**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados
utilizando sensoriamento remoto**

Jéfferson de Oliveira Costa

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2019**

Jéfferson de Oliveira Costa
Engenheiro Agrônomo

**Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados utilizando
sensoriamento remoto**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Costa, Jéfferson de Oliveira

Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados utilizando sensoriamento remoto / Jéfferson de Oliveira Costa - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

86 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Coeficiente de cultura 2. *Coffea arabica* 3. Evapotranspiração 4. *Phaseolus vulgaris* 5. *Vigna unguiculata* l. Título

Aos meus pais, Veraldino Gomes e Maria de Oliveira, que são a base da minha vida pessoal e profissional.

DEDICO

Às minhas irmãs Karla e Geicilene e aos meus irmãos Cleiton, Josuelmo e Jeison, companheiros eternos na minha jornada da vida.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo que conquistei até agora e peço sabedoria a Ele para poder conquistar muito mais. Eu agradeço pelos teus planos para a minha vida, pois estes sempre foram maiores do que os meus próprios sonhos.

Agradeço a Universidade de São Paulo (USP/ESALQ), seu corpo docente, direção e administração por me darem a oportunidade de melhorar a minha formação acadêmica e pessoal.

Ao professor Dr. Rubens Duarte Coelho, por acreditar em minha capacidade, pelos ensinamentos, pelo incentivo e pelo total apoio, eu agradeço. Grato sou por sua ajuda, compreensão, paciência e amizade despertada durante esta jornada.

Ao meu supervisor no estágio PAE (Programa de Aperfeiçoamento de Ensino) Dr. Sérgio Nascimento Duarte, pela paciência, apoio, compreensão e amizade. Um verdadeiro “paizão”.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelos ensinamentos e por serem exemplos de profissionalismo, em especial ao professor Dr. Marcos Vinícius Folegatti pelas sugestões dadas na etapa de plano de pesquisa.

Aos amigos Dr. André Luís Teixeira Fernandes, Dr. Eusímio Felisbino Fraga Júnior, Dr. Wagner Wolff e Dr. Jefferson Vieira José pelo incentivo e pelo apoio incondicional, não há de existir palavras para agradecer vocês.

Agradeço aos meus pais, meus irmãos, minha namorada e demais familiares, pelo apoio, pelo carinho, pela compreensão e pela minha formação inicial que é a base de tudo que sou hoje.

Aos amigos da pós-graduação: Isabela Almeida, Timóteo Herculino, Nathália Lopes, Ailson Maciel, Alex Nunes, Bruno Araújo, Arthur Prudêncio e outros, pela amizade e ensinamentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Jéfferson de Oliveira Costa, nasceu na cidade de Taiobeiras, estado de Minas Gerais, no dia 17 de maio de 1988, filho de Veraldino Gomes Costa e Maria de Oliveira Costa. Coursou o ensino fundamental na Escola Estadual Deputado Chaves Ribeiro (1ª a 4ª série) e na Escola Estadual Osvaldo Lucas Mendes (5ª a 8ª). Em 2003, entrou na Escola Agrotécnica Federal de Salinas-MG (EAFSAL) onde cursou o ensino médio concomitante ao ensino técnico em agropecuária. No ano de 2008 ingressou nas Faculdades Associadas de Uberaba (FAZU) no Curso de Agronomia e obteve o título de Engenheiro Agrônomo em 2012. Em 2014, iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas Agrícolas da Universidade de São Paulo (USP/ESALQ) e obteve o título de Mestre em 2016. Nesse mesmo ano, ingressou no Curso de Doutorado, também no Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas Agrícolas da USP/ESALQ. Três anos depois, submeteu-se à defesa da Tese para obtenção do título de “Doutor em Ciências”.

**“Em seu coração o homem planeja o seu caminho,
mas o Senhor determina os seus passos”.**

Provérbios 16:9

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS.....	19
2 VARIABILIDADE ESPACIAL DO CONSUMO HÍDRICO DO CAFEEIRO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL	23
Resumo	23
Abstract	23
2.1 INTRODUÇÃO	24
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
2.2.1 Localização e caracterização da área experimental.....	25
2.2.2 Imagens de satélite	26
2.2.3 Estimativa da evapotranspiração (algoritmo SEBAL).....	29
2.2.4 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c).....	33
2.2.5 Análise de dados.....	35
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
2.3.1 Distribuição espacial das principais variáveis utilizadas no algoritmo SEBAL..	36
2.3.2 Distribuição espacial da ET_a e do K_c	37
2.3.3 Comparação dos valores de K_c obtidos com trabalhos de referência	40
2.3.4 Validação dos dados	41
2.4 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS.....	45
3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO CONSUMO HÍDRICO DO FEIJOEIRO UTILIZANDO A FERRAMENTA GOOGLE EEFLUX.....	49
Resumo	49
Abstract	49
3.1 INTRODUÇÃO	50
3.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
3.2.1 Localização e caracterização da área experimental.....	52
3.2.2 Conjunto de dados utilizados	54

3.2.3 Evapotranspiração atual (algoritmo METRIC)	57
3.2.4 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c)	60
3.2.5 Análise de dados e validação	62
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
3.3.1 Distribuição espacial da ET_a e do K_c	63
3.3.2 Comparação dos valores de K_c obtidos com trabalhos de referência.....	75
3.3.3 Validação dos dados.....	78
3.4 CONCLUSÕES.....	82
REFERÊNCIAS	82

RESUMO

Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados utilizando sensoriamento remoto

O presente trabalho teve como objetivo estimar a distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) e a curva do coeficiente de cultura (K_c) do café (*Coffea arabica*), do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e do feijão caupi (*Vigna unguiculata*), utilizando os algoritmos *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) na versão do *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux). Além disso, visou-se validar as estimativas espaciais de ET_a comparando-as com as diretrizes da FAO e com valores de evapotranspiração da cultura (ET_c) calculados com o uso de valores de K_c obtidos em outros estudos de referência no Brasil. O estudo da cultura do café foi conduzido no município de Buritis-MG, ao longo de um período de 2 anos (2014-2015); já o estudo com a cultura do feijão foi conduzido no município de Primavera do Leste-MT, sendo analisados quatro ciclos de cultivo (2013, 2014, 2015 e 2017). Nos dois casos, foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), de áreas irrigadas por pivô central e foram feitas análises comparativas utilizando diferentes índices estatísticos. A ET_a para cafeeiros jovens foi de 2,17 mm dia⁻¹, na média geral, e o valor médio de K_c foi de 0,6. Para cafeeiros adultos, a ET_a foi de 3,95 mm dia⁻¹, na média geral e o valor médio de K_c foi de 0,85. Os dados de ET_a e K_c obtidos com base no algoritmo SEBAL apresentaram valores semelhantes aos dos estudos que utilizaram métodos tradicionais. A ET_a para o feijão carioca variou entre 2,3 a 8,5 mm d⁻¹ e o K_c obtido variou entre 0,4 a 1,6, em termos gerais. Para o feijão caupi, a ET_a obtida variou entre 0,8 a 6,2 mm d⁻¹ e o K_c obtido variou entre 0,2 a 1,7, em termos gerais. O método de estimativa de ET_a e K_c espacializados utilizando a plataforma Google EEFlux possibilitou a compreensão da variabilidade espacial dessas duas variáveis.

Palavras-chave: Coeficiente de cultura, *Coffea arábica*, Evapotranspiração, *Phaseolus vulgaris*, *Vigna unguiculata*

ABSTRACT

Spatial variability of water consumption of irrigated crops using remote sensing

The objective of this study was to estimate the spatial distribution of the actual evapotranspiration (ET_a) and crop coefficient (K_c) curve of the coffee (*Coffea arabica*), Carioca bean (*Phaseolus vulgaris*) and Caupi bean (*Vigna unguiculata*), using the algorithms Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) and Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration (METRIC) in the version of Google Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux). In addition, we aimed to validate the spatial estimates of ET_a by comparing them with the FAO guidelines and crop evapotranspiration (ET_c) values calculated using K_c values obtained in other reference studies in Brazil. The study of coffee crop was carried out in the municipality of Buritis-Minas Gerais, over a period of 2 years (2014-2015). Meanwhile, the bean crop study was conducted in the municipality of Primavera do Leste-Mato Grosso, four crop cycles (2013, 2014, 2015 and 2017) were analyzed. In both cases, images of the Landsat 8 satellite, Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS), from central pivot irrigated areas were used and comparative analyzes were performed using different statistical indices. Average ET_a was 2.17 mm d^{-1} for young coffee plantations, and the K_c mean value was 0.6. For adult coffee plantations, average ET_a was 3.95 mm d^{-1} , and the K_c mean value was 0.85. The ET_c and K_c data obtained based on the SEBAL algorithm displayed similar values to studies that used traditional methods. The ET_a for Carioca bean ranged from 2.3 to 8.5 mm d^{-1} and the K_c obtained ranged from 0.4 to 1.6, in general terms. For Caupi bean, the ET_a obtained ranged from 0.8 to 6.2 mm d^{-1} and the K_c obtained ranged from 0.2 to 1.7, in general terms. The method of estimation of ET_a and K_c spatialized using the Google EEFlux platform allowed an understanding of the spatial variability of these two variables.

Keywords: *Coffea arabica*, Crop coefficient, Evapotranspiration, *Phaseolus vulgaris*, *Vigna unguiculata*

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Localização da área de estudo: imagem obtida pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*) - Landsat 8 em 28/07/2015. Detalhe dos pivôs centrais de café na idade jovem, pivôs de café na idade adulta e da estação meteorológica. 26
- Figura 2.2 - Exemplo de cena Landsat 8 com órbita (*Path*) 220 e ponto (*Row*) 71 utilizada no trabalho. 27
- Figura 2.3 - Fluxograma geral do trabalho. 29
- Figura 2.4 - Distribuição espacial das variáveis obtidas no algoritmo SEBAL: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI); Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI); Índice de área foliar (LAI); Temperatura da superfície (Ts); Albedo da superfície (aS) e Saldo de radiação (Rn). Variáveis calculadas a partir de imagem obtida no dia 28/07/2015. 37
- Figura 2.5 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) e do coeficiente de cultura (K_c) nas áreas estudadas. ET_a e K_c foram calculados a partir de imagem obtida no dia 28/07/2015. 38
- Figura 2.6 - Curva do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro adulto (A) comparada com as recomendações do boletim da FAO-56 e curva do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro jovem (B) comparada com trabalhos de referência no Brasil. 40
- Figura 2.7 - Evapotranspiração de cultura (ET_c) de cafeeiros jovens com base no algoritmo SEBAL em comparação com a ET_c (mm d^{-1}) calculada com dados meteorológicos observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo método de Penman-Monteith (PM) pelo coeficiente de cultura (K_c) de estudos de referência no Brasil: Lima e Silva (2008) utilizando a variedade Rubi MG 1192 (A) e Acaia Cerrado (B) e Santinato et al. (2008) com densidade de plantio de 2500 (C), 3300 (D) e 6700 plantas ha^{-1} (E). 42
- Figura 2.8 - Evapotranspiração de cultura (ET_c) de cafeeiros adultos com base no algoritmo SEBAL em comparação com ET_c (mm d^{-1}) calculada com dados meteorológicos observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando a evapotranspiração de referência (ET_o) calculada pelo método Penman-Monteith (PM) pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e estudos de referência no Brasil: Allen et al. (1998) com (A) e sem cobertura de plantas (B), Villa Nova et al. (2002) com (C) e sem (D) cobertura vegetal e com densidade de colheita de 2500 (E), 3300 (F) e 4000 plantas ha^{-1} (G) e Sato et al. (2007) (H). 44

Figura 3.1 - Localização da área de estudo: detalhes do Estado de Mato Grosso, do município de Primavera do Leste e da área do pivô central analisado.....	53
Figura 3.2 - Variabilidade espacial da altitude (metros) na área de estudo (pivô central).	54
Figura 3.3 - Exemplo de cena Landsat 8 com órbita (<i>Path</i>) 225 e ponto (<i>Row</i>) 71 utilizada no trabalho.	56
Figura 3.4 - Imagens representativas do passo-a-passo seguido no uso do EEFlux para a obtenção de valores de evapotranspiração atual (ET_a).....	59
Figura 3.5 - Fluxograma geral do trabalho.	62
Figura 3.6 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) da cultura do feijão carioca para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.	64
Figura 3.7 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) da cultura do feijão caupi para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.....	66
Figura 3.8 - Distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.	68
Figura 3.9 - Distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c) do feijão caupi para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.	70
Figura 3.10 - Curvas do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca (A) e do feijão caupi (B) comparadas com as recomendações do boletim da FAO-56 e com trabalhos de referência no Brasil.....	77
Figura 3.11 - Evapotranspiração atual (ET_a) do feijão carioca obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux) comparado a ET_c calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pelo método de Penman-Monteith (PM), pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e de estudos de referência no Brasil. Allen et al. (1998) (A), Albuquerque e Andrade (2011) (B), Mendonça et al. (2007) (C) e Medeiros et al. (2001) (D e E).	79
Figura 3.12 - Evapotranspiração atual (ET_a) do feijão caupi obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux) comparado a ET_c calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pelo método de Penman-Monteith (PM), pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e de estudos de referência no Brasil. Allen et al. (1998) (A), Bastos et al. (2008) (B), Souza et al. (2005) (C), Murga-Orrillo et al. (2016) (D) e Saraiva e Souza (2012) (E).	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações das bandas do satélite Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas no presente estudo.....	27
Tabela 2.2 - Datas de passagem do satélite Landsat 8 nas quais as imagens dos sensores <i>Operational Land Imager</i> (OLI) e <i>Thermal Infrared Sensor</i> (TIRS) foram consideradas para o presente o estudo.....	28
Tabela 2.3 - Dados meteorológicos diários utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) para as datas de passagem do satélite Landsat 8 que foram consideradas para o presente o estudo.....	34
Tabela 2.4 - Áreas e números de pixels que foram considerados em cada pivô central para os cálculos do K_c médio para cafeeiros jovens e adultos.....	35
Tabela 2.5 - Condições de desenvolvimento dos estudos do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro e valores usados na comparação do K_c do cafeeiro estimado por intermédio do algoritmo SEBAL com K_c recomendados por estes estudos de referência.....	36
Tabela 2.6 - Valores médios de evapotranspiração atual (ET_a) e de coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro jovem e adulto com base no algoritmo SEBAL e os respectivos desvios padrões (DP).....	39
Tabela 3.1 - Caracterização das safras de feijão carioca (<i>Phaseolus vulgaris</i>) e feijão caupi (<i>Vigna unguiculata</i>) na área de estudo (Primavera do Leste - MT), ao longo dos anos de 2013 e 2017.....	55
Tabela 3.2 - Datas de passagem do satélite Landsat 8 nas quais as imagens dos sensores <i>Operational Land Imager</i> (OLI) e <i>Thermal Infrared Sensor</i> (TIRS) foram consideradas para o presente o estudo.....	56
Tabela 3.3 - Dados meteorológicos diários utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) para as datas de passagem do satélite Landsat 8 que foram consideradas para o presente o estudo.....	61
Tabela 3.4 - Condições de desenvolvimento dos estudos do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca e do feijão caupi, e os valores usados na comparação do K_c dos feijoeiros estimado por meio do algoritmo METRIC (EEFLUX) com K_c recomendados por estes estudos de referência.....	63

Tabela 3.5 - Valores médios, mínimos e máximos de evapotranspiração atual (ET_a) (mm d^{-1}) e de coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca com base no algoritmo METRIC (Google EEFlux), seus respectivos desvios padrões (DP) e eficiência do uso da água (EUA), para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.	71
Tabela 3.6 - Valores médios, mínimos e máximos de evapotranspiração atual (ET_a) e de coeficiente de cultura (K_c) do feijão caupi com base no algoritmo METRIC (Google EEFlux), seus respectivos desvios padrões (DP) e eficiência do uso da água (EUA), para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.	74

1 INTRODUÇÃO GERAL

De toda água presente no planeta Terra (100%), 97,22% está nos oceanos (água salgada) e apenas 2,78% está na forma de água doce. Desse percentual de água doce, 77,78% são águas superficiais e dessas águas superficiais, 99,36% estão contidas nas geleiras, ou seja, de toda água doce superficial do mundo (0,64% do total de água no globo terrestre), apenas 51,80% (0,33% do total) está disponível para ser usada. Da água doce que realmente está disponível, cerca de 70% é utilizada na prática da irrigação (Molden, 2007; Siebert et al., 2010; Moreira et al., 2010).

A agricultura irrigada é a usuária dominante dos recursos globais de água doce quando comparada aos setores de abastecimento, de indústrias, de geração de energia, de mineração, de aquicultura, de navegação, de turismo e de lazer; no entanto, a água utilizada na agricultura é fundamental para a produção de alimentos e, além disso, esta água usada na irrigação de cultivos retorna para a atmosfera de forma limpa, não sendo devolvida para os mananciais de forma contaminada (Molden, 2007; Siebert et al., 2010).

