



**FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA POR DADOS  
ORBITAIS PARA O ESTADO DE MINAS  
GERAIS**

**LAVRAS - MG**

**2017**

**FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA POR DADOS ORBITAIS PARA O  
ESTADO DE MINAS GERAIS**

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 Doutor.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato  
Orientador

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

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

Conceição, Fagner Goes da.

Evapotranspiração obtida por dados orbitais para o estado de Minas Gerais / Fagner Goes da Conceição. - 2016.

122 p.

Orientador: Carlos Eduardo Silva Volpato.

Coorientador: Marcelo de Carvalho Alves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. Evapotranspiração de referência. 2. Sensoriamento remoto. 3. Satélite meteorológico. I. Volpato, Carlos Eduardo Silva. II. Alves, Marcelo de Carvalho. III. Título.

**FAGNER GOES DA CONCEIÇÃO**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO OBTIDA POR DADOS ORBITAIS PARA O  
ESTADO DE MINAS GERAIS**

***EVAPOTRANSPIRATION OBTAINED BY ORBITAL DATA FOR THE  
STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL***

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 Doutor.

APROVADA em 28 de dezembro de 2016.

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho	UFLA
Prof. Dr. Pedro Castro Neto	UFLA
Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato	EPAMIG

Prof. Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato  
Orientador

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2017**

Aos meus pais,  
Maria de Lourdes e Francisco José (*in memoriam*)  
DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia (DEG) e ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), pela estrutura disponibilizada para a realização do Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos, bem como à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelos recursos disponibilizados à UFLA.

Aos professores Dr. Carlos Eduardo Silva Volpato e Dr. Marcelo de Carvalho Alves, pela orientação e apoio necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do DEG, pela convivência e auxílio ao longo do curso.

À pesquisadora Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato e aos professores Dr. Luiz Gonsaga Carvalho e Dr. Pedro Castro Neto, por se disporem a participar como membros da banca examinadora.

Ao amigo Lucas Alves da Silva, pela paciente convivência e sempre solícita dedicação.

A todos os meus colegas da Pós-graduação, em especial aos meus amigos e companheiros de sala Murilo Machado, João Paulo Barreto, Vanessa Figueiredo e Delorme Correa, pelos momentos de trabalho e descontração.

A Cristiane Paloschi, por todo amor, companheirismo, incentivo e doação a todo instante.

“Por vezes, sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

*Madre Tereza de Calcutá*

## RESUMO

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do ciclo hidrológico e pode ser determinada por meio do uso de lisímetros, via balanço hídrico ou, ainda, por métodos empíricos de estimativa que utilizam dados meteorológicos de superfície. A utilização de dados de sensoriamento remoto desponta como alternativa para a estimativa de ET em escala regional. Nesse contexto, objetivou-se analisar a incerteza de produtos orbitais de evapotranspiração para o Estado de Minas Gerais, durante o ano de 2014, por estações meteorológicas de superfície. Os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 foram comparados com estimativas de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) calculadas com dados de superfície de 35 estações meteorológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e entre si. Para a avaliação do desempenho estatístico foram considerados: o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro médio absoluto (EMA), erro médio percentual (EMP) e a raiz do erro quadrático médio (REQM). Em todas as comparações, observou-se correlação linear forte, sendo que as estações de Governador Valadares ( $r = 0,78$ ), Lavras e Juiz de Fora ( $r = 0,80$ ) e São Romão ( $r = 0,85$ ) foram as estações que obtiveram os maiores valores de  $r$ . Ademais, tanto o produto DMET quanto o MOD16 superestimaram os valores de evapotranspiração ao longo do período analisado.

**Palavras-chave:** Evapotranspiração de referência. Sensoriamento remoto. Satélite meteorológico.

## ABSTRACT

Evapotranspiration (ET) is one of the main components of the hydrological cycle and can be determined with the use of lysimeters, via water balance, or by empirical estimation methods that use surface weather data. The use of remote sensing data is prominent as alternative for estimating ET in regional scale. In this context, the objective of this work was to analyze the uncertainties of orbital products of evapotranspiration for the state of Minas Gerais, Brazil, during the year of 2014, using surface weather stations. The evapotranspiration products DMET and MOD16 were compared, with reference evapotranspiration estimates (ET<sub>o</sub>) calculated using the surface data of 35 meteorological stations of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) network, and among each other. To evaluate the statistical performance, we considered: the Pearson correlation coefficient ( $r$ ), mean absolute error (MAE), mean percentage error (MPE) and root mean square error (RMSE). A strong linear correlation was verified in all comparisons, with the stations at Governador Valadares ( $r = 0.78$ ), Lavras and Juiz de Fora ( $r = 0.80$ ) and São Romão ( $r = 0.85$ ) presenting the highest values for  $r$ . Furthermore, both the DMET and MOD16 products overestimated the evapotranspiration values along the analyzed period.

**Keywords:** Reference evapotranspiration. Remote sensing. Meteorological satellite.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Imagem capturada pelo satélite Meteosat 11 no espectro visível. ....	33
Figura 2 – Grade global do sensor MODIS na projeção Sinusoidal. ....	36
Figura 3 – Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas em Minas Gerais.....	39
Figura 4 – Fluxograma da metodologia adotada para estimativa e comparação da evapotranspiração (ET).....	41
Figura 5 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014. ....	54
Figura 6 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014.....	55
Figura 7 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014.....	56
Figura 8 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014.....	57
Figura 9 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014.....	58

Figura 10 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014. ....	59
Figura 11 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014. ....	60
Figura 12 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014. ....	61
Figura 13 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014. ....	62
Figura 14 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014. ....	63
Figura 15 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014. ....	64
Figura 16 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014. ....	65
Figura 17 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014. ....	69
Figura 18 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014. ....	70

Figura 19 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014.....	71
Figura 20 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014. ....	72
Figura 21 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014. ....	73
Figura 22 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014. ....	74
Figura 23 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014. ....	75
Figura 24 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014. ....	76
Figura 25 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014. ....	77
Figura 26 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014. ....	78

Figura 27 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014. ....	79
Figura 28 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014. ....	80
Figura 29 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014. ....	84
Figura 30 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014. ....	85
Figura 31 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014. ....	86
Figura 32 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014. ....	87
Figura 33 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014. ....	88
Figura 34 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014. ....	89
Figura 35 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014. ....	90

Figura 36 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014. ....	91
Figura 37 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014. ....	92
Figura 38 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014. ....	93
Figura 39 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014. ....	94
Figura 40 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014. ....	95
Figura 41 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014. ....	99
Figura 42 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014. ....	100
Figura 43 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis, durante o ano de 2014. ....	101
Figura 44 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014. ....	102

Figura 45 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014. ...	103
Figura 46 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014. ....	104
Figura 47 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014.....	105
Figura 48 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014. ....	106
Figura 49 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014. ....	107
Figura 50 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014.....	108
Figura 51 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014. ....	109
Figura 52 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014. ....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização das estações meteorológicas utilizadas. ....	42
Tabela 2 – Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).....	51
Tabela 3 – Avaliação do desempenho estatístico das evapotranspirações do produto DMET e da rede do INMET.....	66
Tabela 4 – Avaliação do desempenho estatístico das evapotranspirações do produto MOD16 e da rede do INMET.....	81
Tabela 5 – Análise do desempenho estatístico das evapotranspirações dos produtos DMET e MOD16. ....	96

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>Evapotranspiração</b> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência</b> .....	22
<b>2.3</b>	<b>Uso do sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração</b> .....	29
<b>2.4</b>	<b>Os satélites Meteosat e o sensor SEVIRI</b> .....	32
<b>2.5</b>	<b>O sensor MODIS</b> .....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	39
<b>3.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b> .....	39
<b>3.2</b>	<b>Fluxograma das etapas</b> .....	40
<b>3.3</b>	<b>Descrição dos dados</b> .....	41
<b>3.3.1</b>	<b>Dados da superfície terrestre por estações meteorológicas</b> .....	42
<b>3.3.2</b>	<b>Dados de superfície terrestre por satélites</b> .....	44
<b>3.3.2.1</b>	<b>O produto de evapotranspiração do sensor SEVIRI</b> .....	44
<b>3.3.2.2</b>	<b>O produto de evapotranspiração do sensor MODIS</b> .....	45
<b>3.3.3</b>	<b>Manipulação dos dados orbitais</b> .....	48
<b>3.3.3.1</b>	<b>Evapotranspiração do produto DMET</b> .....	48
<b>3.3.3.2</b>	<b>Evapotranspiração do produto MOD16</b> .....	49
<b>3.3.4</b>	<b>Comparação e análise dos resultados obtidos</b> .....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
<b>4.1</b>	<b>Comparação do produto de evapotranspiração (ET) DMET com as estações meteorológicas do INMET</b> .....	53
<b>4.2</b>	<b>Comparação do produto de evapotranspiração (ET) MOD16 com as estações meteorológicas do INMET</b> .....	68
<b>4.3</b>	<b>Comparação dos produtos de evapotranspiração (ET) DMET e MOD16</b> .....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	113
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	115

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo de elementos climáticos é indispensável para o planejamento das atividades agrícolas, pois o clima é um dos fatores determinantes para a produção das lavouras. Nesse contexto, o monitoramento agrometeorológico torna-se essencial para a compreensão da ação dos fenômenos meteorológicos e seus impactos nos sistemas agrícolas, auxiliando assim o processo de tomada de decisões.

Pesquisas relacionadas às mudanças climáticas são cada vez mais necessárias, sendo nesses estudos comprovada a importância de variáveis climatológicas, a exemplo da temperatura, utilizada em modelos ambientais baseados no fluxo de energia na superfície terrestre. A determinação dessa variável é também fundamental na análise da cobertura do solo e nos estudos de monitoramento climático e agrometeorológico, estando diretamente envolvida nos processos de troca de energia entre a superfície terrestre e a atmosfera.

A evapotranspiração (ET) pode ser considerada parâmetro essencial no processo de estimativa da necessidade hídrica de culturas agrícolas, de modo que o seu conhecimento serve de subsídio para o manejo correto da irrigação, contribuindo assim para o uso sustentável dos recursos hídricos, além de proporcionar redução nos custos de produção. A ET pode ser determinada por meio do uso de lisímetros, via balanço hídrico ou, ainda, por métodos empíricos de estimativa que utilizam dados meteorológicos. A escolha do método a ser utilizado dá-se, em especial, pelas condições climáticas locais, praticidade e precisão. Dos métodos existentes para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em escala diária, o método combinado Penman-Monteith-FAO, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) e que adota o conceito de uma cultura hipotética, é considerado o método padrão. A ET<sub>o</sub> é uma referência para a determinação da evapotranspiração de uma cultura qualquer, desde que seja ajustada pelo coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>).

Os dados meteorológicos necessários para a estimativa da ETo são mensurados por meio de estações meteorológicas de superfície automáticas ou convencionais, imprescindíveis para o estudo das variáveis que impulsionam o sistema Terra-Atmosfera determinante para o tempo e o clima. No Brasil, as estações meteorológicas de superfície ainda são em número insuficiente e estão espacialmente distribuídas de maneira inadequada, restringindo-se ao fornecimento de dados pontuais que desconsideram a heterogeneidade da superfície em termos de uso e cobertura do solo. Ademais, há de se destacar o custo operacional para manutenção dessas estações, em especial no que diz respeito às estações automáticas, que possuem vários sensores integrados para a determinação de parâmetros meteorológicos, a exemplo da pressão atmosférica, radiação solar, temperatura e umidade relativa. Tais sensores devem ter vida útil respeitada, além de serem corriqueiramente aferidos e calibrados para assegurar a confiabilidade dos dados gerados.

Não só no Brasil, mas em diversas partes do mundo, há a necessidade de estimativa e avaliação de dados climáticos em maiores escalas e com baixo custo. Para tanto, o sensoriamento remoto desponta como alternativa viável, uma vez que apresenta grande cobertura espacial e oferece informação detalhada com rapidez e qualidade. Assim, nos últimos anos, o uso de imagens e produtos de satélite têm assumido papel de destaque para o monitoramento de fenômenos meteorológicos e ambientais.

O acompanhamento desses fenômenos por satélites meteorológicos geoestacionários é importante, pois estes possuem maior resolução temporal, ou seja, possuem um menor tempo de revisita que, por exemplo, os satélites para recursos naturais. Com isso, os satélites meteorológicos configuram-se como plataformas orbitais adequadas para a estimativa de parâmetros como poder emissivo, albedo, temperatura de superfície, fluxo de radiação,

evapotranspiração, dentre outros, o que possibilita uma melhor compressão da dinâmica espaço-temporal dessas variáveis.

Em decorrência do exposto e frente à necessidade de suprir as limitações impostas pela pontualidade de dados meteorológicos de superfície para a estimativa da evapotranspiração, tomou-se como objetivo principal para a condução deste estudo, analisar a incerteza de produtos orbitais de evapotranspiração para o Estado de Minas Gerais, durante o ano de 2014, por estações meteorológicas de superfície. De modo específico, objetivou-se:

- a) Comparar o produto DMET utilizando estimativas de evapotranspiração obtidas pelo método padrão Penman-Monteith-FAO;
- b) Comparar o produto MOD16 utilizando estimativas de evapotranspiração obtidas pelo método padrão Penman-Monteith-FAO;
- c) Comparar os resultados obtidos por meio dos produtos orbitais e de estações meteorológicas de superfície entre si;



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Evapotranspiração

Como observado em Carvalho et al. (2011), o termo evapotranspiração (ET) foi utilizado pela primeira vez na literatura científica por Thornthwaite e Wilm (1944). Segundo Allen et al. (1998), o processo evapotranspirativo, atuante na interface solo-planta-atmosfera, compreende à ação simultânea de transferência de água da superfície do solo por evaporação e dos tecidos vegetais por transpiração. Por isso, é considerado um importante parâmetro físico e biológico, estando entre os principais componentes do ciclo hidrológico (MU et al., 2007; ZHANG et al., 2010).

Ao longo do tempo, outros conceitos foram surgindo no meio científico para aprimorar os estudos relacionados à taxa evapotranspirativa. Graças aos trabalhos de Thornthwaite (1948), que buscou explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e sua relação com as diferenças regionais do clima, e Penman (1948), que propôs um modelo envolvendo os processos físicos da evaporação, surge o conceito de evapotranspiração potencial (ETp) como sendo a máxima transferência de água de uma extensa superfície coberta por vegetação rasteira, com desenvolvimento ativo na fase adulta, altura uniforme e sem restrição hídrica (CAMARGO; CAMARGO, 2000; CARVALHO et al., 2011; SEDIYAMA, 1996).

No final da década de 70, Doorenbos e Pruitt (1977) estabeleceram o primeiro conceito para a evapotranspiração de referência (ETo) em substituição ao termo ETp. Segundo os referidos autores, ETo é a evapotranspiração que ocorre em uma extensa área de grama em crescimento ativo, com altura de 8 a 15 cm, cobrindo totalmente o solo e sem restrição hídrica. No início dos anos 90, a *Food and Agriculture Organization* (FAO) determinou como cultura de referência para a estimativa de ETo uma cultura hipotética com altura de 12 cm,

albedo igual a 0,23 e resistência da cultura ao transporte de vapor d'água de 0,69 s m<sup>-1</sup> (ALLEN et al., 1998; CARVALHO et al., 2011).

A taxa evapotranspirativa é expressa em milímetros por unidade de tempo e é influenciada por elementos meteorológicos tais como a temperatura e a umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a radiação solar incidente que, segundo Lemos Filho et al. (2010), são elementos de entrada do modelo Penman-Monteith parametrizado pela FAO que deve ser medido ou estimado com maior precisão. Fatores relacionados à cultura, como a variedade e o estágio de desenvolvimento da mesma, e condições de solo associadas ao manejo, como salinidade, fertilidade e aplicação de insumos, também estão interligados com o processo evapotranspirativo (ALLEN et al., 1998).

## **2.2 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência**

O conhecimento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é essencial para o manejo de áreas agrícolas e para o uso adequado da água em sistemas de irrigação. Sendo que, para a estimativa da ET<sub>o</sub>, podem ser utilizados métodos diretos com o uso de lisímetros, que apresentam bons resultados, mas também altos custos, e métodos indiretos, menos onerosos, baseados em modelos empíricos que utilizam dados meteorológicos (GONÇALVES et al., 2009). Entretanto, a escolha de um modelo depende de uma série de fatores como a disponibilidade de dados meteorológicos ou mesmo da escala de tempo requerida. Modelos mais complexos necessitam de muitas variáveis meteorológicas, diferente dos mais simples que podem chegar ao valor da ET<sub>o</sub>, por meio de apenas um único elemento meteorológico (ARAÚJO; CONCEIÇÃO; VENANCIO, 2012; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; SENTELHAS; GILLESPIE; SANTOS, 2010).

Conforme observado em Carvalho et al. (2011), Penman, Thornthwaite, Tanque Classe A, Hargreaves, Makkink, Blaney-Cridle e Penman-Monteith-

FAO são alguns dos métodos mais encontrados na literatura que são baseados em equações empíricas e/ou com fundamentação física. Contudo, Rigoni et al. (2013) salientam que esses métodos foram desenvolvidos nas mais diversas condições de clima e, quando, necessário, devem ser calibrados. Dos métodos ora citados para a obtenção da ETo, destaca-se o método combinado Penman-Monteith-FAO (Equação 1) que, segundo Allen et al. (1998), foi parametrizado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) como modelo mais adequado para se estimar a ETo em escala diária. Esse modelo é eficiente em diversas condições climáticas, podendo ser utilizado até para estimativas em escala horária, além de representar um aprimoramento do método de Penman (1948), o qual não considera parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (LIMA JÚNIOR et al., 2016).

A sequência de equações descritas, a seguir, baseia-se na metodologia proposta pela FAO publicada no Boletim de Irrigação e Drenagem n° 56 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

em que,

$ET_o$  – evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>);

$R_n$  – saldo de radiação à superfície (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

$G$  – fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>), considerado igual a 0 na escala diária;

$T$  – temperatura média diária do ar (°C);

$u_2$  – velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>);

$e_s$  – pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

$e_a$  – pressão atual de vapor d'água (kPa);

$\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor d'água (kPa °C<sup>-1</sup>);

$\gamma$  – coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>).

A declividade da curva de pressão de vapor d'água ( $\Delta$ ) é obtida pela Equação 2:

$$\Delta = \frac{4098 \times e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

em que,

$\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor d'água (kPa °C<sup>-1</sup>);

$T$  – temperatura média diária do ar (°C);

$e_s$  – pressão de saturação de vapor d'água (kPa).

A pressão de saturação de vapor d'água ( $e_s$ ) é obtida pela Equação 3

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (3)$$

No Brasil, a temperatura média diária do ar ( $T$ ) pode ser obtida pela Equação 4, quando os dados utilizados são oriundos de estações climatológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

$$T = \frac{T_{12} + T_x + T_n + 2T_{24}}{5} \quad (4)$$

em que,

$T$  – temperatura média diária do ar (°C);

$T_{12}$  – Temperatura do ar às 12h (°C);

$T_{24}$  – Temperatura do ar às 24h (°C);

$T_x$  – Temperatura máxima registrada no dia (°C);

$T_n$  – Temperatura mínima registrada no dia (°C).

O coeficiente psicrométrico ( $\gamma$ ) é obtida pela Equação 5:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (5)$$

em que,

$\gamma$  – coeficiente psicrométrico (kPa °C);

$P$  – pressão atmosférica média diária (Pa).

A pressão atual de vapor d'água ( $e_a$ ) calculada com base na umidade relativa é obtida pela Equação 6:

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (6)$$

em que,

$e_a$  – pressão atual de vapor d'água (kPa);

$e_s$  – pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

$UR$  – umidade relativa média do ar (%).

A umidade relativa média do ar ( $UR$ ) pode ser obtida pela Equação 7 quando são utilizados dados oriundos de estações climatológicas pertencentes à rede de estações do INMET, tal como a temperatura

$$UR = \frac{UR_{12} + UR_{18} + 2UR_{24}}{4} \quad (7)$$

em que,

$UR$  – umidade relativa média do ar (%);

$UR_{12}$  – umidade relativa do ar às 12h (%);

$UR_{18}$  – umidade relativa do ar às 18h (%);

$UR_{24}$  – umidade relativa do ar às 24h (%).

O saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) é obtido pela Equação 8:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

em que,

$R_n$  – saldo de radiação à superfície ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$R_{ns}$  – saldo de radiação de ondas curtas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

$R_{nl}$  – saldo de radiação de ondas longas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ )

O saldo de radiação de ondas curtas ( $R_{ns}$ ) é obtido pela Equação 9:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (9)$$

em que,

$R_{ns}$  – saldo de radiação de ondas curtas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$\alpha$  – albedo (adimensional);

$R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

O saldo de radiação de ondas longas ( $R_{nl}$ ) é obtido pela Equação 10:

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_x^4 + T_n^4}{2} \right] \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (10)$$

em que,

$R_{nl}$  – saldo de radiação de ondas longas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$\sigma$  – constante de Stefan – Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$T_x$  – temperatura máxima absoluta (K);

$T_n$  – temperatura mínima absoluta (K);

$e_a$  – pressão atual de vapor (kPa), obtida conforme a Equação 6;

$R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$R_{so}$  – radiação solar incidente na ausência de nuvens ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

A radiação solar incidente ( $R_s$ ) pode ser obtida pela Equação 11:

$$R_s = \left( a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (11)$$

em que,

$R_s$  – radiação solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$a$  e  $b$  – coeficientes locais (adimensionais);

$n$  – insolação (h);

$N$  – duração astronômica do dia (h);

$R_a$  – radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ).

A duração astronômica do dia ( $N$ ) é obtida pela Equação 12:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (12)$$

em que,

$N$  – duração astronômica do dia (h);

$\omega_s$  – ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad).

O ângulo horário do nascer ou pôr do sol ( $\omega_s$ ) é obtido pela Equação 13:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \times \tan \delta) \quad (13)$$

em que,

$\omega_s$  – ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad);

$\varphi$  – latitude local (rad);

$\delta$  – declinação solar (rad).

A radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $R_a$ ) é obtida pela Equação 14:

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} d_r [\omega_s \operatorname{sen} \varphi \operatorname{sen} \delta + \cos \varphi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s] \quad (14)$$

em que,

$R_a$  – radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );

$d_r$  – distância relativa da Terra ao Sol (adimensional);

$\omega_s$  – ângulo horário do nascer ou pôr do sol (rad), obtido conforme a

Equação 13;

$\varphi$  – latitude local (rad);

$\delta$  – declinação solar (rad).

A distância relativa da Terra ao Sol ( $d_r$ ) é obtida pela Equação 15:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (15)$$

em que,

$d_r$  – distância relativa da Terra ao Sol (adimensional);

$J$  – dia juliano.

A radiação solar incidente na ausência de nuvens ( $R_{so}$ ) é obtida pela Equação 16:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (16)$$

em que,

$R_{so}$  – radiação solar incidente na ausência de nuvens ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );

$z$  – altitude do local (m);

$R_a$  – radiação solar incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), obtida conforme a Equação 14.

No entanto, ainda que preciso, o método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), Penman-Monteith-FAO, pode apresentar limitações quanto ao seu uso em função do número de variáveis requeridas, as quais nem sempre estão prontamente disponíveis, em razão do número insuficiente de estações meteorológicas de superfície que não representam a variabilidade da região, ou que apresentem falhas e/ou imprecisões no processo de aquisição dos dados, comprometendo assim as análises que dependem da ET (LIMA JÚNIOR et al., 2016; MINUZZI et al., 2014). Para Liou e Kar (2014), os instrumentos de medida presentes nessas estações, apesar de apresentar vantagens, propiciam apenas estimativas locais de evapotranspiração e representam custos elevados, além de estarem sujeitos a falhas em razão do estado de conservação.

Assim, de maneira alternativa, dados de sensoriamento remoto podem ser utilizados para caracterizar os processos biofísicos que atuam na superfície terrestre e alimentam os modelos de estimativa de ET (HU; JIA; MENENTI, 2015; SRIVASTAVA et al., 2016; WESTERHOFF, 2015).

### **2.3 Uso do sensoriamento remoto na estimativa da evapotranspiração**

Segundo Ferreira e Dantas (2014), a utilização do sensoriamento remoto em estudos agrometeorológicos para a estimativa da evapotranspiração (ET), tem-se mostrado vantajoso tanto em escala regional quanto local. Ademais, em locais onde existem poucas estações meteorológicas de superfície que possam oferecer dados medidos de forma eficiente, o sensoriamento remoto desponta

como uma importante ferramenta para a obtenção frequente de dados com ampla cobertura e em diferentes escalas espaciais e temporais, contribuindo para a otimização dos processos e o monitoramento em longo prazo (FERNANDES et al., 2012; GIBSON et al., 2013).

Para Mu, Zhao e Running (2011), o sensoriamento remoto é reconhecidamente o meio mais viável para fornecer informação inerente à ET regional espacialmente distribuída na superfície terrestre, de modo que o uso de dados orbitais evoluiu por estratégias que englobam métodos físicos baseados em equações empíricas. Contudo, Tang et al. (2015) relatam que a presença de nuvens e a alta sensibilidade desses métodos à temperatura de superfície dificulta a estimativa da ET em escalas continental e global, sendo necessário o aprimoramento dos modelos e algoritmos utilizados.

Assim, nos últimos anos, trabalhos vêm sendo desenvolvidos em diversas regiões do globo visando ao entendimento e aperfeiçoamento no uso do sensoriamento remoto para a estimativa da ET. Sun et al. (2011) desenvolveram uma metodologia para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), utilizando a equação de Makkink, em tempo quase real, para regiões de planalto no Leste Africano, com o uso de dados dos sensores *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) e *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI), a bordo dos satélites Terra e Meteosat de Segunda Geração (MSG), respectivamente. Os resultados mostraram coeficiente de determinação igual a 0,73 entre a ET<sub>o</sub> estimada e a ET<sub>o</sub> medida para a escala diária, além de ter ocorrido em média subestimativa dos valores obtidos.

Sun et al. (2012) estimaram valores diários para ET, utilizando dados dos sensores MODIS e SEVIRI para o Sudão, Congo, Zâmbia e África do Sul, baseando-se em medições de quatro torres de fluxo localizadas uma em cada país. Os resultados apontaram uma correlação entre as estimativas de ET por satélite e medições de torres de fluxo variando de 0,75 a 0,94. Dessa forma, os

autores concluíram que para as condições analisadas as estimativas de ET foram confiáveis em períodos úmidos com ET diária superior a 1 mm d<sup>-1</sup>.

