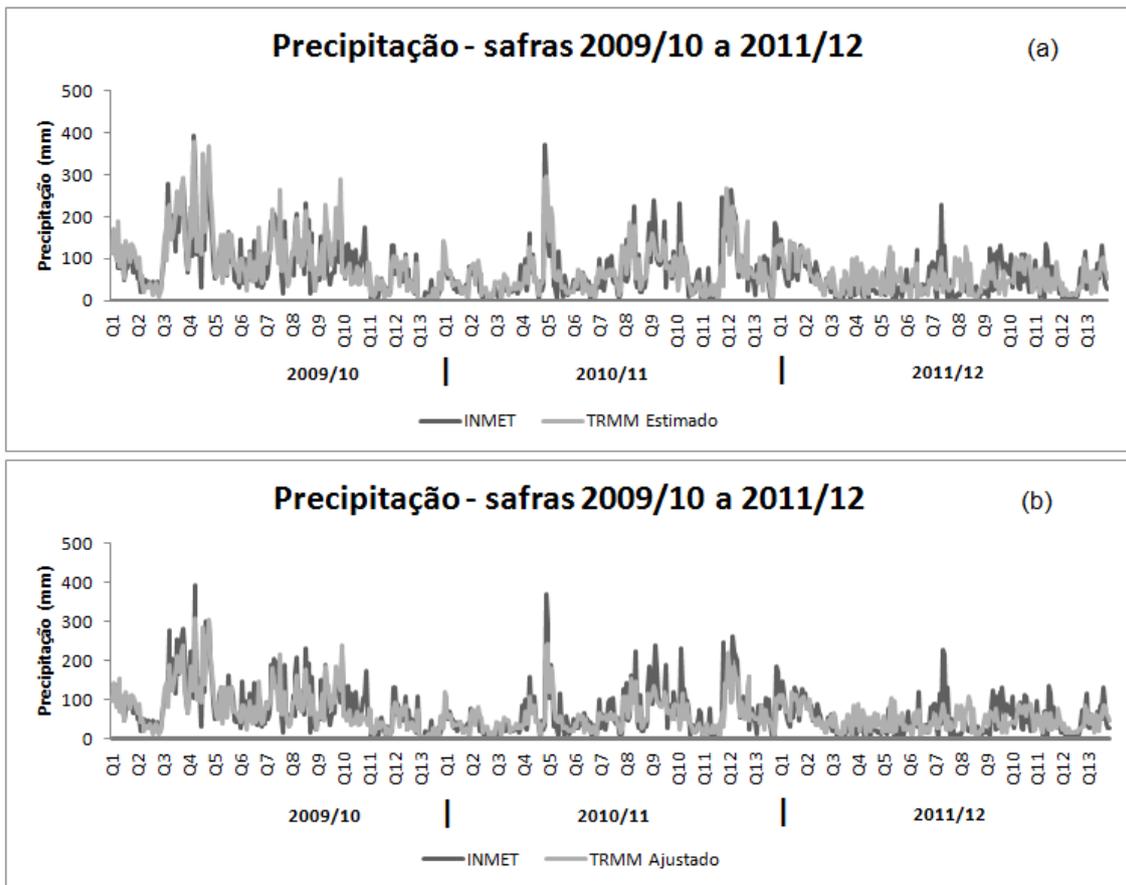


Figura 14 – (a) Variação entre os dados de precipitação pluvial observados (INMET) e estimados (TRMM) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de precipitação pluvial observados (INMET) e ajustados (TRMM) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Nota-se que o TRMM estima de forma eficiente os valores de precipitação quinzenal, já que os valores ajustados acompanham a ordem de grandeza e a amplitude de variação dos dados observados. Percebe-se, também, de acordo com a Tabela 3, que quando ajustados, os dados de precipitação pluvial média do TRMM passam a subestimar os observados (INMET) em 7,1 e 8,8% e a superestimar em 0,8% nas safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente, contra 8,1, 3,0 e 11,7% de superestimativa identificada antes do ajuste.

Além disso, afora os σ dos valores de precipitação de cada uma das safras ajustadas terem diminuído em relação aos dados estimados em todas as safras

(TABELA 3), estes se afastaram ainda mais dos σ referentes aos dados observados (INMET). Isso indica que o ajuste realizado nos dados do TRMM, embora tenha aproximado os valores médios de precipitação do TRMM em relação aos do INMET, promoveu uma diminuição na amplitude de tais valores.

Tabela 3. Precipitações pluviométricas médias observadas (INMET) e ajustadas (TRMM) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12

| Safras | Precipitação pluviométrica média (mm) | | | | | |
|---------|---------------------------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|
| | INMET | DESV PAD | TRMM Estimado | DESV PAD | TRMM Ajustado | DESV PAD |
| 2009/10 | 91,1 | 68,8 | 98,5 | 73,3 | 84,6 | 59,0 |
| 2010/11 | 65,4 | 59,0 | 67,4 | 52,7 | 59,6 | 42,4 |
| 2011/12 | 49,2 | 40,1 | 55,0 | 33,3 | 49,6 | 26,8 |

Apesar disso, as correlações entre os dados ajustados (TRMM) e os observados (INMET) (TABELA 4; FIGURA 15) originaram coeficientes de correlação (r) altos (0,88, 0,84 e 0,51 para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente), mostrando um bom grau de relacionamento entre estes. Entretanto, tal valor foi menor para a safra 2011/12 (0,51), pois nesta ocorreu a menor precipitação pluviométrica média das seis safras analisadas, apenas 49,6mm na quinzena. Contudo, os coeficientes de correlação dos dados ajustados foram superiores aos estimados para as três safras analisadas.

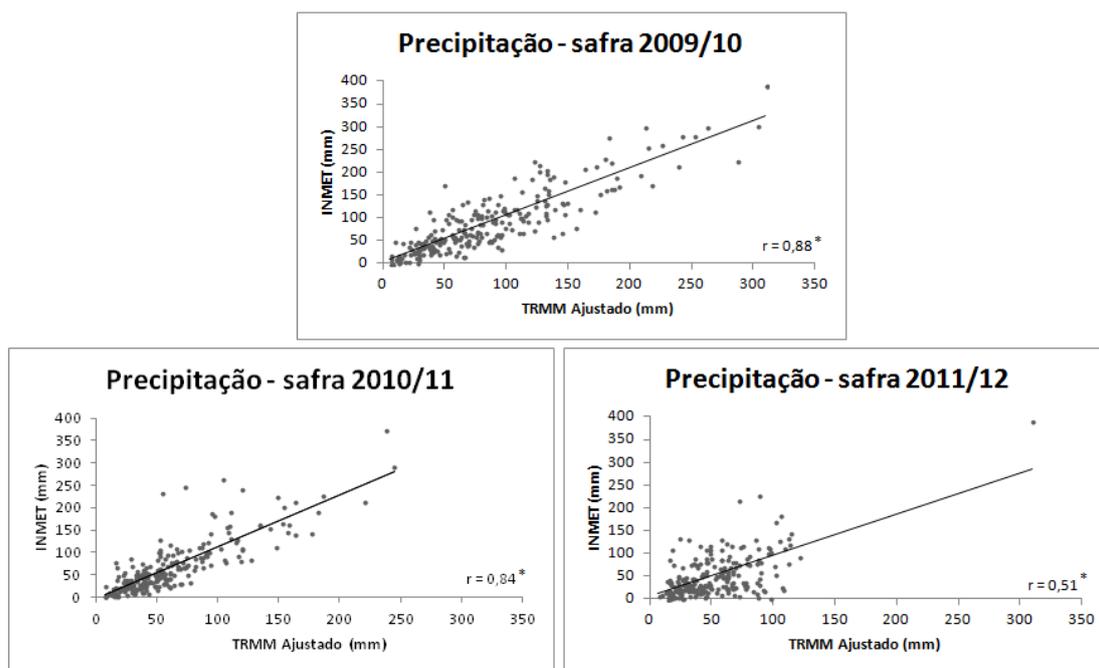


Figura 15 – Relação entre os dados de precipitação pluvial ajustados (TRMM) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

Na Tabela 4 são apresentadas as safras usadas na modelagem, a equação de ajuste, o respectivo coeficiente de determinação (r^2), bem como as safras de validação e os coeficientes de correlação (r) entre os dados do TRMM e do INMET quando estimados e ajustados.

Tabela 4. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a precipitação pluvial entre os dados do TRMM estimados e ajustados frente aos dados do INMET

| Precipitação pluvial | | | | | |
|----------------------|------------------------|--------|------------------|--------------|--------------|
| Safras de ajuste | Equação de ajuste | r^2 | Safras ajustadas | r Estimado | r Ajustado |
| 2006/07 | $y = 0,8052x + 5,3147$ | 0,6931 | 2009/10 | 0,87 | 0,88 |
| a | | | 2010/11 | 0,84 | 0,84 |
| 2008/09 | | | 2011/12 | 0,49 | 0,51 |

4.1.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de precipitação pluvial estimados pelo sistema TRMM em comparação com os observados (INMET)

Na Tabela 5 são apresentados os erros médios quadráticos (RMS) e RMS normalizados (RMSE), bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para os dados estimados e ajustados (TRMM) em relação aos observados (INMET) para a variável precipitação pluvial.

Tabela 5 – RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do sistema TRMM, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a precipitação pluvial

| Safras | RMS (mm) | | RMSE (%) | | NS | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado |
| 2009/10 | 36,9 | 34,2 | 52% | 48% | 0,71 | 0,75 |
| 2010/11 | 32,1 | 33,2 | 67% | 69% | 0,70 | 0,68 |
| 2011/12 | 37,9 | 35,6 | 109% | 102% | 0,10 | 0,21 |

De acordo com a Tabela 5, percebe-se que quando os dados de precipitação pluvial estimados pelo sistema TRMM foram ajustados houve uma redução das diferenças de precipitação nas safras de validação, quando comparados aos dados observados (INMET). As diferenças entre RMS dos dados ajustados (TRMM) e os observados (INMET) estabeleceram-se em 2,7 e 2,3 mm para as safras 2009/10 e 2011/12, respectivamente. Tal comprovação foi obtida a partir do cálculo do RMSE, em que se observa uma redução da diferença de 4 e 7 pontos percentuais (pp) entre os dados estimados e os ajustados (TRMM) em relação aos observados (INMET), nas safras 2009/10 e 2011/12. Na safra 2010/11, percebe-se um aumento da diferença entre os dados estimados e ajustados (TRMM) em comparação com os observados (INMET), uma vez que o RMS e o RMSE indicam um aumento de 1 mm e 2 pp, respectivamente.

Destaca-se que os resultados encontrados se referem a valores acumulados quinzenalmente, o que indica que apesar dos valores de RMS e RMSE serem elevados, estes são distribuídos ao longo da quinzena. Ou seja, as diferenças de precipitação pluvial ocorrida entre os dados ajustados (TRMM) e os observados (INMET), diariamente, são na realidade, a razão entre os

valores de RMS e RMSE pelo período de 15 dias. Portanto, as diferenças de RMS entre os dados ajustados do TRMM em relação aos observados (INMET) são de aproximadamente 2,3, 2,2 e 2,4 mm, na quinzena, para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente.

Nota-se, ainda, que a maior diferença percentual entre os dados ajustados (TRMM) e os observados (INMET) aconteceu justamente na safra 2011/12 (RMSE = 102%), possivelmente em virtude da baixa precipitação pluvial média ocorrida (34,8 mm), a menor de todas as seis safras analisadas.

Em relação ao NS, este demonstrou que a eficácia do modelo matemático de ajuste para as safras de validação, safras 2009/10 e 2010/11, manteve-se praticamente a mesma, atingindo a classificação boa e aceitável (SILVA et al., 2008) de eficiência de estimativa de precipitação na primeira e na segunda safras, respectivamente, frente aos dados observados pelas estações meteorológicas do INMET. Para a safra 2011/12 os valores de NS antes (0,10) e depois do ajuste (0,21) ficaram abaixo do aceitável (0,36).

4.2. Comparação e análise dos resultados de temperatura média do ar a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET

A avaliação dos dados de temperatura média do ar (média quinzenal) para as safras de ajuste (FIGURA 16) mostrou que o modelo ETA tende a superestimar os valores observados pelas estações convencionais do INMET. Os valores estimados (ETA) foram, em média, 3,5 (0,8 °C), 7,3 (1,6 °C) e 3,6% (0,8 °C) superiores aos observados (INMET), nas safras 2006/07, 2007/08 e 2008/09, respectivamente. Quando analisados os dados das três safras de ajuste em conjunto, os valores estimados (ETA) foram, em média, 4,5% (1 °C) superiores aos observados (INMET). Ademais, percebe-se uma tendência do modelo ETA em subestimar os valores de temperatura média do ar nas quinzenas iniciais e o contrário é observado nas quinzenas finais (Q11 – Q13).

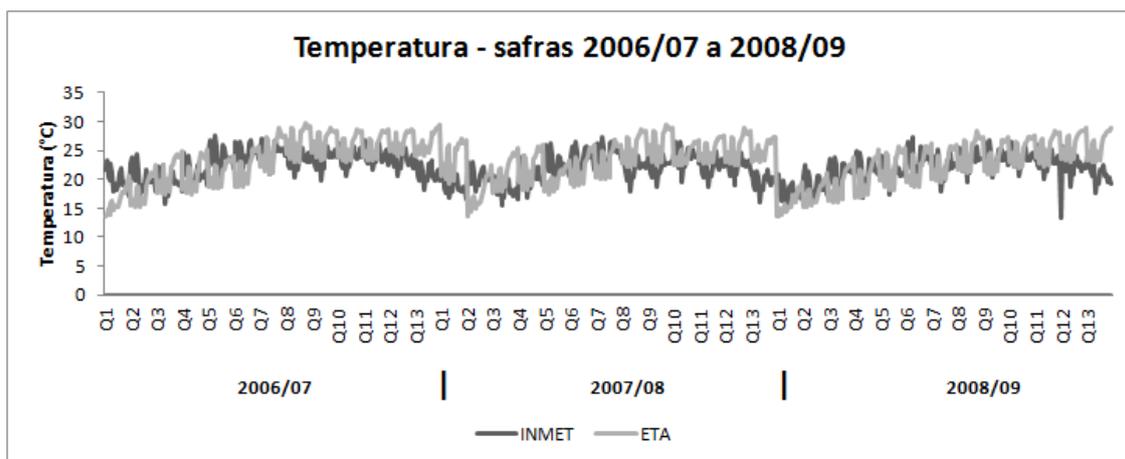


Figura 16 – Variação dos valores de temperatura observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

A partir da análise da Figura 17, pode-se inferir que apesar dos dados estimados (ETA) apresentarem estas superestimativas, existe uma boa concordância entre os dados comparados (ETA e INMET), uma vez que as safras 2006/07 e 2008/09 apresentaram coeficientes de determinação (r^2) significativos (0,22, e 0,32, respectivamente). A exceção ocorreu com a safra

2007/08, em que o valor de r^2 foi o menos expressivo (0,05), o que pode ser explicado pelo fato de esta safra ter apresentado a maior diferença média entre as temperaturas estimadas (ETA) e observadas (INMET).

