



CHRISTIANY MATTIOLI SARMIENTO

**MODELAGEM ESPECTRO-
AGROMETEOROLÓGICA PARA ESTIMATIVA
DA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO ESTADO
DO MATO GROSSO**

**LAVRAS - MG
2018**

CHRISTIANY MATTIOLI SARMIENTO

**MODELAGEM ESPECTRO-AGROMETEOROLÓGICA PARA
ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO ESTADO DO
MATO GROSSO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutora.

Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Dra. Priscila Pereira Coltri
Coorientadores

**LAVRAS - MG
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sarmiento, Christiany Mattioli.

Modelagem espectro-agrometeorológica para estimativa da
produtividade da soja no estado do Mato Grosso / Christiany Mattioli
Sarmiento. - 2018.

167 p. : il.

Orientador: Marcelo de Carvalho Alves.

Coorientadores: Luiz Gonsaga de Carvalho, Priscila Pereira
Coltri.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Sistema de Informação Geográfica. 2. Sensoriamento remoto.
3. Meteorologia. I. Alves, Marcelo de Carvalho. II. Carvalho, Luiz
Gonsaga de. III. Coltri, Priscila Pereira. IV. Título.

CHRISTIANY MATTIOLI SARMIENTO

**MODELAGEM ESPECTRO-AGROMETEOROLÓGICA PARA
ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE DA SOJA NO ESTADO DO
MATO GROSSO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 25 de julho de 2018.

Profa. Dra. Priscila Pereira Coltri	CEPAGRI/UNICAMP
Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho	UFLA
Prof. Dr. Gilberto Coelho	UFLA
Profa. Dra. Mirléia Aparecida de Carvalho	UFLA
Profa. Dra. Renata Ribeiro do Valle Gonçalves	CEPAGRI/UNICAMP

Dr. Marcelo de Carvalho Alves
Orientador

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Dra. Priscila Pereira Coltri
Coorientadores

**LAVRAS - MG
2018**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), à Pró- Reitoria de Pós-Graduação e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade à realização do doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pois o presente trabalho foi realizado com o seu apoio. apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. (Sugiro a eliminação dessa parte).

Ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

Ao Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura - CEPAGRI/UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas.

Aos professores e professoras pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu orientador, Doutor Marcelo de Carvalho Alves, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela temática abordada na tese, pelas sugestões, contribuições e auxílio.

À Doutora Priscila Pereira Coltri, ser humano maravilhoso que me concedeu o privilégio de sua coorientação. Gratidão por me impulsionar a seguir adiante, por me incentivar com palavras doces e motivadoras, por ter sido minha fortaleza, minha base, meu esteio. Por muitas vezes pensei que não conseguiria chegar ao fim, mas você foi minha inspiração! Obrigada por ser minha guia enquanto eu me sentia confusa. Incontáveis foram as vezes em que precisei do seu auxílio para persistir, ir pelo caminho certo, desde o dado gerado ao texto escrito. Mesmo geograficamente distante, você se fez presente em todos os momentos. Definitivamente não sei o que fiz de bom, para merecer ter uma coorientadora tão especial, tão fraterna e tão atenciosa nesta fase tão delicada pela qual passei no doutorado. Escrevo com lágrimas nos olhos! Minha gratidão

e respeito por você serão eternos. Você foi um presente de Deus para mim. Obrigada pelo apoio constante!

Ao Doutor Luiz Gonsaga de Carvalho, por todos os ensinamentos que certamente contribuíram para o meu crescimento profissional e pessoal. Obrigada pelo apoio e compreensão em todos os momentos e por ter me incentivado a dar o melhor de mim.

Aos membros e membras das bancas de qualificação e defesa: Doutora Margarete Marin Lordelo Volpato, Doutora Mirleia Aparecida de Carvalho, Doutora Priscila Pereira Coltri, Doutora Renata Ribeiro do Valle Gonçalves, Doutor Gilberto Coelho, Doutor Marcelo de Carvalho Alves e Doutor Luiz Gonsaga de Carvalho. (Penso que ficaria melhor no masculino plural, como estava).

Aos membros e membras do Núcleo de Estudo em Geomática, do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras. (Igualmente, no masculino plural).

À Heloísa, Neuza Ribeiro, Helem Cristina Carmo, Josy Lacerda, e ao Doutor Carlos Volpato do Departamento de Engenharia.

Aos membros dos Laboratórios de Geoprocessamento e Geomática, em especial, ao Franklin Daniel Inácio, Amanda Gomes, Julia Dal Poggetto Rodrigues, Miryan Pires, Otávio Nassur, Jefferson Francisco Soares, Sthéfany Airane e Daniel Andrade.

À Gláudia Miranda Ramirez, amiga querida e especial que sempre acreditou e torceu por mim. Obrigada por tudo!

À Doutora Rute Costa Ferreira, por me auxiliar com dados espectrais de insolação e precipitação.

Aos meus colegas e amigos da Equipe de Geoprocessamento do Laboratório de Estudos e Projetos em Manejo Florestal.

À Flavia Gorgulho Grossi Branquinho e ao Paulo Terra pela amizade sincera e companheirismo no trabalho!

Ao Antônio Carlos de Sousa Couto Junior por me auxiliar na finalização da tese por meio de métodos ágeis de gerência de projetos em que definimos sprints nas atividades e por permitir que eu utilizasse os computadores do Laboratório de Geoprocessamento para a finalização da tese.

Gratidão aos meus pais que tanto amo, Luzia e Emilio. Obrigada pelas oportunidades de crescimento desde sempre!

Aos meus irmãos Emilio, Cristian, Norman e Fabrício, parceiros de uma vida inteira.

Ao meu Tio Toninho e à Tia Lurdinha.

Aos meus primos e primas, em especial, Renata, João Vítor e Laiany.

Agradeço as boas energias da minha eterna turma de Geografia da Universidade Federal de Alfenas, desde 2008 partilhando de uma linda amizade que perdura, ao longo do tempo e se mantém mesmo com a distância.

Agradeço às minhas amigas e irmãs de alma: Aline Teixeira, Geísa Moreira, Jaqueline Monique, Lyvia Karla, Tatiana Dias, Layla Isadora Nonato Murad.

E, o mais importante, ao Paulo Henrique Silva. Meu amor, obrigada por tudo o que fez e faz por mim, por nós! Esteve ao meu lado quando eu acreditava que não teria forças para prosseguir. Obrigada por sempre me mostrar o lado positivo das situações e as consequentes oportunidades de aprendizado! Obrigada pela paciência, pelo companheirismo, por estar ao meu lado me auxiliando em todos os sentidos. Te amo muito!

RESUMO GERAL

A estimativa precisa do rendimento da soja, antes da colheita, em escala local ou regional, fornece informações valiosas. O monitoramento da cultura com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento fenológico e estimar a produtividade tem sido realizado, utilizando métodos convencionais, tais como dados de estações meteorológicas e visitas a campo. Esses resultados, muitas vezes subjetivos, nem sempre são acurados. Estudos recentes demonstram a aplicabilidade de dados obtidos por satélites, na análise do sistema solo, planta e atmosfera com a finalidade de adquirir informações precisas de extensas áreas e a custos menores. Nesse sentido, o objetivo central do presente trabalho foi estimar a produtividade e analisar o desenvolvimento fenológico da soja, no estado do Mato Grosso, empregando dados espectrais. Empregaram-se dados do Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) da NASA e produtos derivados do Geostacionary Operational Environmental Satellite (GOES IMAGER) integrado ao modelo agrometeorológico espectral para estimativa da soja em grãos. Após validação da usabilidade dos dados espectrais, aplicaram-se dados de temperatura do MERRA-2 e dados de evapotranspiração real e potencial, precipitação, horas de brilho solar e índices de vegetação, derivados de imagens de satélite, para estimar a produtividade da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], com a metodologia de Doorenbos e Kassam (1979), desenvolvendo um modelo agrometeorológico espectral. Foram geradas estimativas de produtividade, para 10 talhões distribuídos em 10 fazendas, localizadas em aglomerados produtores de soja do Estado do Mato Grosso, para a safra 2012/2013. Como resultados principais, apurou-se que os produtos MERGE - 3B42RT do satélite TRMM apresentaram correlação alta (com R^2 variando entre 0,80 a 0,87), para a estimativa dos dados de precipitação, e os valores de reanálise Merra-2 forneceram bons resultados para a estimativa de temperatura e umidade relativa do ar. O modelo agrometeorológico espectral apresentou, para a produtividade, os coeficientes de correlação e determinação de 0,84 e 0,72, respectivamente, com índice de concordância entre 0,96 e 0,99.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica. Sensoriamento remoto. Meteorologia. Fenologia da soja. MERRA-2. TRMM.

GENERAL ABSTRACT

Precise estimation of soybean yield before harvest on a local or regional scale provides valuable information. The monitoring of the crop in order to monitor the phenological development and to estimate the productivity has been carried out using conventional methods, such as meteorological station data and field visits. These results, often subjective, are not always accurate. Recent studies demonstrate the applicability of data obtained by satellites in the analysis of the soil, plant and atmosphere system for the purpose of acquiring accurate information of large areas and at lower costs. In this sense, the main objective of the present work was to estimate the productivity and to analyze the phenological development of the soybean, in the state of Mato Grosso, using spectral data. Data from NASA's Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and products derived from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES IMAGER) integrated with the spectral agrometeorological model for soybean grain estimation were used. After validation of the usability of the spectral data, MERRA-2 temperature data, and actual and potential evapotranspiration data, precipitation, hours of solar brightness and vegetation indexes derived from satellite images were used to estimate soybean yield [*Glycine max* (L.) Merrill] with the methodology of Doorenbos and Kassam (1979), developing a spectral agrometeorological model. Productivity estimates were generated for 10 farms distributed in 10 farms located in agglomerates producing soybeans in the State of Mato Grosso, for the 2012/2013 harvest. The main results obtained were that the MERGE-3B42RT products of the TRMM satellite presented high correlation (with R^2 ranging from 0.80 to 0.87) for estimation of the precipitation data and the Merra-2 reanalysis values provided good results for estimation temperature and relative humidity. The spectral agrometeorological model showed, for productivity, correlation and determination coefficients of 0.84 and 0.72, respectively, with a concordance index between 0.96 and 0.99.

Keywords: Geographic Information System. Remote sensing. Meteorology. phenology of soybean. MERRA-2. TRMM.

LISTA DE FIGURAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

- Figura 1 - Comportamento da precipitação e temperatura média da Normal Climatológica de Cuiabá, Mato Grosso. 67
- Figura 2 - Proximidade entre Estações Meteorológicas Convencionais e talhões de soja. 69
- Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada. 72
- Figura 4 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), para resultados mais representativos das EMC, considerando a variável precipitação. 89
- Figura 5 - Precipitação ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais..... 91
- Figura 6 - Precipitação ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais..... 91
- Figura 7 - Precipitação ocorrida na EMC Cuiabá de acordo com dados de campo e dados espectrais..... 92
- Figura 8 - Resultados obtidos pelo coeficiente de determinação nas EMC Canarana e Padre Ricardo de Remetter. 95
- Figura 9 - Temperatura ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais. 97
- Figura 10 - Temperatura ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais..... 97
- Figura 11 - Resultados obtidos pelo coeficiente de determinação nas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá. 100
- Figura 12 - Umidade ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais. 102

Figura 13 - Umidade ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.....	102
Figura 14 - Umidade ocorrida na EMC Cuiabá de acordo com dados de campo e dados espectrais.	103
Figura 15 - Coeficientes de determinação das variáveis indicadas.....	106
Figura 16 - Insolação ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais.	108
Figura 17 - Insolação ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.....	108
Figura 18 - Insolação ocorrida na EMC Cuiabá de acordo com dados de campo e dados espectrais.	109
Figura 19 - Coeficiente de determinação da EMC Canarana.....	112
Figura 20 - Evapotranspiração real segundo dados espectrais e de campo.....	114
Figura 21 - Coeficiente de determinação da EMC Canarana.....	116

ARTIGO 2

Figura 1 - Mapa de localização dos talhões área de estudo no estado de Mato Grosso.	138
Figura 2 - Comportamento espectral do NDVI no período analisado.....	152
Figura 3 - Comportamento espectral médio dos produtos ET e PET (MOD16) para os talhões analisados na safra 2012/2013. No eixo y, valores de ET e PET e no eixo x, ciclo do plantio.....	154
Figura 4 - Comportamento espectral médio dos produtos de insolação e temperatura para os talhões analisados na safra 2012/2013. No eixo y, valores de insolação e temperatura e no eixo x, ciclo do plantio.	155

LISTA DE TABELAS

PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 - Produção de soja no Brasil e no Estado do Mato Grosso nos últimos 6 anos.....	27
Tabela 2 - Descrição resumida dos estádios fenológicos vegetativos da soja.	29
Tabela 3 - Descrição dos estádios reprodutivos.	31

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1

Tabela 1 - Informações sobre os talhões considerados no estudo.	70
Tabela 2 - Referência das datas e DJ referentes à resolução temporal dos dados de precipitação.	74
Tabela 3 - Dados espectrais utilizados.	77
Tabela 4 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).	81
Tabela 5 - Análises estatísticas entre os dados de precipitação obtidos por fontes de campo em comparação com dados de precipitação obtidos por fontes espectrais e de reanálise pelo método de correlação de Pearson.	88
Tabela 6 - Equação de regressão para as EMC's.....	90
Tabela 7 - Índice de concordância d de Willmott.....	90
Tabela 8 - Análises estatísticas entre os dados de temperatura obtidos por fontes de campo em comparação com dados de temperatura obtidos por fontes espectrais e de reanálise.....	94
Tabela 9 - Equação de regressão para as EMC's.....	96
Tabela 10 - Índice de concordância d de Willmott.....	96

Tabela 11 - Análises estatísticas entre os dados de umidade obtidos por fontes de campo em comparação com dados de umidade obtidos por fontes de reanálise.	99
Tabela 12 - Equação de regressão para as EMC's para a variável umidade relativa.	101
Tabela 13 - Índice de concordância d de Willmott.....	101
Tabela 14 - Análises estatísticas entre os dados de insolação (número de horas de brilho solar) obtidos por fontes de campo em comparação com dados de insolação obtidas por fontes espectrais.	105
Tabela 15 - Equação de regressão para as EMC's para a variável insolação (número de horas de brilho solar).	107
Tabela 16 - Índice de concordância d de Willmott.....	107
Tabela 17 - Análises estatísticas entre os dados de evapotranspiração (em mm), obtidos por fontes de campo, em comparação com dados de evapotranspiração obtidos por fontes espectrais.	112
Tabela 18 - Equação de regressão para as EMCCanarana para a variável evapotranspiração real.....	113
Tabela 19 - Índice de concordância d de Willmott.....	113
Tabela 20 - Análises estatísticas entre os dados de evapotranspiração potencial (em mm), obtidos por fontes de campo, em comparação com dados de evapotranspiração potencial obtidos por fontes espectrais.	115
Tabela 21 - Equação de regressão para as EMC Canarana para a variável evapotranspiração real.....	115
Tabela 22 - Índice de concordância d de Willmott.	116

ARTIGO 2

Tabela 1 - Variedade, Produtividade líquida final e Área (ha) para os 10 talhões selecionados para o desenvolvimento do modelo agrometeorológico-espectral.	139
Tabela 2 - Duração (média) dos estádios fenológicos correspondente ao período analisado.....	140
Tabela 3 - Dados espectrais utilizados.	144
Tabela 4 - Coeficiente de cultura (Kc) e fator de resposta à produtividade (Ky) da soja nos vários estádios de seu desenvolvimento.....	147
Tabela 5 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).	149
Tabela 6 - Produção e produtividade líquida final e estimada (kg/hectare) para os 10 talhões.	156
Tabela 7 - Rendimento e análises estatísticas dos resultados de produção e produtividade obtidos em campo em comparação com os resultados do Modelo Agrometeorológico Espectral, em 10 talhões de soja no Mato Grosso, safras de 2012/2013.....	157

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	17
1	INTRODUÇÃO GERAL	17
1.1	Hipótese	20
1.2	Objetivo geral	21
1.3	Objetivos específicos	21
1.4	Organização da tese	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	Aspectos gerais da cultura da soja	23
2.2	Soja no Mato Grosso	26
2.3	Ciclo fenológico	28
2.3.1	Estádios vegetativos da soja	28
2.3.2	Estádios reprodutivos da soja	30
2.4	Demanda hídrica da soja	32
2.5	Exigências termofotoperiódicas da soja	33
2.6	Monitoramento e previsão de safras da soja	34
2.6.1	Modelo de previsão de safras	36
2.7	Variáveis meteorológicas obtidas por fontes espectrais	39
2.7.1	Satélite TRMM	39
2.7.2	Modelo de reanálise Global MERRA	40
2.7.3	Precipitação pelo método MERGE	40
2.7.4	Número de horas de brilho solar utilizando GOES	41
2.7.5	Sensor MODIS	42
2.8	Filragem de dados meteorológicos utilizando Savitzky Golay 42	
	REFERÊNCIAS	45
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	57
	ARTIGO 1 - APLICABILIDADE POTENCIAL DE INFORMAÇÕES DE SENSORIAMENTO REMOTO EM AGROMETEOROLOGIA	57
1	INTRODUÇÃO	63
2	MATERIAL E MÉTODOS	67
2.1	Estado de Mato Grosso	67
2.2	Área de estudo	68
2.3	Desenvolvimento do trabalho	71
2.4	Dados de campo obtidos em estações meteorológicas convencionais	73
2.4.1	Precipitação	73
2.4.2	Temperatura	74
2.4.3	Insolação	75

2.4.4	Umidade relativa do ar.....	75
2.4.5	Evapotranspiração	76
2.5	Dados radiométricos obtidos em plataformas orbitais.....	76
2.5.1	Evapotranspiração real e potencial (MOD16)	78
2.5.2	Precipitação (MERGE 3B42RT)	78
2.5.3	Insolação	79
2.5.4	Dados de reanálise de modelos climáticos (Merra-2)	79
2.5.5	Correção geométrica e padronização de arquivos	80
2.5.6	Filtragem Savitzky golay	80
2.6	Análises estatísticas	80
2.6.1	Regressão linear	81
2.6.2	Correlação	81
2.6.3	Índice de concordância de Willmott	82
3	RESULTADOS	85
3.1	Precipitação.....	85
3.2	Temperatura	92
3.3	Umidade	98
3.4	Insolação.....	104
4	EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL	111
4.1	Evapotranspiração potencial	114
5	CONCLUSÃO	117
	REFERÊNCIAS	119
	ARTIGO 2 - MODELO AGROMETEOROLÓGICO	
	ESPECTRAL PARA ESTIMATIVA DE Produtividade da soja	
	em GRÃOS NO MATO GROSSO centro-oeste do BRASIL	127
1	INTRODUÇÃO	133
2	MATERIAL E MÉTODOS	137
2.1	Dados experimentais	137
2.2	Modelo Agrometeorológico	141
2.3	Dados espectrais.....	143
2.4	Dados Meteorológicos Regionais	145
2.5	Modelo Agrometeorológico-Espectral	146
2.6	Análises estatísticas	148
2.6.1	Regressão linear	148
2.6.2	Correlação de Pearson	149
2.6.3	Índice de concordância de Willmott	150
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	151
3.1	Análise temporal das variáveis espectrais utilizadas no modelo agrometeorológico espectral	151
3.2	Modelo Agrometeorológico espectral	155
4	CONCLUSÃO	159
	REFERÊNCIAS	161

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil possui grande importância econômica e é considerado um dos líderes mundiais na produção e exportação de produtos agrícolas. A agricultura é um setor fundamental, para a economia brasileira, na qual o agronegócio nacional se insere de forma expressiva nas exportações e gerou, no ano de 2015, US\$ 96 bilhões de dólares. Nacionalmente, a agricultura evoluiu significativamente, nas últimas quatro décadas, em virtude da incorporação de novas tecnologias aos processos produtivos, disponibilidade de terra e mão de obra, tendo, como consequência, o aumento da produtividade e elevados ganhos financeiros.

Considerado o produto agrícola mais exportado em 2017, o complexo soja foi responsável pelo faturamento de US\$ 31.716.749.260, o equivalente a 33% de todo o montante. Essa relevância se apoia nos programas de incentivos a pesquisas pautadas, na geração de tecnologias, para a obtenção de elevados índices de produtividade. A cadeia produtiva da soja tem apresentado um crescimento progressivo que pode ser atribuído a fatores de natureza mercadológica e tecnológica, em que se estabelecem interações comerciais, para o desenvolvimento do mercado da commodity e apresentam soluções inovadoras necessárias para a evolução do processo produtivo.

O Mato Grosso é o principal estado do Brasil, produtor de soja, responsável por 28,6% da produção no País. O balanço geral da safra 2016/17 da oleaginosa foi favorável pelas condições climáticas que contribuíram, para o aumento de 14,9% na produtividade da soja, saltando de 2.848 kg/ha, na safra 2015/16, para 3.273 kg/ha na safra de 2017. O estado possui condições edafoclimáticas adequadas, para a produção e o desenvolvimento da sojicultura,

inicialmente implantada, em função da disponibilidade de terras, financiamento público e oferta de sementes adaptadas às condições climáticas locais. Nesse contexto, o monitoramento da soja, em diferentes escalas, é imprescindível para o sucesso da produção total.

O monitoramento e a previsão de safras são fatores determinantes para o mercado agrícola e podem ser realizados por meio de métodos de estimativa da produtividade, utilizando técnicas robustas e precisas ao longo do ciclo da cultura. Estimar a produtividade é essencial à tomada de decisão de produtores, por equilibrar o comércio de produtos agrícolas, reduzir a instabilidade de preços em curto prazo e, assim, planejar o desenvolvimento de estratégias em longo prazo.

O monitoramento e a estimativa da produtividade são realizados, na maioria dos estados, por meio de métodos convencionais, com visitas de campo e dados de estações meteorológicas. No entanto essas estimativas, normalmente, são subjetivas, gerando resultados pouco acurados. Uma abordagem mais objetiva tem sido desenvolvida, nas últimas décadas, com metodologias ambientais complementares aos métodos convencionais de previsão de safra. Nesse aspecto, técnicas de sensoriamento remoto têm contribuído consideravelmente, para monitorar e prever as safras de soja, uma vez que fornecem imagens acuradas e precisas das áreas de produção. Tais processamentos, com a evolução da ciência do sensoriamento remoto, demonstram-se cada vez mais adequados e eficientes para coletar informações com alta frequência de visita em grandes áreas.

O sensoriamento remoto é uma importante ferramenta de análise espaço-temporal de mudanças da dinâmica agrícola. Informações necessárias à avaliação dos processos fisiológicos da planta, durante os estádios fenológicos e a disponibilidade de dados climáticos, permitem a identificação de tendências da cultura por meio de perfis espectro-temporais de imagens de satélites. As

tendências das culturas são identificadas, por meio de modelos de simulação de crescimento, inseridos em Sistemas de Informação Geográfica - SIG, a exemplo de modelos agrometeorológicos espectrais, considerados alternativas eficazes, para avaliar efeitos potenciais do meio ambiente, bem como fatores biológicos relacionados ao crescimento e ao desenvolvimento da cultura.

Na cultura da soja, assim como na maioria das culturas não irrigadas, o rendimento é influenciado pelas condições meteorológicas, tornando necessário quantificar a produtividade em função do efeito hídrico na planta. Doorenbos e Kassam (1979) propuseram um modelo, para quantificar o efeito do estresse hídrico no rendimento final de culturas agrícolas, baseado na relação entre evapotranspiração real e máxima, isto é, sempre que a quantidade de água necessária for maior do que a quantidade disponível o rendimento potencial será penalizado. Todavia esse modelo necessita de variáveis meteorológicas medidas em campo, para sua utilização e nem sempre essas variáveis estão disponíveis com qualidade e com uma série de dados.

Para uma análise acurada em modelos de simulação de produtividade, é crucial ter um histórico consistente de série de dados meteorológicos, com distribuição espacial adequada, para representar consistentemente a variabilidade climática temporal e espacial. Nesse sentido, os dados de modelos climáticos têm ganhado destaque, nos últimos anos, com informações importantes de variáveis meteorológicas, e os dados provenientes do MERRA (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications), que é uma reanálise da NASA, usando uma nova versão do Sistema de Assimilação de Dados do Sistema de Observação da Terra Goddard Versão 5 (GEOS-5), tem se mostrado eficiente para estimativas de produtividade primárias.

Adicionalmente, informações importantes podem ser acrescentadas aos modelos agrometeorológicos para introduzir informações específicas das condições das plantas, por meio, principalmente, de técnicas de sensoriamento

remoto. Assim, os modelos agrometeorológicos-espectrais são alternativas viáveis para a estimativa da produtividade de culturas em escala regional, com informações refinadas. Tais modelos analisam o estágio fenológico e oferecem ferramentas para simular o crescimento e rendimento de uma dada cultura, com base nas interações entre as características ambientais, como o clima, manejo da cultura, condições do solo e da planta, analisando dados de campo e imagens de satélite.

1.1 Hipótese

Imagens de satélite de alta resolução temporal fornecem informações consistentes de variáveis meteorológicas que podem ser utilizadas na ausência ou em substituição a informações meteorológicas registradas em campo. As questões norteadoras, levantadas neste trabalho, foram:

- a) Imagens de alta resolução temporal e dados climáticos provenientes de modelos de reanálises fornecem estimativas precisas de variáveis meteorológicas, como precipitação, temperatura, insolação, umidade relativa e evapotranspiração para estações meteorológicas convencionais no Mato Grosso?
- b) É possível utilizar e adaptar a metodologia de Doorenbos e Kassam (1979), gerando um modelo agrometeorológico espectral para uma área experimental no Mato Grosso, inserindo variáveis meteorológicas provenientes de satélites e modelos climáticos na equação de estimativa de produtividade de soja em grãos?

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi estimar a produtividade de soja em grãos, no Estado do Mato Grosso, utilizando dados espectrais.

1.3 Objetivos específicos

- a) Objetivo específico do artigo 1: Aplicabilidade potencial de informações de sensoriamento remoto em agrometeorologia:
 - Análise e validação de dados espectrais de alta resolução temporal em comparação com dados de Estações Meteorológicas Convencionais.

- b) Objetivo específico do artigo 2: Modelo Agrometeorológico Espectral para estimativa de produtividade da soja em grãos no Estado de Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil:
 - Utilização do modelo agrometeorológico desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979) com a integração de dados espectrais em substituição a variáveis meteorológicas.

1.4 Organização da tese

Esta tese é composta por duas partes. A primeira parte expõe a introdução geral e o referencial teórico do tema proposto na tese. A segunda parte apresenta dois artigos:

- a) O primeiro artigo aborda a validação de variáveis meteorológicas obtidas em dados espectrais (imagens de alta resolução temporal),

em comparação com dados de estações meteorológicas convencionais.

- b) O segundo artigo aborda a estimativa de produtividade de grãos de soja, em uma área no Mato Grosso, utilizando modelo adaptado de Doorenbos e Kassam (1979), incluindo variáveis meteorológicas obtidas e validadas no artigo 1.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais da cultura da soja

A soja é uma das principais culturas agrícolas existentes no mundo (DHAKAL et al., 2014), importante fonte alimentícia para seres humanos e animais por seu alto teor de proteína, além de oferecer vantagens fundamentais em sistemas de cultivos sustentáveis (SINCLAIR et al., 2014). É utilizada como matéria-prima para as indústrias química, alimentícia e farmacêutica e sua produção é mais concentrada nos Estados Unidos e Brasil, em razão, sobretudo, das condições climáticas favoráveis ao seu cultivo (FAGAN, 2007).