Martínez et al. (2013) compararam o produto da fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FAPAR) derivados dos sensores MODIS, SEVIRI e *Medium Resolution Imaging Spectrometer* (MERIS) para a Península Ibérica. Ao final da análise, os autores observaram diferença significativa na variação temporal e nos valores absolutos. Sendo que os produtos dos sensores MODIS e MERIS apresentaram, respectivamente, os valores absolutos mais altos e mais baixos.

Liu et al. (2014) analisaram o albedo de superfície, em escala diária, utilizando bandas espectrais na faixa do visível e do infravermelho próximo dos sensores MODIS e SEVIRI. Os resultados, validados e calibrados para o Sudoeste da França, mostraram que há correlação entre o albedo de superfície e a umidade do solo, sendo o primeiro propenso para estimar o segundo sob determinadas condições. No entanto, os autores ressaltaram a importância de futuras parametrizações para o aprimoramento dos estudos.

Corbari, Bissolati e Mancini (2015) analisaram estimativas de ET a partir de produtos de temperatura de superfície obtidos pelos sensores MODIS, foram utilizados produtos com resolução espacial de 250 m e 1000 m, e SEVIRI, com resolução espacial de 1000 m e 5000 m, para uma região agrícola no Norte da Itália. Os autores concluíram que os resultados encontrados dependem não apenas dos sensores utilizados, mas também da resolução espacial das imagens de satélites.

Minacapilli et al. (2016) obtiveram estimativas de ET diária em escala regional, no Mediterrâneo, a partir de produtos de sensoriamento remoto utilizando o método do triângulo. Duas áreas distintas na Sicília foram utilizadas para validação da metodologia utilizada por meio da comparação de dados medidos por torres de fluxo. Conforme relato dos autores, a comparação entre as

taxas evapotranspirativas modeladas pelo método do triângulo e as medidas revelou-se satisfatória com erro padrão de cerca de  $0,6 \text{ mm d}^{-1}$ .

#### **2.4 Os satélites Meteosat e o sensor SEVIRI**

A série de satélites geostacionários *Meteorological satellite* (Meteosat) é de responsabilidade da *European Space Agency* (ESA) e da *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT), e teve início com o lançamento do primeiro satélite em 1977, seguido de mais seis satélites da primeira geração da série colocados em órbita de 1981 a 1997 (SCHMETZ et al., 2002). Os satélites dessa geração possuem o sensor *Meteosat Visible and Infrared Imager* (MVIRI) como principal instrumento que opera com três canais na região do visível e do infravermelho termal, sendo capaz de realizar imageamento contínuo a cada 30 minutos, com resolução espacial de 2,5 ou 5 km no nadir (EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES - EUMETSAT, 2013; TRIGO et al., 2011).

Já a segunda geração da série Meteosat, denominada *Meteosat Second Generation* (MSG), foi iniciada em 2002 com o lançamento do oitavo satélite da série e continuidade em 2005 e 2012 com o lançamento dos satélites Meteosat 9 e Meteosat 10, respectivamente; sendo que a segunda geração foi encerrada com o lançamento do Meteosat 11 em 2015 (SCHMETZ et al., 2002; TRIGO et al., 2011). Os satélites MSG têm como principal instrumento a bordo o sensor *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI), capaz de gerar uma imagem a cada 15 min, operando em 12 canais espectrais com resolução espacial de 1 ou 3 km no nadir (GHILAIN; DE ROO; GELLENS-MEULENBERGHS, 2014).

Segundo Petropoulos e Anagnostopoulos (2016), os 12 canais espectrais presentes no sensor SEVIRI consistem em três canais na região do visível e

infravermelho próximo (com comprimento de onda de 0,6, 0,8 e 1,6  $\mu\text{m}$ ), oito canais na região do infravermelho (3,9, 6,2, 7,3, 8,7, 9,7, 10,8, 12,0 e 13,4  $\mu\text{m}$ ) e um canal com banda larga na região do visível (0,5 – 0,9  $\mu\text{m}$ ), fornecendo dados com ampla cobertura meteorológica, melhorando a qualidade das previsões do tempo, e realizando uma observação contínua da Terra em disco cheio, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Imagem capturada pelo satélite Meteosat 11 no espectro visível.



Fonte: EUMETSAT (2016).

Nos últimos anos, uma série de produtos operacionais do sensor SEVIRI vem sendo fornecida pela EUMETSAT e distribuída pela *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (LSA SAF), projeto em operação, criado em 2005

e coordenado pelo Instituto de Meteorologia de Portugal (PETROPOULOS; ANAGNOSTOPOULOS, 2016; TRIGO et al., 2011). De acordo com Cruz-Blanco, Lorite e Santos (2014), a LSA SAF tem como principal objetivo o desenvolvimento de aplicações de sensoriamento remoto para os processos relevantes e inerentes à superfície terrestre.

Para Sepulcre-Canto et al. (2014), os benefícios do uso de produtos LSA SAF são a cobertura espacial, compreendendo a África, Europa e América do Sul, e o fato de que são produzidos em um curto espaço de tempo, constituindo informação essencial para diversas áreas do conhecimento como na agricultura (ZHANG et al., 2015), hidrologia (CORBARI; BISSOLATI; MANCINI, 2015) e climatologia (BADESCU; DUMITRESCU, 2016). Como exemplo desses produtos, há parâmetros de vegetação e indicadores biofísicos, temperatura de superfície da terra, albedo de superfície e parâmetros de radiação (GELLENS-MEULENBERGHS; ARBOLEDA; GHILAIN, 2015).

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos, a fim de desenvolver produtos operacionais de evapotranspiração (ET), a partir de imagens de satélite, para a utilização em escalas continental e global (SEPULCRE-CANTO et al., 2014). Ghilain, Arboleda e Gellens-Meulenberghs (2011) desenvolveram um modelo operacional para determinação de ET em escala continental, a partir dos produtos albedo (AL), *Downwelling Surface Shortwave Flux* (DSSF) e *Downwelling Surface Longwave Flux* (DSLFL), derivados do sensor SEVIRI. O modelo denominado de MET (da fusão “MSG ET”) foi validado para a Europa, apresentando, assim, bons resultados para regiões de clima temperado. Em comparação com observações de superfície, as ETs obtidas apresentaram correlação espacial entre 80 e 90% em horários próximos ao meio-dia.

Cristóbal e Anderson (2013) realizaram uma avaliação do produto de radiação de ondas curtas DSSF do sensor SEVIRI, em escala horária, diária e mensal, validando-o para uma região no Nordeste da Península Ibérica. Os

autores encontraram resultados com erro médio quadrático de 19 a 27%, sendo que os maiores erros obtidos para a escala mensal. Os autores observaram também que em condições de céu nublado pode haver superestimativas dos resultados e, conseqüentemente, erros mais altos.

Petropoulos et al. (2016) avaliaram a precisão de estimativas da ET instantânea, produto MET do SEVIRI, para algumas regiões na Europa, mais precisamente na Espanha, França, Itália e Reino Unido. Os resultados das estimativas orbitais foram comparados com medições *in situ* de torres de fluxo, apresentando correlações pouco maiores que 0,70. Em suas conclusões, os autores ressaltam o potencial da utilização do produto MET para estudos em escala regional e sua aplicabilidade para regiões de interesse na bacia do Mediterrâneo.

## 2.5 O sensor MODIS

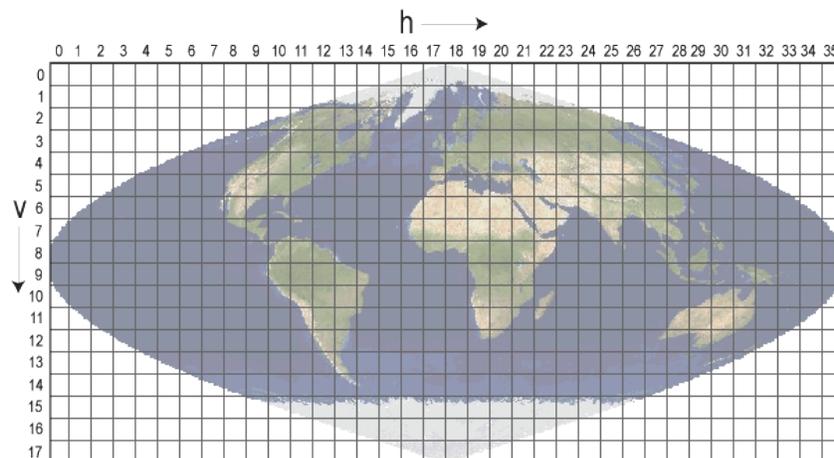
O sensor *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) é o principal dos cinco instrumentos a bordo dos satélites Terra e Aqua, lançados, respectivamente, em 1999 e 2002, com o propósito de aprimorar os estudos sobre a dinâmica da atmosfera, dos oceanos e da superfície terrestre (SUN et al., 2014). Sua idealização faz parte do projeto *Earth Observing System* (EOS) da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), que tem como principal objetivo observar e caracterizar as mudanças do planeta Terra e suas conseqüências para as formas de vida; disponibilizando de maneira efetiva dados de sensoriamento remoto com alta resolução temporal e espectral (MU; ZHAO; RUNNING, 2011).

O MODIS possui 36 bandas espectrais, com comprimentos de onda variando de 0,405 a 14,385  $\mu\text{m}$ , estendendo-se da região do visível à faixa do infravermelho termal, apresenta 12 bits de resolução radiométrica e resolução espacial de 250 m, para as bandas 1 e 2, 500 m, para as bandas de 3 a 7, e 1000

m, para as demais bandas; além de alta resolução temporal, permitindo o imageamento da superfície terrestre a cada 1 ou 2 dias e, por conseguinte, uma melhor compreensão da dinâmica global (OLIVEIRA et al., 2014; SANTOS et al., 2015).

De acordo com Carroll et al. (2016), os dados do sensor MODIS, disponibilizados na forma de produtos operacionais, são produzidos e distribuídos em cenas, denominadas de *tiles*, de  $10 \times 10^\circ$  no equador em projeção Sinusoidal. Cada *tile*, segundo Disney et al. (2016), corresponde a uma área de  $1200 \times 1200$  km de maneira que, para cobertura global, são necessárias 36 cenas no sentido horizontal (h), eixo leste-oeste, e 18 cenas no sentido vertical (v), eixo norte-sul, totalizando 648 cenas tal como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Grade global do sensor MODIS na projeção Sinusoidal.



Fonte: National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2016).

O departamento responsável pelo processamento, armazenamento e distribuição de dados orbitais do sensor MODIS é o *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)*, ligado ao *United States Geological Survey (USGS)* e que tem como uma de suas principais características a disseminação

pública de informação pré-processada na forma de produtos compilados para a escala diária, a cada 8 ou 16 dias e anual (CUNHA et al., 2015; TUCK et al., 2014). Como exemplos desses produtos há índices de vegetação, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al., 1974) e *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (HUETE et al., 1997), compreendidos no produto MOD13 e gerados a partir do produto MOD09, que corresponde à reflectância de superfície; o produto MOD11, referente à temperatura de superfície e emissividade; o produto MOD12, para o uso e cobertura do solo e o produto MOD16 para a evapotranspiração.

Risso et al. (2012) avaliaram o desempenho dos índices NDVI e EVI, ambos oriundos do produto MOD13, para caracterizar áreas de soja frente a outros tipos de cobertura como cana-de-açúcar, pastagem, cerrado e floresta, no Estado do Mato Grosso. Os autores concluíram que os melhores resultados são decorrentes do uso combinado do NDVI, que apresentou melhor desempenho para a discriminação de áreas de soja no período de entressafra, e o do EVI, mais eficaz no período de safra.

Também utilizando o produto de NDVI aliado ao produto de temperatura de superfície, MOD11, Cunha et al. (2015) realizaram uma avaliação do uso destes para o monitoramento de seca em tempo quase real no semiárido brasileiro. Por meio dos resultados, os autores constataram que a relação empírica entre a temperatura de superfície e o NDVI pode ser utilizada, efetivamente, como indicador espaço-temporal de condições de estresse hídrico no semiárido brasileiro. Esse estudo também revelou que a região semiárida é a mais afetada pelo estresse hídrico e que a seca atua de maneira irregular na região.

Sun et al. (2016) analisaram a qualidade do ar em oito cidades chinesas, num período de quase dez anos, utilizando os produtos de aerossol, MOD04, e de uso e cobertura do solo, MOD12; sendo que deste foram obtidos seis tipos de

classes, água, floresta, pastagem, cultivo agrícola, terra improdutiva e espaço urbano. Os autores observaram uma relação direta entre a poluição e a alteração da paisagem; de modo que, nas áreas mais ao interior das cidades, a correlação entre a poluição por partículas e a alteração no uso e cobertura do solo foi maior do que em áreas no litoral.

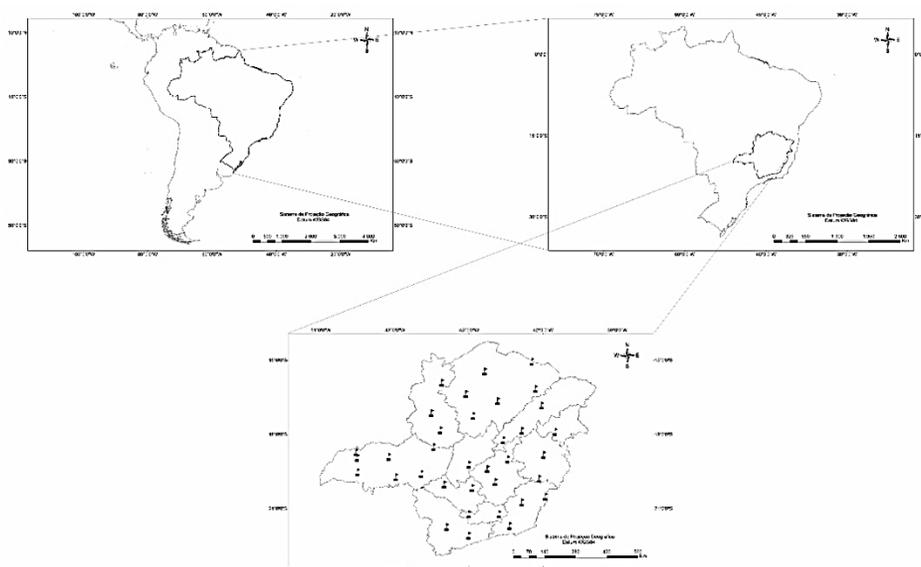
Fazendo uso dos produtos de evapotranspiração (ET) dos sensores MODIS e SEVIRI, Hu, Jia e Menenti (2015) compararam os padrões espaciais dos produtos de ET, com medições *in situ* em 15 diferentes locais na Europa, ao longo de um ano. Com base nos resultados, os autores observaram que o produto do sensor SEVIRI se aproximou mais das medições em campo do que o produto do sensor MODIS. Concluíram também que ambos os produtos foram consistentes, ao longo de quase todo o continente, com exceção para algumas semiáridas.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido no Estado de Minas Gerais, que apresenta uma área de 588.384,3 km<sup>2</sup>, situado na Região Sudeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas de 14°13'57" a 22°55'22" de latitude Sul e 39°51'23" a 51°02'45" de longitude Oeste conforme a Figura 3.

Figura 3 - Localização geográfica da área de estudo e distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas em Minas Gerais.



Fonte: Adaptado pelo autor do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016).

Em virtude de sua localização geográfica e da variabilidade espacial da evapotranspiração, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa (LEMOS FILHO et al., 2010), o Estado apresenta clima diversificado com regime pluviométrico bastante heterogêneo e, por vezes, irregular. No Estado de

Minas Gerais, o inverno é a estação seca e o verão é o período chuvoso, sendo a porção norte do Estado caracterizada por um clima quente e seco, ao contrário da região sul, onde predominam temperaturas mais amenas e chuvas mais bem distribuídas ao longo do ano, ou seja, enquanto nas regiões mais secas, norte, nordeste e leste de Minas Gerais, a precipitação média anual varia de 700 a 1000 mm; nas regiões mais chuvosas, sul, Triângulo Mineiro, noroeste e regiões das Serras do Espinhaço e da Mantiqueira, a precipitação média anual varia de 1200 a 2500 mm (ÁVILA et al., 2014; MELLO; VIOLA, 2013; REBOITA et al., 2015).

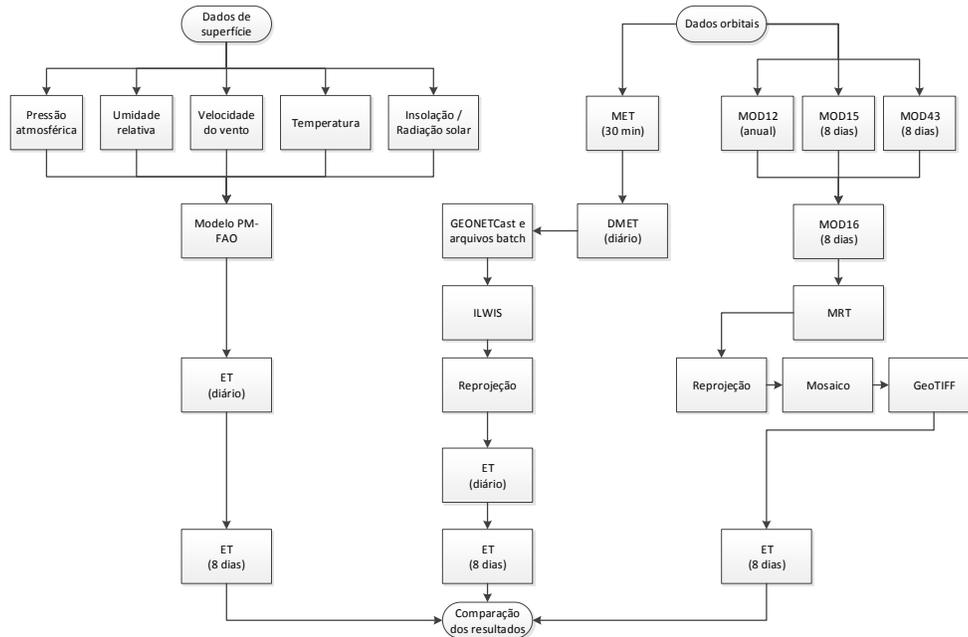
De acordo com a classificação climática de Thornthwaite, o clima na região varia do grupo A, superúmido, predominante em regiões de altitude bastante elevada, a exemplo da região sul do Estado que é influenciada pela Serra da Mantiqueira e apresenta médias anuais de temperatura inferiores a 14°C e precipitações médias acumuladas superiores a 1750 mm durante o ano, ao grupo D, semiárido, com temperaturas médias anuais superiores a 25°C e precipitação média acumulada inferiores a 850 mm ao ano (CARVALHO et al., 2010).

Segundo a classificação climática de Köppen, Minas Gerais apresenta grupos climáticos de A a C dispostos em cinco classes climáticas, Am, Aw, BSh, Cwa e Cwb, sendo que as classes Am, clima tropical de monção, e BSh, clima de estepe quente, são insignificantes frente às demais com área de atuação conjunta no Estado inferior a 0,2 %; em contrapartida, as classes dominantes são Aw, clima tropical com estações úmida e seca, e Cw, clima subtropical úmido, que apresentam 67,2 e 21,4 %, respectivamente (SÁ JÚNIOR et al., 2012).

### **3.2 Fluxograma das etapas**

Para uma compreensão sucinta das etapas, a seguir é apresentado um fluxograma (FIGURA 4).

Figura 4 - Fluxograma da metodologia adotada para estimativa e comparação da evapotranspiração (ET).



MET – produto de evapotranspiração instantânea do sensor SEVIRI ( $\text{mm h}^{-1}$ )

DMET – produto diário de evapotranspiração do sensor SEVIRI ( $\text{mm d}^{-1}$ )

MOD12 – produto de uso e ocupação do solo do sensor MODIS

MOD15 – produto da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e índice de área foliar do sensor MODIS

MOD43 – produto de albedo do sensor MODIS

MOD16 – produto de evapotranspiração do sensor MODIS ( $\text{mm 8d}^{-1}$ )

MRT – *MODIS Reprojection Tool*

ET – evapotranspiração ( $\text{mm 8d}^{-1}$ )

PM-FAO - equação de Penman-Monteith-FAO

Fonte: Do autor (2016)

### 3.3 Descrição dos dados

A seguir, têm-se a descrição dos dados de superfície terrestre obtidos por estações meteorológicas e por satélites utilizados neste trabalho.

### 3.3.1 Dados de superfície terrestre por estações meteorológicas

Os dados meteorológicos de superfície terrestre utilizados nas estimativas das evapotranspirações de referência (ET<sub>o</sub>), temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, insolação e pressão atmosférica, foram obtidos em estações meteorológicas convencionais geralmente denominadas Estações Climatológicas Principais (ECPs), pertencentes à rede nacional de postos de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados registrados pelo INMET são sistematicamente monitorados por observadores meteorológicos responsáveis pelo armazenamento dessa informação em bancos de dados disponibilizados via internet.

Para algumas localidades do Estado de Minas Gerais em que não havia disponibilidade de dados de insolação, foram utilizados dados de radiação solar registrados por estações automáticas do INMET, sendo estas Campina Verde, Governador Valadares, Ituiutaba, Pirapora, Pompeu, São Romão, Teófilo Otoni e Uberlândia. Assim, neste trabalho, foram utilizadas 35 estações meteorológicas escolhidas pela disponibilidade de dados para o ano de 2014, todas localizadas na superfície do Estado de Minas Gerais (FIGURA 3 e TABELA 1).

Tabela 1 - Caracterização das estações meteorológicas utilizadas.

(Continua)

<b>Código</b>	<b>Município</b>	<b>UF</b>	<b>Latitude (°)</b>	<b>Longitude (°)</b>	<b>Altitude (m)</b>
83442	Araçuaí	MG	-16,83	-42,05	289,00
83579	Araxá	MG	-19,60	-46,93	1023,61
83384	Arinos	MG	-15,91	-46,10	519,00
83582	Bambuí	MG	-20,03	-46,00	661,27
83689	Barbacena	MG	-21,25	-43,76	1126,00
83587	Belo Horizonte	MG	-19,93	-43,93	915,00

Tabela 1 - Caracterização das estações meteorológicas utilizadas.

(Conclusão)

<b>Código</b>	<b>Município</b>	<b>UF</b>	<b>Latitude (°)</b>	<b>Longitude (°)</b>	<b>Altitude (m)</b>
86793	Campina Verde	MG	-19,54	-49,52	559,00
83639	Caparaó	MG	-20,52	-41,90	843,18
83514	Capinópolis	MG	-18,71	-49,55	620,60
83592	Caratinga	MG	-19,80	-42,15	609,65
83589	Conceição do Mato Dentro	MG	-19,01	-43,43	652,00
83538	Diamantina	MG	-18,25	-43,60	1296,12
83635	Divinópolis	MG	-20,17	-44,87	788,35
86783	Governador Valadares	MG	-18,83	-41,98	198,00
83488	Itamarandiba	MG	-17,85	-42,85	914,00
86775	Ituiutaba	MG	-18,95	-49,52	540,00
83386	Januária	MG	-15,45	-44,36	473,71
83481	João Pinheiro	MG	-17,74	-46,17	760,36
83692	Juiz de Fora	MG	-21,70	-43,35	939,96
83687	Lavras	MG	-21,23	-45,00	918,84
83683	Machado	MG	-21,75	-45,90	873,35
83388	Monte Azul	MG	-15,05	-42,45	603,63
83437	Montes Claros	MG	-16,65	-43,83	646,29
83479	Paracatu	MG	-17,13	-46,52	712,00
83531	Patos de Minas	MG	-18,51	-46,43	940,28
86759	Pirapora	MG	-17,26	-44,83	505,00
86788	Pompéu	MG	- 19,24	-45,00	705,00
83441	Salinas	MG	-16,16	-42,30	471,32
83736	São Lourenço	MG	-22,10	-45,01	953,20
86739	São Romão	MG	-16,36	-45,12	490,00
83586	Sete Lagoas	MG	-19,40	-44,25	732,00
86762	Teófilo Otoni	MG	-17,89	-41,51	467,00
83577	Uberaba	MG	-19,73	-47,95	737,00
86776	Uberlândia	MG	-18,92	-48,25	875,00
83642	Viçosa	MG	-20,75	-42,85	689,73

Fonte: Do autor (2016).

### 3.3.2 Dados de superfície terrestre por satélites

No que diz respeito aos dados de superfície terrestre estimados por satélites, serão descritos a seguir os produtos orbitais utilizados neste trabalho.

#### 3.3.2.1 O produto de evapotranspiração do sensor SEVIRI

O produto de evapotranspiração (ET) do sensor *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) é dividido em dois produtos de ET com resolução espacial de 3 km, mas com diferentes resoluções temporais: o produto MET, que compreende a ET instantânea estimada a cada 30 min, expresso em  $\text{mm h}^{-1}$ , e o produto DMET, derivado da integração dos valores instantâneos de ET para cada dia, conforme a Equação 17 descrita abaixo, e expresso em  $\text{mm d}^{-1}$  (GHILAIN; ARBOLEDA; GELLENS-MEULENBERGHS, 2011).

$$DMET = \int_{h_1}^{h_2} MET_i(t) dt \quad (17)$$

em que,

$MET_i$  – evapotranspiração instantânea estimada ( $\text{mm h}^{-1}$ );

$h_1$  – primeiro horário de aquisição de dados do dia, às 00:30 UTC;

$h_2$  – último horário de aquisição de dados do dia, às 24:00 UTC;

$dt$  – integração (30 minutos). Em condições ideais, 48 imagens são integradas para obtenção de um valor diário do produto DMET.

Em virtude da falta de dados para um determinado dia, pode ser realizada uma interpolação linear a partir de dados próximos pela Equação 18:

$$MET_j = MET_{j-1} + 0,5(MET_{j+1} + MET_{j-1})N \quad (18)$$

em que,

$MET_j$  – valor de evapotranspiração ( $\text{mm h}^{-1}$ )

$MET_{j+1}$  – valor de evapotranspiração posterior ( $\text{mm h}^{-1}$ );

$MET_{j-1}$  – valor de evapotranspiração anterior ( $\text{mm h}^{-1}$ );

$N$  – número de intervalos de tempo entre a evapotranspiração anterior e posterior.