A produção mundial de alimentos ocorre majoritariamente no sistema de agricultura de sequeiro. Portanto, muito dependente das condições de tempo e clima de cada região produtora. Um grande desafio consiste em produzir mais alimentos com menor quantidade de água, tarefa que poderá ser bastante dificultada se confirmadas as projeções de mudanças climáticas para as próximas décadas (Stocker et al., 2013). Some-se às possíveis alterações climáticas da Terra, o contínuo crescimento da população global, que até o ano de 2050 deve ultrapassar os nove bilhões de habitantes (Bos et al., 2005).

De acordo com Rosegrant e Ringler (2000) à medida que a população e a economia crescem, a demanda pela transferência de água utilizada pela irrigação para outros setores também aumenta. Entretanto, a produção de alimentos que deve atender ao crescimento mundial necessita do insumo água, especialmente porque a fronteira agrícola vem diminuindo e áreas até pouco consideradas impróprias para a exploração agrícola estão sendo cultivadas. Portanto, é imprescindível a utilização racional da água, especialmente no uso com irrigação a fim de permitir alocação deste recurso aos demais setores da economia e ao uso doméstico (Abu-Zeid, 2001; Zwart e Bastiaanssen, 2007).

Considerando a grande quantidade de água usada na agricultura irrigada anualmente, aliada ao aumento da área irrigada nos últimos anos, a evapotranspiração (ET), fenômeno no qual a água passa para a atmosfera, na forma de vapor, pela superfície do solo e pela planta, através dos estômatos e pela água na superfície de galhos e folhas, assume um papel cada vez maior na gestão dos recursos hídricos. O gerenciamento do uso da água é um dos maiores desafios para a humanidade neste século. O conhecimento das leis físicas e das características que governam cada um dos componentes do ciclo hidrológico tem uma importância relevante. Dentro do ciclo hidrológico, o processo de evaporação (E), inerente a diferentes superfícies terrestres, precisa ser entendido e quantificado corretamente, de forma que se alcance um desenvolvimento sustentável de nossos recursos hídricos (Bastiaanssen et al., 2000; Valipour, 2015; Fisher et al., 2017).

A quantificação do consumo hídrico das plantas é essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos na agricultura e vem sendo muito estudada durante as últimas décadas (Doorenbos e Pruitt, 1977; Doorenbos e Kassam, 1979; Allen et al., 1998; Allen et al., 2005). O planejamento do uso e manejo da água em áreas agrícolas é feito por meio do conhecimento de variáveis que estão relacionadas ao clima, ao solo e às plantas, tais como, a evapotranspiração de referência (ET_0), o coeficiente de cultura (K_c) e a evapotranspiração de cultura (ET_c), que é o resultado do produto das duas primeiras variáveis (Allen et al., 2011a; Pereira et al., 2015).

A medida da ET é difícil e onerosa, quando realizada por meio de lisímetros ou evapotranspirômetros. Por isso, a ET é geralmente determinada por meio de estimativas. Conforme os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, os métodos para estimar a ET podem ser agrupados em cinco categorias: empíricos, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões (Pereira et al., 1997; Pereira et al., 2015). A ET é usualmente determinada pelo o método da FAO Penman-Monteith, segundo o qual calcula-se a ET_0 , relativa à uma área coberta por grama, sem restrições hídrica e em bom desenvolvimento, apresentando altura em torno de 0,12 m. Para determinar-se a ET_c em questão, multiplica-se a ET_0 pelo K_c . O K_c engloba as características da cultura em relação à resistência superficial ao transporte de vapor d'água, arquitetura e morfologia que influenciam na transpiração, características que variam ao decorrer do desenvolvimento da

cultura, de forma que, para cada estágio de desenvolvimento, há um K_c específico (Allen et al., 1989; Allen et al., 1998; Allen et al., 2005).

Porém, os métodos de medidas e estimativas da ET citados anteriormente são limitados porque são baseados em valores pontuais de ET para um local específico e não para uma escala regional. A ET é variável no espaço e no tempo devido à grande variabilidade espacial da precipitação, das características físico-hídricas do solo, do tipo e da densidade da vegetação e da variabilidade do clima em geral (Allen et al., 2011b). Segundo Tasumi et al. (2005) as técnicas tradicionais para obtenção da ET são aplicáveis para uma área relativamente homogênea no entorno do equipamento de medida da ET, o qual está exposto aos fatores ambientais locais. Portanto, quando há necessidade de determinação da ET em escala regional faz-se necessária a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e de algoritmos apropriados.

Nas últimas décadas, uma variedade de técnicas de sensoriamento remoto tem sido usada para quantificar a ET de áreas agrícolas em larga escala (Kustas e Norman, 1996; Courault et al., 2005; Zhang et al., 2016). Dentre os tipos de modelos e algoritmos para obtenção da ET, os que são baseados no balanço de energia da superfície são os métodos mais usados, dentre eles, estão o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b) e o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) (Allen et al., 2007). Além desses dois, atualmente existe a plataforma *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux) que foi projetada e desenvolvida dentro do *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick et al., 2017) com base no algoritmo METRIC e funciona como um meio de automatizar a entrada e manipulação de dados, no intuito de acelerar o processo de obtenção da ET.

O desempenho do algoritmo SEBAL tem demonstrado potencial interessante para estimar a ET_c de diversas culturas agrícolas (algodão, arroz, cana-de-açúcar, milho, trigo e outras) em grandes áreas, usando dados meteorológicos limitados e nas diferentes regiões do mundo (Bastiaanssen et al., 2005; Li et al., 2008; Teixeira et al., 2009b; Ruhoff et al., 2012; Kiptala et al., 2013; Paul et al., 2013; Sari et al., 2013; Mkhwanazi et al., 2015; Rawat et al., 2017). O desempenho do algoritmo METRIC, na sua versão tradicional, também tem sido promissor para estimar a ET de diversas culturas agrícolas nas diferentes regiões do mundo. Alguns exemplos de aplicações do METRIC podem ser encontrados em trabalhos desenvolvidos com o

algodão (French et al., 2015), com a cana-de-açúcar (Zhang et al. 2015), com o sorgo (Wagle et al., 2017), com o milho (Singh et al., 2012), com a soja (Choi et al., 2009), dentre outros. Quanto à versão do algoritmo METRIC na versão do Google EEFlux, Allen et al. (2015) afirmam que a nova ferramenta é capaz de calcular valores de evapotranspiração atual (ET_a) comparáveis aos valores encontrados pelo algoritmo METRIC, na sua versão tradicional.

Portanto, a estimativa do consumo hídrico do cafeeiro e do feijoeiro utilizando os algoritmos SEBAL e METRIC (na versão do Google EEFlux) deve ser melhor estudada em função das particularidades dessas culturas cultivadas em condições de clima tropical, uma vez que a detecção remota pode melhorar o gerenciamento da irrigação, considerando a variabilidade espacial das áreas de cultivo.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estimar a distribuição espacial da ET_a e a curva do K_c do café (*Coffea arabica*), do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e do feijão caupi (*Vigna unguiculata*), utilizando os algoritmos SEBAL e METRIC na versão do Google EEFlux. Além disso, visou-se validar as estimativas espaciais de ET_a comparando-as com as diretrizes da FAO e com valores de ET_c calculados com o uso de valores de K_c obtidos em outros estudos de referência no Brasil.

Com base no que foi exposto, foram elaborados dois capítulos:

Capítulo I:

Variabilidade espacial do consumo hídrico do cafeeiro utilizando o algoritmo

SEBAL: compreende os estudos da distribuição espacial da ET_a e da curva do K_c do café (*Coffea arabica*), utilizando o algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL).

Capítulo II:

Variabilidade espacial do consumo hídrico do feijoeiro utilizando a ferramenta

Google EEFLUX: compreende os estudos da distribuição espacial da ET_a e da curva do K_c do feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e do feijão caupi (*Vigna unguiculata*), utilizando o algoritmo *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) na versão do *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux).

REFERÊNCIAS

- Abu-Zeid, M. 2001. Water pricing in irrigated agriculture. *International Journal of Water Resources Development* 17: 527-538.
- Allen, R.G.; Jensen, M.E.; Wright, J.L.; Burman, R.D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal* 81: 650-662.
- Allen, R.G.; Morton, C.; Kamble, B.; Kilic, A.; Huntington, J.; Thau, D.; Gorelick, N.; Erickson, T.; Moore, R.; Trezza, R.; Ratcliffe, I.; Robison, C. 2015. EEFlux: A Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. p. 1-11.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T.A.; Jensen, M. E. 2011a. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98: 899-920.
- Allen, R.G.; Irmak, A.; Trezza, R.; Hendrickx, J.M.; Bastiaanssen, W.; Kjaersgaard, J. 2011b. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes* 25: 4011-4027.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56: FAO, Rome, Italy.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J.L. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 2-13.
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133: 380-394.
- Bastiaanssen, W.G.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.; Molden, D.J.; Makin, I.W. 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management* 46: 137-155.
- Bastiaanssen, W.G.M.; Noordman, E.J.M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B.P.; Allen, R.G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 85-93.

Bastiaanssen, W.G.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; Van der Wal, T. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology* 212: 213-229.

Bos, M.G.; Burton, M.A.; Molden, D.J. 2005. Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines. CABI publishing.

Choi, M.; Kustas, W.P.; Anderson, M.C.; Allen, R.G.; Li, F.; Kjaersgaard, J.H. 2009. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, US) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 2082-2097.

Courault, D.; Seguin, B.; Olioso, A. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage* 19: 223-249.

Doorenbos, J.; Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper*, 33, Rome, 193p.

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirement: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Rome, 144p.

Fisher, J.B.; Melton, F.; Middleton, E.; Hain, C.; Anderson, M.; Allen, R.; Kilic, A. 2017. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research* 53: 2618-2626.

French, A.N.; Hunsaker, D.J.; Thorp, K.R. 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment* 158: 281-294.

Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.

Kiptala, J.K.; Mohamed, Y.; Mul, M.L.; Zaag, P. 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research* 49: 8495-8510.

Kustas, W.P.; Norman, J.M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41: 495-516.

Li, H.; Zheng, L.; Lei, Y.; Li, C.; Liu, Z.; Zhang, S. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95: 1271-1278.

Mkhwanazi, M.; Chávez, J.L.; Andales, A.A. 2015. SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sensing* 7: 15046-15067.

Molden, D. 2007. Comprehensive assessment of water management in agriculture. *Water for Food, Water for Life: Comprehensive assessment of water management in agriculture*. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute. 688p.

Moreira, L.C.; Durand, B.J.; Teixeira, A.D.S.; Andrade, E.M. 2010. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. *Engenharia Agrícola* 30: 1148-1159.

Paul, G.; Gowda, P.H.; Prasad, P.V.; Howell, T.A.; Staggenborg, S.A.; Neale, C.M. 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX 08. *Advances in Water Resources* 59: 157-168.

Pereira, A.R.; Villa Nova, N.A.; Sedyama, G.C. 1997. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: FEALQ, 183p.

Pereira, L.S.; Allen, R.G.; Smith, M.; Raes, D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147: 4-20.

Rawat, K.S.; Bala, A.; Singh, S.K.; Pal, R.K. 2017. Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management* 187: 200-209.

Rosegrant, M.W.; Ringler, C. 2000. Impact on food security and rural development of transferring water out of agriculture. *Water Policy* 1: 567-586.

Ruhoff, A.L.; Paz, A.R.; Collischonn, W.; Aragao, L.E.; Rocha, H.R.; Malhi, Y.S. 2012. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing* 4: 703-725.

Sari, D.K.; Ismullah, I.H.; Sulasdi, W.N.; Harto, A.B. 2013. Estimation of water consumption of lowland rice in tropical area based on heterogeneous cropping calendar using remote sensing technology. *Procedia Environmental Sciences* 17: 298-307.

Siebert, S.; Burke, J.; Faures, J.M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Döll, P.; Portmann, F.T. 2010. Groundwater use for irrigation a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 1863-1880.

Singh, R.K.; Liu, S.; Tieszen, L.L.; Suyker, A.E.; Verma, S.B. 2012. Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. *Irrigation Science* 30: 303-313.

Stocker, T.F.; Qin, D.; Plattner, G.K.; Tignor, M.; Allen, S.K.; Boschung, J.; Midgley, P.M. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*.

Tasumi, M.; Trezza, R.; Allen, R.G.; Wright, J.L. 2005. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid US. *Irrigation and Drainage Systems* 19: 355-376.

Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmad, M.U.D, Bos, M.G. 2009b. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the large scale. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 462-476.

Valipour, M. 2015. Future of agricultural water management in Africa. *Archives of Agronomy and Soil Science* 61: 907-927.

Wagle, P.; Bhattarai, N.; Gowda, P.H.; Kakani, V.G. 2017. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128: 192-203.

Zwart, S.J.; Bastiaanssen, W.G. 2007. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water Management* 89: 287-296.

Zhang, H.; Anderson, R.G.; Wang, D. 2015. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research* 180: 143-154.

Zhang, K.; Kimball, J.S.; Running, S.W. 2016. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3: 834-853.

2 VARIABILIDADE ESPACIAL DO CONSUMO HÍDRICO DO CAFEEIRO UTILIZANDO O ALGORITMO SEBAL

Resumo

O café é uma das principais culturas irrigadas do Brasil, com elevado valor agregado e com preço de venda vinculado à qualidade do produto final; por esse motivo, o uso racional da água nesta atividade é de grande importância, diante do contexto atual de escassez desse recurso e da exigência crescente de técnicas de manejo sustentáveis nos mercados certificados. Para adoção do manejo da irrigação baseado nos elementos meteorológicos, o conhecimento da evapotranspiração (ET) e do coeficiente de cultura (K_c) se faz necessário. A variabilidade espacial da ET e do K_c é desconsiderada quando estes são obtidos por meio de métodos tradicionais. Métodos baseados em medidas de reflectâncias têm o potencial de obter essas variáveis de forma espacializada, o que pode vir a melhorar a qualidade média final do produto na área de produção. O estudo foi conduzido no município de Buritis, MG, Brasil, em áreas com a espécie *Coffea arabica* irrigada por pivô central. Usando imagens do satélite Landsat 8, determinou-se a curva do K_c e a variabilidade espacial da evapotranspiração atual (ET_a). Foram utilizadas imagens dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), de cafeeiros jovens e adultos, ao longo de um período de dois anos. A estimativa da ET foi realizada utilizando o SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*). Além disso, por intermédio do método de Penman-Monteith, a evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada utilizando dados de uma estação meteorológica local. Utilizando os valores de ET_a e ET_o , foram obtidos os valores da fração de evapotranspiração (ET_f), análogo ao K_c . Foi feita uma análise comparativa utilizando diferentes índices estatísticos, a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), o erro médio absoluto (MBE), a raiz do erro médio ao quadrado normalizada (NRMSE) e o índice de concordância (d). A ET_a para cafeeiros jovens foi de $2,17 \text{ mm dia}^{-1}$, na média geral, e o valor médio de K_c foi de 0,6. Para cafeeiros adultos, a ET_a foi de $3,95 \text{ mm dia}^{-1}$, na média geral e o valor médio de K_c foi de 0,85. Os dados de ET_a e K_c obtidos com base no algoritmo SEBAL apresentaram valores semelhantes aos estudos que utilizaram métodos tradicionais (ET_o K_c).

Palavras-chave: Coeficiente de cultura; *Coffea arabica*; Evapotranspiração

SPATIAL VARIABILITY OF COFFEE PLANT WATER CONSUMPTION BASED ON THE SEBAL ALGORITHM

Abstract

Coffee is one of the main irrigated crops in Brazil, with high added value and sales price linked to the quality of the final product; for this reason, the rational use of water in this activity is of great importance, given the current context of scarcity of this resource and the growing demand for sustainable management techniques in certified markets. Awareness of evapotranspiration (ET) and crop coefficient (K_c) is necessary for irrigation management in coffee crops based on the meteorological elements. ET and K_c spatial variabilities are disregarded in traditional methods. Methods based on reflectance measurements have potential to obtain these spatialized variables, which may improve the final average quality of the product in

the production area. The study was conducted in Buritis, Minas Gerais State, Brazil, in areas cropped with *Coffea arabica* irrigated by central pivots. The K_c curve and spatial variability of actual evapotranspiration (ET_a) were determined using images from Landsat 8 satellite. We used images of young and adult coffee plantations from OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) sensors over a two-year period. Evapotranspiration was estimated using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL). Moreover, the reference evapotranspiration (ET_o) was estimated through the Penman-Monteith method using data from a local weather station. We obtained the values for the evapotranspiration fraction (ET_f), analogous to K_c , according to ET and ET_o values. A comparative analysis was made using different statistical indices, the root mean square error (RMSE), the mean bias error (MBE), the normalized root mean square error (NRMSE) and the index of agreement (d). Average ET_a was 2.17 mm d^{-1} for young coffee plantations, and the K_c mean value was 0.6. For adult coffee plantations, average ET_a was 3.95 mm d^{-1} , and the K_c mean value was 0.85. The ET_c and K_c data obtained based on the SEBAL algorithm displayed similar values to studies that used traditional methods.

Keywords: *Coffea arabica*; Crop coefficient; Evapotranspiration

2.1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração da cultura (ET_c), a partir de superfícies de cultivo em condições sem déficit é determinada pelo coeficiente de cultura (K_c) que relaciona a ET_c e a evapotranspiração de referência (ET_o). No entanto, a evapotranspiração (ET) é uma função complexa das propriedades do solo, das condições atmosféricas, do uso do solo, da vegetação e da topografia, sendo influenciada por estes parâmetros no espaço e no tempo (Navarro et al., 2016).