A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é uma cultura de clima tropical de origem asiática, região do rio Yangtse, na China (OLIVEIRA, 2010), é sensível às mudanças de temperatura, sendo tradicional de regiões temperadas e subtropicais (MILAZZO et al., 2013). A soja [*Glycine max* (L.) Merrill] é citada como uma das principais culturas antigas domesticadas pelo homem. Durante anos o cultivo da soja era conhecido e explorado somente no Oriente, sendo ignorada pelo Ocidente até a segunda década do século XX, quando os Estados Unidos iniciaram sua exploração comercial (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2003). Foi citada, pela primeira vez, em 1804, como uma promissora planta forrageira e produtora de grãos (CÂMARA, 2014). Em 1882, a soja foi introduzida no Brasil via Estados Unidos por Gustavo Dutra na Bahia, porém tem-se como marco principal o ano de 1901, quando começaram os cultivos no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) e a distribuição de sementes para produtores paulistas (EMBRAPA, 2003).

Segundo Gazzoni (2013), do ponto de vista comercial, o ingresso da soja no Brasil foi marcado por sua baixa sustentabilidade ambiental, fato que a levou

para a região do Rio Grande do Sul pela sua similaridade com regiões em condições edafoclimáticas ideais para seu máximo potencial produtivo, como países asiáticos e o Sul dos Estados Unidos da América. A migração da cultura, a qual foi acompanhada por sua evolução tecnológica, expandiu-se para o Centro-Oeste e Mato Grosso do Sul e, depois para outros estados. No entanto sua grande expansão ocorreu, em 1930, em virtude de sua qualidade como alimento e possibilidade de colheita mecanizada (BLACK, 2000).

Na década de 40, a soja adquiriu importância econômica para o País, sendo feito o primeiro registro estatístico nacional no Anuário Agrícola do RS, em 1941, no qual constou sua área cultivada de 640 ha, produção de 450 toneladas e rendimento de 700 kg/ha. Em 1949, o Brasil, pela primeira vez, ficou nas estatísticas internacionais como produtor de soja, com uma produção de 25.000 toneladas. A produção foi impulsionada, na década de 60, pela política de subsídios ao trigo, em que a soja se estabeleceu como uma cultura economicamente importante para o País, multiplicando-se sua produção para 1.056 milhões de toneladas, em 1969 (EMBRAPA, 2003).

Na década de 70, o aumento da demanda mundial por proteína causou a expansão do comércio internacional de produtos de soja, tendo resultado em mudanças positivas nas políticas econômicas do país, a exemplo da criação da taxa de câmbio favorável à competitividade das exportações (SILVA et al., 2010). Ainda, na década de 70, houve grande expansão ao se tornar uma importante fonte de divisas para o País (CAMARGO, 1984) e a principal cultura do agronegócio nacional, passando de 1,5 milhões de toneladas, para mais de 15 milhões de toneladas, em 1979. Este crescimento ocorreu, em razão do aumento da área cultivada, assim como do expressivo incremento em produtividade. Nas décadas de 1980 e 1990, a cultura da soja continuou crescendo, na região tropical do Brasil, promovendo o estado do Mato Grosso de produtor marginal a líder nacional de produção e de produtividade (EMBRAPA, 2003).

A ampliação dos plantios de soja, no Brasil, sempre esteve atrelada ao rápido desenvolvimento tecnológico e à intensificação das pesquisas. Por isso, foi possível seu ingresso em regiões com condições edafoclimáticas totalmente contrárias ao seu centro de origem (GAZZONI, 2013). Para tanto, o desenvolvimento de cultivares adaptadas a diferentes climas e latitudes foi um desafio e um marco de expansão da cultura da soja em diversas regiões do Brasil.

No contexto mundial, o Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, ficando atrás dos Estados Unidos, seguido da Argentina, China e outros (DEPARTAMENTO DO AGRONEGÓCIO - DEAGRO, 2014). A participação do Brasil, na oferta e demanda de produtos do complexo agroindustrial da soja, é bem significativa. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2018), a safra 2017/2018 pontuou 119.281,70 milhões de toneladas produzidas, que ocorreu em virtude do ganho de área. A cultura da soja permanece como principal responsável pelo aumento de área, com 35.149,2 milhões de hectares de área plantada e produtividade de 3.393,57 kg/hectare, além de apresentar o maior crescimento absoluto, com estimativa de aumento de produção para 119.427,5 milhões de toneladas.

Sua importância, também, pode ser avaliada por sua interação com outras cadeias produtivas, pois, aproximadamente, 90% dos grãos consumidos são direcionados ao processo de esmagamento que irá gerar o farelo de soja o qual juntamente com o milho são utilizados para a composição de rações para animais (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014b). Além de existirem mais de 200 produtos nos supermercados, cuja formulação possui um ou mais ingredientes à base de soja, com destaque ao óleo de soja e, no que diz respeito ao setor energético, a soja atingiu 47% da produção nacional de biodiesel, em 2013, além da cadeia produtiva da soja gerar quantidade expressiva de empregos diretos e indiretos (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014a).

Para dar suporte ao crescimento da cultura da soja no País, constantes injeções de capital financeiro, fomentadas por produtores, foram aplicadas em terras agrícolas visando ao crescimento dos sistemas de cultivo (ESPÍNDOLA et al., 2013), bem como ao desenvolvimento de pesquisas, em melhoramento genético, para a progressão do desenvolvimento de cultivares adaptadas a vários ambientes (EPIPHANIO et al., 1989). É notório o aumento na busca por tecnologias, para a melhoria da qualidade das informações obtidas sobre a área agrícola, por meio da utilização de melhores equipamentos e de novas formas de análise de dados nas últimas décadas (BORSSOI; URIBE-OPAZO; GALEA, 2011).

2.2 Soja no Mato Grosso

A soja faz parte do conjunto de atividades agrícolas com maior destaque no mercado brasileiro e, como resultado de constantes investimentos e conquistas tecnológicas (RODRIGUES, 2012), segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2017), a produção nacional da soja apresentou crescimento recorde, em relação a 2016, alcançando 114 milhões de toneladas produzidas em 2017 (IBGE, 2017). Ainda, segundo o IBGE, esta alta foi marcada pelo incremento de área, nos maiores estados produtores, especialmente no Mato Grosso, que acrescentou 670.732 hectares à sua área de soja, maior 8,5% em relação a 2013.

A partir a Tabela 1, é possível observar a evolução da produção de soja no Brasil, de 2012 até 2017 e no estado de Mato Grosso (IBGE, 2017).

Tabela 1 - Produção de soja no Brasil e no Estado do Mato Grosso nos últimos 6 anos.

Ano	Produção (toneladas)	
	Brasil	Mato Grosso
2012	65.848.857	21.841.292
2013	81.724.477	23.416.774
2014	86.760.520	26.495.884
2015	97.043.704	27.766.988
2016	96.084.324	26.277.753
2017	114.982.993	30.479.870

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017).

A partir da Tabela 1 é possível observar o aumento progressivo da produção de 2012 a 2015, com um pequeno decréscimo em 2016 e considerável aumento em 2017. Nesse sentido, justifica-se a importância de uma análise pautada na estimativa da produtividade em aglomerados produtores localizados neste estado.

A produção da cultura da soja, no estado do Mato Grosso, merece destaque pelo considerável desenvolvimento de suas atividades agrícolas na última década e por representar uma liderança nacional em termos de produção e produtividade (FIGUEIREDO; BARROS; GUILHOTO, 2005). No estado do Mato Grosso, pode-se perceber a presença de empresas *cluster*, concentrações geográficas de empresas interconectadas, relacionadas entre si e com outras entidades importantes para competição. Essas organizações fornecem insumos e linhas de financiamento, recebem e compram a produção agrícola e possuem capacidade de verticalização de operações, além de possuírem um extenso acesso a portfólios de mercados. Dentre os importantes fatores positivos da competitividade da sojicultura brasileira, no estado do Mato Grosso, têm-se *clusters* produtivos compostos por entidades sólidas e em constante desenvolvimento (HIRARUKI, 2013).

2.3 Ciclo fenológico

A fenologia é definida como o estudo dos eventos periódicos da vida da planta em função da sua reação às condições do ambiente e permite compreender a relação entre as características morfológicas e fisiológicas (OLIVEIRA, 2010). Caracterizar os estádios de desenvolvimento fenológicos da soja é essencial para descrever os períodos pelos quais a lavoura atravessa durante o ciclo da cultura (NEUMAIER et al., 2000) e torna-se essencial à identificação dos caracteres morfológicos e às necessidades do vegetal em determinado momento.

O ciclo fenológico da soja apresenta uma sucessão de fases vegetativas e reprodutivas. Nesse sentido, Fehr e Caviness (1977) dividiram os estádios de desenvolvimento fenológico da soja em vegetativos e reprodutivos, em que os estádios vegetativos são representados pela letra V e os estádios reprodutivos pela letra R. Com exceção dos estádios emergência (V_E) e cotilédone (V_C), as letras V e R são seguidas de índices numéricos que identificam estádios específicos nestas duas fases de desenvolvimento da planta.

2.3.1 Estádios vegetativos da soja

O nó é a parte do caule onde a folha se desenvolve e é utilizado para determinar os estádios vegetativos, enquanto a folha é temporária, o nó é permanente e pode desprender do caule. Os nós cotiledonares são opostos no caule e cada um deles possui um cotilédone. Para a determinação dos estádios vegetativos (V_1 a V_n), os nós cotiledonares não são considerados, pois não possuem folhas verdadeiras. A Tabela 2 apresenta a descrição resumida dos estádios fenológicos vegetativos da soja.

Tabela 2 - Descrição resumida dos estádios fenológicos vegetativos da soja.

Símbolo	Estádio Denominação	Descrição
V _E	Emergência	Os cotilédones estão acima da superfície do solo
V _C	Cotilédone desenvolvimento	Cotilédones totalmente abertos
V ₁	Primeiro nó	A folhas unifolioladas estão completamente abertas
V ₂	Segundo nó	Primeira folha trifoliolada aberta
V ₃	Terceiro nó	Segunda folha trifoliolada aberta
V _n	Enésimo nó	“Enésimo” nó ao longo da haste principal com trifólio aberto

Fonte: Adaptado de Faria, Nepomuceno e Neumaier (2007).

Os nós acima dos cotiledonares são os nós das folhas unifolioladas e são opostos no caule. Cada um deles possui uma folha unifoliolada. Nós opostos ocupam a mesma posição no caule e, por isso, são considerados como um nó apenas. Todos os nós acima dos unifoliolados são alternados, ocupam diferentes posições no caule e possuem folhas trifolioladas. As folhas jovens possuem folíolos que, no início de seu desenvolvimento, assemelham-se a cilindros. Ao se desenvolverem, os folíolos se desenrolam e os bordos se separam até a sua abertura completa. Uma folha é considerada completamente desenvolvida, quando está totalmente aberta e os bordos dos folíolos da folha do nó imediatamente acima não mais se tocam. A folha apical está completamente desenvolvida, quando seus folíolos já se encontram abertos e se assemelham aos das folhas abaixo dela (NEUMAIER et al., et al, 2000).

O estágio vegetativo V_E representa a emergência dos cotilédones, em que uma plântula recém-emergida é considerada em V_E. Uma planta pode ser considerada emergida, quando, juntamente com os cotilédones acima da superfície do solo, formam um ângulo de 90°, ou maior, com seus respectivos hipocótilos. O estágio vegetativo V_C representa o estágio em que os cotilédones se encontram completamente abertos e expandidos. Uma planta é considerada

em V_C quando as bordas de suas folhas unifolioladas não mais se tocam. A partir do V_C , as subdivisões dos estádios vegetativos são numeradas na sequência ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, \dots, V_n$), em que n é o número de nós, acima do nó cotiledonar, com folha completamente desenvolvida. Nesse sentido, uma plântula está em V_1 , quando as folhas unifolioladas estiverem completamente desenvolvidas, ou seja, quando os bordos dos folíolos da primeira folha trifoliolada não mais se tocarem. Da mesma maneira, uma planta atinge o estágio V_2 , quando a primeira folha trifoliolada estiver completamente desenvolvida, ou seja, quando os bordos dos folíolos da segunda folha trifoliolada não mais se tocarem. E, assim sucessivamente, para $V_3, V_4, V_5, V_6, \dots, V_n$. (NEUMAIER et al., 2000).

2.3.2 Estádios reprodutivos da soja

Os estádios reprodutivos são denominados pela letra R seguida dos números um até oito e descrevem detalhadamente o período florescimento-maturação. Os estádios reprodutivos abrangem quatro distintas fases do desenvolvimento reprodutivo da planta, ou seja, florescimento (R1 e R2), desenvolvimento da vagem (R3 e R4), desenvolvimento do grão (R5 e R6) e maturação da planta (R7 e R8). Na Tabela 3 são apresentados os estádios fenológicos reprodutivos da soja.

Tabela 3 - Descrição dos estádios reprodutivos.

Estádio	Denominação	Descrição
R ₁	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (haste principal)
R ₂	Florescimento pleno	Uma flor aberta num dos 2 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R ₃	Início da formação da vagem	Vagem com 5 mm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R ₄	Vagem completamente desenvolvida	Vagem com 2 cm de comprimento num dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R ₅	Início do enchimento do grão	Grão com 3 mm de comprimento em vagem num dos 4 últimos nós do caule, com folha completamente desenvolvida
R ₆	Grão cheio ou completo	Vagem contendo grãos verdes preenchendo as cavidades da vagem em um dos 4 últimos nós do caule com folha completamente desenvolvida
R ₇	Início da maturação	Uma vagem normal no caule com coloração de madura
R ₈	Maturação plena	95% das vagens com coloração de madura

Fonte: Adaptado de Faria, Nepomuceno e Neumaier (2007).

A proposta de Fehr e Caviness (1977) não apresenta subdivisões dos estádios de desenvolvimento da soja (TABELA 3). Entretanto, para melhor detalhamento do estádio R5, Yorinori (1996), em seu estudo sobre epidemiologia e controle, propôs a subdivisão em cinco subestádios:

- a) R5,1 - grãos perceptíveis ao tato (o equivalente a 10% da granação);
- b) R5,2 - granação de 11% a 25%;
- c) R5,3 - granação de 26% a 50%;
- d) R5,4 - granação de 51% a 75%;
- e) R5,5 - granação de 76% a 100.

2.4 Demanda hídrica da soja

A água constitui 90% do peso da soja e atua, em todos os processos fisiológicos e bioquímicos, pois auxilia na regulação térmica, tanto no resfriamento como na manutenção e distribuição do calor. No caso específico da soja, a água é fundamental em dois períodos de desenvolvimento: germinação-emergência e floração-enchimento dos grãos. Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de uma boa uniformidade na população das plantas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% do seu peso em água para assegurar boa germinação. Nessa fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50% (EMBRAPA, 2003).

A necessidade de água, na cultura da soja, vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo, durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas, causando a redução do rendimento de grãos por queda prematura de folhas, flores e o abortamento das vagens. A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção de máximo rendimento, depende das condições climáticas e da duração do ciclo, variando entre 450 a 800 mm/ciclo.

Além da água, vários outros fatores irão determinar se uma lavoura de soja irá apresentar alta produtividade de grãos. Entre os principais, condições climáticas determinam a melhor época de semeadura e influenciam diretamente na umidade e temperatura do solo. Durante o ciclo da soja, as condições de umidade do solo, aliadas à capacidade do solo em fornecer nutrientes, são as principais responsáveis pelo pleno crescimento das plantas e produção de grãos. Quando ocorre deficiência hídrica, as plantas sofrem carência de água e de

nutrientes. Na ausência de outras limitações, as condições favoráveis de umidade no solo, durante o período vegetativo (emergência-floração), favorecem o crescimento. De modo geral, a deficiência hídrica, no período vegetativo, reduz o porte e, no período reprodutivo, reduz a produção de grãos. Condições favoráveis, durante o período reprodutivo, garantem altos rendimentos de grãos. Nesse sentido, esse período é o mais crítico com relação à exigência de água pela soja para garantia de alto rendimento de grãos.

2.5 Exigências termofotoperiódicas da soja

Fotoperíodo e temperatura são importantes para o desenvolvimento da cultura da soja e provocam mudanças qualitativas ao longo do seu ciclo. Há muito tempo já se conhece que o intervalo de tempo, em número de dias entre a emergência e o florescimento, depende da influência da temperatura e do fotoperíodo e que há determinado limite de comprimento de dia suficientemente curto para induzir a floração e suficientemente longo para impedi-la. Este é caracterizado como fotoperíodo crítico. O comprimento do fotoperíodo crítico varia também entre cultivares de soja. Com relação à temperatura, ambientes com fotoperíodo constante influenciam grandemente o tempo de florescimento.

A soja é uma das espécies mais sensíveis ao fotoperíodo, sendo considerada planta de dias curtos. As cultivares de soja respondem à época da semeadura em função da sensibilidade da cultivar ao fotoperíodo e do hábito de crescimento da cultivar. A soja se adapta a temperaturas do ar entre 20° C e 30°C e a temperatura ideal, para seu desenvolvimento, está em torno de 30°C. A faixa de temperatura ideal para semeadura do solo varia entre 20° C a 30° C, sendo 25° C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme.

O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo a temperaturas menores ou iguais a 10° C. Temperaturas maiores que 40° C têm efeito adverso

na taxa de crescimento, provando distúrbios na floração com a diminuição da retenção de vagens. Esses problemas se acentuam com a ocorrência de déficits hídricos. Diferenças na data de floração entre cultivares, numa mesma época de semeadura, são pela resposta diferencial das cultivares à duração do dia ou número de horas de brilho solar, o chamado fotoperíodo.

A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, visto que cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico acima do qual o florescimento é atrasado. A soja é considerada planta de dia curto e, em função dessa característica, a faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao Norte ou ao Sul. Entretanto cultivares que apresentam a característica “período juvenil longo” possuem adaptabilidade mais ampla, possibilitando sua utilização em faixas mais abrangentes de latitudes e de épocas de semeadura.

2.6 Monitoramento e previsão de safras da soja

decorrente da importância da cultura da soja para a economia do País, são necessárias informações adequadas sobre a área plantada e produtividade; a área cultivada é uma das informações principais envolvidas no processo de previsão de safra (MERCANTE et al., 2012). O monitoramento da superfície terrestre e da dinâmica do uso e ocupação da soja, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, é de grande importância para a agricultura (ASSAD et al., 2007; CAMPELO JUNIOR et al., 2014).

A estimativa do rendimento da soja é realizada de duas maneiras: a) utilizando métodos subjetivos, por meio da análise de dados de produtividade de anos anteriores mais as observações meteorológicas durante o cultivo da estação; b) por meio de métodos objetivos que utilizem modelos matemáticos confiáveis e precisos aliados a dados agrometeorológicos (BERKA; RUDORFF;

SHIMABUKURO, 2003; RIZZI; RUDORFF, 2007). Nos últimos anos, a previsão de safras no Brasil foi alterada de modo a tornar-se menos subjetiva e isso ocorreu pelo emprego de instrumentos estatísticos de amostragem e pelo monitoramento de culturas por meio de detecção remota, que juntos fornecem uma visão sinóptica de informações sobre áreas plantadas (MERCANTE et al., 2012).

Trabalhos realizados em culturas anuais, tais como soja, milho e perenes, como café e cana-de-açúcar, mostram que a utilização do sensoriamento remoto orbital é viável, para a estimativa da produtividade, aproveitando modelos agrometeorológicos.

Camargo, Brunini e Miranda (1986), com o propósito de estimar a produção de grãos de soja na seção de leguminosas do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, desenvolveram um modelo agrometeorológico baseado na penalização de produtividade potencial de cada cultivar de soja (UFV-1, Viçosa, Santa Rosa e Paraná) durante o período de 1977 a 1980. Os coeficientes de determinação, entre dados observados e estimados, variaram de 0,76 a 0,87 para os quatro cultivares estudados. Segundo os autores, as estimativas da produtividade da soja, utilizando esse modelo, mostraram-se bastante satisfatórias.

Com o objetivo avaliar o desempenho de modelos simplificados e agrometeorológicos, na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, estado do Paraná, Araújo, Souza e Tsukahara (2011) utilizaram dados de produtividade de 11 safras e dados climáticos. Os autores estimaram a evapotranspiração de referência com o método de Penman- Monteith -FAO e os balanços hídricos diários foram determinados com um programa desenvolvido especialmente para esta finalidade. Dentre as inúmeras análises realizadas, os melhores resultados foram obtidos, considerando-se a disposição temporal das produtividades reais das safras da cultura da soja em dois grupos, em função da

rotação de culturas na região e do ajuste dos coeficientes e fatores dos modelos em análises de regressão múltipla. Segundo os autores, os modelos de Stewart e Jensen possibilitaram as melhores estimativas de produtividade.

Para investigar a relação entre a produtividade da soja e as variáveis agrometeorológicas (precipitação pluvial, temperatura média do ar, radiação solar global e índice local de Moran (*LISA*) da produtividade), Araújo, Uribe-Opazo e Johann (2013) realizaram uma análise de agrupamentos espaciais por meio da estatística multivariada. O estudo foi realizado com os dados das safras dos anos agrícolas de 2000/2001 a 2007/2008 da região Oeste do Estado do Paraná. Foi identificado um número adequado de *clusters*, para cada ano-safra, empregando a minimização de desvios. O estudo mostrou a formação de grupos de municípios valendo-se das similaridades das variáveis em análise. Os autores concluem afirmando que a análise de agrupamento foi um instrumento útil, para melhor gestão das atividades de produção da agricultura, pois, a partir do agrupamento, foi possível estabelecer similaridades que proporcionem parâmetros à melhor gestão dos processos de produção, trazendo resultados almejados pelo agricultor.

2.6.1 Modelo de previsão de safras

Tendo em vista que a informação espectral seria um adicional na análise dos modelos agrometeorológicos, a utilização de dados espectrais com a adoção do modelo agrometeorológico espectral forneceram resultados positivos. Nessa perspectiva, Barnett e Thompson (1982) estudaram a relação entre dados de produtividade e dados espectrais, com o auxílio de imagens Landsat/MSS, obtendo relação entre os valores.

Rudorff e Batista (1990) avaliaram o desempenho do modelo de estimativa, para a cultura da cana (*Saccharum officinarum*), servindo-se de

dados espectrais em conjunto com o rendimento estimado, a partir de um modelo agrometeorológico. O estudo foi realizado em Lençóis Paulistas, SP, onde dados de produção para 4 anos de cultivos foram analisados. Os autores correlacionaram a produtividade do primeiro ano safra (1983/84) com dados espectrais do satélite Landsat/MSS. Estes dados foram utilizados para prever o rendimento dos anos seguintes, isto é, 1984-1985. Os modelos, para prever a produtividade nos anos seguintes (até 1987/88), foram desenvolvidos da mesma forma, incorporando todos os anos anteriores. As estimativas de produtividade obtidas, a partir desses modelos, explicaram 69%, 54% e 50% do rendimento e variação da safra dos anos 1984-1985, 1985-1986 e 1986-1987, respectivamente. Os autores sugerem que o método seja aperfeiçoado a fim de se obter melhores resultados em estudos futuros.

Objetivando estimar a produtividade de soja, no Rio Grande do Sul, nas safras de 2000/2001 a 2002/2003, Rizzi e Rudorff (2007) usaram um modelo agronômico implementado em um Sistema de Informação Geográfica - SIG. Os autores dispuseram de duas abordagens: o modelo agronômico (AGRO), com valores de índice de área foliar -IAF- obtidos da literatura; e o modelo agronômico - espectral - AGROESPEC, com valores de IAF estimados a partir das imagens de alta resolução temporal, MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer). As estimativas de produtividade obtidas pelo modelo foram comparadas às fornecidas pelo IBGE, com o uso do teste t para pares de observação. Nas safras 2000/2001 e 2001/2002, não foram observadas diferenças significativas. Para 2002/2003, o modelo subestimou o valor de produtividade em 7,87 e 7,04%, nas abordagens AGRO e AGROESPEC, respectivamente, em comparação à produtividade fornecida pelo IBGE. Ambas as abordagens do modelo permitiram a avaliação objetiva e quantitativa do efeito das condições meteorológicas sobre a produtividade de soja. Segundo os autores, o AGROESPEC forneceu estimativas mais detalhadas, no que se refere

à variação espacial da produtividade, em razão do emprego dos valores de IAF estimados, a partir das imagens MODIS.

Berka, Rudorff e Shimabukuro (2003) objetivaram adaptar e integrar um modelo agrometeorológico num SIG para estimar a produtividade da soja. Foram geradas estimativas de produtividade, para 144 municípios do Estado do Paraná, responsáveis por 90% da produção de soja no estado, em cinco anos-safra no período de 1996/1997 a 2000/2001. O modelo aplica parâmetros agronômicos e dados meteorológicos, para o cálculo da produtividade máxima, a qual é penalizada, quando ocorre estresse hídrico. A análise da comparação entre as estimativas municipais obtidas pelo modelo e aquelas divulgadas pela Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB) do Paraná foi feita pelo teste t. para pares de observação. No ano-safra 1996/1997, o modelo superestimou a produtividade em 10,8% quanto à SEAB, o que pode ser atribuído à ocorrência de oídio, cujo efeito não é considerado no modelo. Nos anos-safra de 1997/1998, 1998/1999 e 1999/2000, não foram identificadas diferenças ($P > 0,05$) entre as estimativas do modelo e da SEAB. Em 2000/2001, a produtividade foi subestimada pelo modelo em 10,5% e as causas desta diferença precisam ser melhor investigadas. O modelo integrado no SIG mostrou ser uma ferramenta viável, para acompanhar a cultura da soja, ao longo da estação de crescimento e estimar a produtividade em municípios do Estado do Paraná.

Em estudos envolvendo estimativa de produtividade, dispondo de modelos- agrometeorológicos espectrais, há a inserção de variáveis meteorológicas, a exemplo da metodologia de Doorenbos e Kassam (1979). A proposta de utilização, integração e substituição de dados meteorológicos de campo por dados meteorológicos espectrais é citada por Rizzi e Rudorff (2007), Sakamoto et al. (2010), Urban, Guan e Jain (2018) e outros autores que trabalham com modelos de estimativa de safra.

2.7 Variáveis meteorológicas obtidas por fontes espectrais

Há de se considerar a indisponibilidade de variáveis meteorológicas por falhas ou ausência de registros de estações meteorológicas automáticas e convencionais (COLSTON et al., 2018), em determinadas regiões do Brasil e, em específico, no estado de Mato Grosso, onde, segundo Souza et al. (2013), medidas de rotina são escassas. Como alternativa, faz-se necessário o emprego de banco de dados climáticos, oriundos de dados de reanálise e de sensoriamento remoto (OVANDO; SAYAGO; BOCCO, 2018)), fornecidos por agências espaciais.

Imagens de satélite podem ser aproveitadas, para estimar a produtividade (ROSA et al., 2010), por meio de informações meteorológicas essenciais em modelos agrícolas (VENÄLÄINEN; HEIKINHEIMO, 2002). Para o entendimento do potencial de aplicação de variáveis meteorológicas, Araji et al. (2018), Flumignan e Faria (2009), Lu et al. (2017), Neset et al. (2018), Santos e Camargo (2006), Tsukahara et al. (2016) e Xu et al. (2018), ilustraram o emprego dessas variáveis obtidas em campo em estudos direcionados para a agricultura.

2.7.1 Satélite TRMM

O TRMM-Tropical Rainfall Measuring Mission - é um programa de pesquisa projetado para estudar a Terra, oceanos, ar, gelo e a vida enquanto sistema. O TRMM é a primeira missão da NASA - National Aeronautics and Space Administration - dedicada a observar e entender as chuvas tropicais e como o clima global é afetado (ISLAM; UYEDA, 2007).

Para a comparação entre diferentes bases de dados de precipitação, Blacutt et al. (2015) valeram-se dos conjuntos de dados de reanálise Modern-Era

Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA) e Climate Forecast System Reanalysis and Reforecast, o algoritmo de satélite TRMM 3B42. Os autores selecionaram duas estações na Bolívia e concluíram que os dados do TRMM 3B42 descreveram uma distribuição de chuvas mais realista com comportamento semelhante às observações da superfície.