O algoritmo do produto ET do SEVIRI baseia-se no modelo de transferência de massa e energia *Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer* (SVAT), por meio da interação solo-planta-atmosfera, oriunda de outros produtos da rede *Land Surface Analysis Satellite Applications Facility* (LSA SAF) referentes ao fluxo de radiação de ondas curtas e ondas longas, *Downwelling Surface Shortwave Flux* (DSSF) e *Downwelling Surface Longwave Flux* (DSLFL), respectivamente, e ao albedo; além de parâmetros meteorológicos, como temperatura, umidade do ar e pressão atmosférica na superfície, oriundos do centro de observações europeu o *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (HU; JIA; MENENTI, 2015).

No presente estudo, foram utilizados dados diários do produto de evapotranspiração DMET obtidos, gratuitamente, diretamente do portal eletrônico da LSA SAF, os quais estão disponíveis para a Europa, África e América do Sul em formato de arquivo do tipo *Hierarchical Data Format 5* (HDF5) e são distribuídos com atraso de apenas um dia.

### 3.3.2.2 O produto de evapotranspiração do sensor MODIS

O produto de evapotranspiração do sensor *Moderate Resolution Imaging Spectrometer* (MODIS) o MOD16 apresenta 1 km de resolução espacial e compreende dados de evapotranspiração real (ET<sub>r</sub>) e evapotranspiração potencial (ET<sub>p</sub>), de fluxo de calor latente (LE), real e potencial, além de um

produto integrado de controle de qualidade; todos estes disponibilizados a cada 8 dias, mensalmente ou ainda anualmente.

Como observado em Mu, Zhao e Running (2011) o algoritmo de evapotranspiração (ET) do produto MOD16 baseia-se na equação de Penman-Monteith, Equação 19, dada como:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (19)$$

em que,

$\lambda ET$  – fluxo de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor d'água ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$R_n$  – saldo de radiação ( $\text{W m}^{-2}$ );

$G$  – fluxo de calor no solo ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\rho_a$  – massa específica do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$c_p$  – capacidade de calor específica do ar ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$e_s$  – pressão de saturação do vapor d'água ( $\text{kPa}$ );

$e_a$  – pressão atual do vapor d'água ( $\text{kPa}$ );

$\gamma$  – coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$r_s$  – resistência à difusão de vapor d'água ( $\text{s m}^{-1}$ );

$r_a$  – resistência aerodinâmica ao transporte de vapor d'água ( $\text{s m}^{-1}$ ).

Para calcular o valor de evapotranspiração, o algoritmo foi aprimorado e simplificado por Mu, Zhao e Running (2011), baseando-se na soma da evaporação de solo úmido, da transpiração vegetal e da evaporação da umidade acumulada no dossel, tanto no período noturno, quanto no período diurno. Inicialmente, o produto MOD16 desconsiderava a fração noturna da

evapotranspiração em razão desta ocorrer, em sua maior parte, durante o período diurno (MU et al., 2007).

O produto MOD16 é elaborado pela combinação de dados de sensoriamento remoto, fazendo uso de outros produtos do próprio sensor MODIS, e dados meteorológicos de superfície. São três os produtos orbitais utilizados: o MOD12, com resolução espacial de 1 km e resolução temporal anual, diz respeito a dados referentes ao uso e ocupação do solo; MOD15, com resolução espacial de 1 km e resolução temporal de 8 dias, é referente à fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e ao índice de área foliar e o MOD43, também com 1 km de resolução espacial e resolução temporal de 8 dias, fornece dados de albedo (MU et al., 2007).

No que se refere aos dados meteorológicos, têm-se a radiação solar incidente, a temperatura média do ar durante o dia, temperatura mínima do ar, umidade específica e pressão de vapor d'água; todos esses dados são oriundos da *Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)*, base de dados da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, sendo interpolados para resolução espacial de 1 km, mesma resolução dos produtos MODIS utilizados (HU; JIA; MENENTI, 2015; MU; ZHAO; RUNNING, 2011).

Foram utilizados, neste trabalho, dados de evapotranspiração do produto MOD16, disponibilizados na escala de  $\text{mm } 8\text{d}^{-1}$  para o ano de 2014, adquiridos de forma gratuita diretamente do endereço eletrônico do grupo de pesquisas *Numerical Terradynamic Simulation Group (NTSG)* da Universidade de Montana. Vale ressaltar que a evapotranspiração do produto MOD16 é estimada na escala diária e disponibilizada em escalas de 8 dias, mensal e anual, equivalentes a soma durante o período de tempo correspondente. Isto é, a ET na unidade  $\text{mm } 8\text{d}^{-1}$  corresponde à soma de evapotranspiração, durante um período de 8 dias.

### 3.3.3 Manipulação dos dados orbitais

A seguir, será descrito o processo de manipulação dos dados orbitais utilizados neste trabalho.

#### 3.3.3.1 Evapotranspiração do produto DMET

Os dados diários de evapotranspiração do produto DMET foram importados para o programa *Integrated Land and Water Information System* (ILWIS), versão 3.72, ainda no formato e projeção original dos arquivos. Esse processo de importação foi realizado por meio da caixa de ferramentas GEONETCast, versão 1.6. O GEONETCast é um sistema global de distribuição de informação que tem por objetivo a disseminação de dados ambientais e produtos de satélites para usuários de todo o globo (MAATHUIS et al., 2011).

Para otimizar os processos de importação e processamento em lote dos dados diários do produto DMET, foram desenvolvidas rotinas, a partir de comandos MSDOS e arquivos no formato *batch* (.bat). Essas rotinas *batch lopping* foram utilizadas para a importação dos dados para o ILWIS, reprojeção dos mesmos para a projeção Geográfica e datum WGS84; sendo que para delimitação da área de estudo foi determinado um retângulo envolvente de maneira que compreendesse a área de estudo, ou seja, o Estado de Minas Gerais.

Os valores diários de evapotranspiração foram extraídos do pixel correspondente às coordenadas geográficas das estações meteorológicas de superfície utilizadas, fornecidas pelos responsáveis do INMET. Em seguida, os valores obtidos foram exportados para uma planilha eletrônica, na qual foram gerados gráficos de dispersão linear para a correlação linear entre as duas diferentes fontes de dados, estações meteorológicas de superfície e plataformas orbitais.

### 3.3.3.2 Evapotranspiração do produto MOD16

Para contemplar a cobertura global, o produto de evapotranspiração MOD16 está dividido em 286 cenas (HU; JIA; MENENTI, 2015). De modo que, para a área de estudo considerada, foram necessárias quatro cenas identificadas no catálogo por H13V10, H13V11, H14V10 e H14V11. Estas são disponibilizadas em formato de arquivo HDF e com projeção Sinusoidal. Com o uso do programa *MODIS Reprojection Tool* (MRT), foi feito o mosaico das cenas, bem como a reprojeção das mesmas para projeção Geográfica e datum WGS84; além da alteração do formato de saída dos dados, os quais foram convertidos para GeoTIFF, formato padrão de metadados *raster*.

Os valores de evapotranspiração do produto MOD16, assim como efetuado com o produto DMET, foram extraídos do pixel correspondente às coordenadas geográficas das estações meteorológicas de superfície. Contudo, seguindo as recomendações do manual do produto, os valores obtidos para cada pixel foram multiplicados por 0,1, fator de escala do produto.

### 3.3.4 Comparação e análise dos resultados obtidos

Para efeito de comparação, as evapotranspirações por produtos orbitais e as estimativas de evapotranspiração por dados de estações meteorológicas foram convertidas para a mesma escala de tempo do produto MOD16, isto é,  $\text{mm } 8\text{d}^{-1}$ . Assim, as evapotranspirações oriundas do produto DMET e das estações meteorológicas da rede do INMET foram somadas a cada 8 dias.

Uma vez na mesma escala de tempo, os dados foram analisados por meio de gráficos de dispersão linear para a correlação linear entre as três diferentes fontes de dados. Em seguida, foram comparados por meio dos seguintes métodos de desempenho estatísticos: coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro médio absoluto (EMA), erro médio percentual (EMP) e raiz do erro quadrático médio (REQM).

Os erros dos modelos, EMA, EMP e REQM foram obtidos, respectivamente, pelas Equações 20, 21 e 22 descritas a seguir:

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^N |E_i - O_i|}{N} \quad (20)$$

$$EMP = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \frac{E_i - O_i}{O_i} \right|}{N} \times 100 \quad (21)$$

$$REQM = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (22)$$

em que,

*EMA* – erro médio absoluto (mm 8d<sup>-1</sup>);

*EMP* – erro médio percentual (%);

*REQM* – raiz do erro quadrático médio (mm 8d<sup>-1</sup>);

*E<sub>i</sub>* – valores estimados de evapotranspiração (mm 8d<sup>-1</sup>);

*O<sub>i</sub>* – valores observados de evapotranspiração (mm 8d<sup>-1</sup>);

*N* – número de observações.

Para a análise qualitativa do coeficiente de correlação de Pearson, foi adotada a classificação proposta por Callegari-Jacques (2003) exposta na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos valores do coeficiente de correlação de Pearson (r).

<b>Coeficiente de correlação de Pearson (r)</b>	<b>Classificação</b>
$0,9 \leq  r  \leq 1,0$	Correlação linear muito forte
$0,7 \leq  r  < 0,9$	Correlação linear forte
$0,4 \leq  r  < 0,7$	Correlação linear moderada
$0,2 \leq  r  < 0,4$	Correlação linear fraca
$0,0 \leq  r  < 0,2$	Correlação linear muito fraca

Fonte: Do autor (2016).

Deve-se destacar que, por não haver dados suficientes para alguns dias, ocorrendo falhas em horários específicos, optou-se pela retirada dos dias com lacunas de informação do processo de análise, admitindo-se a possibilidade dessas lacunas alterarem a correlação entre os métodos abordados. Assim, apenas os dias que possuíam dados válidos foram avaliados.

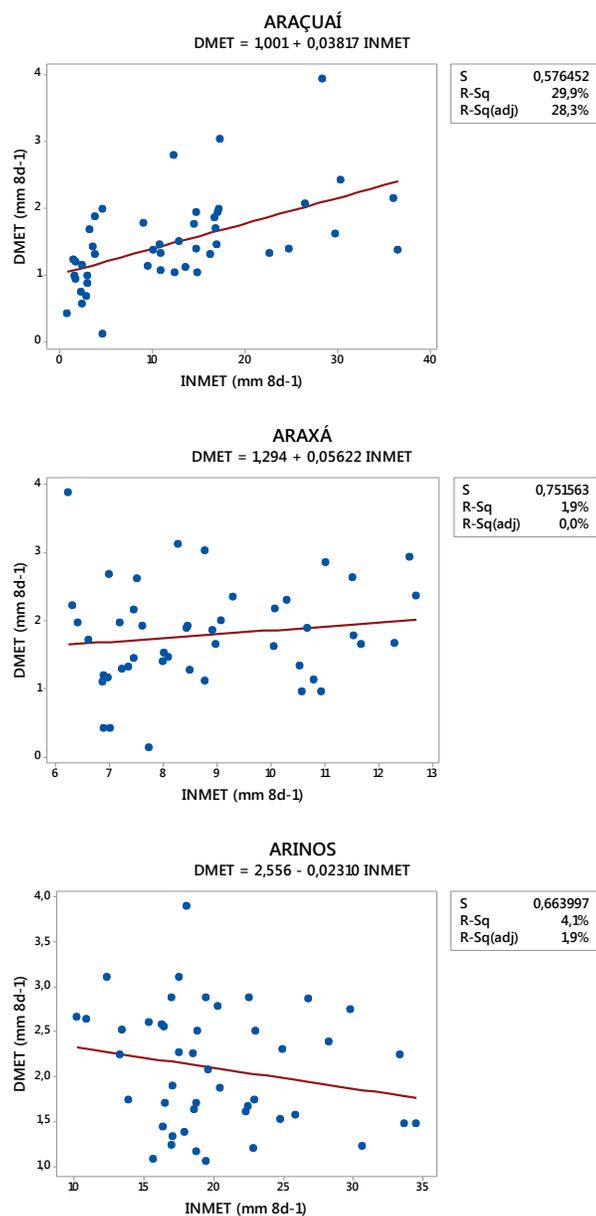


## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Comparação do produto de evapotranspiração (ET) DMET com as estações meteorológicas do INMET**

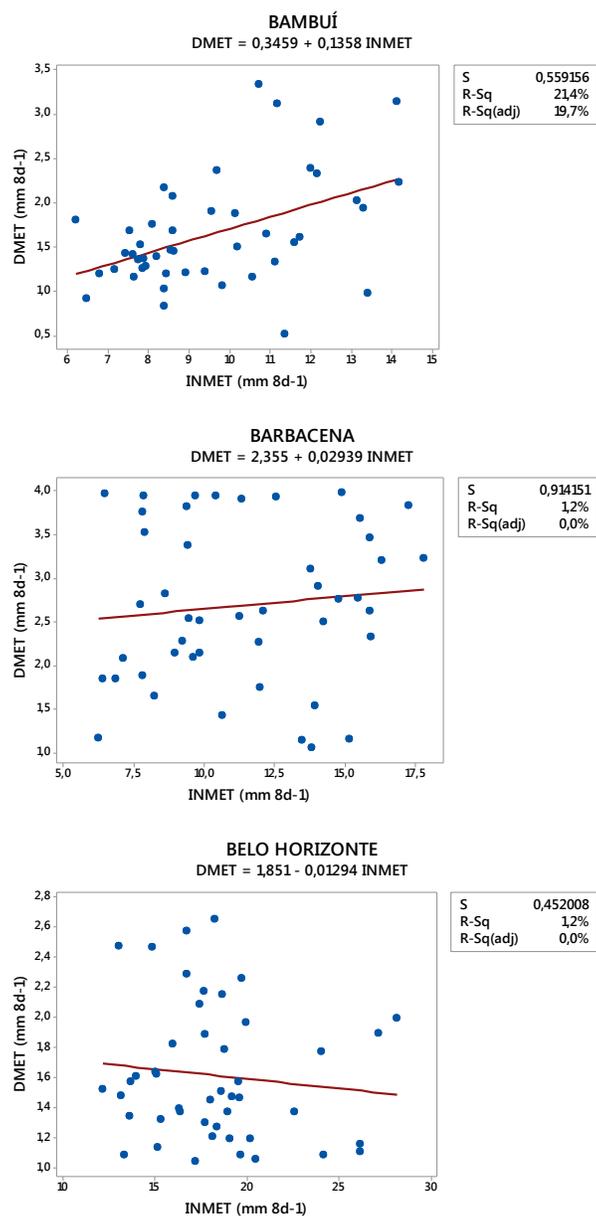
Os resultados apresentados a seguir, da Figura 5 à Figura 16, na forma de regressão linear simples, demonstram a comparação do produto de evapotranspiração DMET com as evapotranspirações obtidas por meio de dados de superfície coletados por estações meteorológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) analisados durante o ano de 2014.

Figura 5 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014.



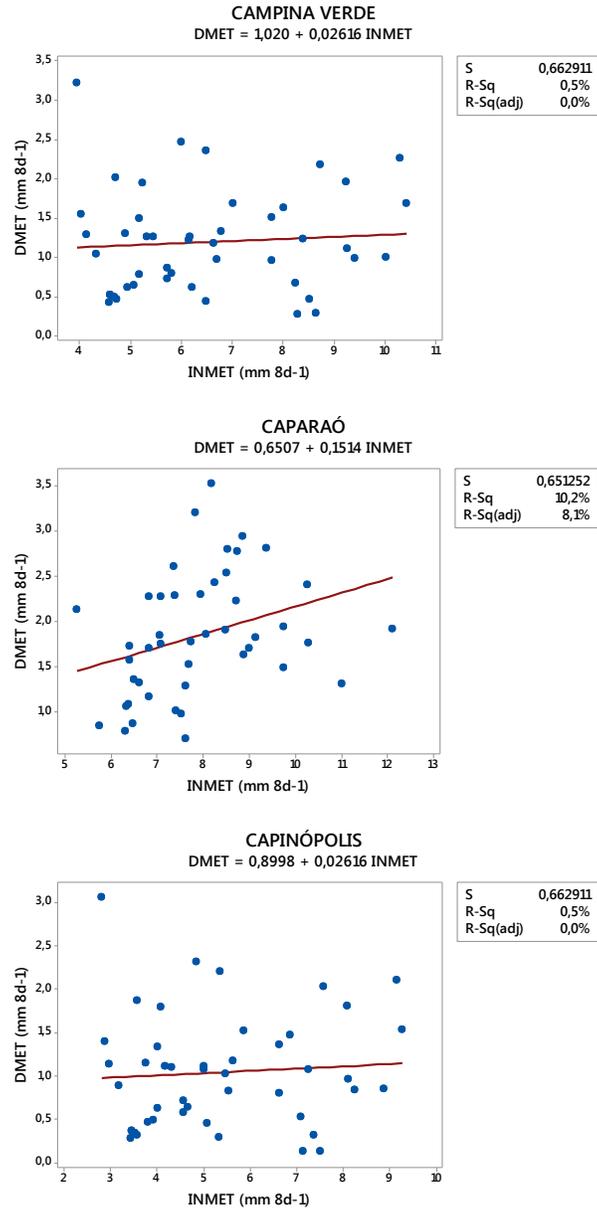
Fonte: Do autor (2016)

Figura 6 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de BambuÍ, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014.



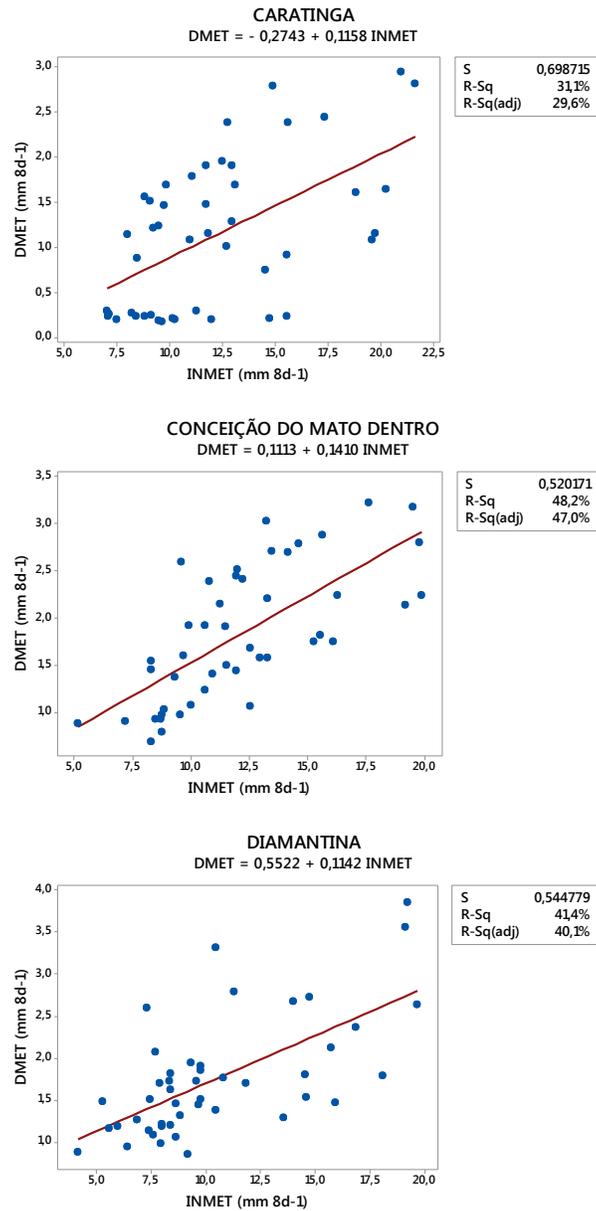
Fonte: Do autor (2016).

Figura 7 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014.



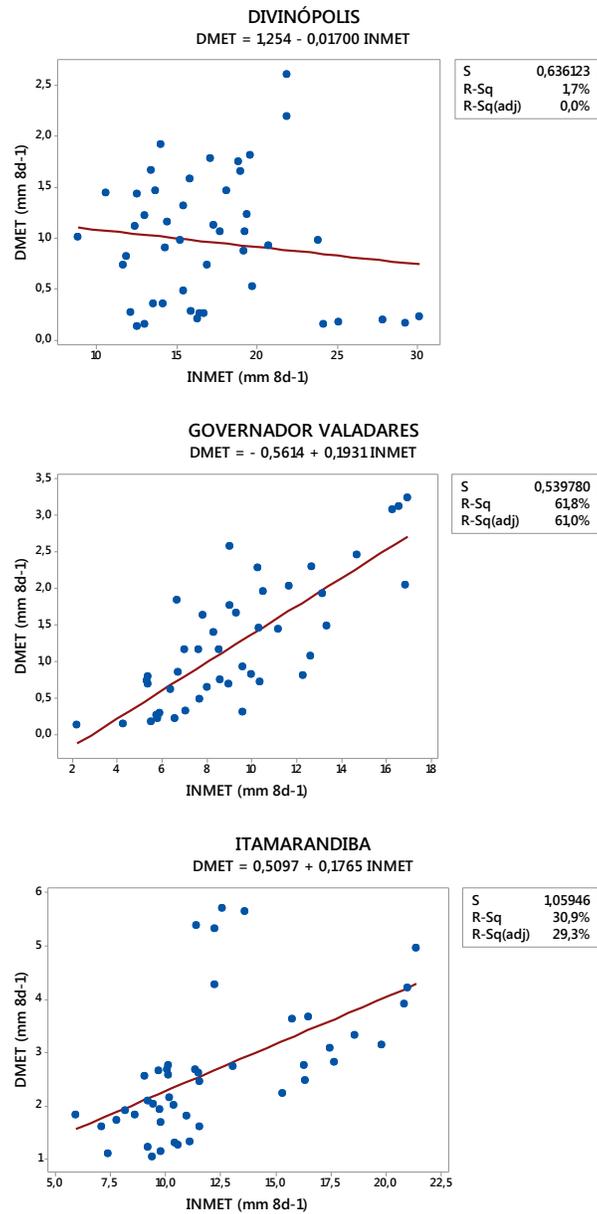
Fonte: Do autor (2016).

Figura 8 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014.



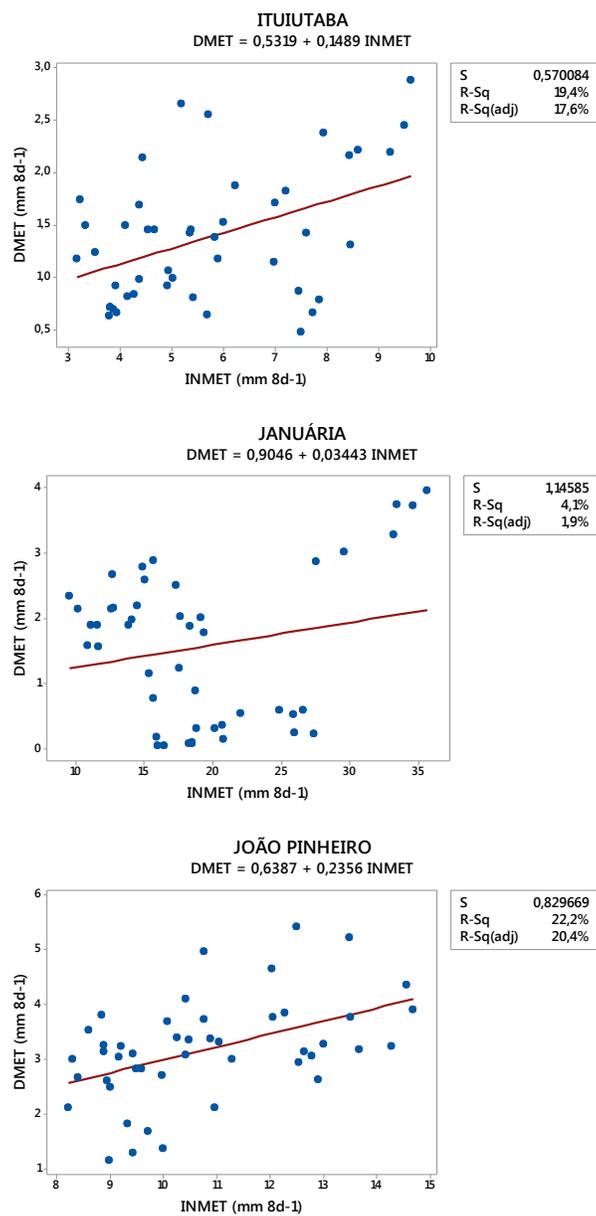
Fonte: Do autor (2016).

Figura 9 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014.



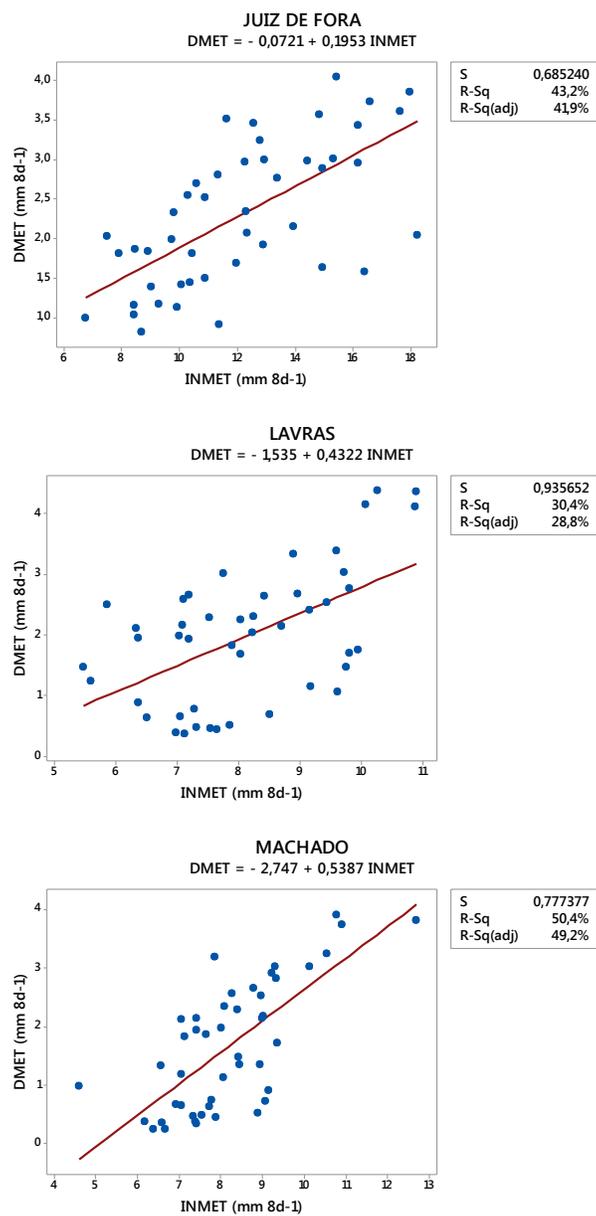
Fonte: Do autor (2016).