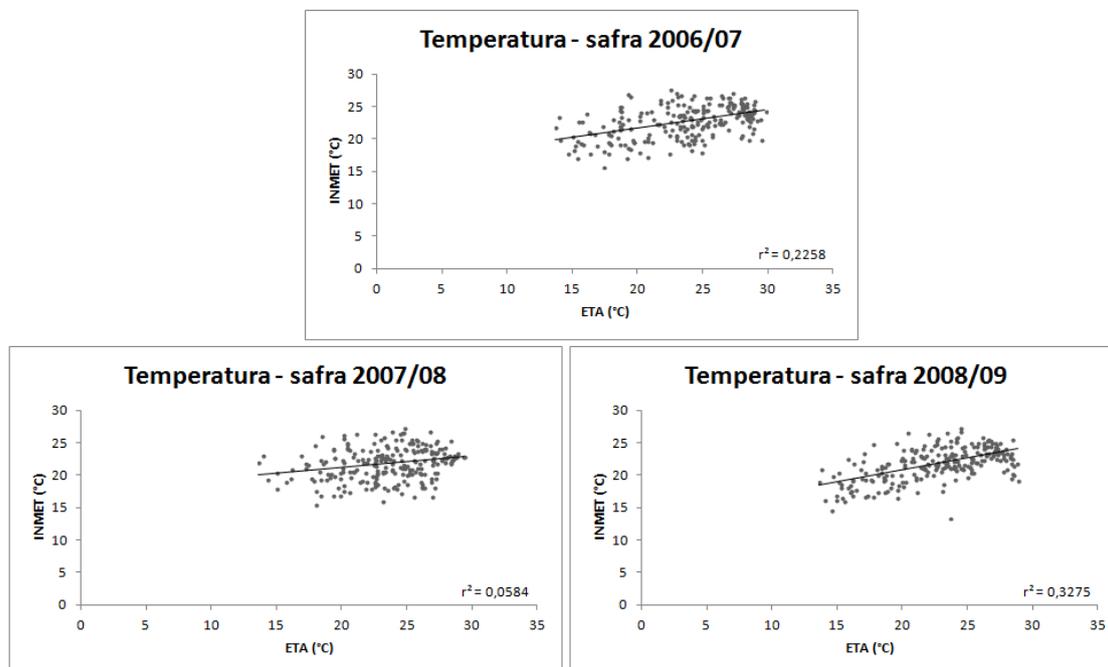


Figura 17 – Diagrama de dispersão entre os dados de temperatura estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

4.2.1. Modelagem matemática de ajuste da temperatura média do ar dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET

Em função da ocorrência de superestimativas por parte do modelo ETA e de modo a ajustar os seus dados para melhor representá-los em relação ao INMET, desenvolveu-se uma equação de regressão linear com as safras 2006/07, 2007/08 e 2008/09 em conjunto. Tal equação, relacionando os valores de temperatura do ar estimados (ETA) e observados (INMET), juntamente com o coeficiente de determinação para as três safras de ajuste, encontra-se disposta no diagrama de dispersão (FIGURA 18).

A utilização das três safras em conjunto resultou em um coeficiente de correlação menor (0,43) que os observados para duas (2006/07 e 2008/09) das três safras utilizadas no ajuste, mas significativo a 99%, segundo o teste de t -

student. Valor que segundo Cohen (1988), estabelece uma correlação média entre os dados do modelo ETA e do INMET.

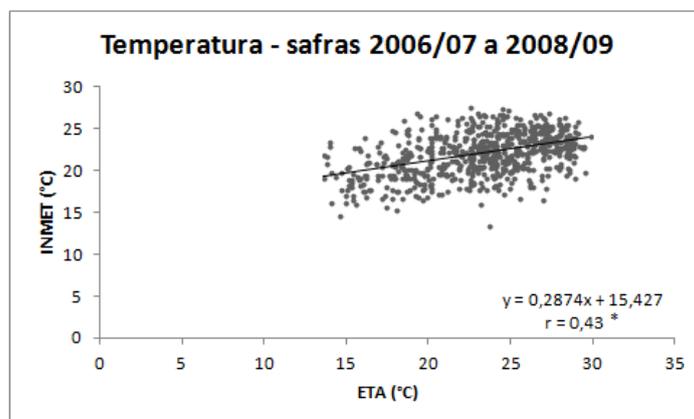


Figura 18 – Diagrama de dispersão entre os dados de temperatura do ar estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10 a 2011/12).
*Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

4.2.2. Estimativa de temperatura média do ar a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA

Ao observar-se a Figura 19 (a) e (b), identifica-se, em todas as safras modeladas (2009/10, 2010/11 e 2011/12), que os dados do ETA, quando ajustados, passam a apresentar menores valores de temperatura do ar, se aproximando, assim, dos valores observados (INMET).

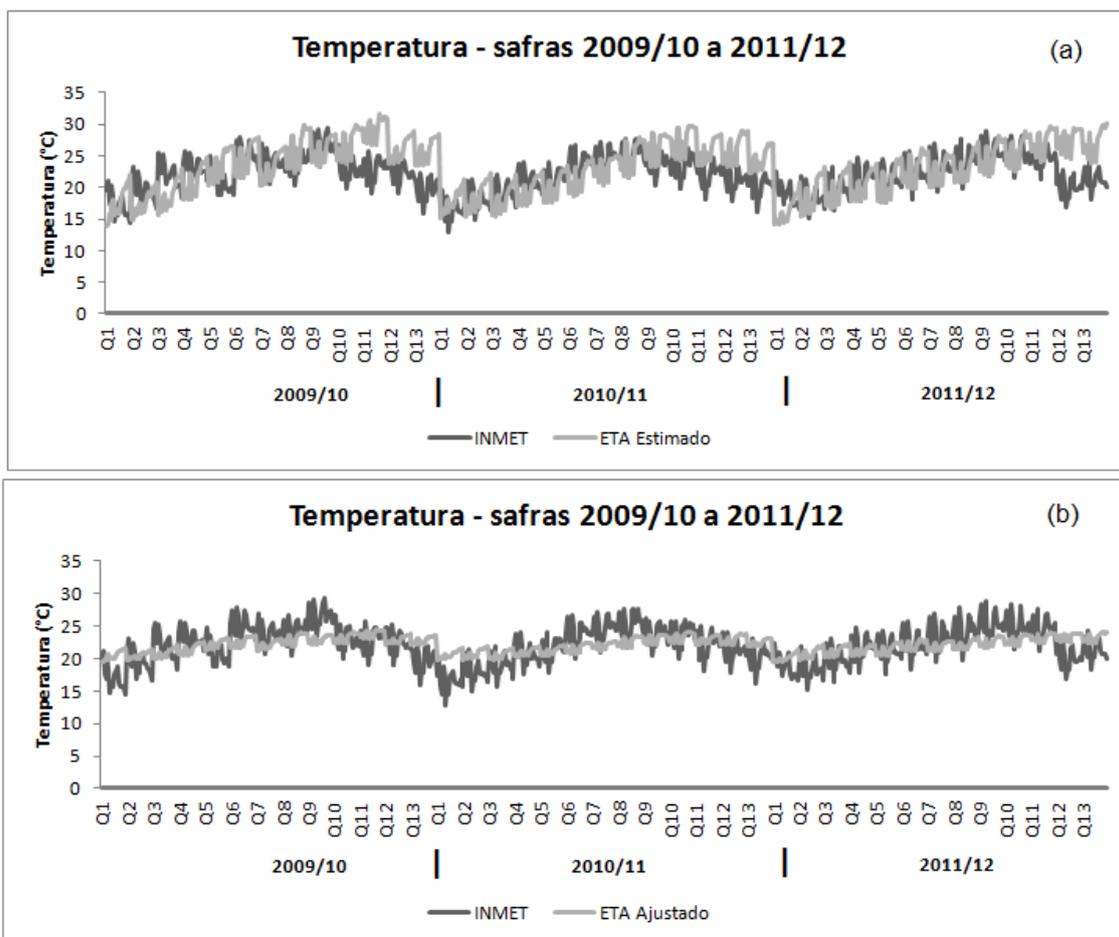


Figura 19 – (a) Variação entre os dados de temperatura do ar observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de temperatura do ar observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

É na Tabela 6, que os valores médios de temperatura média do ar do modelo ETA ajustados se equiparam aos observados (INMET) nas três safras analisadas. Os dados ajustados do ETA subestimam, em média, 0,44% os dados observados na safra 2009/10. Na safra 2010/11, identifica-se a ocorrência de uma superestimativa média de 1,4%, enquanto na safra 2011/12 os valores coincidem. Situação oposta àquela identificada antes do ajuste, em que se observava uma superestimativa média de 6,2, 5,5 e 4,5% dos dados estimados (ETA) frente aos observados (INMET) para as referidas safras, respectivamente.

Pela análise do σ , observa-se que a amplitude dos valores de temperatura média do ar diminuiu quando os dados do modelo ETA foram ajustados. Os valores aproximados do σ diminuíram de 4 para 1 °C, quando os valores do ETA foram ajustados, enquanto que o σ dos valores observados (INMET) ficaram em torno de 3 °C. Isto fica evidente ao observar-se a pequena variação nos valores ajustados de temperatura média do ar entre as quinzenas de outono e primavera com relação às de verão (FIGURA 19). Para os dados observados (INMET) existe uma visível sazonalidade na variação temporal dos dados. Para os dados estimados, é mais evidente o aumento da temperatura média do ar do início para o meio do período estudado, com uma pequena redução nas quinzenas finais.

Tabela 6. Temperaturas do ar médias observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12

| Safras | Temperatura do ar média (°C) | | | | | |
|---------|------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | INMET | DESV PAD | ETA Estimado | DESV PAD | ETA Ajustado | DESV PAD |
| 2009/10 | 22,4 | 3,0 | 23,8 | 4,2 | 22,3 | 1,2 |
| 2010/11 | 21,7 | 3,0 | 22,9 | 3,9 | 22,0 | 1,1 |
| 2011/12 | 22,1 | 2,8 | 23,1 | 4,0 | 22,1 | 1,2 |

De acordo com a Figura 20, os resultados obtidos com as comparações entre os dados ajustados (ETA) e os observados (INMET) foram satisfatórios, pois a magnitude dos coeficientes de correlação linear (r) atendeu aos respectivos escores propostos por Cohen (1988), estabelecendo-se como médio para as safras 2009/10 (0,42) e 2011/12 (0,46) e grande (0,61) para a safra 2010/11. Ademais, todos os coeficientes foram significativos a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

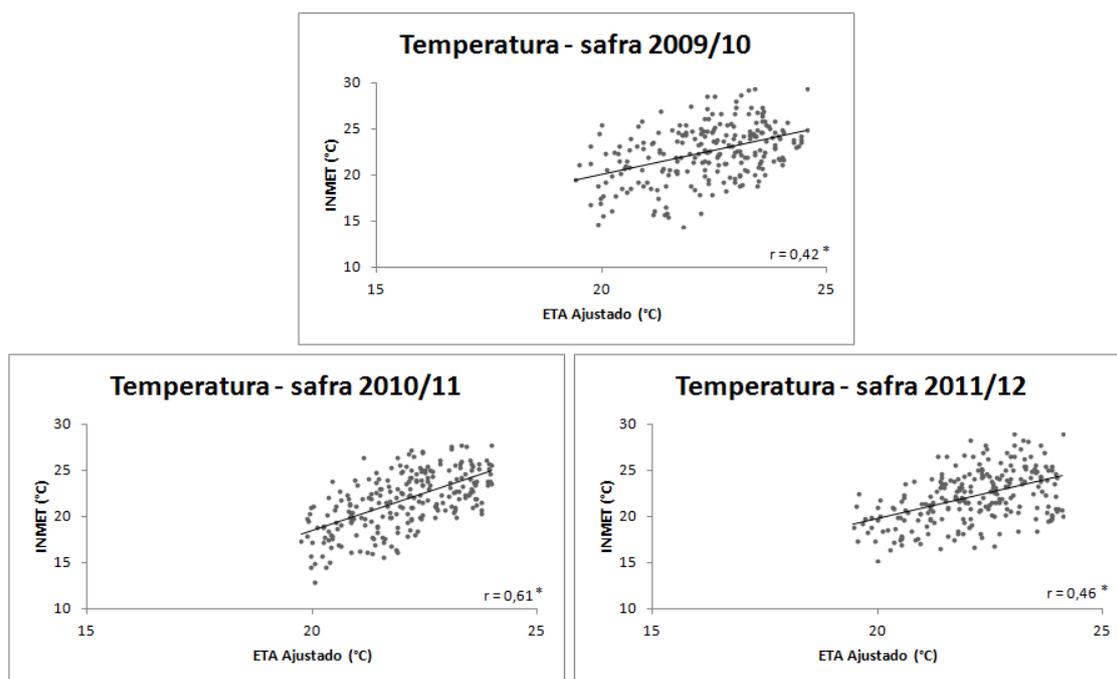


Figura 20 – Relação entre os dados de temperatura ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

Na Tabela 7 são apresentadas as safras usadas na modelagem, a equação de ajuste, o respectivo coeficiente de determinação (r^2), bem como as safras de validação e os coeficientes de correlação (r) entre os dados do ETA e do INMET quando estimados e ajustados.

Tabela 7. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a temperatura do ar entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET

| Temperatura do ar | | | | | |
|-------------------|------------------------|--------|------------------|----------|----------|
| Safras de ajuste | Equação de ajuste | r^2 | Safras ajustadas | r | r |
| | | | | Estimado | Ajustado |
| 2006/07 | $y = 0,2874x + 15,427$ | 0,1914 | 2009/10 | 0,34 | 0,42 |
| a | | | 2010/11 | 0,60 | 0,61 |
| 2008/09 | | | 2011/12 | 0,45 | 0,46 |

4.2.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de temperatura média do ar estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET)

Na Tabela 8 são apresentados os erros médios quadráticos (RMS) e RMS normalizados (RMSE), bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para os dados estimados e ajustados (ETA) em relação aos observados (INMET) para a variável temperatura média do ar.

Tabela 8. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a temperatura média do ar

| Safra | RMS (°C) | | RMSE (%) | | NS | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado |
| 2009/10 | 4,3 | 2,7 | 19% | 12% | -1,08 | 0,17 |
| 2010/11 | 3,4 | 2,5 | 15% | 12% | -0,26 | 0,30 |
| 2011/12 | 3,9 | 2,5 | 18% | 11% | -0,88 | 0,20 |

Na Tabela 8 apresenta-se a eficiência do ajuste dos dados do modelo ETA quando comparados aos observados do INMET. Percebe-se uma redução das diferenças de temperatura nas safras utilizadas para testar a equação de ajuste do modelo. As diferenças entre RMS dos dados ajustados (ETA) e os observados (INMET) estabeleceram-se em 1,6, 0,9 e 1,4 °C para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente. Essa constatação foi estabelecida a partir do cálculo do RMSE, em que se observa uma redução da diferença de 7, 3 e 7 pp entre os dados estimados e os ajustados (ETA) em relação aos observados (INMET), nas safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12.