2.7.2 Modelo de reanálise Global MERRA

Dados de reanálise MERRA-2 são combinações de medições meteorológicas com um modelo de previsão numérica gerados, operando o sistema global de assimilação de dados da NASA (National Aeronautics and Space Administration). Simulam aspectos do sistema terrestre, fornecendo uma estimativa sintetizada do estado do sistema atmosférico, para inúmeras variáveis, a exemplo da precipitação, temperatura, umidade relativa, observações do vento, dentre outros (REICHLE et al., 2017). Dados do Merra- 2 possuem alta resolução temporal e estão disponíveis diariamente a cada 3 horas.

Auger et al. (2018) e Draper, Reichle e Koster (2018) auferiram, dentre vários modelos de reanálise, dados do MERRA-2 para as variáveis precipitação e temperatura do ar e obtiveram resultados positivos. Em relação à umidade relativa, Keernik e Jakobson (2017) avaliaram o desempenho de modelos de reanálises, na região do mar Báltico, apresentando boa concordância e melhores resultados quando comparados a outros modelos.

2.7.3 Precipitação pelo método MERGE

A técnica MERGE, desenvolvida para combinar estimativas de precipitação, usando satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) com observações de superfície, no continente sul-americano, é proposta por Rozante

et al. (2010). Diversos autores (BENDER; YNOUE, 2014; ROZANTE et al., 2018) aplicaram a técnica MERGE como fonte de informações de registros de precipitação. Duas abordagens diferentes, para a avaliação do desempenho deste produto, quanto às observações, foram testadas: uma subamostragem de validação cruzada de todo o continente e outra subamostragem de áreas com observações esparsas. Os resultados mostram que, em áreas com alta densidade de observações, o desempenho da técnica MERGE é equivalente ao da média das estações, no entanto, em áreas com observações esparsas, a técnica MERGE mostra resultados superiores.

2.7.4 Número de horas de brilho solar utilizando GOES

Na última década, as imagens derivadas de satélite demonstraram ser promissoras para estimar dados de radiação solar em grandes regiões. Porfírio e Ceballos (2017) desenvolveram um método de estimativa da irradiação normal direta sob todas as circunstâncias do céu a partir de imagens do satélite geoestacionário GOES.

O conhecimento de quantas horas, ao longo do dia, o disco solar permanece sem obstrução de nuvens é de fundamental importância a vários setores, principalmente, agricultura (PORFIRIO; CEBALLOS, 2012). Para a obtenção da insolação, ou número de horas de brilho solar, Ceballos e Rodrigues (2008) basearam-se em imagens de radiação refletida no intervalo visível a partir de imagens do canal VIS do GOES (canal 1, centrado em $0,55 \mu\text{m}$). A estimativa diária de brilho solar (insolação) adota uma relação linear entre a cobertura local de nuvens C e a refletância R observada no canal VIS do GOES. Em seus estudos, Porfírio e Ceballos (2012) desenvolveram estimativas de insolação, a partir de dados de satélite, indicando que os resultados podem fornecer informações precisas, para estudos de levantamento do potencial energético de

uma região, assim como para a estimativa de irradiação solar direta, a partir de imagens de satélite.

2.7.5 Sensor MODIS

O sensor MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer - é um sensor de imageamento inserido nos satélites Terra e Aqua e fornece dados de satélite multitemporais e multiespectrais, com 36 bandas espectrais. Por meio do sensor MODIS, é possível compreender os fenômenos da superfície terrestre, por meio de vários produtos, tais como evapotranspiração real e potencial, representados pelo MOD16.

Em relação à evapotranspiração real e potencial, o cálculo do MOD16, baseado na equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), baseia-se na conservação de energia e massa. O algoritmo do MOD16 opera diariamente, ET diário é a soma de ET diurno e noturno. Verticalmente, ET é a soma dos fluxos de vapor de água da evaporação do solo, evaporação do dossel úmido e transpiração da planta na superfície do dossel seco (MU; ZHAO; RUNNING, 2011). O algoritmo MOD16 foi e é utilizado, em vários estudos, inclusive, os produzidos por Chang et al. (2018), Hu, Jia e Menenti (2015), Khan et al. (2018), Liaqat e Choi (2017), Xiong et al. (2015).

2.8 Filtragem de dados meteorológicos utilizando Savitzky Golay

Com o objetivo de suavizar e calcular derivadas de um conjunto de valores consecutivos, após a tabulação, houve a filtragem dos dados espectrais aplicando o método proposto por Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Para uma janela de filtro específica, os coeficientes são os mesmos, para diferentes observações e são derivados do ajuste por mínimos quadrados de um

polinômio de ordem inferior a um número de observações consecutivas. Trabalhos desenvolvidos por Li et al. (2014), Oliveira et al. (2014) e Xu, Conrad e Doktor (2017), demonstram a manipulação do algoritmo, quando utilizado em imagens de satélite.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A. de; SELEME, R.; CARDOSO NETO, J. Rodovia Transoceânica: uma alternativa logística para o escoamento das exportações da soja brasileira com destino à China. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 351-368, abr./jun. 2013.
- ARAJI, H. A. et al. Impacts of climate change on soybean production under different treatments of field experiments considering the uncertainty of general circulation models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 205, p. 63-71, June 2018.
- ARAUJO, E. C. de; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A. Análise de agrupamento da variabilidade espacial da produtividade da soja e variáveis agrometeorológicas na região oeste do Paraná. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, n. 4, p. 782-795, jul./ago. 2013.
- ARAUJO, M. A.; SOUZA, J. L. M.; TSUKAHARA, R. Y. Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, jan./mar. 2011.
- ARVOR, D. et al. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. **Applied Geography**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 702-713, Mar. 2012.
- ASSAD, E. D. et al. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 615-625, maio 2007.
- ATZBERGER, C. Advances in remote sensing of agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 2, p. 949-981, Feb. 2013.
- AUGER, J. et al. An ensemble Mean and evaluation of third generation global climate reanalysis models. **Atmosphere**, Downsview, v. 9, n. 6, p. 236-248, June 2018.
- BARNETT, T. L.; THOMPSON, D. R. The use of large-area spectral data in wheat yield estimation. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 12, n. 6, p. 509-518, Dec. 1982.

BATTISTI, R.; BENDER, F. D.; SENTELHAS, P. C. Assessment of different gridded weather data for soybean yield simulations in Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, London, p. 1-11, Jan. 2018.

BENDER, F. D.; YNOUE, R. Y. Application of a spatial verification method to gfs precipitation forecasts. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 561-571, set. 2014.

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

BERTRAND, J.-P.; CADIER, C.; GASQUES, J. G. Le crédit: un des facteurs clés de l'expansion de la filière soja dans le Mato Grosso. **Cahiers Agricultures**, Montrouge, v. 14, n. 1, p. 45-51, Jan./Fév. 2005.

BLACK, R. J. Complexo soja: fundamentos, situação atual e perspectivas. In: CÂMARA, G. M. de S. (Ed.). **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ, 2000. p. 1-18.

BLACUTT, L. A. et al. Precipitation comparison for the CFSR, MERRA, TRMM3B42 and combined scheme datasets in Bolivia. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 163, p. 117-131, Sept. 2015.

BORSSOI, J. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; GALEA, R. M. Técnicas de diagnóstico de influência local na análise especial de produtividade da soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 376-387, mar./abr. 2011.

BRAGAGNOLO, C.; BARROS, G. S. de C. Impactos dinâmicos dos fatores de produção e da produtividade sobre a função de produção agrícola. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 53, n. 1, p. 31-50, mar. 2015.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Indicadores gerais da Agrostat**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016. Disponível em: <<http://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

_____. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Intercâmbio comercial do agronegócio: principais mercados de destino**. Brasília: MAPA/ACS, 2014. 466 p.

BROWN, M. E.; BEURS, K.; VRIELING, A. The response of African land surface phenology to large scale climate oscillations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 10, p. 2286-2296, Oct. 2010.

CÂMARA, G. M. de S. (Ed.). **Soja: tecnologia da produção II**. Piracicaba: ESALQ, 2000. 18 p.

_____. **Introdução ao agronegócio da soja**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2014. 30 p.

CAMARGO, M. B. P. de; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. de. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CAMARGO, M. B. P. de. **Exigências Bioclimáticas e estimativa da produtividade para quatro cultivares de soja no estado de São Paulo**. 1984. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", Piracicaba, 1984.

CAMPELO JUNIOR, J. H. et al. Estimativa da retenção de água em Latossolos do Cerrado mato-grossense cultivados com algodão. **Revista Agro@ambiente On-line**, Roraima, v. 9, n. 1, p. 318-326, dez. 2014.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L. Estimativa de insolação mediante satélite geostacionário: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., São Paulo. **Anais...** São Paulo: CPTE, 2008. p. 1-6.

CHADDAD, F. Introduction. In: _____. **The economics and organization of Brazilian agriculture**. San Diego: Academic Press, 2016. chap. 1, p. 1-17.

CHANG, Y. et al. A modified MOD16 algorithm to estimate evapotranspiration over alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 561, p. 16-30, June 2018.

COLSTON, J. M. et al. Evaluating meteorological data from weather stations, and from satellites and global models for a multi-site epidemiological study. **Environmental Research**, New York, v. 165, p. 91-109, Aug. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos: volume 5 - Safra 2017/18 - Sexto levantamento**. Brasília: Conab, 2018. 140 p.

_____. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**: volume 8 - Safra 2015/16 - Oitavo levantamento. Brasília: Conab, 2016. 178 p.

DEPARTAMENTO DO AGRONEGÓCIO - DEAGRO. Safra Mundial de Soja 2015/16 - 8º Levantamento do USDA. **Informativo DEAGRO**, São Paulo, dez. 2014.

DHAKAL, K. H. et al. Variation of unsaturated fatty acids in soybean sprout of high oleic acid accessions. **Food Chemistry**, Barking, v. 164, p. 70-73, Dec. 2014.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 15, n. 2, p. 1-22, ago. 2012.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yiels response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DRAPER, C. S.; REICHLER, R. H.; KOSTER, R. D. Assessment of MERRA-2 land surface energy flux estimates. **Journal of Climate**, Boston, v. 31, n. 2, p. 671-691, Jan. 2018.

DUTRIEUX, L. P. et al. Reconstructing land use history from Landsat time-series: case study of a swidden agriculture system in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 47, p. 112-124, May 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**: região Central do Brasil 2004. Londrina: Embrapa Soja, 2003. 237 p.

_____. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil - 2003. Londrina: Embrapa Soja, 2002. 199 p.

_____. **Visão 2014-2034**: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira: síntese. Brasília: Embrapa, 2014. 53 p.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Sensoriamento remoto termal na discriminação de cultivares de soja submetidas a estresse hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 2, p. 253-258, 1989.

ESPINDOLA, C. J. et al. Trajetórias do progresso técnico na cadeia produtiva de carne de frango do Brasil. **Geosul**, Florianópolis, v. 27, n. 53, p. 89-114, abr. 2013.

FAGAN, E. B. A cultura de soja: modelo de crescimento e aplicação da estrobilurina piraclostrobina. 2007. 84 p. Tese (Doutorado em Fisiologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 10 p (Circular Técnica, 48).

FEHR, W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: State University of Science and Technology, 1977. 11 p. (Special Report, 80).

FERREIRA, D. S.; POPPI, R. J.; PALLONE, J. A. L. Evaluation of dietary fiber of Brazilian soybean (*Glycine max*) using near-infrared spectroscopy and chemometrics. **Journal of Cereal Science**, London, v. 64, p. 43-47, July 2015.

FIGUEIREDO, M. G. de; BARROS, A. L. M. de; GUILHOTO, J. J. M. Relação econômica dos setores agrícolas do Estado do Mato Grosso com os demais setores pertencentes tanto ao Estado quanto ao restante do Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 557-575, set. 2005.

FLUMIGNAN, D. L.; FARIA, R. T. de. Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 1, p. 269-278, 2009.

FOERSTER, S. et al. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 89, p. 30-40, Nov. 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. Agricultural Outlook 2015. **OECD iLibrary**, Paris, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2015-en>. Acesso em: 15 mar. 2018.

GAZZONI, D. L. **A sustentabilidade da soja no contexto do agronegócio brasileiro e mundial**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 50 p.

GUSSO, A. et al. Spectral model for soybean yield estimate using MODIS/EVI Data. **International Journal of Geosciences**, London, v. 4, n. 9, p. 1233-1241, Nov. 2013.

GUSSO, A.; ARVOR, D.; DUCATI, J. R. Model for soybean production forecast based on prevailing physical conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 2, p. 95-103, fev. 2017.

HIRAKURI, M. H. **Avaliação econômica da produção de soja para a safra 2013/14**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 10 p. (Circular Técnica, 102).

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **O agronegócio da soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: Embrapa Soja, 2014a. 70p. (Circular técnica/Embrapa Soja, 105).

_____. **Impactos econômicos de estresses bióticos e abióticos na produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2014b. 70 p. (Documentos/Embrapa Soja, 349).

HU, G.; JIA, L.; MENENTI, M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 156, p. 510-526, Jan. 2015.

HUANG, J. et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 204, p. 106-121, May 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 11, p. 1-85 nov. 2015.

_____. Tabela 5457 - Área plantada ou destinada à colheita, área colhida, quantidade produzida rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias e permanentes. **Sidra**: banco de tabelas estatísticas, Brasília, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

ISLAM, M.; UYEDA, H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 108, n. 3, p. 264-276, June 2007.

KADIYALA, M. D. M. et al. An integrated crop model and GIS decision support system for assisting agronomic decision making under climate change.

Science of the Total Environment, Amsterdam, v. 521/522, p. 123-134, July 2015.

KEERNIK, H.; JAKOBSON, E. Evaluating reanalyses performance in the Baltic Sea region by using assimilated radiosonde data. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 38, n. 4, p. 1820-1832, Sept. 2017.

KHAN, M. S. et al. Stand-alone uncertainty characterization of GLEAM, GLDAS and MOD16 evapotranspiration products using an extended triple collocation approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 252, p. 256-268, Apr. 2018.

KOWALIK, W. et al. Yield estimation using SPOT-Vegetation products: a case study of wheat in European countries. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 32, p. 228-239, Oct. 2014.

KROSS, A. et al. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 34, p. 235-248, Feb. 2015.

LI, Y. et al. Assimilating remote sensing information into a coupled hydrology-crop growth model to estimate regional maize yield in arid regions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 291, p. 15-27, Nov. 2014.

LIAQAT, U. W.; CHOI, M. Accuracy comparison of remotely sensed evapotranspiration products and their associated water stress footprints under different land cover types in Korean peninsula. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 155, p. 93-104, July 2017.

LOPRESTI, M. F.; DI BELLA, C. M.; DEGIOANNI, A. J. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: a case study in Northern Buenos Aires province, Argentina. **Information Processing in Agriculture**, New York, v. 2, n. 2, p. 73-84, Sept. 2015.

LU, H. et al. Effects of meteorological droughts on agricultural water resources in southern China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 548, p. 419-435, May 2017.

MABILANA, H. A.; FONTANA, D. C.; FONSECA, E. L. da. Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho

na Província de Manica-Moçambique. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 337-349, jun. 2012.

MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, The Netherlands, v. 26, n. 1, p. 49-63, Mar. 2014.

MATA, D. da; FREITAS, R. E. Produtos agropecuários: para quem exportar? **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, n. 2, p. 257-290, jun. 2008.

MELO, R. W. de et al. An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 29, n. 14, p. 4013-4028, July 2008.

MERCANTE, E. et al. Detection of soybean planted areas through orbital images based on culture spectral dynamics. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 920-931, out. 2012.

MILAZZO, M. F. et al. Sustainable soy biodiesel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 27, p. 806-852, 2013.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265-272, Sept. 2014.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, Cambridge, v. 19, p. 205-234, 1965.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, Aug. 2011.

NESET, T.-S. et al. Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: the case of Swedish agriculture. **Ecological Indicators**, New York, p. 1-10, June 2018.

NEUMAIER, N. et al. Estádios de desenvolvimento da cultura de soja. In: BONATO, E. R. (Ed.). **Estresses em soja**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. p. 19-44.

OLIVEIRA, A. B. de. **Fenologia, desenvolvimento e produtividade de cultivares de soja em função de épocas de semeadura e densidades de plantas**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

OLIVEIRA, C. M. et al. Crop losses and the economic impact of insect pests on Brazilian agriculture. **Crop Protection**, Guildford, v. 56, p. 50-54, Feb. 2014.

OVANDO, G.; SAYAGO, S.; BOCCO, M. Evaluating accuracy of DSSAT model for soybean yield estimation using satellite weather data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 138, p. 208-217, Apr. 2018.

PAN, Z. et al. Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 34, p. 188-197, Feb. 2015.

PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. A method for estimating direct normal irradiation from GOES geostationary satellite imagery: validation and application over Northeast Brazil. **Solar Energy**, Kidlington, v. 155, p. 178-190, Oct. 2017.

_____. Comparação entre diferentes métodos de estimativa de insolação: uma aplicação às estações de Petrolina e Natal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17., 2012, Gramado. **Anais...** Gramado: UFRGS, 2012. p. 1-6.

POSSE, R. P. et al. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o déficit hídrico (ky) na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 2, p. 158-164, abr. 2009.

RAUCCI, G. S. et al. Greenhouse gas assessment of Brazilian soybean production: a case study of Mato Grosso State. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 96, p. 418-425, June 2015.

REICHLE, R. H. et al. Land surface precipitation in MERRA-2. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 5, p. 1643-1664, Mar. 2017.

RESOP, J. P. et al. Combining explanatory crop models with geospatial data for regional analyses of crop yield using field-scale modeling units, **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 89, p. 51-61, Nov. 2012.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, jan. 2007.

RODRIGUES, C. **Plantabilidade de sementes de soja classificadas por largura**. 2012. 73 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.

ROSA, V. G. C. da et al. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, dez. 2010.

ROZANTE, J. R. et al. Combining TRMM and surface observation of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, Boston, p. 885-894, June 2010.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological - Spectral models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 33, n. 3, p. 183-192, Sept. 1990.

SAKAMOTO, T. et al. A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 10, p. 2146-2159, Oct. 2010.

SANTOS, M. A. dos; CAMARGO, M. B. P. de. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, July 1964.

SILVA, V. P. da et al. Variability in environmental impacts of Brazilian soybean according to crop production and transport scenarios. **Journal of Environmental Management**, London, v. 91, n. 9, p. 1831-1839, Sept. 2010.

SINCLAIR, T. R. et al. Soybean production potential in Africa. **Global Food Security**, Washington, v. 3, n. 1, p. 31-40, Feb. 2014.

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Mato Grosso, v. 1, n. 1, p. 34-43, out./dez. 2013.

TSUKAHARA, R. Y. et al. Produtividade de soja em consequência do atraso da colheita e de condições ambientais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 8, p. 905-915, ago. 2016.

URBAN, D.; GUAN, K.; JAIN, M. Estimating sowing dates from satellite data over the U.S. Midwest: A comparison of multiple sensors and metrics. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 211, p. 400-412, June 2018.

VENÄLÄINEN, A.; HEIKINHEIMO, M. Meteorological data for agricultural applications. **Physics and Chemistry of The Earth, Parts A/b/c**, Oxford, v. 27, n. 23/24, p. 1045-1050, Jan. 2002.

VERA-DIAZ, M. D. C. et al. An interdisciplinary model of soybean yield in the Amazon Basin: the climatic, edaphic, and economic determinants. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 420-431, Apr. 2008.

WANG, S. et al. Validation and trend analysis of ECV soil moisture data on cropland in North China Plain during 1981-2010. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 48, p. 110-121, June 2016.

WEINHOLD, D.; KILLICK, E.; REIS, E. J. Soybeans, poverty and inequality in the Brazilian Amazon. **World Development**, Oxford, v. 52, p. 132-143, Dec. 2013.

XIONG, Y. J. et al. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 530, p. 392-404, Nov. 2015.

XU, M. et al. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 203, p. 1-163, May 2018.

XU, X.; CONRAD, C.; DOKTOR, D. optimising phenological metrics extraction for different crop types in germany using the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 3, p. 254-270, Mar. 2017.

YORINORI, J. T. **Cancro da haste da soja: epidemiologia e controle**. Londrina: Embrapa-CNPSO, 1996. 75 p. (Circular Técnica, 14).

YUAN, W. et al. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 7, p. 1416-1431, July 2010.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 - APLICABILIDADE POTENCIAL DE INFORMAÇÕES DE
SENSORIAMENTO REMOTO EM AGROMETEOROLOGIA**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2003) e formatado de acordo
com o Manual da UFPA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

No Brasil, grande parte dos estudos agrometeorológicos se baseiam em dados coletados em estações automáticas e convencionais. No entanto, em razão da escassez de dados em regiões sem informações de campo, imagens de satélite têm demonstrado ser uma importante alternativa. Neste estudo, compararam-se dados espectrais obtidos por satélites de alta resolução temporal, tais como MODIS, GOES IMAGER e TRMM, com informações meteorológicas registradas em três estações meteorológicas convencionais. As comparações foram feitas por testes estatísticos de correlação lineares (Pearson), teste de concordância de Willmott, significância e testou-se o filtro Savitzky Golay, para suavizar e calcular derivadas de um conjunto de valores consecutivos, melhorando a diferença entre os dados. Os resultados demonstraram que o produto MERGE assinalou melhores correlações (entre 0,89 e 0,93; com d de Willmott entre 0,98 e 0,99), para precipitação, sugerindo uma ótima relação entre o conjunto de dados. Dados de reanálise do Merra-2 apresentaram bons resultados para temperatura ($R^2= 0,646$ e $R^2=0,7669$) e umidade ($R^2= 0,6369$, $R^2=0,8035$ e $R^2=0,915$). Para as variáveis evapotranspiração real e potencial, os produtos MODIS não apresentaram correlações significativas. O emprego do filtro Savitzky Golay, para a comparação entre dados de campo, não se mostrou uma boa alternativa, para a suavização da diferença entre os dados, com exceção da estação meteorológica convencional Padre Ricardo de Remetter, nas variáveis evapotranspiração real e potencial.

Palavras-chave: Meteorologia. Satélites. MERRA-2. TRMM. GOES. MODIS.

ABSTRACT

In Brazil, most of the agrometeorological studies are based on data collected in automatic and conventional stations. However, due to the scarcity of data in regions with no field information, satellite images have been shown to be an important alternative. In this study, spectral data obtained by high-resolution satellites such as MODIS, GOES IMAGER and TRMM were compared with meteorological information recorded in three conventional meteorological stations. Comparisons were made by linear correlation (Pearson) tests, Willmott's concordance test, significance, and the Savitzky Golay filter was tested to smooth and calculate derived from a set of consecutive values, improving the difference between the data. The results showed that the MERGE product showed better correlations (between 0.89 and 0.93, with Willmott's d between 0.98 and 0.99) for precipitation, suggesting an excellent relation between the data set. Data from the Merra-2 reanalysis showed good results for temperature ($R^2 = 0.646$ and $R^2 = 0.7669$) and humidity ($R^2 = 0.6369$, $R^2 = 0.8035$ and $R^2 = 0.915$). For the actual and potential evapotranspiration variables, MODIS products did not present significant correlations. The use of the Savitzky Golay filter for the comparison of field data was not a good alternative for the smoothing of the difference between the data, except for the conventional meteorological station Padre Ricardo de Remetter, in the variables evapotranspiration real and potential.

Keywords: Meteorology. Satelites. MERRA-2. TRMM. GOES. MODIS.

1 INTRODUÇÃO

Séries temporais meteorológicas são uma das principais fontes de informações dos processos ligados à atmosfera e são utilizadas como dados de entrada em modelos de previsão de safras agrícolas e na análise de tendências em períodos específicos (HOFFMANN et al., 2017; KRZYSZCZAK et al., 2017). Variáveis meteorológicas registradas, em estações convencionais, podem fornecer medições precisas (DUAN et al., 2016) sobre o comportamento climático de determinada região (XU; CONRAD; DOKTOR, 2018; ZHAO et al., 2018), bem como auxiliar no monitoramento e previsão de safras (GUSSO et al., 2013) de culturas com grande rentabilidade para economia mundial, a exemplo da soja.

A variação da produção da soja está diretamente relacionada com as condições climáticas observadas durante cada ano (BERKA; RUDORFF; SHIMABUKURO, 2003). No entanto, no Brasil, um dos maiores produtores de soja do mundo, o número baixo de estações de monitoramento meteorológico em campo, associado às falhas registradas nos dados, limita a obtenção de informações que atendam as necessidades locais em estudos envolvendo regressões e séries temporais (JURY, 2017).

Por disponibilidade limitada de dados meteorológicos obtidos em campo, no estado de Mato Grosso (DUBREUIL et al., 2004), torna-se necessário utilizar outras fontes de informações, a exemplo de imagens de satélites (AHMED et al., 2016; BLUM et al., 2013; FERREIRA et al., 2017; FORD; LABOSIER, 2017) e dados de modelos de reanálise (ARAJI et al., 2018; BUCHARD et al., 2017; DRAPER; REICHLE; KOSTER, 2018; GELARO et al., 2017; IGBAWUA et al., 2018).

Estudos recentes comprovam que dados meteorológicos derivados de satélites e de modelos de reanálises têm o potencial de serem utilizados como

substitutos em situações e locais onde as observações registradas por estações meteorológicas são inadequadas ou incompletas (COLSTON et al., 2018; LIM et al., 2017; POWELL, 2017; RANDLES et al., 2017; REICHLE et al., 2017).

Por meio de satélites meteorológicos, produtos de sensoriamento remoto fornecem informações úteis para o monitoramento meteorológico de áreas extensas (GIULIANI et al., 2017), incluindo, dentre outras variáveis, precipitação, temperatura, umidade relativa do ar (COSTON et al., 2018), número de horas de brilho solar, evapotranspiração real e potencial. Em relação às principais fontes de dados espectrais e de modelos de reanálise, empregadas em artigos científicos, destacam-se o Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), MERGE, MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Modern Era-Retrospective Analysis for Research and Analysis (MERRA-2) e Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), citados por Anderson et al. (2016), Ceballos e Rodrigues (2008), Chang et al. (2018), Elgamal, Reggiani e Jonoski (2017), Reichle et al. (2017), Rozante et al. (2010, 2018).

A informação meteorológica, baseada em imagens de satélite e dados de modelos de reanálise, possuem diferentes resoluções espaciais e temporais, mas ressalta-se aqui os que apresentam baixa e média resolução espacial e alta resolução temporal (KRZYSZCZAK et al., 2017), a exemplo dos produtos MODIS, produtos obtidos pela técnica MERGE (precipitação) e dados de reanálise do Merra-2. Essas variáveis meteorológicas encontram-se disponíveis, gratuitamente na internet (GIULIANI et al., 2017), favorecendo e incentivando o acesso e o uso desses dados. Tais informações se fazem úteis em regiões extensas, como no Mato Grosso, com poucas estações meteorológicas convencionais instaladas em campo (MOTA et al., 2013) com posições geográficas muito próximas.

Dentre as inúmeras aplicações, dados meteorológicos (FOERSTER et al., 2012; MARIN; RIBEIRO; MARCHIORI, 2014) obtidos em campo e, por meio de imagens de satélite (SAKAMOTO et al., 2010; WANG et al., 2016) e dados de modelos de reanálise permitem a identificação de tendências da cultura e são fonte de dados para modelos de estimativa de produtividade (SARMIENTO et al., 2017). No caso específico da estimativa da produtividade da soja, pesquisas endossam sobre a eficiência do emprego de dados meteorológicos obtidos por fontes espectrais (BAUP; FIEUZAL; BETBEDER, 2015; BERKA; RUDORFF; SHIMABUKURO, 2003; GUSSO et al., 2013; MONTEIRO; SENTELHAS, 2014) e modelos de reanálise (TALACUECE et al., 2016).

Assim, o presente trabalho se baseia na hipótese de que imagens de satélite e dados provenientes de modelos de reanálise fornecem informações válidas quando comparadas a dados de estações meteorológicas convencionais medidos em campo.