Figura 10 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014.



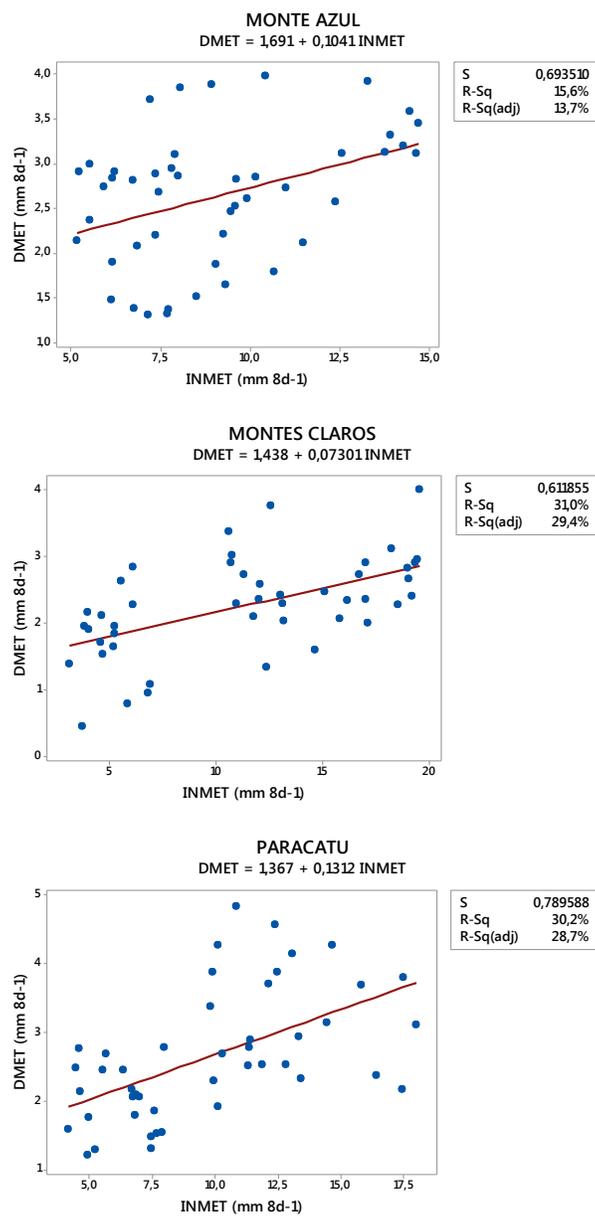
Fonte: Do autor (2016)

Figura 11 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014.



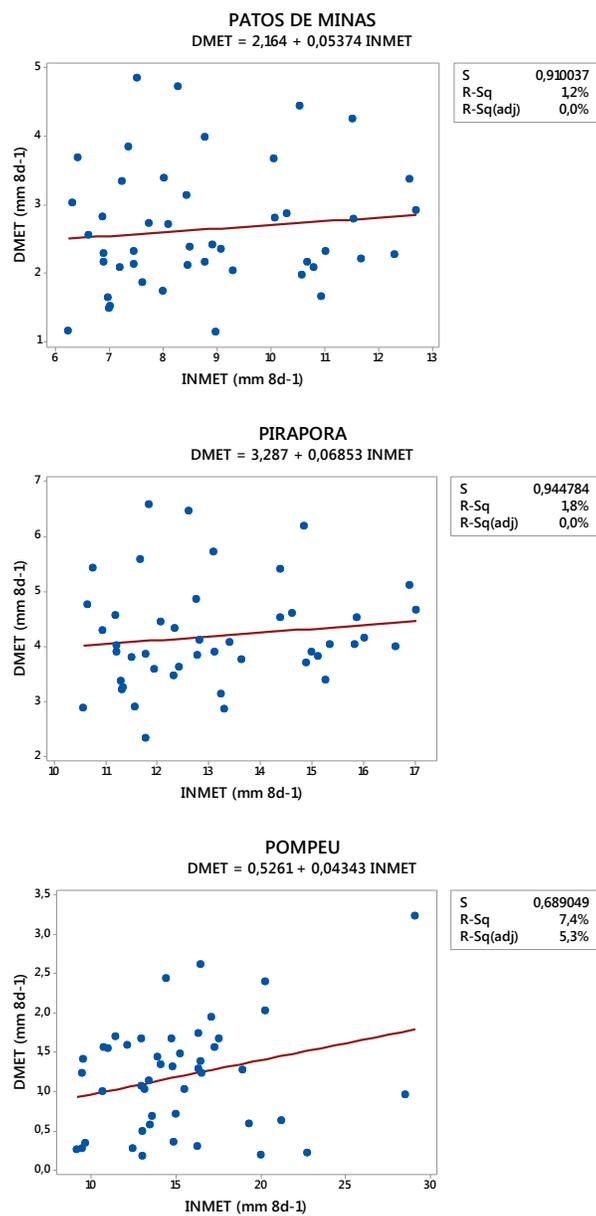
Fonte: Do autor (2016).

Figura 12 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014.



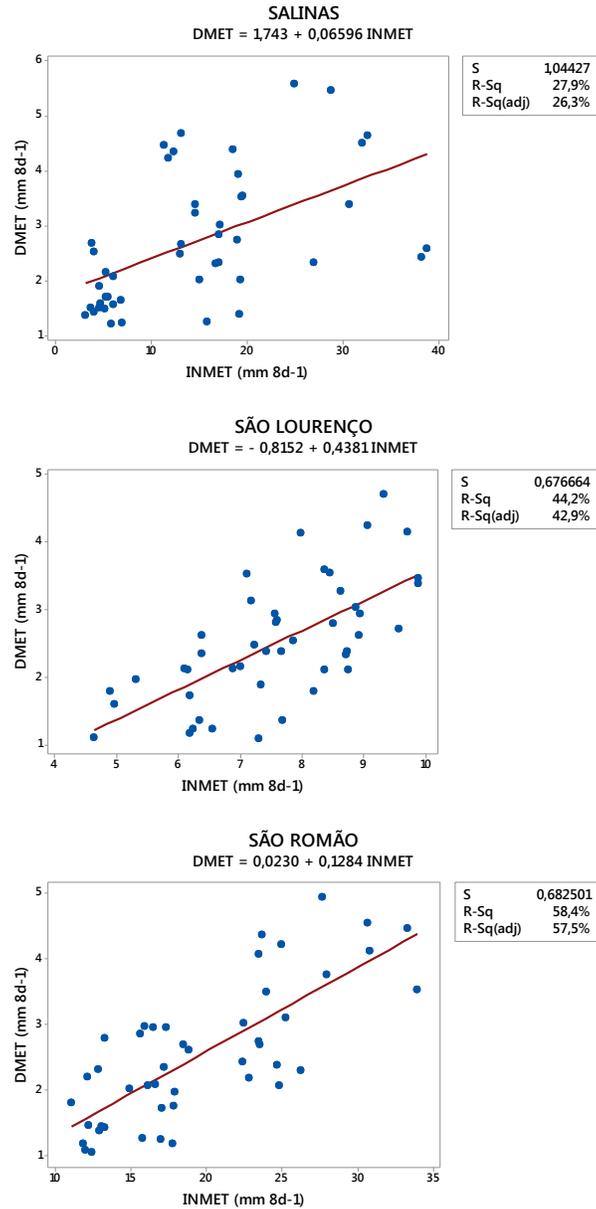
Fonte: Do autor (2016).

Figura 13 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014.



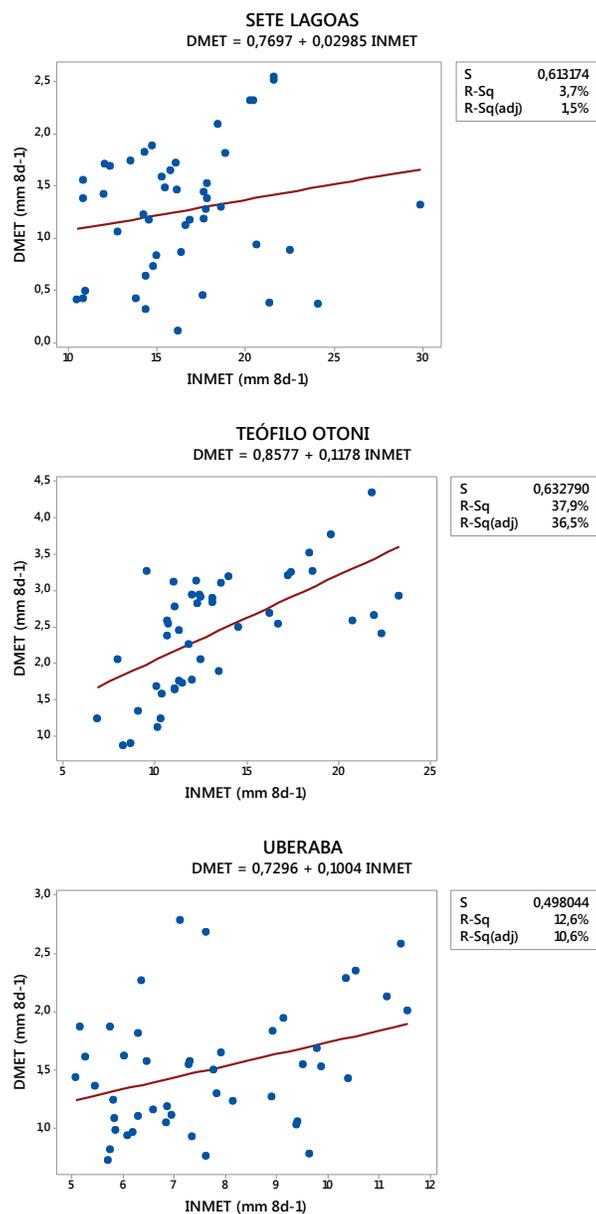
Fonte: Do autor (2016)

Figura 14 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014.



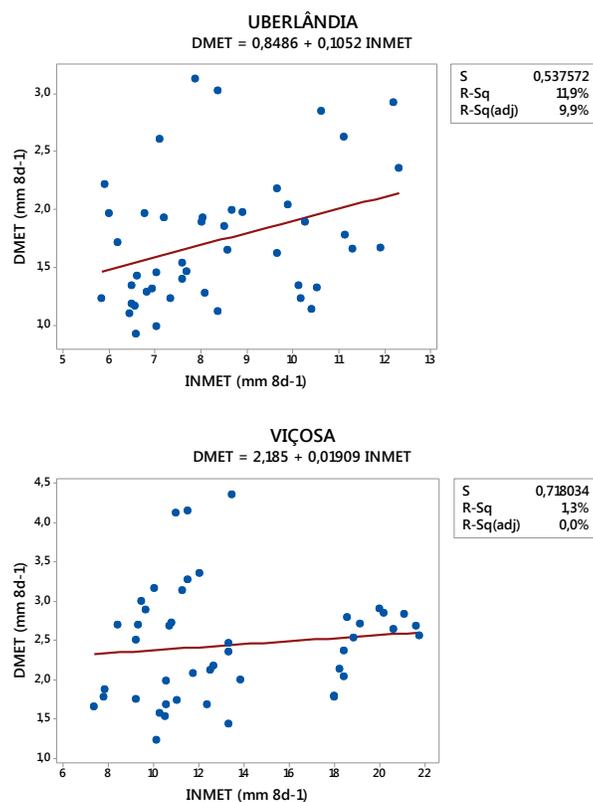
Fonte: Do autor (2016).

Figura 15 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 16 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto DMET e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Diante da dispersão dos pontos e da análise de desempenho estatístico (TABELA 3) observa-se, no geral, correlação linear positiva entre o produto de evapotranspiração DMET e a evapotranspiração obtida com o uso de variáveis de superfície medidas pela rede de estações meteorológicas do INMET utilizada. Apenas as estações de Arinos, Belo Horizonte e Divinópolis apresentaram correlação linear negativa, ou seja, enquanto há um aumento dos valores variável INMET no eixo x, ocorre diminuição dos valores da variável DMET no eixo y.

Tabela 3 – Avaliação do desempenho estatístico das evapotranspirações do produto DMET e da rede do INMET.

Estações	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> (adj.)	r	r (adj.)	EMA	EMP	REQM
Araçuaí	0,30	0,28	0,55	0,53	10,94	1,92	74,22
Araxá	0,02	0,00	0,14	0,00	7,03	1,73	47,70
Arinos	0,04	0,02	0,20	0,14	18,20	1,95	123,44
Bambuí	0,21	0,20	0,46	0,44	7,96	1,80	53,99
Barbacena	0,01	0,00	0,11	0,00	8,74	1,66	59,25
Belo Horizonte	0,01	0,00	0,11	0,00	16,71	1,98	113,32
Campina Verde	0,01	0,00	0,07	0,00	5,35	1,78	36,30
Caparaó	0,10	0,08	0,32	0,28	5,94	1,67	40,29
Capinópolis	0,01	0,00	0,07	0,00	4,35	1,75	29,52
Caratinga	0,31	0,30	0,56	0,54	11,09	1,97	75,21
Conceição do Mato Dentro	0,48	0,47	0,69	0,69	10,35	1,85	70,17
Diamantina	0,41	0,40	0,64	0,63	8,72	1,81	59,18
Divinópolis	0,02	0,00	0,13	0,00	16,24	2,05	110,17
Governador Valadares	0,62	0,61	0,79	0,78	8,00	1,89	54,29
Itamarandiba	0,31	0,29	0,56	0,54	9,56	1,70	64,82
Ituiutaba	0,19	0,18	0,44	0,42	4,36	1,65	29,55
Januária	0,04	0,02	0,20	0,14	17,59	2,00	119,33
João Pinheiro	0,22	0,20	0,47	0,45	7,61	1,53	51,63
Juiz de Fora	0,43	0,42	0,66	0,65	9,83	1,76	66,66
Lavras	0,30	0,29	0,55	0,54	6,16	1,64	41,76
Machado	0,50	0,49	0,71	0,70	6,53	1,73	44,29
Monte Azul	0,16	0,14	0,39	0,37	6,45	1,54	43,73
Montes Claros	0,31	0,29	0,56	0,54	9,06	1,74	61,47
Paracatu	0,30	0,29	0,55	0,54	7,15	1,59	48,51
Patos de Minas	0,01	0,00	0,11	0,00	6,19	1,52	41,95
Pirapora	0,02	0,00	0,14	0,00	8,96	1,48	60,74
Pompeu	0,07	0,05	0,27	0,23	14,15	2,00	95,98
Salinas	0,28	0,26	0,53	0,51	11,96	1,77	81,10
São Lourenço	0,44	0,43	0,66	0,65	5,07	1,46	34,39
São Romão	0,58	0,58	0,76	0,76	17,10	1,89	115,98
Sete Lagoas	0,04	0,02	0,19	0,12	15,21	2,01	103,19
Teófilo Otoni	0,38	0,37	0,62	0,60	10,98	1,78	74,44
Uberaba	0,13	0,11	0,35	0,33	6,17	1,75	41,87
Uberlândia	0,12	0,10	0,35	0,31	6,69	1,73	45,36
Viçosa	0,01	0,00	0,12	0,00	11,04	1,78	74,91

Fonte: Do autor (2016).

Coefficiente de determinação (r<sup>2</sup>), coeficiente de correlação de Pearson (r), erro médio absoluto (EMA), erro médio percentual (EMP) e raiz do erro quadrático médio (REQM).

Por meio da análise da Tabela 3, observa-se que, para o período analisado, as estações de Governador Valadares, São Romão e Machado apresentaram os maiores coeficientes de determinação, com valor de  $r^2$  iguais a 0,61, 0,58 e 0,49, respectivamente e foram classificadas como de correlação linear forte, pois os seus respectivos coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) foram iguais 0,78, 0,76 e 0,70. Correlação linear moderada foi encontrada para as estações de Araçuaí ( $r = 0,53$ ), Bambuí ( $r = 0,44$ ), Caratinga ( $r = 0,54$ ), Conceição do Mato Dentro ( $r = 0,69$ ), Diamantina ( $r = 0,63$ ), Itamarandiba ( $r = 0,54$ ), Ituiutaba ( $r = 0,42$ ), João Pinheiro ( $r = 0,45$ ), Juiz de Fora ( $r = 0,65$ ), Lavras, Montes Claros e Paracatu ( $r = 0,54$ ), Salinas ( $r = 0,51$ ), São Lourenço ( $r = 0,65$ ) e Teófilo Otoni ( $r = 0,60$ ). Foram classificadas como de correlação linear fraca as estações de Caparaó ( $r = 0,28$ ), Monte Azul ( $r = 0,37$ ), Pompeu ( $r = 0,23$ ), Uberaba ( $r = 0,33$ ) e Uberlândia ( $r = 0,31$ ). As estações de Arinos e Januária, ambas com valores de  $r$  igual a 0,14, além de Sete Lagoas ( $r = 0,12$ ) apresentaram correlação linear muito fraca. O mesmo aconteceu com as estações de Araxá, Barbacena, Belo Horizonte, Campina Verde, Capinópolis, Divinópolis, Patos de Minas, Pirapora e Viçosa, pois em todas estas localidades praticamente não houve correlação linear entre a evapotranspiração do produto DMET e da rede de estações meteorológicas do INMET, apresentando valores de coeficiente de correlação de Pearson muito próximos a zero.

A discrepância de desempenho apresentada está associada a resolução espacial do produto de evapotranspiração DMET que é de 3 km e, conforme observado por Corbari, Bissolati e Mancini (2015), a resolução espacial dos dados é determinante para a qualidade dos resultados. Sun et al. (2012) e Sepulcro-Canto et al. (2014) também obtiveram correlação linear forte e valores de  $r$  próximos aos aqui encontrados e destacaram a diferença de resolução espacial entre as variáveis analisadas como determinantes no processo de análise. Já Cruz-Blanco et al. (2014) obtiveram resultados que expressam

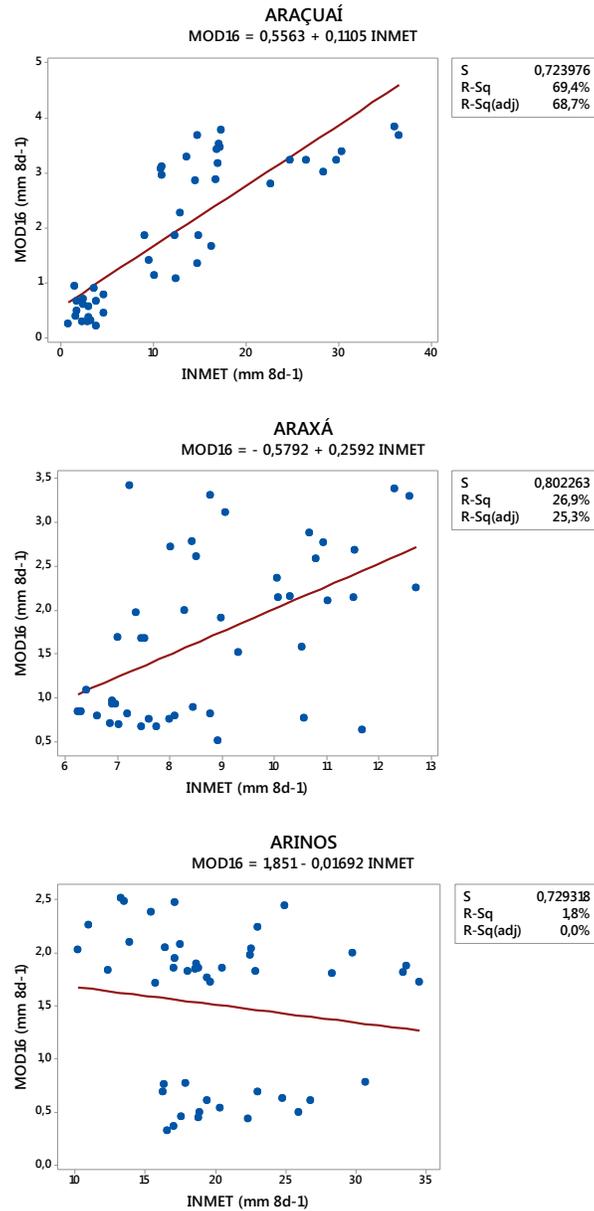
correlação linear muito forte ( $0,9 \leq |r| \leq 1,0$ ) entre a evapotranspiração obtida por um modelo misto, que combina dados de radiação solar estimada por satélite e dados medidos em superfície, e a evapotranspiração estimada pelo método padrão.

Em linhas gerais, o produto DMET superestimou os valores de evapotranspiração para todas as estações analisadas ao longo do ano de 2014, com valores de erro médio absoluto (EMA) variando de 4,35 a 18,20 mm  $8d^{-1}$  e valores de erro médio percentual (EMP) variando de 1,46 a 2,05 %. Essa superestimativa aponta para um maior espalhamento dos pontos, indicando o afastamento dos valores de evapotranspiração expressos pelo produto DMET em relação aos valores de evapotranspiração obtidos com dados de estações meteorológicas da rede do INMET. Em relação aos valores da raiz do erro quadrático médio (REQM), estes variaram de 29,52 a 123,44 mm  $8d^{-1}$ , apontando baixa acurácia. Conforme observado em Sun et al. (2012), tal situação é decorrente de erros presentes no algoritmo do próprio produto associados à influência de nuvens.

#### **4.2 Comparação do produto de evapotranspiração (ET) MOD16 com as estações meteorológicas do INMET**

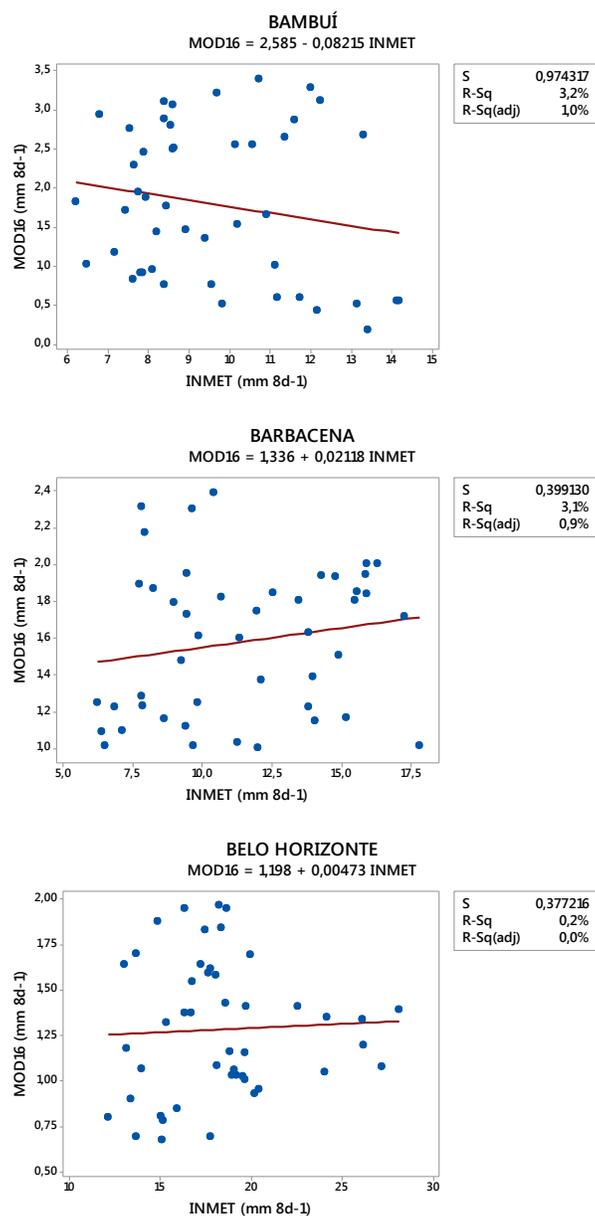
A seguir, serão apresentados da Figura 17 à Figura 28 os resultados na forma de regressão linear simples, demonstram a comparação do produto de evapotranspiração MOD16 com as evapotranspirações obtidas por estações meteorológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), analisados durante o ano de 2014.

Figura 17 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014.



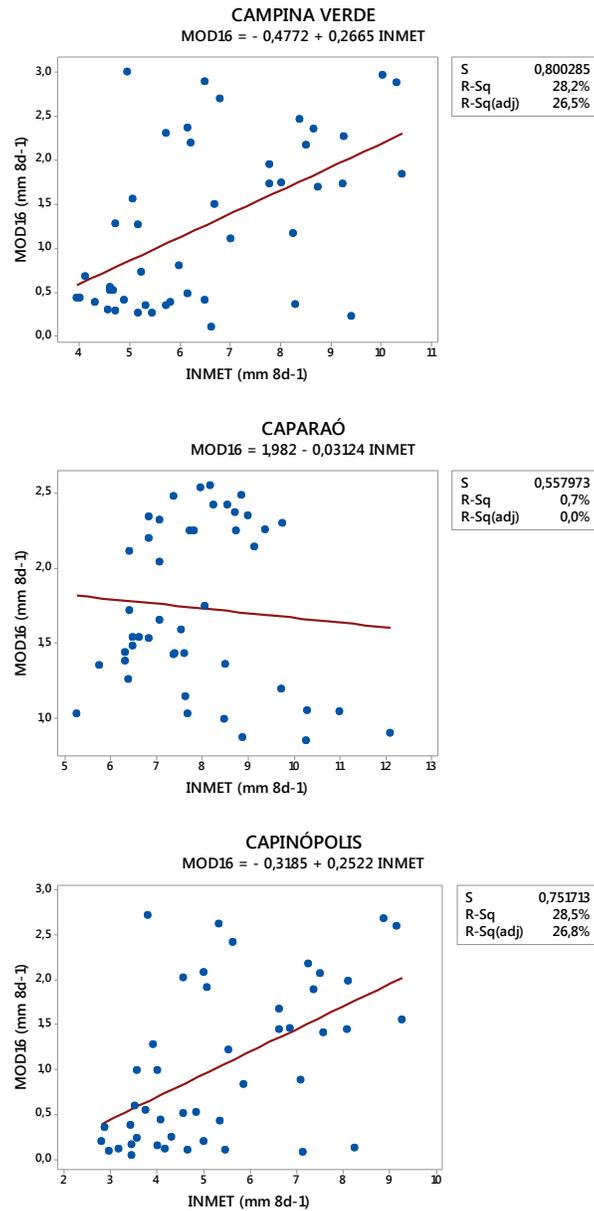
Fonte: Do autor (2016).