Em áreas agrícolas, a ET_c pode ser medida ao longo de uma superfície homogênea, utilizando técnicas convencionais, tais como a Razão de Bowen, o sistema de correlação de turbilhões (*Eddy covariance*), o balanço de água no solo e a lisimetria. No entanto, medições *in situ* são limitadas em gerar estimativas de área, tanto em termos de custo quanto de precisão, por causa da heterogeneidade natural (Allen et al., 2011; Kiptala et al., 2013). Assim, torna-se difícil estimá-la ou medi-la, representativamente, em escala regional.

Com o advento dos satélites de observação da Terra (Navarro et al., 2016), diferentes algoritmos de modelagem da ET utilizando dados de sensoriamento remoto foram desenvolvidos e validados (Paul et al., 2013). Um desses métodos, desenvolvido na década de 90, é o SEBAL-*Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaanssen et al., 1998a, 1998b). A principal vantagem da detecção remota é que a ET pode ser calculada em larga escala, na base de pixel-a-pixel em um

conjunto consistente de equações que utilizam radiações espectrais únicas para cada pixel (Teixeira et al., 2009).

O desempenho desse método tem demonstrado potencial interessante para estimar a ET_c de diversas culturas agrícolas (algodão, arroz, cana-de-açúcar, milho, trigo e outras) em grandes áreas, usando dados meteorológicos limitados e nas diferentes regiões do mundo (Bala et al., 2016; Bastiaanssen et al., 2005; Li et al., 2008; Teixeira et al., 2009b; Ruhoff et al., 2012; Kiptala et al., 2013; Paul et al., 2013; Sari et al., 2013; Mkhwanazi et al., 2015; Rawat et al., 2017).

Existem alguns estudos sobre ET em áreas de cultivo de café (Flumignan et al., 2011; Marin et al., 2005); no entanto, a estimativa do consumo de água do cafeeiro utilizando o algoritmo SEBAL deve ser melhor estudada em função das particularidades da distribuição em *rank* do dossel destas plantas no campo, uma vez que a detecção remota pode melhorar o gerenciamento da irrigação, considerando a variabilidade espacial das áreas cultivadas.

Este estudo teve como objetivo estimar a distribuição espacial da ET_c e a curva do K_c do cafeeiro, utilizando o satélite Landsat 8 e o algoritmo SEBAL. Além disso, visou-se validar as estimativas espaciais de ET_c usando as diretrizes da FAO e valores de K_c do cafeeiro obtidos em outros estudos de referência no Brasil.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em propriedades de cafeicultores do noroeste do Estado de Minas Gerais (cerrado brasileiro). Estas estão localizadas no município de Buritis-MG e em municípios vizinhos (latitude de 15°48'S, longitude de 46°30'O e altitude média de 600 metros), totalizando aproximadamente dois mil hectares irrigados da espécie *Coffea arabica* (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Localização da área de estudo: imagem obtida pelo sensor OLI (*Operational Land Imager*) - Landsat 8 em 28/07/2015. Detalhe dos pivôs centrais de café na idade jovem, pivôs de café na idade adulta e da estação meteorológica.

Os sistemas de irrigação utilizados na área de estudo são do tipo pivô central equipados com emissores LEPA (*Low Energy Precise Application*), que é um sistema de aspersão de baixa pressão no qual os emissores ficam suspensos por um tubo de transporte de água, diminuindo assim as perdas de água por evaporação, tubo este posicionado bem acima do dossel das plantas, em plantio perfeitamente circular, concêntrico ao equipamento.

O clima da região é do tipo Aw (Alvares et al., 2013) isto é, tropical com estação seca de inverno. A temperatura média anual é de 24,2 °C e a pluviosidade média anual é de 1815 mm. O relevo é plano e os solos predominantes da região são Latossolos Vermelho-Amarelos, que possuem baixa fertilidade natural, variando de profundos a muito profundos, permeáveis, de textura média a arenosa, com alto teor de alumínio trocável e relacionados a rochas arenosas.

2.2.2 Imagens de satélite

Foram utilizadas imagens dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*ThermalInfrared Sensor*) do satélite Landsat 8, cena com órbita (*Path*) 220 e ponto (*Row*) 71 (Figura 2.2), ao longo de um período de 2 anos (2014-2015) de cafezais jovens e adultos. As especificações das bandas que foram utilizadas estão detalhadas na Tabela 2.1.

Figura 2.2 - Exemplo de cena Landsat 8 com órbita (*Path*) 220 e ponto (*Row*) 71 utilizada no trabalho.

Tabela 2.1 - Especificações das bandas do satélite Landsat 8 OLI/TIRS utilizadas no presente estudo.

Bandas		Resolução (metros)
Landsat 8 (OLI/TIRS) Lançado em 11/02/2013	Banda 2 - Azul	30
	Banda 3 - Verde	30
	Banda 4 - Vermelho	30
	Banda 5 - Infravermelho próximo	30
	Banda 6 - Infravermelho médio (SWIR 1)	30
	Banda 7 - Infravermelho médio (SWIR 2)	30
	Banda 8 - Pancromática	15
	Banda 10 - Infravermelho termal (TIRS) 1	100
	Banda 11 - Infravermelho termal (TIRS) 2	100

Fonte: Adaptado de USGS (2016).

Na seleção das imagens, foram priorizadas aquelas sem nuvens e regularmente distribuídas ao longo do período de estudo, de forma a permitir melhor avaliação das variáveis (ET e K_c) de acordo com as distintas fases fenológicas do café (Tabela 2.2). Também foi utilizada uma imagem do satélite ASTER GEDEM V2

(*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), referente ao modelo digital do terreno (MDT).

Tabela 2.2 - Datas de passagem do satélite Landsat 8 nas quais as imagens dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) foram consideradas para o presente o estudo.

2014		2015*	
14 de janeiro	9 de julho	17 de janeiro	28 de julho
15 de fevereiro	10 de agosto	2 de fevereiro	29 de agosto
19 de março	11 de setembro	6 de março	30 de setembro
20 de abril	13 de outubro	23 de abril	16 de outubro
22 de maio	30 de novembro	25 de maio	*
7 de junho	*	10 de junho	3 de dezembro

Uma imagem foi usada para cada mês, embora em alguns meses do ano haja duas imagens do Landsat 8 disponíveis para uso. *Nos meses de dezembro de 2014 e novembro de 2015 as imagens disponíveis apresentaram grande quantidade de nuvens e, por isso, a evapotranspiração média da cultura (ET_c) para esses meses foi calculada com dados de apenas um ano.

O esquema da metodologia aplicada no presente estudo pode ser analisado na Figura 2.3. As imagens do satélite Landsat 8 foram reprojetaadas para o sistema de coordenadas projetadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), Zona 23 Sul e Datum Sirgas 2000. Além disso, estas imagens foram convertidas de números digitais para valores de reflectância no topo da atmosfera. Estes procedimentos de pré-processamento das imagens foram realizados nos sistemas de informação geográfica (SIG): Gdal (*Geospatial Data Abstraction Library*, versão 2.0) e QGIS (*QGIS Development Team*, versão 2.8.3), sendo neste último mediante o *plugin* GRASS 7.0 (*GRASS Development Team*, versão 7.0), que permite a interação entre estes dois SIGs.

Figura 2.3 - Fluxograma geral do trabalho.

2.2.3 Estimativa da evapotranspiração (algoritmo SEBAL)

Após o pré-processamento das imagens, foi feita a estimativa da evapotranspiração atual (ET_a) por meio do algoritmo SEBAL-*Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Bastiaanssen et al., 1998a). As etapas de cálculo do algoritmo SEBAL foram realizadas utilizando um *script* na linguagem de programação *python* disponibilizado por Wolff (2016) no programa GRASS GIS 7.0 (GRASS Development Team, versão 7.0).

Para estimar a ET em escala temporal e espacial, o algoritmo SEBAL utiliza uma abordagem residual do balanço de energia da superfície. A energia líquida resultante do balanço de radiação na superfície é particionada no balanço de energia para:

(i) aquecimento do solo (fluxo de calor no solo); (ii) aquecimento do ambiente (fluxo de calor sensível para a atmosfera); e (iii) evaporação da água (fluxo de calor latente nas superfícies). Dessa forma, a energia utilizada no sistema solo-planta-ambiente pode ser mensurada pela equação do balanço de energia, de acordo a Equação 1.

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (1)$$

em que: R_n é saldo de radiação, ($W\ m^{-2}$); G é o fluxo de calor no solo, ($W\ m^{-2}$); H é o fluxo de calor sensível para a atmosfera, ($W\ m^{-2}$); e λET é o fluxo de calor latente, ($W\ m^{-2}$).

Portanto, rearranjando a equação do balanço de energia, a ET é estimada considerando o λET como a energia “residual”, tal como a Equação 2.

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2)$$

O saldo de radiação (R_n), expressa o equilíbrio da radiação dos fluxos de entrada e saída, o que constitui um fator chave para o aquecimento da atmosfera e do solo, sendo dado pela Equação 3.

$$R_n = (RS_{\downarrow} - \alpha RS_{\downarrow}) + (RL_{\downarrow} - RL_{\uparrow} - (1 - \epsilon_0) RL_{\downarrow}) \quad (3)$$

em que: $RS_{\downarrow}$ é a radiação solar incidente, ($W\ m^{-2}$); α é o albedo da superfície, (adimensional); $RL_{\downarrow}$ é a radiação termal emitida pela atmosfera, ($W\ m^{-2}$); ϵ_0 é a emissividade da superfície, (adimensional); e $RL_{\uparrow}$ é a radiação termal emitida pela superfície, ($W\ m^{-2}$).

O termo $\alpha RS_{\downarrow}$ representa a radiação de onda curta (radiação solar) refletida pela superfície e o termo $(1 - \epsilon_0) RL_{\downarrow}$ a radiação de onda longa (radiação termal) refletida pela superfície.

A radiação de onda curta líquida disponível na superfície da terra depende da radiação de onda curta incidente ($RS_{\downarrow}$) e do albedo da superfície (α). O segundo parâmetro é calculado a partir das radiâncias espectrais para cada banda da faixa do visível e do infravermelho, seguido de expressões matemáticas para a integração espectral e correções atmosféricas (Silva et al., 2016). A $RS_{\downarrow}$ foi calculada em função da radiação teórica no topo da atmosfera (RTOA) e da transmissividade atmosférica (τ_{SW}), ambas as expressões dadas pela FAO-56: *Crop Evapotranspiration* (Allen et al., 1998).

A radiação de onda longa emitida pela superfície ($RL_{\uparrow}$) foi calculada segundo a equação de Stefan-Boltzman (Boltzmann, 1884). A equação relaciona uma quantidade teórica de radiação emitida pela superfície, com a temperatura da superfície na quarta potência. A temperatura da superfície (T_S) foi obtida pela equação de Weng et al. (2004) (adaptado para o satélite Landsat 8) utilizando a

Banda 10, depois das correções atmosféricas. Por sua vez, a emissividade da superfície (ϵ_0) foi estimada em função do índice de vegetação ajustado ao solo (SAVI) e do índice de área foliar (IAF) (Allen et al., 2007).

Tal como a $RL_{\uparrow}$, a radiação de onda longa incidente na superfície ($RL_{\downarrow}$) foi estimada pela equação de Stefan-Boltzman (Boltzmann, 1884), a qual relaciona a emissividade empírica da atmosfera (ϵ_A) e a quarta potência da temperatura do ar, como dado em Allen et al. (2007). Portanto, uma vez calculada a radiação dos fluxos de entrada e saída do sistema solo-atmosfera, a R_n foi calculada pela Equação 3.

O segundo termo a ser calculado do balanço de energia é o fluxo de calor no solo (G). O termo G foi calculado mediante relação com o R_n , pela razão G/R_n . Essa razão foi estimada em função do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Bastiaanssen, 2000; Allen et al., 2007), como pode ser visto na Equação 4.

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s - 273,15)}{\alpha} (0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2) (1 - 0,98 \text{NDVI}^4) \quad (4)$$

em que: T_s é a temperatura da superfície, (K); e NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada. Para corpos d'água, em que o valor de NDVI é negativo a razão G/R_n é definida como 0,5.

O fluxo de calor sensível (H) foi estimado a partir do gradiente de temperatura próximo a superfície dado pela função aerodinâmica, conforme a Equação 5.

$$H = \rho c_p \frac{(a + bT_s)}{r_{ah}} \quad (5)$$

em que: ρ é a densidade do ar, (kg m^{-3}); c_p é o calor específico do ar à pressão constante, ($\approx 1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); r_{ah} é a resistência aerodinâmica para transferência de calor, (s m^{-1}); e a e b são coeficientes empíricos determinados por meio de uma calibração interna para cada imagem de satélite.

O termo $(a + bT_s)$ é uma equação que representa o gradiente de temperatura próximo à superfície e a temperatura do ar, para uma altura próxima a superfície de 0,1 metros e outra 2 metros acima da superfície. A determinação da r_{ah} requer cálculos iterativos para correções de estabilidade da atmosfera aplicando o comprimento de Monin-Obukhov (L) (Bastiaanssen, 2000; Koloskov et al., 2007).

As iterações da calibração interna do algoritmo SEBAL foram realizadas para prever duas condições extremas de ET. Uma para H igual a zero, sendo denominada de pixel “frio” e a outra para o fluxo de calor latente (λET) igual a zero, denominada de pixel “quente”. O pixel “frio” é selecionado em uma superfície de cultura bem irrigada e coberta por vegetação, no qual representam casos que a quantidade máxima de energia disponível está sendo consumida pelo processo de ET. O pixel “quente” é selecionado em uma área de campo aberto, sem vegetação e irrigação, em que a ET é assumida como zero ($\lambda ET = 0$) ou $H = R_n - G$. Os passos para seleção dos pixels supracitados estão descritos em Allen et al. (2007).

A seleção dos pixels “quente” e “frio” nas imagens utilizadas neste trabalho foi feita de forma manual. O pixel “quente” foi selecionado em áreas de campo aberto próximas ao local de estudo, enquanto que o pixel “frio” foi selecionado em áreas de café irrigado na região de estudo.

A última etapa do algoritmo SEBAL é o cálculo da ET. Uma vez calculado os fluxos do balanço de energia, a evapotranspiração instantânea (ET_i) na hora de passagem do satélite e, conseqüente, do imageamento da superfície foi calculada pela Equação 6.

$$ET_i = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (6)$$

em que: ET_i é a evapotranspiração instantânea, (mm h^{-1}); 3600 o número de segundos em uma hora; e λ é o calor latente de vaporização, (MJ kg^{-1}) que segundo Allen et al. (2007) pode ser calculado pela Equação 7.

$$\lambda = [2,501 - 0,00236 (T_s - 273,15)] \quad (7)$$

Posteriormente foi calculado a evapotranspiração de referência diária (ET_o) e horária (ET_{oi}), mediante o uso dos dados meteorológicos e do modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), para ambas as referências temporais. Nos cálculos da ET_{oi} foram consideradas os horários de passagem do satélite, o fuso horário (conversão para o horário de Brasília) e o horário de verão em determinados períodos do ano. Uma vez estabelecidos os valores de ET_i , obtidos pelo SEBAL, e de ET_{oi} , a razão entre essas grandezas fornece um coeficiente, denominado de

fração evapotranspiratória de referência (ET_{of}). Quando obtido em superfícies cultivadas, esse coeficiente é similar ao K_c (Tasumi et al., 2005).

Assumindo-se que a ET_{of} na hora da passagem do satélite é relativamente constante durante o dia como demonstrado por Allen et al. (2007). A evapotranspiração diária (ET_{24h}) foi calculada utilizando a Equação 8.

$$ET_{24h} = ET_{of} ET_o \quad (8)$$

em que: ET_{24h} é a evapotranspiração diária, (mm dia^{-1}); ET_{of} é a fração evapotranspiratória de referência, (adimensional); e ET_o é a evapotranspiração de referência diária, (mm dia^{-1}).

2.2.4 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c)

A ET_o para os dias de passagem do satélite foi estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO 56), conforme metodologia adotada por Allen et al. (1998) por meio do software REF-ET versão 2.01.14.

Os dados meteorológicos (temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e precipitação) utilizados nas estimativas da ET_o foram obtidos na estação meteorológica localizada na área de estudo (Tabela 2.3). Esta estação encontra-se instalada a uma altura de dois metros em relação ao solo e registra dados de 15 em 15 minutos, sendo que estes são armazenados em um sistema de aquisição de dados.

Tabela 2.3 - Dados meteorológicos diários utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) para as datas de passagem do satélite Landsat 8 que foram consideradas para o presente o estudo.