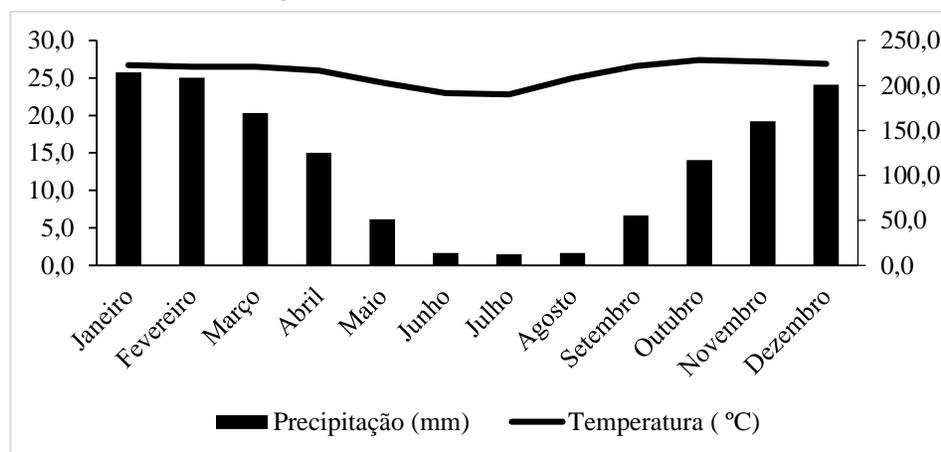
Objetivou-se com este trabalho analisar a precisão de dados meteorológicos obtidos por meio de imagens de satélite e dados de reanálise. Para tanto, escolheram-se estações meteorológicas convencionais no estado de Mato Grosso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Estado de Mato Grosso

O Estado de Mato Grosso está localizado na região Central do Brasil, com área de, aproximadamente, 905 mil km² (CHAVES et al., 2018), possui três biomas: pantanal úmido no Sudoeste (61.000 km²), florestas tropicais úmidas da Amazônia ao Norte (484.000 km²) e cerrado (360.000 km²) (KASTENS et al., 2017). A caracterização do clima do Estado de Mato Grosso pode ser observada na Figura 1, com a variação temporal da precipitação e temperatura média, segundo as Normais Climatológicas de Cuiabá - MT entre 1961 - 1990.

Figura 1 - Comportamento da precipitação e temperatura média da Normal Climatológica de Cuiabá, Mato Grosso.



Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (2018).

A partir da Figura 1, visualiza-se o comportamento das Normais Climatológicas de Cuiabá, capital do Estado de Mato Grosso, entre os anos 1961 e 1990. No eixo primário, a temperatura mínima média ocorre em julho com

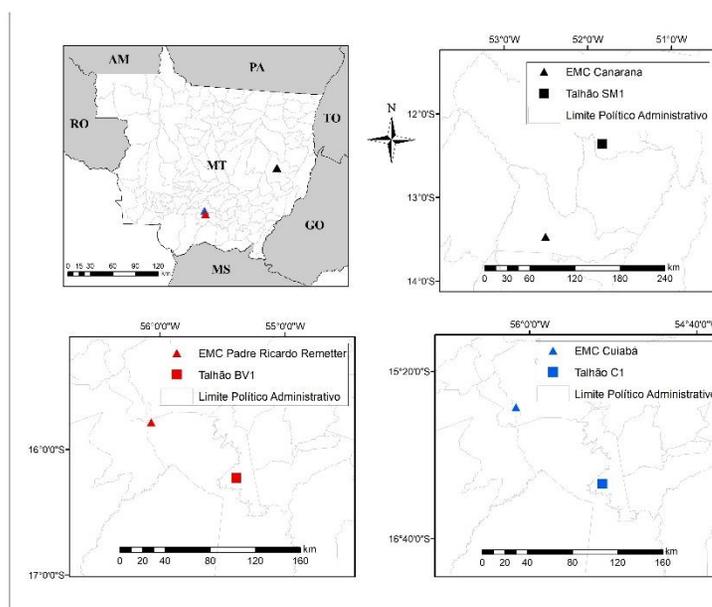
22,8°C e a máxima média em outubro com e 27,4° C. Já no eixo secundário, na precipitação, é possível observar que duas estações climáticas são bem definidas: chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro) (SOUZA et al., 2013). O clima tropical úmido-seco do Estado sofre variações, de acordo com a localização geográfica (ARVOR et al., 2012; DUBREUIL et al., 2004) e é influenciado por sistemas atmosféricos equatoriais e tropicais, além de contar com atuação extratropical. Considerada uma grande área de transição entre os climas predominantes quentes e úmidos, ao Norte e subtropical úmido, ao Sul, a área de domínio do clima úmido-seco apresenta características próprias, todavia diferenciadas em sua extensa área de domínio. A ação das massas equatorial continental (MEC), tropical marítima (MTA), tropical continental (MTC) e polar atlântica (MPA) marcam o clima da área pela atuação das linhas de instabilidade a Noroeste (INW), das ondas de calor a Noroeste, frio a Leste e Sudeste, de processos frontogênicos (FPA), que juntos respondem pela formação de invernos secos e verões úmidos nos subtipos climáticos desse domínio, em especial, o clima tropical do Brasil central (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

2.2 Área de estudo

Este estudo foi elaborado, a partir da localização geográfica da rede de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), inseridas no Banco de dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), para as três Estações Meteorológicas Convencionais (EMC's) do Estado de Mato Grosso. Escolheram-se, estritamente, as Estações Meteorológicas Convencionais, uma vez que as Estações Meteorológicas Automáticas não contam com medições disponíveis de insolação, variável imprescindível para o cálculo de rendimento de safra. As EMC Canarana, Cuiabá e Padre Ricardo de

Remetter foram escolhidas pela proximidade com fazendas produtoras de soja de alta, média e baixa produtividade (FIGURA 2).

Figura 2 - Proximidade entre Estações Meteorológicas Convencionais e talhões de soja.



Fonte: Da autora (2018).

A Figura 2 ilustra a proximidade entre EMC's e talhões de soja das Fazendas C1, BV1 e SM1. Os talhões de soja das fazendas citadas neste estudo foram escolhidos de modo a representar talhões de baixa, média e alta produtividade na safra 2012/2013.

Foram coletadas informações de produtividade (kg) e área (hectares) referentes a 10 talhões distribuídos em duas fazendas no Estado de Mato Grosso. Considerando que cada saca possui 60 kg por hectare, após cálculo do número de sacas para cada talhão, foram definidas as classes alta, média e baixa

produtividade pelo método *natural breaks* de Jenks (1967). Este método de classificação de dados determina a melhor organização de valores de classes diferentes, separa-os em classes que apresentem maior variabilidade entre si e menor variabilidade dentro das classes (CHEN et al., 2013).

Após o cálculo, segundo *Natural breaks* proposto por Jenks (1967), a definição do intervalo de valores de produtividade de cada classe, em sacas/ha, três talhões de soja foram selecionadas e as EMC's Cuiabá, Padre Ricardo de Remeter e Canarana, de acordo com a proximidade com as Fazendas C1, BV1 e SM1, respectivamente (TABELA 1).

Tabela 1 - Informações sobre os talhões considerados no estudo.

Parâmetro	Fazenda C1	Fazenda BV1	Fazenda SM1
Talhão	08/1	104	325/1
Latitude (°)	-16,24	-16,22	-12,35
Longitude (°)	-55,39	-55,38	-51,82
Sacas/há (kg)	33	50	73
Produtividade de grãos de soja	Baixa	Média	Alta
Intervalo de valores (sacas/ha)	30,12 - 44,34	44,34 - 58,56	58,56 - 72,78
Estação Meteorológica Convencional	Cuiabá	Padre Ricardo de Remeter	Canarana
Latitude da EMC mais próxima (°)	-15,61	-15,78	-13,47
Longitude da EMC mais próxima (°)	-56,10	-56,06	-52,27
Altitude (m)	145	140	430
*Classe Climática da EMC mais próxima	C ₁ dA'a'	C ₁ dA'a'	B ₁ wA'a'

*Classe climática de Thornthwaite segundo Souza et al. (2013).

2.3 Desenvolvimento do trabalho

O período de coleta dos dados se refere à safra de soja do ano agrícola 2012/2013, a contabilizar entre os dias 21 de setembro de 2012 a 22 de março de 2013, dias juliano (DJ) 265 a 81, respectivamente. A análise destes dados, neste período em específico, deve-se à disponibilidade e confiabilidade dos dados e ao fato de que este estudo poderá ser aproveitado em pesquisas futuras, envolvendo a detecção do desenvolvimento fenológico da soja, bem como a resposta da cultura quanto à aplicação de modelos de estimativa de produtividade abrangendo dados meteorológicos espectrais.

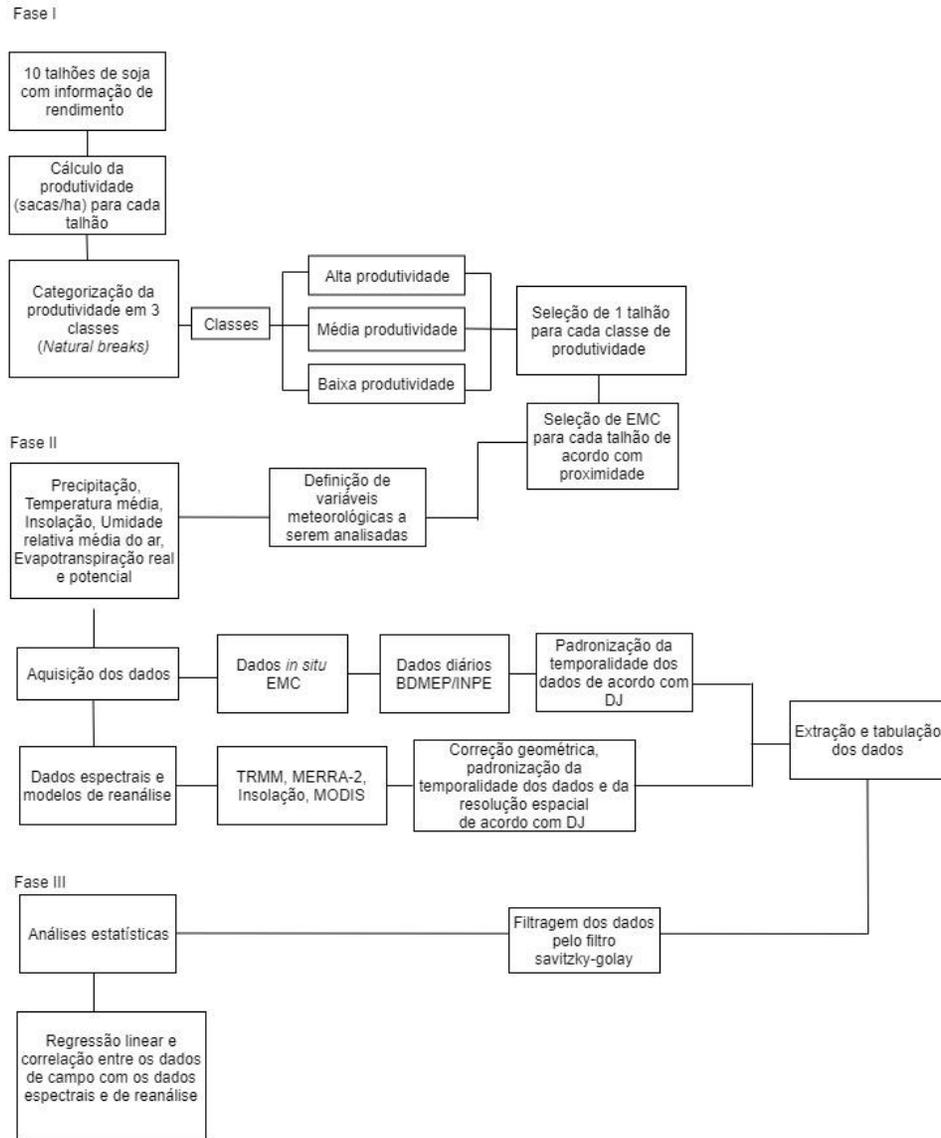
Os procedimentos metodológicos deste estudo, apresentados no fluxograma da Figura 3, foram divididos em três etapas:

Fase I: Definição e seleção das EMC's, com base na proximidade de talhões de soja, categorizados em baixa, média e alta produtividade (descrita na Seção 2.2).

Fase II: Aquisição, tratamento e tabulação dos dados espectrais, de reanálise de modelos climáticos e de campo (EMC).

Fase III: Análise estatística e validação dos dados analisados.

Figura 3 - Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Da autora (2018).

O desenrolar desta pesquisa foi pautado na comparação estatística entre conjuntos de dados de modelos climáticos de reanálise e de imagens de satélite

com variáveis meteorológicas coletadas *in situ* das estações meteorológicas convencionais (EMC) previamente definidas.

Assim, para a comparação, foram consideradas as variáveis meteorológicas: (i) precipitação, (ii) temperatura média do ar, (iii) insolação, (iv) umidade relativa do ar, (v) evapotranspiração real e (vi) evapotranspiração potencial.

2.4 Dados de campo obtidos em estações meteorológicas convencionais

Por meio de séries históricas diárias coletadas em EMC, foram analisadas as variáveis precipitação (mm), temperatura (°C), insolação (número de horas de brilho solar) e umidade relativa do ar (%). Também disponível no site do INMET, o Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária (SISDAGRO) oferece aos usuários ferramentas, para o monitoramento de condições agrometeorológicas obtidas, por meio de modelos de previsão numérica do tempo, como o balanço hídrico e a perda de produtividade. Nesse sentido, foi possível determinar a evapotranspiração real e potencial da cultura da soja, considerando informações da EMC mais próximas das fazendas analisadas.

2.4.1 Precipitação

Os dados diários de precipitação (mm) foram obtidos em formato .txt e, posteriormente, convertidos para formato .xls. Todos os dados espectrais e de campo seguiram às datas correspondentes aos dias juliano (DJ) do sensor MODIS, com resolução temporal de 8 dias (TABELA 2).

Tabela 2 - Referência das datas e DJ referentes à resolução temporal dos dados de precipitação.

Datas	Precipitação acumulada do período:
21/09/2012	DJ 265: 14/09/2012 - 21/09/2012
29/09/2012	DJ 273: 22/09/2012 - 29/09/2012
07/10/2012	DJ 281: 30/09/2012 - 07/10/2012
15/10/2012	DJ 289: 08/10/2012 - 15/10/2012
23/10/2012	DJ 297: 16/10/2012 - 23/10/2012
31/10/2012	DJ 305: 24/10/2012 - 31/10/2012
08/11/2012	DJ 313: 01/11/2012 - 08/11/2012
16/11/2012	DJ 321: 09/11/2012 - 16/11/2012
24/11/2012	DJ 329: 17/11/2012 - 24/11/2012
02/12/2012	DJ 337: 25/11/2012 - 02/12/2012
10/12/2012	DJ 345: 03/12/2012 - 10/12/2012
18/12/2012	DJ 353: 11/12/2012 - 18/12/2012
26/12/2012	DJ 361: 19/12/2012 - 26/12/2012
01/01/2013	DJ 1: 25/12/2012 - 01/01/2013
09/01/2013	DJ 9: 02/01/2013 - 09/01/2013
17/01/2013	DJ 17: 10/01/2013 - 17/01/2013
25/01/2013	DJ 25: 18/01/2013 - 25/01/2013
02/02/2013	DJ 33: 26/01/2013 - 02/02/2013
10/02/2013	DJ 41: 03/02/2013 - 10/02/2013
18/02/2013	DJ 49: 11/02/2013 - 18/02/2013
26/02/2013	DJ 57: 19/02/2013 - 26/02/2013
06/03/2013	DJ 65: 27/02/2013 - 06/03/2013
14/03/2013	DJ 73: 07/03/2013 - 14/03/2013
22/03/2013	DJ 81: 15/03/2013 - 22/03/2013

Fonte: Da autora (2018).

Os dados diários de precipitação coletados nas EMC's foram somados a cada 8 dias de modo a caracterizar a precipitação acumulada nesse período.

2.4.2 Temperatura

Em relação à variável temperatura média diária compensada (INMET), foi estimada, conforme sugestão do INMET (EQUAÇÃO 1).

$$T = [T (12h) + 2 * T (24 h) + T (X) + T (n)] / 5 \quad (1)$$

Em que,

T-Temperatura média compensada°, T (12h) - Temperatura observada às 12 horas UTC, T (24) -Temperatura observada às 24 horas UTC, T (X) - Temperatura máxima, T (n) - Temperatura mínima.

2.4.3 Insolação

Os dados diários de insolação (brilho solar ou número de horas de sol sem nuvens durante o dia) foram registrados por heliógrafo, tipo Campbell-Stokes. O registro de número de horas de brilho solar (d^{-1}) seguiu as datas correspondentes aos DJ (TABELA 2).

2.4.4 Umidade relativa do ar

Informações diárias de umidade relativa média do ar (UR), dadas em porcentagem, foram coletadas no período relacionado aos DJ (TABELA 2). Considerando dados meteorológicos obtidos em campo pelas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá, em comparação com os dados de reanálise Merra -2 e Merra-2 com filtro Savitzky Golay, foram realizadas análises estatísticas de modo a selecionar e sugerir o melhor dado de reanálise, na ausência de informações de campo, para cada uma dessas três regiões em que as EMC's se encontram.

2.4.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração de referência (ET_o) na escala diária foi estimada pelo modelo parametrizado pela Food and Agriculture Organization of the United Nation (FAO), ou seja, equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.5 Dados radiométricos obtidos em plataformas orbitais

Foram analisadas as variáveis temperatura, precipitação, insolação, umidade relativa do ar, evapotranspiração real e evapotranspiração potencial. As imagens de insolação foram fornecidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e todos os produtos MODIS foram adquiridos por meio do portal Reverb-Echo. Foram utilizados dados de reanálise do Merra-2 (<http://www.soda-pro.com/web-services/meteo-data/merra>), para as variáveis precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, disponível em plataformas de aquisição de dados da National Aeronautics and Space Administration (NASA). Para o componente espectral, foram empregados produtos do sensor MODIS, GOES - IMAGER (<http://satelite.cptec.inpe.br/radiacao/>) e dados de reanálise Merra- 2, conforme descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados espectrais utilizados.

Produtos	Especificações	Cena	Fonte de dados	Referências
Precipitação obtida pelo produto 3B42 RT - Corrigido pelo método Merge	Resolução Temporal: Diário/ Resolução Espacial: 20 km Unidade: mm/h Versão:007	América do Sul	INPE	ROZANTE et al. 2010
Precipitação obtida por dados de reanálise Merra-2	Resolução Espacial: 0,5° x 0,625 ° Unidade: mm/h Versão:	Coordenadas dos centroides das estações	NASA	
Temperatura média do ar (K)	Resolução Temporal: diária Resolução Espacial: 0,5° x 0,625 ° (lat x lon)	Coordenadas dos centroides das estações	Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA),	BOSILOVICH et al., 2016
Insolação - número de horas de brilho solar (n) obtidos pelo Canal 1 do GOES Imager - 0,55 µm	Resolução Temporal: Diária Resolução Espacial: 4 km	Estado de Mato Grosso	DSA/CPTEC - INPE	PORFIRIO; CEBALLOS, 2017
Umidade relativa do ar	Resolução Temporal: diária Resolução Espacial: 0,5° x 0,625 ° (lat x lon)	Coordenadas dos centroides das estações	NASA	
MOD16- Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial	Resolução Temporal: 8 dias/ Resolução Espacial: 1 km Unidade: kg/m ² /8 dias Versão:005	h12v10	Terra/sensor MODIS	MU et al., 2011

Fonte: Da autora (2018).

2.5.1 Evapotranspiração real e potencial (MOD16)

Foram utilizadas imagens do produto MOD 16 (Evapotranspiração real e potencial), satélite Terra. Os produtos MOD16 possuem formato de arquivo HDF-EOS com 5 bandas espectrais, resolução espacial de 1 km e ciclo de revisita de 8 dias. O produto MOD16, originalmente, possui resolução radiométrica de 16-bit inteiros sinalizados, com datum indefinido e projeção geográfica do tipo sinusoidal. As imagens foram processadas no *software* MODIS Reprojection Tool (MRTTool), sendo reprojctadas para UTM WGS-84 21S, EPSG 32721 com resolução radiométrica de 32 bit não sinalizados e formato de arquivo geotiff, usando o algoritmo de reamostragem bilinear (CHEN et al., 2016).

O algoritmo MOD16 ET foi baseado, na equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), desenvolvido por Mu, Zhao e Running (2011).

2.5.2 Precipitação (MERGE 3B42RT)

Medidas de precipitação foram coletadas diariamente no período analisado. Posteriormente, dados da série temporal referentes ao período estudado foram agregados de modo a representar 8 dias de precipitação acumulada para cada DJ (TABELA 2). O produto MERGE combina a precipitação observada de EMC's com a estimativa de precipitação do satélite TRMM, produto 3B42RT (ROZANTE et al., 2010). As imagens possuem resolução espacial de 20 km com informação de precipitação acumulada a cada 24 horas. As imagens do produto 3B42RT Merge são adquiridas no formato binário (.bin), transformadas em geotiff pelo *software* Grid Analysis and Display System (GrADS).

2.5.3 Insolação

Para a obtenção da insolação, Ceballos e Rodrigues (2008) e Porfírio e Ceballos (2017) basearam-se em imagens de radiação refletida no intervalo visível, a partir de imagens do canal VIS do GOES (canal 1, centrado em 0,55 μm). A estimativa diária de brilho solar (insolação) adota uma relação linear entre a cobertura local de nuvens C e a refletância R observada no canal VIS do GOES. Informações sobre o número de horas de brilho solar (n), do satélite GOES, aplicadas neste trabalho, foram fornecidas pela Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE), em arquivos no formato binário (.bin), transformados em geotiff pelo *software* Grid Analysis and Display System (GrADS).

2.5.4 Dados de reanálise de modelos climáticos (Merra-2)

Dados de temperatura diária foram adquiridos pelos produtos do Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, segunda versão (MERRA - 2) (BOSILOVICH; LUCCHESI; SUAREZ, 2016). Os dados de reanálise MERRA-2 são combinações de medições meteorológicas com um modelo de previsão numérica (meteorológica), gerados pelo sistema global de assimilação de dados da NASA (National Aeronautics and Space Administration) e simulam aspectos do sistema terrestre (REICHLE et al., 2017). Esta combinação fornece uma estimativa sintetizada do estado do sistema atmosférico. Dados do Merra- 2 possuem alta resolução espacial (0,5° de Latitude por 0,67° de Longitude) e estão disponíveis a cada 3 horas e diariamente. No presente trabalho, os dados foram extraídos em escala diária de acordo com o centroide das EMC's.

2.5.5 Correção geométrica e padronização de arquivos

As imagens foram reamostradas (RIZZI; RUDORFF, 2007), aplicando o algoritmo *nearest neighbor*, para padronizar a resolução espacial em 250 m (AHL et al., 2006; MASSEY et al., 2017). Em seguida, houve a extração das informações dos pixels com base nas coordenadas das EMC's selecionadas.

2.5.6 Filtragem Savitzky golay

Com o objetivo de suavizar e calcular derivadas de um conjunto de valores consecutivos, após a tabulação dos dados, houve a filtragem dos dados espectrais operando o método proposto por Savitzky-Golay (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Para uma janela de filtro específica, os coeficientes são os mesmos para diferentes observações e são derivados do ajuste por mínimos quadrados de um polinômio de ordem inferior a um número de observações consecutivas. O grau do polinômio de suavização são dois parâmetros críticos que devem ser determinados pelos usuários (CHEN et al., 2004). Neste estudo, o tamanho da janela foi ajustado para 5 e uma função polinomial de 2ª ordem foi usada.

2.6 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram efetuadas na versão trial do *software* IBM Statistical Package for the Social Science (SPSS). Foram realizadas análises estatísticas, para selecionar e sugerir o melhor dado espectral e/ou de reanálise na ausência de informações de campo, para cada uma dessas três regiões em que as EMC's se encontram.

2.6.1 Regressão linear

Análise de regressão é uma técnica de modelagem empregada para analisar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. Esta técnica identifica (estima) uma função que descreve, o mais próximo possível, a relação entre essas variáveis e, assim, poderemos prever o valor que a variável dependente (Y) irá assumir para um determinado valor da variável independente X.

2.6.2 Correlação

Foi analisada a eficiência do ajuste pelo coeficiente de correlação (r) entre as variáveis espectrais utilizadas e, no presente trabalho, reflete a eficiência do ajuste, dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. As correlações foram calculadas e classificadas de acordo com o coeficiente de correlação de Pearson (TABELA 4).

Tabela 4 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Coeficiente de correlação	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito Alta
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: Adaptado de Hopkins (2000).

Um ajuste perfeito teria coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1. O instrumento de medida da correlação linear é dado pelo coeficiente de correlação de Pearson (EQUAÇÃO 2).

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x) \cdot (\sum y)}{n}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}} \quad (2)$$

O valor do coeficiente de correlação r sempre deverá estar entre -1 e 1, em que os dados próximos de 1 ou -1 indicam a correlação linear perfeita. Para a acurácia estatística do modelo, três critérios estatísticos foram utilizados: coeficiente de determinação (R^2), erro quadrado médio (EQM), que mede a discrepância dos dados simulados sobre os observados (JACOVIDES; KONTOYIANNIS, 1995) e o índice de concordância de Willmott.

2.6.3 Índice de concordância de Willmott

O índice de Willmott (d), proposto por Willmott et al. (1985), é determinado pela Equação 3 e estima o grau de concordância entre os conjuntos de dados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (3)$$

em que O_i , $i = 1, 2, \dots, n$, o i -ésimo valor da variável observada, P_i , $i = 1, 2, \dots, n$, o i -ésimo valor da variável predita. Os valores de "d" podem variar de 0, para nenhuma concordância, a 1, para uma concordância perfeita.

3 RESULTADOS

Os resultados desta seção estão separados por variável meteorológica na seguinte ordem: 4.1 Precipitação 4.2 Temperatura 4.3 Umidade 4.4 Insolação 4.5 Evapotranspiração real e 4.6 Evapotranspiração potencial. Ao utilizar coeficiente de correlação de Pearson, os registros meteorológicos das estações demonstraram padrões de correlação, segundo dado espectral e o observado em campo.

3.1 Precipitação

A Tabela 5 apresenta as análises estatísticas dos dados de precipitação (mm/ 8 dias), obtidos por fontes espectrais e de reanálise, em comparação aos dados de campo de precipitação obtidos pelas estações meteorológicas convencionais de Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.

Observa-se, na EMC Canarana, próxima ao talhão de alta produtividade, que os dados de reanálise do Merra-2 apresentaram coeficiente de correlação (r) moderado ($r = 0,47$), coeficiente de determinação (R^2) de 0,229 ($p = 0,0179$) e erro quadrático médio de 49 mm a cada 8 dias. Por outro lado, após aplicação do filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação (r) aumentou de 0,47 para 0,64, sendo classificado como alta correlação, segundo Hopkins (2000), com R^2 de 0,42 e erro quadrático médio de 43 mm a cada 8 dias. Assim, de acordo com a Tabela 5, os resultados sugerem que, na comparação dos dados do Merra 2 com os dados de precipitação da EMC, a aplicação do filtro Savitzky Golay é eficiente para melhorar a correlação entre os dados.

Utilizando o produto MERGE (ROZANTE et al., 2010) gerado, a partir de imagens do 3B42RT do satélite TRMM, foi possível obter o coeficiente de correlação de 0,89 ($p < 0,0001$), considerado uma classificação muito alta

(HOPKINS, 2000), R^2 0,805 e erro quadrático médio de 24 mm/8 dias. Após aplicação do filtro Savitzky Golay, diferente do comportamento ocorrido nos dados de reanálise do Merra-2, houve a diminuição dos coeficientes de correlação e de determinação (R^2) de 0,89 para 0,80 e de 0,805 para 0,645, respectivamente. Há de se considerar o aumento do erro quadrático médio de 24 mm para 33 mm a cada 8 dias.

Nesse sentido, para a EMC Canarana, a aplicação do filtro Savitzky Golay foi eficiente apenas para os dados de reanálise Merra-2, havendo um aumento no coeficiente de correção e de determinação. Os melhores resultados, para estimar a variável precipitação da EMC Canarana, foram operando o produto MERGE 3B42RT.