Figura 18 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014.



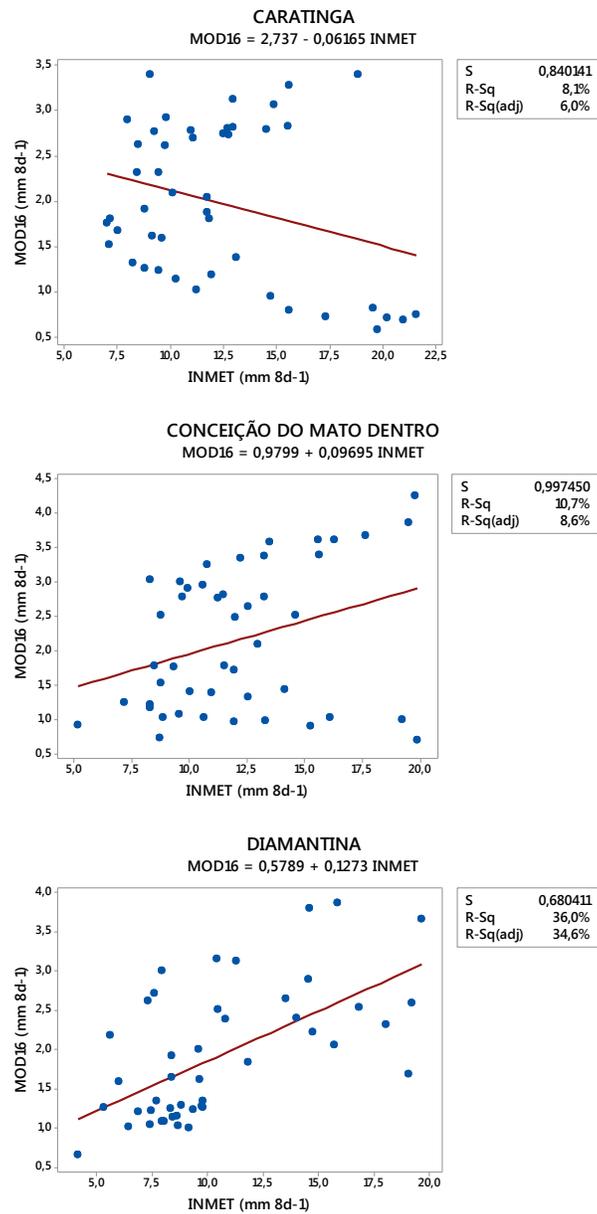
Fonte: Do autor (2016).

Figura 19 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014.



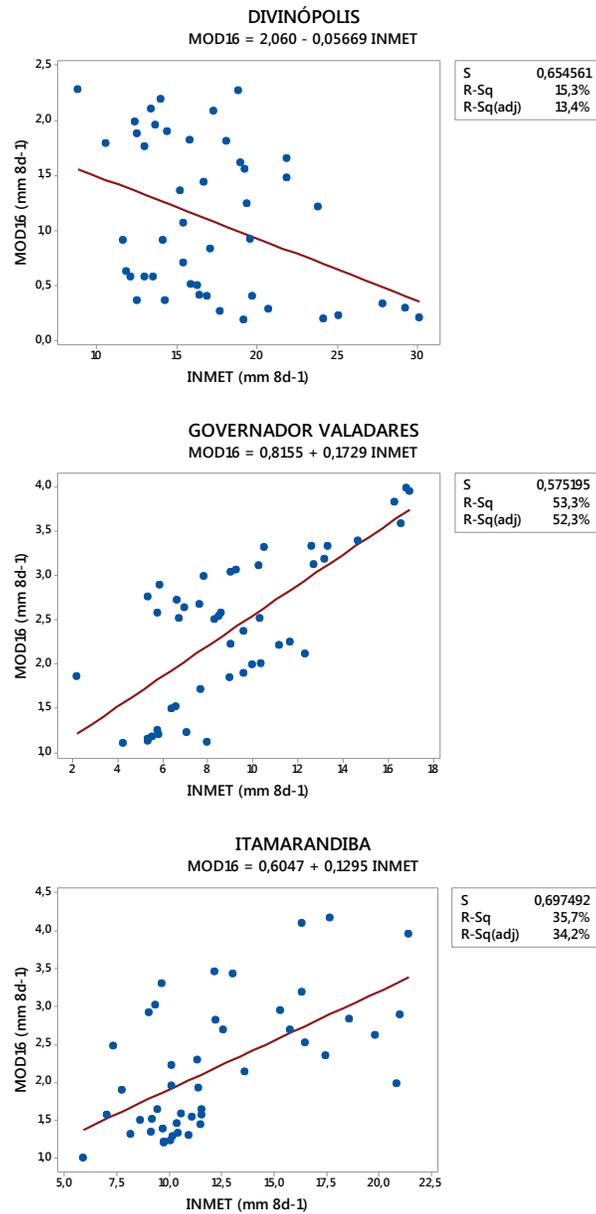
Fonte: Do autor (2016).

Figura 20 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014.



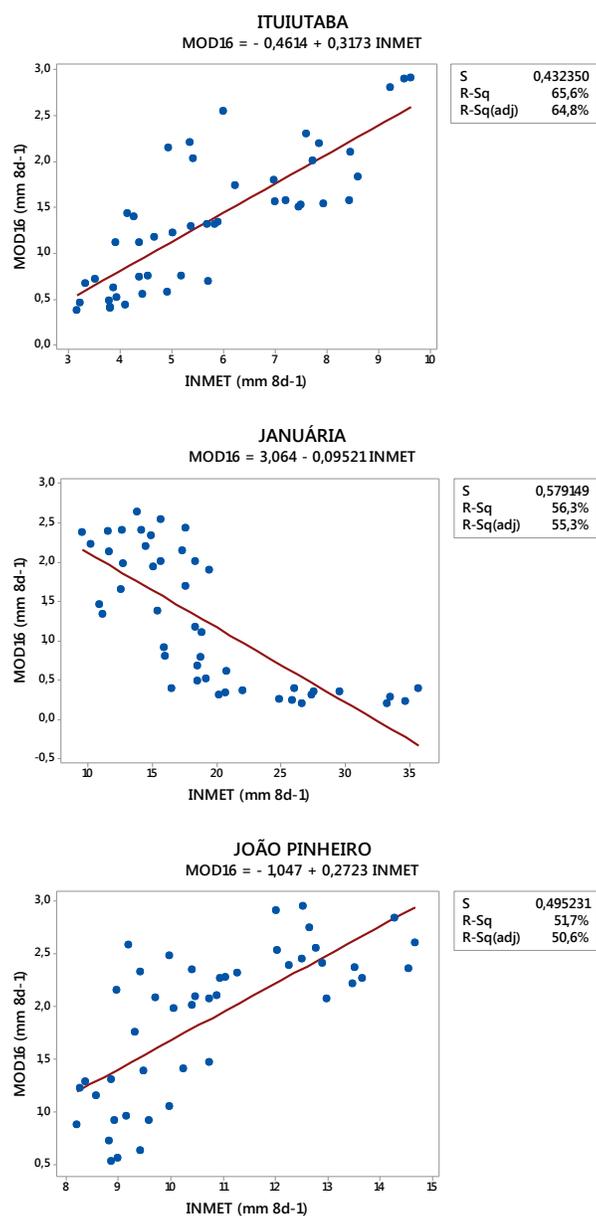
Fonte: Do autor (2016).

Figura 21 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014.



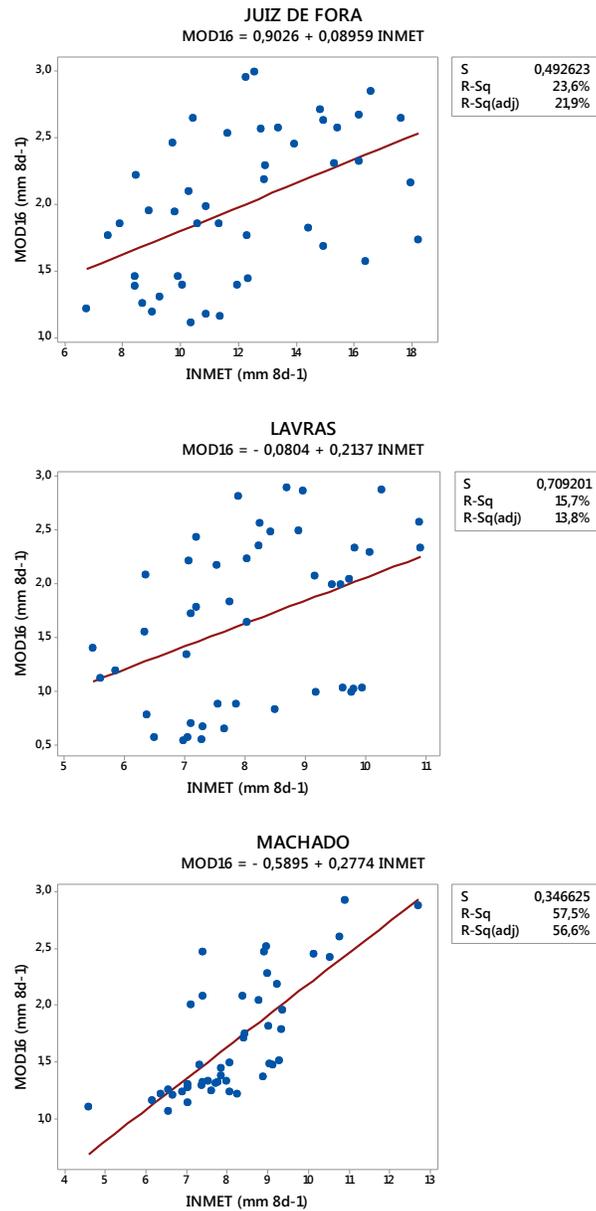
Fonte: Do autor (2016).

Figura 22 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014.



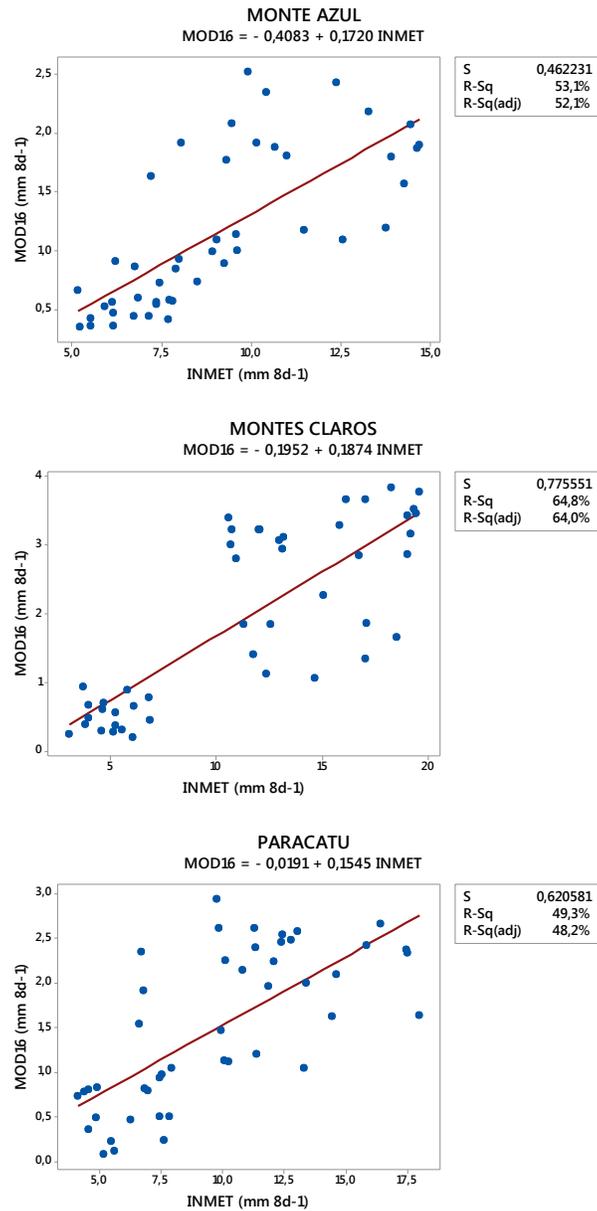
Fonte: Do autor (2016).

Figura 23 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014.



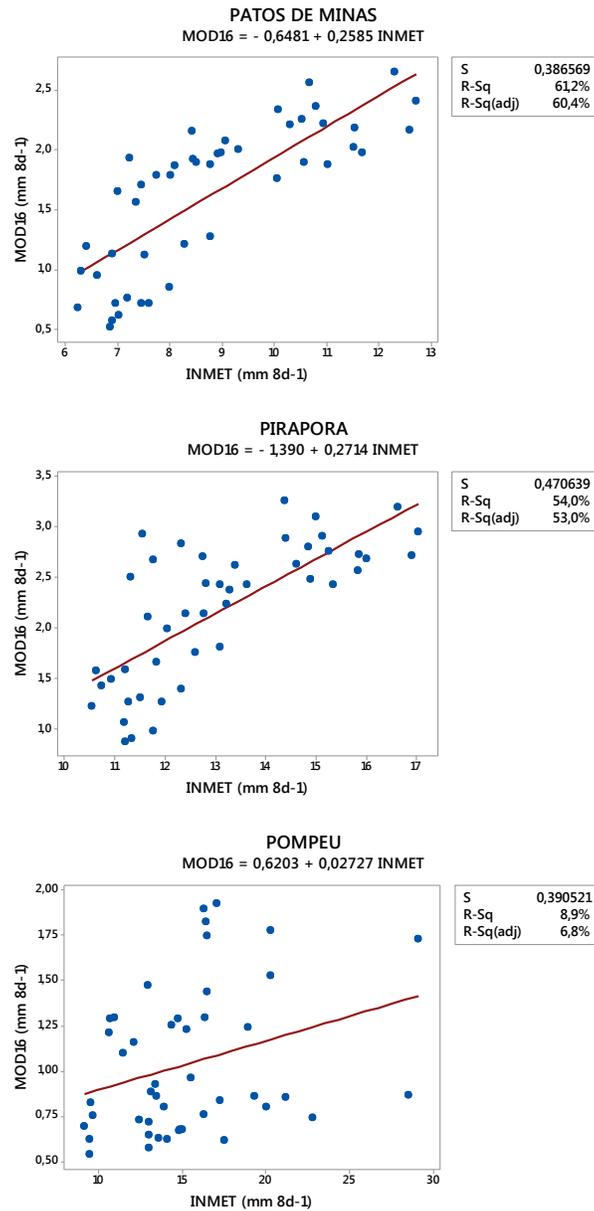
Fonte: Do autor (2016).

Figura 24 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014.



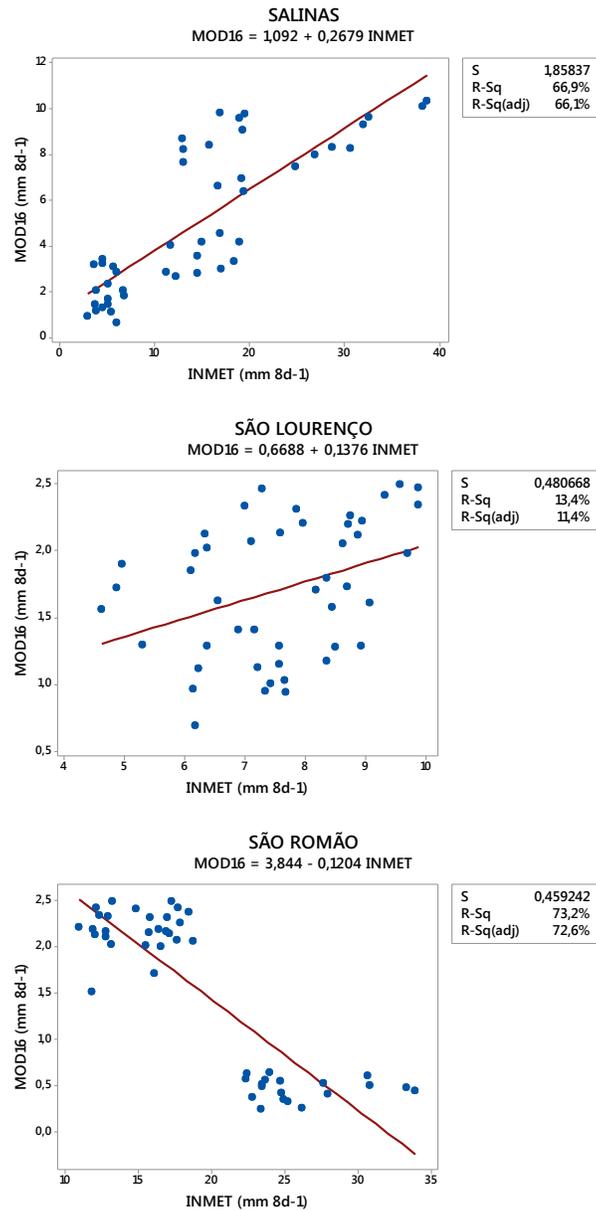
Fonte: Do autor (2016).

Figura 25 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014.



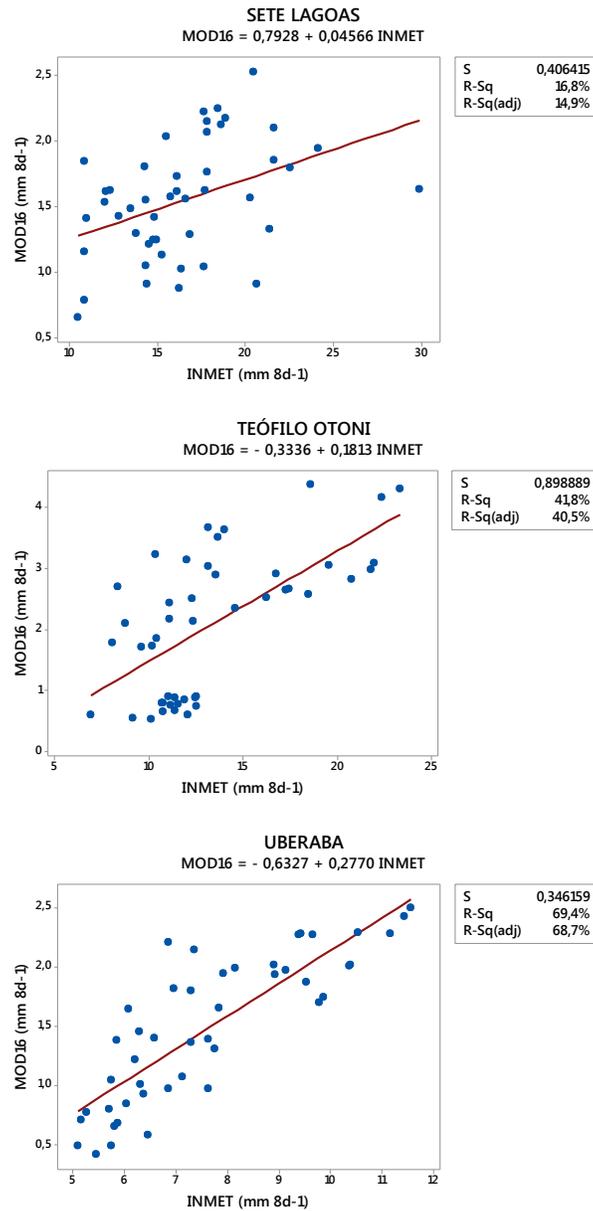
Fonte: Do autor (2016).

Figura 26 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014.



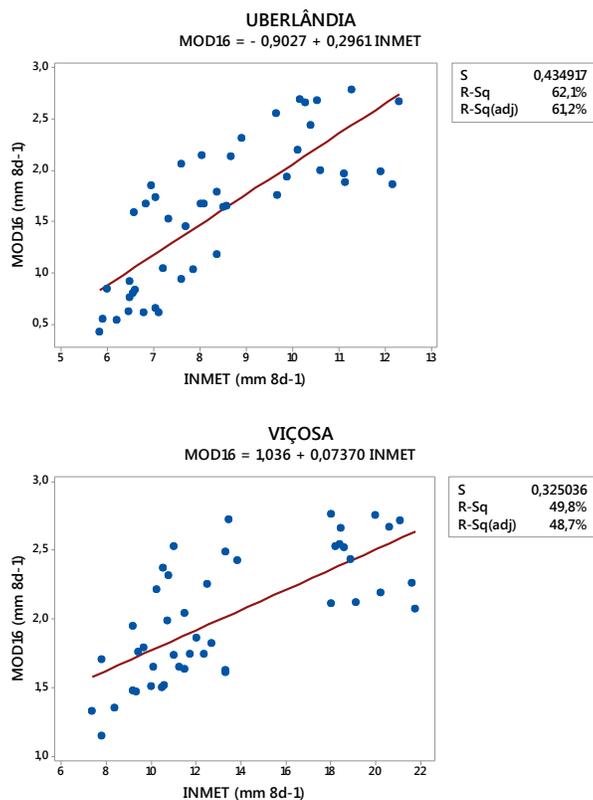
Fonte: Do autor (2016).

Figura 27 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 28 – Diagrama de dispersão entre os valores de evapotranspiração do produto MOD16 e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Diante da dispersão dos pontos e da análise do desempenho estatístico (TABELA 4), observa-se predominantemente correlação linear positiva entre o produto de evapotranspiração MOD16 e a evapotranspiração obtida com o uso de variáveis de superfície medidas pela rede de estações meteorológicas do INMET utilizada. Correlação linear negativa foi observada para as estações de Arinos, Bambuí, Caparaó, Caratinga, Divinópolis, Januária e São Romão. Quando comparados aos resultados anteriores, no que diz respeito à classificação do coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) proposta por Callegari-

Jacques (2003), aumentou o número de estações que foram classificadas como de correlação linear forte, apontando, assim, uma melhora na correlação entre as variáveis analisadas.

Tabela 4 – Avaliação do desempenho estatístico das evapotranspirações do produto MOD16 e da rede do INMET.

(Continua)

<b>Estações</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>r<sup>2</sup> (adj.)</b>	<b>r</b>	<b>r (adj.)</b>	<b>EMA</b>	<b>EMP</b>	<b>REQM</b>
Araçuaí	0,69	0,69	0,83	0,83	10,49	1,84	71,15
Araxá	0,27	0,25	0,52	0,50	7,12	1,75	48,26
Arinos	0,02	0,00	0,14	0,00	18,78	2,01	127,38
Bambuú	0,03	0,01	0,18	0,10	7,82	1,77	53,01
Barbacena	0,03	0,01	0,18	0,09	9,85	1,87	66,79
Belo Horizonte	0,00	0,00	0,05	0,00	17,04	2,02	115,56
Campina Verde	0,28	0,27	0,53	0,51	5,28	1,75	35,79
Caparaó	0,01	0,00	0,08	0,00	6,05	1,70	41,06
Capinópolis	0,28	0,27	0,53	0,52	4,35	1,75	29,51
Caratinga	0,08	0,06	0,29	0,24	10,25	1,82	69,51
Conceição do Mato Dentro	0,11	0,09	0,33	0,29	10,01	1,79	67,92
Diamantina	0,36	0,35	0,60	0,59	8,56	1,78	58,07
Divinópolis	0,15	0,13	0,39	0,37	16,12	2,04	109,33
Governador Valadares	0,53	0,52	0,73	0,72	6,81	1,61	46,22
Itamarandiba	0,36	0,34	0,60	0,58	10,04	1,78	68,06
Ituiutaba	0,66	0,65	0,81	0,80	4,38	1,66	29,72
Januária	0,56	0,55	0,75	0,74	17,92	2,03	121,53
João Pinheiro	0,52	0,51	0,72	0,71	8,90	1,79	60,37
Juiz de Fora	0,24	0,22	0,49	0,47	10,14	1,82	68,74
Lavras	0,16	0,14	0,40	0,37	6,48	1,73	43,95
Machado	0,58	0,57	0,76	0,75	6,51	1,73	44,19
Monte Azul	0,53	0,52	0,73	0,72	7,93	1,90	53,79
Montes Claros	0,65	0,64	0,81	0,80	9,40	1,80	63,76
Paracatu	0,49	0,48	0,70	0,69	8,31	1,84	56,37
Patos de Minas	0,61	0,60	0,78	0,78	7,19	1,77	48,77
Pirapora	0,54	0,53	0,73	0,73	10,97	1,81	74,38
Pompeu	0,09	0,07	0,30	0,26	14,30	2,03	97,02
Salinas	0,67	0,66	0,82	0,81	9,65	1,43	65,43
São Lourenço	0,13	0,11	0,37	0,34	5,86	1,68	39,77
São Romão	0,73	0,73	0,86	0,85	18,17	2,01	123,21
Sete Lagoas	0,17	0,15	0,41	0,39	14,93	1,97	101,27

Tabela 4 – Avaliação do desempenho estatístico das evapotranspirações do produto MOD16 e da rede do INMET.

(Continua)

<b>Estações</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>r<sup>2</sup> (adj.)</b>	<b>r</b>	<b>r (adj.)</b>	<b>EMA</b>	<b>EMP</b>	<b>REQM</b>
Teófilo Otoni	0,42	0,41	0,65	0,64	11,31	1,83	76,74
Uberaba	0,69	0,69	0,83	0,83	6,18	1,75	41,92
Uberlândia	0,62	0,61	0,79	0,78	6,83	1,76	46,33
Viçosa	0,50	0,49	0,71	0,70	11,46	1,85	77,70

Coefficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), erro médio absoluto (EMA), erro médio percentual (EMP) e raiz do erro quadrático médio (REQM).  
Fonte: Do autor (2016)

Por meio da análise da Tabela 4, percebe-se que o maior coeficiente de determinação obtido,  $r^2 = 0,73$ , foi registrado para a estação de São Romão, de maneira que esta apresentou correlação linear forte com valor de  $r$  igual a 0,85. Com mesma classificação também aparecem as estações de Araçuaí e Uberaba ( $r = 0,83$ ), Salinas ( $r = 0,81$ ), Ituiutaba e Montes Claros ( $r = 0,80$ ), Patos de Minas e Uberlândia ( $r = 0,78$ ), Machado ( $r = 0,75$ ), Januária ( $r = 0,74$ ), Pirapora ( $r = 0,73$ ), Governador Valadares e Monte Azul ( $r = 0,72$ ), João Pinheiro ( $r = 0,71$ ) e Viçosa ( $r = 0,70$ ). Correlação linear moderada foi observada em Paracatu ( $r = 0,69$ ), Teófilo Otoni ( $r = 0,64$ ), Diamantina ( $r = 0,59$ ), Itamarandiba ( $r = 0,58$ ), Capinópolis ( $r = 0,52$ ), Campina Verde ( $r = 0,51$ ), Araxá ( $r = 0,50$ ) e Juiz de Fora ( $r = 0,47$ ). Correlação linear fraca foi observada em Sete Lagoas ( $r = 0,39$ ), Divinópolis e Lavras ( $r = 0,37$ ), São Lourenço ( $r = 0,34$ ), Conceição do Mato Dentro ( $r = 0,29$ ), Pompeu ( $r = 0,26$ ) e Caratinga ( $r = 0,24$ ). Já as estações de Bambuí ( $r = 0,10$ ) e Barbacena ( $r = 0,09$ ) apresentaram correlação linear muito fraca, a exemplo de Arinos, Belo Horizonte e Caparaó que, com valores de coeficiente de correlação de Pearson muito próximos a zero, praticamente não apresentaram correlação linear entre a evapotranspiração do produto MOD16 e da rede de estações meteorológicas do INMET.