Datas	URmed %	U_2 ms^{-1}	Tmax °C	Tmin °C	Qg $MJ\ m^2\ d^{-1}$	Ppt mm	ET_o mmd^{-1}
14/01/2014	70,2	1,2	30,2	13,8	22,3	0,0	4,55
15/02/2014	89,4	0,4	27,4	17,9	9,7	29,4	2,11
19/03/2014	86,9	0,6	29,0	14,0	16,8	5,8	3,16
20/04/2014	76,8	0,6	30,3	13,7	19,2	0,0	3,44
22/05/2014	74,6	0,5	28,5	11,2	16,5	0,0	2,69
07/06/2014	74,4	0,6	27,5	11,3	13,5	0,0	2,32
09/07/2014	72,7	0,6	25,7	8,5	11,9	0,0	2,07
10/08/2014	56,3	1,0	27,1	5,4	19,1	0,0	3,35
11/09/2014	51,3	1,1	31,2	9,7	21,8	0,0	4,44
13/10/2014	45,5	0,9	33,7	11,8	22,6	0,0	4,83
30/11/2014	83,8	0,8	29,8	17,3	16,8	54,0	3,46
17/01/2015	64,2	0,7	31,4	13,1	22,0	0,0	4,37
02/02/2015	66,5	0,6	31,3	12,7	25,7	0,0	4,77
06/03/2015	89,3	0,6	26,9	15,4	8,0	6,8	1,79
23/04/2015	86,0	0,6	28,7	15,7	11,6	0,0	2,31
25/05/2015	74,3	0,5	27,1	10,6	17,1	0,0	2,65
10/06/2015	74,5	0,6	27,2	9,5	15,2	0,0	2,43
28/07/2015	62,6	0,6	29,1	11,4	12,7	0,0	2,48
29/08/2015	56,2	1,0	30,1	16,1	16,1	0,0	3,57
30/09/2015	69,2	1,1	32,0	14,6	17,0	0,0	3,84
16/10/2015	42,0	0,9	35,2	15,5	20,7	0,0	4,82
03/12/2015	85,9	1,0	28,7	18,2	14,5	1,0	3,07

URmed - umidade relativa média; U_2 - velocidade do vento a 2 metros de altura; Tmax- temperatura máxima do ar; Tmin - temperatura mínima do ar; Qg - Radiação solar na superfície terrestre; Ppt - precipitação pluvial; ET_o - Evapotranspiração de referência diária.

Após a obtenção da ET_o , o K_c foi obtido por intermédio da relação entre a ET_a e a ET_o diária, obtendo-se um valor de K_c para cada mês estudado. O termo K_c foi usado ao longo do trabalho representando o que é na verdade o K_c multiplicado pelo coeficiente de estresse hídrico do solo (K_s) (Allen et al., 2007), ou seja, considerou-se que o solo estava na capacidade de campo nos dias avaliados.

Dos valores de K_c obtidos nas imagens, foram considerados para as etapas seguintes, aqueles que estavam localizados nas áreas de cafezais adultos e jovens. O K_c médio para cafeeiros jovens foi calculado utilizando-se valores provenientes

das áreas de 4 pivôs centrais que juntos abrangem uma área de 225 ha. Já o K_c médio para cafeeiros adultos foi calculado utilizando-se valores provenientes das áreas de 13 pivôs centrais que juntos abrangem uma área de 1284 ha. As áreas e o número de pixels de cada pivô central, com valores de K_c que foram considerados nos cálculos, podem ser vistos na Tabela 2.4.

Os cafeeiros foram considerados jovens quando tinham menos de três anos e adultos quando tinham três anos ou mais. Na delimitação de polígono de áreas de cafeeiros jovens e adultos, os pixels de borda inseridos em campos vizinhos foram considerados. No entanto, os valores de ET_a desses pixels de borda foram considerados, para o cálculo das médias apresentadas, apenas quando mais de 50% de sua área de cobertura estava dentro de um determinado pivô.

Tabela 2.4 - Áreas e números de pixels que foram considerados em cada pivô central para os cálculos do K_c médio para cafeeiros jovens e adultos.

Pivô central	Área (ha)	Nº de pixels	Pivô central	Área (ha)	Nº de pixels	Pivô central	Área (ha)	Nº de pixels
1	67	741	7	127	1411	13	85	944
2	65	723	8	129	1433	14	98	1089
3	67	741	9	53	589	15	86	956
4	26	286	10	87	967	16	93	1033
5	108	1201	11	100	1111	17	95	1056
6	127	1411	12	96	1067			

Jovem - com idade inferior a 3anos; Adulto - com idade superior a 3 anos.

2.2.5 Análise de dados

Utilizando os valores de ET_a e K_c obtidos por meio do algoritmo SEBAL, foram realizados cálculos de médias e desvio padrão para cada mês do ano. A média de ET de cada mês foi calculada com base nos valores de 2014 e 2015. Para os cafeeiros jovens, foram utilizados valores médios de quatro pivôs e para cafeeiros adultos, foram utilizados treze pivôs para o cálculo dos valores médios.

Os valores de ET_a de cafeeiros jovens e adultos com base no algoritmo SEBAL foram comparados com a ET_c (mm d^{-1}) calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando-se a ET_o calculada pelo método de Penman-Monteith (PM) pelo K_c de recomendações do boletim FAO-56 e de estudos de referência no Brasil (Tabela 2.5).

Alguns índices estatísticos foram utilizados para comparar a ET_c medida e a estimada. Os índices utilizados foram: a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), o erro médio absoluto (MBE), a raiz do erro médio ao quadrado normalizada (NRMSE) e índice de concordância de Willmott (d).

Tabela 2.5 - Condições de desenvolvimento dos estudos do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro e valores usados na comparação do K_c do cafeeiro estimado por intermédio do algoritmo SEBAL com K_c recomendados por estes estudos de referência.

Referências	Cobertura vegetal	Dp	Variedade	Sistema de irrigação	País	Valores de K_c		
						I	M	F
Allen et al. (1998)	não	**	**	**	EUA	0,90	0,95	0,95
	sim					1,05	1,10	1,10
Villa Nova et al. (2002)	não	4000	Mundo Novo IAC 388-17	Aspersão convencional	Brasil	0,71	0,53	0,60
	sim	4000				0,93	0,91	0,83
	*	2500				0,94	0,94	0,89
	*	3300				0,93	0,92	0,86
	*	4000				0,90	0,90	0,83
Sato et al. (2007)	*	3571	Catuaí vermelho IAC 44	Gotejamento	Brasil	1,11	0,96	0,68
Lima e Silva (2008)	*	3571	Rubi MG 1192 Acaiá Cerrado	Gotejamento	Brasil	0,39	0,46	0,32
						0,33	0,42	0,28
Santinato et al. (2008)	*	2500	**	**	Brasil	0,60	0,60	0,60
		3300				0,70	0,70	0,70
		6700				0,80	0,80	0,80

Adulto

Jovem

Dp - Densidade de plantio (plantas ha⁻¹); *não especificado; **condições gerais de cultivo; I - Inicial; M - Intermediária; F - Final.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Distribuição espacial das principais variáveis utilizadas no algoritmo SEBAL

Alguns exemplos das etapas do algoritmo SEBAL, usadas na estimativa da ET_a e do K_c do cafeeiro, podem ser vistas na Figura 2.4. Observa-se que para esta data de passagem do satélite (28/07/2015) o NDVI apresentou valor máximo de 0,9 e valor mínimo de -0,9, o SAVI variou entre -0,4 e 0,8 e o LAI ficou entre 0,1 e 6,0. A temperatura da superfície teve um valor máximo de 312,2 K e um valor mínimo de

278,2 K, enquanto que o albedo da superfície ficou entre 0,1 e 0,9. Já o saldo de radiação variou 34,4 W m⁻² a 598,0 W m⁻².

Figura 2.4 - Distribuição espacial das variáveis obtidas no algoritmo SEBAL: Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI); Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI); Índice de área foliar (LAI); Temperatura da superfície (Ts); Albedo da superfície (aS) e Saldo de radiação (Rn). Variáveis calculadas a partir de imagem obtida no dia 28/07/2015.

2.3.2 Distribuição espacial da ET_a e do K_c

Na Figura 2.5 pode-se observar exemplos da distribuição espacial da ET_a e do K_c estimados por meio do algoritmo SEBAL. Verifica-se que a ET_a variou de 0 a 4,2 mm dia⁻¹, sendo que as áreas vegetadas foram as que apresentaram os maiores

valores de ET_a , as áreas com solo exposto foram as que apresentaram os menores valores e as áreas de rios e lagos apresentaram valores medianos de ET_a .

Figura 2.5 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) e do coeficiente de cultura (K_c) nas áreas estudadas. ET_a e K_c foram calculados a partir de imagem obtida no dia 28/07/2015.

Quanto ao K_c , observa-se que este variou entre 0 e 1,2, sendo que, como já era esperado, as áreas vegetadas foram as que apresentaram os maiores valores e as áreas com solo exposto as que apresentaram os menores valores. As áreas dos pivôs centrais com café adulto podem ser facilmente identificadas por apresentarem valores altos de K_c .

As áreas com cafeeiros adultos apresentam uma porcentagem maior de superfície vegetada quando comparada com as áreas com cafeeiros jovens que, no local do estudo, são plantados com espaçamentos de 3,5 metros entre as linhas. Além disso, o método SEBAL é calibrado com base nos pixels "quentes" e "frios" que são selecionados de acordo com a porcentagem de cobertura vegetal. Assim, a ET_a estimada pelo SEBAL será maior em áreas com maior superfície vegetada, se a escolha do pixel for feita corretamente, resultando em maiores valores de K_c .

Observa-se também que existe um padrão consistente entre valores mínimos e máximos de ET_a e K_c em uma visualização intra-pivôs. Possivelmente, a questão do posicionamento do sol em relação ao alinhamento de plantio da cultura gera esta distorção (sombra) em todos os equipamentos analisados, pois todos os equipamentos apresentam o mesmo padrão.

Na Tabela 2.6, são apresentados os valores médios de ET_a e K_c de cafeeiros jovens e adultos com base no algoritmo SEBAL. Observa-se que, para o cafeeiro jovem, a ET_a foi de 2,17 mm dia⁻¹ na média de todos os valores analisados com um desvio padrão de 0,7 mm dia⁻¹ em média. Quanto ao K_c para cafeeiros na mesma fase o valor médio foi de 0,6 com um desvio padrão de 0,43 em média.

Tabela 2.6 - Valores médios de evapotranspiração atual (ET_a) e de coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro jovem e adulto com base no algoritmo SEBAL e os respectivos desvios padrões (DP).

Fase	Mês*	Cafeeiro Jovem**				Cafeeiro Adulto***			
		ET_a	DP	K_c	DP	ET_a	DP	K_c	DP
Intermediário	Jan	2,54	0,805	0,570	0,360	3,560	1,007	0,810	0,450
	Fev	2,03	0,802	0,590	0,500	3,337	0,967	0,690	0,580
	Mar	1,39	0,552	0,560	0,530	3,257	0,880	1,040	0,805
	Abr	1,64	0,542	0,570	0,410	3,220	0,620	1,010	0,460
Final	Mai	2,03	0,640	0,760	0,480	3,332	0,332	1,220	0,245
	Jun	2,02	0,835	0,850	0,700	2,710	0,332	1,000	0,280
	Jul	1,74	0,637	0,765	0,545	2,870	0,600	1,150	0,520
	Ago	2,25	0,252	0,650	0,145	3,095	0,470	0,820	0,275
Inicial	Set	1,28	0,802	0,310	0,395	3,292	0,980	0,680	0,475
	Out	1,79	0,535	0,370	0,205	3,087	0,880	0,620	0,365
	Nov	2,54	1,155	0,675	0,645	2,535	1,012	0,480	0,560
	Dez	1,84	0,392	0,520	0,197	2,837	1,217	0,720	0,725

*Média mensal nos anos 2014 e 2015; **Valores médios nos quatro pivôs analisados; ***Valores médios nos treze pivôs analisados; ET_a - evapotranspiração atual; K_c - coeficiente de cultura; DP - desvio padrão.

Já para o cafeeiro adulto, observa-se que a ET_a foi de 3,95 mm dia⁻¹ na média de todos os valores analisados com um desvio padrão de 0,78 mm dia⁻¹ em média. Os valores baixos de desvio padrão encontrados entre os pixels são indicativos de um suprimento uniforme de água pelos pivôs centrais, que permite um crescimento homogêneo do cafezal, resultando em uma menor diferença entre os K_c de diferentes pontos da lavoura. Quanto ao K_c para cafeeiros na mesma fase, o valor médio foi de 0,85 com uma média de desvio padrão de 0,48. Em média, o K_c para o cafeeiro adulto foi maior na fase final e menor na fase inicial, apresentando valor mediano na fase intermediária.

2.3.3 Comparação dos valores de K_c obtidos com trabalhos de referência

Na Figura 2.6 podem ser vistas as curvas do K_c do cafeeiro adulto (A) comparada com as recomendações do boletim da FAO-56 e do K_c do cafeeiro jovem (B) comparada com trabalhos de referência no Brasil.

Figura 2.6 - Curva do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro adulto (A) comparada com as recomendações do boletim da FAO-56 e curva do coeficiente de cultura (K_c) do cafeeiro jovem (B) comparada com trabalhos de referência no Brasil.

A curva do K_c do cafeeiro adulto apresentou na fase final valores que ficaram dentro do intervalo de valores dos K_c recomendados por Allen et al. (2006); já na fase inicial e intermediária, esses valores ficaram abaixo dos valores dos K_c recomendados por Allen et al. (2006). No entanto, verifica-se que o comportamento das diferentes curvas de K_c do cafeeiro é semelhante nas três situações comparadas.

Os valores de K_c encontrados para a fase inicial do cafeeiro adulto foi de 0,63 em média. Já para as fases intermediária e final esses valores foram em média de 0,89 e 1,05, respectivamente.

A curva do K_c do cafeeiro jovem ficou dentro do intervalo de valores dos K_c obtidos por outros trabalhos de referência no Brasil. Os valores de K_c encontrados para a fase inicial do cafeeiro jovem foi de 0,47 em média. Já para as fases intermediária e final esses valores foram em média de 0,57 e 0,76, respectivamente.

2.3.4 Validação dos dados

Na Figura 2.7 podem ser vistos os valores de ET_c de cafeeiros jovens com base no algoritmo SEBAL e a ET_c calculada com dados observados. Comparando a ET_c obtida pelo SEBAL com a ET_c calculada e recomendada por Lima e Silva (2008) utilizando a variedade Rubi MG 1192 (Figura 2.7A) e Acaiá Cerrado (Figura 2.7B), observa-se que o índice d apresentou valores abaixo de 0,44, independentemente da variedade, indicando uma baixa precisão do modelo nessas situações. O RMSE foi inferior a 0,94, o MBE foi inferior a 0,82 e o NRMSE foi inferior a 0,75, indicando uma precisão não recomendável da estimativa de ET_c , com base no algoritmo SEBAL.

Isso pode ter ocorrido devido ao fato dos K_c , recomendados pelos estudos de referência apresentarem pouca ou nenhuma variação ao longo do ano. Esta questão difere dos outros estudos de estimativa realizados com o algoritmo SEBAL, nos quais se obteve um valor de K_c diferente para cada mês. Além disso, as áreas de cafeeiros jovens apresentam uma maior proporção de solo sem cobertura vegetal, o que reduz a precisão do modelo de estimativa. Para estudos futuros nessas condições, sugere-se fazer mudanças no algoritmo, incluindo fatores de correção para as estimativas feitas em cafeeiros jovens.

Na validação da ET_c obtida pelo algoritmo SEBAL com os valores da ET_c calculados por meio de dados observados e recomendados por Santinato et al.

(2008) utilizando a densidade de plantio de 2500 (Figura 2.7C), 3300 (Figura 2.7D) e 6700 plantas ha^{-1} (Figura 2.7E), observa-se que o índice d descrito apresentou valores inferiores a 0,50, independentemente da densidade de plantio, indicando uma baixa precisão do modelo nessas situações. O RMSE foi inferior a 0,79, o MBE inferior a 0,67 e o NRMSE ficou abaixo de 0,63, indicando também precisão não recomendável da estimativa de ET_c , com base no algoritmo SEBAL.

Figura 2.7 - Evapotranspiração de cultura (ET_c) de cafeeiros jovens com base no algoritmo SEBAL em comparação com a ET_c (mm d^{-1}) calculada com dados meteorológicos observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando-se a evapotranspiração de referência (ET_0) calculada pelo método de Penman-Monteith (PM) pelo coeficiente de cultura (K_c) de estudos de referência no Brasil: Lima e Silva (2008) utilizando a variedade Rubi MG 1192 (A) e Acaiá Cerrado (B) e Santinato et al. (2008) com densidade de plantio de 2500 (C), 3300 (D) e 6700 plantas ha^{-1} (E).

A comparação da ET_c de cafeeiros adultos obtida pelo SEBAL com valores de ET_c calculados, é mostrada na Figura 2.8. Na validação da ET_c obtida pelo algoritmo SEBAL com a ET_c calculada por intermédio de dados observados e recomendados por Allen et al. (1998) com (Figura 2.8A) e sem cobertura vegetal (Figura 2.8B), observa-se que o índice d apresenta valores superiores a 0,62, independentemente da cobertura da planta, indicando uma precisão relativamente alta do modelo nessas situações. O RMSE ficou abaixo de 0,51, o MBE foi inferior a 0,43 e o NRMSE foi inferior a 0,50, indicando também uma precisão razoável da estimativa ET_c , com base no método SEBAL.

Rawat et al. (2017) estimaram a ET_c da cultura de trigo pelo SEBAL e o método padronizado FAO-PM no distrito de Bhiwani de Haryana, na Índia, e os resultados obtidos foram avaliados por testes de medidas estatísticas de desempenho. Os parâmetros estatísticos encontrados (RMSE=0,56, NRMSE=0,20 e $d=0,87$) mostraram um bom acordo entre SEBAL ET_c e PM ET_c . Os valores encontrados no trabalho sugeriram que o modelo SEBAL tem um bom potencial para estimar ET_c espacializada para essa região.

No Brasil, Silva et al. (2018) estimaram a ET_a por satélite utilizando imagens Landsat 8 e o algoritmo SEBAL em áreas agrícolas, de vegetação nativa e áreas urbanas e verificaram que os valores obtidos de ET_a eram compatíveis com os apresentados na literatura e o erro entre ET estimada com o SEBAL e o método padronizado FAO-PM foram inferiores ou iguais a 1 mm dia^{-1} .

Na validação da ET_c obtida pelo algoritmo SEBAL com os valores do ET_c calculados com dados observados e recomendados por Villa Nova et al. (2002) com (Figura 2.8C) e sem cobertura vegetal (Figura 2.8D) e com densidade de plantio de 2500 (Figura 2.8E), 3300 (Figura 2.8F) e 4000 plantas ha^{-1} (Figura 2.8G), observa-se que o índice d apresentou valores acima de 0,40, independentemente da cobertura vegetal e da densidade de plantio, indicando uma precisão relativamente alta do modelo nessas situações. O RMSE ficou abaixo de 1,20, o MBE foi inferior a 1,12 e o NRMSE ficou abaixo de 1,17, indicando também uma precisão razoável da estimativa ET_c , com base no método SEBAL.

Figura 2.8 - Evapotranspiração de cultura (ET_c) de cafeeiros adultos com base no algoritmo SEBAL em comparação com ET_c ($mm\ d^{-1}$) calculada com dados meteorológicos observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando a evapotranspiração de referência (ET_0) calculada pelo método Penman-Monteith (PM) pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e estudos de referência no Brasil: Allen et al. (1998) com (A) e sem cobertura de plantas (B), Villa Nova et al. (2002) com (C) e sem (D) cobertura vegetal e com densidade de colheita de 2500 (E), 3300 (F) e 4000 plantas ha^{-1} (G) e Sato et al. (2007) (H).

Na comparação da ET_c obtida pelo algoritmo SEBAL com os valores do ET_c calculados com dados observados e recomendados por Sato et al. (2007) (Figura

2.8H), observa-se que o índice d apresentou um valor de 0,50, indicando uma baixa precisão do modelo nessa situação. O RMSE foi de 0,77, o MBE de 0,69 e o NRMSE foi de 0,75, indicando também uma precisão razoável da estimativa ET_c , com base no método SEBAL.

Bala et al. (2016) também estimaram a ET_c da cultura de trigo pelo SEBAL e compararam os resultados com a ET obtida em lisímetro usando parâmetros estatísticos; foram encontrados valores de RMSE iguais a 0,19 e NRMSE de 0,21 $mm\ d^{-1}$. Os erros ou desvios encontrados nas comparações entre valores estimados e medidos podem vir do próprio modelo de estimativa, mas também da forma como estes dados são comparados. A metodologia de comparação usando valores de K_c fixos para longos períodos do ano também pode resultar em valores inesperados de certos parâmetros estatísticos.

2.4 CONCLUSÕES

Os dados ET_a e K_c obtidos com base no algoritmo SEBAL apresentaram valores semelhantes aos estudos que utilizaram métodos tradicionais. O algoritmo SEBAL é uma alternativa mais parcimoniosa na estimativa do K_c e, portanto, o K_c obtido por este método pode ser usado diretamente em áreas de cultivo de café.

A validação da ET_c obtida pelo algoritmo SEBAL com os valores da ET_c calculados por meio de dados observados e recomendados por trabalhos de referência apresentou resultados com precisão não recomendável (cafeeiro jovem) e com precisão razoável (cafeeiro adulto); no entanto, o comportamento das diferentes curvas de K_c do cafeeiro obtidas é semelhante aos demais trabalhos de referência no Brasil e no mundo.

O método de estimativa de ET_a e de K_c de forma espacializada permitiu a compreensão da variabilidade da área de estudo, possibilitando o uso da irrigação de precisão. O modelo possui potencial para estimar ET na região em diferentes idades do cafeeiro e pode ajudar a entender o consumo hídrico da cultura auxiliando assim o manejo da irrigação na região.

REFERÊNCIAS

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and drainage paper 56: FAO, Rome, Italy.

Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133: 380-394.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Howell, T.A.; Jensen, M. E. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98: 899-920.

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728.

Bala, A.; Rawat, K.S.; Misra, A.K.; Srivastava, A. 2016. Assessment and validation of evapotranspiration using SEBAL algorithm and lysimeter data of IARI agricultural farm, India. *Geocarto International* 31: 739-764.

Bastiaanssen, W.G.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology* 212: 198-212.

Bastiaanssen, W.G.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; Van der Wal, T. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology* 212: 213-229.

Bastiaanssen, W. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology* 229: 87-100.

Bastiaanssen, W.G.M.; Noordman, E.J.M.; Pelgrum, H.; Davids, G.; Thoreson, B.P.; Allen, R.G. 2005. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 85-93.

Boltzmann, L. 1884. Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie. *Annalen der Physik* 258: 291-294.

Flumignan, D.L.; Faria, R.T.de; Prete, C.E.C. 2011. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production. *Agricultural Water Management* 98: 791-800.

Kiptala, J.K.; Mohamed, Y.; Mul, M.L.; Zaag, P. 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research* 49: 8495-8510.

Koloskov, G.; Mukhamejanov, K.; Tanton, T. 2007. Monin Obukhov length as a cornerstone of the SEBAL calculations of evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 335: 170-179.

Li, H.; Zheng, L.; Lei, Y.; Li, C.; Liu, Z.; Zhang, S. 2008. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. *Agricultural Water Management* 95: 1271-1278.

Lima, E.P.; Silva, E.L. 2008. Base temperature, crop coefficients and degrees-day for arabic coffee plants in the implantation phase. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 266-273.

Marin, F.R.; Angelocci, L.R.; Righi, E.Z.; Sentelhas, P.C. 2005. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brazil. *Experimental Agriculture* 41: 187-197.

Mkhwanazi, M.; Chávez, J.L.; Andales, A.A. 2015. SEBAL-A: A remote sensing ET algorithm that accounts for advection with limited data. Part I: Development and validation. *Remote Sensing* 7: 15046-15067.

Navarro, A.; Rolim, J.; Miguel, I.; Catalao, J.; Painho, M.; Vekerdy, Z. 2016. Crop Monitoring Based on SPOT-5 Take-5 and Sentinel-1A Data for the Estimation of Crop Water Requirements. *Remote Sensing* 8: 525–544.

Paul, G.; Gowda, P.H.; Prasad, P.V.; Howell, T.A.; Staggenborg, S.A.; Neale, C.M. 2013. Lysimetric evaluation of SEBAL using high resolution airborne imagery from BEAREX 08. *Advances in Water Resources* 59: 157-168.

Rawat, K.S.; Bala, A.; Singh, S.K.; Pal, R.K. 2017. Quantification of wheat crop evapotranspiration and mapping: A case study from Bhiwani District of Haryana, India. *Agricultural Water Management* 187: 200-209.

Ruhoff, A.L.; Paz, A.R.; Collischonn, W.; Aragao, L.E.; Rocha, H.R.; Malhi, Y.S. 2012. A MODIS-based energy balance to estimate evapotranspiration for clear-sky days in Brazilian tropical savannas. *Remote Sensing* 4: 703-725.

Santinato, R.; Fernandes, A.L.; Fernandes, D.R. 2008. Irrigation in coffee crop. O Lutador, Uberaba, MG, Brazil.

Sari, D.K.; Ismullah, I.H.; Sulasdi, W.N.; Harto, A.B. 2013. Estimation of water consumption of lowland rice in tropical area based on heterogeneous cropping calendar using remote sensing technology. *Procedia Environmental Sciences* 17: 298-307.

Sato, F.A.; Silva, A.M.D.; Coelho, G.U.; Silva, A.C.; Carvalho, L.G.D. 2007. Crop coefficient (Kc) for coffee (*Coffea arabica* L.) during the winter-fall seasons in Lavras region-MG, Brazil. Engenharia Agrícola 27: 383-391.

Silva, B.B.; Braga, A.C.; Braga, C.C.; Oliveira, L.M.M.D.; Montenegro, S.M.G.L.; Barbosa Junior, B. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 20: 3-8.

Silva, B.B.da.; Mercante, E.; Boas, M.A.V.; Wrublack, S.C.; Oldoni, L.V. 2018. Satellite-based ET estimation using Landsat 8 images and SEBAL model. Revista Ciência Agronômica 49: 221-227.

Tasumi, M.; Allen, R.G.; Trezza, R.; Wright, J.L. 2005. Satellite-Based Energy Balance to Assess Within-Population Variance of Crop Coefficient Curves. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131: 94-109.

Teixeira, A.H.de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmad, M.U.D.; Bos, M.G. 2009. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil: Part A: Calibration and validation. Agricultural and Forest Meteorology 149: 462-476.

Teixeira, A.H. de C.; Bastiaanssen, W.G.M.; Ahmad, M.U.D, Bos, M.G. 2009b. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the large scale. Agricultural and Forest Meteorology 149: 462-476.

USGS - United States Geological Survey. Disponível em:<<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em 01 de março de 2016.

Villa Nova, N.A.; Favarin, J.L.; Angelocci, L.R.; Dourado-Neto, D. 2002. Estimative of the coffee crop coefficient as function of the weather and plant parameters. Bragantia 61: 81-88.

Weng, Q.; Lu, D.; Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relation-ship for urban heat island studies. Remote Sensing of Environment 89: 467-483.

Wolff, W. 2016. SEBAL_GRASS. Script to calculate daily evapotranspiration for Landsat 8 images in GRASS GIS. Disponível em: <http://doi.org/10.5281/zenodo.167350> [Acesso em 11 de setembro de 2016].

3 VARIABILIDADE ESPACIAL DO CONSUMO HÍDRICO DO FEIJOEIRO UTILIZANDO A FERRAMENTA GOOGLE EEFLUX

Resumo

A variabilidade espacial da evapotranspiração (ET) e do coeficiente de cultura (K_c) é desconsiderada quando estes são obtidos por meio de métodos tradicionais. Com o desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto a estimativa da ET de áreas agrícolas, de forma espacializada, tornou-se possível por meio do uso de algoritmos baseados no balanço de energia da superfície como o *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) e sua versão automatizada, presente na plataforma *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux). O estudo foi realizado em uma área irrigada por pivô central localizada no município de Primavera do Leste, MT, Brasil. Foram analisados quatro ciclos de cultivo (2013, 2014, 2015 e 2017) das espécies *Phaseolus vulgaris* (feijão carioca) e *Vigna unguiculata* (feijão caupi). Usando imagens processadas do satélite Landsat 8, dentro da plataforma EEFlux, determinou-se a variabilidade espacial da evapotranspiração atual (ET_a) e a curva do K_c dessas duas espécies avaliadas. A eficiência do uso da água (EUA) para as duas espécies nas diferentes situações analisadas também foi determinada. Foi feita uma análise comparativa utilizando diferentes índices estatísticos, a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), o erro médio absoluto (MBE), a raiz do erro médio ao quadrado normalizada (NRMSE) e o índice de concordância (d). A ET_a para o feijão carioca variou entre 2,3 a 8,5 mm d⁻¹ e o K_c obtido variou entre 0,4 a 1,6, em termos gerais. Para o feijão caupi, a ET_a obtida variou entre 0,8 a 6,2 mm d⁻¹ e o K_c obtido variou entre 0,2 a 1,7, em termos gerais. A EUA do feijão carioca e do feijão caupi, em média, foi de 0,75 e 0,38 kg m⁻³, respectivamente. O método de estimativa de ET_a e K_c espacializados utilizando a plataforma Google EEFlux possibilitou a compreensão da variabilidade espacial dessas duas variáveis e, portanto, este aplicativo tem bom potencial para a estimar a ET_a e o K_c de diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento dos feijoeiros carioca e caupi.

Palavras-chave: Coeficiente de cultura; Evapotranspiração; *Phaseolus vulgaris*; *Vigna unguiculata*

SPATIAL VARIABILITY OF BEAN WATER CONSUMPTION USING THE GOOGLE EEFLUX TOOL

Abstract

Evapotranspiration (ET) and crop coefficient (K_c) spatial variabilities are disregarded in traditional methods. With the development of remote sensing techniques the estimation of ET of agricultural areas, in a specialized way, has become possible through the use of algorithms based on the surface energy balance such as the Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration (METRIC) and its automated version, featured on the Google Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) platform. The study was carried out in a central pivot irrigated area located in the city of Primavera do Leste, MT, Brazil. Four cultivation cycles (2013, 2014, 2015 and 2017) of the species *Phaseolus vulgaris* (Carioca bean) and *Vigna unguiculata* (Caupi bean) were analyzed. Using processed images from the Landsat 8 satellite, within the EEFlux platform, the spatial variability

of the current evapotranspiration (ET_a) and the K_c curve of these two species were determined. The water use efficiency (WUE) for both species in the different situations analyzed was also determined. A comparative analysis was performed by using different statistical indices, root mean square error (RMSE), the mean bias error (MBE), the normalized root mean square error (NRMSE) and the index of agreement (d). The ET_a for Carioca bean ranged from 2.3 to 8.5 mm d⁻¹ and the K_c obtained ranged from 0.4 to 1.6, in general terms. For Caupi bean, the ET_a obtained ranged from 0.8 to 6.2 mm d⁻¹ and the K_c obtained ranged from 0.2 to 1.7, in general terms. The WUE of Carioca bean and Caupi bean, on average, was 0.75 and 0.38 kg m⁻³, respectively. The method of estimation of ET_a and K_c mapped by using the Google EEFux platform made possible the understanding of the spatial variability of these two variables and, therefore, this application has good potential to estimate the ET_a and K_c of different stages of growth and development of beans carioca and caupi.

Keywords: Crop coefficient; Evapotranspiration; *Phaseolus vulgaris*; *Vigna unguiculata*

3.1 INTRODUÇÃO

Estimativas confiáveis e precisas do consumo hídrico das plantas são essenciais para o gerenciamento dos recursos hídricos na agricultura. O planejamento do uso e manejo da água em áreas agrícolas é feito por meio do conhecimento de variáveis que estão relacionadas ao clima, ao solo e às plantas, tais como, a evapotranspiração de referência (ET_o), o coeficiente de cultura (K_c) e a evapotranspiração de cultura (ET_c), que é o resultado do produto das duas primeiras variáveis (Allen et al., 2011; Pereira et al., 2015).

Essas variáveis podem ser obtidas ao longo de uma superfície vegetada homogênea, utilizando técnicas convencionais (lisímetros, balanço hídrico no solo, Razão de Bowen, etc.); no entanto, os valores obtidos por esses métodos tradicionais são limitados em termos de precisão por causa da variabilidade espacial dos elementos determinantes dessas variáveis; além disso, os custos envolvidos nos aparatos experimentais das técnicas convencionais são elevados (Allen et al., 2011; Kiptala et al., 2013). Assim, apesar de serem metodologias amplamente utilizadas para quantificação do consumo de água pelas plantas, essas técnicas apresentam certas desvantagens.

Nas últimas décadas, uma variedade de técnicas de sensoriamento remoto tem sido usada para quantificar a evapotranspiração (ET) de áreas agrícolas em larga escala (Kustas e Norman, 1996; Courault et al., 2005). Dentre os tipos de

modelos e algoritmos para obtenção da ET, os que são baseados no balanço de energia da superfície são os métodos mais usados. O *Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration* (METRIC) (Allen et al., 2007) é um dos algoritmos mais utilizados, sendo que este emprega princípios e técnicas que se originaram a partir do *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) (Bastiaanssen et al., 1998a; Bastiaanssen et al., 1998b).

A aplicação do algoritmo METRIC muitas vezes pode consumir um certo tempo, já que é necessário calibrar e executar o modelo. A calibração do METRIC é feita para cada cena Landsat e para cada data de passagem do satélite, envolvendo a escolha de pixels com valores extremos de ET. Usuários diferentes, que podem não ser igualmente experientes, podem produzir resultados distintos; por isso, no intuito de reduzir as incertezas associadas ao processo de calibração, e para economizar tempo, foram desenvolvidos modelos de calibração automatizados para o algoritmo METRIC, gerando estimativas de ET comparáveis às aquelas produzidas manualmente por usuários bem treinados (Tasumi et al., 2005; Morton et al., 2013).

No entanto, mesmo que a calibração automatizada do METRIC reduza algumas das desvantagens da aplicação do algoritmo na obtenção da ET, os usuários ainda precisarão acumular e montar uma variedade de camadas, incluindo a imagem de satélite, mapa de cobertura da terra, modelo digital do terreno, clima local e mapa de solos, provenientes de diferentes fontes e plataformas, podendo haver uma quantidade significativa de pré-processamento necessário para as diferentes camadas antes de se aplicar o algoritmo. A entrada e a manipulação de dados podem ser as partes mais demoradas do conjunto do processo (Gorelick et al., 2017; Li et al., 2019).

Como um meio de automatizar a entrada e manipulação de dados e para acelerar o processo de obtenção da ET, a plataforma *Google Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFlux) foi projetada e desenvolvida dentro do *Google Earth Engine* (GEE) (Gorelick et al., 2017) com base no algoritmo METRIC (Allen et al., 2007). O EEFlux utiliza arquivos de imagens Landsat armazenados no GEE, uma plataforma baseada em nuvem (Allen et al., 2015), possibilitando aos usuários a obtenção de mapas de ET para qualquer cena dos satélites Landsat 5, 7 ou 8. O EEFlux também fornece geração rápida de mapas de produtos intermediários, como temperatura da superfície (Ts), índice de vegetação por diferença normalizada

(NDVI) e mapas de albedo para determinada cena Landsat que podem ser úteis para outras aplicações além da ET.

O desempenho do algoritmo METRIC, na sua versão tradicional, tem sido promissor para estimar a ET de diversas culturas agrícolas nas diferentes regiões do mundo usando dados meteorológicos limitados. Alguns exemplos de aplicações do METRIC podem ser encontrados em trabalhos desenvolvidos com o algodão (French et al., 2015), com a cana-de-açúcar (Zhang et al. 2015), com o sorgo (Wagle et al., 2017), com o milho (Singh et al., 2012), com a soja (Choi et al., 2009), dentre outros.

No Brasil, existem alguns estudos sobre ET e K_c em áreas de cultivo de feijão carioca (Medeiros et al., 2001; Mendonça et al., 2007; Albuquerque e Andrade, 2011) e de feijão caupi (Souza et al., 2005; Bastos et al., 2008; Saraiva e Souza, 2012; Murga-Orrillo et al., 2016); no entanto, a estimativa do consumo hídrico do feijoeiro utilizando o algoritmo METRIC na versão do Google EEFlux deve ser melhor estudada, uma vez que a detecção remota pode melhorar o gerenciamento da irrigação, considerando a variabilidade espacial das áreas cultivadas.

Este estudo teve como objetivo estimar a distribuição espacial da ET_a e a curva do K_c dos feijões carioca e caupi, utilizando o algoritmo METRIC na versão do Google EEFlux. Além disso, visou-se validar as estimativas espaciais de ET_a comparando-as com as diretrizes da FAO e com valores de ET_c calculados com o uso de valores de K_c do feijão carioca e caupi obtidos em outros estudos de referência no Brasil.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi realizado em uma propriedade rural localizada no município de Primavera do Leste, Estado de Mato Grosso (Figura 3.1). Esta propriedade possui uma área irrigada por pivô central de aproximadamente 130 hectares (latitude de 15°13'S, longitude de 53°58'O e altitude média de 560 metros), na qual foram cultivados feijoeiros de duas espécies (*Phaseolus vulgaris* e *Vigna unguiculata*), entre os anos de 2013 e 2017.

O clima da região é do tipo Aw (Alvares et al., 2013), isto é, tropical com estação seca no inverno. A temperatura média anual é de 22,0°C e a pluviosidade

média anual é de 1784 mm. A diferença entre a precipitação do mês mais seco e do mês mais chuvoso é de 313 mm. A variação das temperaturas médias durante o ano é de 4,5°C. O mês mais quente do ano é o de outubro com uma temperatura média de 23,4°C. Ao longo do mês de julho (mês mais frio do ano) a temperatura média é de 18,9°C.

O relevo é plano e os solos predominantes da região são Latossolos Vermelhos distróficos, que possuem baixa fertilidade natural, variando de profundos a muito profundos, permeáveis, de textura argilosa e muito argilosa. Na região predomina a vegetação do bioma Cerrado (Lopes e Guilherme, 2016).

Figura 3.1 - Localização da área de estudo: detalhes do Estado de Mato Grosso, do município de Primavera do Leste e da área do pivô central analisado.

A variabilidade espacial da altitude na área de estudo pode ser vista na Figura 3.2. Observa-se que os pontos (pixels) de menor elevação possuem altitudes entre 550 e 559 metros, enquanto que, os pontos de maior elevação possuem altitudes entre 574 a 581 metros. Verifica-se que, mesmo considerando os valores

extremos de altitude (550 e 581 m) dentro da área de estudo, a declividade média, em geral, é baixa, com valores que não ultrapassam os 4,8%.

Figura 3.2 - Variabilidade espacial da altitude (metros) na área de estudo (pivô central).

3.2.2 Conjunto de dados utilizados

Foram utilizados dados de campo de quatro safras de feijão, sendo dois anos de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e dois anos de feijão caupi (*Vigna unguiculata*), conforme a Tabela 3.1. Cada espécie foi semeada em duas épocas distintas, porém, com área plantada e ciclo semelhantes. Todos os cultivos das diferentes espécies nos diferentes anos foram conduzidos sob sistema de irrigação por pivô central. Também foram utilizados os dados de produtividade de cada uma das safras do feijoeiro para obtenção da eficiência do uso da água nas diferentes situações estudadas.

Tabela 3.1 - Caracterização das safras de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris*) e feijão caupi (*Vigna unguiculata*) na área de estudo (Primavera do Leste - MT), ao longo dos anos de 2013 e 2017.

Cultura*	Data de plantio	Data de colheita	Ciclo (dias)	Produção** (Ton)	Produtividade (Ton ha ⁻¹)
Feijão carioca	07/08/2013	01/11/2013	86	329,33	2,52
Feijão caupi	03/03/2014	06/06/2014	95	191,12	1,46
Feijão caupi	12/04/2015	17/07/2015	96	153,10	1,17
Feijão carioca	26/05/2017	24/08/2017	90	502,50	3,84

* nos anos de plantio do feijão carioca foi utilizada a cultivar Pérola e nos anos de plantio do feijão caupi foi utilizada a cultivar Nova era; ** a produção total foi obtida em uma área de 130,68 hectares, referente a área irrigada pelo sistema de irrigação por pivô central; Ton - toneladas; ha - hectares.

A eficiência do uso da água (EUA) para as diferentes situações estudadas foi calculada usando os dados de produtividade do feijoeiro carioca e caupi, assim como, os dados do consumo hídrico da cultura ao longo dos seus respectivos ciclos, conforme a Equação 1 (Geerts e Raes, 2009).

$$EUA = \frac{Y}{10 ET_{all}} \quad (1)$$

em que: EUA é a eficiência do uso da água, (kg m⁻³); Y é a produtividade do feijoeiro, (kg ha⁻¹); e ET_{all} é a ET total durante todo o ciclo de cultivo, (mm).

Quanto aos dados remotos, foram utilizadas imagens dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat 8, cena com órbita (*Path*) 225 e ponto (*Row*) 71 (Figura 3.3) ao longo dos anos de 2013, 2014, 2015 e 2017. O satélite usado tem resolução temporal de 16 dias e espacial de 30 metros, segundo informações do *United States Geological Survey* (USGS).

Figura 3.3 - Exemplo de cena Landsat 8 com órbita (*Path*) 225 e ponto (*Row*) 71 utilizada no trabalho.

Na seleção das imagens, foram priorizadas aquelas sem nuvens e regularmente distribuídas ao longo do período de estudo, de forma a permitir melhor avaliação das variáveis (ET e K_c) de acordo com as distintas fases fenológicas do feijoeiro carioca e caupi. Seguindo estes critérios, foram selecionadas três imagens de cada ano avaliado, obtidas em três dias representativos das fases inicial, intermediária e final das culturas, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Datas de passagem do satélite Landsat 8 nas quais as imagens dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) foram consideradas para o presente o estudo.

Feijão carioca		Feijão caupi	
2013	2017	2014	2015
26 de agosto	18 de junho	22 de março	26 de abril
27 de setembro	20 de julho	07 de abril	28 de maio
13 de outubro	05 de agosto	09 de maio	13 de junho

3.2.3 Evapotranspiração atual (algoritmo METRIC)

As imagens do satélite Landsat 8 utilizadas neste estudo encontram-se processadas na plataforma do *Earth Engine Evapotranspiration Flux* (EEFLUX) que é uma versão do *Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* (METRIC) que opera no sistema *Google Earth Engine*.

O EEFlux foi desenvolvido por um consórcio formado pela Universidade de Nebraska-Lincoln, Instituto de Pesquisa do Deserto (*Desert Research Institute*) e Universidade de Idaho, com apoio financeiro da Google. A plataforma processa imagens individuais do Landsat de qualquer período de 1984 até o presente e para quase todas as áreas do globo. O EEFlux usa dados meteorológicos em grade para calibrar o balanço de energia da superfície para cada imagem.

No EEFLUX (versão do METRIC que opera no sistema *Google Earth Engine*) a ET atual é calculada como um resíduo do balanço de energia da superfície (Allen et al., 2007), conforme a Equação 2.

$$LE = R_n - H - G \quad (2)$$

em que: LE é o fluxo de calor latente (referente a energia utilizada no processo de evapotranspiração), ($W\ m^{-2}$); R_n é radiação líquida, ($W\ m^{-2}$); G é fluxo de calor no solo, ($W\ m^{-2}$); e H é fluxo de calor sensível, ($W\ m^{-2}$).

O EEFlux utiliza a banda térmica do Landsat para estimar o balanço de energia da superfície e as bandas de ondas curtas para estimar a quantidade de vegetação, o albedo e a rugosidade da superfície. A versão atual do EEFlux emprega a calibração automatizada da imagem sugerida por Allen et al. (2007).

O LE é estimado no momento exato da passagem do satélite para cada pixel e a ET instantânea é então calculada, dividindo-se o LE pelo calor latente de vaporização, conforme a Equação 3.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda_{pw}} \quad (3)$$

Em que: ET_{inst} é a evapotranspiração instantânea, ($mm\ h^{-1}$); 3600 converte segundos para horas; λ é o calor latente de vaporização, ($J\ kg^{-1}$); e pw é a densidade da água, ($\sim 1000\ kg\ m^{-3}$).

A ET é expressa em termos de ET_{rF} que representa ET como uma fração da evapotranspiração de referência (ET_r). No EEFlux, a ET_r é calculada usando a referência da cultura da alfafa, conforme Equação 4. O ET_{rF} é semelhante ao tradicionalmente chamado de coeficiente de cultura (K_c).

$$ET_{rF} = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (4)$$

A ET_{rF} é usada como um veículo para extrapolar a ET do instante da passagem do satélite para o período de 24 horas. Assim, a ET_a diária é calculada multiplicando-se valores de ET_{rF} para cada pixel individual pelo ET_r diária do local e assumindo-se consistência entre ET_{rF} no momento da passagem do satélite e ET_{rF} para o período de 24 horas, conforme a Equação 5.

$$ET_a = ET_{rF} ET_r \quad (5)$$

No uso do EEFlux para a obtenção de valores de ET_a , foram seguidos os seguintes passos. Inicialmente, selecionou-se o período do ciclo das culturas nos diferentes anos estudados (datas de plantio e colheita) na janela de data e, em seguida, moveu-se o pino vermelho no mapa da Google para a área de interesse (região de Primavera do Leste - MT), conforme Figura 3.4A.

Depois disso, o botão "Pesquisar imagem" foi pressionado, e o EEFlux pesquisou no arquivo da Google as imagens Landsat que residem no período e que cobrem a área identificada pelo marcador, sendo fornecida uma lista de imagens para o local, permitindo assim, a seleção da imagem a ser processada. As imagens (cenas) utilizadas no presente estudo foram processadas uma de cada vez. Na lista de imagens disponíveis, é possível visualizar uma avaliação da porcentagem de cobertura de nuvens para toda cena (Figura 3.4B).

Figura 3.4 - Imagens representativas do passo-a-passo seguido no uso do EEFlux para a obtenção de valores de evapotranspiração atual (ET_a).

Após a seleção de uma imagem, o EEFlux apresentou uma lista de camadas de dados que podem ser exibidas na janela do mapa (Figura 3.4C). Dentre essas

camadas que são disponibilizadas (mapa base, cores verdadeiras, cores falsas, albedo, NDVI, modelo digital do terreno-MDT, cobertura do solo, temperatura da superfície, ET_o para alfafa e gramado, fração evapotranspiratória- ET_F e evapotranspiração atual- ET_a), foram utilizados os produtos de ET_a para todas as datas especificadas na Tabela 3.2.

As camadas de ET_a foram baixadas como arquivos geo-tiff no site EEFlux e, em seguida, foram processadas dentro do Sistema de Informações Geográficas (SIG) ArcGIS®. O processamento dessas camadas consistiu na extração dos valores de ET_a na área de estudo, a partir da criação de um polígono delimitando a área do pivô central.

3.2.4 Evapotranspiração de referência (ET_o) e coeficiente de cultura (K_c)

Para obtenção da evapotranspiração de referência (ET_o), foram utilizados dados de temperatura máxima e mínima, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e precipitação de uma estação meteorológica *Campbell* localizada na área de estudo (Tabela 3.3). Esta estação meteorológica encontra-se instalada a uma altura de dois metros em relação ao solo e registra dados de 15 em 15 minutos, sendo que estes são armazenados em um sistema de aquisição de dados.

As estimativas de ET_o para os dias de passagem do satélite foram feitas utilizando o método de Penman-Monteith (FAO 56), conforme metodologia adotada por Allen et al. (1998) por meio do software REF-ET versão 2.01.14.

Tabela 3.3 - Dados meteorológicos diários utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) para as datas de passagem do satélite Landsat 8 que foram consideradas para o presente o estudo.

Datas	URmed %	U_2 $m\ s^{-1}$	Tmax °C	Tmin °C	Qg $MJ\ m^2\ d^{-1}$	Ppt mm	ET_o $mm\ d^{-1}$
26/08/2013	64,0	3,0	30,9	20,1	23,8	0,0	5,37
27/09/2013	75,0	3,1	32,7	19,9	27,6	0,0	5,98
13/10/2013	72,9	1,0	30,3	13,3	16,8	0,0	2,86
22/03/2014	92,2	3,7	30,2	19,2	19,3	2,5	3,69
07/04/2014	68,1	0,8	30,5	20,8	19,8	0,0	4,27
09/05/2014	86,0	0,7	32,0	13,4	20,2	0,0	3,47
26/04/2015	75,7	0,5	32,3	19,4	19,1	0,0	3,31
28/05/2015	77,3	1,0	29,8	16,4	18,3	0,0	3,08
13/06/2015	63,3	1,1	23,7	16,8	8,3	6,3	3,67
18/06/2017	78,0	2,9	27,8	14,9	16,5	0,0	3,25
20/07/2017	65,8	2,5	21,9	13,9	16,8	54,0	3,39
05/08/2017	89,5	1,0	28,0	10,2	24,6	3,0	3,97

URmed - umidade relativa do ar média; U_2 - velocidade do vento a 2 metros de altura; Tmax - temperatura máxima do ar; Tmin - temperatura mínima do ar; Qg - Radiação solar na superfície terrestre; Ppt - precipitação pluvial; ET_o - Evapotranspiração de referência diária.

Após a obtenção da ET_o , o K_c foi obtido por meio da relação entre a ET_a e a ET_o diária (Equação 6), obtendo-se um valor de K_c para cada fase fenológica (inicial, intermediária e final) dos feijoeiros carioca e caupi. O termo K_c foi usado ao longo do trabalho representando o que é na verdade o K_c multiplicado pelo coeficiente de estresse hídrico do solo (K_s) (Allen et al., 2007), ou seja, considerou-se que o solo estava na capacidade de campo nos dias avaliados.

$$K_c = \frac{ET_a}{ET_o} \quad (6)$$

Um esquema da metodologia aplicada no presente estudo pode ser visto na Figura 3.5. Observa-se que inicialmente foram obtidos os produtos de ET_a na plataforma do Google EEFflux; em seguida foram analisados somente os valores de ET_a dentro da área de abrangência do pivô central estudado. A partir da relação entre ET_a e ET_o obtiveram-se os valores de K_c tanto para o feijoeiro carioca quanto

para o feijoeiro caupi. Por fim, os valores de ET_a e K_c para as duas espécies foram comparados e validados na parte de análise de dados.

Figura 3.5 - Fluxograma geral do trabalho.

3.2.5 Análise de dados e validação

Os dados de ET_a e K_c foram submetidos a uma análise estatística descritiva, com estudo de médias, desvio padrão, valores mínimos e máximos para cada um dos períodos do ciclo do feijoeiro considerados neste estudo. Além disso, foram apresentados mapas de distribuição espacial na área de estudo (130,68 ha ou 1452 pixels) dessas duas variáveis (ET_a e K_c) para os feijoeiros carioca e caupi nos diferentes anos analisados.

Os valores de ET_a de feijoeiros carioca e caupi obtidos por meio da plataforma do Google EEFlux foram comparados com a ET_c (mm d^{-1}) calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida multiplicando-se a ET_o calculado pelo método de Penman-Monteith (PM) pelo K_c de recomendações do boletim FAO-56 (Allen et al., 1998) e de estudos de referência no Brasil (Tabela 3.4).

Alguns índices estatísticos foram utilizados para comparar a ET_c medida e a estimada. Os índices utilizados foram: a raiz do erro médio ao quadrado (RMSE), o

erro médio absoluto (MBE), a raiz do erro médio ao quadrado normalizada (NRMSE) e índice de concordância de Willmott (d).

Tabela 3.4 - Condições de desenvolvimento dos estudos do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca e do feijão caupi, e os valores usados na comparação do K_c dos feijoeiros estimado por meio do algoritmo METRIC (EEFLUX) com K_c recomendados por estes estudos de referência.

Referências	Dp	Variedade	Sistema de irrigação	País	Valores de K_c		
					I	M	F
Allen et al. (1998)	**	**	*	EUA	0,40	1,15	0,35
Albuquerque e Andrade (2011)	**	**	*	Brasil	0,83	1,14	0,34
Mendonça et al. (2007)	24	UENF 47	Aspersão convencional	Brasil	1,04	1,34	0,34
Medeiros et al. (2001)	28	Carioca 80-SH	*	Brasil	0,63 0,69	0,96 0,98	0,98 0,98
Bastos et al. (2008)	16	BR-17 Gurguéia	Aspersão convencional	Brasil	0,80	1,10	0,90
Souza et al. (2005)	10	Setentão	Microaspersão	Brasil	0,78	1,27	0,86
Murga-Orrillo et al. (2016)	20	Nova era	Aspersão convencional	Brasil	0,42	0,82	1,20
Saraiva e Souza (2012)	**	**	*	Brasil	0,78	1,00	0,86

Feijão carioca

Feijão caupi

Dp - Densidade de plantio (plantas m^{-2}); * não especificado; ** condições gerais de cultivo; I - Inicial; M - Intermediária; F - Final.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Distribuição espacial da ET_a e do K_c

A variabilidade da distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux), nos períodos de cultivo nos anos de 2013 e 2017, para da cultura do feijão carioca, pode ser vista na Figura 3.6. Observa-se que a ET_a obtida variou entre 2,3 a 8,5 $mm\ d^{-1}$, em termos gerais. Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2013, verificou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase inicial da cultura (26/08/2013) e uma

menor amplitude entre os valores observados na fase final do feijão carioca (13/10/2013).

Figura 3.6 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) da cultura do feijão carioca para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.

Enquanto isso, nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2017, verificou-se uma amplitude pequena entre os valores observados nas fases inicial (18/06/2017), intermediária (20/07/2017) e final (05/08/2017). Os mapas apresentados confirmam a ocorrência da variabilidade espacial e temporal da ET_a , em função dos elementos meteorológicos atuantes em determinados períodos e em função das características do solo e da cultura. Em 2013, o ciclo do feijão carioca cultivado na área de estudo se deu entre o inverno e o início da primavera, enquanto que, em 2017, o ciclo se deu entre o outono e início do inverno, propiciando maiores diferenças nos valores de ET_a entre os anos distintos.

Santana et al. (2014) obtiveram valores de ET_c do feijão carioca pelo método de balanço de água no solo, na região de Uberaba-MG que também apresentaram variações em função dos períodos avaliados dentro do ciclo (dias após a semeadura) e do tipo de cultivar plantada. Resultados encontrados por Medeiros et al. (2005) e Medeiros et al. (2016), em estudo com feijão carioca na região de Campinas-SP, também corroboram com a variabilidade de valores de ET apresentados neste trabalho.

Na Figura 3.7 observa-se a variabilidade da distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux), nos períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015, para da cultura do feijão caupi. Verifica-se que a ET_a obtida variou entre 0,8 a 6,2 mm d⁻¹, em termos gerais. Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2014, verificou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase final da cultura (09/05/2014) e uma menor amplitude entre os valores observados na fase intermediária do feijão caupi (07/04/2014).

Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2015, observou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase final do feijão caupi (13/06/2015) e uma amplitude menor entre os valores observados na fase intermediária da cultura (28/05/2015), semelhante ao ano de 2014. Em 2014, o ciclo do feijão caupi cultivado na área de estudo se deu entre o final do verão e o outono, enquanto que, em 2015, o ciclo se deu entre o outono e o início do inverno, propiciando diferenças nos valores de ET_a entre os anos distintos.

Resultados encontrados por Souza et al. (2005), Bastos et al. (2008) e Saraiva e Souza (2012) em estudos com feijão caupi na região nordeste do Brasil,

também corroboram com a variabilidade de valores de ET apresentados neste trabalho para essa cultura.

Figura 3.7 - Distribuição espacial da evapotranspiração atual (ET_a) da cultura do feijão caupi para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.

A variabilidade da distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c), nos períodos de cultivo nos anos de 2013 e 2017, para da cultura do feijão carioca, pode ser vista na Figura 3.8. Observa-se que o K_c obtido variou entre 0,4 a 1,6, em termos gerais. Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2013, verificou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase inicial da cultura (26/08/2013) e uma menor amplitude entre os valores observados nas fases intermediária (27/09/2013) e final (13/10/2013) do feijão carioca.

Enquanto isso, nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2017, verificou-se uma amplitude pequena entre os valores observados nas fases inicial (18/06/2017), intermediária (20/07/2017) e final (05/08/2017). Os mapas apresentados confirmam a ocorrência da variabilidade espacial e temporal do K_c , em função do crescimento da cultura do feijão carioca, de forma que os maiores valores de K_c ocorrem em locais com maior cobertura do solo por parte da vegetação, ou seja, cultura com maior índice de área foliar (IAF).

A evaporação da água no solo e a transpiração pelas plantas ocorrem de forma simultânea variando ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas; inicialmente as maiores perdas são decorrentes da evaporação do solo, com o desenvolvimento da vegetação e aumento do dossel a transpiração se torna o principal processo (Allen et al., 1998).

Medeiros et al. (2004) obtiveram valores de K_c do feijão carioca utilizando três diferentes métodos de estimativa da ET_o , na região de Campinas-SP, que também apresentaram uma variabilidade em função do IAF e do método de estimativa da ET_o . Resultados encontrados por Allen et al. (2005) e Tasumi et al. (2005), em estudos com a cultura do feijão, também corroboram com a variabilidade de valores de K_c apresentados.

Figura 3.8 - Distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.

Na Figura 3.9 observa-se a variabilidade da distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c) nos períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e

2015, para da cultura do feijão caupi. Verifica-se que o K_c obtido variou entre 0,2 a 1,7, em termos gerais. Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2014, verificou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase final da cultura (09/05/2014) e uma menor amplitude entre os valores observados nas fases inicial (22/03/2014) e intermediária (07/04/2014) do feijão caupi.

Nas datas de passagem do satélite avaliadas no ano de 2015, observou-se uma maior amplitude entre os valores observados na fase final do feijão caupi (13/06/2015) e uma amplitude menor entre os valores observados nas fases inicial (26/04/2015) e intermediária (28/05/2015) da cultura, semelhante ao ano de 2014. Resultados encontrados por Souza et al. (2005), Bastos et al. (2008) e Saraiva e Souza (2012) em estudos com feijão caupi na região nordeste do Brasil, também corroboram com a variabilidade de valores de K_c apresentados neste trabalho para essa cultura.

Figura 3.9 - Distribuição espacial do coeficiente de cultura (K_c) do feijão caupi para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.

Na Tabela 3.5, observa-se que os valores médios de ET_a foram de 6,21, 6,83 e 3,31 mm d⁻¹ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do

feijão carioca cultivado no ano de 2013. Os desvios padrões para os valores de ET_a deste ano foram de 1,43, 1,04 e 0,38 mm d^{-1} para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2017, verificou-se valores médios de ET_a de 4,06, 3,78 e 4,34 mm d^{-1} nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca. Os desvios padrões para os valores de ET_a deste ano foram de 0,60, 0,57 e 0,74 mm d^{-1} para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Tabela 3.5 - Valores médios, mínimos e máximos de evapotranspiração atual (ET_a) (mm d^{-1}) e de coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca com base no algoritmo METRIC (Google EEFflux), seus respectivos desvios padrões (DP) e eficiência do uso da água (EUA), para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2013 e 2017.

Ano	2013				2017	
Dia/Mês	26/ago	27/set	13/out	18/jun	20/jul	05/ago
DAS	19	51	67	23	55	71
ET _a ±DP	6,21±1,43	6,83±1,04	3,31±0,38	4,06±0,60	3,78±0,57	4,34±0,74
ET _{min}	2,45	4,07	2,36	2,55	2,43	2,65
ET _{max}	8,52	7,83	4,31	4,68	4,38	5,06
Diferença (ET _{max} - ET _{min})	6,07	3,76	1,95	2,13	1,94	2,42
K _c ±DP	1,16±0,27	1,14±0,17	1,16±0,13	1,05±0,19	1,12±0,17	1,09±0,19
K _{cmin}	0,46	0,68	0,82	0,78	0,72	0,67
K _{cmax}	1,59	1,31	1,51	1,44	1,29	1,28
Diferença (K _{cmax} - K _{cmin})	1,13	0,63	0,68	0,66	0,57	0,61
ET _{ac} (mm)	407,36				438,3	
EUA (kg m ⁻³)	0,62				0,88	
Média EUA	0,75					

ET_a - evapotranspiração atual (mm); $ET_{\min}$ - evapotranspiração mínima; $ET_{\max}$ - evapotranspiração máxima; ET_{ac} - evapotranspiração acumulada; K_c - coeficiente de cultura; $K_{c\min}$ - coeficiente de cultura mínimo; $K_{c\max}$ - coeficiente de cultura máximo; $\pm DP$ - desvio padrão; DAS - dias após a semeadura; EUA - eficiência do uso da água.

Quanto aos valores mínimos de ET_a , verificou-se que estes foram de 2,45, 4,07 e 2,36 mm d^{-1} nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca cultivado no ano de 2013. Enquanto isso, no ano de 2017 os valores mínimos de ET_a foram de 2,55, 2,43 e 2,65 mm d^{-1} para as datas

representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Os valores máximos de ET_a , no ano de 2013, foram de 8,52, 7,83 e 4,31 mm d⁻¹ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2017, verificou-se que os valores máximos de ET_a foram de 4,68, 4,38 e 5,06 mm d⁻¹ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca.

As diferenças entre os valores extremos de ET_a (máximos e mínimos) foram de 6,07, 3,76 e 1,95 mm d⁻¹ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca cultivado no ano de 2013. Enquanto isso, no ano de 2017 as diferenças entre os valores extremos de ET_a foram de 2,13, 1,94 e 2,42 mm d⁻¹ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Quanto aos valores médios de K_c , observa-se que estes foram de 1,16, 1,14 e 1,16 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca cultivado no ano de 2013. Os desvios padrões para os valores de K_c deste ano foram de 0,27, 0,17 e 0,13 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2017, verificou-se valores médios de K_c de 1,25, 1,12 e 1,09 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca. Os desvios padrões para os valores de K_c deste ano foram de 0,19, 0,17 e 0,19 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Os valores mínimos de K_c foram de 0,46, 0,68 e 0,82 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca cultivado no ano de 2013. Enquanto isso, no ano de 2017 os valores mínimos de K_c foram de 0,78, 0,72 e 0,67 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Os valores máximos de K_c , no ano de 2013, foram de 1,59, 1,31 e 1,51 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2017, verificou-se que os valores máximos de K_c foram de 1,44, 1,29 e 1,28 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca.

As diferenças entre os valores extremos de K_c (máximos e mínimos) foram de 1,13, 0,63 e 0,68 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão carioca cultivado no ano de 2013. Enquanto isso, no ano de 2017 as diferenças entre os valores extremos de K_c foram de 0,66, 0,57 e 0,61 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

A evapotranspiração acumulada (ET_{ac}) ao longo do ciclo da cultura do feijão carioca no ano de 2013 foi de 407,36 mm e no ano de 2017 foi de 438,3 mm, considerando os valores de K_c fixos para cada fase de crescimento e desenvolvimento da cultura. Devido as maiores demandas da atmosfera no ano de 2017, o consumo de água foi naturalmente mais alto do que no ano de 2013.

A eficiência do uso da água (EUA) foi de 0,62 e 0,88 $kg\ m^{-3}$ para os anos de 2013 e 2017, respectivamente. Na média dos dois anos de cultivo analisados a EUA foi de 0,75 $kg\ m^{-3}$, valor superior aos que foram encontrados por Doorenbos e Kassam (1979), 0,3 a 0,6 $kg\ m^{-3}$ para a cultura do feijão, quando utilizado de 300 a 500 mm de água em todo ciclo. Soureshjani et al. (2019) encontrou valores de EUA de 0,5 a 1,3 $kg\ m^{-3}$ para o feijão, em estudo com déficit hídrico. A variação da EUA da cultura pode estar relacionada a diferentes quantidades de água aplicadas, aos efeitos das condições climáticas e as quantidades e tipos de fertilizantes utilizados (Fan et al., 2018).

Na Tabela 3.6, observa-se que os valores médios de ET_a foram de 3,17, 4,75 e 4,48 $mm\ d^{-1}$ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Os desvios padrões para os valores de ET_a deste ano foram de 0,74, 0,40 e 1,47 $mm\ d^{-1}$ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2015, verificou-se valores médios de ET_a de 3,66, 2,64 e 4,14 $mm\ d^{-1}$ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi. Os desvios padrões para os valores de ET_a deste ano foram de 0,31, 0,25 e 0,77 $mm\ d^{-1}$ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Quanto aos valores mínimos de ET_a verificou-se que estes foram de 1,18, 2,77 e 0,90 $mm\ d^{-1}$ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Enquanto isso, no ano de 2015 os valores mínimos de ET_a foram de 3,36, 1,95 e 2,38 $mm\ d^{-1}$ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Os valores máximos de ET_a , no ano de 2014, foram de 3,96, 6,01 e 6,22 $mm\ d^{-1}$ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2015, verificou-se que os valores máximos de ET_a foram de 4,55, 3,12 e 5,04 $mm\ d^{-1}$ nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi.

As diferenças entre os valores extremos de ET_a (máximos e mínimos) foram de 2,77, 3,24 e 5,33 $mm\ d^{-1}$ nas datas representativas das fases inicial, intermediária

e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Enquanto isso, no ano de 2015 as diferenças entre os valores extremos de ET_a foram de 1,19, 1,18 e 2,66 mm d⁻¹ para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Quanto aos valores médios de K_c , observa-se que estes foram de 0,86, 1,11 e 1,29 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Os desvios padrões para os valores de K_c deste ano foram de 0,20, 0,09 e 0,42 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2015, verificou-se valores médios de K_c de 1,11, 0,86 e 1,13 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi. Os desvios padrões para os valores de K_c deste ano foram de 0,09, 0,08 e 0,21 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

Tabela 3.6 - Valores médios, mínimos e máximos de evapotranspiração atual (ET_a) e de coeficiente de cultura (K_c) do feijão caupi com base no algoritmo METRIC (Google EEFflux), seus respectivos desvios padrões (DP) e eficiência do uso da água (EUA), para os diferentes períodos estudados ao longo dos anos de 2014 e 2015.

Ano	2014			2015		
Dia/Mês	22/mar	07/abr	09/mai	26/abr	28/mai	13/jun
DAS	19	35	67	14	46	62
ET _a ±DP	3,17±0,74	4,75±0,40	4,48±1,47	3,66±0,31	2,64±0,25	4,14±0,77
ET _{min}	1,18	2,77	0,90	3,36	1,95	2,38
ET _{max}	3,96	6,01	6,22	4,55	3,12	5,04
Diferença (ET _{max} - ET _{min})	2,77	3,24	5,33	1,19	1,18	2,66
K _c ±DP	0,86±0,20	1,11±0,09	1,29±0,42	1,11±0,09	0,86±0,08	1,13±0,21
K _{cmin}	0,32	0,65	0,26	1,02	0,63	0,65
K _{cmax}	1,07	1,41	1,79	1,38	1,01	1,38
Diferença (K _{cmax} - K _{cmin})	0,75	0,76	1,53	0,36	0,38	0,73
ET _{ac} (mm)	361,95			321,92		
EUA (kg m ⁻³)	0,40			0,36		
Média EUA	0,38					

ET_a - evapotranspiração atual (mm); ET_{min} - evapotranspiração mínima; ET_{max} - evapotranspiração máxima; ET_{ac} - evapotranspiração acumulada; K_c - coeficiente de cultura; K_{cmin} - coeficiente de cultura mínimo; K_{cmax} - coeficiente de cultura máximo; $\pm DP$ - desvio padrão; DAS - dias após a semeadura; EUA - eficiência do uso da água.

Os valores mínimos de K_c foram de 0,32, 0,65 e 0,26 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Enquanto isso, no ano de 2015 os valores mínimos de K_c foram de 1,02, 0,63 e 0,65 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. Os valores máximos de K_c , no ano de 2014, foram de 1,07, 1,41 e 1,79 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente. No ano de 2015, verificou-se que os valores máximos de K_c foram de 1,38, 1,01 e 1,38 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi.

As diferenças entre os valores extremos de K_c (máximos e mínimos) foram de 0,75, 0,76 e 1,53 nas datas representativas das fases inicial, intermediária e final do feijão caupi cultivado no ano de 2014. Enquanto isso, no ano de 2015 as diferenças entre os valores extremos de K_c foram de 0,36, 0,38 e 0,73 para as datas representativas das fases inicial, intermediária e final, respectivamente.

A eficiência do uso da água (EUA) foi de 0,40 e 0,36 kg m^{-3} para os anos de 2014 e 2015, respectivamente. Na média dos dois anos de cultivo analisados a EUA foi de 0,38 kg m^{-3} . A evapotranspiração acumulada (ET_{ac}) ao longo do ciclo da cultura do feijão caupi no ano de 2014 foi de 361,95 mm e no ano de 2015 foi de 321,92 mm, considerando os valores de K_c fixos para cada fase de crescimento e desenvolvimento da cultura.

Bastos et al. (2008) encontram valores inferiores de ET_c (288,5 mm) para a cultura de feijão-caupi na região Nordeste, resultados estes, similares da ET_c total foram obtidos por Murga-Orrillo et al. (2016). Bozkurt e Mansuroglub (2018) estimaram o consumo de água para o ciclo da cultura do feijão e encontraram valores de 358 mm na estação do outono e 533 mm na estação da primavera na província de Hatay, Turquia. Satriani et al. (2016) mostraram que a ET_c foi de 299,4 mm para todo o ciclo da cultura.

3.3.2 Comparação dos valores de K_c obtidos com trabalhos de referência

Na Figura 3.10 são apresentados os valores médios do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca (Figura 3.10A) e do feijão caupi (Figura 3.10B) ao longo dos seus respectivos ciclos de crescimento e desenvolvimento, obtidos no presente trabalho e em outros trabalhos de referência no Brasil e no mundo. Os valores de K_c para o feijão carioca, na média dos dois anos analisados (2013 e 2017), aumenta de

um valor mínimo na fase inicial de 1,11 até um máximo de K_c de 1,13 nas fases intermediária e final. Esses valores seguem uma possível variação no desenvolvimento da área foliar que alcança os maiores valores nas fases intermediária e final.

Observa-se que o K_c médio para o feijão carioca obtido por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux) é semelhante ao valor de K_c tabelado da FAO (Allen et al., 1998) na fase intermediária; no entanto, é diferente nas fases inicial e final. De acordo com Tasumi et al. (2005) os valores de K_c determinados experimentalmente para diferentes estágios do feijão carioca têm sido consideravelmente diferentes dos recomendados pela FAO-56 (Allen et al., 1998). Segundo os autores, o desenvolvimento de dados locais K_c é uma estimativa recomendada. As diferenças nos valores de K_c podem ser atribuídas a diferenças devido à variabilidade inerente na data de emergência, manejo de uso do solo, precipitação pluvial, área foliar e condições atmosféricas, como temperatura do ar, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor (Kamble et al., 2013).

Na comparação dos K_c do feijão carioca obtidos pelo algoritmo METRIC (Google EEFlux) com os valores de K_c recomendados por outros trabalhos de referência no Brasil (Albuquerque e Andrade, 2011; Mendonça et al., 2007; Medeiros et al., 2001) verificou-se que os valores apresentados são semelhantes, evidenciando o potencial do algoritmo na estimativa da ET_a e do K_c via sensoriamento remoto, bem como, uma ferramenta de auxílio a ser usada no manejo da irrigação.

Os valores de K_c para o feijão caupi, na média dos dois anos analisados (2014 e 2015), aumenta de um valor mínimo nas fases inicial e intermediária de 0,99 até um máximo de K_c de 1,21 na fase final. Observa-se que o K_c médio para o feijão caupi obtido por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux) é semelhante ao valor de K_c tabelado da FAO (Allen et al., 1998) na fase intermediária, no entanto, é diferente nas fases inicial e final.

Figura 3.10 - Curvas do coeficiente de cultura (K_c) do feijão carioca (A) e do feijão caupi (B) comparadas com as recomendações do boletim da FAO-56 e com trabalhos de referência no Brasil.

De acordo com Murga-Orrillo et al. (2016) os valores de K_c determinados experimentalmente para o feijão caupi podem diferir dos valores recomendados pela FAO-56 (Allen et al., 1998) em função das condições locais de solo e dos métodos de estimativa da ET_o utilizados na obtenção do K_c . Além disso, há grande dependência entre a ET e as condições climáticas regionais, justificando assim a diferença nos valores obtidos.

Na comparação dos K_c do feijão caupi obtidos pelo algoritmo METRIC (Google EEFlux) com os valores de K_c recomendados por outros trabalhos de referência no Brasil (Bastos et al., 2008; Souza et al., 2005; Murga-Orrillo et al., 2016; Saraiva e Souza, 2012) verificou-se que os valores apresentados são semelhantes, evidenciando o potencial do algoritmo na estimativa da ET_a e do K_c para o feijão caupi via sensoriamento remoto.

3.3.3 Validação dos dados

Na Figura 3.11 podem ser vistos os valores de ET_a do feijão carioca obtidos por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlux) comparados a ET_c calculada com dados observados. Comparando-se a ET_a do feijão carioca obtido pelo METRIC, com a ET_c calculada utilizando valores de K_c recomendados por Allen et al. (1998) (Figura 3.11A), observou-se que o índice d apresentou um valor de 0,65, indicando baixa acurácia do modelo nessa situação. O RMSE foi de 2,52, o MBE foi de 2,04 e o NRMSE foi de 0,72, indicando precisão não tão aceitável da estimativa de ET_a , baseado no algoritmo METRIC. A baixa precisão e acurácia encontrada não significa que as estimativas realizadas pelo algoritmo METRIC não são confiáveis, ao contrário, significa que consideram a variabilidade espaço-temporal da ET e do K_c , diferentemente das outras metodologias existentes.

Embora os valores de K_c recomendados por Allen et al. (1998) não representem a verdade fundamental, sua posição na comunidade científica é estabelecida, tornando-se uma boa referência para comparação. Costa et al. (2019) e José et al. (2019) utilizaram o algoritmo SEBAL (origem dos princípios e técnicas do METRIC), no Brasil, para quantificarem o consumo hídrico do cafeeiro e do algodão, respectivamente. Nos dois estudos verificaram que os valores preconizados pela FAO-56 quando comparados aos valores obtidos via algoritmos de balanço de energia na superfície, apresentam baixos índices de precisão e acurácia, em geral.

Figura 3.11 - Evapotranspiração atual (ET_a) do feijão carioca obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFflux) comparado a ET_c calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pelo método de Penman-Monteith (PM), pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e de estudos de referência no Brasil. Allen et al. (1998) (A), Albuquerque e Andrade (2011) (B), Mendonça et al. (2007) (C) e Medeiros et al. (2001) (D e E).

Na validação da ET_a do feijão carioca obtida pelo algoritmo METRIC (Google EEFlex) com os valores da ET_c calculados com dados observados e recomendados por Albuquerque e Andrade (2011) (Figura 3.11B), Mendonça et al. (2007) (Figura 3.11C) e Medeiros et al. (2001) (Figura 3.11D e Figura 3.11E), observa-se que o índice d apresentou valores acima de 0,69, indicando uma precisão relativamente alta do modelo nessas situações. O RMSE ficou abaixo de 1,80, o MBE foi inferior a 1,43 e o NRMSE ficou abaixo de 0,51, indicando também uma precisão razoável da estimativa ET_c , com base no algoritmo METRIC.

Na Figura 3.12 podem ser vistos os valores de ET_a do feijão caupi obtidos por meio do algoritmo METRIC (Google EEFlex) comparados a ET_c calculada com dados observados. Comparando-se a ET_a do feijão caupi obtido pelo METRIC, com a ET_c calculada utilizando valores de K_c recomendados por Allen et al. (1998) (Figura 3.12A), observou-se que o índice d apresentou um valor de 0,50, indicando baixa acurácia do modelo nessa situação. O RMSE foi de 2,16, o MBE foi de 1,87 e o NRMSE foi de 0,61, indicando precisão não tão aceitável da estimativa de ET_a , baseado no algoritmo METRIC. A baixa precisão e acurácia encontrada não significa que as estimativas realizadas pelo algoritmo METRIC não são confiáveis para a cultura do feijão caupi, ao contrário, significa que consideram a variabilidade espaço-temporal da ET e do K_c , diferentemente das outras metodologias existentes.

Na validação da ET_a do feijão caupi obtida pelo algoritmo METRIC (Google EEFlex) com os valores da ET_c calculados com dados observados e recomendados por Bastos et al. (2008) (Figura 3.12B), Souza et al. (2005) (Figura 3.12C), Murga-Orrillo et al. (2016) (Figura 3.12D) e Saraiva e Souza (2012) (Figura 3.12E), observa-se que o índice d apresentou valores acima de 0,60, indicando uma precisão não tão aceitável do modelo nessas situações. O RMSE ficou abaixo de 1,26, o MBE foi inferior a 0,97 e o NRMSE ficou abaixo de 0,36, indicando uma precisão razoável da estimativa ET_c , com base no algoritmo METRIC.

Figura 3.12 - Evapotranspiração atual (ET_a) do feijão caupi obtida por meio do algoritmo METRIC (Google EEFflux) comparado a ET_c calculada com dados observados. A ET_c observada foi obtida pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_0), calculada pelo método de Penman-Monteith (PM), pelo coeficiente de cultura (K_c) das recomendações do boletim FAO-56 e de estudos de referência no Brasil. Allen et al. (1998) (A), Bastos et al. (2008) (B), Souza et al. (2005) (C), Murga-Orrillo et al. (2016) (D) e Saraiva e Souza (2012) (E).

3.4 CONCLUSÕES

O método de estimativa de evapotranspiração atual (ET_a) e coeficiente de cultura (K_c) espacializados utilizando a plataforma Google EEFlux possibilitou a compreensão da variabilidade espacial dessas duas variáveis e, portanto, considera-se que este aplicativo tem alto potencial para a estimar a ET_a e o K_c de diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento dos feijoeiros carioca e caupi. Isso também pode ajudar a entender a necessidade hídrica dessas culturas e auxiliar quanto ao manejo da irrigação em sistemas de cultivos irrigados.

Os dados ET_a e K_c obtidos com base no algoritmo METRIC (Google EEFlux) apresentaram valores semelhantes aos estudos que utilizaram métodos tradicionais. A plataforma Google EEFlux é uma alternativa mais parcimoniosa na estimativa do K_c e, portanto, os valores de K_c obtidos por este método podem ser usados diretamente em áreas de cultivo de feijão carioca e caupi.

A validação da ET_a obtida pelo algoritmo METRIC (Google EEFlux) com os valores da ET_c calculados por meio de dados observados e recomendados por trabalhos de referência apresentou resultados com precisão razoável (tanto para o feijão carioca como para o feijão caupi); no entanto, o comportamento das diferentes curvas de K_c do feijoeiro obtidas é semelhante aos demais trabalhos de referência no Brasil e no mundo.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, P.E.P.; Andrade, C.L.T. 2001. Planilha eletrônica para a programação da irrigação de culturas anuais. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 14p. Circular Técnica, 10.
- Allen, R.G.; Irmak, A.; Trezza, R.; Hendrickx, J.M.; Bastiaanssen, W.; Kjaersgaard, J. 2011. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes* 25: 4011-4027.
- Allen, R.G.; Morton, C.; Kamble, B.; Kilic, A.; Huntington, J.; Thau, D.; Gorelick, N.; Erickson, T.; Moore, R.; Trezza, R.; Ratcliffe, I.; Robison, C. 2015. EEFlux: A Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. p. 1-11.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. Irrigation and Drainage paper 56: FAO, Rome, Italy.

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J.L. 2005. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 2-13.
- Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. 2007. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)-Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133: 380-394.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.M.; Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22: 711-728.
- Bastiaanssen, W.G.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. 1998a. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology* 212: 198-212.
- Bastiaanssen, W.G.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F.; Roerink, G. J.; Van der Wal, T. 1998b. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology* 212: 213-229.
- Bastos, E.A.; Ferreira, V.M.; Silva, C.D.; Andrade Júnior, A.D. 2008. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no Vale do Guruguia, Piauí. *Irriga* 13: 182-190.
- Bozkurt, S.; Mansuroglu, G.S. 2018. Responses of unheated greenhouse grown green bean to buried drip tape placement depth and watering levels. *Agricultural Water Management* 197: 1-8.
- Choi, M.; Kustas, W.P.; Anderson, M.C.; Allen, R.G.; Li, F.; Kjaersgaard, J.H. 2009. An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, US) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology* 149: 2082-2097.
- Costa, J.O.; Coelho, R.D.; Wolff, W.; José, J.V.; Folegatti, M.V.; Ferraz, S.F.B. 2019. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. *Scientia Agrícola* 76: 93-101.
- Courault, D.; Seguin, B.; Olioso, A. 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage* 19: 223-249.
- Doorenbos, J.; Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage paper* 33: 257.
- Fan, Y.; Wang, C.; Nan, Z. 2018. Determining water use efficiency of wheat and cotton: A meta-regression analysis. *Agricultural Water Management* 199: 48-60.

French, A.N.; Hunsaker, D.J.; Thorp, K.R. 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment* 158: 281-294.

Geerts, S.; Raes, D. 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management* 96: 1275-1284.

Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27.

José, J.V.; Oliveira, N.P.R.de.; Silva, T.J.de.A.da.; Bonfim-Silva, E.M.; Costa, J.de.O.; Fenner, W.; Coelho, R.D. 2019. Quantification of cotton water consumption by remote sensing. *Geocarto International* 33: 1-15.

Kamble, B.; Kilic, A.; Hubbard, K. 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote sensing* 5: 1588-1602.

Kiptala, J.K.; Mohamed, Y.; Mul, M.L.; Zaag, P. 2013. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa. *Water Resources Research* 49: 8495-8510.

Kustas, W.P.; Norman, J.M. 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41: 495-516.

Li, H.; Wan, W.; Fang, Y.; Zhu, S.; Chen, X.; Liu, B.; Hong, Y. 2019. A Google Earth Engine-enabled software for efficiently generating high-quality user-ready Landsat mosaic images. *Environmental Modelling & Software* 112: 16-22.

Lopes, A.S.; Guilherme, L.R.G. 2016. Career Perspective on Soil Management in the Cerrado region of Brazil. *Advances in Agronomy* 137: 1-72.

Medeiros, G.A.de.; Arruda, F.B.; Sakai, E.; Fujiwara, M. 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural Water Management* 49: 211-224.

Medeiros, G.A.de.; Arruda, F.B.; Sakai, E. 2004. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. *Acta Scientiarum. Agronomy* 26: 513-519.

Medeiros, G.A.de.; Arruda, F.B.; Sakai, E. 2005. Crop coefficient for irrigated beans derived using three reference evaporation methods. *Agricultural and Forest Meteorology* 135: 135-143.

Medeiros, G.A.de.; Daniel, L.A.; Fengler, F.H. 2016. Growth, development, and water consumption of irrigated bean crop related to growing degree-days on different soil tillage systems in Southeast Brazil. *International Journal of Agronomy* 1: 1-8.

Mendonça, J.C.; Sousa, E.F.; Bernardo, S.; Sugawara, M.T.; Peçanha, A.L.; Gottardo, R.D. 2007. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em Campos dos Goytacazes, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11: 471-475.

Morton, C.G.; Huntington, J.L.; Pohl, G.M.; Allen, R.G.; McGwire, K.C.; Bassett, S.D. 2013. Assessing calibration uncertainty and automation for estimating evapotranspiration from agricultural areas using METRIC. *American Water Resources Association* 49: 549-562.

Murga-Orrillo, H.; Araújo, W.F.; Rocha, P.R.R.; Sakazaki, R.T.; Dionisio, L.F.S.; Polo-Vargas, A.R. 2016. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi cultivado em solo do cerrado submetido à cobertura morta. *Irriga* 21:172-187.

Pereira, L.S.; Allen, R.G.; Smith, M.; Raes, D. 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO 56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147: 4-20.

Santana, M.J.D.; Lemos, L.B.; Souza, S.S.D.; Campos, T.M.; Silva, F.M.D.; Borges, R.D. 2014. Estimated production and evapotranspiration of irrigated bean cultivars. *Engenharia Agrícola* 34: 1089-1103.

Saraiva, K.R.; Souza, F.de. 2012. O efeito das mudanças climáticas nas necessidades hídricas do feijão-caupi no Curu-Pentecoste utilizando o modelo "ISAREG". *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 6: 8-13.

Satriani, A.; Loperte, A.; Soldovieri, F. 2015. Integrated geophysical techniques for sustainable management of water resource. A case study of local dry bean versus commercial common bean cultivars. *Agricultural Water Management* 162: 57-66.

Singh, R.K.; Liu, S.; Tieszen, L.L.; Suyker, A.E.; Verma, S.B. 2012. Estimating seasonal evapotranspiration from temporal satellite images. *Irrigation Science* 30: 303-313.

Souza, M.D.S. M.de.; Bezerra, F.M.L.; Maria, E. 2005. Coeficientes de cultura do feijão caupi na região litorânea do Ceará. *Irriga* 10: 241-248.

Soureshjani, H.K.; Nezami, A.; Kafi, M.; Tadayon, M. 2019. Responses of two common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 213: 270-279.

Tasumi, M.; Allen, R.G.; Trezza, R.; Wright, J.L. 2005. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131: 94-109.

Wagle, P.; Bhattarai, N.; Gowda, P.H.; Kakani, V.G. 2017. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128: 192-203.

Zhang, H.; Anderson, R.G.; Wang, D. 2015. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research* 180: 143-154.