Embora o modelo matemático de ajuste tenha promovido uma melhora na eficiência de previsão (NS) em todas as safras ajustadas, tais resultados permitem enquadrar o modelo na categoria inaceitável em todas as safras ajustadas (SILVA et al., 2008).

4.3. Comparação e análise dos resultados de radiação solar incidente média a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET

A Figura 21 apresenta a tendência do modelo ETA em superestimar os valores de radiação solar incidente (média quinzenal) das estações meteorológicas do INMET. Isto foi observado em todas as safras de ajuste, em que as superestimativas foram de 28,6 (137,6 cal cm⁻² dia⁻¹), 28,7 (140,7 cal cm⁻² dia⁻¹) e 27% (131,2 cal cm⁻² dia⁻¹) nas safras 2006/07, 2007/08 e 2008/09, respectivamente, comparando os dados estimados (ETA) e os observados (INMET).

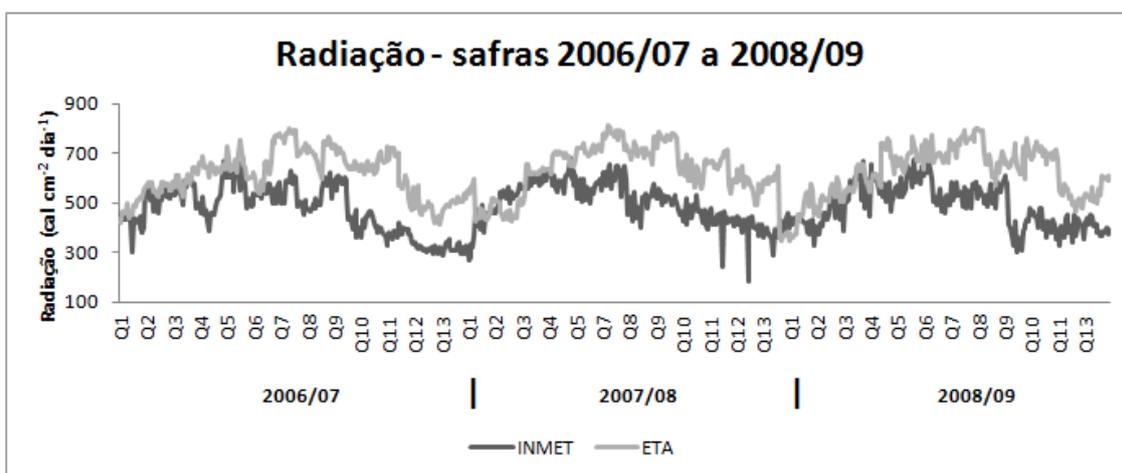


Figura 21 – Variação dos valores de radiação observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1^a quinzena de outubro a 1^a quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Apesar disso, a comparação entre os dados estimados (ETA) e os observados (INMET) apresentou para as três safras de ajuste, coeficientes de determinação (r^2) significativos, variando de 0,18 a 0,26 e classificados como médio e grande, respectivamente, por Cohen (1988) (FIGURA 22). Soma-se a isso, a capacidade que o modelo ETA possui de acompanhar a evolução temporal dos dados do INMET. Pois, tanto para os dados estimados (ETA) quanto para os observados (INMET), os menores valores de radiação solar incidente são observados por ocasião do início e do final do período analisado,

que coincidem com os meses da primavera e do início do outono. Já os maiores valores são observados durante o período de verão, para ambos os conjuntos de dados.

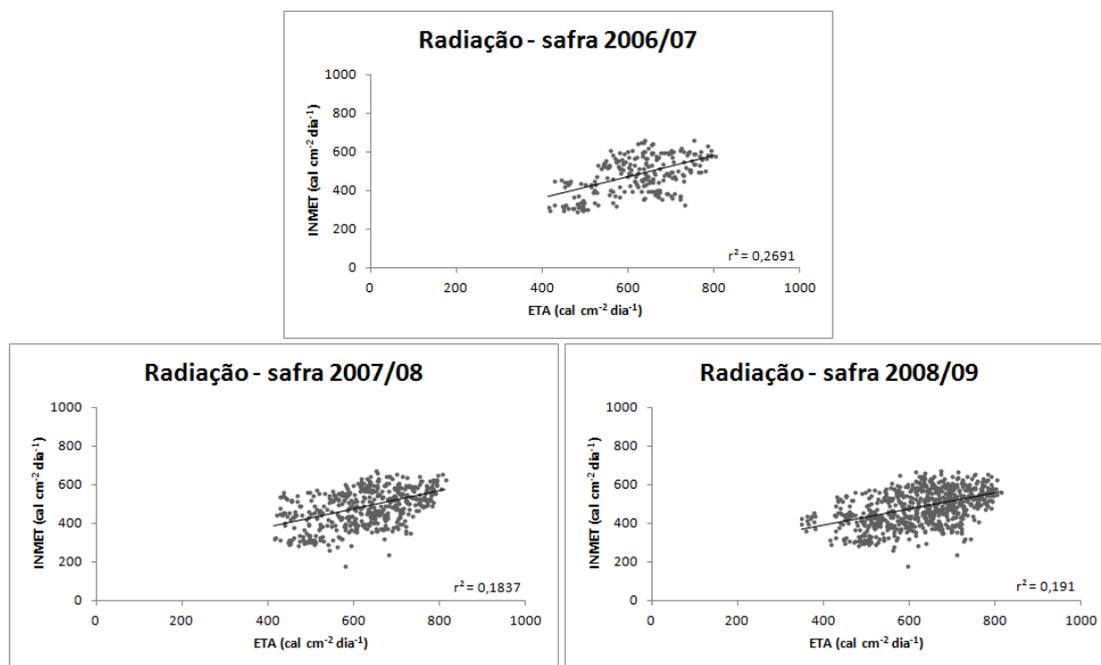


Figura 22 – Diagrama de dispersão entre os dados de radiação estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

4.3.1. Modelagem matemática de ajuste da radiação solar incidente dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET

A Figura 23 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores de radiação solar incidente estimados (ETA) e os observados pelas estações meteorológicas (INMET), a equação de regressão linear desenvolvida para ajustar os dados do ETA e o respectivo coeficiente de determinação para as três safras de ajuste. A utilização das três safras em conjunto resultou em um coeficiente de determinação superior (0,21) aos observados para duas (2007/08 e 2008/09) das três safras utilizadas no ajuste. Já as três safras quando consideradas em conjunto apresentaram um coeficiente de correlação de 0,46, considerado médio segundo a classificação adotada por Cohen (1988), porém significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

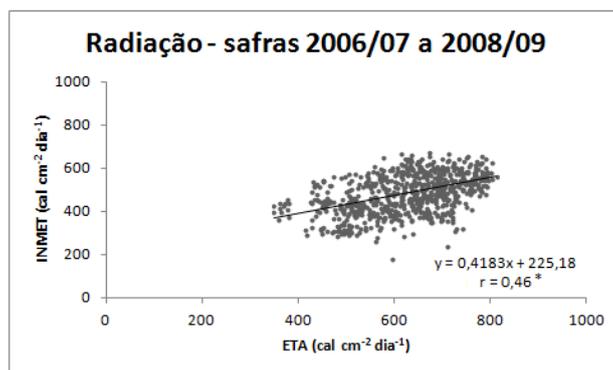


Figura 23 – Diagrama de dispersão entre os dados de radiação solar incidente estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10 a 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

4.3.2. Estimativa de radiação solar incidente a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA

A Figura 24 (a) e (b) mostra que em todas as safras modeladas (2009/10, 2010/11 e 2011/12), os dados do ETA, quando ajustados, passam a apresentar menores valores de radiação solar incidente, se aproximando, assim, dos valores observados (INMET). Ainda assim, os valores ajustados (ETA) acompanham, até certo ponto, a variação sazonal dos valores observados pelas estações convencionais do INMET. Embora a amplitude de variação de tais valores tenha diminuído, quando se comparam os dados ajustados aos estimados.

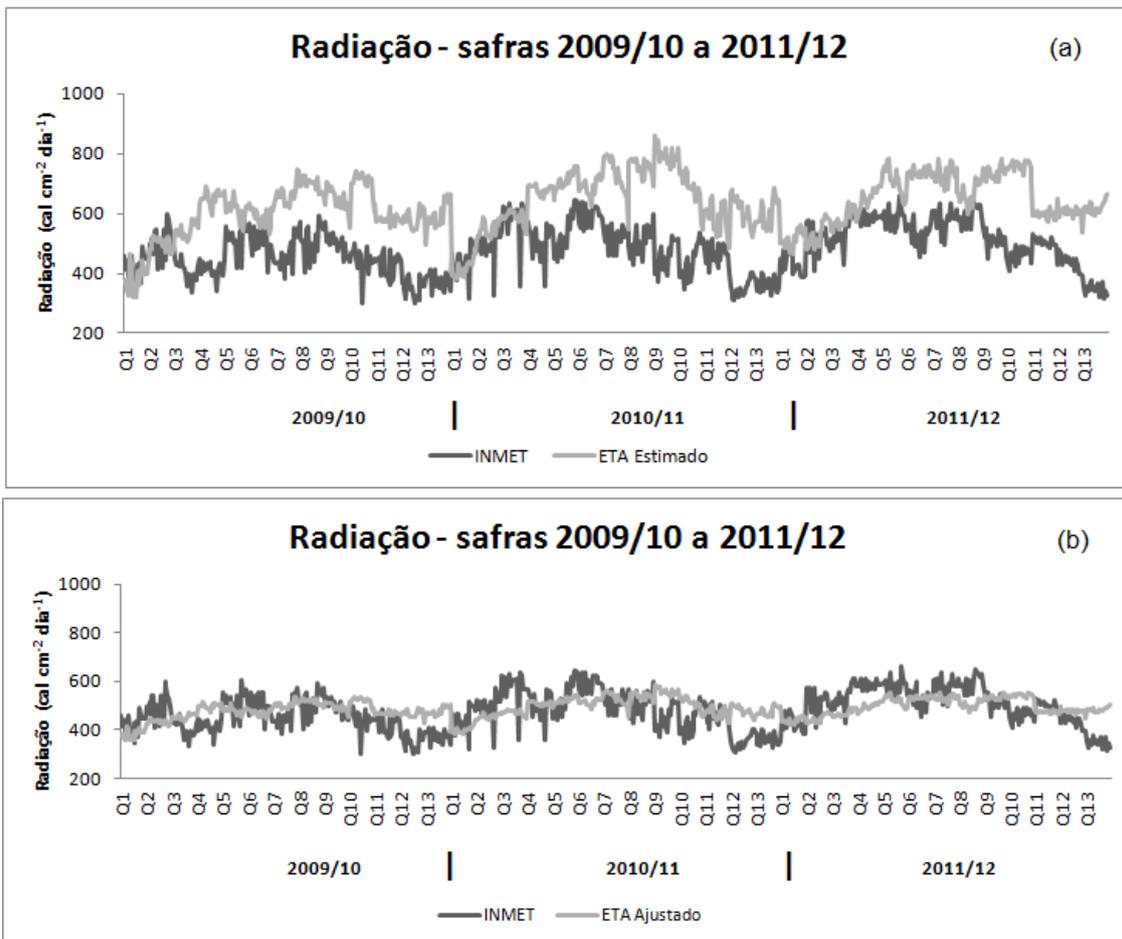


Figura 24 – (a) Variação entre os dados de radiação observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de radiação observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Nota-se, de acordo com a Tabela 9, que os dados de radiação solar incidente estimados pelo ETA e ajustados por meio da equação de ajuste superestimam em aproximadamente 5,6 e 2,6% os dados observados (INMET) das safras 2009/10 e 2010/11, respectivamente, contra 32,6 e 33,7% de superestimativa identificada antes do ajuste. Na safra 2011/12, percebe-se uma subestimativa de 2,5% dos dados ajustados (ETA) frente aos observados (INMET). Antes se observava uma superestimativa de 27,3%.

Isto sugere que, uma vez ajustados, os dados do ETA estimam de forma eficiente os valores de radiação solar incidente (média quinzenal), do ponto de vista da grandeza, pois estes acompanham os valores do INMET em todas as

safras ajustadas. Porém, em relação à amplitude tal afirmação não pode ser feita, pois embora os valores médios de radiação solar incidente dos dados ajustados do ETA tenham se aproximado dos dados observados pelo INMET, esses passaram a apresentar valores de amplitude menores em relação aos observados (INMET). Pela análise do σ , observa-se que tal amplitude diminuiu praticamente 50% em todas as safras ajustadas (ETA) (TABELA 9).

Tabela 9. Média da radiação solar incidentes observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12

| Safras | Radiação solar incidente média ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) | | | | | |
|---------|--|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | INMET | DESV PAD | ETA Estimado | DESV PAD | ETA Ajustado | DESV PAD |
| 2009/10 | 449,1 | 66,1 | 595,8 | 89,2 | 474,3 | 37,3 |
| 2010/11 | 482,7 | 85,1 | 645,5 | 104,1 | 495,3 | 43,8 |
| 2011/12 | 509,8 | 78,6 | 649,2 | 83,5 | 496,8 | 35,2 |

Os resultados, embora satisfatórios, em função da redução nas superestimativas entre os dados ajustados frente os observados (FIGURA 25), apresentaram coeficientes de correlação pequenos (0,15 e 0,22) nas safras 2009/10 e 2010/11 e médio (0,30) na safra 2011/12, segundo classificação de Cohen (1988). Apesar disso, tais valores foram significativos a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student* para as safras 2010/11 e 2011/12 e a 95% de probabilidade para a safra 2008/09.