Para a EMC Padre Ricardo de Remetter, estação próxima ao talhão de média produtividade, dados sem filtro obtidos pelo Merra-2 apresentaram resultados ligeiramente inferiores, quando comparados aos dados que passaram pelo filtro Savitzky Golay, com coeficientes de correlação 0,73 e 0,72 e determinação R^2 igual a 0,537 e 0,596, respectivamente ($p < 0,0001$). Apesar dos dados Merra-2 sem filtro terem apresentado resultados superiores nos coeficientes de correlação e determinação, o erro quadrático médio foi maior com 33 mm/8 dias. Dados do produto MERGE 3B42RT, quando comparados aos dados de campo da EMC Padre Ricardo de Remetter, foram classificados como quase perfeitos, segundo coeficiente de correlação com r de 0,90 ($p < 0,0001$). O coeficiente de determinação desse dado demonstrou uma linearidade na correlação com R^2 0,824. Após a filtragem dos dados MERGE 3B42RT, houve a diminuição do coeficiente de correlação para 0,80 e diminuição do coeficiente de determinação para 0,746. Em relação ao erro quadrático médio, os dados filtrados obtiveram um erro de 23 mm/8 dias e os não filtrados 19mm/8 dias. Diante desses resultados, nota-se que, para os dados espectrais MERGE 3B42RT, com filtro e sem filtro, os resultados são satisfatórios, no entanto a

filtragem por Savitzky Golay não se faz necessária, pois o produto por si só apresentou bons resultados.

Em relação à EMC Cuiabá, dados do Merra-2 demonstraram classificação alta para o coeficiente de correlação ($r = 0,56$), coeficiente de determinação de 0,31 e erro quadrático médio de 50 mm/8 dias ($p=0,0040$). Após a utilização do filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação obtido foi baixo ($r = 0,19$), o coeficiente de determinação 0,039 e erro quadrático médio de 59 mm/8 dias. Essa diminuição significativa de correlação entre os dados, após a utilização do filtro Savitzky Golay, também ocorreu com os dados obtidos pelo MERGE 3B42RT. O coeficiente de correlação do MERGE 3B42RT não filtrado foi de 0,93 ($p < 0,0001$), enquanto, para os dados filtrados, foi de 0,29, sendo classificados como quase perfeito e baixo, respectivamente. O erro quadrático médio foi mais que o dobro para os dados com filtro Savitzky Golay. Dessa maneira, recomenda-se, para esse conjunto de dados, a não utilização do filtro, pois há a diminuição significativa dos coeficientes de correlação e determinação, bem como aumento do erro quadrático médio.

Tabela 5 - Análises estatísticas entre os dados de precipitação obtidos por fontes de campo em comparação com dados de precipitação obtidos por fontes espectrais e de reanálise pelo método de correlação de Pearson.

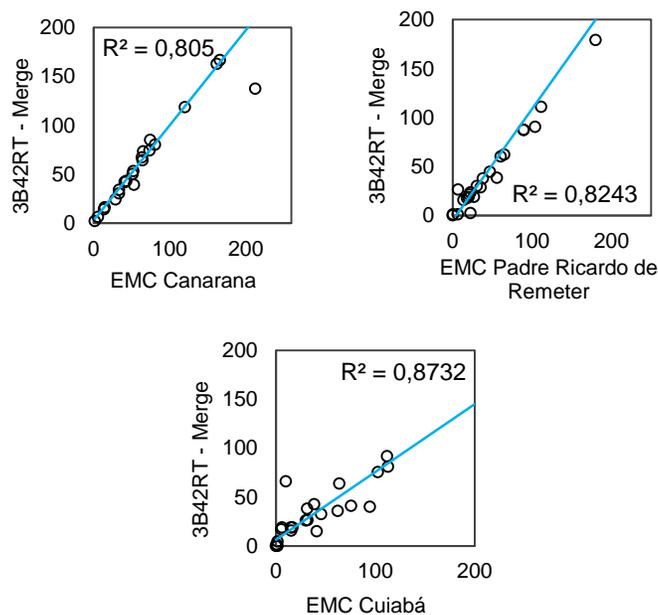
Dado de campo	Dado espectral/ reanálise	Coefficiente de correlação r	p-valor (Pearson)	EQM (Erro quadrático médio)	Coefficiente de determinação R ²
	Merra - 2	0,47	0,0179	49,6217	0,229
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,64	0,0006	43,0513	0,420
	MERGE 3B42RT	0,89	< 0,0001	24,9608	0,805
	MERGE 3B42RT Savitzky Golay	0,80	< 0,0001	33,6694	0,645
	Merra - 2	0,73	< 0,0001	31,5301	0,596
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,72	< 0,0001	29,4342	0,537
	MERGE 3B42RT	0,90	< 0,0001	19,4200	0,824
	MERGE 3B42RT Savitzky Golay	0,86	< 0,0001	23,3311	0,746
	Merra - 2	0,56	0,0040	50,1061	0,3181
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,19	0,355	59,4813	0,039
	MERGE 3B42RT	0,93	< 0,0001	21,6068	0,873
	MERGE 3B42RT Savitzky Golay	0,29	0,1665	58,0364	0,085

Fonte: Da autora (2018).

De uma maneira geral, observa-se que o produto MERGE 3B42RT conseguiu desempenho superior quando comparado aos demais dados espectrais e/ou de reanálise nas três EMC. Com exceção dos dados do Merra-2 para a EMC Canarana, todos os dados com filtro Savitzky Golay aplicado tiveram resultados inferiores aos dados sem filtro. O erro quadrático médio foi maior, utilizando produto MERGE 3B42RT com filtro Savitzky Golay na EMC Cuiabá, obtendo 58 mm/8 dias. Já o menor erro ocorreu, usando o produto MERGE 3B42RT na EMC Padre Ricardo de Remetter, com 19 mm/8 dias.

Os dados espectrais indicados, para representar precipitação nas três estações e que possuíram maior coeficiente de determinação (R^2), são ilustrados na Figura 4 com as respectivas equações de regressão apresentadas na Tabela 6, para a estimativa de precipitação.

Figura 4 - Valores do coeficiente de determinação (R^2), para resultados mais representativos das EMC, considerando a variável precipitação.



Fonte: Da autora (2018).

Tabela 6 - Equação de regressão para as EMC's.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MERGE 3B42RT	$y = 10,8846 + 0,8294 x$
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	MERGE 3B42RT	$y = 12,2856 + 0,7250 x$
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	MERGE 3B42RT	$y = -2,0653 + 1,2616 x$

Fonte: Da autora (2018).

Com base no produto MERGE 3B42RT, infere-se que ele possa ser utilizado, para o complemento da falta de dados de superfície em locais, onde não existam estações instaladas. Com base nisso, realizou-se o teste d de Willmott em 1985, conforme apresenta a Tabela 7.

Tabela 7 - Índice de concordância d de Willmott.

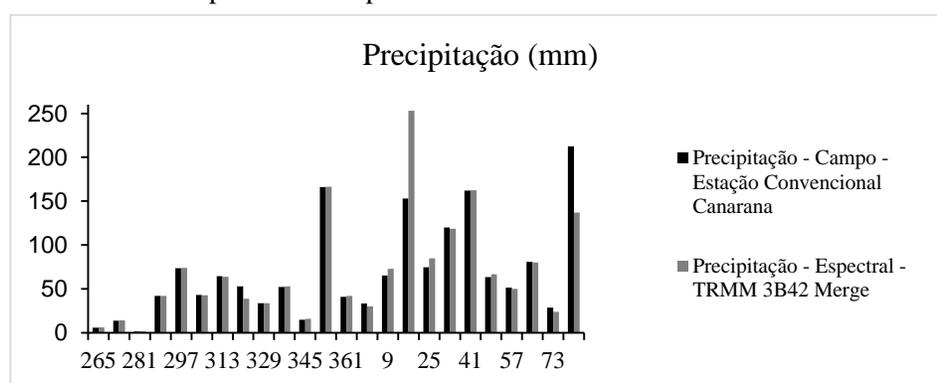
Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MERGE 3B42RT	0,99
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	MERGE 3B42RT	0,99
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	MERGE 3B42RT	0,98

Fonte: Da autora (2018).

Os resultados obtidos pelo índice de concordância d de Willmott corroboram com coeficiente de correlação e determinação das três EMC.

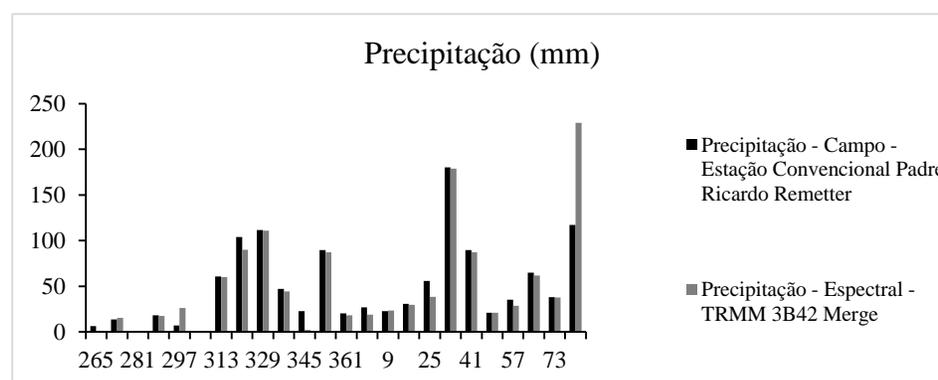
Os resultados relativos à quantidade (mm) acumulada (8 dias) de água precipitada nas EMC são apresentados na Figuras 6, 7 e 8 e ilustram a quantidade de água precipitada a cada 8 dias em comparação aos dados das EMC's. É possível observar a quantidade de água precipitada durante o período analisado, onde foram consideradas informações de precipitação acumulada a cada 8 dias nas três estações.

Figura 5 - Precipitação ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

Figura 6 - Precipitação ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

filtro Savitzky Golay, houve a diminuição dos coeficientes de correlação ($r=0,72$ e determinação ($R^2=0,528$), bem como aumento do erro quadrático médio (TABELA 8). Ainda assim, o coeficiente de correlação de Pearson foi classificado como muito alto ($p < 0,0001$) e o erro quadrático médio resultou em $1\text{ }^\circ\text{C}$.

Os dados espectrais de temperatura obtidos pelo produto LST - MODIS, quando comparados aos dados de temperatura da EMC Canarana, apresentaram resultados inferiores, com coeficiente de correlação $0,45$ classificado como moderado, $R^2\ 0,206$ ($p=0,026$) e erro quadrático médio de $1\text{ }^\circ\text{C}$. Diferentemente dos dados filtrados do Merra-2, em que houve a piora dos resultados, o produto LST-Modis com filtro Savitzky Golay apresentou melhora nos coeficientes de correlação ($r=0,53$) e determinação ($0,286$) e uma ligeira redução no erro quadrático médio ($p= 0,007$) (TABELA 8).

Na EMC Padre Ricardo de Remetter, dados de temperatura fornecidos pelo Merra-2 obtiveram resultados muito altos do coeficiente de correlação ($r=0,87$). Já o coeficiente de determinação estimou $R^2 = 0,76$, indicou correlação de 76% entre os dados. O erro quadrático médio foi de $0,95\text{ }^\circ\text{C}$. Os dados com filtro Savitzky Golay tiveram uma redução no coeficiente de correlação ($r=0,72$) e de determinação ($R^2=0,522$), bem como aumento do erro quadrático médio ($p < 0,0001$) quando comparados aos dados não filtrados (TABELA 8). A partir dos produtos LST-Modis, o valor do coeficiente de correlação ($r=0,47$) foi classificado como moderado. O coeficiente de determinação ($R^2= 0,221$) demonstrou que os dados espectrais representavam os dados de campo em 22% . Após a utilização do filtro Savitzky Golay, houve um ligeiro aumento dos coeficientes de correlação ($r=0,47$, para $0,48$) e determinação ($R^2= 0,221$ para $0,232$), bem como a redução do erro quadrático médio (EQM= $1,73$ para $1,72$). Ainda assim, os resultados continuaram inferiores em relação aos obtidos pelos dados de reanálise Merra-2.

Os coeficientes de correlação e determinação realizados, com o auxílio de dados de reanálise e de campo da EMC Cuiabá, demonstraram não haver bons resultados para esta estação, e as correlações ficaram inferiores à EMC mais próxima, Padre Ricardo de Remetter, com erros superiores a 1° C. Uma provável explicação para esse fato são os erros das medições de campo, que podem interferir nos resultados. De acordo com Spank et al. (2013), incertezas nas medições de estações meteorológicas convencionais podem estar associados à falha nos equipamentos e a mão de obra destinada a realizar tal atividade. Assim, pela proximidade da EMC Cuiabá com a EMC Padre Ricardo de Remetter, para este trabalho optou-se pela utilização de informações da EMC Padre Ricardo de Remetter.

Considerando o bom desempenho do dado de reanálise, para a variável temperatura, sugere-se a utilização do Merra-2 sem filtro na coleta de registros de temperatura para a EMC Cuiabá.

Tabela 8 - Análises estatísticas entre os dados de temperatura obtidos por fontes de campo em comparação com dados de temperatura obtidos por fontes espectrais e de reanálise.

(Continua)

Dado de campo	Dado espectral/ reanálise	Coefficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coefficiente de determinação R² (Pearson)
	Merra - 2	0,80	< 0,0001	0,8767	0,646
	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,72	< 0,0001	1,0136	0,528
EMC Canarana	LST - MODIS	0,45	0,026	1,3144	0,206
	LST - MODIS - Savitzky Golay	0,53	0,007	1,2461	0,286

Tabela 8 - Análises estatísticas entre os dados de temperatura obtidos por fontes de campo em comparação com dados de temperatura obtidos por fontes espectrais e de reanálise.

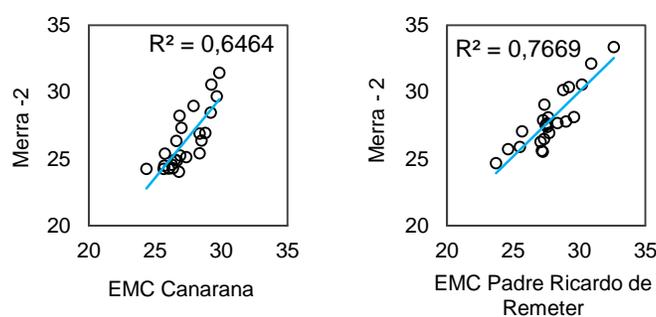
(Conclusão)

Dado de campo	Dado espectral/ reanálise	Coefficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coefficiente de determinação R ² (Pearson)
EMC Padre Ricardo de Remetter	Merra - 2	0,87	< 0,0001	0,9510	0,767
	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,72	< 0,0001	1,3616	0,522
	LST - MODIS	0,47	0,021	1,7388	0,221
	LST - MODIS - Savitzky Golay	0,48	0,017	1,7257	0,232
EMC Cuiabá	Merra - 2	-0,05	0,791	2,0375	0,003
	Merra - 2 - Savitzky Golay	-0,10	0,636	2,0303	0,010

Fonte: Da autora (2018).

Dados de reanálise indicados, para representar registros de temperatura nas três estações e que possuíram maior coeficiente de determinação (R²), são ilustrados pela Figura 8.

Figura 8 - Resultados obtidos pelo coeficiente de determinação nas EMC Canarana e Padre Ricardo de Remetter.



Fonte: Da autora (2018).

Os resultados do coeficiente de determinação demonstram, a partir das Figura 8, uma linearidade positiva dos dados nas duas EMC's.

A Tabela 9 apresenta equações de regressão, para a variável temperatura, usando dados de reanálise Merra-2 indicados neste estudo. Estas equações descrevem a resposta e os termos do modelo para estimar a temperatura do local com os dados do MERRA-2 (variável x).

Tabela 9 - Equação de regressão para as EMC's.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	Merra - 2	$y = 13,2589 + 0,5324 x$
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	Merra - 2	$y = 5,7139 + 0,7919 x$

Fonte: Da autora (2018).

A partir dos resultados satisfatórios para a variável temperatura nas duas EMC's, foi calculado entre as variáveis observadas em campo (EMC's Canarana e Padre Ricardo de Remetter) e o dado predito (Merra-2), o índice de concordância d de Willmott, como apresenta a Tabela 10.

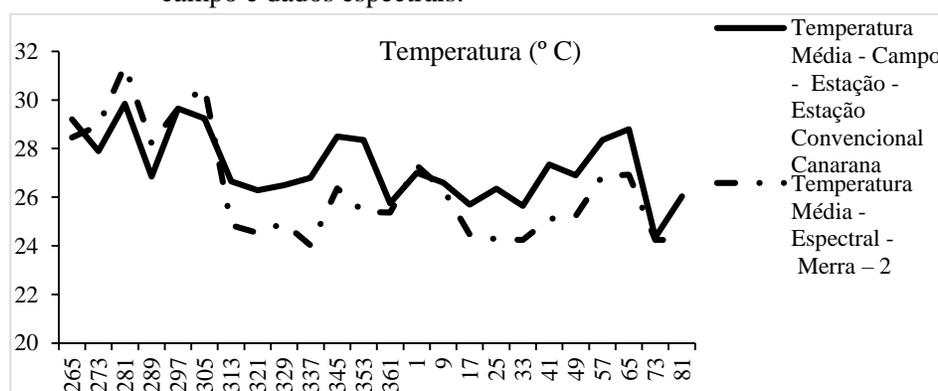
Tabela 10 - Índice de concordância d de Willmott.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	Merra - 2	0,91
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	Merra - 2	0,99

Fonte: Da autora (2018).

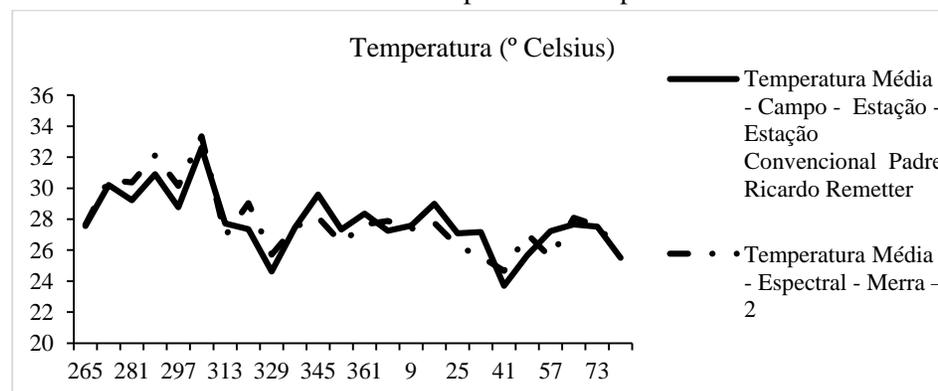
De acordo com os resultados do índice d de Willmot, há uma boa concordância entre os valores preditos e os valores observados, com índice d superior a 0,9. O índice indica que a proximidade com o valor 1 significa perfeita concordância. As Figuras 9 e 10 apresentam o comportamento da temperatura, obtida em campo e por dados de reanálise, nas EMC Canarana e Padre Ricardo de Remetter.

Figura 9 - Temperatura ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

Figura 10 - Temperatura ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

3.3 Umidade

A Tabela 11 apresenta as análises estatísticas dos dados de umidade relativa do ar (%) obtidos pelo Merra-2, em comparação aos dados de umidade relativa do ar (%), medidos no campo pelas estações meteorológicas convencionais Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.

Na EMC Canarana, próxima ao talhão de alta produtividade, dados de reanálise do Merra-2 apresentaram coeficiente de correlação ($r= 0,798$) muito alto, ($p < 0,0001$) coeficiente de determinação (R^2) de 0,637 e erro quadrático médio de 7% de umidade a cada 8 dias. Após aplicação do filtro Savitzky Golay, houve a diminuição dos coeficientes de correlação (r) e de determinação (R^2), de 0,798 para 0,757 e de 0,637 para 0,573, respectivamente.

Na EMC Padre Ricardo de Remetter, dados de umidade fornecidos pelo Merra-2 obtiveram resultados muito altos dos coeficientes de correlação ($r= 0,896$) e determinação ($R^2=0,804$), com p valor $< 0,0001$. O erro quadrático médio foi de 5% de umidade. Já os dados com filtro Savitzky Golay tiveram uma redução no coeficiente de correlação ($r= 0,805$) e de determinação ($R^2 = 0,648$), bem como aumento de 2% de umidade relativa do erro quadrático médio quando comparados aos dados não filtrados.

Na EMC Cuiabá, houve os melhores resultados. Os valores dos coeficientes de correlação e regressão foram $r= 0,907$ e $R^2 = 0,823$, sendo classificados como quase perfeito e linear, respectivamente, com p valor $< 0,0001$. Após a aplicação do filtro Savitzky Golay, os resultados apresentaram um pequeno decréscimo nos coeficientes de correlação ($r= 0,816$) e determinação ($R^2= 0,667$), bem como aumento do erro quadrático médio de 2% de umidade relativa em relação aos dados sem filtro.

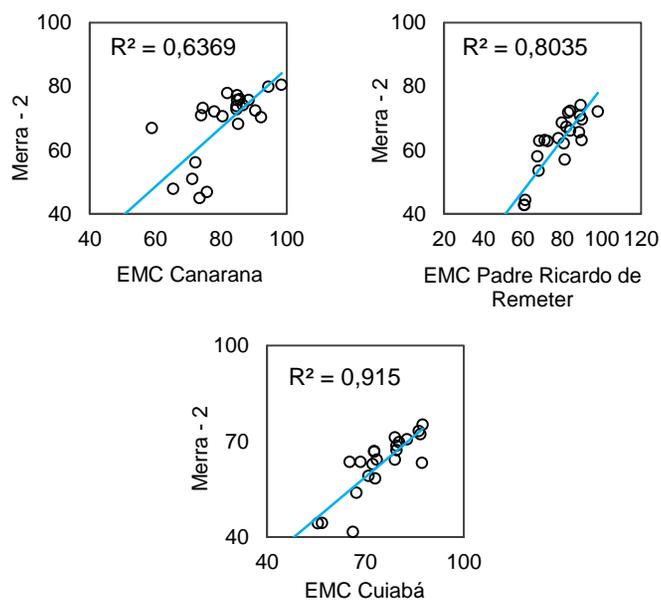
Tabela 11 - Análises estatísticas entre os dados de umidade obtidos por fontes de campo em comparação com dados de umidade obtidos por fontes de reanálise.

Dado de campo	Dado espectral/ reanálise	Coefficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coefficiente de determinação R² (Pearson)
EMC Canarana	Merra - 2	0,798	< 0,0001	7,3830	0,637
	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,757	< 0,0001	8,0030	0,573
EMC Padre Ricardo de Remetter	Merra - 2	0,896	< 0,0001	5,8959	0,804
	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,805	< 0,0001	7,8869	0,648
EMC Cuiabá	Merra - 2	0,907	< 0,0001	4,9480	0,915
	Merra - 2 - Savitzky Golay	0,816	< 0,0001	6,9936	0,667

Fonte: Da autora (2018).

Dados de reanálise indicados, para representar registros de umidade relativa do ar, nas três estações e que possuíram maior coeficiente de determinação (R²), são ilustrados pela Figura 11.

Figura 11 - Resultados obtidos pelo coeficiente de determinação nas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.



Fonte: Da autora (2018).

A partir da Figura 11, destaca-se a linearidade dos dados das EMC Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá, com representatividade dos dados de 80% e 91% dos dados. A Tabela 12 indica equações de regressão que descrevem o modelo para cada EMC, para estimativa da umidade relativa (%) (y), a partir de dados do MERRA-2 (variável x).

Tabela 12 - Equação de regressão para as EMC's para a variável umidade relativa.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	Merra - 2	$y = 33,6452 + 0,6894 x$
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	Merra - 2	$y = 16,4260 + 0,9914 x$
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	Merra-2	$y = 17,3686 + 0,9087 x$

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 13 apresenta o índice de concordância d de Willmott, calculado a partir dos resultados obtidos para a variável umidade relativa nas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá, considerando variáveis observadas e dados de reanálise Merra-2.

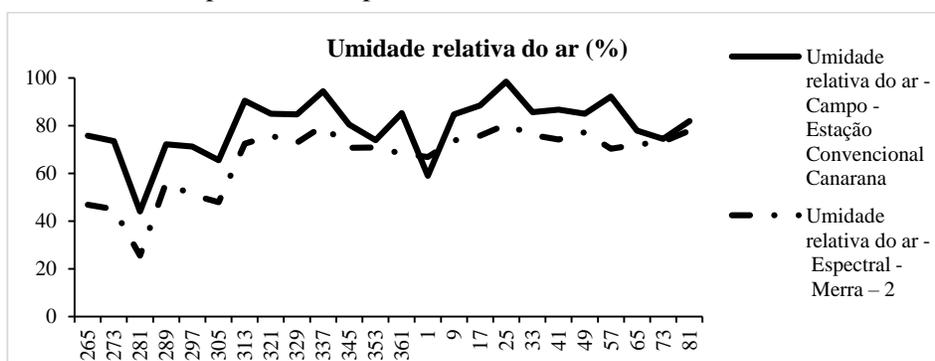
Tabela 13 - Índice de concordância d de Willmott.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	Merra - 2	0,65
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	Merra - 2	0,64
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	Merra - 2	0,66

Fonte: Da autora (2018).

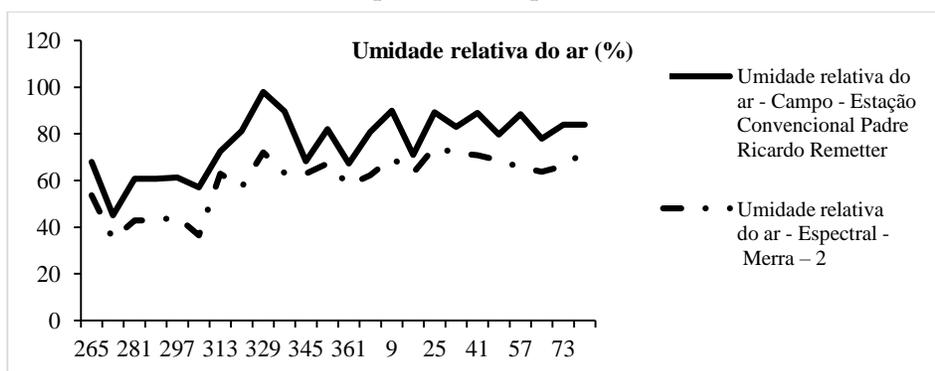
De acordo com os resultados do índice d de Willmot (1985), há uma boa concordância entre os valores preditos e os valores observados, variando entre 0,64 a 0,66. As Figuras 12, 13 e 14 apresentam o comportamento da variável umidade ao longo do período de análise.

Figura 12 - Umidade ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais.



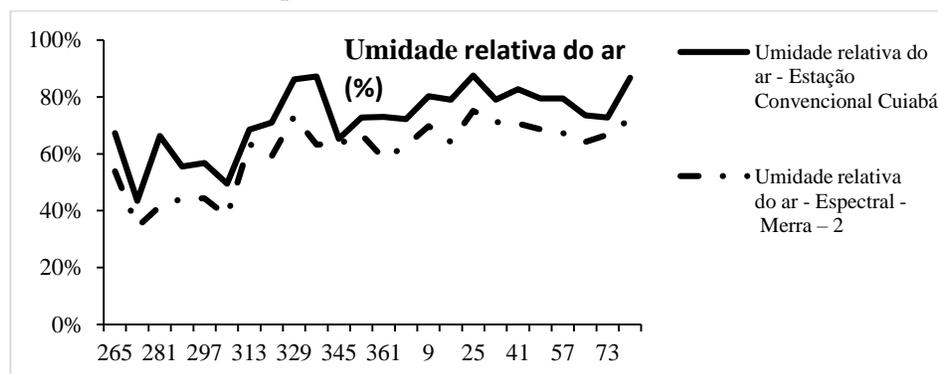
Fonte: Da autora (2018).