De modo geral, o produto MOD16 superestimou os valores de evapotranspiração em relação aos valores obtidos pelo método padrão a partir de

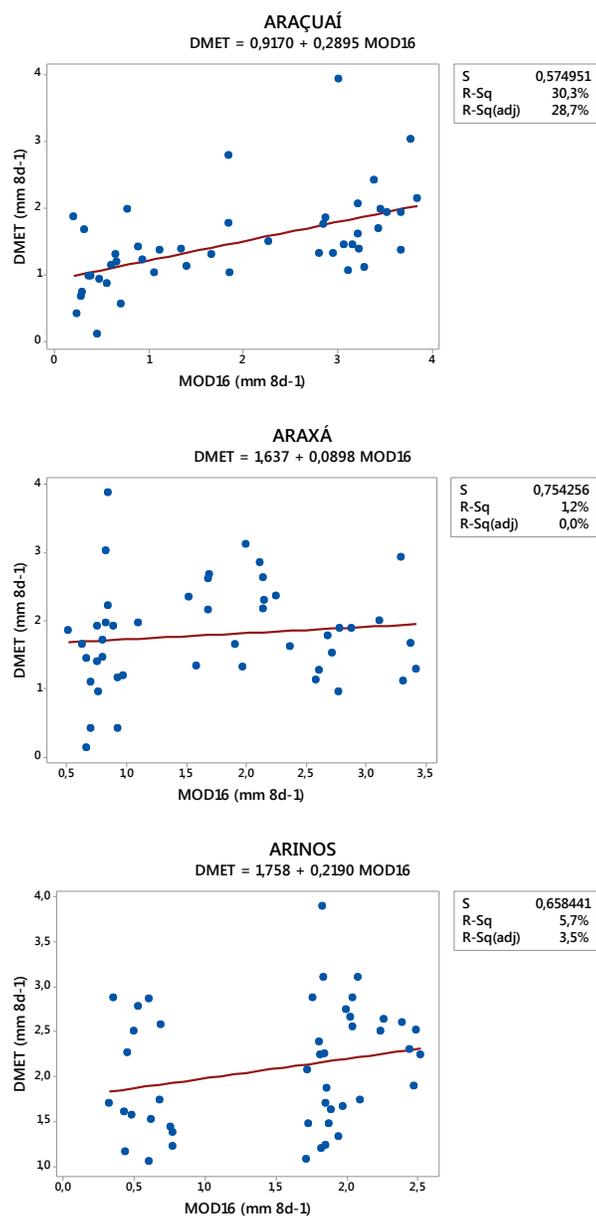
dados de superfície oriundos de estações meteorológicas da rede do INMET, durante o ano de 2014. Os valores de erro médio absoluto (EMA) variaram de 4,35 a 18,78 mm d<sup>-1</sup> e os valores de erro médio percentual (EMP) variaram de 1,43 a 2,04 %. Já os valores da raiz do erro quadrático médio (REQM) variaram de 29,51 a 127,38 mm d<sup>-1</sup>. Esses valores de variação aproximam-se dos resultados anteriores, mas diferem dos resultados encontrados por Trambauer et al. (2014) que observaram uma tendência de subestimativa dos valores de evapotranspiração do produto MOD16, bem como menores correlações com outros produtos em regiões áridas e semiáridas do Mediterrâneo, do Sahel e do Sul da África. No que se refere às correlações detalhadas na Tabela 4, por exemplo, das onze estações que obtiveram correlação linear forte, cinco delas (São Romão, Salinas, Montes Claros, Januária e Pirapora) pertencem à mesorregião Norte de Minas que é caracterizada por condições de aridez.

Jang et al. (2013) observaram tendência a superestimativa da evapotranspiração do produto MOD16 em áreas florestadas, em decorrência do efeito do sombreamento das folhas ser desconsiderado. Já Hu, Jia e Menenti (2015) perceberam que, em regiões com limitações hídricas, na Europa, a evapotranspiração do produto MOD16 é subestimada e defendem que o algoritmo do produto MOD16 necessita de melhores ajustes para a parametrização da resistência estomática e aerodinâmica, em especial para condições de clima úmido, como a resposta estomática à radiação emitida não é levada em consideração na resistência estomática do algoritmo, a velocidade do vento é desconsiderada na parametrização aerodinâmica.

### **4.3 Comparação dos produtos de evapotranspiração (ET) DMET e MOD16**

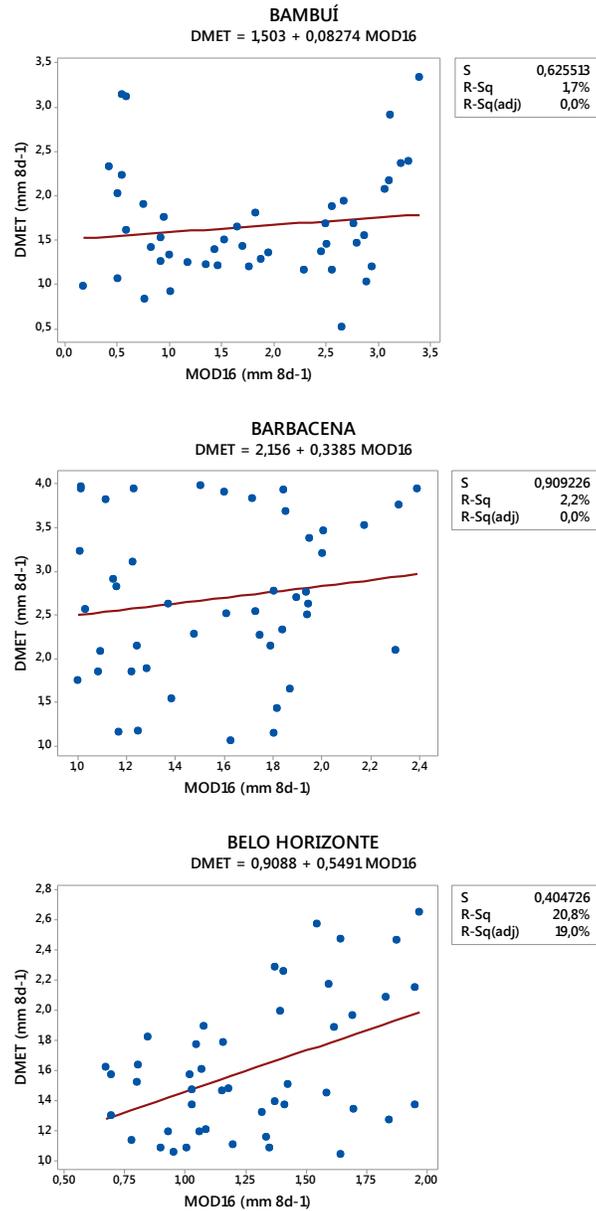
Os resultados apresentados, a seguir, da Figura 29 à Figura 40, na forma de regressão linear simples, demonstram a comparação entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 durante o ano de 2014.

Figura 29 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014.



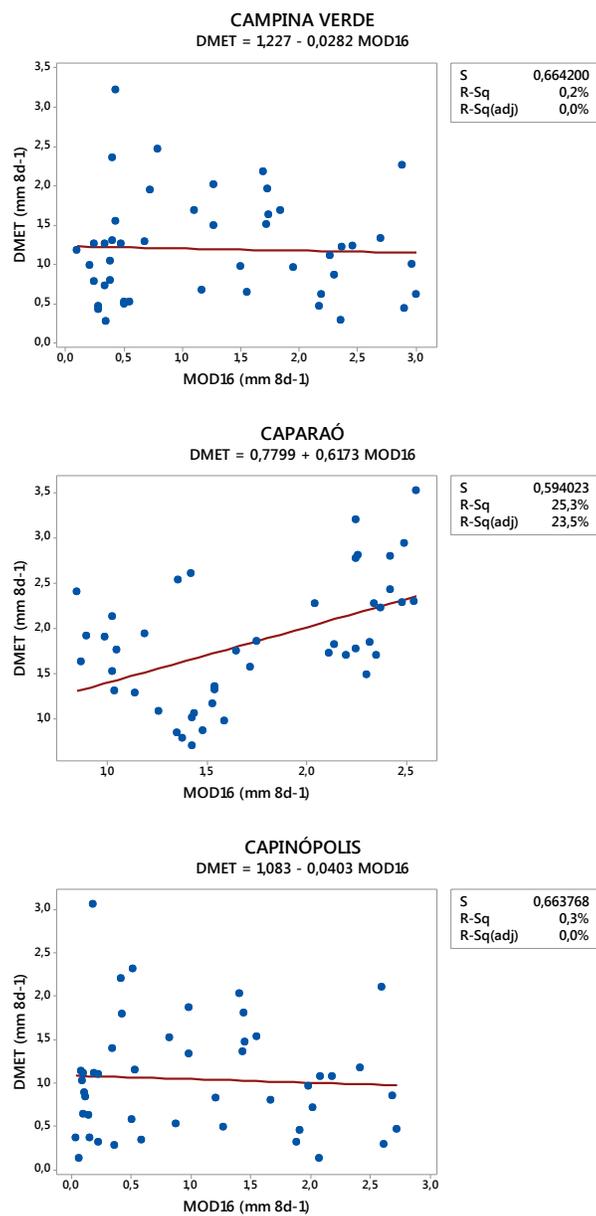
Fonte: Do autor (2016).

Figura 30 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014.



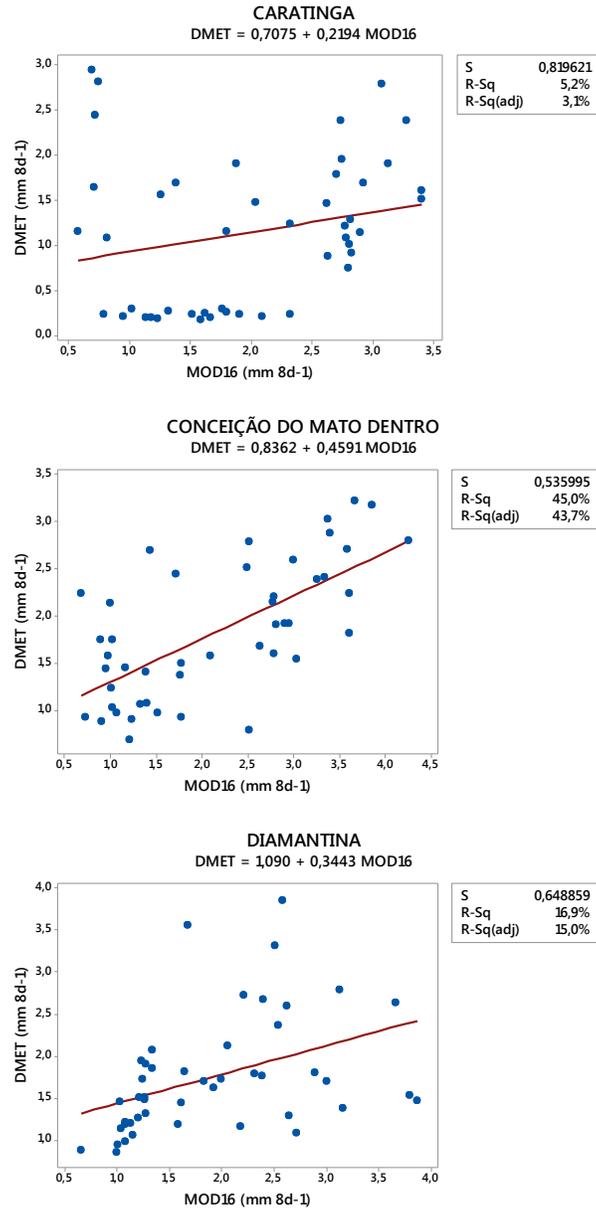
Fonte: Do autor (2016).

Figura 31 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis durante o ano de 2014.



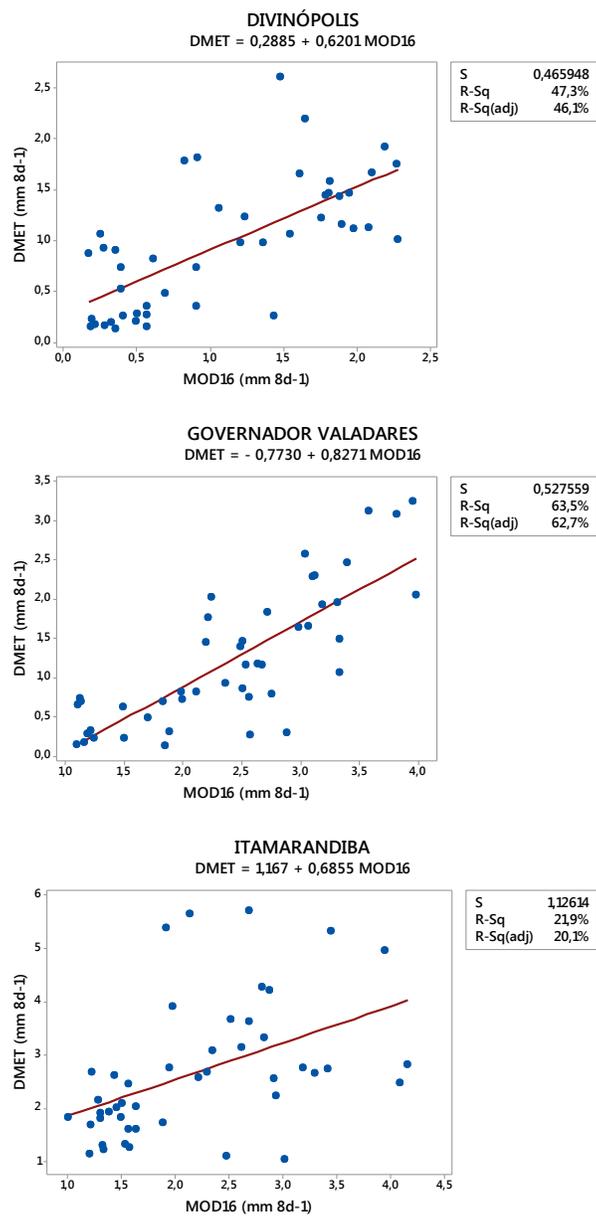
Fonte: Do autor (2016).

Figura 32 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014.



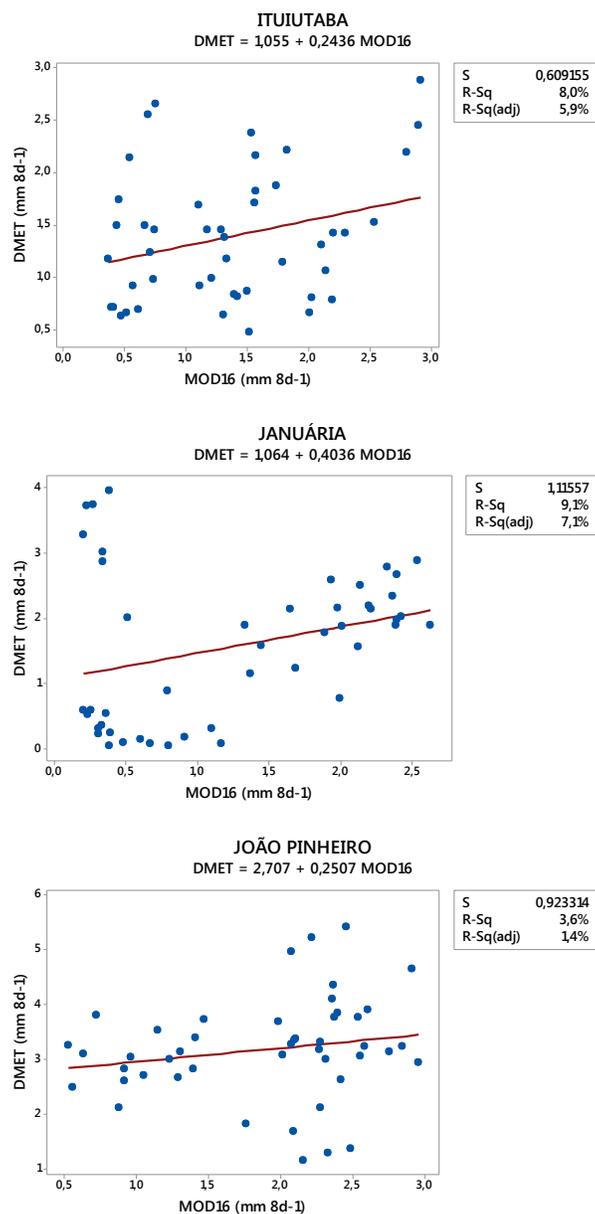
Fonte: Do autor (2016).

Figura 33 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014.



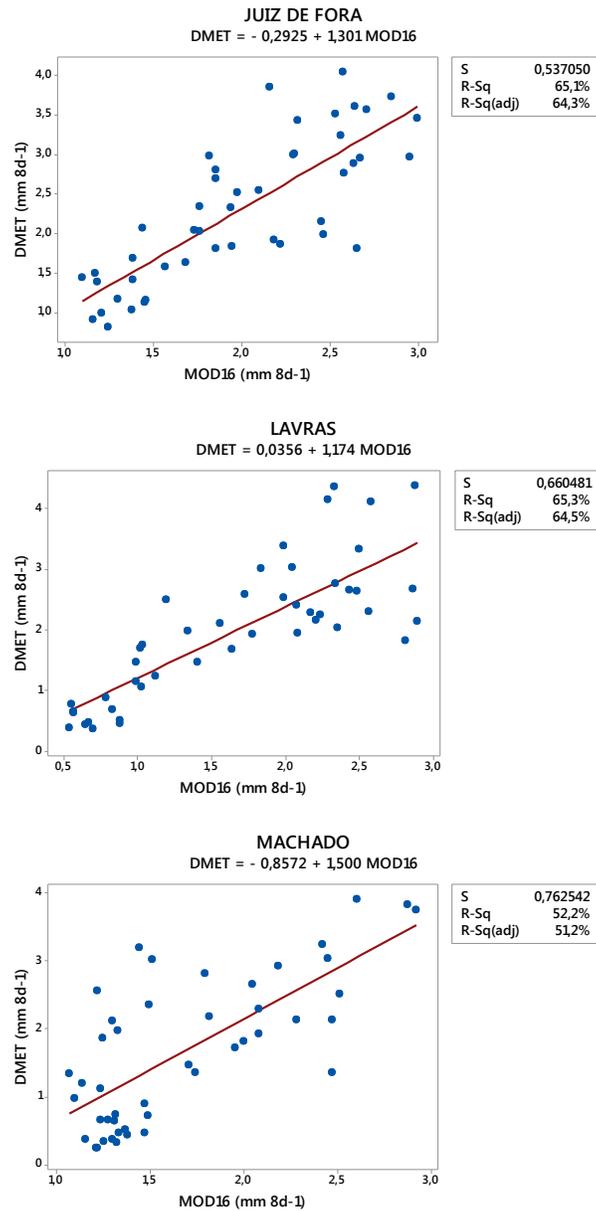
Fonte: Do autor (2016).

Figura 34 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014.



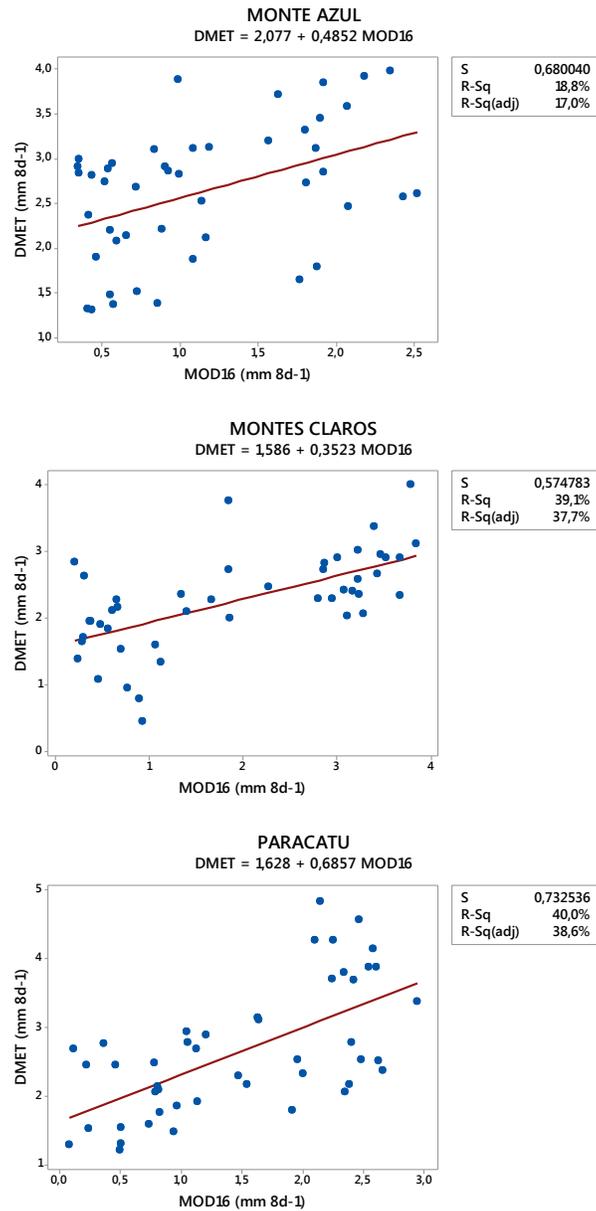
Fonte: Do autor (2016).

Figura 35 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014.



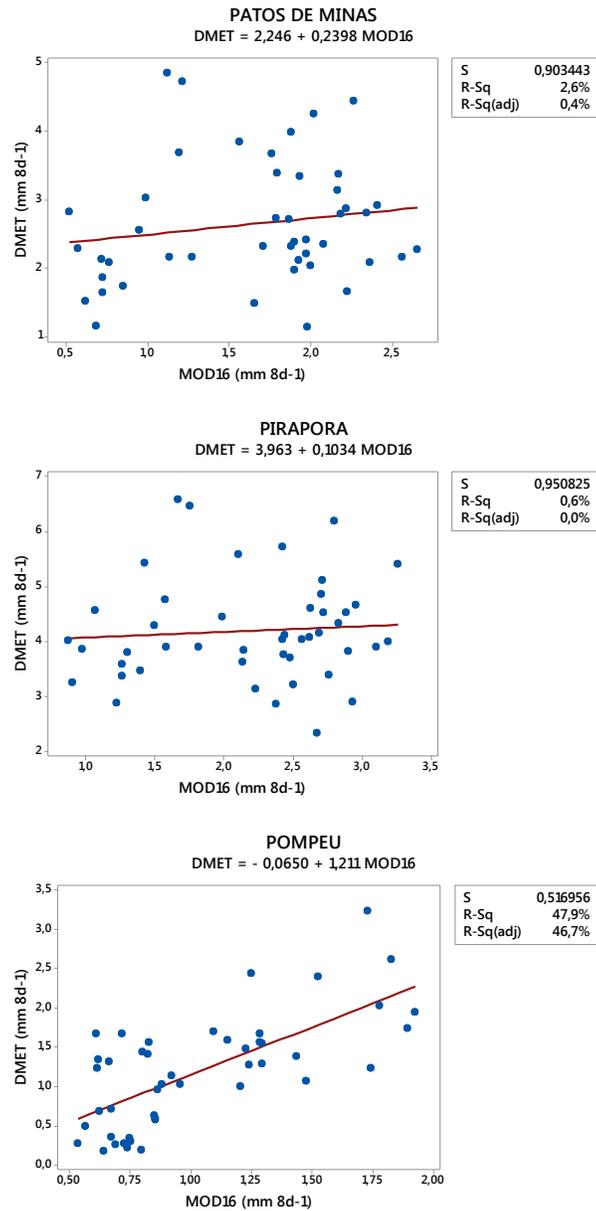
Fonte: Do autor (2016)

Figura 36 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014.



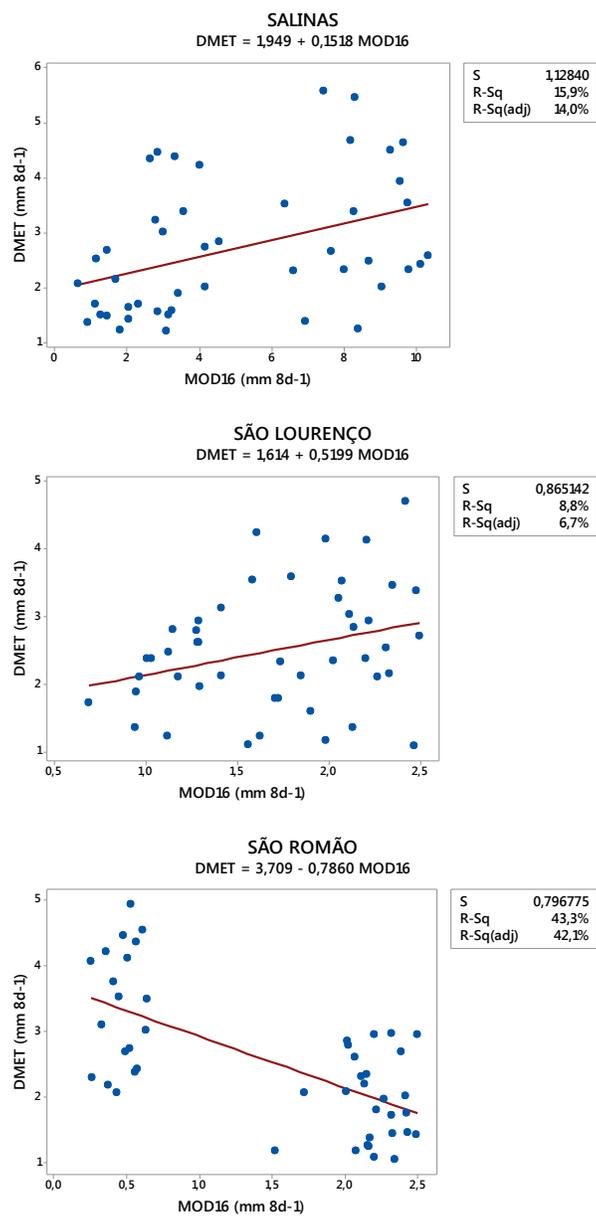
Fonte: Do autor (2016).