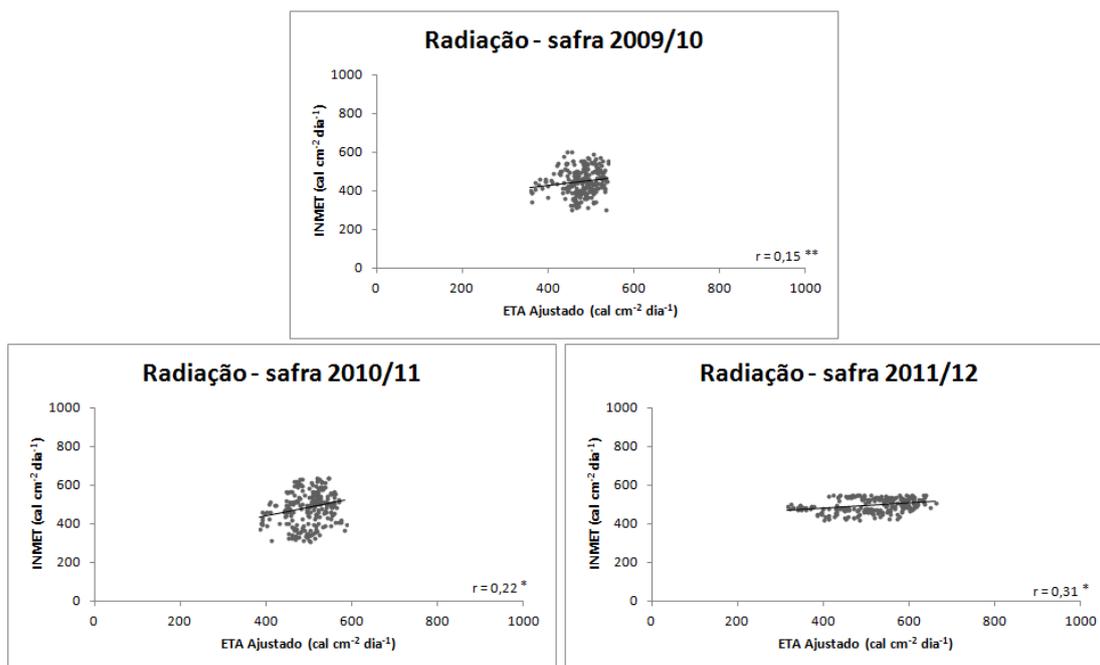


Figura 25 – Relação entre os dados de radiação ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*. **Significativo a 95% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

Na Tabela 10 são apresentadas as safras usadas na modelagem, a equação de ajuste, o respectivo coeficiente de determinação (r^2), bem como as safras de validação e os coeficiente de correlação (r) entre os dados do ETA e do INMET quando estimados e ajustados. Neste caso, os valores de coeficiente de correlação, embora significativos, pouco (2009/10) ou não (2010/11e 2011/12) se alteraram em função da aplicação dos modelos de ajuste. Tais coeficientes são considerados baixos (2009/10 e 2010/11) e médio (2011/12) segundo a classificação adotada por Cohen (1988).

Tabela 10. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a radiação solar incidente entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET

| Radiação solar incidente | | | | | |
|--------------------------|------------------------|--------|------------------|-----------------|-----------------|
| Safras de ajuste | Equação de ajuste | r^2 | Safras ajustadas | r Estimado | r Ajustado |
| 2006/07 | | | 2009/10 | 0,18 | 0,15 |
| a | $y = 0,4183x + 225,18$ | 0,2102 | 2010/11 | 0,22 | 0,22 |
| 2008/09 | | | 2011/12 | 0,31 | 0,31 |

4.3.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de radiação solar incidente estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET)

Na Tabela 11 são apresentados os erros médios quadráticos (RMS) e RMS normalizados (RMSE), bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para os dados estimados e ajustados (ETA) em relação aos observados (INMET) para a variável radiação solar incidente.

Tabela 11. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a radiação solar incidente

| Safr | RMS (cal cm ⁻² dia ⁻¹) | | RMSE (%) | | NS | |
|---------|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado |
| 2009/10 | 179 | 75,2 | 40% | 17% | -6,36 | 0,30 |
| 2010/11 | 201,7 | 87,6 | 41% | 18% | -4,64 | -0,06 |
| 2011/12 | 168,9 | 76,6 | 33% | 15% | -3,63 | 0,94 |

A Tabela 11 informa que há uma redução na magnitude dos erros nos valores de radiação solar incidente do modelo ETA quando os dados são ajustados pela equação de regressão linear. O RMS diminuiu 104,3, 114,1 e 92,3 cal cm⁻² dia⁻¹ para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente, quando os dados foram submetidos à equação de ajuste. O RMSE variando entre 15 e 18% para as safras de validação indica que houve melhora na estimativa dos dados de radiação solar incidente quando os dados do ETA foram submetidos aos modelos de ajuste. Já que para os dados originais estimados pelo modelo ETA estes indicadores estavam entre 33 e 41%.

Apesar do aumento do NS nas safras 2009/10 e 2010/11, quando comparados os dados estimados (ETA) com os observados (INMET), o desempenho do modelo matemático mostrou-se inaceitável (abaixo de 0,36) (SILVA et al., 2008). O mesmo não ocorreu com a safra 2011/12, pois o valor de NS obtido (0,94), indica um bom desempenho do modelo matemático de ajuste (SILVA et al., 2008).

4.4. Comparação e análise dos resultados de umidade relativa média do ar a partir de dados estimados pelo ETA e observados pelas estações do INMET

De modo geral, a umidade relativa média do ar (média quinzenal) obtida por meio de dados estimados (ETA) subestima os dados observados (INMET). Nas safras de ajuste de 2006/07 e 2008/09, a diferença média entre esses dados foi de 10,7 pp (8,1%) e 3,5 pp (2,6%), respectivamente. Enquanto que na safra 2007/08 ocorreu uma superestimativa média de 6,9 pp (4,8%) dos dados do ETA em relação aos do INMET (FIGURA 26).

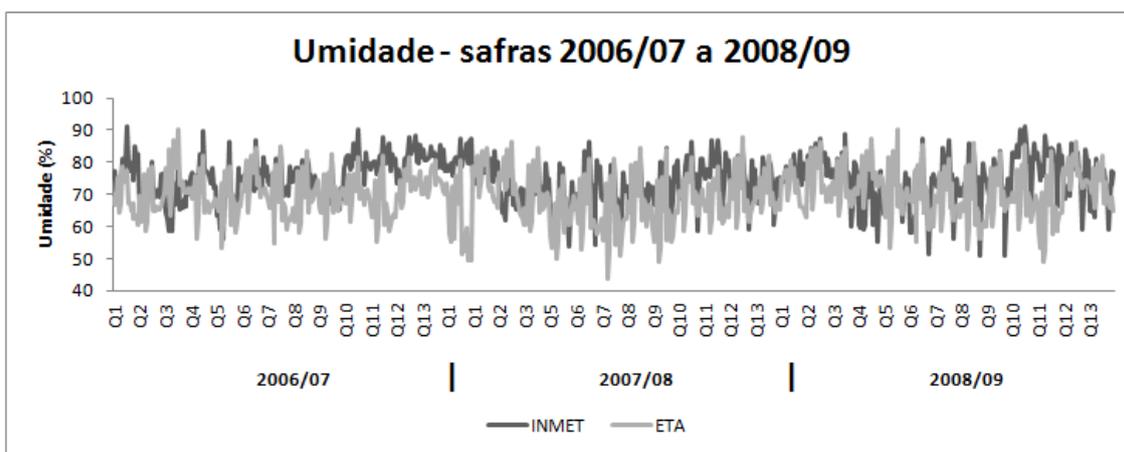


Figura 26 – Variação dos valores de umidade observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Ao analisar a Figura 27, é possível identificar a pequena concordância existente entre os dados estimados (ETA) e os observados (INMET), uma vez que os valores dos coeficientes de determinação (r^2) são baixos, estabelecendo-se em 0,007 (safra 2006/07) e 0,10 (safra 2007/08). Os baixos valores podem explicar a dificuldade que os dados estimados (ETA) têm de acompanhar os dados observados (INMET), especialmente na safra 2006/07. Apesar disso, as duas últimas safras de ajuste tiveram coeficientes de determinação significativos a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student* e a primeira não significativo.

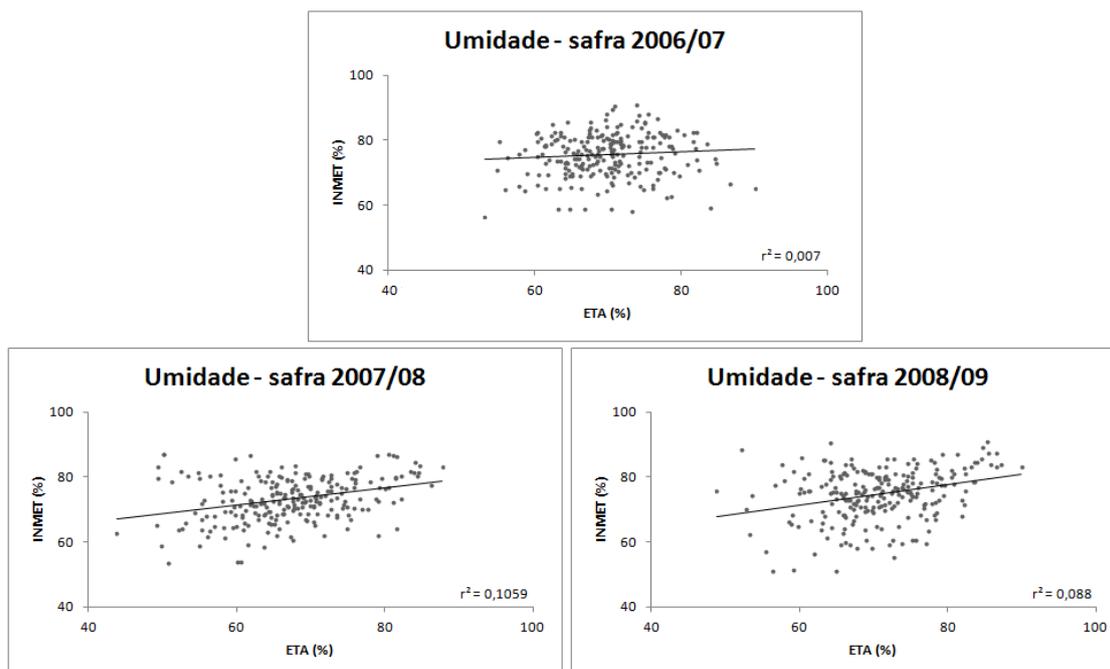


Figura 27 – Diagrama de dispersão entre os dados de umidade estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

4.4.1. Modelagem matemática de ajuste dos dados de umidade relativa média do ar estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET

A Figura 28 apresenta o diagrama de dispersão entre os valores de umidade relativa do ar estimados (ETA) e os observados pelas estações meteorológicas (INMET), a equação de regressão linear e o respectivo coeficiente de correlação para as três safras de ajuste em conjunto. Nota-se, que a utilização das três safras em conjunto resultou em um coeficiente de determinação (0,1076) e de correlação linear (0,33; considerado médio por Cohen (1988)) superior aos observados para as três safras utilizadas no ajuste. Neste caso, o teste de *t-student* indicou uma significância de 99% de probabilidade.

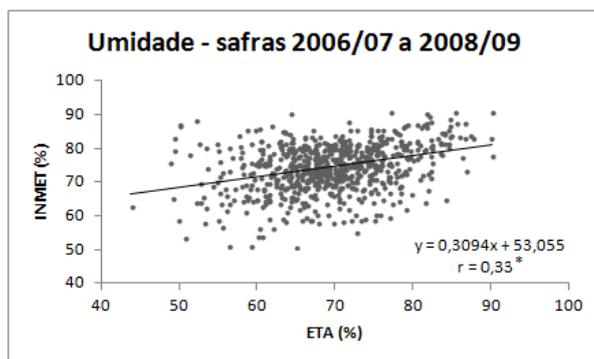


Figura 28 – Diagrama de dispersão entre os dados de umidade estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

4.4.2. Estimativa de umidade relativa média do ar a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA

Ao visualizar-se a Figura 29 (a) e (b), é possível afirmar que em todas as safras modeladas (2009/10, 2010/11 e 2011/12) os dados do ETA, quando ajustados, passam a apresentar valores de umidade relativa do ar próximos dos observados (INMET).

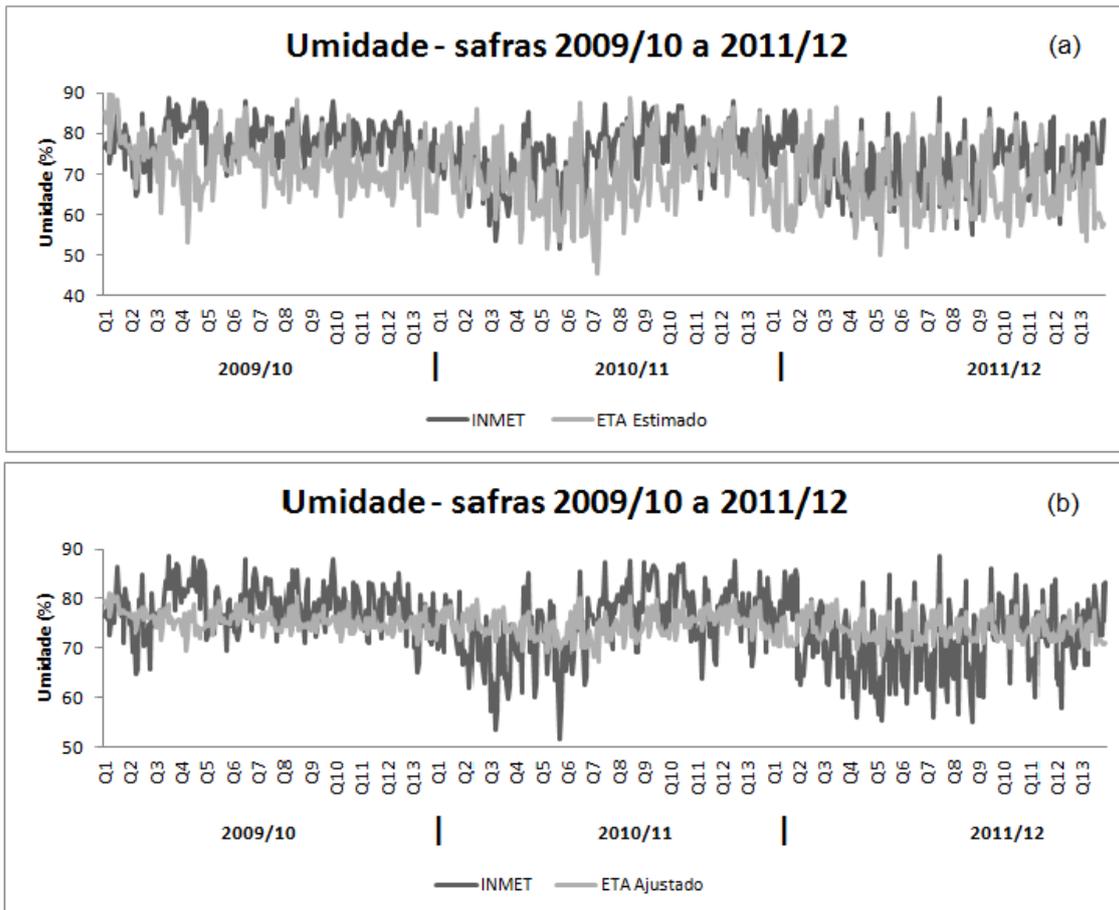


Figura 29 – (a) Variação entre os dados de umidade observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de umidade observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Pela análise da Tabela 12 é possível identificar que mesmo ajustados, os dados médios de umidade relativa do ar do modelo ETA tendem a subestimar os observados (INMET) em 3,6% na safra 2009/10 e 0,2% na safra 2010/11. Na safra 2011/12 os dados do ETA superestimam em 2% os dados do INMET, em média. Em termos absolutos, os dados médios de umidade relativa do ar estimados (ETA), subestimam os observados (INMET) em 7,5, 7,2 e 7,4% nas safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente.