Figura 13 - Umidade ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

Figura 14 - Umidade ocorrida na EMC Cuiabá de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

Com exceção ao DJ 1 (1º de janeiro), a umidade relativa do ar, embora com valores de campo e de reanálise diferentes, segue um padrão no período analisado. Na EMC Canarana, considerando dados de campo em comparação aos dados de reanálise, observa-se que há a umidade mínima de 25% e 44% no DJ 273, indicando período seco e uma umidade máxima de 98% e 80% no DJ 25, apontando período com umidade elevada.

Na EMC Padre Ricardo de Remetter, considerando dados de campo em comparação aos dados de reanálise, observa-se que a umidade mínima também ocorre no DJ 273, com de 45% e 34% no DJ 273, e uma umidade máxima de 89% e 74% no DJ 25, assinalando período com umidade elevada. Já na EMC Cuiabá, valores de umidade mínima e máxima ocorrem, nos mesmos DJ que as outras EMC, variando entre 43 e 86% para os dados de campo e 38 e 73% para os dados de reanálise.

Reanálises são baseadas em um método consistente para reprocessar dados observacionais. Apesar disso, a precisão das reanálises é constantemente aprimorada pela assimilação de dados de novos instrumentos e técnicas de

medição que não estavam disponíveis no início do intervalo de tempo dessas reanálises (KEERNIK; JAKOBSON, 2017).

3.4 Insolação

A Tabela 14 apresenta as análises estatísticas dos dados de insolação (número de horas de brilho solar) obtidas por fontes espectrais em comparação aos dados de campo de temperatura alcançados pelas estações meteorológicas convencionais Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.

Dados de campo fornecidos pela EMC Canarana, quando comparados aos dados de insolação estimados por VIS-GOES, apresentaram coeficiente de correlação de Pearson 0,664, sendo classificado como alto, p valor = 0,0004, coeficiente de determinação $R^2= 0,441$ e erro quadrático médio de 2 horas de brilho solar. Após aplicação do filtro Savitzky Golay, houve a diminuição dos coeficientes de correlação ($r=0,5319$) e determinação ($R^2=0,283$), bem como diminuição do erro quadrático médio.

Na EMC Padre Ricardo de Remetter, dados de insolação estimados por VIS-GOES alcançaram bons resultados dos coeficientes de correlação e determinação, com $r= 0,711$ e $R^2= 0,506$, respectivamente, p valor $\leq 0,0001$. O erro quadrático médio foi de 1 hora de brilho solar. Já os dados com filtro Savitzky Golay tiveram uma redução no coeficiente de correlação ($r= 0,244$) e de determinação ($R^2= 0,059$), bem como aumento do erro quadrático médio, quando comparados aos dados não filtrados.

Em relação à EMC Cuiabá, dados de insolação estimados por VIS-GOES obtiveram, para os coeficientes de correlação, $r= 0,669$, classificado como alto, e determinação com $R^2=0,544$ com p valor= $0,006$. O erro quadrático médio foi de 1 hora de brilho solar. Já os dados com filtro Savitzky Golay

tiveram uma redução no coeficiente de correlação e de determinação e aumento do erro quadrático médio, quando comparados aos dados não filtrados.

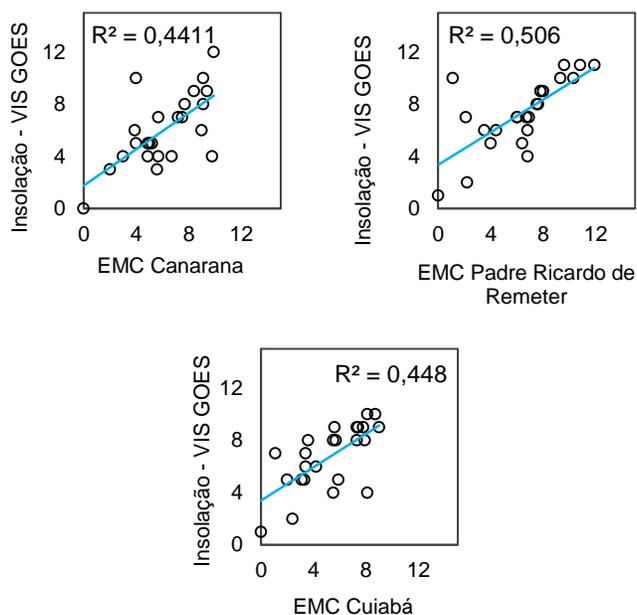
Tabela 14 - Análises estatísticas entre os dados de insolação (número de horas de brilho solar) obtidos por fontes de campo em comparação com dados de insolação obtidas por fontes espectrais.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Coefficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coefficiente de determinação R² (Pearson)
EMC Canarana	VIS-GOES	0,664	0,0004	2,108	0,441
	VIS-GOES - Savitzky Golay	0,5319	0,007	1,717	0,283
EMC Padre Ricardo de Remetter	VIS-GOES	0,711	< 0,0001	1,938	0,506
	VIS-GOES - Savitzky Golay	0,244	0,251	1,916	0,059
EMC Cuiabá	VIS-GOES	0,669	0,0003	1,864	0,448
	VIS-GOES - Savitzky Golay	0,544	0,006	1,780	0,296

Fonte: Da autora (2018).

Dados espectrais estimados pelo VIS-GOES indicados, para representar registros de número de horas de brilho solar nas três estações e que possuíram maior coeficiente de determinação (R²), são ilustrados pela Figura 15.

Figura 15 - Coeficientes de determinação das variáveis indicadas.



Fonte: Da autora (2018).

Ainda que os resultados de coeficiente de determinação (R^2) tenham sido relativamente baixos, variando de $R^2 = 0,44$ a $R^2 = 0,48$ e pela ausência de informações sobre número de horas de brilho solar, em muitas regiões do estado de Mato Grosso, onde medições de insolação são inexistentes, sugere-se utilizar dados espectrais estimados pelo VIS-GOES de acordo com a metodologia proposta por Ceballos (2008).

Tabela 15 - Equação de regressão para as EMC's para a variável insolação (número de horas de brilho solar).

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	VIS-GOES	$y = 1,7609 + 0,6956 x$
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	VIS-GOES	$y = 3,3373 + 0,6248 x$
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	VIS-GOES	$y = 3,4626 + 0,6262 x$

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 16 apresenta o índice de concordância d de Willmott (1985), calculado a partir dos resultados obtidos para a variável insolação nas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá, considerando variáveis observadas e dados espectrais do VIS-GOES.

Tabela 16 - Índice de concordância d de Willmott.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	VIS-GOES	0,99
EMC Padre Ricardo de Remetter (Próxima ao talhão de média produtividade)	VIS-GOES	0,95
EMC Cuiabá (Próxima ao talhão de baixa produtividade)	VIS-GOES	0,89

Fonte: Da autora (2018).

Os resultados obtidos pelo índice d de Willmott demonstram uma concordância alta entre os valores observados e preditos das EMC. As Figuras 16, 17 e 18 apresentam a insolação do período estudado, indicando alta variabilidade entre dias claros e nublados.

Figura 16 - Insolação ocorrida na EMC Canarana de acordo com dados de campo e dados espectrais.

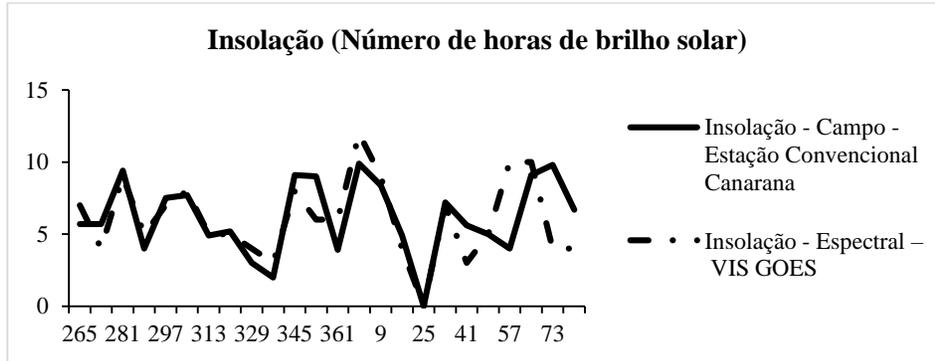


Figura 17 - Insolação ocorrida na EMC Padre Ricardo de Remetter de acordo com dados de campo e dados espectrais.

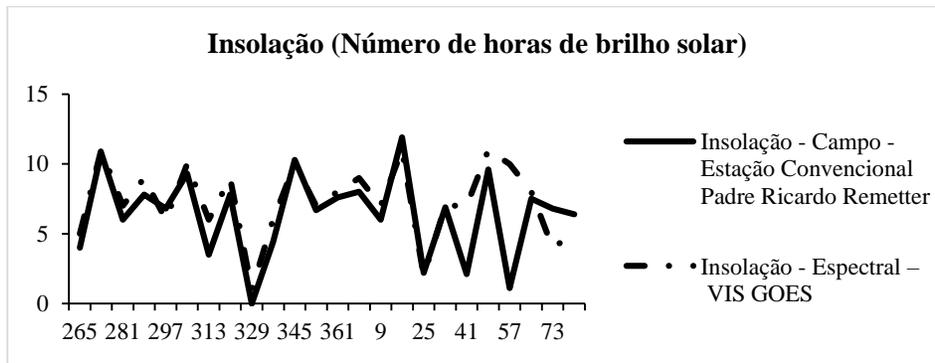
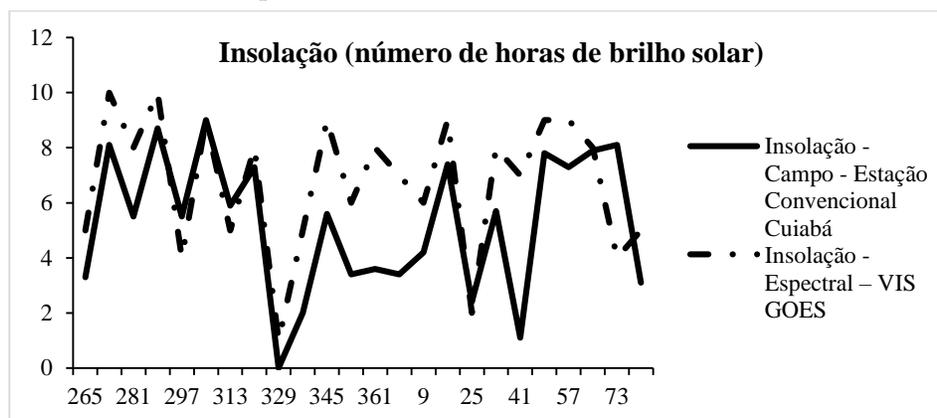


Figura 18 - Insolação ocorrida na EMC Cuiabá de acordo com dados de campo e dados espectrais.



Fonte: Da autora (2018).

As Figuras 16, 17 e 18 apresentam a quantidade de número de horas de brilho solar das EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá. É possível observar que as três EMC variam bruscamente entre dias claros e nublados. Considerando dias com maior número de horas de brilho solar, destacam-se os DJ 1 e 17 e os com menos horas, ou seja, nublados, os DJ 329, 25 e 41.

4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL

A Tabela 17 apresenta análises dos dados de evapotranspiração real, totalizados a cada 8 dias (mm), obtidos por fontes espectrais em comparação aos dados de campo de evapotranspiração real obtidos pelas estações meteorológicas convencionais Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.

Na EMC Canarana, próxima ao talhão de alta produtividade, dados de evapotranspiração real do MOD-16 apresentaram coeficiente de correlação (r) alto (valor=0,612), coeficiente de determinação (R^2) de 0,374 e erro quadrático médio de 0,7 mm a cada 8 dias ($p=0,001$). Ao aplicar o filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação (r) diminuiu para 0,597, ainda sendo classificada como alta correlação, segundo Hopkins (2000), com R^2 de 0,356 e erro quadrático médio de 0,7 mm a cada 8 dias ($p=0,002$).

Para a EMC Padre Ricardo de Remetter, estação próxima ao talhão de média produtividade, dados de evapotranspiração real do MOD-16 apresentaram resultados ligeiramente inferiores, quando comparados aos dados que passaram pelo filtro Savitzky Golay, com coeficientes de correlação 0,252 e 0,290 e determinação R^2 0,063 e 0,084, respectivamente, e $p=0,169$.

Em relação à EMC Cuiabá, dados de evapotranspiração real do MOD-16 demonstraram classificação baixa para o coeficiente de correlação, coeficiente de determinação de 0,074 e erro quadrático médio de 0,9 mm/8 dias. Após a utilização do filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação obtido continuou baixo, o coeficiente de determinação 0,049 e erro quadrático médio de 0,8 mm/8 dias ($p=0,198$).

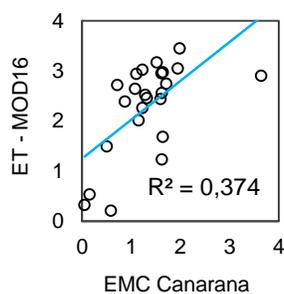
Tabela 17 - Análises estatísticas entre os dados de evapotranspiração (em mm), obtidos por fontes de campo, em comparação com dados de evapotranspiração obtidos por fontes espectrais.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Coefficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coefficiente de determinação R ² (Pearson)
EMC Canarana	MOD 16 - ET	0,612	0,001	0,738	0,374
	MOD 16 - ET - Savitzky Golay	0,597	0,002	0,736	0,356
EMC Padre Ricardo de Remetter	MOD 16 - ET	0,252	0,236	1,013	0,063
	MOD 16 - ET - Savitzky Golay	0,290	0,169	0,954	0,084
EMC Cuiabá	MOD 16 - ET	0,272	0,198	0,940	0,074
	MOD 16 - ET - Savitzky Golay	0,221	0,300	0,872	0,049

Fonte: Da autora (2018).

Os resultados obtidos, a partir da análise de coeficiente de determinação, indicaram que a EMC Canarana não apresentou uma linearidade dos dados.

Figura 19 - Coeficiente de determinação da EMC Canarana.



Fonte: Da autora (2018).

Tabela 18 - Equação de regressão para as EMCCanarana para a variável evapotranspiração real.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MOD16	$y = 1,2463 + 0,7768 x$

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 19 apresenta o índice de concordância d de Willmott calculado, a partir dos resultados obtidos para a variável evapotranspiração real nas EMC Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá, considerando variáveis observadas e dados espectrais do produto MOD16.

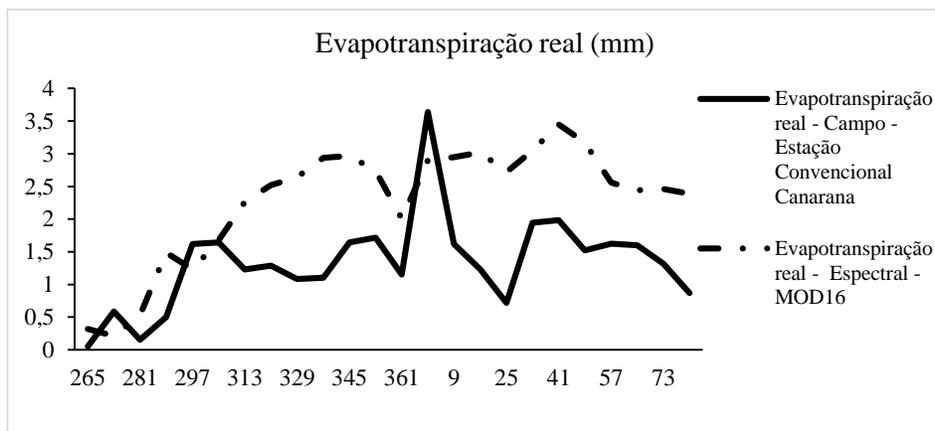
Tabela 19 - Índice de concordância d de Willmott.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MOD16	0,68

Fonte: Da autora (2018).

A Figura 20 ilustra o comportamento da variável evapotranspiração real obtida em campo e pelo sensor MODIS, produto MO16. A Figura 20 corrobora com os resultados estatísticos e apresenta o comportamento da variável Evapotranspiração (ET) de acordo com os dados obtido em campo e pelo produto MOD16.

Figura 20 - Evapotranspiração real segundo dados espectrais e de campo.



Fonte: Da autora (2018).

4.1 Evapotranspiração potencial

A Tabela 20 apresenta análises dos dados de evapotranspiração potencial totalizada, a cada 8 dias (mm), obtidos pelo produto MOD16 em comparação aos dados de campo de evapotranspiração potencial, obtidos pelas estações meteorológicas convencionais Canarana, Padre Ricardo de Remetter e Cuiabá.

Na EMC Canarana, próxima ao talhão de alta produtividade, dados de evapotranspiração potencial do MOD-16 apresentaram coeficiente de correlação (r) alto (valor=0,687), coeficiente de determinação (R^2) de 0,472 e erro quadrático médio de 0,7 mm a cada 8 dias ($p=0,002$). Ao se aplicar o filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação (r) diminuiu para 0,306, ainda sendo classificada como moderada correlação, segundo Hopkins (2000), com R^2 de 0,094 e erro quadrático médio de 0,89 mm a cada 8 dias ($p=0,002$).

Para a EMC Padre Ricardo de Remetter, estação próxima ao talhão de média produtividade, dados de evapotranspiração potencial do MOD-16 apresentaram resultados inferiores, quando comparados aos dados que passaram

pelo filtro Savitzky Golay, com coeficientes de correlação 0,042 e 0,433 e determinação R^2 0,002 e 0,187, respectivamente e $p=0,035$.

Em relação à EMC Cuiabá, dados de evapotranspiração potencial do MOD-16 demonstraram classificação baixa para o coeficiente de correlação, coeficiente de determinação de 0,229 e erro quadrático médio de 0,7 mm/8 dias. Após a utilização do filtro Savitzky Golay, o coeficiente de correlação obtido aumentou ($r=0,368$), o coeficiente de determinação 0,135 e erro quadrático médio de 0,5 mm/8 dias ($p=0,07$).

Tabela 20 - Análises estatísticas entre os dados de evapotranspiração potencial (em mm), obtidos por fontes de campo, em comparação com dados de evapotranspiração potencial obtidos por fontes espectrais.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Coeficiente de correlação r (Pearson)	p-valor (Pearson)	EQM	Coeficiente de determinação R^2 (Pearson)
EMC Canarana	MOD 16 - PET	0,687	0,0002	0,745	0,472
	MOD 16 - PET - Savitzky Golay	0,306	0,145	0,898	0,094
EMC Padre Ricardo de Remetter	MOD 16 - PET	0,042	0,846	0,668	0,002
	MOD 16 - PET - Savitzky Golay	0,433	0,035	0,669	0,187
EMC Cuiabá	MOD 16 - PET	0,229	0,282	0,729	0,052
	MOD 16 - PET - Savitzky Golay	0,368	0,077	0,553	0,135

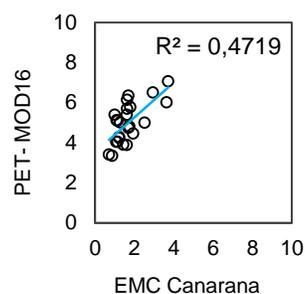
Fonte: Da autora (2018).

Tabela 21 - Equação de regressão para as EMC Canarana para a variável evapotranspiração real.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Equação de regressão
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MOD16	$y = 3,5160 + 0,8726 x$

Fonte: Da autora (2018).

Figura 21 - Coeficiente de determinação da EMC Canarana.



Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 22 apresenta o índice de concordância d de Willmott calculado, a partir dos resultados obtidos para a variável evapotranspiração potencial na EMC Canarana, considerando variáveis observadas e dados espectrais do produto MOD16.

Tabela 22 - Índice de concordância d de Willmott.

Dado de campo	Dado espectral/reanálise	Teste d de Willmott
EMC Canarana (Próxima ao talhão de alta produtividade)	MOD16	0,26

Fonte: Da autora (2018).

5 CONCLUSÃO

A partir deste trabalho, é possível concluir que as variáveis meteorológicas precipitação e insolação (número de horas de brilho solar) podem ser estimadas por imagens de satélite de alta resolução temporal, e a temperatura e a umidade relativa podem ser estimadas por modelos de reanálise, fornecendo dados valiosos e precisos, comparáveis aos dados medidos em campo por estações meteorológicas convencionais em três localidades do Mato Grosso. Os resultados deste trabalho sugerem que a precipitação, uma das variáveis mais importantes em agricultura, pode ser estimada, utilizando dados do produto MERGE 3B42RT do satélite TRMM, com alta concordância entre o conjunto de dados estimados e os reais. As variáveis temperatura e umidade relativa podem ser estimadas, empregando o conjunto de dados de reanálise do MERRA-2, proveniente da NASA. A variável insolação (número de horas de brilho solar) pode ser estimada pelo conjunto de dados espectrais do produto VIS-GOES, do satélite GOES, que apresentou ótima concordância entre os dados, ressaltando que a relação entre esse conjunto de dados não é linear. Por outro lado, as variáveis referentes à evapotranspiração apresentaram uma correlação e concordância menor, quando comparadas às demais. A evapotranspiração real, quando comparada ao produto MOD16, apresentou uma concordância mediana entre os conjuntos de dados estimados e reais, e a evapotranspiração potencial apresentou baixa correlação e concordância. O uso do filtro Savitzky Golay não se mostrou eficiente para essas duas variáveis.

REFERÊNCIAS

AHL, D. E. et al. Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 88-95, Sept. 2006.

AHMED, M. et al. Assessing and improving land surface model outputs over Africa using GRACE, Field, and remote sensing data. **Surveys in Geophysics**, Dordrecht, v. 37, n. 3, p. 529-556, May 2016.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANDERSON, M. C. et al. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: an assessment based on crop yield impacts. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 174, p. 82-99, Mar. 2016.

ARAJI, H. A. et al. Impacts of climate change on soybean production under different treatments of field experiments considering the uncertainty of general circulation models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 205, p. 63-71, June 2018.

ARVOR, D. et al. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. **Applied Geography**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 702-713, Mar. 2012.

BAUP, F.; FIEUZAL, R.; BETBEDER, J. Estimation of soybean yield from assimilated optical and radar data into a simplified agrometeorological model. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2015, Italy. **Proceedings...** Italy: IEEE, 2015. p. 3961-3964.

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

BLUM, M. et al. Estimation of olive grove canopy temperature from MODIS thermal imagery is more accurate than interpolation from meteorological stations. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 176, p. 90-93, July 2013.

BOSILOVICH, M. G.; LUCCHESI, R.; SUAREZ, M. MERRA-2: file specification. Version 1.1. **GMAO Office Note**, Greenbelt, n. 9, p. 1-73, Sept. 2016.

BUCHARD, V. et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: evaluation and case studies. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 17, p. 6851-6872, Sept. 2017.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L. Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., São Paulo. **Anais...** São Paulo: CPTE, 2008. p. 1-6.

CHANG, Y. et al. A modified MOD16 algorithm to estimate evapotranspiration over alpine meadow on the Tibetan Plateau, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 561, p. 16-30, June 2018.

CHAVES, M. et al. A geostatistical approach for modeling soybean crop area and yield based on census and remote sensing data. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 5, p. 680-709, Apr. 2018.

CHEN, Y. et al. A new downscaling-integration framework for high-resolution monthly precipitation estimates: combining rain gauge observations, satellite-derived precipitation data and geographical ancillary data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 214, p. 154-172, Sept. 2018.

_____. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 91, n. 3/4, p.332-344, June 2004.

_____. Impacts of spatial heterogeneity on crop area mapping in Canada using MODIS data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 119, p. 451-461, Sept. 2016.

_____. Research on geographical environment unit division based on the method of natural breaks (Jenks). **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Beijing, v. 40, p. 47-50, Nov. 2013.

COLSTON, J. M. et al. Evaluating meteorological data from weather stations, and from satellites and global models for a multi-site epidemiological study. **Environmental Research**, New York, v. 165, p. 91-109, Aug. 2018.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DRAPER, C. S.; REICHLER, R. H.; KOSTER, R. D. Assessment of MERRA-2 land surface energy flux estimates. **Journal of Climate**, Boston, v. 31, n. 2, p. 671-691, Jan. 2018.

DUAN, Z. et al. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 573, p. 1536-1553, Dec. 2016.

DUBREUIL, V. et al. Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil). **Annales de l'Association Internationale de Climatologie**, France, v. 1, p. 133-156, 2004.

ELGAMAL, A.; REGGIANI, P.; JONOSKI, A. Impact analysis of satellite rainfall products on flow simulations in the Magdalena River Basin, Colombia. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 9, p. 85-103, Feb. 2017.

FERREIRA, E. et al. Validation of incident solar radiation using orbital and surface data in Lavras, Minas Gerais. **Theoretical and Applied Engineering**, Lavras, v. 1, n. 2, p.1-9, dez. 2017.

FOERSTER, S. et al. Crop type mapping using spectral-temporal profiles and phenological information. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 89, p. 30-40, Nov. 2012.

FORD, T. W.; LABOSIER, C. F. Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 247, p. 414-423, Dec. 2017.

GELARO, R. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 14, p. 5419-5454, July 2017.

GIULIANI, G. et al. Live monitoring of earth surface (LiMES): a framework for monitoring environmental changes from Earth Observations. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 202, p. 222-233, Dec. 2017.

GUSSO, A. et al. Spectral model for soybean yield estimate using MODIS/EVI Data. **International Journal of Geosciences**, London, v. 4, n. 9, p. 1233-1241, Nov. 2013.

HOFFMANN, H. et al. Temporal properties of spatially aggregated meteorological time series. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 234/235, p. 247-257, Mar. 2017.

HOPKINS, W. G. **Correlation coefficient**: a new view of statistics. [S.l.: s.n.], 2000. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 15 mar 2018.

HU, G.; JIA, L.; MENENTI, M. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 156, p. 510-526, Jan. 2015.

HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document, version 3**. Greenbelt: NASA Goddard Space Flight Center, 1999. 122 p.

IGBAWUA, T. et al. Assessment of moisture budget over West Africa using MERRA-2's aerological model and satellite data. **Climate Dynamics**, Berlin, p. 1-24, Feb. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, 2018. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normais_climatologicas>. Acesso em: 15 mar. 2018.

JENKS, G. F. "The data model concept in statistical mapping". **International Yearbook of Cartography**, Bonn, v. 7, p. 186-190, 1967.

JURY, M. R. Evaluation of satellite-model proxies for hydro-meteorological services in the upper Zambezi. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 13, p. 91-109, Oct. 2017.

KASTENS, J. H. et al. Soy moratorium impacts on soybean and deforestation dynamics in Mato Grosso, Brazil. **PLoS One**, San Francisco, v. 12, n. 4, p. 1-21, Apr. 2017.

KEERNIK, H.; JAKOBSON, E. Evaluating reanalyses performance in the Baltic Sea region by using assimilated radiosonde data. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 38, n. 4, p. 1820-1832, Sept. 2017.

KRZYSZCZAK, J. et al. Temporal scale influence on multifractal properties of agro-meteorological time series. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 239, p. 223-235, May 2017.

LI, Y. et al. Assimilating remote sensing information into a coupled hydrology-crop growth model to estimate regional maize yield in arid regions. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 291, p. 15-27, Nov. 2014.

LIM, Y.-K. et al. The 2015/16 El Niño event in context of the MERRA-2 reanalysis: a comparison of the Tropical Pacific with 1982/83 and 1997/98. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 13, p. 4819-4842, July 2017.

MACHADO, N. G. et al. Seasonal and interannual pattern of meteorological variables in Cuiabá, Mato Grosso State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 477-488, 2015.

MARIN, F. R.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R. How can crop modeling and plant physiology help to understand the plant responses to climate change? A case study with sugarcane. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, The Netherlands, v. 26, n. 1, p. 49-63, Mar. 2014.

MASSEY, R. et al. MODIS phenology-derived, multi-year distribution of conterminous U.S. croptypes. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 198, p. 490-503, Sept. 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Calibration and testing of an agrometeorological model for the estimation of soybean yields in different Brazilian regions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, n. 3, p. 265-272, Sept. 2014.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, Aug. 2011.