Figura 37 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014.



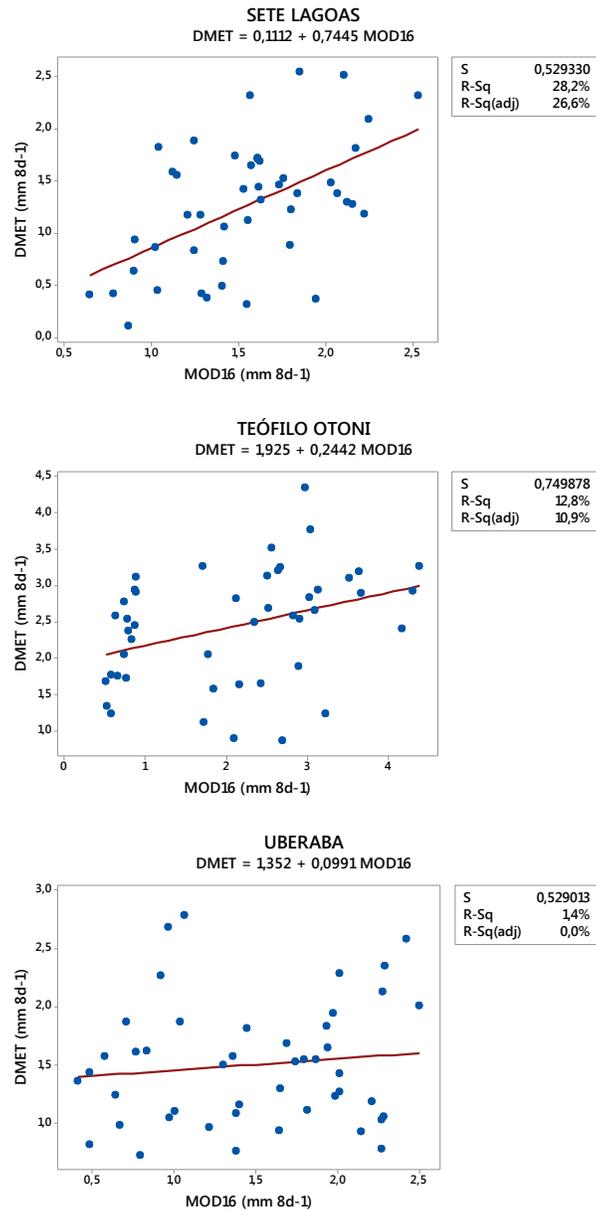
Fonte: Do autor (2016).

Figura 38 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014



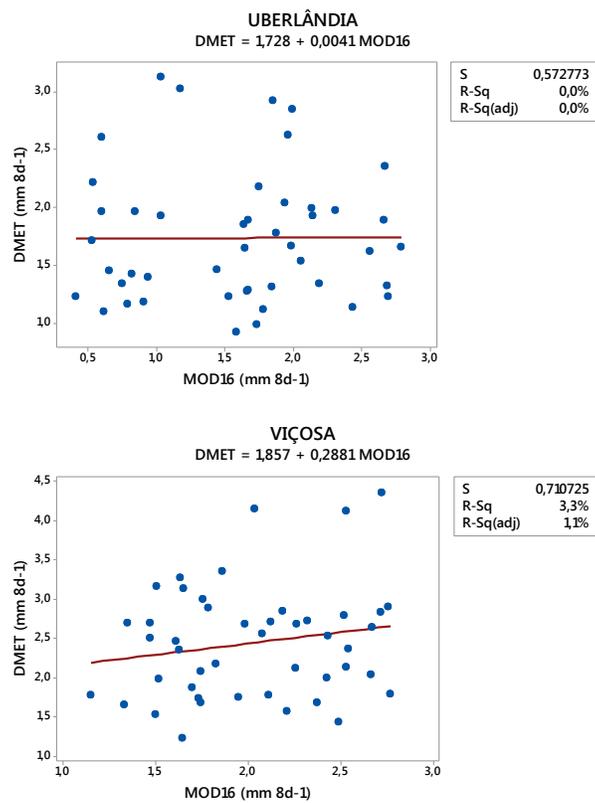
Fonte: Do autor (2016).

Figura 39 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 40 – Diagrama de dispersão entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16 para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Diante da dispersão dos pontos e da análise de desempenho estatístico (TABELA 5), observa-se, no geral, correlação linear positiva entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16. Apenas as estações de Campina Verde, Capinópolis e São Romão apresentaram correlação linear negativa.

Tabela 5 – Análise do desempenho estatístico das evapotranspirações dos produtos DMET e MOD16.

Estações	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> ( <i>adj.</i> )	r	r ( <i>adj.</i> )	EMA	EMP	REQM
Araçuaí	0,30	0,29	0,55	0,54	0,45	0,51	3,07
Araxá	0,01	0,00	0,11	0,00	0,08	0,11	0,56
Arinos	0,06	0,04	0,24	0,19	0,58	0,84	3,93
Bambuí	0,02	0,00	0,13	0,00	0,14	0,17	0,98
Barbacena	0,02	0,00	0,15	0,00	1,11	1,53	7,54
Belo Horizonte	0,21	0,19	0,46	0,44	0,33	0,56	2,24
Campina Verde	0,00	0,00	0,04	0,00	0,08	0,13	0,51
Caparaó	0,25	0,24	0,50	0,48	0,11	0,15	0,77
Capinópolis	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Caratinga	0,05	0,03	0,23	0,18	0,84	0,92	5,70
Conceição do Mato Dentro	0,45	0,44	0,67	0,66	0,33	0,33	2,25
Diamantina	0,17	0,15	0,41	0,39	0,16	0,19	1,11
Divinópolis	0,47	0,46	0,69	0,68	0,12	0,25	0,84
Governador Valadares	0,64	0,63	0,80	0,79	1,19	1,07	8,07
Itamarandiba	0,22	0,20	0,47	0,45	0,48	0,48	3,25
Ituiutaba	0,08	0,06	0,28	0,24	0,03	0,04	0,17
Januária	0,09	0,07	0,30	0,27	0,32	0,57	2,20
João Pinheiro	0,04	0,01	0,19	0,12	1,29	1,48	8,74
Juiz de Fora	0,65	0,64	0,81	0,80	0,31	0,34	2,08
Lavras	0,65	0,65	0,81	0,80	0,32	0,42	2,20
Machado	0,52	0,51	0,72	0,72	0,01	0,02	0,10
Monte Azul	0,19	0,17	0,43	0,41	1,48	2,79	10,06
Montes Claros	0,39	0,38	0,63	0,61	0,34	0,38	2,28
Paracatu	0,40	0,39	0,63	0,62	1,16	1,68	7,85
Patos de Minas	0,03	0,00	0,16	0,06	1,01	1,34	6,82
Pirapora	0,01	0,00	0,08	0,00	2,01	2,01	13,64
Pompeu	0,48	0,47	0,69	0,68	0,15	0,32	1,04
Salinas	0,16	0,14	0,40	0,37	2,31	1,00	15,67
São Lourenço	0,09	0,07	0,30	0,26	0,79	1,01	5,38
São Romão	0,43	0,42	0,66	0,65	1,07	1,57	7,23
Sete Lagoas	0,28	0,27	0,53	0,52	0,28	0,40	1,92
Teófilo Otoni	0,13	0,11	0,36	0,33	0,34	0,35	2,30
Uberaba	0,01	0,00	0,12	0,00	0,01	0,01	0,05
Uberlândia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,20	0,97
Viçosa	0,03	0,01	0,18	0,10	0,41	0,44	2,80

Fonte: Do autor (2016).

Coefficiente de determinação (r<sup>2</sup>), coeficiente de correlação de Pearson (r), erro médio absoluto (EMA), erro médio percentual (EMP) e raiz do erro quadrático médio (REQM).

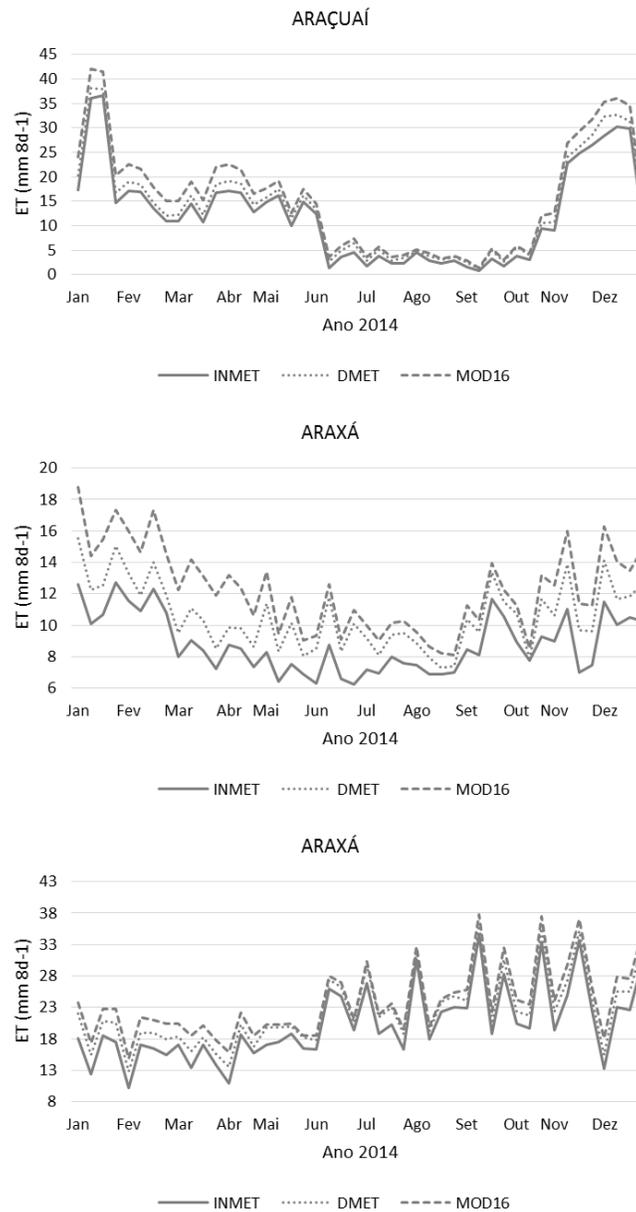
Por meio da análise da Tabela 5, observa-se que os maiores valores de coeficiente de determinação foram encontrados, respectivamente, para as estações de Lavras ( $r^2 = 0,65$ ), Juiz de Fora ( $r^2 = 0,64$ ), Governador Valadares ( $r^2 = 0,63$ ) e Machado ( $r^2 = 0,51$ ). Desse modo, essas estações apresentaram correção linear forte com valores de coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) iguais a 0,80, 0,79 e 0,72, respectivamente. Correlação linear moderada foi observada em Divinópolis e Pompeu ( $r = 0,68$ ), Conceição do Mato Dentro ( $r = 0,66$ ), São Romão ( $r = 0,65$ ), Paracatu ( $r = 0,62$ ), Montes Claros ( $r = 0,61$ ), Araçuaí ( $r = 0,54$ ), Sete Lagoas ( $r = 0,52$ ), Caparaó ( $r = 0,48$ ), Itamarandiba ( $r = 0,45$ ), Belo Horizonte ( $r = 0,44$ ) e Monte Azul ( $r = 0,41$ ). Correlação linear fraca foi observada em Diamantina ( $r = 0,39$ ), Salinas ( $r = 0,37$ ), Teófilo Otoni ( $r = 0,33$ ), Januária ( $r = 0,27$ ), São Lourenço ( $r = 0,26$ ) e Ituiutaba ( $r = 0,24$ ). Correlação linear muito fraca foi observada em Arinos ( $r = 0,19$ ), Caratinga ( $r = 0,18$ ), João Pinheiro ( $r = 0,12$ ) e Viçosa ( $r = 0,10$ ). A mesma classificação foi atribuída para as estações de Araxá, Bambuí, Barbacena, Campina Verde, Capinópolis, Patos de Minas, Pirapora, Uberaba e Uberlândia, que com valores de  $r$  muito próximos a zero praticamente não apresentaram correlação linear entre os produtos de evapotranspiração DMET e MOD16.

Ao longo de todo o período analisado, houve uma tendência do produto DMET em superestimar os valores de evapotranspiração para todas as localidades analisadas, sendo que os valores de erro médio absoluto (EMA) variaram de 0,00 a 2,31  $\text{mm } 8\text{d}^{-1}$  e os valores de erro médio percentual (EMP) variaram de 0,00 a 2,79 %. Já, em relação à raiz do erro quadrático médio (REQM), os valores variaram de 0,00 a 15,67  $\text{mm } 8\text{d}^{-1}$ . Em comparação com os resultados obtidos por Hu, Jia e Menenti (2015) para análise conjunta dos produtos DMET e MOD16, houve correlação satisfatória; contudo os autores em questão observaram uma maior tendência de subestimativa

dos valores para os meses com menor incidência de nuvens em razão da baixa transmissividade atmosférica.

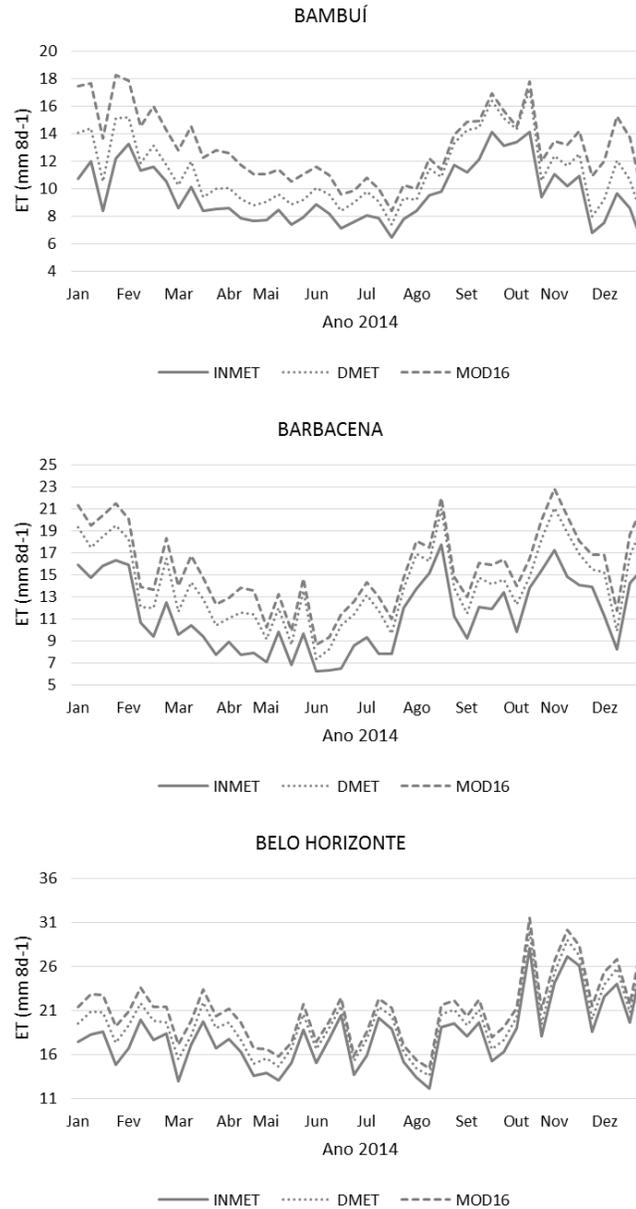
A seguir, é possível observar, da Figura 41 à Figura 52, o comportamento das evapotranspirações oriundas dos produtos órbitas e de dados de superfície coletados por estações meteorológicas ao longo do ano de 2014.

Figura 41 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Araçuaí, Araxá e Arinos durante o ano de 2014.



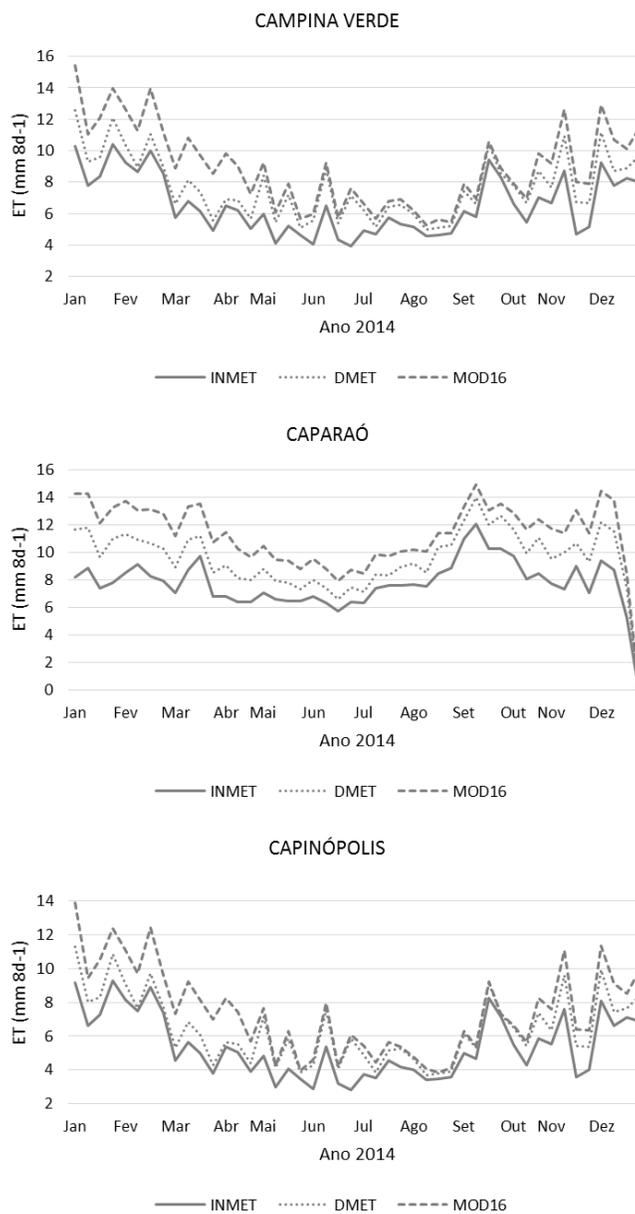
Fonte: Do autor (2016).

Figura 42 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Bambuí, Barbacena e Belo Horizonte durante o ano de 2014.



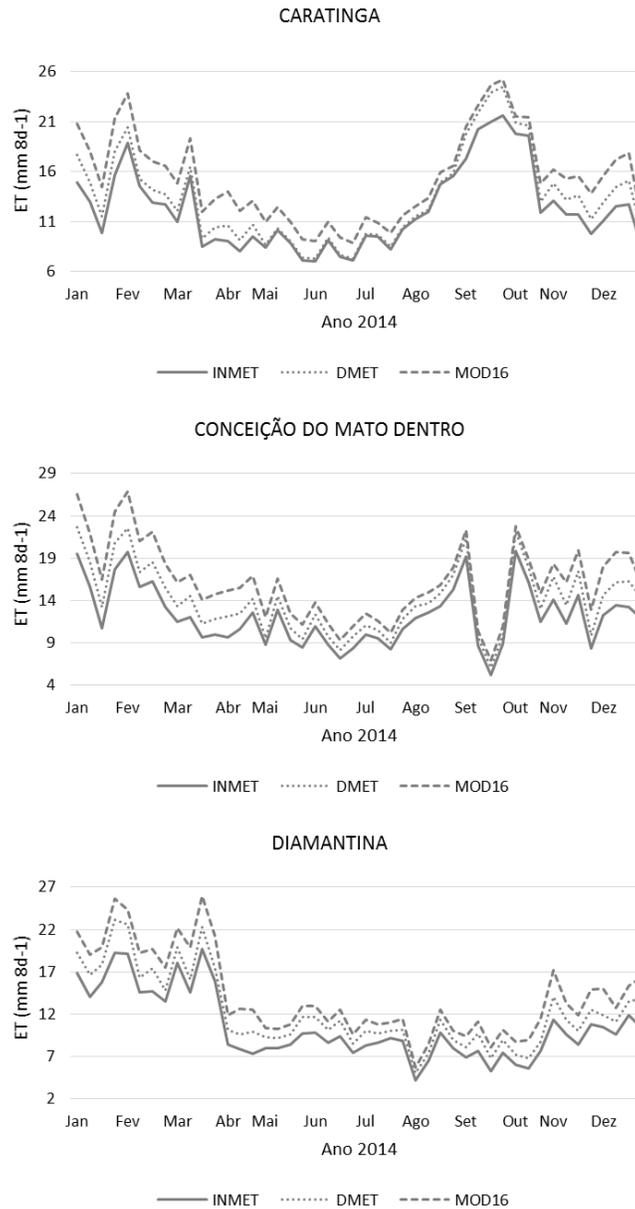
Fonte: Do autor (2016).

Figura 43 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Campina Verde, Caparaó e Capinópolis, durante o ano de 2014.



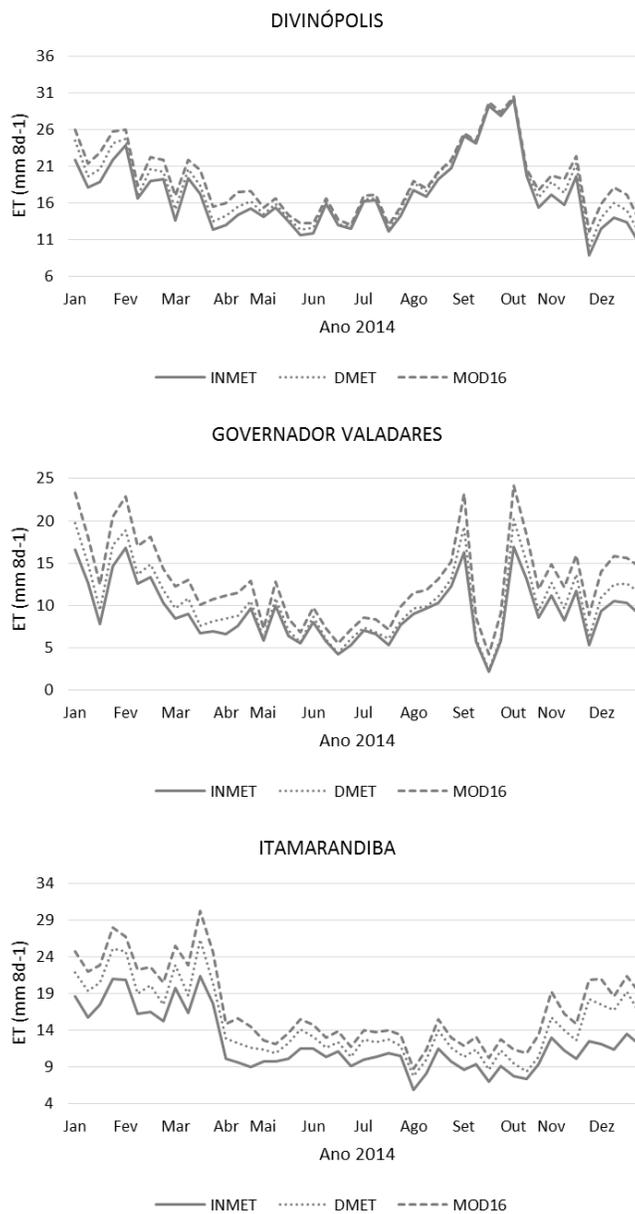
Fonte: Do autor (2016).

Figura 44 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Caratinga, Conceição do Mato Dentro e Diamantina durante o ano de 2014.



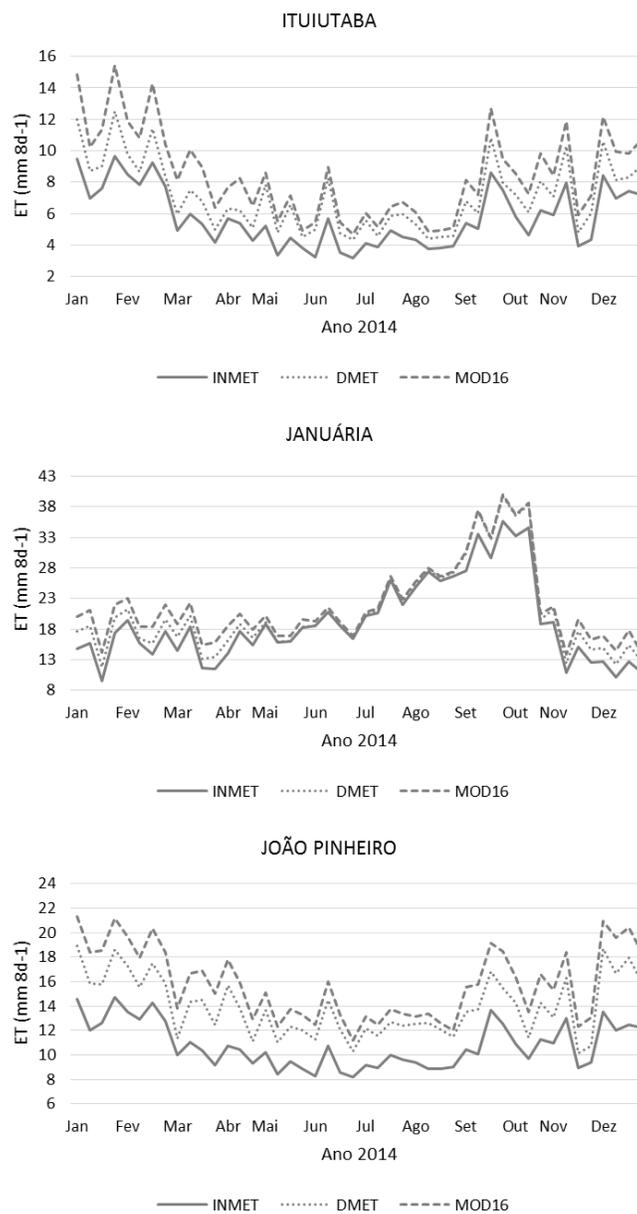
Fonte: Do autor (2016).