A análise do σ permite inferir que os dados ajustados (ETA) não acompanham a amplitude de variação dos dados observados (INMET). Os valores de σ variam de 1,9 a 2,5% para os dados ajustados do ETA e de 4,7 a 7,1 para os dados do observados do INMET.

Tabela 12. Umidades do ar médias observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12

| Safras | Umidade relativa do ar média (%) | | | | | |
|---------|----------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| | INMET | DESV PAD | ETA Estimado | DESV PAD | ETA Ajustado | DESV PAD |
| 2009/10 | 78,2 | 4,7 | 72,3 | 6,3 | 75,4 | 1,9 |
| 2010/11 | 74,7 | 7,1 | 69,3 | 8,1 | 74,5 | 2,5 |
| 2011/12 | 71,5 | 7,1 | 66,2 | 7,3 | 73,5 | 2,3 |

Muito embora exista uma pequena diferença entre os dados médios ajustados do ETA e os dados médios observados do INMET, estes quando correlacionados indicam a existência de uma afinidade pequena nas safras 2009/10 (0,26) e 2011/12 (0,23), e média na safra 2010/11 (0,49), de acordo com Cohen (1988) (FIGURA 30). Além disso, os valores de coeficiente de correlação pouco se alteraram em virtude da aplicação dos modelos de ajuste nos dados estimados pelo modelo ETA. Entretanto, todos os coeficientes de correlação foram significativos a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

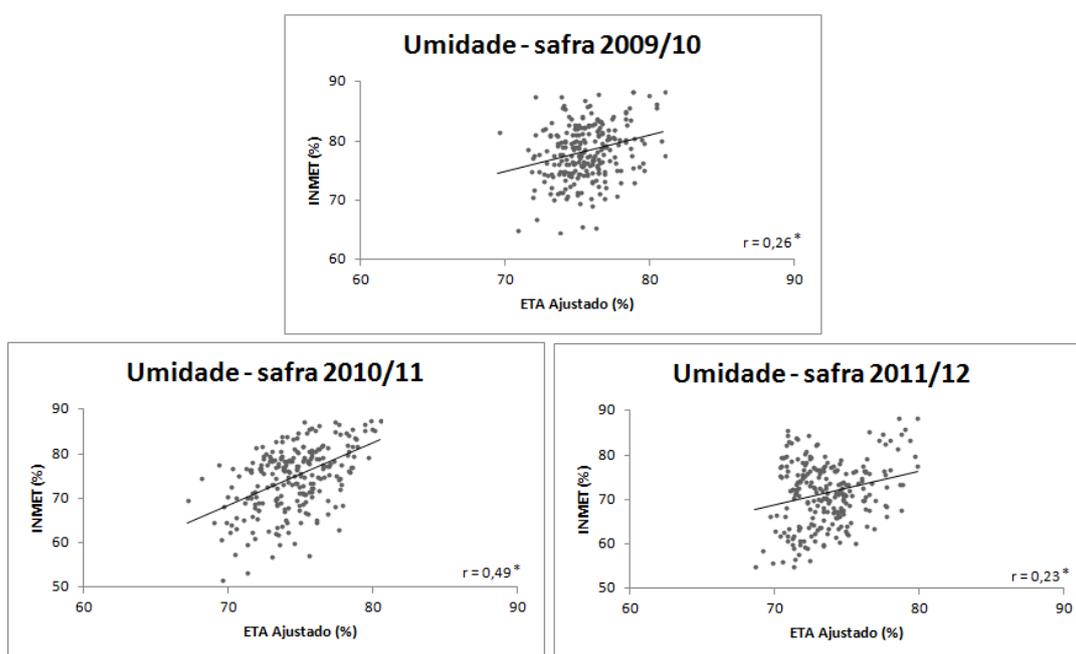


Figura 30 – Relação entre os dados de umidade ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. *Significativo a 99% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

Na Tabela 13 são apresentadas as safras usadas na modelagem, a equação de ajuste, o respectivo coeficiente de determinação (r^2), bem como as

safras de validação e os coeficientes de correlação (r) entre os dados do ETA e do INMET quando estimados e ajustados para a variável umidade relativa do ar.

Tabela 13. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a umidade relativa do ar entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET

| Umidade relativa do ar | | | | | |
|------------------------|------------------------|--------|------------------|----------|----------|
| Safras de ajuste | Equação de ajuste | r^2 | Safras ajustadas | r | r |
| | | | | Estimado | Ajustado |
| 2006/07 | $y = 0,3094x + 53,055$ | 0,1076 | 2009/10 | 0,24 | 0,26 |
| a | | | 2010/11 | 0,48 | 0,49 |
| 2008/09 | | | 2011/12 | 0,23 | 0,23 |

4.4.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de umidade relativa média do ar estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET)

Na Tabela 14 são apresentados os erros médios quadráticos (RMS) e RMS normalizados (RMSE), bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para os dados estimados e ajustados (TRMM) em relação aos observados (INMET) para a variável umidade relativa do ar.

Tabela 14. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a variável umidade relativa do ar

| Saфра | RMS (%) | | RMSE (%) | | NS | |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado |
| 2009/10 | 9 | 5,4 | 12% | 7% | -0,35 | -0,11 |
| 2010/11 | 9,5 | 6,3 | 12% | 8% | 0,21 | 0,06 |
| 2011/12 | 10,4 | 7,3 | 14% | 10% | -0,04 | -0,33 |

De acordo com a Tabela 14, percebe-se que quando os dados de umidade relativa do ar do modelo ETA foram ajustados e comparados aos observados (INMET), houve uma redução das diferenças dos valores nas safras utilizadas para validar a equação de ajuste do modelo. As diferenças entre o RMS dos dados ajustados (ETA) e os observados (INMET) estabeleceram-se em 3,6, 3,2 e 3,1 pp para as safras 2009/10, 2010/11 e

2011/12, respectivamente. A partir do cálculo do RMSE se observa uma redução da diferença entre 4 e 5 pp entre os dados estimados e os ajustados (ETA) em relação aos observados (INMET), nas safras ajustadas. Apesar dos coeficientes de correlação não serem altos para esta variável, os baixos valores de RMS além de sua redução para todas as safras, quando aplicados os modelos de ajuste, sugerem que estes melhoram as estimativas do ETA, apesar da considerável diminuição da amplitude dos dados quando estes são ajustados. Por outro lado, os valores de NS ficaram abaixo do aceitável (0,36) (SILVA et al., 2008) para todas as safras, mesmo após o ajuste dos dados pelo modelo matemático.

4.5. Comparação e análise dos resultados de velocidade média do vento a partir de dados estimados pelo ETA e observados das estações do INMET

A evolução temporal dos valores de velocidade do vento média (média quinzenal) para as safras de ajuste (FIGURA 31) destaca a tendência dos dados do modelo ETA em superestimar os valores observados pelas estações convencionais do INMET. Esse comportamento foi percebido em todas as safras de ajuste, ficando estabelecidas as diferenças médias entre os dados estimados (ETA) e os observados (INMET) em 26,5 (56 km dia⁻¹), 29,2 (61,1 km dia⁻¹) e 26,5% (60 km dia⁻¹) nas safras 2006/07, 2007/08 e 2008/09, respectivamente. Quando analisados os dados das três safras de ajuste em conjunto, os valores estimados (ETA) foram, em média, 27,4% (59,2 km dia⁻¹) superiores aos observados (INMET).

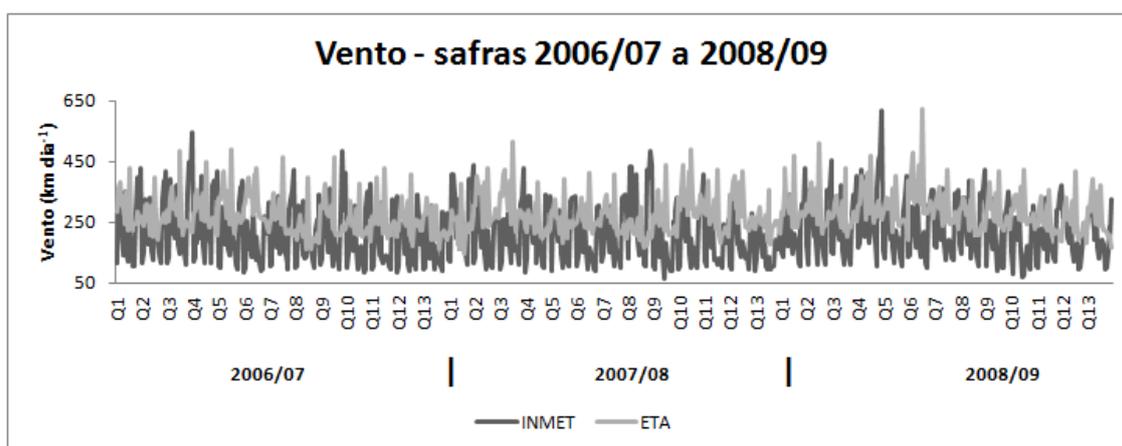


Figura 31 – Variação dos valores de velocidade do vento observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras utilizadas na geração dos modelos de ajuste (2006/07 a 2008/09). Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas em ordem cronológica (1ª quinzena de outubro a 1ª quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Estas diferenças têm suporte, também, pela análise dos diagramas de dispersão entre os valores estimados (ETA) e os observados (INMET) e os baixíssimos valores dos respectivos coeficientes de determinação para as três safras de ajuste (FIGURA 32).

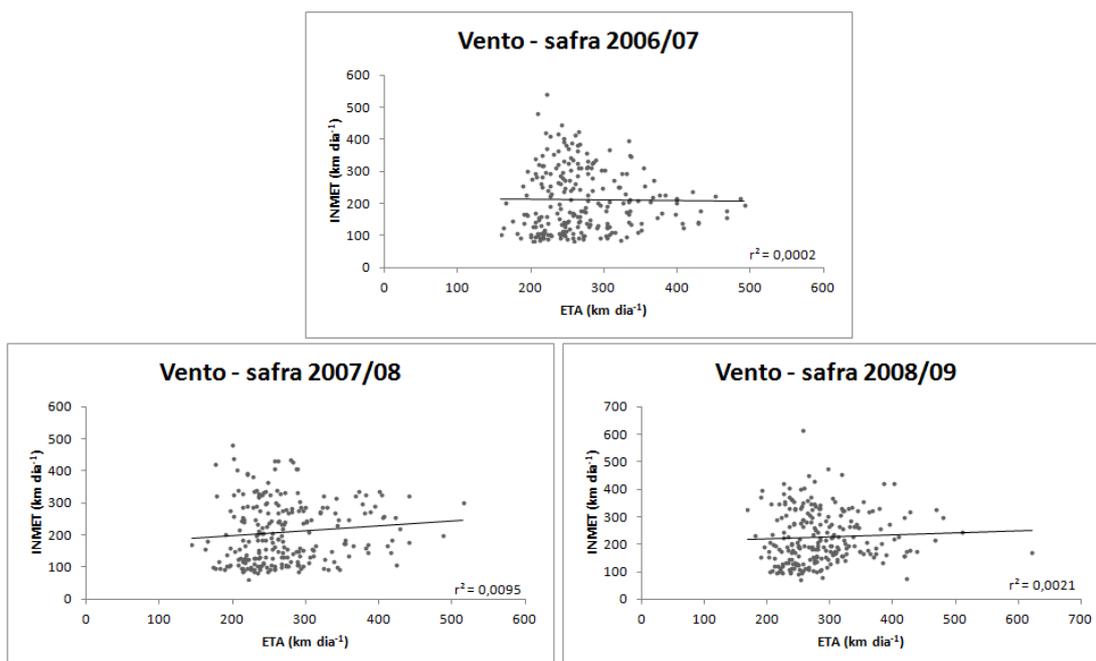


Figura 32 – Diagrama de dispersão entre os dados de velocidade do vento estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como o coeficiente de determinação (r^2).

4.5.1. Modelagem matemática de ajuste da velocidade média do vento dos dados estimados pelo ETA a partir dos dados observados pelas estações do INMET

A Figura 33 contém o diagrama de dispersão entre os valores de velocidade do vento média estimados (ETA) e os observados pelas estações meteorológicas (INMET), a equação de regressão linear e o respectivo coeficiente de determinação para as três safras de ajuste. A utilização das três safras em conjunto resultou em um coeficiente de determinação superior (0,0042) aos observados para duas (2006/07 e 2008/09) das três safras utilizadas no ajuste, e uma correlação linear muito pequena (0,06).

Diferentemente das demais variáveis analisadas, para a informação referente à velocidade do vento média, a comparação das estimativas do modelo ETA frente aos dados observados pelas estações do INMET resultou em um coeficiente de correlação muito pequeno (0,06), não significativo a 99 e 95%, pelo teste de *t-student*. Entretanto, optou-se, mesmo assim, por desenvolver modelos de ajuste para esta variável, em virtude de tal coeficiente ser significativo a 90% de probabilidade pelo mesmo teste estatístico.

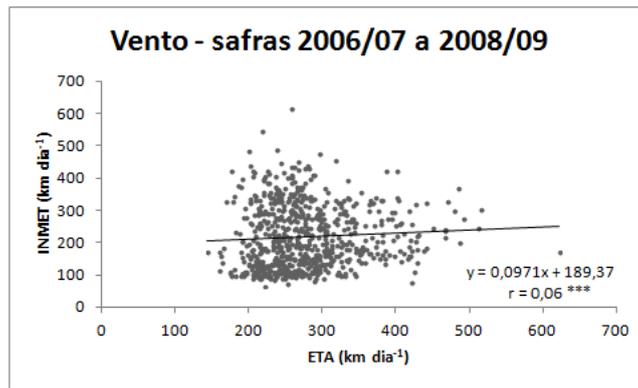


Figura 33 – Diagrama de dispersão entre os dados de velocidade do vento estimados (ETA) e os observados (INMET) para as safras de 2006/07 a 2008/09, bem como a equação (y) e o coeficiente de correlação (r) utilizados para ajustar as últimas três safras (2009/10, 2010/11 e 2011/12). ***Significativo a 90% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

4.5.2. Estimativa de velocidade média do vento a partir do ajuste dos dados estimados pelo modelo ETA

A Figura 34 (a) e (b) demonstra em todas as safras modeladas (2009/10, 2010/11 e 2011/12), que os dados do ETA, quando ajustados, passam a apresentar valores de amplitude de velocidade do vento muito menores se comparados aos do INMET. Os valores ajustados variam entre 247,3 e 201,7 km dia⁻¹ na safra 2009/10, entre 242,6 e 201,9 km dia⁻¹ na safra 2010/11 e entre 244,4 e 199,1 km dia⁻¹ na safra 2011/12. Já os valores observados (INMET) variam entre 450,2 e 65,3 km dia⁻¹ na safra 2009/10, entre 423,6 e 75,5 km dia⁻¹ na safra 2010/11 e entre 441,6 e 73 km dia⁻¹ na safra 2011/12.