MYNENI, R.; KNYAZIKHIN, Y.; PARK, T. **MOD15A2H MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC**. Sioux Falls: [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD15A2H.006>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

PORFIRIO, A. C. S.; CEBALLOS, J. C. A method for estimating direct normal irradiation from GOES geostationary satellite imagery: validation and application over Northeast Brazil. **Solar Energy**, Kidlington, v. 155, p. 178-190, Oct. 2017.

POWELL, S. W. Successive MJO propagation in MERRA-2 reanalysis. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 44, n. 10, p. 5178-5186, May 2017.

RANDLES, C. A. et al. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: system description and data assimilation evaluation. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 17, p. 6823-6850, Sept. 2017.

REICHLER, R. H. et al. Land surface precipitation in MERRA-2. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 5, p. 1643-1664, Mar. 2017.

RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo agrônômico para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, jan. 2007.

ROZANTE, J. R. et al. Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 6, p. 1-17, June 2018.

_____. Combining TRMM and surface observation of precipitation: technique and validation over South America. **Weather and Forecasting**, Boston, p. 885-894, June 2010.

SAKAMOTO, T. et al. A two-step filtering approach for detecting maize and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 10, p. 2146-2159, Oct. 2010.

SARMIENTO, C. M. Dinâmica fenológica da cultura da soja e sua correlação com variáveis espectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBSR, 2017. p. 7264-7271.

SAVITZKY, A.; GOLAY, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 36, n. 8, p. 1627-1639, July 1964.

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, Mato Grosso, v. 1, n. 1, p. 34-43, out./dez. 2013.

SPANK, U. et al. Effects of measurement uncertainties of meteorological data on estimates of site water balance components. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 492, p. 176-189, June 2013.

TALACUECE, M. et al. Modeling of soybean under present and future climates in Mozambique. **Journal of Climate**, Boston, v. 4, n. 2, p. 31-45, June 2016.

WANG, S. et al. Validation and trend analysis of ECV soil moisture data on cropland in North China Plain during 1981-2010. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 48, p. 110-121, June 2016.

XU, X.; CONRAD, C.; DOKTOR, D. Optimising phenological metrics extraction for different crop types in Germany using the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). **Remote Sensing**, Basel, v. 9, n. 3, p. 254-270, Mar. 2017.

ZHAO, N. et al. Spatio-temporal changes in precipitation over Beijing-Tianjin-Hebei region, China. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 202, p. 156-168, Apr. 2018.

**ARTIGO 2 - MODELO AGROMETEOROLÓGICO ESPECTRAL PARA
ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA EM GRÃOS NO MATO
GROSSO CENTRO-OESTE DO BRASIL**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2003) e formatado de acordo
com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

Utilizou-se, neste estudo, dados espectrais integrados ao modelo agrometeorológico de Doorenbos e Kassam (1979), para desenvolver um modelo agrometeorológico-espectral, para a estimativa da produtividade da soja em grãos, no Estado do Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil, um dos principais produtores de soja do mundo. No modelo desenvolvido, empregaram-se dados espectrais em substituição a dados meteorológicos coletados em campo, visando ao uso dessa metodologia em larga escala. O presente estudo teve como objetivo identificar a melhor fase fenológica da soja para fazer uma estimativa confiável da produção líquida. Para tanto, utilizaram-se os produtos MOD16 (Evapotranspiração real e potencial), MOD 13Q1 (Índice de vegetação da diferença normalizada - NDVI), MOD15A2H (Leaf área index) do satélite MODIS, além de dados de insolação, obtidos pelo canal do visível do satélite GOES IMAGER. Os dados estimados pelo modelo agrometeorológico-espectral foram comparados aos dados coletados em campo de produtividade da safra 2012/13, para 10 talhões de soja das Fazendas Coroados e Vale do Rio Verde, localizadas em aglomerados produtores de soja do Estado do Mato Grosso. De acordo com a metodologia proposta, foi possível acompanhar o desenvolvimento da cultura da soja, ao longo do ciclo, estimar a produção e a produtividade na área de estudo. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo agrometeorológico espectral superestimou a produtividade estimada em 131,54 kg/hectare, o que equivaleu a 2 sacas por hectare.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica. Modelo Agrometeorológico-espectral. Sensoriamento remoto. Agrometeorologia. Safra.

ABSTRACT

Data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) of NASA and products derived from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES IMAGER) integrated with the agrometeorological model of Doorenbos and Kassam (1979) were developed to develop a spectral agrometeorological model for estimation of soybean yield in grains in the state of Mato Grosso, mid-western Brazil, one of the world's leading soy producers. The developed model uses spectral data to replace meteorological data collected in the field, facilitating the use of this methodology on a large scale. In addition, the present study also aimed to identify the best phenological phase of soybean to make a reliable estimate of net yield. In order to do so, the products MOD16 (real and potential evapotranspiration), MOD 13Q1 (normalized difference vegetation index - NDVI) of the MODIS satellite were used, as well as sunshine data, obtained by the visible channel of the GOES IMAGER satellite, Agrometeorological model of Doorenbos and Kassam (1979). The data estimated by the agrometeorological-spectral model were compared to the data collected in the yield field of the 2012/13 harvest for 10 soybean fields of the Coroados and Vale do Rio Verde farms located in agglomerates producing soybeans in the state of Mato Grosso. Based on the proposed methodology, it was possible to follow the development of the soybean crop along the cycle, to estimate yield and productivity in the study area. As well as analyzing the efficiency of the model when compared to the real productivity obtained in the field. The results showed that the spectral agrometeorological model overestimated the estimated productivity at 131.54 kg / ha, which was equivalent to 2 sacks per hectare.

Keywords: Geographic Information System. Remote Sensing. Meteorology. Harvest.

1 INTRODUÇÃO

A soja é uma das principais culturas agrícolas do mundo com uma produção de 351,3 milhões de toneladas, na safra 2016/2017 (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA, 2018), sendo fonte de óleo cru (biodiesel, esterois, óleo refinado), nutrição animal, nutrição humana, proteína isolada dentre outros subprodutos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA., 2013). O Brasil é um dos mais importantes produtores mundiais da soja em grãos, com produtividade superior aos EUA, maior produtor mundial (EMBRAPA, 2013). Dados oficiais da Embrapa, CONAB e do Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária (INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA - IMEA, 2017) demonstram que mais de um quarto da produção brasileira é proveniente do estado do Mato Grosso, o qual é o estado com maior produção da cultura, estimada em 113,923 milhões de toneladas na safra 2016/17 (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2017). Atualmente, a procura de grãos de soja está aumentando constantemente com o crescimento populacional, fazendo necessário um aprimoramento da produção e dos rendimentos de forma sustentável (SENTELHAS et al., 2015). Nesse contexto, a demanda por metodologias que permitam a obtenção de informações de produtividade e do monitoramento da soja em larga escala tem sido um desafio.

As estimativas brasileiras oficiais de produtividade da soja são realizadas ou por meios de métodos subjetivos (GUSSO; ARVOR; DUCATI, 2017), que não permitem uma análise quantitativa de erros envolvidos (RIZZI; RUDORFF, 2007), ou em razão da quebra de rendimento, com base em modelos agrometeorológicos (ROSA et al., 2010) que estudam as interações do clima com a produtividade (CAMARGO et al., 1999), procurando quantificar os

efeitos das variações climáticas sobre o comportamento vegetal (ROBERTSON, 1983).

As relações entre os elementos climáticos e a produção agrícola são bastante complexas, pois os fatores do ambiente podem afetar o crescimento e o desenvolvimento das plantas sob diferentes formas nas fases do ciclo da cultura (CAMARGO; BRUNINI; MIRANDA, 1986). Para melhor entendimento dessas interações, há muitas décadas, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos, para caracterizar os efeitos das variações climáticas sobre o desenvolvimento da produção da soja, como demonstrado por Baier (1973), Berlato e Gonçalves (1978), Camargo, Brunini e Miranda (1986), Doorenbos e Kassam (1979), Fontana et al. (2001), Hoogenboom (2000), Moraes et al. (1998), dentre outros.

Todavia os modelos agrometeorológicos necessitam, na maioria das vezes, de dados meteorológicos coletados em campo, o que dificulta sua utilização em larga escala (BETBEDER; FIEUZAL; BAUP, 2016; GUSSO; ARVOR; DUCATI, 2017; SAKAMOTO; GITELSON; ARKEBAUER, 2013; ZENG et al., 2016). Assim, os parâmetros das culturas dificilmente podem ser estimados em escala regional ou nacional, aproveitando-se apenas os modelos agrometeorológicos. Nesse contexto, ferramentas mais avançadas necessitam ser empregadas para esse (BETBEDER; FIEUZAL; BAUP, 2016).

Uma das técnicas mais promissoras, para serem combinadas com os modelos agrometeorológicos, é o sensoriamento remoto (BETBEDER; FIEUZAL; BAUP, 2016; MELO et al. 2008) e, com os recentes avanços dos satélites, esse método tem se tornado uma alternativa viável, para estimar produção agrícola e monitorar a vegetação (REN et al., 2008), uma vez que fornece uma estimativa oportuna, precisa, sinótica e objetiva de diversos parâmetros de produção diretamente relacionados ao rendimento, como Índice de Área Foliar (IAF), Índices de Vegetação (NDVI, EVI), radiação

fotossinteticamente ativa (fPAR) e Produção Primária Bruta (NPP) (BASTIAANSEN; ALI, 2003).

Portanto tem havido muitos esforços, na aplicação de produtos do sensoriamento remoto à estimativa e previsão da produção das culturas agrícolas, e a maioria desses trabalhos sugerem que a tecnologia de sensoriamento remoto seja promissora (REN et al., 2008), principalmente, quando associada a modelos agrometeorológicos.

Os modelos espectrais têm sido desenvolvidos com sucesso, nos últimos anos (DANG; WANG; WU, 2000; HARTKAMP; WHITE; HOOGENBOOM, 1999; SUGAWARA, 2001) e podem utilizar diretamente índices de vegetação ou combiná-los com um modelo de cultura (CLAVERIE et al., 2012; DUCHEMIN et al., 2008; MOULIN; BONDEAU; DELECOLLE, 1998), para estimar parâmetros da cultura, como a biomassa, teor de água, índice de área foliar ou rendimento de grãos (GUÉRIF; DUKE, 2000; LOBELL et al., 2003; OLIOSO et al., 2005), gerando, assim, os modelos agrometeorológicos-espectrais.

Imagens de alta resolução temporal fornecem informações sobre a dinâmica sazonal, a partir da natureza óptica de uma cultura (ZHONG et al., 2016; ZENG et al., 2016; KING et al. 2017), sendo indicadas para estudos de monitoramento de extensas áreas (ZULLO JUNIOR et a., 2014). O perfil temporal do índice de vegetação do MODIS expressa diferentes ciclos de crescimento, para cada tipo de vegetação e também diferenças fenológicas entre os anos, variando em fase e amplitude temporal (RUDORFF et al., 2010). No caso específico da soja, o conhecimento do comportamento espectral permite a caracterização das diferentes fases de desenvolvimento fenológico (MERCANTE et al. 2012), bem como a aquisição de informações sobre os parâmetros biofísicos, área plantada e produtividade (GUSSO et al. 2013). Além do MODIS, outros produtos de diferentes satélites com alta resolução temporal

podem ser utilizados como dados de entrada de informações espectrais para modelos agrometeorológicos.

Nesse contexto, o presente trabalho se baseia na hipótese de que a integração de dados espectrais de satélites de alta resolução temporal com modelos agrometeorológicos é um método eficiente à estimativa da produtividade da soja em grãos no estado do Mato Grosso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

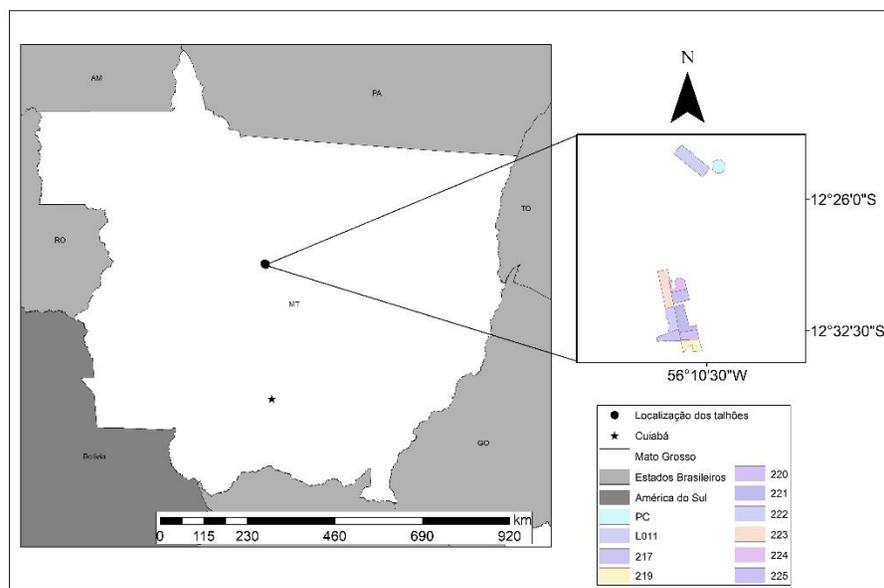
2.1 Dados experimentais

O experimento de campo foi conduzido em aglomerados produtores de soja, no estado do Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil, na safra 2012/2013. O estado do Mato Grosso é localizado na região central do Brasil, com área de, aproximadamente, 903 mil km², possui os biomas cerrado e pantanal (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2015), chapadas e planaltos na região central; planície com presença de pântanos na região Oeste; planaltos residuais ao Norte e depressões ao Sul do estado. Dentre os fatores técnicos que influenciaram a escolha da área, para a coleta de dados da produtividade, destacaram-se: alta tecnologia aplicada às lavouras da região, topografia e apoio de um importante aglomerado produtor de soja do Estado do Mato Grosso.

Neste trabalho, analisou-se o potencial de dados orbitais de alta resolução temporal inseridos no modelo agrometeorológicos, para a estimativa da produtividade da soja e sua relação com a dinâmica fenológica, no período correspondente à safra 2012/2013.

A coleta de dados de produtividade foi realizada para 10 talhões distribuídos pelo estado do Mato Grosso, com uma área total de 1.915,02 hectares, conforme Figura 1.

Figura 1 - Mapa de localização dos talhões área de estudo no estado de Mato Grosso.



Fonte: Da autora (2018).

As condições de manejo da cultura da soja, tais como pré-semeadura, semeadura, condução, colheita, tipo de solo e a cultivar plantada foram definidas e levantadas em cada talhão, a fim de se estabelecer o mesmo critério de análise para os talhões avaliados.

A produtividade real foi obtida por colheita mecanizada, e a soja colhida em cada talhão foi transportada por caminhões até uma balança de grande porte, de forma a determinar o peso líquido dos grãos. Foi realizada a análise do teor de água de cada lote transportado e descontada a umidade dos grãos do peso obtido, padronizando o teor de água a 15%. Dessa forma, obteve-se o rendimento de grãos de soja, produzidos em cada talhão para os aglomerados avaliados, conforme Tabela 1.

As informações de produtividade líquida obtidas em campo por área (em hectares) e variedade de soja, para os dez talhões analisados, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Variedade, Produtividade líquida final e Área (ha) para os 10 talhões selecionados para o desenvolvimento do modelo agrometeorológico-espectral.

Fazenda	Talhão	Variedade	Produção líquida (kg)	Área (hectares)
VRV	1	TMG32RR	553.508,00	146
VRV	2	TMG32RR	1.089.822,00	357
COR	3	TMG32RR	554.763,00	157
COR	4	TMG32RR	479.419,00	149
COR	5	TMG32RR	434.852,00	134
COR	6	TMG32RR	837.983,00	254
COR	7	TMG32RR	526.336,00	184
COR	8	TMG32RR	1.039.132,00	286
COR	9	TMG32RR	404.579,00	123
COR	10	TMG32RR	504.812,00	152

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 2 fornece informações sobre os estádios fenológicos dos talhões de acordo com data de colheita e data de plantio. As informações foram

organizadas e categorizadas, segundo a data do plantio (entre 16/09/2012 e 21/09/2012) e o ciclo da soja, divididos em estádios vegetativos (V) e reprodutivos (R), de acordo com a seguinte escala: semeadura (VE), desenvolvimento vegetativo (V1,...,Vn) e florescimento, enchimento do grão e a maturação (R1 a R8) (adaptado de FEHR; CAVINESS, 1977). Conforme os dados coletados em campo, informações espectrais de satélites de alta resolução temporal foram adquiridas, no período compreendido entre o Dia Juliano (DJ) de semeadura (21/09/2012) e DJ da colheita (17/01/2013), totalizando um ciclo de 120 dias (TABELA 2).

Tabela 2 - Duração (média) dos estádios fenológicos correspondente ao período analisado.

(Continua)

Estádios vegetativos e reprodutivos	Número médio de dias	DJ	Data
Semeadura - VE	10	265	21/09/2012
VE - VC	5	273	29/09/2012
VC - V1	5	281	07/10/2012
V1 - V2	5	289	15/10/2012
V2 - V3	5	297	23/10/2012
V3 - V4	5	305	31/10/2012
V4 - V5	5	313	08/11/2012
V5 - V6	3	321	16/11/2012
Acima de V6	3	329	24/11/2012
R1 - R2	3	337	02/12/2012
R2 - R3	15	345	10/12/2012

Tabela 2 - Duração (média) dos estádios fenológicos correspondente ao período analisado.

(Conclusão)

Estádios vegetativos e reprodutivos	Número médio de dias	DJ	Data
R3 - R4	8	353	18/12/2012
R4 - R5	8	361	26/12/2012
R5 - R6	14	1	01/01/2013
R6 - R7	16	9	09/01/2013
R7 - R8	10	17	17/01/2013

Fonte: Adaptado de Fehr e Caviness (1977).

Ao final desta análise, foram obtidos valores de produção líquida coletada em campo para cada talhão. Para validação e análise da eficiência do modelo, tais valores foram posteriormente comparados com a produtividade estimada pelo modelo.

2.2 Modelo Agrometeorológico

Para a estimativa do rendimento da cultura, foi adotado o modelo desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979), baseado na quantificação de estresse hídrico, por relação entre a evapotranspiração real e evapotranspiração potencial, limitado por um fator de resposta à produtividade (ky).

No modelo de estimativa de previsão de rendimento da cultura da soja, Y_p constitui a produtividade potencial da cultura analisada e Y_{est} é a produção real estimada em condições meteorológicas ótimas, ou seja, sem restrições hídricas e/ou térmicas.

$$Y_{est} = Y_p [1 - k_y (1 - E_{Tr}/E_{Tm})] \quad (1)$$

Em que Y_p = rendimento máximo possível; K_y = fator resposta da produtividade (TABELA 4); E_{Tr} = evapotranspiração real e E_{Tm} = evapotranspiração máxima. A estimativa da produtividade potencial da cultura (Y_p) foi realizada, adotando-se o “Método da Zona Agroecológica” (DOORENBOS; KASSAM, 1994). O método de estimativa da produtividade potencial (Y_p) é expresso pela Equação 2.

$$Y_p = PPB_p \cdot C_{IAF} \cdot C_R \cdot C_C \cdot ND \quad [kg \text{ ha}^{-1}] \quad (2)$$

Em que PPB_p - produção potencial bruta de matéria seca da cultura padrão, C_{IAF} é o coeficiente para a correção do índice de área foliar da cultura, C_R = coeficiente para a correção para a respiração de manutenção da cultura, C_C = correção para a parte efetivamente colhida, ND = número de dias do período analisado.

PPB_p representa a determinação da produção bruta de matéria seca de uma cultura- padrão, considerando dados de insolação, C_{IAF} a correção para o índice de área foliar, considerando a cobertura total do terreno, C_R a correção para a respiração da cultura, segundo sua temperatura, C_C sendo a correção para a parte colhida em que há a relação entre a matéria seca e o rendimento obtido.

Para o C_R , adotou-se o valor de 0,5 para cada DJ, pois, segundo dados de reanálise do Merra -2 (item 2.4 da metodologia), a temperatura média do ar da área de estudo foi superior a 20°C em todos os talhões para o período analisado. O coeficiente de colheita (C_C) adotado foi 0,3 e as umidades residuais ($U\%$) iguais a 8% por se tratar de uma área não irrigada (DOORENBOS; KASSAM, 1994).

O número de dias do ciclo (ND) para a soja foi de 120 dias e o C_{IAF} foi obtido pela Equação 3, segundo metodologia de Battisti et al. (2013). Esse método pressupõe que as exigências hídricas, nutricionais e fitossanitárias da cultura sejam atendidas e que o rendimento seja condicionado apenas pelas características da cultura e pela disponibilidade de radiação solar, fotoperíodo e temperatura do ar.

$$C_{IAF}=(0,0093+0,185*IAF-0,0175*IAF^2) \quad (3)$$

2.3 Dados espectrais

Para a aplicação do modelo agrometeorológico de Doorenbos e Kassam (1979), foram utilizados dados espectrais, para as variáveis de entrada insolação (número de horas de brilho solar), índice de área foliar (IAF), evapotranspiração real e potencial, evitando, assim, coletas de campo por viabilidade econômica e possibilidade de utilização em escalas de menor detalhamento com abrangência de grandes áreas. Nesse sentido, para introduzir o componente espectral, foram aproveitados produtos dos satélites MODIS e GOES IMAGER, conforme descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados espectrais utilizados.

Fonte de dados	Produtos	Especificações	Cena
Terra/sensor MODIS	Evapotranspiração real e evapotranspiração potencial (MOD16)	Resolução Temporal: 8 dias/ Resolução Espacial: 1 km	h12v10
DSA/CPTEC - INPE	Horas de brilho solar (n) obtidos pelo Canal 1 do GOES Imager - 0,55 μm (Insolação (número de horas de brilho solar))	Resolução Diária Resolução Espacial: 4 km	Estado do Mato Grosso
Terra+Aqua sensor MODIS	Índice de vegetação - NDVI (MOD13Q1+MYD13Q1)	Resolução Temporal: 8 dias/ Resolução Espacial: 250 m	h12v10
Terra sensor MODIS	Índice de área foliar (MOD15A2H)	Resolução Temporal: 8 dias/ Resolução Espacial: 1 km	H12v10

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 3 apresenta os produtos Evapotranspiração real e potencial (MOD 16), índice de Área Foliar (MOD15A2H) e Índice de Vegetação (NDVI) (MOD13Q1+MYD13Q1) obtidos por meio do instrumento MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), satélites Terra e Aqua. A composição de 16 dias dos satélites Terra (MOD13Q1) e Aqua (MYD13Q1), sensor MODIS permite uma resolução temporal de 8 dias.

A duração do brilho solar (n), ou insolação, tradicionalmente, é medida por heliógrafos, no entanto, em razão de ausência de informações para todas as áreas, tornou-se necessário utilizar imagens de satélites, para se conseguir dados com alta frequência temporal em locais sem estações automáticas e convencionais. Os dados de horas de brilho solar (n), do satélite GOES Imager, empregados nesse trabalho, foram fornecidos pela Divisão de Satélites Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE), no qual Ceballos e Rodrigues (2008) baseiam-se em imagens de radiação refletida no intervalo visível a partir de imagens do canal VIS do GOES (canal

1, centrado em $0,55\mu\text{m}$). A estimativa adota uma relação linear entre a cobertura local de nuvens C e a refletância R observada no canal VIS do GOES. Adicional à informação do número de horas de brilho solar, foram obtidos os fotoperíodos correspondentes aos talhões analisados por meio do item *Daylength - Time for Sunrise and Sunset - Sun's declination* do Merra-2 (<http://www.soda-pro.com>).

A duração solar relativa é o coeficiente que expressa nebulosidade atmosférica. É o coeficiente da duração real da insolação, n , e a duração máxima possível da insolação da luz do dia N (n/N).

Todas imagens adquiridas foram recortadas, por meio o *shapefile* dos 10 talhões de soja (FIGURA 2), para o intervalo de 8 dias correspondente a cada DJ. As imagens foram reamostradas, valendo-se do algoritmo *nearest neighbor* para padronizar a resolução espacial em 250m. Em seguida, houve a extração de todos os pixels contidos nos talhões, gerando *shapefiles* pontuais, segundo os valores dos pixels das imagens correspondentes aos limites dos talhões. As variáveis referentes à evapotranspiração real e potencial, provenientes do produto MOD16, foram utilizadas no cálculo da penalização da produtividade potencial, decorrente da deficiência hídrica, em substituição às equações propostas para cálculo de Evapotranspiração real e potencial no modelo de Doorenbos e Kassam (1979).

2.4 Dados Meteorológicos Regionais

Dados de temperatura são requeridos para a utilização das equações de Doorenbos e Kassam (1979). A temperatura diária foi adquirida pelos produtos do “*Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications* (MERRA-2) *product*” (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/>), com 30 anos de reanálises gerados pelo GOES 5.2.0 (RIENECKER et al., 2011). Os dados de reanálise MERRA-2 são combinações de medições meteorológicas com um modelo de

previsão numérica (meteorológica), gerados ao utilizar o sistema global de assimilação de dados da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e simulam um ou mais aspectos do sistema terrestre (REICHLÉ et al., 2017). Com esta combinação, obtém-se uma estimativa sintetizada do estado do sistema. Possuem resolução espacial de 0,5° de latitude por 0,67° de longitude e estão disponíveis a cada 3 horas e, diariamente, a partir de 1979. A localização do pixel do MERRA-2 foi identificada, conforme o centroide de cada talhão da área de estudo (FIGURA 2) e, então, os dados foram extraídos em escala diária. De acordo com as análises realizadas no capítulo 1 desta tese, comprovou-se que esses dados podem ser utilizados para substituição da temperatura coletada em campo.

2.5 Modelo Agrometeorológico-Espectral

Para inserir os dados espectrais no modelo agrometeorológico, os valores de PPBp (produção potencial bruta de matéria seca da cultura-padrão) foram obtidas pela soma das produtividades potenciais para período de céu limpo (PPBc) e de céu nublado (PPBn), segundo as Equações 4 e 5, desenvolvidas por Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007). A PPBp foi estimada, para cada 8 dias, segundo a resolução temporal dos dados MODIS ao longo do ciclo.

$$PPBc = [(107,2 + 8,604 * Q_0) * cTc * n / N] \quad (4)$$

$$PPBn = [(31,7 + 5,234 * Q_0) * cTn * (1 - n / N)] \quad (5)$$

Em que: Q_0 é a irradiância solar global extraterrestre em $\text{cal cm}^2 \text{d}^{-1}$, cTc e cTn são fatores de correção para temperatura do ar, para dia de céu claro e

nublado, n é a insolação diária em horas por dia e N é o número de horas máximo de brilho solar diário (fotoperíodo).

Lidando com dados espectrais, o consumo de água pela cultura relaciona-se à evapotranspiração de referência estimada por métodos climatológicos à evapotranspiração máxima das culturas, segundo a Equação 6, de Doorenbos e Kassam, 1979:

$$ET_c = ETo \cdot Kc \quad (6)$$

Em que

ET_c : evapotranspiração da cultura (mm/8 dias)

ETo : evapotranspiração de referência (mm/8 dias)

Kc : coeficiente de cultura

Informações espectrais, referentes ao produto MOD16A2 (MU; ZHAO; RUNNING, 2011) obtido pelo satélite Terra, indicativas da evapotranspiração real e potencial, foram utilizadas para cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c). O coeficiente de cultura - Kc - expressou a relação entre a evapotranspiração máxima da cultura e a evapotranspiração de referência. O valor de k_c e k_y , fator de resposta à produtividade, a ser utilizado seguiu a metodologia de Doorenbos e Kassam (1979), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente de cultura (Kc) e fator de resposta à produtividade (Ky) da soja nos vários estádios de seu desenvolvimento.

Cultura	Estádios de desenvolvimento da cultura				
	I	II	III	IV	V
k_c	0,3-0,4	0,7-0,8	1,1-1,15	0,7-0,8	0,4-0,5
k_y	0,2	0,8	1,00		0,85

Fonte: Da autora (2018).