Figura 45 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Divinópolis, Governador Valadares e Itamarandiba durante o ano de 2014.



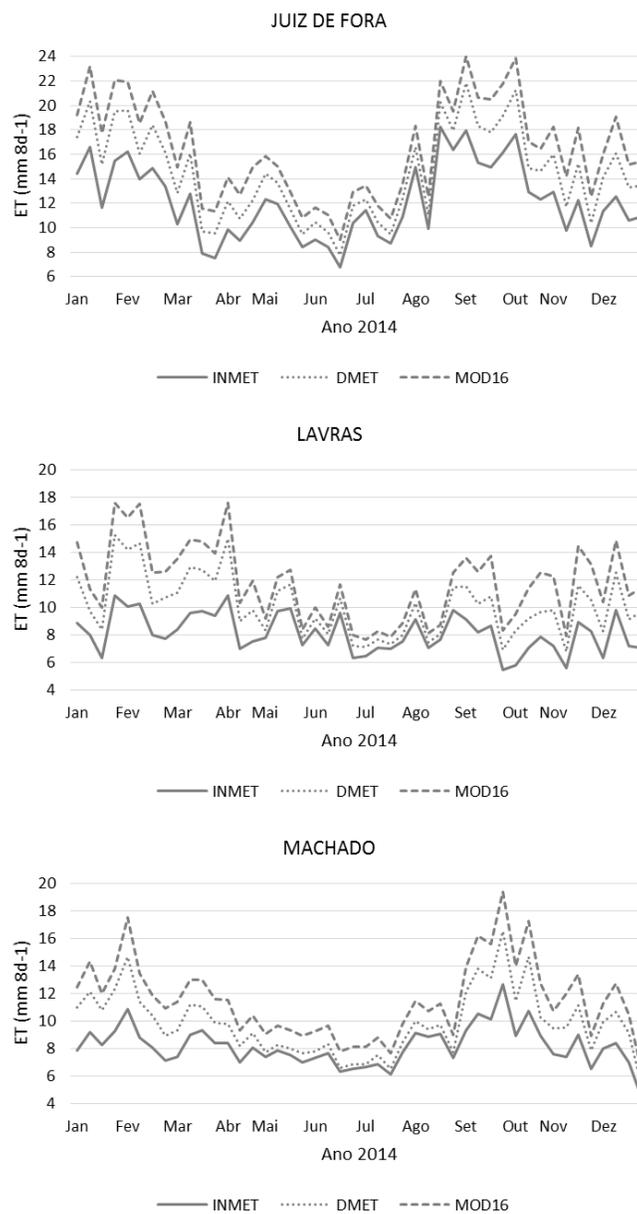
Fonte: Do autor (2016).

Figura 46 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Ituiutaba, Januária e João Pinheiro durante o ano de 2014.



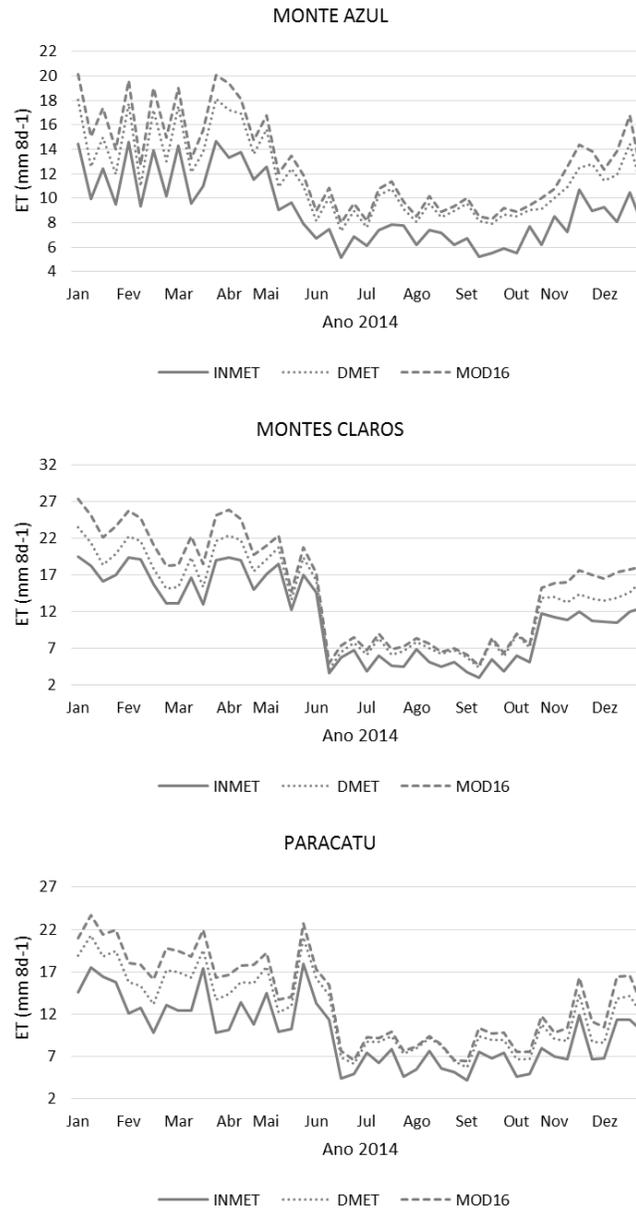
Fonte: Do autor (2016).

Figura 47 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Juiz de Fora, Lavras e Machado durante o ano de 2014.



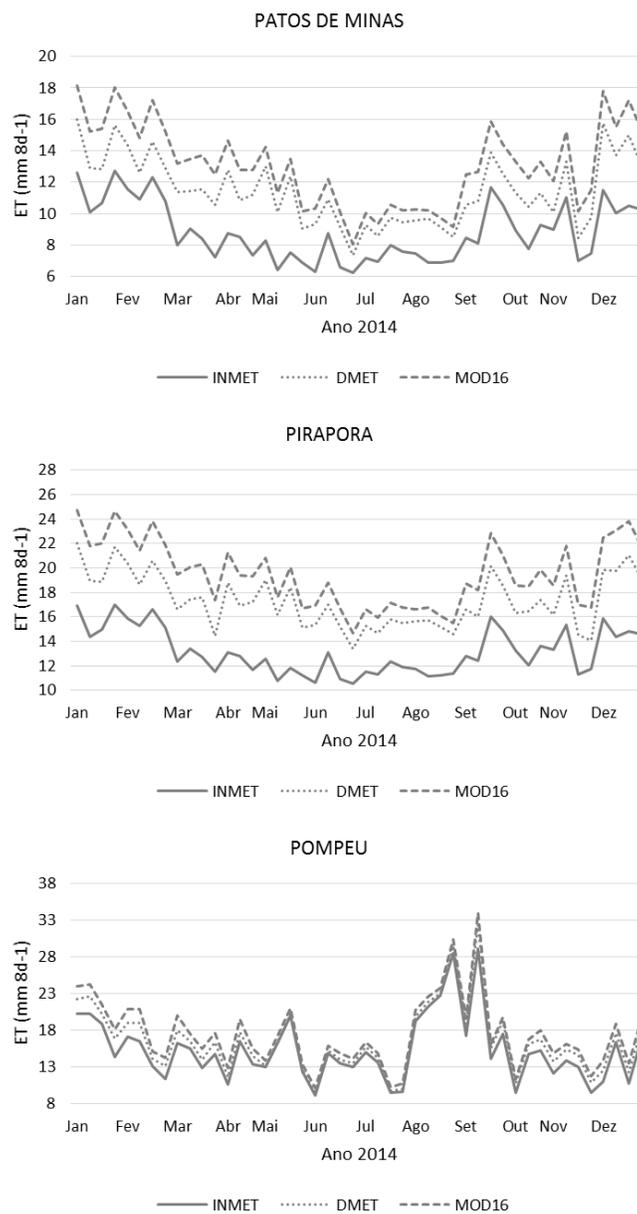
Fonte: Do autor (2016).

Figura 48 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Monte Azul, Montes Claros e Paracatu durante o ano de 2014.



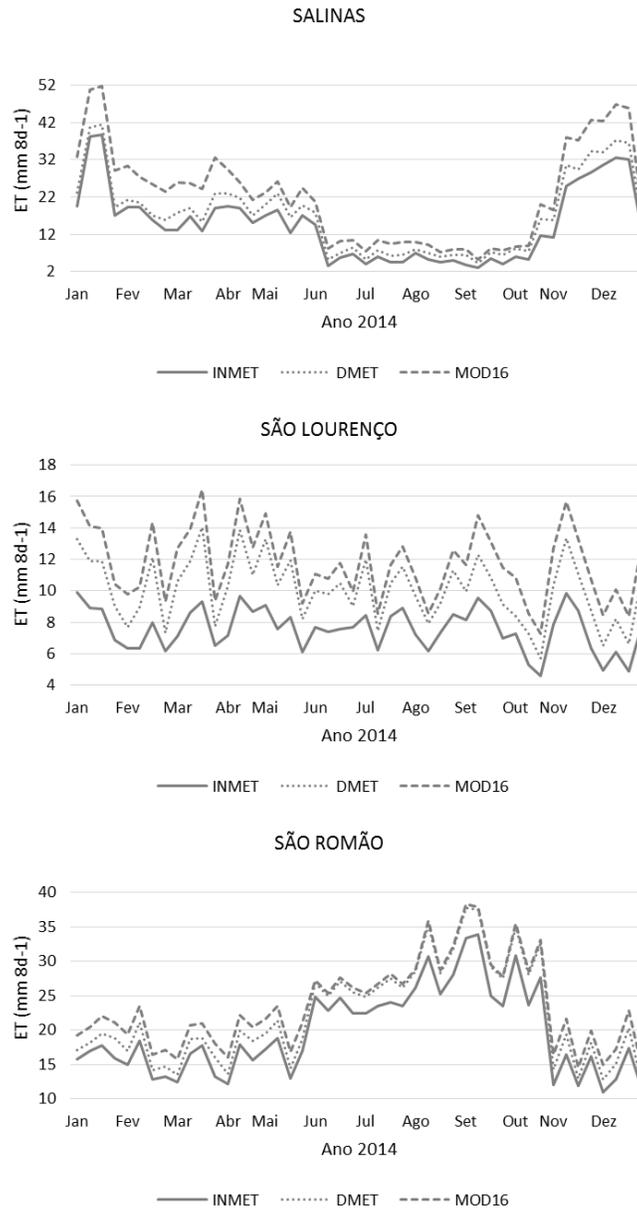
Fonte: Do autor (2016).

Figura 49 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Patos de Minas, Pirapora e Pompeu durante o ano de 2014.



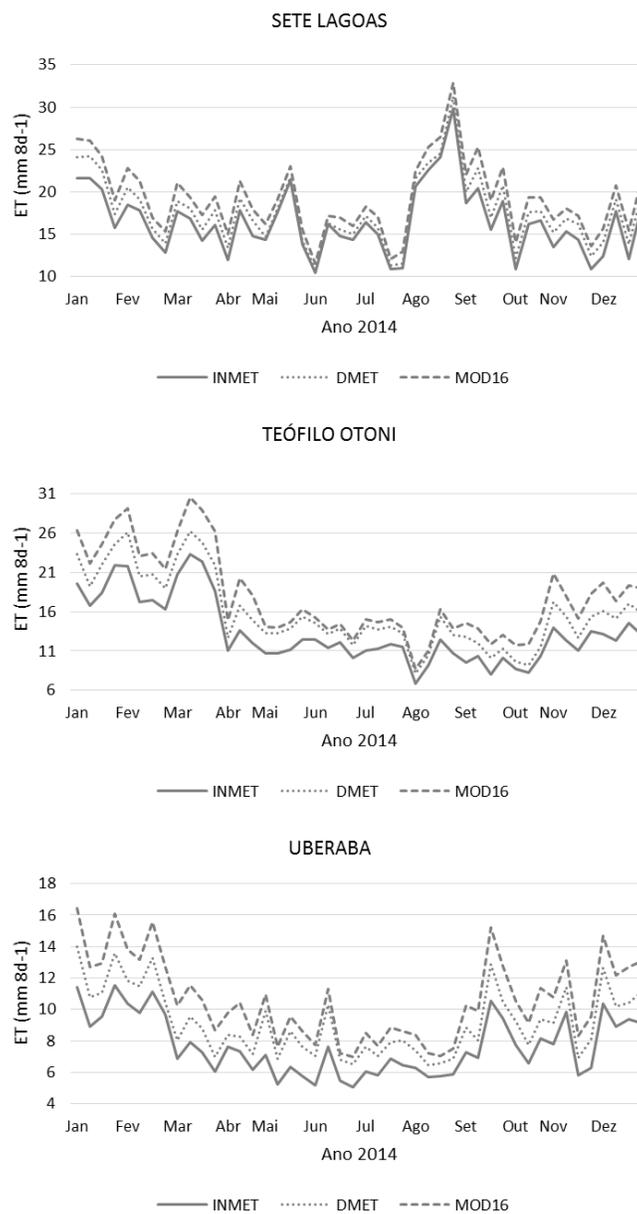
Fonte: Do autor (2016).

Figura 50 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Salinas, São Lourenço e São Romão durante o ano de 2014.



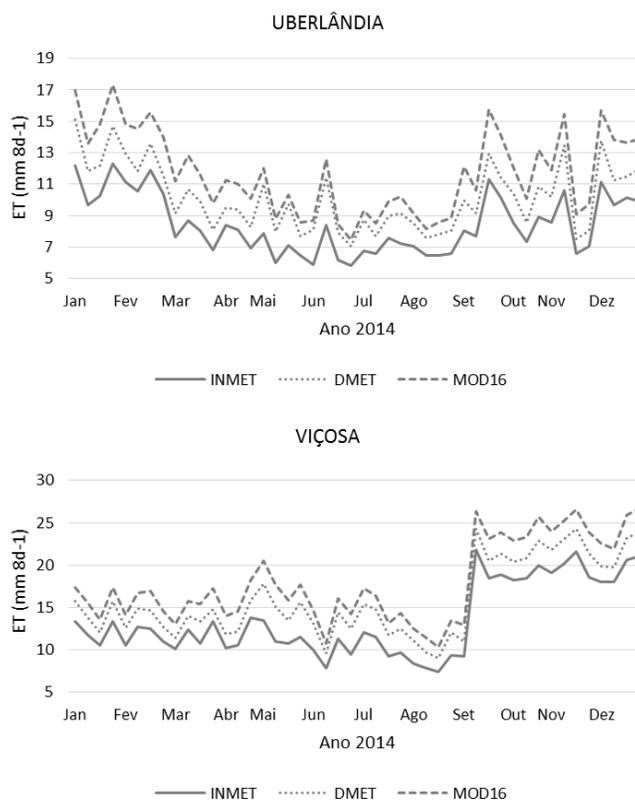
Fonte: Do autor (2016).

Figura 51 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Sete Lagoas, Teófilo Otoni e Uberaba durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 52 – Comportamento das evapotranspirações dos produtos DMET, MOD16 e da rede do INMET para as estações de Uberlândia e Viçosa durante o ano de 2014.



Fonte: Do autor (2016).

De maneira geral, percebe-se, pela análise conjunta das figuras, que houve correspondência entre as evapotranspirações dos produtos DMET e MOD16 com as evapotranspirações das estações meteorológicas da rede do INMET, durante o ano de 2014. Sendo que as evapotranspirações do produto DMET melhor se ajustaram aos valores de evapotranspiração obtidos a partir de dados de superfície medidos nas estações meteorológicas da rede do INMET; apesar das estimativas do produto DMET serem oriundas de uma resolução espacial de 3 km, contra 1 km das estimativas do produto MOD16. De encontro

a isso, Sun et al. (2012) afirmaram que, em razão da presença de vegetação próxima a estações de superfície, geralmente as estimativas de evapotranspiração mais próximas a esse ponto devem ser maiores que valores estimados a 3 km de resolução.

Outro fator relevante a ser observado é que não houve desempenho superior ou mesmo melhores correlações por parte das estações automáticas do INMET em relação às convencionais, à exceção dos valores de coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) de Governador Valadares ( $0,72 \leq r \leq 0,79$ ), estação automática que obteve correlação linear forte em todas as situações analisadas, o que se pode inferir que os erros observados não podem ser atribuídos apenas pela qualidade das medições em superfície, ou mesmo pela condições dos equipamentos utilizados nesse processo.



## 5 CONCLUSÕES

Na comparação do produto de evapotranspiração DMET com a evapotranspiração obtida por dados de superfície medidos por estações da rede INMET foi observada correlação linear forte entre as variáveis. De modo que a estação de Governador Valadares apresentou o maior coeficiente de correlação de Pearson,  $r = 0,78$ .

Também foi possível observar correlação linear forte na comparação do produto de evapotranspiração MOD16 com a evapotranspiração obtida por dados de superfície medidos por estações da rede INMET. Com  $r = 0,85$  a estação de São Romão apresentou o maior coeficiente de correlação de Pearson.

Na comparação entre os produtos orbitais DMET e MOD16 as estações de Lavras e Juiz de Fora apresentaram os maiores coeficientes de correlação de Pearson e correlação linear forte, com valores de  $r$  iguais  $0,80$  para ambas.

Tanto o produto DMET quanto o produto MOD16 superestimaram os valores de evapotranspiração.



## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO, W. F.; CONCEIÇÃO, M. A. F.; VENANCIO, J. B. Evapotranspiração de referência diária em Boa Vista (RR) com base na temperatura do ar. **Irriga**, Botucatu, p. 155-169, 2012. Volume especial.
- ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no estado de Minas Gerais. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 49, n. 4, p. 247-256, abr. 2014.
- BADESCU, V.; DUMITRESCU, A. Simple solar radiation modelling for different cloud types and climatologies. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 124, n. 1, p. 141-160, 2016.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CARROLL, M. L. et al. Development of an operational land water mask for MODIS Collection 6, and influence on downstream data products. **International Journal of Digital Earth**, London, v. 10, n. 2, p. 1-12, Oct. 2016.
- CARVALHO, L. G. et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.
- CARVALHO, L. G. et al. Multivariate geostatistical application for climate characterization of Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 102, n. 3, p. 417-428, 2010.
- CORBARI, C.; BISSOLATI, M.; MANCINI, M. Multi-scales and multi-satellites estimates of evapotranspiration with a residual energy balance model in the Muzza agricultural district in Northern Italy. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 524, n. 2, p. 243-254, May 2015.

CRISTÓBAL, J.; ANDERSON, M. C. Validation of a meteosat second generation solar radiation dataset over the northeastern Iberian Peninsula. **Hidrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 17, n. 1, p. 163-175, 2013.

CRUZ-BLANCO, M. et al. Assessment of reference evapotranspiration using remote sensing and forecasting tools under semi-arid conditions. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 33, n. 12, p. 280-289, Dec. 2014.

CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. J.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 131, n. 1, p. 135-145, Jan. 2014.

CUNHA, A. P. M. et al. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 214/215, n. 12, p. 494-505, Dec. 2015.

DISNEY, M. et al. A new global fAPAR and LAI dataset derived from optimal albedo estimates: comparison with MODIS products. **Remote Sensing**, Basel, v. 8, n. 4, p. 1-29, 2016.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 143 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES. Disponível em: <[http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/08/MSG-4\\_Europe\\_s\\_latest\\_weather\\_satellite\\_delivers\\_first\\_image](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2015/08/MSG-4_Europe_s_latest_weather_satellite_delivers_first_image)>. Acesso em: 12 out. 2016.

EUROPEAN ORGANISATION FOR THE EXPLOITATION OF METEOROLOGICAL SATELLITES. **MSG level 1.5 image data format description**. Darmstadt, 2013. 128 p.

FERNANDES, D. S. et al. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n. 2, p. 246-255, 2012.

FERREIRA, E.; DANTAS, A. A. A. Estimativa da evapotranspiração atual a partir de produtos de sensoriamento remoto usando o método do triângulo. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 73-81, 2014.

GELLENS-MEULENBERGHS, F.; ARBOLEDA, A.; GHILAIN, N. **LSA-SAF product user manual: evapotranspiration (ET)**. Version 2.5. Lisboa: IPMA, 2015. 36 p.

GHILAIN, N.; ARBOLEDA, A.; GELLENS-MEULENBERGHS, F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data. **Hidrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 15, n. 3, p. 771-786, 2011.

GHILAIN, N.; DE ROO, F.; GELLENS-MEULENBERGHS, F. Evapotranspiration monitoring with meteosat second generation satellites: improvement opportunities from moderate spatial resolution satellites for vegetation. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 35, n. 7, p. 2654-2670, 2014.

GIBSON, L. A. et al. Estimating evapotranspiration using remote sensing and the Surface Energy Balance System - A South African perspective. **Water SA**, Pretoria, v. 39, n. 4, p. 477-484, 2013.

GONÇALVES, F. M. et al. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 2, p. 71-77, 2009.

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, n. 12, p. 510-526, Jan. 2015.

HUETE, A. R. et al. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, p. 440-451, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage>>. Acesso em: 7 jun. 2016.

JANG, K. et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 118, n. 23, p. 12927-12940, 2013.

LEMOS FILHO, L. C. A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 1294-1303, 2010.

LIMA JÚNIOR, J. C. et al. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016.

LIOU, Y. A.; KAR, S. K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various Surface Energy Balance Algorithms: a review. **Energies**, Basel, v. 7, n. 5, p. 2821-2849, 2014.

LIU, S. et al. A parameterization of SEVIRI and MODIS daily surface albedo with soil moisture: calibration and validation over southwestern France. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 144, n. 11, p. 137-151, Mar. 2014.

MAATHUIS, B. et al. **GEONET Cast Toolbox**: installation, configuration and user guide of the GEONET Cast Toolbox plug-in for ILWIS 3.7, XML. Version 1.2. Enschede: ITC, 2011. Disponível em: <<http://52north.org/downloads/earthobservation/geonetcast/toolbox>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

MARTÍNEZ, B. et al. Intercomparison and quality assessment of MERIS, MODIS and SEVIRI FAPAR products over the Iberian Peninsula. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 21, n. 4, p. 463-476, 2013.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. Mapeamento das chuvas intensas no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 1, p. 37-44, 2013.

MINACAPILLI, M. et al. A time domain triangle method approach to estimate actual evapotranspiration: application in a Mediterranean region using MODIS and MSG-SEVIRI products. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 174, p. 10-23, Mar. 2016.

MINUZZI, R. B. et al. Estimativa da evapotranspiração diária por Penman-Monteith FAO com dados de temperatura do ar para Santa Catarina. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 548-558, 2014.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 111, n. 4, p. 519-536, 2007.

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, 2011.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **MODIS Grids**. Disponível em: <[https://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND\\_grid.html](https://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html)>. Acesso em: 19 out. 2016.

OLIVEIRA, L. M. M. et al. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 1039-1046, 2014.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 193, n. 1, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Porto Alegre: Agropecuária, 2002. 478 p.

PETROPOULOS, G. P.; ANAGNOSTOPOULOS, V. SEVIRI PrePro: a novel software tool for the pre-processing of SEVIRI geostationary orbit EO data products. **Environmental Modelling e Software**, Kidlington, v. 82, n. 8, p. 321-329, Aug. 2016.

PETROPOULOS, G. P. et al. Operational evapotranspiration estimates from SEVIRI in support of sustainable water management. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 49, n. 7, p. 175-187, July 2016.

REBOITA, M. S. et al. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 17, n. 1, p. 206-226, jul./dez. 2015.

RIGONI, E. R. et al. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 21, n. 6, p. 547-562, 2013.

RISSO, J. et al. Índices de vegetação MODIS aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, set. 2012.

ROUSE, J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. p. 309-317.

SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 108, n. 1, p. 1-7, 2012.

SANTOS, F. A. C. et al. Desempenho de metodologias para estimativa do saldo de radiação a partir de imagens MODIS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 30, n. 3, p. 295-306, 2015.

SCHMETZ, J. et al. An introduction to Meteosat Second Generation (MSG). **Bulletin of the American Meteorological Society**, Washington, v. 83, p. 977-992, 2002.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SEPULCRE-CANTO, G. et al. Assessment of the EUMETSAT LSA-SAF evapotranspiration product for drought monitoring in Europe. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 30, n. 8, p. 190-202, Aug. 2014.

SRIVASTAVA, P. K. et al. Seasonal evaluation of evapotranspiration fluxes from MODIS satellite and mesoscale model downscaled global reanalysis datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 124, n. 1, p. 461-473, 2016.

SUN, J. et al. Terra MODIS band 27 electronic crosstalk effect and its removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 52, n. 3, p. 1551-1561, 2014.

SUN, L. et al. Impact of Land-Use and Land-Cover Change on urban air quality in representative cities of China. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, London, v. 142, n. 5, p. 43-54, May 2016.

SUN, Z. et al. Estimation of daily evapotranspiration over Africa using MODIS/Terra and SEVIRI/MSG data. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 112, n. 8, p. 35-44, Aug. 2012.

SUN, Z. et al. Mapping daily evapotranspiration and dryness index in the East African highlands using MODIS and SEVIRI data. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 15, n. 1, p. 163-170, 2011.

TANG, R. et al. Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, Piscataway, v. 8, n. 4, p. 1478-1486, 2015.

THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; WILM, H. G. Report of the committee on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 25, n. 5, p. 686-693, 1944.

TRAMBAUER, P. et al. Comparison of different evaporation estimates over the African continent. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 18, n. 1, p. 193-212, 2014.

TRIGO, I. F. et al. The satellite application facility on land surface analysis. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 32, n. 10, p. 2725-2744, 2011.

TUCK, S. L. et al. MODISTools: downloading and processing MODIS remotely sensed data in R. **Ecology and Evolution**, Chichester, v. 4, n. 24, p. 4658-4668, Dec. 2014.

WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman-Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 169, n. 12, p. 102-112, Nov. 2015.

ZHANG, X. et al. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 10, p. 1506-1516, 2010.

ZHANG, X. et al. Winter wheat water productivity evaluated by the developed remote sensing evapotranspiration model in Hebei Plain, China. **The Scientific World Journal**, Boynton Beach, v. 1, n. 1, p. 1-10, 2015.