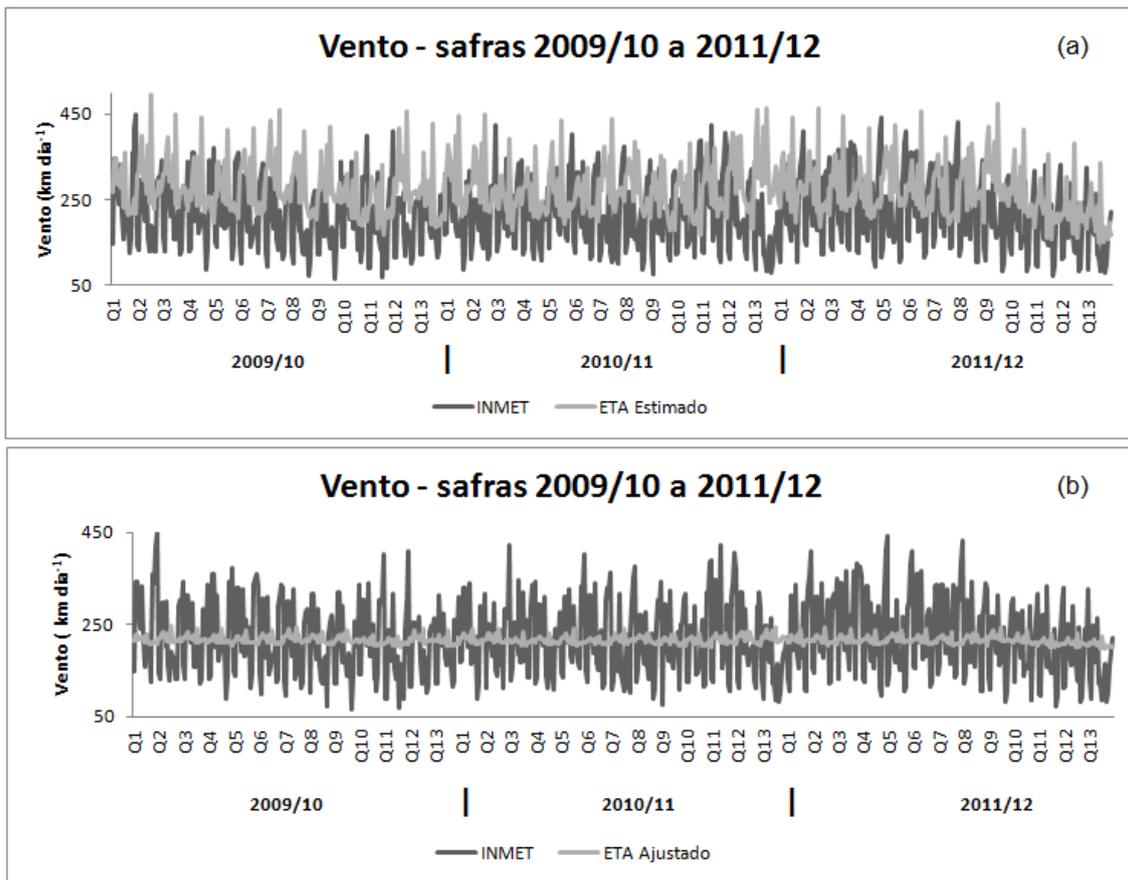


Figura 34 – (a) Variação entre os dados de velocidade do vento observados (INMET) e estimados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12; (b) variação entre os dados de velocidade do vento observados (INMET) e ajustados (ETA) para as safras de 2009/10 a 2011/12. Os símbolos de Q1 a Q13 referem-se às quinzenas estudadas em ordem cronológica (1^a quinzena de outubro a 1^a quinzena de abril). Entre estas estão dispostos os valores que se referem às estações meteorológicas estudadas na ordem em que estas estão transcritas na tabela 2.

Percebe-se, também, de acordo com a Tabela 15, que quando aplicados os modelos de ajuste às safras de validação, os dados médios de velocidade do vento do ETA subestimam os observados (INMET) em 0,5, 0,1 e 3% nas safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente, contra 26,8, 27,5 e 19,6% de superestimativa identificada antes do ajuste.

O σ da maioria dos valores ajustados do ETA varia de 8,3 a 8,8 km dia⁻¹, enquanto que para os valores do INMET entre 81,0 e 86,73 km dia⁻¹.

Tabela 15. Média das velocidades dos ventos observadas (INMET) e ajustadas (ETA) e os desvios padrão (σ) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12

| Velocidade do vento média (km dia ⁻¹) | | | | | | |
|---|-------|----------|--------------|----------|--------------|----------|
| Safras | INMET | DESV PAD | ETA Estimado | DESV PAD | ETA Ajustado | DESV PAD |
| 2009/10 | 218 | 81,0 | 276,4 | 61,1 | 216,8 | 8,5 |
| 2010/11 | 217 | 81,6 | 276,6 | 59,8 | 216,8 | 8,3 |
| 2011/12 | 221,9 | 86,7 | 265,4 | 63,5 | 215,2 | 8,8 |

De acordo com a Figura 35, os resultados obtidos não foram satisfatórios. As correlações entre os dados ajustados (ETA) e os observados (INMET) originaram coeficientes de correlação muito pequenos, não significativos (NS) (0,01 e 0,04) para as safras 2009/10 e 2011/12, respectivamente. Além disso, somente o coeficiente de correlação correspondente à safra 2010/11 (-0,13) foi significativo a 95% de probabilidade pelo teste de *t-student*.

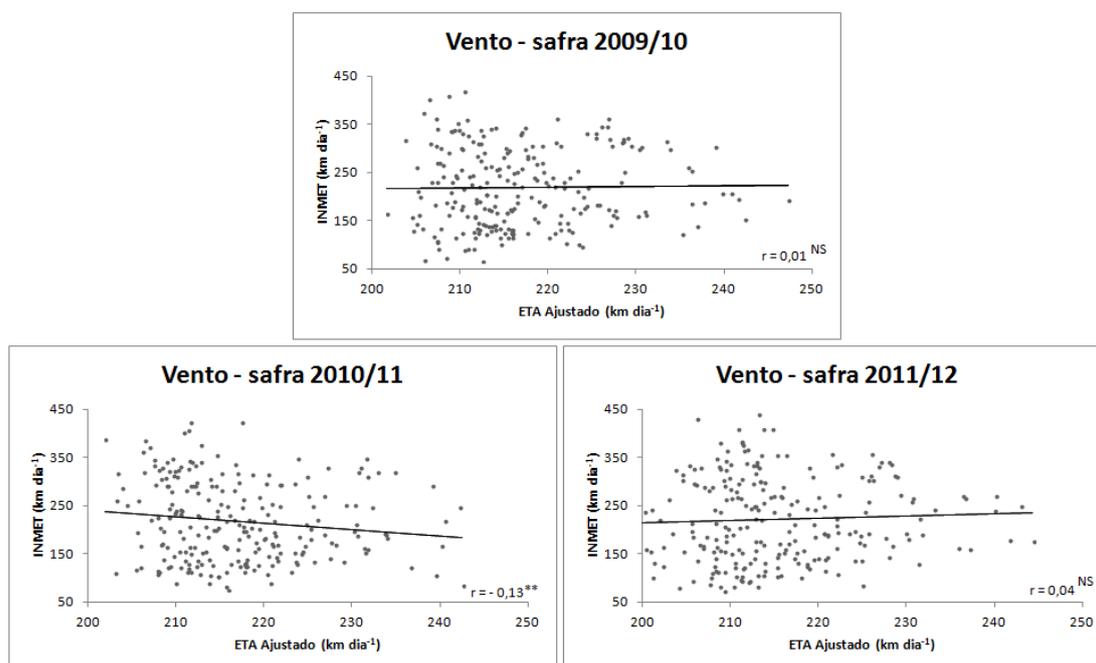


Figura 35 – Relação entre os dados de velocidade do vento ajustados (ETA) e os observados (INMET) para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12. **Significativo a 95% de probabilidade pelo teste *t* de student. NS Não significativo.

Na Tabela 16 são apresentadas as safras usadas na modelagem, a equação de ajuste, o respectivo coeficiente de determinação (r^2), bem como as

safras de validação e os coeficientes de correlação (r) entre os dados do TRMM e do INMET quando estimados e ajustados.

Tabela 16. Safras de ajuste, equação de ajuste, coeficiente de determinação (r^2), safras ajustadas e coeficiente de correlação (r) para a velocidade do vento média entre os dados do ETA estimados e ajustados frente aos dados do INMET

| Velocidade do vento | | | | | |
|---------------------|------------------------|--------|------------------|----------|----------|
| Safras de ajuste | Equação de ajuste | r^2 | Safras ajustadas | r | r |
| | | | | Estimado | Ajustado |
| 2006/07 | $y = 0,0971x + 189,37$ | 0,0042 | 2009/10 | 0,02 | 0,01 |
| a | | | 2010/11 | 0,14 | 0,13 |
| 2008/09 | | | 2011/12 | 0,05 | 0,04 |

4.5.3. Avaliação estatística do ajuste dos dados de velocidade média do vento estimados pelo modelo ETA em comparação com os observados (INMET)

Na Tabela 17 são apresentados os erros médios quadráticos (RMS) e RMS normalizados (RMSE), bem como o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) para os dados estimados e ajustados (ETA) em relação aos observados (INMET) para a variável velocidade do vento.

Tabela 17. RMS, RMSE e NS dos dados estimados e ajustados do modelo ETA, safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, para a variável velocidade do vento

| Safra | RMS (km dia ⁻¹) | | RMSE (%) | | NS | |
|---------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado | Estimado | Ajustado |
| 2009/10 | 116,2 | 81,2 | 56% | 39% | -1,07 | -0,01 |
| 2010/11 | 122,7 | 83,0 | 60% | 41% | -1,27 | -0,04 |
| 2011/12 | 113,5 | 86,8 | 55% | 42% | -0,72 | -0,006 |

De acordo com a Tabela 17, percebe-se que quando os dados de velocidade do vento do sistema TRMM foram ajustados e comparados aos observados (INMET) houve uma redução das diferenças de velocidade do vento nas safras utilizadas para validar a equação de ajuste do modelo. As diferenças entre RMS dos dados ajustados (TRMM) e os observados (INMET), estabeleceram-se em 35, 39,7 e 26,7 km dia⁻¹ para as safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente. Para o RMSE se observa uma redução da diferença de 16, 19 e 13 pp entre os dados estimados e os ajustados (ETA) em

relação aos observados (INMET), nas safras 2009/10, 2010/11 e 2011/12, respectivamente. Contudo, os coeficientes NS tanto para os valores estimados quanto ajustados foram inaceitáveis para as três safras de ajuste (inferiores a 0,36), segundo Silva et al. (2008).

Apesar da redução na magnitude do RMS observada por ocasião do ajuste, os resultados encontrados para a variável velocidade do vento aqui apresentados, no que se refere aos coeficientes de correlação, indicam que pode não ser oportuno utilizar tais dados em estudos que visem a modelagem e o monitoramento da produtividade agrícola. Pois, mesmo ajustados, os dados do modelo ETA, pelo menos na forma como foram utilizados neste trabalho (em que são geradas estimativas quinzenais baseadas em dados diários), não conseguiram captar a magnitude da variação espacial e temporal dos dados observados pelas estações meteorológicas convencionais do INMET.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados neste trabalho merecem algumas considerações acerca da sua introdução em modelos de estimativa da produtividade agrícola de culturas em substituição aos dados observados em superfície.

Em se tratando dos dados de precipitação pluvial, os altos valores de coeficiente de correlação indicam que o sistema TRMM consegue captar a magnitude da variação espacial e temporal dos dados observados pelas estações do INMET. Embora os valores de RMSE sejam altos (especialmente para a safra 2011/12), os modelos agrônômicos geralmente utilizam os dados quinzenais para efetuar o monitoramento temporal das condições das lavouras. Contudo, para a estimativa dos valores de produtividade final os dados geralmente são integrados ao longo de todo o ciclo da planta (embora muitas vezes com diferentes pesos para cada estágio fenológico), o que pode diluir parte dos erros que ocorrem nas estimativas de precipitação do TRMM e do ETA.

Afora isto, o menor coeficiente de correlação para a safra 2011/12, cujo regime pluvial foi o menor das seis safras analisadas, pode ser um indício de que o sistema TRMM não seja tão eficiente em safras de escassez hídrica, quando o monitoramento espacial e temporal da safra agrícola é ainda mais importante.

Com relação ao modelo de ajuste para tais dados, este reduziu a diferença de 5 mm de superestimativa para 4 mm de subestimativa dos dados do TRMM frente os do INMET, quando considerada a média para as três safras ajustadas. Porém, a amplitude dos dados ajustados que era em torno de 3 mm menor (também para a média das três safras) ficou 13,3 mm menor em relação aos dados observados do INMET. Em outras palavras, a aplicação do modelo de ajuste não resultou em melhora na estimativa da ordem de grandeza dos valores de precipitação e provocou a diminuição da amplitude dos dados para as safras ajustadas. Além disso, tal abordagem pouco alterou os coeficientes de correlação para todas as safras, embora tenha reduzido o RMSE para duas das três safras analisadas. Assim, é possível que os dados

originais do TRMM ainda sejam mais indicados que os ajustados visando a utilização em modelos agronômicos.

Em contrapartida, para a variável temperatura média do ar, radiação solar incidente e umidade relativa do ar média, os dados do modelo ETA ajustados conseguem reproduzir, até certo ponto, a ordem de grandeza dos dados observados, visto que os dados médios para cada safra pouco diferem para os dois conjuntos de dados (ETA e INMET). Isto é particularmente importante, pois elevadas sub ou superestimativas nestes valores podem provocar grandes diferenças na estimativa da produtividade das culturas, mesmo que o comportamento espacial ou temporal dos valores do ETA e do INMET seja similar, como é o caso dos dados de radiação solar incidente estimados. Para tais variáveis, houve substancial redução no RMSE quando os dados do ETA foram ajustados. Entretanto, os modelos de ajuste reduziram consideravelmente a amplitude de variação dos dados, o que pode ter influência na estimativa da produtividade agrícola por meio de modelos agronômicos.

No que se refere aos dados de velocidade do vento média, os modelos de ajuste conseguiram aproximar os valores médios dos dados ajustados frente aos observados. Isto, assim como para as demais variáveis, é de suma importância em se tratando da estimativa da produtividade em modelos agronômicos. No entanto, os baixos coeficientes de correlação não significativos resultantes, além da diminuição da amplitude de variação dos dados após o ajuste (de cerca de 60 para 8,5 km dia⁻¹), desencorajam sua aplicação em modelos agronômicos.

Obviamente, as considerações aqui apresentadas só poderão ser confirmadas por ocasião de uma detalhada análise do desempenho dos dados ajustados frente aos estimados e observados quando efetivamente utilizados na estimativa e/ou monitoramento da produtividade agrícola das culturas por meio de modelos agronômicos.