Na inexistência de informações locais, para a determinação de Kc o qual é um coeficiente imprescindível, que integra diferentes fatores de produção, pôde-se adotar os coeficientes recomendados pela FAO, apresentados na Tabela 4. O Kc varia com a planta, local, clima, práticas culturais, desenvolvimento vegetativo, disponibilidade de água no solo, estágio de desenvolvimento fenológico e condições de cultivo. A FAO apresenta uma relação dos valores de Kc, para as principais culturas, ao longo de seu ciclo (DOORENBOS; KASSAN, 1979; DOORENBOS; PRUITT, 1984), os quais vêm sendo utilizados como diretriz para irrigação, quando não há dados determinados no local de interesse.

2.6 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram calculadas no *software* IBM Statistical Package for the Social Science (SPSS), considerando a produção líquida obtida em campo pelos 10 talhões analisados, em comparação com a produção líquida estimada pelo modelo agrometeorológico espectral.

2.6.1 Regressão linear

Análise de regressão é uma técnica de modelagem utilizada para analisar a relação entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. Esta técnica identifica (estima) uma função que descreve, o mais próximo possível, a relação entre essas variáveis e, assim, poderemos prever o valor que a variável dependente (Y) irá assumir, para um determinado valor da variável independente X.

2.6.2 Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação (r) entre as informações resultantes, no presente trabalho, reflete a eficiência do ajuste dado pela técnica da soma dos quadrados dos desvios, representando a equação de regressão linear em questão. Informações sobre a produção líquida obtida em campo demonstraram padrões de correlação com a produção líquida estimada pelo modelo. Utilizando coeficiente de correlação de Pearson, correlações foram calculadas e classificadas (TABELA 5).

Tabela 5 - Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).

Coeficiente de correlação	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito Alta
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: Adaptado de Hopkins (2000).

Um ajuste perfeito teria coeficiente de regressão igual a 1 e a linha do melhor ajuste coincidiria com o modelo perfeito, isto é, com o coeficiente linear igual a zero e o angular igual a 1. O instrumento de medida da correlação linear é dado pelo coeficiente de correlação de Pearson (EQUAÇÃO 7):

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x) \cdot (\sum y)}{n}}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}} \quad (7)$$

O valor do coeficiente de correlação r sempre deverá estar entre -1 e 1 , cujos dados próximos de 1 ou -1 indicam a correlação linear perfeita. Para a acurácia estatística do modelo, além do coeficiente de determinação (R^2), foram utilizados os seguintes critérios estatísticos: erro quadrado médio (EQM), que mede a discrepância dos dados simulados sobre os observados (JACOVIDES; KONTOYIANNIS, 1995) e o índice de concordância de Willmott.

2.6.3 Índice de concordância de Willmott

O índice de Willmott (d), proposto por Willmott et al. (1985), é determinado pela Equação 8 e estima o grau de concordância entre os conjuntos de dados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (8)$$

em que O_i , $i = 1, 2, \dots, n$, o i -ésimo valor da variável observada, P_i , $i = 1, 2, \dots, n$, o i -ésimo valor da variável predita. Os valores de " d " podem variar de 0 , para nenhuma concordância, a 1 , para uma concordância perfeita.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

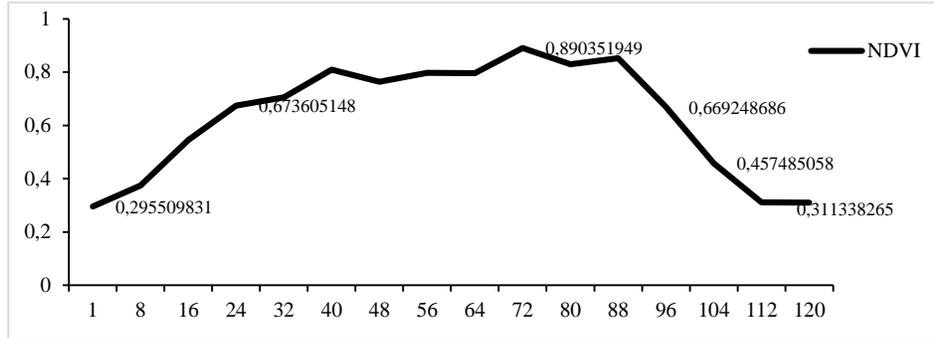
3.1 Análise temporal das variáveis espectrais utilizadas no modelo agrometeorológico espectral

O período definido, para o cálculo da produtividade da soja, compreendeu desde a terceira quinzena de setembro de 2012 até o final de março de 2013, num total de 120 dias. Variáveis espectrais de entrada NDVI, ET, PET, Insolação (número de horas de brilho solar) e temperatura foram analisadas em associação aos estádios de desenvolvimento fenológico da soja.

A Figura 2 mostra a evolução temporal do NDVI médio sobre a soja dos 10 talhões analisados, durante a estação de crescimento, na safra 2012/2013. É possível observar que a variação do NDVI está relacionada com os estágios fenológicos da soja. Baixos valores de NDVI foram observados, no início e no fim do ciclo de desenvolvimento da soja, especificamente, nos meses setembro de 2012 e janeiro de 2013.

Pode-se observar, na Figura 2, o aumento inicial dos valores de NDVI, à época da germinação, aproximadamente 8 dias após o plantio, que a semente absorve 50% do seu volume em água, na fase da emergência (VE). Com 24 dias após o plantio (estádios V1 e V2), o rápido incremento dos valores de NDVI, subindo para 0,67, demonstra a sensibilidade do índice NDVI ao acréscimo da fitomassa (RIZZI; RUDORFF, 2007), na fase inicial do ciclo da cultura. Aos 40 dias após o plantio, nota-se o aumento gradual do NDVI (0,808), em que a quarta folha trifoliolada se encontra completamente desenvolvida (V5). Há uma tendência à estabilização, aos 48 dias após o plantio, nos estádios V4 e V5 da soja. É possível observar na Figura essa estabilização.

Figura 2 - Comportamento espectral do NDVI no período analisado.



Fonte: Da autora (2018).

Os valores máximos de NDVI (0,890) ocorreram 72 dias após o plantio, no estágio reprodutivo R5, em que o NDVI apresentou o acréscimo de fitomassa em estádios fenológicos mais avançados, e o valor mais alto de NDVI coincide com o período de maior desenvolvimento das plantas. Ainda nessa fase, a vagem possuía 3 cm de comprimento em um dos quatro nós superiores da haste principal com folha completamente desenvolvida (FEHR; CAVINESS, 1977), flores quase abertas e planta em sua altura máxima. O decréscimo do NDVI começou aos 88 dias, chegando ao valor mínimo no 112º dia após o plantio, estágio R8 da cultura, com maturação plena. É nessa fase que se expressa a senescência das plantas, com a diminuição da fitomassa verde da soja no final do ciclo.

Resultados semelhantes da curva de NDVI, para monitoramento da cultura da soja, foram encontrados por Breuning (2011), Ephiaphanio e Heute (1995) e Walther-Shea et al. (1997), ao demonstrarem os efeitos do NDVI nas copas e fitomassas mais espessas, com alta correlação ao índice de área foliar (IAF). Conforme o IAF aumenta ou diminui, o NDVI tende a variar na mesma proporção (BREUNING, 2011).

Variações que ocorreram na curva podem estar associadas a fatores meteorológicos referentes à safra, à geometria de iluminação e ao dia selecionado, para a geração da composição 8-dias (produtos MOD13Q1 e MYD13Q1), entre outros fatores.

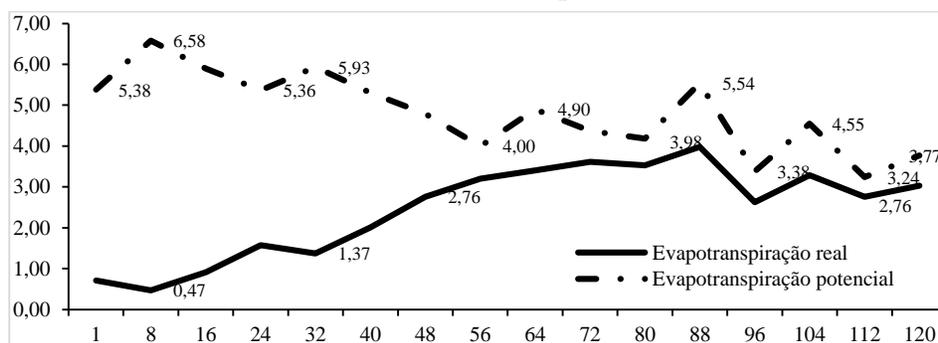
As necessidades hídricas, durante a fase de crescimento vegetativo, são menos importantes, quando comparadas às fases de florescimento e frutificação. Diante disso, como é possível observar, no início da fase de crescimento vegetativo, nota-se que a quantidade média de água evapotranspirada é de 0,47 mm (FIGURA 3).

Excesso ou deficiência hídrica entre a germinação e o florescimento retarda o crescimento vegetativo e prejudica a obtenção de uniformidade na população de plantas (CAMARGO, 2006). A disponibilidade de água é importante, em dois principais períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos, ou seja, há o aumento da necessidade de água, conforme o seu desenvolvimento (SILVA, 2011). A deficiência hídrica, durante o florescimento (R1-R3), reduz o número total de vagens, pois a soja é sensível à carência hídrica (CAMARGO, 1986). Nessa ótica, os estádios de floração e de enchimento de grãos são os de maior consumo de água pela planta, sendo, portanto os mais críticos à deficiência hídrica.

Do início da fase de desenvolvimento vegetativo (V3) ao início do enchimento dos grãos (R5), houve o aumento constante da quantidade de água evapotranspirada pelos dos talhões, como é possível observar entre os dias 32 a 88 pós-data de plantio.

A Figura 3 apresenta os valores de evapotranspiração real (ET) e potencial (PET) ocorridos no período estudado.

Figura 3 - Comportamento espectral médio dos produtos ET e PET (MOD16) para os talhões analisados na safra 2012/2013. No eixo y, valores de ET e PET e no eixo x, ciclo do plantio.

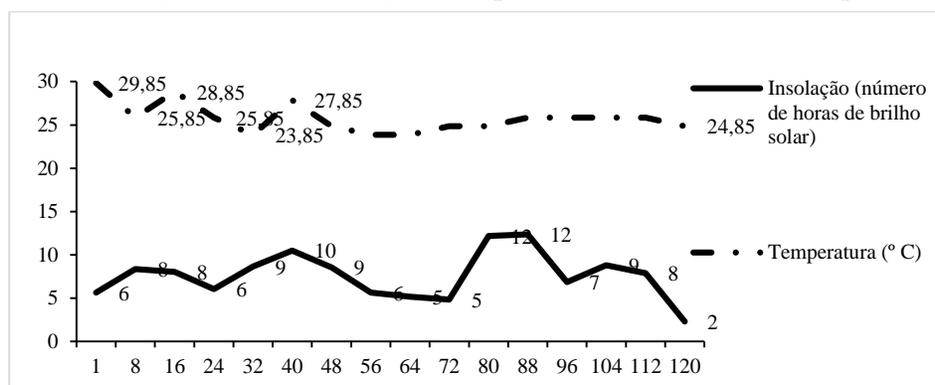


Fonte: Da autora (2018).

A partir da Figura 3, é possível observar que até 56 dias, após a data de plantio, ET e PET apresentaram valores opostos e, em seguida, mantiveram um padrão correspondente. Nota-se, por exemplo, que em 8 dias após o plantio, ET e PET tiveram comportamentos inversos, ou seja, as plantas de soja possuíam um potencial de evapotranspiração superior à evapotranspiração real. Este fato pode ser atribuído às influências meteorológicas, como precipitação e temperatura, fotoperíodo, número de horas de brilho solar, dentre outros fatores que se relacionam diretamente com a radiação incidente na superfície terrestre. A quantidade de água evapotranspirada, durante o ciclo de desenvolvimento fenológico apresentou comportamento favorável à produção de soja para os talhões analisados.

Informações sobre insolação (número de horas de brilho solar) e temperatura (FIGURA 4) são importantes para o desenvolvimento da cultura da soja (RODRIGUES et al., 2001).

Figura 4 - Comportamento espectral médio dos produtos de insolação e temperatura para os talhões analisados na safra 2012/2013. No eixo y, valores de insolação e temperatura e no eixo x, ciclo do plantio.



Fonte: Da autora (2018).

A soja se adapta melhor em regiões cujas temperaturas oscilam entre 20°C e 30°C (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Na soja analisada, a temperatura média mínima foi de 23,8°C e a temperatura média máxima, 29°C, favoráveis ao desenvolvimento da cultura da soja. Os dados de temperatura média diária (°C), fornecidos pelo Merra-2, foram determinantes para a escolha do fator de correção da respiração da planta e foram inseridos no cálculo de produção bruta de matéria seca para cada talhão durante todo o ciclo analisado. Em relação à insolação, o número de horas de brilho solar não seguiu um padrão, variando ao longo do ciclo. O valor máximo de insolação ocorreu entre 80 e 88 dias, após o plantio, nas fases R2 a R5, fases de florescimento e início do enchimento dos grãos.

3.2 Modelo Agrometeorológico espectral

O cálculo do modelo agrometeorológico-espectral foi realizado, empregando imagens de satélite em substituição a variáveis de campo, em que

as imagens usadas foram reamostradas para 250 m de resolução espacial. Considerando a área de abrangência de cada um dos 10 talhões, foram realizados os recortes das imagens e extração dos valores espectrais para cada data (dia juliano). Os valores dos pixels de cada variável de entrada foram inseridos no modelo agrometeorológico espectral. Após o cálculo de produtividade (kg/hectare), para cada pixel inserido nas áreas de abrangência de cada talhão, foram calculadas as médias de produtividade em kg/hectare para cada dia juliano. Após o cálculo de produtividade para cada dia juliano, houve a comparação com os dados de produtividade real obtidos em campo. A Tabela 6 apresenta a produção (kg) e produtividade líquida final (kg/hectare) e estimadas pelo modelo agrometeorológico espectral.

Tabela 6 - Produção e produtividade líquida final e estimada (kg/hectare) para os 10 talhões.

Talhão	Produção líquida real (kg)	Produção líquida modelo (kg)	Prod. Real (kg/ha)	Prod. Modelo (kg/ha)	DJ	Dias após o plantio
1	553.508,00	508.434,94	3.791,15	3.482,43	9	112
2	1.089.822,00	1.071.750,55	3.052,72	3.002,10	361	96
3	554.763,00	525.084,582	3.533,52	3.344,48	9	112
4	479.419,00	450.597,73	3.217,57	3.024,14	1	104
5	434.852,00	438.424,39	3.245,16	3.271,82	9	112
6	837.983,00	853.113,9	3299,14	3358,71	9	112
7	526.336,00	513.238,4	2.860,52	2.789,33	361	96
8	1.039.132,00	989.488,80	3633,32	3459,75	9	112
9	404.579,00	421.616,1	3289,26	3427,773	9	112
10	504.812,00	515.251,3	3321,132	3389,811	9	112

Fonte: Da autora (2018).

A Tabela 6 apresenta a produção e a produtividade obtidas em campo e estimadas pelo modelo para cada um dos 10 talhões analisados. É possível observar que o Talhão 1 alcançou a maior diferença estimada entre os 10 talhões, com uma superestimativa de 308 kg/hectare. No entanto o talhão que pontuou menor diferença na estimativa de produtividade, segundo o modelo proposto neste trabalho, foi o Talhão 5, com 26,66 kg/hectare a mais em relação à produtividade obtida em campo. Com o modelo agrônômico espectral, Rizzi e Rudorff (2007) pontuaram bons resultados na estimativa de produtividade, manuseando imagens MODIS, com uma diferença de estimativa variando entre 1 a 228 kg ha⁻¹ entre as safras 2000/2001, 2001/2002 e 2002/2003. Ao empregar o modelo agrometeorológico espectral integrado a um Sistema de Informação Geográfica, para a estimativa da produtividade de soja, Berka et al. (2003) apuraram resultados superestimados com 284 kg ha⁻¹ a mais.

A Tabela 7 apresenta análises estatísticas dos resultados obtidos em campo e pelo modelo agrometeorológico espectral.

Tabela 7 - Rendimento e análises estatísticas dos resultados de produção e produtividade obtidos em campo em comparação com os resultados do Modelo Agrometeorológico Espectral, em 10 talhões de soja no Mato Grosso, safras de 2012/2013.

Rendimento e informações estatísticas	Produção líquida (kg)	Produtividade (kg ha⁻¹)
Campo	6.425.206	3.308,55
Modelo Agrometeorológico Espectral	6.287.000	3.237,38
Coefficiente de correlação (r)	0,99	0,84
p valor	p<0,0001	p=0,0019
Coefficiente de determinação (R ²)	0,991	0,7202
EQM (Erro Quadrático Médio)	24.634,36	131,54
Teste d de Willmott	0,99	0,96

Fonte: Da autora (2018).

De acordo com a Tabela 7, identifica-se que os resultados calculados e estimados pelo modelo apresentaram um coeficiente de correlação classificado como muito alto para a produção líquida ($r=0,99$) e produtividade ($r=0,84$), com coeficiente de determinação de $R^2=0,99$ e $R^2= 0,72$ para produção ($p< 0,0001$) e produtividade ($p=0,0019$), respectivamente. Verifica-se que a produção e a produtividade obtidas em campo e estimadas pelo modelo apresentam concordância, o que corrobora com o índice d de Willmott, apresentado na Tabela 7, com $0,99$ para a produção líquida e $0,96$ para a produtividade. O erro associado à produção foi de $24.634,36$ kg para uma área de 1.942 hectare. Considerando que os 10 talhões possuem diferentes áreas, a produtividade em kg/hectare foi calculada individualmente. Dessa forma, após o cálculo da produtividade de cada talhão, o erro obtido foi de 131 kg/hectare, ou seja, $2,18$ sacas de soja (60 kg) por hectare.

Gusso, Arvor e Ducati (2017) estimaram a produção de soja no Mato Grosso, em 2005 e 2006, utilizando EVI do MODIS e reportaram coeficientes de determinação que variaram entre $0,91$ e $0,98$, com resultado global de $R^2=0,96$ ($p\leq 0,01$). O modelo acoplado, utilizado pelos autores, ajustou às estatísticas oficiais. No nível local, os dados espacialmente distribuídos foram comparados a dados de produção de 422 lavouras. O coeficiente de determinação ($R^2=0,87$) confirmou a confiabilidade do EVI, para ser aplicado em modelos baseados em sensoriamento remoto, para a previsão da produção de soja.

4 CONCLUSÃO

As projeções e monitoramento das culturas agrícolas em campo, por meios objetivos e diretos, continuam sendo um desafio. O presente trabalho contribuiu a esse desafio, propondo uma metodologia capaz de monitorar o desenvolvimento e quantificar a produção e produtividade de soja em locais do estado do Mato Grosso. As análises do perfil do índice de vegetação NDVI se mostraram capazes de identificar e monitorar as fases fenológicas do ciclo e, se o desenvolvimento da cultura ocorre dentro do esperado, quanto à produção de fitomassa. As análises do perfil de evapotranspiração se mostraram eficientes, para monitorar as necessidades hídricas da cultura, ao longo do ciclo, fornecendo informações para dados de restrição hídrica, importantes no cálculo da produtividade final. O modelo agrometeorológico espectral, baseado na metodologia de Dorembos e Kassam (1979) e desenvolvido com o auxílio dados espectrais e do modelo Merra-2, em substituição a variáveis de campo, mostrou-se eficiente para a estimativa da produção líquida (kg) e produtividade (kg há⁻¹) da soja. As análises estatísticas sugerem que as variáveis estimadas pelo modelo agrometeorológico espectral tenham alto grau de concordância com a variável coletada em campo. Para a área de estudo, o erro da estimativa do modelo agrometeorológico espectral foi baixo, de 2,18 sacas de soja por hectare. Assim, conclui-se que, para a área de estudo, a metodologia aqui proposta é consistente e objetiva para a estimativa da produção e produtividade da cultura da soja.

REFERÊNCIAS

- ARVOR, D. et al. Analyzing the agricultural transition in Mato Grosso, Brazil, using satellite-derived indices. **Applied Geography**, Oxford, v. 32, n. 2, p. 702-713, Mar. 2012.
- BAIER, W. Crop-weather analysis model: review and model development. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 12, p. 937-947, 1973.
- BASTIAANSEN, W. G. M.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Oxford, v. 94, n. 3, p. 321-340, Mar. 2003.
- BATTISTI, R. et al. Eficiência climática para as culturas da soja e do trigo no estado do Rio Grande do Sul em diferentes datas de semeadura. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 3, p. 390-396, mar. 2013.
- BERKA, L. M. S.; RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E. Soybean yield estimation by an agrometeorological model in a GIS. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 3, p. 433-440, 2003.
- BERLATO, M. A.; GONÇALVES, H. M. Relação entre o índice hídrico P/ETP e rendimento da soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 227-233, 1978.
- BETBEDER, J.; FIEUZAL, R.; BAUP, F. Assimilation of LAI and dry biomass data from optical and SAR images into an agro-meteorological model to estimate Soybean Yield. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, New York, v. 9, n. 6, p. 2540-2553, June 2016.
- BREUNIG, F. M. **Influência da geometria de aquisição sobre índices de vegetação e estimativas de IAF com dados MODIS, Hyperion e simulações PROSAIL para a soja**. 2011. 210 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
- CAMARGO, M. B. P. de et al. Modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade para o cultivar de laranja Valência. **Bragantia**, Campinas, v. 58, n. 1, p. 171-178, 1999.

CAMARGO, M. B. P. de; BRUNINI, O.; MIRANDA, M. A. C. de. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 45, n. 2, p. 279-292, 1986.

CAMARGO, M. B. P. Relações entre produtividade e exigências bioclimáticas da Soja. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 67-69, 2006.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L. Estimativa de insolação mediante satélite geoestacionário: resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: INPE, 2008. 1 CD-ROM.

CLAVERIE, M. et al. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 124, p. 844-857, Sept. 2012.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB.
Acompanhamento da safra brasileira: café: volume 4. Monitoramento agrícola - Safra 2017. Brasília: Conab, 2017. 98 p.

_____. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos:** volume 8 - Safra 2015/16 - Oitavo levantamento. Brasília: Conab, 2016. 178 p.

DANG, A.; WANG, X.; WU, H. GIS based study on the potential grain productivity of China. In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 2000, Honolulu. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Publications, 2000. 1 CD-ROM.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeitos da água no rendimento das culturas**. Roma: FAO, 1994. 212 p. (Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1984. 144 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DUBREUIL, V. et al. Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil). **Annales de l'Association Internationale de Climatologie**, France, v. 1, p. 133-156, 2004.

DUCHEMIN, B. et al. A simple algorithm for yield estimates: evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v. 23, n. 7, p. 876-892, July 2008.

EDRO JUNIOR, M. J. et al. Teste de modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade da cultura da soja de ciclo precoce. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1984. p. 11-17.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: região Central do Brasil 2014**. Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265 p.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun sensor geometry and its effect on fapar relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 51, n. 3, p. 351-360, Mar. 1995.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 8 p. (Circular Técnica, 48).

FEHR, W. R. et al. Stages Df Soybean üevelcprnent. **Special Report**, Ames, n. 80, p. 1-12, Mar. 1977.

FONTANA, D. C. et al. Modelo de estimativa de rendimento de soja no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 399-403, mar. 2001.

GUÉRIF, M.; DUKE, C. I. Adjustment procedures of a crop model to the site specific characteristics of soil and crop using remote sensing data assimilation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, New York, v. 81, n. 1, p. 57-69, Oct. 2000.

GUSSO, A. et al. Spectral model for soybean yield estimate using MODIS/EVI Data. **International Journal of Geosciences**, London, v. 4, n. 9, p. 1233-1241, Nov. 2013.

GUSSO, A.; ARVOR, D.; DUCATI, J. R. Model for soybean production forecast based on prevailing physical conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n. 2, p. 95-103, fev. 2017.

HARTKAMP, A. D.; WHITE, J. W.; HOOGENBOOM, G. Interfacing geographic information systems with agronomic modelings: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 5, p. 761-772, Sept. 1999.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 1/2, p. 137-157, June 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 11, p. 1-85, nov. 2015.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA - IMEA. 2ª **Estimativa da Safra de Soja - 2017/18**. Cuiabá: IMEZ, 2017. 2 p. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/06112017165315.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 27, n. 3/4, p. 365-371, July 1995.

KING, L. A. et al. A multi-resolution approach to national-scale cultivated area estimation of soybean. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 195, p. 13-29, June 2017.

LOBELL, D. B. et al. Remote sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, New York, v. 94, n. 2, p. 205-220, Feb. 2003.

MELO, R. W. et al. An agrometeorological-spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 29, n. 14, p. 4013-4028, July 2008.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.

MERCANTE, E. et al. Detection of soybean planted areas through orbital images based on culture spectral dynamics. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 5, p. 920-931, out. 2012.

- MORAES, A. V. C. et al. Teste e análise de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade para a cultura da soja na região de Ribeirão Preto. **Bragantia**, Campinas, v. 57, n. 2, p. 393-406, 1998.
- MOULIN, S.; BONDEAU, A.; DELECOLLE, R. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scales. **International Journal of Remote Sensing**, Basingstoke, v. 19, n. 6, p. 1021-1036, Jan. 1998.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, Aug. 2011.
- OLIOSO, A. et al. Future directions for advanced evapotranspiration modeling: Assimilation of remote sensing data into crop simulation models and SVAT models. **Irrigation and Drainage Systems, Essex**, v. 19, n. 3/4, p. 377-412, Nov. 2005.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: ESALQ, 2007. 192 p. 1 apostila.
- REICHLER, R. H. et al. Land surface precipitation in MERRA-2. **Journal of Climate**, Boston, v. 30, n. 5, p. 1643-1664, Mar. 2017.
- REN, J. et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Enschede, v. 10, n. 4, p. 403-413, Dec. 2008.
- RIENECKER, M. M. et al. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. **Journal of Climate**, Boston, v. 24, n. 14, p. 3624-3648, July 2011.
- RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T. Imagens do sensor MODIS associadas a um modelo para estimar a produtividade de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 1, p. 73-80, jan. 2007.
- ROBERTSON, G. W. **Guidelines on crop-weather models**. Geneve: World Meteorological Organization, 1983. 115 p.
- RODRIGUES, O. et al. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 431-437, mar. 2001.

ROSA, V. G. C. da et al. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 12, p. 1478-1488, dez. 2010.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

RUDORFF, B. F. T.; SHIMABUKURO, Y. E.; CEBALLOS, J. C. (Coord.). **Sensor MODIS e suas aplicações ambientais no Brasil**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 425 p.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A. A.; ARKEBAUER, T. J. MODIS-based corn grain yield estimation model incorporating crop phenology information. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 131, p. 215-231, Apr. 2013.

SENTELHAS, P. C. et al. The soybean yield gap in Brazil - magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **The Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 153, n. 8, p. 1394-1411, Nov. 2015.

SILVA, D. F. da. **Uso de modelos agrometeorológicos de estimativa de produtividade e de risco climático para a soja no vale do médio Paranapanema - SP**. 2011. 95 p. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Agroambientais) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2011.

SUGAWARA, L. M. **Avaliação de modelo agrometeorológico e imagens NOAA/AVHRR no acompanhamento e estimativa de produtividade da soja no Estado do Paraná**. 2001. 181 p. Dissertação ((Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. World Agricultural Production. **Foreign Agricultural Service/USDA**, Washington, p. 1-29, Nov. 2018. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2018.

WALTER-SHEA, E. A. et al. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in Alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 1, p.162-177, July 1997.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

ZENG, L. et al. A hybrid approach for detecting corn and soybean phenology with time-series MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 181, p. 237-250, Aug. 2016.

ZHONG, L. et al. Automated mapping of soybean and corn using phenology. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 119, p. 151-164, Sept. 2016.

ZULLO JUNIOR, J. et al. Multi-resolution in remote sensing for agricultural monitoring: a review. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n. 66/7, p. 1517-1529, dez. 2014.