Igualmente, cabe lembrar que as informações climáticas perfazem somente parte dos dados de entrada neste tipo de modelo. Já que além destes, são geralmente utilizados dados espectrais provindos de sensores remotos de observação da Terra a bordo de plataformas orbitais. As informações espectrais refletem, em parte, o efeito conjunto do clima e dos demais fatores

que interferem diretamente na produtividade dos cultivos (como manejo e tipo de solo, adubação, tratos fitossanitários etc.) e contemplam amostras pontuais em uma resolução espacial muito melhor em comparação aos dados climáticos. Isto pode compensar, até certo ponto, a discrepância entre os dados meteorológicos estimados e observados.

Afora o que foi discutido até aqui no que tange a comparação entre os dados estimados e observados, cabe ressaltar que os dados provindos do ETA e do TRMM possuem uma resolução espacial regular. Da mesma forma, os dados recobrem boa parte da América do Sul (ETA) ou do globo terrestre (TRMM). Isso implica na disponibilidade de dados mesmo em locais onde a distribuição das estações meteorológicas ainda é esparsa, e permite fazer inferências sobre o andamento da safra agrícola mesmo em locais remotos.

6. CONCLUSÕES

Os dados de precipitação pluvial do TRMM para as safras de ajuste apresentaram alto coeficiente de correlação (0,83) frente aos dados observados do INMET, apresentando uma superestimativa média de 11%. Uma vez que os modelos matemáticos gerados tiveram pouca influência nos valores estimados pelo TRMM frente aos dados observados, recomenda-se a sua utilização no formato original em modelos de estimativa de produtividade de cultivos agrícolas.

Para as variáveis meteorológicas temperatura do ar, radiação solar incidente e umidade relativa do ar, boa parte dos dados melhorou substancialmente por acasão da aplicação dos modelos matemáticos gerados. Mesmo assim, observou-se, em geral, média correlação entre os dados estimados pelo modelo ETA e os observados pelo INMET. Logo, seu emprego como variável de entrada em modelos de estimativa de produtividade agrícola deve ser analisado com cuidado e aplicado com ressalvas, já que a atmosfera apresenta uma natureza caótica.

No que tange à variável velocidade do vento, perceberam-se correlações muito baixas entre os dados estimados pelo ETA e os observados pelas estações meteorológicas. Em virtude disso, não se recomenda sua aplicação em modelos de estimativa de produtividade de cultivos agrícolas.

Ressalta-se, que as observações supracitadas só serão definitivamente ratificadas quando da efetiva aplicação dos dados do TRMM e do ETA em modelos agrônômicos de estimativa de produtividade agrícola. Isto permitirá, até certo ponto, o monitoramento da variabilidade espacial e temporal das condições meteorológicas que interferem na produtividade dos cultivos, além de promover o acesso às informações meteorológicas a qualquer momento, mesmo em locais remotos ou onde o acesso aos dados observados é limitado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M.; GIAROLLA, A.; MOREIRA, M. A.; DEPPE, F. Avaliação de diferentes escalas temporais de chuva obtidos por modelos matemáticos e por sensoriamento remoto para o Paraná. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, CBMET. Edição XIV, 2006 – Florianópolis – p. 151-200.

ADEYEWA, Z. D.; K. E NAKAMURA. Validation of TRMM radar rainfall data over major climatic regions in Africa, *Journal of Applied Meteorology*, v. 42, n.2, p. 331-347, 2003.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. (FAO-Irrigation and Drainage Paper 56).

ALMEIDA, I. R. **Variabilidade pluviométrica interanual e produção de soja no Estado do Paraná**. 130 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Campus de Presidente Prudente, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, 2000.

ANGSTRÖN, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v.50, p.121-126, 1924.

ANUÁRIO BRASILEIRO DA SOJA: Santa Cruz do Sul: Gazeta Grupo de Comunicações, 2000. 143p.

ARAÚJO, A. N. Simulação hidrológica com o uso de chuva estimada por satélite. Dissertação de Mestrado. 164 pág. Paraná, UFPR. 2006.

ARAUJO, M. A. de. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná. Curitiba,

2008. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ASCE. Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management. Committee Irrigation and Drainage Division. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drainage Eng.*, 119:429-442, 1993.

BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 3, p. 433-440. July/Sept. 2003.

CHOU, S. C. et al. Evaluation of seasonal precipitation forecasts over South America using Eta model. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, n. 4, p. 537-555, 2005.

CHOU, S. C. Modelo regional Eta. **Climanálise**. v. 1, n. Ed. Especial, p. 203-207, 1996.

COHEN, J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale, NJ, Erlbaum. (1988)

COLLISCHONN, B. 2006. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: grãos, oitavo levantamento, maio 2015 – CONAB, – Brasília, 2015. Disponível em: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_05_12_08_59_36_bol_etim_graos_maio_2015.pdf>. Acesso em: 12 maio 2015.

COSTA, J. A. Cultura da soja. Porto Alegre: ed. Evangraf, 1996. 233 p.

DERECZYNSKI, C. P. et al. Avaliação do desempenho do modelo regional Eta utilizando um topografia de 30 segundos. Congresso Brasileiro de Meteorologia, CBMET. Edição XI, 2000 - Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. 1 CD-ROM.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Soja:** história. Londrina: Embrapa Soja, 2007. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/index.php?op_page=112&cod_pai=33>. Acesso em: Acessado em: 25 de fev. 2015.

FARIAS, J. R. B. Zoneamento agroclimático delimita áreas de risco para soja. In: **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 5, p. 70-72, 2006.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; MEUMAIER, N.; OYA, T. Ecofisiologia. In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **A** Farias, J. R. B.; Neumaier, N.; Nepomuceno, A. L. Soja. In: Monteiro, J. E. B. A. (Org.). Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: INMET, 2009. p. 263-277.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; MEUMAIER, N. Ecofisiologia da Soja. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 09 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica 48).

HARTKAMP, A. D.; WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information systems with agronomic modellings: A review. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 5, p. 761-722. 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Eletrônica (SIDRA). 2015. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=1612>>. Acesso em: 01 de mar. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema IBGE de Recuperação Eletrônica (SIDRA). 2015. Disponível em: <<http://www.estatgeo.ibge.gov.br/cartograma/gerador.html?nivr=3&zoom=fe&met>>

odo=3&qtdfaixas=5&cor1=%2300CC00&cor2=%2300FF00&cor3=%2399FF33
&cor4=%23FFFF00&c>. Acesso em: 01 de mar. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Estação Meteorológica de Observação de Superfície Convencional, 2015. Disponível em:

<<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>.

Acesso em: 10 de jan. 2015.

JUNIOR, P. A. V. et al. Previsões meteorológicas do Modelo Eta para subsidiar o uso de modelos de previsão agrícola no Centro-Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 2, p. 412-420, mar-abr, 2009.

KAWANISHI, T.; KUROIWA, H.; KOJIMA, M.; OIKAWA, K.; KOZU, T.; KUMAGAI, H.; OKAMOTO, K.; OKUMURA, M.; NAKATSUKA, H.; NISHIKAWA, K. TRMM Precipitation Radar. **Adv. Space Res.** Vol. 25, No. 5, pp. 969-72, 2000.

KUMMEROW, C. et al. The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission. Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. **Journal of Applied Meteorology**, 39 (12), 1965-1982. 2000.

MARION, E. Parâmetros hídricos para estimativa do rendimento de grãos de soja. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina.

MOTA, F. S. Condições climáticas e produção de soja no sul do Brasil. In: Verneti, F.de J.(Coord) Soja. Campinas: Fundação Cargill, 1983, 463 p.

MUNDSTOCK, C. M.; THOMAS, A. L. Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATTO, E. R. Estresses em soja. Passo Fundo. Embrapa Trigo, cap.1, p. 19-44, 2000.

NÓBREGA, R. N. Modelagem de Impactos do Desmatamento nos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Jamari (Ro) utilizando dados de Superfície e do TRMM. Campina Grande, PB: UFCG. 2008. 238 pág. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande.

PÍCOLLI, M. C. A.; RUDORFF, B. F. T.; RIZZI, R.; GIAROLLA, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, p. 789-795, 2009.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, Adelaide, v.64, p.114-118, 1940.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M. de; FONTANA, D. C. Monitoramento e estimativa da produtividade de soja auxiliados pelo modelo de previsão de tempo ETA. **Revista Ambiente & Água**, v.1, n. 2, p. 28-38, 2006.

ROSA, V. G. C. da; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, 2010.

SAULO, A. C. et al. Model characterization of the south american low-level folw during the 1997-1998 spring-summer season. **Climate Dynamics**, v. 18, p. 867-881, 2000.

SCHUSTER, I. Soja e saúde. Cascavel: Coodetec, 2007. Disponível em: <<http://www.coodetec.com.br/sojasaude/>>. Acesso em: 23 de fev. 2015.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M. G.; SEDYIAMA, C. S.; GOMES, J. L. L. Cultura da soja: I Parte. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa Viçosa - Minas Gerais, 1996. 96 p.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Intercambios de masas de aire entre latitudes tropicales y extratropicales de Sudamerica. **Climanálise**, v. 14, n. 1, p. 46-70, 2003.

SELUCHI, M. E. et al. Analysis of three situations of the foehn effects over the Andes (zonda wind) using the Eta-CPTec regional model. **Weather and forecasting**, v. 18, 481-501p., 2003.

SILVA, P. M. O.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 12:258-265, 2008.

SPRING, versão 4.3.3. Software freeware, 2007. (informações em: <http://www.dpi.inpe.br/spring>).

SUGAWARA, L. M. Variação interanual da produtividade agrícola da cana-de-açúcar por meio de um modelo agrônômico. (Sid.inpe.br/mtc-m19/2010/10,08,14,39-TDI). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. 144 p. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/38CSKHB>>. Acesso em: 17 fev. 2015.

USDA (United States Department of Agriculture) - World Agricultural Supply and Demand Estimates WASDE-541 – May 12, 2015. Disponível em: <<http://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2015.

WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction. Academic Press: San Diego, CA, 1995.

WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 2nd Ed. International Geophysics Series, Vol. 91, Elsevier, 627 p. 2006.

ZHANG, H. G.; Fu, S. H.; FANG, W. H.; IMURA, H.; ZHANG, X. C. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. Transactions of the ASABE, 50, 911-918. 2007.

8. ANEXOS

ANEXO A. Radiação extraterrestre diária (r_a) em diferentes latitudes para o 15^o dia do mês.

| Northern Hemisphere | | | | | | | | | | | | Lat. deg. | Southern Hemisphere | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
| 0.0 | 2.6 | 10.4 | 23.0 | 35.2 | 42.5 | 39.4 | 28.0 | 14.9 | 4.9 | 0.1 | 0.0 | 70 | 41.4 | 28.3 | 15.8 | 4.9 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 2.2 | 10.7 | 23.5 | 37.3 | 45.3 |
| 0.1 | 3.7 | 11.7 | 23.9 | 35.3 | 42.0 | 36.9 | 28.6 | 16.1 | 6.0 | 0.7 | 0.0 | 68 | 41.0 | 29.3 | 16.9 | 6.0 | 0.8 | 0.0 | 0.0 | 3.2 | 11.9 | 24.4 | 37.4 | 44.7 |
| 0.6 | 4.8 | 12.9 | 24.8 | 35.6 | 41.4 | 36.8 | 29.3 | 17.3 | 7.2 | 1.5 | 0.1 | 66 | 40.9 | 30.0 | 18.1 | 7.2 | 1.5 | 0.1 | 0.9 | 4.2 | 13.1 | 25.4 | 37.6 | 44.1 |
| 1.4 | 5.9 | 14.1 | 25.8 | 35.9 | 41.2 | 36.8 | 30.0 | 18.4 | 8.5 | 2.4 | 0.6 | 64 | 41.0 | 30.3 | 19.3 | 8.4 | 2.4 | 0.6 | 1.2 | 5.3 | 14.4 | 26.3 | 38.0 | 43.9 |
| 2.3 | 7.1 | 15.4 | 26.6 | 36.3 | 41.2 | 39.0 | 30.6 | 19.6 | 9.7 | 3.4 | 1.3 | 62 | 41.2 | 31.5 | 20.4 | 9.6 | 3.4 | 1.2 | 2.0 | 6.4 | 15.5 | 27.2 | 38.3 | 43.9 |
| 3.3 | 8.3 | 16.6 | 27.5 | 36.6 | 41.2 | 39.2 | 31.3 | 20.6 | 10.9 | 4.4 | 2.2 | 60 | 41.5 | 32.3 | 21.5 | 10.8 | 4.4 | 2.0 | 2.9 | 7.6 | 16.7 | 28.1 | 38.7 | 43.9 |
| 4.3 | 9.6 | 17.7 | 28.4 | 37.0 | 41.3 | 39.4 | 32.0 | 21.7 | 12.1 | 5.5 | 3.1 | 58 | 41.7 | 33.0 | 22.6 | 12.0 | 5.5 | 2.9 | 3.9 | 8.7 | 17.9 | 28.9 | 39.1 | 44.0 |
| 5.4 | 10.8 | 18.9 | 29.2 | 37.4 | 41.4 | 39.6 | 32.6 | 22.7 | 13.3 | 6.7 | 4.2 | 56 | 42.0 | 33.7 | 23.6 | 13.2 | 6.5 | 3.9 | 4.9 | 9.9 | 19.0 | 29.8 | 39.5 | 44.1 |
| 6.5 | 12.0 | 20.0 | 30.0 | 37.8 | 41.5 | 39.8 | 33.2 | 23.7 | 14.5 | 7.9 | 5.2 | 54 | 42.2 | 34.3 | 24.6 | 14.4 | 7.7 | 4.9 | 6.0 | 11.1 | 20.1 | 30.6 | 39.9 | 44.3 |
| 7.7 | 13.2 | 21.1 | 30.8 | 38.2 | 41.6 | 40.1 | 33.8 | 24.7 | 15.7 | 9.0 | 6.4 | 52 | 42.5 | 35.0 | 25.6 | 15.6 | 8.8 | 6.0 | 7.1 | 12.2 | 21.2 | 31.4 | 40.2 | 44.4 |
| 8.9 | 14.4 | 22.2 | 31.5 | 38.5 | 41.7 | 40.2 | 34.4 | 25.7 | 16.9 | 10.2 | 7.5 | 50 | 42.7 | 35.5 | 26.6 | 16.7 | 10.0 | 7.1 | 8.2 | 13.4 | 22.2 | 32.1 | 40.6 | 44.5 |
| 10.1 | 15.7 | 23.3 | 32.2 | 38.8 | 41.8 | 40.4 | 34.9 | 26.6 | 18.1 | 11.4 | 8.7 | 48 | 42.9 | 36.2 | 27.5 | 17.9 | 11.1 | 8.2 | 9.3 | 14.6 | 23.3 | 32.8 | 40.9 | 44.5 |
| 11.3 | 16.9 | 24.3 | 32.9 | 39.1 | 41.9 | 40.6 | 35.4 | 27.5 | 19.2 | 12.6 | 9.9 | 46 | 43.0 | 36.7 | 28.4 | 19.0 | 12.3 | 9.3 | 10.4 | 15.7 | 24.3 | 33.5 | 41.1 | 44.6 |
| 12.5 | 18.0 | 25.3 | 33.5 | 39.3 | 41.9 | 40.7 | 35.9 | 28.4 | 20.3 | 13.9 | 11.1 | 44 | 43.2 | 37.2 | 29.3 | 20.1 | 13.5 | 10.5 | 11.6 | 16.8 | 25.2 | 34.1 | 41.4 | 44.6 |
| 13.8 | 19.2 | 26.3 | 34.1 | 39.5 | 41.9 | 40.8 | 36.3 | 29.2 | 21.4 | 15.1 | 12.4 | 42 | 43.3 | 37.7 | 30.1 | 21.2 | 14.6 | 11.6 | 12.8 | 18.0 | 26.2 | 34.7 | 41.6 | 44.6 |
| 15.0 | 20.4 | 27.2 | 34.7 | 39.7 | 41.9 | 40.8 | 36.7 | 30.0 | 22.5 | 16.3 | 13.6 | 40 | 43.4 | 38.1 | 30.9 | 22.3 | 15.8 | 12.8 | 13.9 | 19.1 | 27.1 | 35.3 | 41.8 | 44.6 |
| 16.2 | 21.5 | 28.1 | 35.2 | 39.9 | 41.8 | 40.8 | 37.0 | 30.7 | 23.6 | 17.5 | 14.6 | 38 | 43.4 | 38.5 | 31.7 | 23.3 | 16.9 | 13.9 | 15.1 | 20.2 | 28.0 | 35.8 | 41.9 | 44.5 |
| 17.5 | 22.6 | 29.0 | 35.7 | 40.0 | 41.7 | 40.8 | 37.4 | 31.5 | 24.6 | 18.7 | 16.1 | 36 | 43.4 | 38.9 | 32.4 | 24.3 | 18.1 | 15.1 | 16.2 | 21.2 | 28.8 | 36.3 | 42.0 | 44.4 |
| 18.7 | 23.7 | 29.9 | 36.1 | 40.0 | 41.6 | 40.8 | 37.6 | 32.1 | 25.6 | 19.9 | 17.3 | 34 | 43.4 | 39.2 | 33.0 | 25.3 | 19.2 | 16.2 | 17.4 | 22.3 | 29.5 | 36.7 | 42.0 | 44.3 |
| 19.9 | 24.8 | 30.7 | 36.5 | 40.0 | 41.4 | 40.7 | 37.9 | 32.8 | 26.6 | 21.1 | 18.5 | 32 | 43.3 | 39.4 | 33.7 | 26.3 | 20.3 | 17.4 | 18.5 | 23.3 | 30.4 | 37.1 | 42.0 | 44.1 |
| 21.1 | 25.8 | 31.4 | 36.8 | 40.0 | 41.2 | 40.6 | 38.0 | 33.4 | 27.6 | 22.2 | 19.8 | 30 | 43.1 | 39.6 | 34.3 | 27.2 | 21.4 | 18.6 | 19.6 | 24.3 | 31.1 | 37.5 | 42.0 | 43.9 |
| 22.3 | 26.8 | 32.2 | 37.1 | 40.0 | 40.9 | 40.4 | 38.2 | 33.9 | 28.5 | 23.3 | 21.0 | 28 | 43.0 | 39.8 | 34.8 | 28.1 | 22.5 | 19.7 | 20.7 | 25.3 | 31.8 | 37.8 | 41.9 | 43.8 |
| 23.4 | 27.8 | 32.8 | 37.4 | 39.9 | 40.6 | 40.2 | 38.3 | 34.5 | 29.3 | 24.5 | 22.2 | 26 | 42.8 | 39.9 | 35.3 | 29.0 | 23.5 | 20.8 | 21.8 | 26.3 | 32.5 | 38.0 | 41.8 | 43.3 |
| 24.6 | 28.8 | 33.5 | 37.6 | 39.7 | 40.3 | 39.9 | 38.3 | 34.9 | 30.2 | 25.5 | 23.3 | 24 | 42.5 | 40.0 | 35.8 | 29.8 | 24.6 | 21.9 | 22.9 | 27.2 | 33.1 | 38.3 | 41.7 | 43.0 |
| 25.7 | 29.7 | 34.1 | 37.8 | 39.5 | 40.0 | 39.6 | 38.4 | 35.4 | 31.0 | 26.6 | 24.5 | 22 | 42.2 | 40.1 | 36.2 | 30.6 | 25.6 | 23.0 | 24.0 | 28.1 | 33.7 | 38.4 | 41.4 | 42.6 |
| 26.8 | 30.6 | 34.7 | 37.9 | 39.3 | 39.5 | 39.3 | 38.3 | 35.8 | 31.8 | 27.7 | 25.6 | 20 | 41.9 | 40.0 | 36.6 | 31.3 | 26.6 | 24.1 | 25.0 | 28.9 | 34.2 | 38.6 | 41.2 | 42.1 |
| 27.9 | 31.5 | 35.2 | 38.0 | 39.0 | 39.1 | 38.9 | 38.2 | 36.1 | 32.5 | 28.7 | 26.6 | 18 | 41.5 | 40.0 | 37.0 | 32.1 | 27.5 | 25.1 | 26.0 | 29.8 | 34.7 | 38.7 | 40.9 | 41.7 |
| 28.9 | 32.3 | 35.7 | 38.1 | 38.7 | 38.6 | 38.5 | 38.1 | 36.4 | 33.2 | 29.6 | 27.9 | 16 | 41.1 | 39.9 | 37.2 | 32.8 | 28.5 | 26.2 | 27.0 | 30.6 | 35.2 | 38.7 | 40.6 | 41.2 |
| 29.9 | 33.1 | 36.1 | 38.1 | 38.4 | 38.1 | 38.1 | 38.0 | 36.7 | 33.9 | 30.6 | 28.9 | 14 | 40.6 | 39.7 | 37.5 | 33.4 | 29.4 | 27.2 | 27.9 | 31.3 | 35.9 | 36.7 | 40.2 | 40.6 |
| 30.9 | 33.8 | 36.5 | 38.0 | 38.0 | 37.6 | 37.6 | 37.8 | 36.9 | 34.5 | 31.5 | 30.0 | 12 | 40.1 | 39.6 | 37.7 | 34.0 | 30.2 | 28.1 | 28.9 | 32.1 | 36.6 | 36.6 | 39.8 | 40.0 |
| 31.9 | 34.5 | 36.9 | 37.9 | 37.6 | 37.0 | 37.1 | 37.5 | 37.1 | 35.1 | 32.4 | 31.0 | 10 | 39.5 | 39.3 | 37.8 | 34.6 | 31.1 | 29.1 | 29.8 | 32.6 | 36.3 | 36.5 | 39.3 | 39.4 |
| 32.8 | 35.2 | 37.2 | 37.8 | 37.1 | 36.3 | 36.5 | 37.2 | 37.2 | 35.6 | 33.3 | 32.0 | 8 | 38.9 | 39.0 | 37.9 | 35.1 | 31.9 | 30.0 | 30.7 | 33.4 | 36.6 | 36.4 | 38.8 | 38.7 |
| 33.7 | 35.8 | 37.4 | 37.6 | 36.6 | 36.7 | 36.9 | 36.9 | 37.3 | 36.1 | 34.1 | 32.9 | 6 | 38.3 | 38.7 | 38.0 | 36.6 | 32.7 | 30.9 | 31.5 | 34.0 | 36.8 | 36.2 | 38.2 | 38.0 |
| 34.6 | 36.4 | 37.6 | 37.4 | 36.0 | 36.0 | 36.3 | 36.5 | 37.3 | 36.6 | 34.9 | 33.9 | 4 | 37.6 | 38.3 | 38.0 | 36.0 | 33.4 | 31.8 | 32.3 | 34.6 | 37.0 | 36.0 | 37.6 | 37.2 |
| 35.4 | 37.0 | 37.8 | 37.1 | 35.4 | 34.2 | 34.6 | 36.1 | 37.3 | 37.0 | 35.6 | 34.8 | 2 | 36.9 | 37.9 | 38.0 | 36.4 | 34.1 | 32.6 | 33.1 | 35.2 | 37.1 | 37.7 | 37.0 | 36.4 |
| 36.2 | 37.5 | 37.9 | 36.8 | 34.8 | 33.4 | 33.9 | 36.7 | 37.2 | 37.4 | 36.3 | 35.6 | 0 | 36.2 | 37.5 | 37.9 | 36.8 | 34.8 | 33.4 | 33.9 | 35.7 | 37.2 | 37.4 | 36.3 | 35.6 |

ANEXO B. Horas de luz do dia (n) em diferentes latitudes para o 15^o dia do mês.

| Northern Hemisphere | | | | | | | | | | | | Lat. deg. | Southern Hemisphere | | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----------|---------------------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|
| Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec | | Jan | Feb | Mar | Apr | May | Jun | July | Aug | Sep | Oct | Nov | Dec |
| 0.0 | 6.6 | 11.0 | 15.6 | 21.3 | 24.0 | 24.0 | 17.6 | 12.8 | 8.3 | 2.3 | 0.0 | 70 | 24.0 | 17.4 | 13.0 | 8.4 | 2.7 | 0.0 | 0.0 | 6.4 | 11.2 | 15.7 | 21.7 | 24.0 |
| 2.1 | 7.3 | 11.1 | 15.3 | 19.7 | 24.0 | 22.3 | 17.0 | 12.7 | 8.7 | 4.1 | 0.0 | 68 | 21.9 | 16.7 | 12.9 | 8.7 | 4.3 | 0.0 | 1.7 | 7.0 | 11.3 | 15.3 | 19.9 | 24.0 |
| 3.9 | 7.8 | 11.2 | 14.9 | 18.7 | 22.0 | 20.3 | 16.4 | 12.7 | 9.0 | 5.2 | 1.9 | 66 | 20.1 | 16.2 | 12.8 | 9.1 | 5.3 | 2.0 | 3.7 | 7.6 | 11.3 | 15.0 | 18.8 | 22.1 |
| 5.0 | 8.2 | 11.2 | 14.7 | 17.9 | 20.3 | 19.2 | 16.0 | 12.6 | 9.3 | 6.0 | 3.7 | 64 | 19.0 | 15.8 | 12.8 | 9.3 | 5.1 | 3.7 | 4.8 | 9.0 | 11.4 | 14.7 | 18.0 | 20.3 |
| 5.7 | 8.5 | 11.3 | 14.4 | 17.3 | 19.2 | 18.4 | 15.7 | 12.6 | 9.5 | 6.6 | 4.8 | 62 | 18.3 | 15.5 | 12.7 | 9.6 | 5.7 | 4.8 | 5.8 | 8.3 | 11.4 | 14.5 | 17.4 | 19.2 |
| 6.4 | 8.8 | 11.4 | 14.2 | 16.8 | 18.4 | 17.7 | 15.3 | 12.5 | 9.7 | 7.1 | 5.6 | 60 | 17.6 | 15.2 | 12.6 | 9.8 | 7.2 | 5.6 | 6.3 | 8.7 | 11.5 | 14.3 | 16.0 | 18.4 |
| 6.9 | 9.1 | 11.4 | 14.1 | 16.4 | 17.8 | 17.2 | 15.1 | 12.5 | 9.9 | 7.5 | 6.2 | 58 | 17.1 | 14.9 | 12.6 | 9.9 | 7.6 | 6.2 | 6.8 | 8.9 | 11.5 | 14.1 | 16.5 | 17.8 |
| 7.3 | 9.3 | 11.5 | 13.9 | 16.0 | 17.3 | 16.8 | 14.8 | 12.4 | 10.1 | 7.9 | 6.7 | 56 | 16.7 | 14.7 | 12.5 | 10.1 | 8.0 | 6.7 | 7.2 | 9.2 | 11.5 | 13.9 | 16.1 | 17.3 |
| 7.7 | 9.5 | 11.5 | 13.8 | 15.7 | 16.8 | 16.4 | 14.6 | 12.4 | 10.2 | 8.2 | 7.1 | 54 | 16.3 | 14.5 | 12.5 | 10.2 | 8.3 | 7.2 | 7.6 | 9.4 | 11.5 | 13.8 | 15.6 | 16.9 |
| 8.0 | 9.7 | 11.5 | 13.6 | 15.4 | 16.5 | 16.0 | 14.4 | 12.4 | 10.3 | 8.5 | 7.5 | 52 | 16.0 | 14.3 | 12.5 | 10.4 | 8.6 | 7.5 | 8.0 | 9.6 | 11.5 | 13.7 | 15.5 | 16.5 |
| 8.3 | 9.8 | 11.6 | 13.5 | 15.2 | 16.1 | 15.7 | 14.3 | 12.3 | 10.4 | 8.7 | 7.9 | 50 | 15.7 | 14.2 | 12.4 | 10.5 | 8.8 | 7.9 | 8.3 | 9.7 | 11.7 | 13.6 | 15.3 | 16.1 |
| 8.6 | 10.0 | 11.6 | 13.4 | 15.0 | 15.8 | 15.5 | 14.1 | 12.3 | 10.6 | 9.0 | 8.2 | 48 | 15.4 | 14.0 | 12.4 | 10.6 | 9.0 | 8.2 | 8.5 | 9.9 | 11.7 | 13.4 | 15.0 | 15.8 |
| 8.8 | 10.1 | 11.6 | 13.3 | 14.8 | 15.5 | 15.2 | 14.0 | 12.3 | 10.7 | 9.2 | 8.5 | 46 | 15.2 | 13.9 | 12.4 | 10.7 | 9.2 | 8.5 | 8.8 | 10.0 | 11.7 | 13.3 | 14.8 | 15.5 |
| 9.1 | 10.3 | 11.6 | 13.2 | 14.6 | 15.3 | 15.0 | 13.8 | 12.3 | 10.7 | 9.4 | 8.7 | 44 | 14.9 | 13.7 | 12.4 | 10.8 | 9.4 | 8.7 | 9.0 | 10.2 | 11.7 | 13.3 | 14.6 | 15.3 |
| 9.3 | 10.4 | 11.7 | 13.2 | 14.4 | 15.0 | 14.8 | 13.7 | 12.3 | 10.8 | 9.6 | 9.0 | 42 | 14.7 | 13.6 | 12.3 | 10.8 | 9.6 | 9.0 | 9.2 | 10.3 | 11.7 | 13.2 | 14.4 | 15.0 |
| 9.5 | 10.5 | 11.7 | 13.1 | 14.2 | 14.8 | 14.6 | 13.6 | 12.2 | 10.9 | 9.7 | 9.2 | 40 | 14.5 | 13.5 | 12.3 | 10.9 | 9.8 | 9.2 | 9.4 | 10.4 | 11.8 | 13.1 | 14.3 | 14.8 |
| 9.6 | 10.6 | 11.7 | 13.0 | 14.1 | 14.6 | 14.4 | 13.5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |