

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA: UMA ABORDAGEM DOS PRINCIPAIS MÉTODOS APLICADOS ÀS PESQUISAS CIENTÍFICAS E NA AGRICULTURA

LUAN PERONI VENANCIO¹; FERNANDO FRANÇA DA CUNHA¹;
EVERARDO CHARTUNI MANTOVANI¹; CIBELE HUMMEL DO AMARAL² E
EDVALDO FIALHO DO REIS³

¹Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP: 36570-900, Viçosa, MG, Brasil, luan.venancio@ufv.br, fernando.cunha@ufv.br, everardo@ufv.br

²Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Av. Peter Henry Rolfs, s/n, CEP: 36570-900, Viçosa, MG, Brasil, chamaral@ufv.br

³Departamento de Engenharia Rural, Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/nº, Guararema, CEP: 29500-000, Alegre, ES, edreis@cca.ufes.br

1 RESUMO

Existem muitas metodologias para medição ou estimativa da evapotranspiração de cultura (ETc). Essas metodologias apresentam grandes diferenças entre si, especialmente no que se refere à base de formulação (empíricas, físicas ou a combinação de ambos), ao nível tecnológico (equipamentos, sensores sofisticados, etc.), a necessidade de dados de entrada, a área de aplicação, custo e precisão. Esta diversidade está relacionada à complexidade envolvida na transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera, com as variadas condições climáticas ao redor do planeta e também com os diferentes tipos de vegetação estudados. Nesta revisão, os seguintes métodos foram descritos e revisados: lisimetria (LIS), balanço de água no solo (BAS), razão de Bowen - balanço de energia (RBBE), covariância de vórtices turbulentos (CVT), modelos de fluxo de seiva (MFS), sistema de câmaras (SC), e métodos baseados no coeficiente de cultura (MB_{Kc}). Por fim, os métodos baseados no balanço de energia das superfícies (SR_{BE}) e em índices de vegetação (SR_{IV}), calculados a partir de dados de sensoriamento remoto (SR). Esses métodos foram selecionados por serem considerados, dentro do seu tipo de abordagem (hidrológica, micrometeorológica, fisiológica, empírica e sensoriamento remoto), os mais difundidos entre a comunidade científica internacional, e na agricultura.

Palavras-chave: agricultura irrigada, consumo hídrico, manejo da irrigação, coeficiente de cultura, sensoriamento remoto.

VENANCIO, L. P.; CUNHA, F. F.; MANTOVANI, E. C.; AMARAL, C. H.; REIS, E. F.
CROP EVAPOTRANSPIRATION: AN APPROACH TO MAIN METHODS APPLIED
TO SCIENTIFIC RESEARCHES AND IN AGRICULTURE

2 ABSTRACT

There are many methodologies for measuring or estimating crop evapotranspiration (ETc). These methodologies differ greatly from each other depending on the approach (empirical,

physical or a combination of both), technological level, input dataset, application area, cost and accuracy. This wide diversity is related to the complexity involved in water transference from the soil-plant system to the atmosphere, within various climatic conditions around the Earth and also to the different types of vegetation. In this review, the following methods were described and reviewed: lysimeter (LIS), soil water balance (BAS), Bowen ratio - energy balance (RBBE), eddy covariance (CVT), sap-flow models (MFS), chamber system (SC) and, crop coefficient-based methods (MB_{Kc}). Finally, the methods based on surface energy balance (SR_{BE}) and vegetation indices (SR_{IV}) were estimated through remote sensing data (SR). These methods were selected because they are considered, within their type of approach (hydrological, micrometeorological, physiological, empirical and remote sensing), the most widespread among the international scientific community and in agriculture.

Keywords: irrigated agriculture, water consumption, irrigation management, crop coefficient, remote sensing.

3 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um importante parâmetro nas interações entre o solo, a vegetação e a atmosfera (LIU et al., 2013), desempenhando um papel fundamental no balanço de energia e água dos sistemas agrícolas (ZHAO et al., 2019; WANG et al., 2015). O conhecimento da evapotranspiração é fundamental para o estudo das mudanças climáticas globais, gestão dos recursos hídricos, otimização do manejo da irrigação e produtividade da água, pesquisa agrícola e dinâmica do ciclo hidrológico (ANAPALLI et al., 2016; CASTELLVÍ; SNYDER, 2010; DING et al., 2013; VALIPOUR, 2015; XU; CHEN, 2005).

A evapotranspiração de cultura (ET_c) pode ser medida diretamente ou ser estimada, em que a escolha depende do objetivo. De acordo com Escarabajalhenarejos et al. (2015), os principais fatores a se levar em consideração na escolha do método são a precisão requerida e o custo das medições, além da adequabilidade às condições da área de estudo. Por exemplo, quando se deseja medidas precisas de ET_c, em escala de campo, podem ser obtidas sobre uma superfície homogênea usando técnicas convencionais, tais como razão de Bowen (RB), covariância de vórtices

(CVT) e sistemas de lisímetros (COSTA et al., 2018). Por outro lado, se o objetivo for a realização do monitoramento do balanço hídrico solo-planta em áreas irrigadas, a abordagem mais comum e operacional é a metodologia descrita no FAO-56 (FARG et al., 2012; YANG et al., 2014).

Dados de ET_c podem ser derivados de uma gama de sistema de medição, que inclui lisimetria (LIS), covariância de vórtices turbulentos (CVT), balanço de energia pelo método da razão de Bowen (RBBE), balanço de água no solo (BAS), modelos de fluxo de seiva (MFS), cintilometria, além das técnicas que utilizam imagens de sensoriamento remoto (ALLEN et al., 2011). Estes autores destacam, entretanto, que todas requerem cuidados experimentais consideráveis e são propensas a tendências substanciais nos resultados relatados.

Dentre estas, as mais utilizadas para medição da ET_c *in situ* para fins de pesquisa, são a lisimetria e a covariância de vórtices turbulentos (ALFIERI et al., 2012). Diversas técnicas supracitadas, tais como a RBBE, CVT e LIS, são medidas caras, trabalhosas e limitadas a pequenos experimentos de campo. Essas limitações justificam o recente aumento da integração de dados de sensoriamento remoto orbital em modelos já consolidados de ET_c, haja

vista que é uma técnica menos onerosa, com recobrimento de grandes áreas e que pode facilitar a estimativa do consumo de água nas áreas agrícolas (CONSOLI; VANELLA, 2014).

Quando se deseja conhecer as várias formas de obtenção da ETc, uma importante etapa do processo é categorizar tais formas de acordo o tipo de abordagem. Assim, está apresentada na Tabela 1, uma categorização das principais formas de obtenção da ETc, baseada em classificações reportadas na literatura (ALLEN et al., 2011; COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2003,

2005; LI et al., 2009; LIOU; KAR, 2014; NOURI et al., 2013; RANA et al., 2000). As abordagens baseadas em dados de sensoriamento remoto são as de mais difícil classificação, pois, muitas vezes, combinam conceitos físicos e empíricos, tornando-se assim um método intermediário (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2003). No presente estudo adotou-se como referência, a classificação proposta por Allen et al. (2011) onde se tem apenas duas categorias: (i) métodos baseados no balanço energético e (ii) métodos que utilizam os índices de vegetação.

Tabela 1. Categorização das principais formas de medição e estimativa da ETc.

Obtenção da ETc	Tipo de abordagem	Método/Técnica
Medição	Hidrológica	Lisimetria Balanço de água no solo
	Micrometeorológica	Razão de Bowen - Balanço de energia Covariância de vórtices turbulentos
		Fisiológica
	Estimativa	Empírica
Sensoriamento Remoto*		Baseados no balanço de energia na superfície Baseados em índices de vegetação

* podendo ser utilizado dados de sensoriamento remoto orbital (imagens de satélites), aéreo (ex.: Veículo aéreo não tripulado) e terrestre (plataformas).

É importante destacar que, apesar de ter sido atribuído o tipo de abordagem empírica para os métodos que utilizam o coeficiente de cultura, os demais conjuntos de abordagem também podem apresentar algum tipo de empirismo, principalmente as abordagens de sensoriamento remoto. Dessa forma, o presente artigo visa à revisão dos mais importantes métodos de medição e de estimativa da ETc, apresentando, para cada método, suas principais aplicabilidades e suas vantagens e desvantagens. É oportuno ressaltar que o objetivo não é uma revisão exaustiva de todos os métodos de ETc existentes, mas daqueles mais conhecidos e difundidos na comunidade científica internacional, com

especial atenção aos aplicados à pesquisa agrícola.

4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO E ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE CULTURA (ETc)

4.1 Lisimetria (LIS)

A lisimetria (LIS) é considerada a metodologia mais precisa na medição direta da ETc (PIOUCEAU et al., 2014; RUIZ-PEÑALVER et al., 2015; SÁNCHEZ et al., 2019), por isso ainda é considerada o método padrão (KLAMMLER; FANK 2014; PAYERO; IRMAK, 2008). Os

lisímetros são grandes caixas cheias de solo, localizadas no campo, apresentando superfície com solo exposto ou coberta por vegetação (CAMPECHE et al., 2011). A construção dos lisímetros tem levado em consideração necessidades específicas, que dependem da cultura estudada (ex.: profundidade do sistema radicular e projeção da copa), do tipo de solo e do clima (CAMPECHE et al., 2011; ESCARABAJAL-HENAREJOS et al., 2015). O custo de construção e instalação de um lisímetro pode variar consideravelmente, sendo afetado principalmente pelo seu tamanho, tipo de material e, especialmente, pelo tipo de mecanismo de pesagem (HAGENAU; MEISSNER; BORG, 2015; PAYERO; IRMAK, 2008).

Os três principais tipos de lisímetros existentes são os de drenagem, lençol freático constante e pesagem. Os lisímetros de pesagem são os mais utilizados e os mais precisos (RUIZ-PEÑALVER et al., 2015; XU; CHEN, 2005). Este tipo de lisímetro é constituído de um bloco isolado de solo, suspenso por meio de um mecanismo de pesagem (célula de carga), com a vegetação cultivada sobre este solo em condições naturais (ALLEN et al., 2011). A ETc é determinada a partir da variação do peso do bloco de solo devido à entrada ou saída de água, constituindo uma medida direta da dinâmica da água em um solo cultivado ou não (solo exposto) (ALLEN et al., 2011; CAMPECHE et al., 2011).

As principais vantagens da LIS são: a precisão, a possibilidade de total automação, a calibração, que pode ser feita mecanicamente, a facilidade de inspeção (ALLEN et al., 2011; NOURI et al., 2013), a capacidade de controlar e medir os componentes do balanço de água no solo (ABDOU; FLURY, 2004; DIETRICH; FAHLE; SEYFARTH, 2016), a alta resolução temporal, a possibilidade de análise de diferentes tipos de vegetação e produtividades de culturas e, ainda, o

monitoramento da lixiviação de nutrientes (DIETRICH; FAHLE; SEYFARTH, 2016).

As principais desvantagens dos lisímetros de pesagem são: o alto custo e a dificuldade de instalação, manuseio e manutenção (ALLEN et al., 2011; EVETT et al., 2012; LIU et al., 2016; RUIZ-PEÑALVER et al., 2015). Além disso, este método é focado em experimentos de campo específico, com áreas pequenas, que, muitas vezes, não representam a situação real do campo, dificultando a extrapolação dos dados (ALFIERI et al., 2012; ALLEN et al., 2011; LIU et al., 2016). Há também a dificuldade em manter ou reconstruir perfil de solos com as características originais, dificuldade da cultura em reproduzir as características de enraizamento natural, dificuldade de medição da ETc de plantas com grande porte e grandes espaçamentos, onde muitas vezes a área que representa a evaporação do solo não é correta (ALLEN et al., 2011; NOURI et al., 2013), e a possibilidade de efeito oásis (DIETRICH; FAHLE; SEYFARTH, 2016).

Apesar da técnica da LIS ser considerada padrão no estudo de calibração de outros métodos, ela não está isenta de críticas como visto acima, sendo mais precisa quando se calcula evapotranspiração em períodos menores que um dia (CAMPECHE et al., 2011).

4.2 Balanço de água no solo (BAS)

O balanço de água em volume de controle de solo, ou também método do balanço de água no solo (BAS), descrito pela primeira vez na década de 30 do século passado por Horton (1933), ainda tem sido aplicado em diversas pesquisas (CHOUDHURY; SINGH; PRADHAN, 2016; MA; FENG; ONG, 2013; VERA et al., 2009). O balanço hídrico do solo é realizado a partir da contabilização de todas as entradas (precipitação, irrigação e ascensão capilar) e saídas de água (evapotranspiração, escoamento superficial

e drenagem), cuja soma algébrica resulta na variação de armazenagem, conforme Equação 1.

$$P + I - D + AC - ET_c \pm R = \Delta h_z \quad (01)$$

Em que: P - precipitação (mm); I - irrigação (mm); D - drenagem (mm); AC - ascensão capilar (mm); ET_c - evapotranspiração de cultura (mm); R - escoamento superficial (mm); Δh_z - variação da armazenagem (mm) desde a superfície do solo até a profundidade z.

Esta equação, porém, é usualmente rearranjada para deixar a evapotranspiração da cultura (ET_c , mm) como variável dependente, assim o BAS é um método indireto. Ao medir todos os elementos da Equação 1, pode-se, variando o valor da profundidade z, estudar a retirada de água da cultura por meio da ET_c para camadas de solo de espessura arbitrária. Este procedimento, simples à primeira vista, é difícil, principalmente no que se refere às medidas do fluxo de água no solo, por depender do conhecimento detalhado das propriedades hídricas do perfil (CRUZ et al., 2005). A variabilidade dos parâmetros relacionados à condutividade hidráulica é um dos fatores que mais contribui para elevar os erros na estimativa da densidade de fluxo de um local para outro (ALLEN et al., 2011; NOURI et al., 2013; SILVA et al., 2007).

Evetts et al. (2012) destacam que a precipitação e a irrigação podem ser facilmente medidas, usando, por exemplo, estações meteorológicas e/ou medidores de chuva quando bem localizados e distribuídos. Para as mensurações de fluxos de água no solo, esses autores recomendam medidas para evitar possíveis erros: (i) arranjar as parcelas de modo que os fluxos laterais sejam pequenos como, por exemplo, evitar locais inclinados; (ii) incluir as chamadas “zonas tampões” entre as parcelas que receberão diferentes

quantidades de irrigação; (iii) evitar locais com lençol freático superficial; (iv) verificar o conteúdo de água profundamente (abaixo das zonas das raízes), de modo que as últimas medições ocorram em solo seco. Desse modo, haverá a garantia de que todo o processo de penetração da água oriunda da precipitação e da irrigação, bem como a absorção de água pelas raízes, estão ocorrendo em uma zona conhecida, que será usada no balanço.

Wilson et al. (2001) consideram como uma grande vantagem do método a simplicidade e o oferecimento de informações sobre a contribuição relativa das várias profundidades do sistema radicular na transpiração total. Contudo, a maior dificuldade encontrada no uso desse método é a medição de todos os termos da Equação 1. A necessidade de realização de algumas simplificações (Equação 2) tornam o método menos preciso (RANA et al., 2000).

$$P + I = ET_c \pm \Delta h_z \quad (02)$$

Também são limitações as imprecisões, que ocorrem devido à falta de uniformidade da irrigação, à imprecisão na calibração de sensores e ao desafio na seleção de pontos de amostragens apropriados (NOURI et al., 2013). Outra grande limitação, considerada fonte potencial de erro, está na drenagem da zona de amostragem ou nos possíveis movimentos ascendentes da água, a partir de uma zona inferior mais úmida até a zona amostrada (ALLEN et al., 2011).

4.3 Método da razão de Bowen - Balanço de energia (RBBE)

O método da razão de Bowen - Balanço de energia (RBBE) é considerado o mais apropriado para medições contínuas dos elementos micrometeorológicos e da ET_c sobre extensas superfícies homogêneas durante todo o ano (MALEK; BINGHAM,

1993). O RBBE é um método micrometeorológico que tem sido amplamente utilizado em várias condições de campo por diversos pesquisadores a fim de resolver a equação do balanço de energia sobre as culturas e, assim, obter a ETc (JIAO et al., 2018; UDDIN et al., 2013; ZHANG et al., 2008). Esse método representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície, constituindo-se, basicamente, na partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente e nos fluxos de calor sensível no ar e no solo (FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1991).

Bowen (1926), como pioneiro no estudo com balanço de energia, determinou que a razão entre os fluxos de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE) sobre uma superfície líquida, é função de um gradiente de temperatura e de pressão de vapor d'água, que ficou conhecida como razão de Bowen (β), conforme Equação 3.

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (03)$$

A Equação 3, é comumente escrita da seguinte forma (Equação 4):

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (04)$$

Em que: γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); ΔT - gradiente da temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e Δe - gradiente da pressão parcial do vapor d'água (kPa).

A determinação da ETc pelo método RBBE ocorre mediante a combinação da razão de Bowen (Equação 3) com a clássica equação simplificada do balanço de energia (Equação 5), conforme verifica-se na Equação 6.

$$R_n = LE + H + G \quad (05)$$

$$LE = -\left(\frac{+R_n + G}{1 + \beta}\right) \quad (06)$$

Em que: R_n - saldo de radiação (W m^{-2}); LE - fluxo de calor latente (W m^{-2}); H - fluxo de calor sensível (W m^{-2}) e G - fluxo de calor no solo (W m^{-2}).

O LE é convertido em evapotranspiração por meio da aplicação de sua relação com o calor latente de vaporização da água (ALLEN et al., 1998). A ampla utilização do RBBE deve-se a simplicidade de utilização, base teórica simples, robustez e exigências instrumentais relativamente modestas e a não necessidade de informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse. Além disso, permitem a integração do fluxo de calor latente sobre grandes áreas, permitem estimar os fluxos em escala fina de tempo (menos que uma hora) e fornecimento de medições contínuas (JIM; HE, 2010; WOLF et al., 2008), além da possibilidade de automatização (ALLEN et al., 2011) e a independência das condições do tempo para obter a ETc (PAUWELS; SAMSON, 2006).

A RBBE tem dois problemas: (i) a precisão da observação da temperatura do ar e a (ii) possibilidade de descontinuidade de dados quando a razão de Bowen se aproxima de -1 (MARUYAMA; ITO; TAKIMOTO, 2019). Somada a isso, tem-se a grande dependência da representatividade e da precisão de R_n e G para uma estimativa de ETc precisa, e a necessidade de utilizar algumas pressuposições (ALLEN et al., 2011; NOURI et al., 2013; PAUWELS; SAMSON, 2006).

4.4 Covariância de vórtices turbulentos (CVT)

A técnica de covariância de vórtices turbulentos (CVT) foi desenvolvida por Swinbank (1951) e vem sendo considerada a técnica mais aplicada para monitorar as trocas de gases do ecossistema (DUMORTIER et al., 2019) e da ETc em

nível de campo em superfícies homogêneas (MARUYAMA; ITO; TAKIMOTO, 2019; ROSA; TANNY, 2015; SIMMONS et al., 2007; UDDIN et al., 2013), porém é uma técnica micrometeorológica mais onerosa do que RBBE (ZHANG et al., 2009). Esta técnica determina as taxas de troca de CO₂, H₂O, CH₄, NO₂ e energia, calor sensível (H) e calor latente (LE), na interface entre a atmosfera e os ecossistemas, por meio da determinação da covariância entre as flutuações na velocidade vertical do vento e a taxa de mistura destes gases no ar. Tal mistura dos gases no ar é feita por turbilhões de vento, daí o nome covariância de vórtices turbulentos (ALFIERI et al., 2012; ALLEN et al., 2011; MORO et al., 2007).

A sua grande aplicabilidade pode ser justificada pelos diversos sistemas implantados em todo mundo pela rede FLUXNET (https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dataset_lister.pl?p=9) (MAAYA; CHEN; PRICE, 2008). A FLUXNET é uma rede global de locais de mais de 500 torres micrometeorológicas que usam métodos de CVT para medir as trocas de dióxido de carbono, vapor de água e energia entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. O objetivo principal da coleta de dados é fornecer informações para validar produtos de sensoriamento remoto para produtividade primária líquida, evaporação e absorção de energia (FALGE et al., 2017). As principais vantagens desta técnica são as medições em tempo real, em curtos intervalos de tempo. É um método não destrutivo, aplicável para grandes áreas e são sistemas automatizados (ALLEN et al., 2011; CONNAN et al., 2015; NOURI et al., 2013; SCHRIER-UIJL et al., 2010; WERLE, 2010).

Embora a técnica CVT seja de grande confiança, as desvantagens relacionadas a esta, são muitas. A sua aplicabilidade ao nível de propriedades agrícolas é limitada, principalmente devido ao elevado custo dos sensores, a complexidade da sua operação e a análise

intensiva de dados (ROSA; TANNY, 2015). Exige uma série de correções que muitas vezes não são bem definidas e muitas vezes empíricas, podem não registrar movimentos de turbilhões muito pequenos ou grandes. Assim, os erros no fechamento do balanço de energia podem variar de 10 a 30%, requer linhas de fluxo consistente e quase horizontal e a mudança na direção vertical das linhas de fluxo durante um período médio provoca grandes erros (ALLEN et al., 2011).

Outras desvantagens são a variabilidade espacial em condições atmosféricas e de superfície, que podem acontecer dentro da área de avaliação à medida que a mesma aumenta (ALFIERI et al., 2012). Há também erros associados a problemas instrumentais, fenômenos físicos e especificidades do terreno, como os cultivos esparsos, onde há relativamente uma alta contribuição da evaporação do solo (CAMMALLERI et al., 2013; FOKEN et al., 2006). Já Pauwels e Samson (2006) citam como desvantagem a formação de orvalho sobre os instrumentos durante a madrugada, o que torna os instrumentos não confiáveis, além do fato dos equipamentos não funcionarem corretamente sob precipitação.

4.5 Métodos de fluxo de seiva (MFS)

Os métodos de fluxo de seiva apresentam muitas aplicações nas áreas de horticultura, silvicultura e ecologia (TRCALA; CERMÁK, 2016). Nos últimos 15 anos eles se tornaram os métodos mais utilizados para estimar a transpiração de plantas em condições de campo para fins de pesquisa (POBLETE-ECHEVERRÍA et al., 2012). São conhecidos um total de cinco métodos para medição de fluxo de seiva (TRCALA; CERMÁK, 2016), sendo dois mais amplamente utilizados (DICKEN; COHEN; TANNY, 2013): (i) método de pulso térmico (COHEN; FUCHS; GREEN, 1981) e o método da sonda de dissipação

térmica ou simplesmente método de dissipação térmica (GRANIER, 1985).

O método de dissipação térmica (GRANIER, 1985) consiste em sondas termoelétricas que são inseridas no tronco para a medição do fluxo de seiva. Granier (1985) relacionou a velocidade de dissipação de calor aplicado pontualmente no tronco com a densidade de fluxo de seiva, sob o pressuposto de que a variação temporal da diferença de temperatura entre este ponto e um ponto abaixo dele é ocasionada pelo transporte convectivo de calor pela seiva. Portanto, no período de um dia a máxima diferença de temperatura entre os dois pontos de medida significa que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto a mínima diferença significa uma taxa máxima de fluxo de seiva através dessa seção de transporte (PINTO JÚNIOR et al., 2013; VELLAME et al., 2009).

A determinação precisa da área condutora de seiva no caule (área efetiva do xilema) se faz necessária para a estimativa da densidade de fluxo de seiva pelo MFS, já que a sonda de dissipação térmica determina a densidade de fluxo no local de inserção da sonda (PINTO JÚNIOR et al., 2013; VELLAME; COELHO FILHO; PAZ, 2009). As suas principais vantagens são a utilização de princípios físicos relativamente simples e a possibilidade de ser aplicado diretamente no campo, sem alterar as condições fisiológicas e microclimáticas da planta (DELGADO-ROJAS et al., 2007; PINTO JÚNIOR et al., 2013). A principal limitação surge da necessidade de medição da área de seção transversal do caule condutor de seiva, já que esta determinação somente é possível com a retirada de uma amostra do lenho ou a destruição total da planta para determinação da área efetiva do xilema, o que também é uma grande fonte de erro (PINTO JÚNIOR et al., 2013; VELLAME; COELHO FILHO; PAZ, 2009).

A taxa de fluxo de seiva no xilema de caules de planta pode ser quantificado

por meio da medição da velocidade de um pulso de calor introduzido na haste (KLUITENBERG; HAM, 2004), baseando-se no método de pulso térmico. O método criado por Cohen, Fuchs e Green (1981), por meio de dispositivos específicos, emite um breve pulso de calor dentro dos tecidos condutores de seiva. A partir da medida do tempo necessário para atingir um ponto situado a jusante da emissão, pode-se determinar a velocidade do fluxo de seiva (KLUITENBERG; HAM, 2004). Para calcular o fluxo total de seiva, é obrigatório o conhecimento da seção total de transporte da seiva. Por ser um procedimento que necessita da perfuração do xilema para colocação dos sensores, causando uma perturbação deste tecido condutor, as medidas de velocidade dos pulsos de calor devem ser corrigidas (FERNÁNDEZ et al., 2001; GONZÁLEZ-ALTOZANO et al., 2008).

Os MFS possibilitam acompanhar uma escala temporal de curtos intervalos o funcionamento hídrico das plantas no seu meio ambiente natural, durante períodos prolongados e de forma automática (DRAGONI; LAKSO; PICCIONI, 2005; MADURAPPERUMA et al., 2009; TRCALA; CERMÁK, 2014; VELLAME; COELHO FILHO; TOLENTINO, 2012).

As desvantagens estão na quantidade limitada de plantas monitoradas que representarão todo o cultivo, variabilidade entre plantas, instrumentação complexa e dispendiosa (GIORIO; GIORIO, 2003). Estes métodos também não consideram a evaporação de água do solo, pois determinam apenas a transpiração, podendo levar a grandes erros em áreas com altas frequências de irrigação e com pouca cobertura (DICKEN; COHEN; TANNY, 2013).

4.6 Sistema de câmaras (SC)

Reicosky e Peters (1977) foram os pioneiros em estudos com sistema de

câmaras (SC) para determinação de ETc. De acordo com Luo et al. (2018), o SC é um método promissor para determinar a ETc por ser portátil e aplicável em escala de parcela relativamente pequena. Este método realiza a medição dos fluxos de CO₂ e H₂O (BALOGH et al., 2007; BURKART et al., 2007; MÜLLER et al., 2009) para depois, utilizando o vapor de água, determinar a ETc. Os modelos de câmaras podem ser agrupados em três tipos principais (BEKKU et al., 1997): câmara de fluxo aberto, câmara semiaberta e câmara fechada. O primeiro baseia-se na diferença entre a concentração do ar externo e o ar que passa através da câmara. No segundo, amostras no interior da câmara são retiradas manualmente para análise em tempos definidos. No terceiro o gás circula através de tubos, passando por um analisador de gás e retorna para a câmara, isso traz a vantagem de ser facilmente automatizado (STEDUTO et al., 2002).

A determinação do consumo de água de uma cultura pelo método de SC se dá basicamente por meio do monitoramento das alterações da umidade de uma corrente de ar que circula no interior da câmara (CENTINARI et al., 2009). Atualmente, além da aplicação na determinação da ETc, esta técnica vem sendo aplicada fortemente no monitoramento de fluxos de CO₂ em diferentes ambientes (DOMYSHEVA et al., 2015; KANDEL; LAERKE; ELSGAARD, 2016; RIEDERER; SERAFIMOVICH; FOKEN, 2014).

Uma grande vantagem do SC é a determinação separadamente da transpiração e evaporação (HAMEL et al., 2015) e de permitir o monitoramento contínuo da resposta da planta ao longo das estações (STEDUTO et al., 2002). São muito úteis nas medições de campo, pois podem ser facilmente transportadas e adaptadas para pequenas parcelas, e podem ser movidas para tratamento para realizar comparações (CENTINARI et al., 2009). Em comparação com os métodos de fluxo

de seiva, que também são métodos com abordagem fisiológicas, os SC são menos propensos a erros sistemáticos, pois baseiam-se em alguns pressupostos verificáveis (DRAGONI; LAKSO; PICCIONI, 2005). Quando comparado aos métodos micrometeorológicos, o SC permite saber exatamente de onde vieram os fluxos, fornecem informações sobre a heterogeneidade fisiológica espacial da vegetação a custos menores (BALOGH et al., 2007).

A principal limitação do método é devida à radiação líquida e ao microclima no interior da câmara, que não são representativos das reais condições ocorrentes na parte externa, além da dificuldade de medições em altas taxas de fluxos (DRAGONI; LAKSO; PICCIONI, 2005; MCLEOD et al., 2004; MÜLLER et al., 2009), com a possibilidade de estagnação do vento no seu interior (STANNARD; WELTZ, 2006). Somado a isso, é uma técnica que pode ser aplicada somente a culturas de menor porte (BURKART; MANDERSCHIED; WEIGEL, 2007). Por fim, e, além disso, é limitada a pequenas áreas, as medições a longo prazo ou noturnas necessitam de um operador no local (HAMEL et al., 2015) e, também, há a possibilidade de estagnação do vento no seu interior (STANNARD; WELTZ, 2006).

4.7 Métodos baseados no coeficiente de cultura (MB_{Kc})

Primeiramente é importante deixar claro que os métodos baseados no coeficiente de cultura (MB_{Kc}) tem como um dos dados de entrada a evapotranspiração de referência (ET_o). A ET_o é definida como a evapotranspiração promovida por uma cultura hipotética que cobre todo o solo, em crescimento ativo, sem restrição hídrica ou nutricional, com altura média de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor de 70 s m⁻¹

¹ (ALLEN et al., 1998). O método definido como padrão para estimar a ETo é o Penman-Monteith (FAO-56).

As estimativas da ET_c utilizando os MB_{K_c} são as mais utilizadas e com sucesso para o manejo da água de irrigação em nível de campo (ALLEN; PEREIRA, 2009; KAMBLE; KILIC; HUBBARD, 2013; ZHANG et al., 2011). Por meio destes métodos, o consumo de água das culturas é estimado como uma fração da evapotranspiração de referência (ETo). As metodologias mais conhecidas são as descritas por Allen et al. (1998), ou seja, as abordagens do coeficiente de cultura único (Equação 7) e do coeficiente de cultura duplo (Equação 8). Além destas duas metodologias, existe a abordagem denominada de método FAO modificado (MFAO) (Equação 9) (MANTOVANI; COSTA, 1998; MANTOVANI et al., 2006).

$$ET_c = ETo \times K_c \quad (07)$$

$$ET_c = ETo \times (K_{cb} + K_e) \quad (08)$$

$$ET_c = ETo \times (K_c \times K_s) \times K_L \quad (09)$$

Em que: ETo - evapotranspiração de referência determinada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) (mm d⁻¹); K_c - coeficiente de cultura; K_{cb} - coeficiente de cultura basal; K_e - coeficiente de evaporação de água do solo; K_s - coeficiente de estresse hídrico, e K_L - fator de ajuste devido à aplicação localizada da água (KELLER; BLIESNER, 1990). Todos os coeficientes citados são adimensionais.

4.7.1 Coeficiente de cultura único (K_c_{único})

É mais aplicado em nível de campo do que a metodologia do coeficiente de cultura duplo (ODHIAMBO; IRMAK, 2012). Nesta abordagem, os efeitos de transpiração da cultura e evaporação da água do solo são integrados em único

coeficiente de cultura (K_c). É uma metodologia mais indicada para manejo de sistemas de irrigação mais simples, por exemplo, aqueles com baixa frequência de irrigação, onde os efeitos de evaporação de água são pouco relevantes, e também para desenvolvimento de cronogramas básicos de irrigação, estudo de balanço hídrico e hidrológico e para fins de projeto (ALLEN et al., 1998).

Como mencionado anteriormente, a ETo utilizada nesta metodologia é aquela determinada pelo método padrão de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). Porém, em muitos países os usuários só têm acesso aos dados meteorológicos para aplicar essa equação por meio de pagamentos (PEREIRA et al., 2015). No Brasil, o problema não é o custo, mas sim a indisponibilidade dos dados exigidos pelo método na maioria das estações meteorológicas (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015; PALARETTI; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2014). O resultado disso, é a recorrência a métodos mais simples, como o de Hargreaves e Samani (1985), por exemplo (PEREIRA et al., 2015).

Por outro lado, vale destacar que os usuários podem adquirir de forma gratuita os dados meteorológicos necessários ao cálculo da ETo por Penman-Monteith no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A limitação é que a quantidade de estações meteorológicas do INMET está muito aquém da dimensão territorial do Brasil, assim, apenas um percentual muito pequeno de locais podem usufruir destes dados. Com a era tecnológica consolidando-se na agricultura, estão chegando a este ambiente novas tecnologias, como por exemplo, o aplicativo para Smartphones Android chamado EVAPO, desenvolvido por Maldonado et al. (2019). Este aplicativo foi validado para estimar a ETo em tempo real pelo método de Penman-Monteith a partir de dados da NASA-POWER em qualquer

lugar do mundo, podendo ser uma ferramenta muito útil para contornar os problemas acima mencionados.

O outro componente da metodologia, o K_c , para a maioria das culturas agrícolas está disponível no Boletim da FAO-56, valores que representam os principais estádios fenológicos da cultura (ALLEN et al., 1998). Uma grande desvantagem destes K_c são as incertezas sobre estes coeficientes e necessidade de calibração quando aplicados em locais com condições climáticas e/ou sistemas de irrigação diferentes (YANG et al., 2016). Visando contornar essa situação de incertezas e a necessidade de calibração, muitos pesquisadores determinam valores de K_c para as condições climáticas, de cultivo, de sistema de irrigação no qual serão utilizados, o que pode ser verificado em trabalhos reportados na literatura científica (CHOUDHURY; SINGH; PRADHAN, 2016; HOWELL et al., 2015; MUNIANDY; YUSOP; ASKARI, 2016; YANG et al., 2016).

4.7.2. Coeficiente de cultura duplo ($K_{c\text{duplo}}$)

O método do coeficiente de cultura duplo realiza a divisão do K_c em dois componentes separados, um para a evaporação da água do solo, denominado de coeficiente de evaporação (K_e) e o outro para a transpiração da cultura, chamado de coeficiente de cultura basal (K_{cb}) (ALLEN et al., 1998, 2005).

O K_{cb} é definido como a razão entre a ET_c e a ET_o quando a superfície do solo está seca, e quando a transpiração não é limitada pela água. Portanto, o K_{cb} multiplicado pela ET_o representa principalmente o componente de transpiração. Assim como para os valores de $K_{c\text{único}}$, há valores listados para o K_{cb} no boletim FAO-56, porém, melhores resultados são obtidos realizando sua determinação dia a dia para as condições

locais, utilizando para isso valores de K_{cb} pré-determinados para cada estágio fenológico (inicial, médio e final), dados meteorológicos da umidade relativa e velocidade do vento e a altura da cultura (ALLEN et al., 1998).

A determinação do K_e , assim como para o K_{cb} , é feito dia a dia, para isso é necessário o conhecimento de dados de capacidade de campo, ponto de murcha, máximo valor de K_c , fração de cobertura do solo e profundidade da superfície sujeita a evaporação. O máximo valor de K_e ocorre quando o solo está úmido, ou seja, após algum evento de precipitação ou irrigação e, quando a superfície do solo está seca o K_e se torna muito pequeno ou até mesmo nulo (ALLEN et al., 1998, 2005).

A Equação 8, que descreve matematicamente a metodologia do coeficiente de cultura duplo, é aplicável para condições onde não há nenhuma ocorrência de deficiência hídrica, situação que dificilmente acontece na prática. Nesse sentido, há necessidade de corrigir a componente transpiração por meio da sua multiplicação por um coeficiente de estresse hídrico (K_s), conforme Equação 10.

$$ET_c = ET_o \times (K_{cb} \times K_s + K_e) \quad (10)$$

O K_s varia de 0 a 1 e depende do teor de água do solo da zona radicular. Uma descrição detalhada de todo o processo de obtenção do K_{cb} , K_e e K_s pode ser verificada em Allen et al. (1998, 2005). A abordagem do coeficiente de cultura duplo é mais precisa do que a abordagem simples, pois ela consegue realizar a separação dos componentes de evaporação e transpiração. É mais precisa ainda em cultivos que cobrem o solo parcialmente, pois o componente de evaporação tem grande participação na ET_c (ALLEN et al., 1998; COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2005; ROSA et al., 2012) em sistema de alta frequência de aplicação de água, como na

irrigação por gotejamento (HOWELL et al., 2004; TOLK; HOWELL, 2001) e em cultivos com presença de cobertura (MARTINS et al., 2013).

Quando comparada à abordagem do $K_{c\text{único}}$, é possível inferir que a limitação da abordagem do K_c duplo é a complexidade um pouco maior nos cálculos, já que são necessários dois balanços diários de água, um para a camada de evaporação do solo e outro para o solo explorado pelas raízes das culturas (PEREIRA et al., 2015; ROSA et al., 2012).

Odhiambo e Irmak (2012) destacam que o desempenho de ambos os métodos ($K_{c\text{único}}$ e $K_{c\text{duplo}}$) depende da seleção precisa de valores dos coeficientes representativos para cada um dos estádios fenológicos das culturas e da identificação dos comprimentos de cada fase de crescimento para as condições locais, além da estimativa precisa da E_{To} a partir de parâmetros climáticos.

4.7.3 Método FAO modificado (MFAO)

O método FAO modificado é considerado uma adaptação da Eq. 7 (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS; PRUITT, 1977). Essa metodologia foi divulgada pela primeira vez por Mantovani e Costa (1998), através do manual do software SISDA - Sistema de Suporte à Decisão Agrícola. A partir de então, vários pesquisadores vêm utilizando essa metodologia em suas pesquisas que envolvem a estimativa de E_{Tc} (MANTOVANI et al., 2013; SOARES et al., 2003; VENANCIO; CUNHA; MANTOVANI, 2016; SANTOS et al., 2018; SILVA et al., 2018; VICENTE et al., 2017; VIEIRA, MANTOVANI; SEDIYAMA, 2014).

Além disso, vale destacar que o MFAO tem sido aplicado com grande sucesso para estimativa de E_{Tc} em cultivos comerciais por meio da empresa IRRIGER. De acordo com os dados da empresa, este

método já foi utilizado na estimativa de E_{Tc} em mais de 2,5 milhões de hectares e atualmente é aplicado em aproximadamente 700 fazendas, distribuídas no Brasil, Paraguai, Argentina, Chile, Bolívia, Peru, Nicarágua, Venezuela, México, Estados Unidos, Nigéria, Sudão, Turquia, Ucrânia, Rússia e Laos (IRRIGER, 2019).

Sendo uma adaptação da metodologia do $K_{c\text{único}}$, os parâmetros E_{To} e K_c do MFAO são obtidos da mesma maneira. Dessa forma, segue abaixo a descrição dos coeficientes K_s e K_L que diferenciam as metodologias. O K_s é responsável por representar os efeitos do estresse hídrico do solo na E_{Tc} , para isso, ele é multiplicado pelo K_c . No método MFAO o K_s é calculado por meio da Eq. 11 (BERNARDO et al., 2019).

$$K_s = \frac{\ln(LAA + 1,0)}{\ln(CTA + 1,0)} \quad (11)$$

Em que: K_s - coeficiente de estresse hídrico (adimensional); \ln - logaritmo neperiano; CTA - capacidade total de água no solo (mm) e LAA - lâmina atual de água no solo (mm).

Com base na Eq. 11 observa-se que quando a LAA é igual a CTA , isto é, quando a umidade do solo está na capacidade de campo o valor de K_s é igual a unidade e a E_{Tc} não sofre efeito do déficit hídrico. Nesta situação, a magnitude da E_{Tc} é função apenas do tipo de cultura e principalmente das condições climáticas predominantes (E_{To}). Porém, à medida que o conteúdo de água no solo decresce (redução da LAA), o valor K_s se distancia da unidade no sentido decrescente e a E_{Tc} é reduzida. Em sistemas de irrigação com alta frequência de irrigação, tal como o gotejamento, o K_s tende a permanecer próximo a unidade. Já para sistemas de irrigação com um turno de rega mais esparsos (5 a 7 dias), como no caso da aspersão convencional, os valores de K_s são

mais distantes da unidade e próximos a zero.

Ao aplicar o método MFAO em sistemas de aplicação localizada (gotejamento, microaspersão, microjet e pivô de aplicação localizada) tem-se a necessidade de realizar correção da ETc. A correção é devido ao molhamento parcial da superfície do solo, levando há uma redução da componente evaporação e, consequentemente da ETc. Na metodologia MFAO, a correção é feita utilizando a Equação 12, proposta por Keller e Bliesner (1990).

$$K_L = 0,1\sqrt{P} \quad (12)$$

Em que: K_L - fator de ajuste devido à aplicação localizada da água (adimensional) e P - porcentagem de área molhada (PAM; %) ou porcentagem de área sombreada (PAS; %). Utiliza-se no cálculo do K_L , o maior valor entre as porcentagens.

As principais vantagens dessa metodologia são a simplicidade de aplicação e estimativas mais precisas da ETc. Essa última em comparação com abordagem do $K_{C\acute{u}nico}$ à medida que o conteúdo de água no solo se distancia da CC, em sistema com o turno de rega mais esparsa e em sistemas de aplicação de água localizada. Os pontos negativos são a limitação de uso em áreas com presença de *mulching* (cobertura do solo), onde apresenta resultados inconsistentes, bem como o pouco dinamismo dos coeficientes em comparação com o método do coeficiente de cultura duplo (MANTOVANI; COSTA, 1998; SOARES et al., 2003).

4.8 Modelos de balanço de energia na superfície baseada em dados de sensoriamento remoto (SR_{BE})

A estimativa de ETc a partir do balanço de energia na superfície utilizando

dados de sensoriamento remoto (SR) pode ser considerada uma forma de estimativa emergente perante as demais discutidas, com crescente aplicação nos últimos anos (BHATTARAI et al., 2016; DHUNGEL; BARBER, 2018; MAHMOUD; ALAZBA, 2016). A ideia principal destes métodos é estimar a ETc como resíduo da equação do balanço de energia (vide Equação 5).

Os principais modelos SR_{BE} o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998) e o *Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN; TASUMI; TREZZA, 2007). Outros menos conhecidos são o *Two-Source Energy Balance* - TSEB (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995), *Simplified Surface Energy Balance* - S-SEBI (ROERINK; SU; MENENTI, 2000) e o *Surface Energy Balance System* - SEBS (SU, 2002). A principal diferença entre estes métodos está no cálculo do fluxo de calor sensível (SANTOS; SILVA, 2010). Merecem destaque também, os modelos desenvolvidos e/ou validados para as condições brasileiras. Um deles é o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER), desenvolvido e validado para as condições semiáridas brasileiras, considerado de simples aplicação quando comparado aos modelos acima mencionados (TEIXEIRA, 2010). O outro é o *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) model (SENAY et al., 2013), parametrizado recentemente para a realidade morfoclimática do Brasil (ANA, 2020), com a vantagem de operar no sistema *Google Earth Engine* (GEE), onde facilmente se acessa os resultados.

As principais vantagens dos modelos de balanço de energia na superfície baseados em dados de SR, principalmente os orbitais, são a cobertura de grandes áreas, permitindo amostragem e integração ao longo delas. Os custos são geralmente mais baixos do que as medições pontuais e existe

a possibilidade de quantificar a variação espacial da ETc em áreas heterogêneas (ALLEN et al., 2011; NOURI et al., 2013).

As principais limitações são a baixa resolução temporal da maioria das imagens obtidas por sensores a bordo de satélites (ex.: imagens Landsat = 16 dias); os problemas com mistura espectral, ou seja, os dados de determinado pixel será o resultado da combinação de seus componentes (SHIMABUKURO et al., 1998); a necessidade de imagens livres da presença de nuvens (imagens orbitais); a necessidade de extrapolação dos dados para períodos maiores, com a utilização de métodos ou suposições, considerando que o dado obtido de ETc é instantâneo (ZHANG; KIMBALL; RUNNING, 2016).

4.9 Métodos de índices de vegetação calculados com dados de sensoriamento remoto (SR_{IV})

Os SR_{IV} são mais simples que os SR_{BE}, uma vez que os últimos exigem imagens de temperatura da superfície, juntamente com um nível de conhecimento relativamente elevado em física da radiação, o que impede que muitos profissionais apliquem tais técnicas (TASUMI; ALLEN; TREZZA, 2006). A ideia principal dos SR_{IV} é estimar o K_c ou K_{cb} a partir dos índices de vegetação (IV) (CAMPOS et al., 2017; KAMBLE; KILIC; HUBBARD, 2013; NEALE; BAUSCH; HEERMAN, 1989) e, posteriormente, calcular a ETc por meio das metodologias baseadas no coeficiente de cultura, anteriormente discutidas.

Os primeiros trabalhos voltados para obtenção da relação entre os índices de vegetação e o K_c surgiram no início dos anos 80, como é possível se observar no estudo realizado por Heilman, Heilman e Moore (1982). A partir de então, vários estudos têm relacionado os índices de vegetação com o coeficiente de cultura (KAMBLE; KILIC; HUBBARD, 2013;

PÔÇAS et al., 2015; RAMÍREZ-CUESTA et al., 2019; SINGH; IRMAK, 2009). Essas estimativas são possíveis porque tanto os coeficientes de cultura (K_c e K_{cb}) como a refletância espectral, são sensíveis ao índice de área foliar e à fração de cobertura do solo (CHOUDHURY et al., 1994; MORAN et al., 1995).

Embora simples, a precisão da estimativa da ETc por meio desta metodologia pode ser limitada, pois os IV não fornecem informações sobre a evaporação da água do solo (ALLEN et al., 2011; TASUMI; ALLEN; TREZZA, 2006). Allen et al. (2011) destacam que esta metodologia se torna mais precisa quando o K_{cb} é estimado, pois a transpiração tem uma relação maior com a vegetação e, conseqüentemente, com os IV. Assim, quando se opta por estimar o K_{cb}, as estimativas de evaporação do solo devem ser obtidas de forma separada.

As principais vantagens desta metodologia são a maior simplicidade de aplicação em comparação com os métodos que utilizam o balanço de energia por imagens de satélite, a viabilidade de se obter estimativas para grandes áreas e, também, a possibilidade de calibração por meio das técnicas de balanço energético. As desvantagens estão: na alta probabilidade de superestimação em condições de baixo conteúdo de água no solo; nas incertezas associadas à determinação da componente evaporação, considerando a sua baixa relação com os IV; e na dificuldade dos IV em identificar e quantificar os vários níveis de dossel, principalmente em vegetações densas (ALLEN et al., 2011).

5 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado uma revisão geral sobre os métodos de medição e estimativa da ETc, com foco naqueles aplicados às pesquisas científicas e na agricultura. Conceitualmente, a

evapotranspiração de cultura é um parâmetro simples, pois é o somatório da transpiração da planta com a evaporação da água do solo. Entretanto, para a sua medição e/ou estimativa, ainda são encontradas várias dificuldades na prática, o que justifica o constante aprimoramento de técnicas consagradas e o surgimento de novas outras, visando encontrar uma forma que combine praticidade e precisão.

A escolha da técnica para medir ou estimar a ETc dependerá principalmente do objetivo e do custo de sua implantação. Para fins de pesquisa no campo em áreas homogêneas, a técnica de CVT vem sendo a mais aplicada, enquanto, para o manejo da irrigação em nível de propriedade agrícola, destacam-se o método do $K_{c\acute{u}nico}$ e $K_{c\acute{d}uplo}$ e o método MFAO, especialmente no Brasil.

A utilização dos SR_{BE} e SR_{IV} estimados a partir de imagens de sensoriamento remoto (orbital ou terrestre) está em grande crescimento nos últimos anos, impulsionados principalmente pela necessidade de se praticar uma irrigação mais eficiente e pela era digital que a agricultura está vivendo. Ainda existem dificuldades relacionadas aos dados provenientes de sensores orbitais que dificilmente aliam altas resoluções temporal e espacial, combinação

necessárias para um manejo mais efetivo da irrigação. Mesmo assim, são utilizadas atualmente com o objetivo de monitoramento do consumo hídrico e detecção de variabilidade espacial da ETc nas áreas agrícolas.

Por fim, as perspectivas futuras apontam para uma maior inserção de metodologias que utilizam inteligência artificial combinadas com dados de sensoriamento remoto, principalmente aqueles adquiridos com os VANT's, para estimativa de ETc. Além disso, a disponibilidade de novas tecnologias com custos mais acessíveis, tal como os sensores de umidade do solo, permitirá um manejo mais preciso da irrigação através da associação do monitoramento da umidade do solo com as estimativas de ETc.

6 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão da bolsa de estudos ao primeiro autor.

7 REFERÊNCIAS

- ABDOU, H. M.; FLURY, M. Simulation of water flow and solute transport in free - drainage lysimeters and field soils with heterogeneous structures. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 55, n. 2, p. 229-241, 2004.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015.
- ALFIERI, J. G.; KUSTAS, W. P.; PRUEGER, O. H.; HIPPS, L. E.; EVETT, S. R.; BASARA, J. B.; NEALE, C. M. U.; FRENCH, A. N.; COLAIZZI, P.; AGAMH, N.; COSH, M. H.; CHAVEZ, J. L.; HOWELL, T. A. On the discrepancy between eddy covariance and lysimetry-based surface flux measurements under strongly advective conditions. **Advances in Water Resources**, New York, v. 50, p. 62-78, 2012.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 28, n. 1, p. 17-34, 2009.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 6, p. 899-920, 2011.

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

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J. L. FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 131, n.1, p. 2-13, 2005.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) - Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. 1. ed. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2020. 41p.

ANAPALLI, S. S.; AHUJA, L. R.; GOWDA, P. H.; MA, L.; MAREK, G.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 177, p. 274-283, 2016.

BALOGH, J.; NAGY, Z.; FÓTI, S.; PINTÉR, K.; CZÓBEL, S.; PÉLI, E. R.; ACOSTA, M.; MAREK, M. V.; CSINTALAN, Z.; TUBA, Z. Comparison of CO₂ and H₂O fluxes over grassland vegetations measured by the eddy-covariance technique and by open system chamber. **Photosynthetica**, Heidelberg, v. 45, n. 2, p. 288-292, 2007.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUMA, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINKA, G. J.; WALA, T. V. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 212-213, n. 1-4, p. 198-212, 1998.

BEKKU, Y.; KOIZUMI, H.; OIKAWA, T.; IWAKI, H. Examination of four methods for measuring soil respiration. **Applied Soil Ecology**, London, v. 5, n. 3, p. 247-254, 1997.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019. 545p.

BHATTARAI, N.; SHAW, S. B.; QUACKENBUSH, L. J.; IM, J.; NIRLAULA, R. Evaluating five remote sensing based single-source surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in a humid subtropical climate. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 49, p. 75-86, 2016.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v. 27, n. 6, p. 779-787, 1926.

BURKART, S.; MANDERSCHIED, R.; WEIGEL, H. J. Design and performance of a portable gas exchange chamber system for CO₂- and H₂O-flux measurements in crop canopies. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 61, n. 1, p. 25-34, 2007.

CAMMALLERI, C.; RALLO, G.; AGNESE, C.; CIRAULO, G.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Combined use of eddy covariance and sap flow techniques for partition of ET fluxes and water stress assessment in an irrigated olive orchard. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 120, n. 1, p. 89-97, 2013.

CAMPECHE, L. F. M. S.; NETTO, A. O. A.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. A large-scale weighting lysimeter. Part I: Development and calibration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 519-525, 2011.

CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. J.; GONÇALVES, I. Z. Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 187, p. 140-153, 2017.

CASTELLVÍ, F.; SNYDER, R. L. A comparison between latent heat fluxes over grass using a weighing lysimeter and surface renewal analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 381, n. 3-4, p. 213-220, 2010.

CENTINARI, M.; PONI, S.; FILIPPETTI, I.; MAGNANINI, E.; INTRIERI, C. Evaluation of an open portable chamber system for measuring cover crop water use in a vineyard and comparison with a mini-lysimeter approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, London, v. 149, n. 11, p. 1975-1982, 2009.

CHOUDHURY, B. J.; AHMED, N. U.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; DAUGHTRY, C. S.T. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. **Remote Sensing Environment**, New York, v. 50, n. 1, p. 1-17, 1994.

CHOUDHURY, B. U.; SINGH, A. K.; PRADHAN, S. Estimation of crop coefficients of dry-seeded irrigated rice-wheat rotation on raised beds by field water balance method in the Indo-Gangetic plains, India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 123, p. 20-31, 2016.

COHEN, Y.; FUCHS, M.; GREEN, G. C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 4, n. 1, p. 391-397, 1981.

CONNAN, O.; MARO, D.; HÉBERT, D.; OLIER, L.; IDEAS, P. C.; LAGUIONIE, P.; ST-AMANT, N. In situ measurements of tritium evapotranspiration (³H-ET) flux over grass and soil using the gradient and eddy covariance experimental methods and the FAO-56 model.

Journal of Environmental Radioactivity, Essex, v. 148, p. 1-9, 2015.

CONSOLI, S.; VANELLA, D. Mapping crop evapotranspiration by integrating vegetation indices into a soil water balance model. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 143, p. 71-81, 2014.

COSTA, J. de O.; COELHO, R. D.; WOLFF, W.; JOSÉ, J. V.; FOLEGATTI, M. V.; FERRAZ, S. F. de B. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 76, n. 2, p. 93-101, 2018.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage Systems**, Amsterdam, v. 19, n. 3-4, p. 223-249, 2005.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review to estimate Evapotranspiration from remote sensing data: some examples from the simplified relationship to the use of mesoscale atmospheric models. In: ICID Workshop on Remote Sensing of et for Large Regions, 2003. **Proceedings...** 2003, v. 17, p. 1-18.

CRUZ, A. C. R.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A.; ROCHA, G. C. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 1-10, 2005.

DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; FILHO, M. A. C. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 404-413, 2007.

DHUNGEL, S.; BARBER, M. E. Estimating calibration variability in evapotranspiration derived from a satellite-based energy balance model. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, n. 11, p. 1-25, 2018.

DICKEN, U.; COHEN, S.; TANNY, J. Examination of the Bowen ratio energy balance technique for evapotranspiration estimates in screenhouses. **Biosystems Engineering**, London, v. 114, n. 4, p. 397-405, 2013.

DIETRICH, O.; FAHLE, M.; SEYFARTH, M. Behavior of water balance components at sites with shallow groundwater tables: Possibilities and limitations of their simulation using different ways to control weighable groundwater lysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 163, p. 75-89, 2016.

DING, R.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, Y.; TONG, L. Evapotranspiration measurement and estimation using modified Priestley-Taylor model in an irrigated maize field with mulching. **Agricultural and Forest Meteorology**, London, v. 168, n. 1, p. 140-148, 2013.

DOMYSHEVA, V. M.; PESTUNOV, D. A.; SAKIRKO, M. V.; SHAMRIN, A. M.; PANCHENKO, M. V. Estimation of CO₂ fluxes in the “atmosphere–water” system in the south Lake Baikal littoral with the floating chamber method. **Atmospheric and Oceanic Optics**, Moscow, v. 28, n. 6, p. 543-550, 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO Irrigation and Drainage, 24).

DRAGONI, D.; LAKSO, A. N.; PICCIONI, R. M. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers. **Agricultural and Forest Meteorology**, London, v. 130, n. 1-2, p. 85-94, 2005.

DUMORTIER, P.; AUBINET, M.; LEBEAU, F.; NAIKEN, A.; HEINESCH, B. Point source emission estimation using eddy covariance: Validation using an artificial source experiment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 266-267, n. 8, p. 148-156, 2019.

EVETT, S. R.; SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J.; HENG, L. K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 104, p. 1-9, 2012.

FALGE, E.; AUBINET, M.; BAKWIN, P. S.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; BLACK, T. A.; CEULEMANS, R.; DAVIS, K. J.; DOLMAN, A. J.; GOLDSTEIN, A.; GOULDEN, M. L.; GRANIER, A.; HOLLINGER, D. Y.; JARVIS, P. G.; JENSEN, N.; PILEGAARD, K.; KATUL, G.; KYAW THA PAW, P.; LAW, B. E.; LINDROTH, A.; LOUSTAU, D.; MAHLI, Y.; MONSON, R.; MONCRIEFF, P.; MOORS, E.; MUNGER, J. W.; MEYERS, T.; OECHEL, W.; SCHULZE, E.-D.; THORGEIRSSON, H.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. B.; VESALA, T.; WOFSY, S. C. **FLUXNET Research Network Site Characteristics, Investigators, and Bibliography**, 2016, ORNL Distributed Active Archive Center, 2017. Disponível em: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1530. Acesso em: 31 ago. 2019.

FARG, E.; ARAFAT, S. M.; ABD EL-WAHED, M. S.; EL-GINDY, A. M. Estimation of Evapotranspiration ETc and Crop Coefficient Kc of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, Egito, v. 15, n. 1, p. 83-89, 2012.

FERNÁNDEZ, J. E.; PALOMOA, M. J.; DÍAZ-ESPEJOA, A.; CLOTHIER, B. E.; GREEN, S. R.; GIRÓN, I. F.; MORENO, F. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation : tests , root flow and diagnostics of water stress. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 51, n. 2, p. 99-123, 2001.

FOKEN, T.; WIMMER, F.; MAUDER, M.; THOMAS, C.; LIEBETHAL, C. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, Oxford, v. 6, n. 2, p. 3381-3402, 2006.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991.

GIORIO, P.; GIORIO, G. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 49, n. 1, p. 9-20, 2003.

- GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; PAVEL, E. W.; ONCINS, J. A.; DOLTRA, J.; COHEN, M.; GONZA, P.; PAÇO, T.; MASSAI, R.; CASTEL, J. R. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. **Agricultural and Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 5, p. 503-515, 2008.
- GRANIER, A. Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. **Annales Sciences Forestieres**, New York, v. 42, n. 2, p. 193-200, 1985.
- HAGENAU, J.; MEISSNER, R.; BORG, H. Effect of exposure on the water balance of two identical lysimeters. **Journal of Hydrology**, New York, v. 520, p. 69-74, 2015.
- HAMEL, P.; MCHUGH, I.; COUTTS, A.; DALY, E.; BERINGER, J.; FLETCHER, T. D. Automated chamber system to measure field evapotranspiration rates. **Journal of Hydrologic Engineering**, New York, v. 20, n. 2, p. 1-7, 2015.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.
- HEILMAN, J. L., HEILMAN, W. E., MOORE, D. G. Evaluating the crop coefficient using spectrals reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, 967-971, 1982.
- HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Transactions, American Geophysical Union**, Washington, v.14, p. 446-460, 1933.
- HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; COPELAND, K. S.; MAREK, T. H. Evapotranspiration, water productivity and crop coefficients for irrigated sunflower in the U.S. Southern High Plains. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 162, p. 33-46, 2015.
- HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; SCHNEIDER, A. D. Evapotranspiration of full, deficit-irrigated, and dryland cotton on the Northern Texas High Plains. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 130, n. 4, p. 277-285, 2004.
- IRRIGER - GERENCIAMENTO E ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO - Uma empresa do grupo Valmont. **IRRIGER Quem Somos**. 2019. Disponível em: <http://www.irriger.com.br/pt-BR/>. Acesso em: 31 ago. 2019.
- JIAO, L.; DING, R.; KANG, S.; DU, T.; TONG, L.; LI, S. A comparison of energy partitioning and evapotranspiration over closed maize and sparse grapevine canopies in northwest China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 203, p. 251-260, 2018.
- JIM, C. Y.; HE, H. Coupling heat flux dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem. **Ecological Engineering**, New York, v. 36, n. 8, p. 1052-1063, 2010.
- KAMBLE, B.; KILIC, A.; HUBBARD, K. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 4, p. 1588-1602, 2013.

KANDEL, T. P.; LAERKE, P. E.; ELSGAARD, L. Effect of chamber enclosure time on soil respiration flux: A comparison of linear and non-linear flux calculation methods. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 141, p. 245-254, 2016.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinold, 1990. 652 p.

KLAMMLER, G.; FANK, J. Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria). **Science of the Total Environment**, New York, v. 499, p. 448-462, 2014.

KLUITENBERG, G. J.; HAM, J. M. Improved theory for calculating sap flow with the heat pulse method. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 126, n. 1-2, p. 169-173, 2004.

LI, Z. L.; TANG, R.; WAN, Z.; BI, Y.; ZHOU, C.; TANG, B.; YAN, G.; ZHANG, X. A review of current methodologies for regional Evapotranspiration estimation from remotely sensed data. **Sensors**, Basel, v. 9, n. 5, p. 3801-3853, 2009.

LIU, Y. A.; KAR, S. K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review. **Energies**, Basel, v. 7, n. 5, p. 2821-2849, 2014.

LIU, S. M.; XU, Z. W.; ZHU, Z. L.; JIA, Z. Z.; ZHU, M. J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 487, p. 24-38, 2013.

LIU, Z.; CHEN, H.; HUO, Z.; WANG, F.; SHOCK, C. C. Analysis of the contribution of groundwater to evapotranspiration in an arid irrigation district with shallow water table. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 171, p. 131-141, 2016.

LUO, C.; WANG, Z.; SAUER, T. J.; HELMERS, M. J.; HORTON, R. Portable canopy chamber measurements of evapotranspiration in corn, soybean, and reconstructed prairie. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 198, p. 1-9, 2018.

MA, Y.; FENG, S.; SONG, X. A root zone model for estimating soil water balance and crop yield responses to deficit irrigation in the North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 127, p. 13-24, 2013.

MADURAPPERUMA, W. S.; BLEBY, T. M.; BURGESS, S. S. O. Evaluation of sap flow methods to determine water use by cultivated palms. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 66, p. 372-380, 2009.

MAHMOUD, S. H.; ALAZBA, A. A. A coupled remote sensing and the Surface Energy Balance based algorithms to estimate actual evapotranspiration over the western and southern regions of Saudi Arabia. **Journal of Asian Earth Sciences**, Hong Kong, v. 124, p. 269-283, 2016.

MALDONADO, W.; VALERIANO, T. T. B.; ROLIM, G. S. EVAPO: A smartphone

application to estimate potential evapotranspiration using cloud gridded meteorological data from NASA-POWER system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 156, p. 187-192, 2019.

MALEK, E.; BINGHAM, G. E. Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 146, n. 1-4, p. 209-220, 1993.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação Princípios e Métodos**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 318 p.

MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C. Manual do SISDA 2.0. In: Workshop Internacional sobre Manejo Integrado das Culturas e Recursos Hídricos, 1998, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: UFV, 1998. 153p.

MANTOVANI, E. C.; DELAZARI, F. T.; DIAS, L. E.; ASSIS, I. R.; VIEIRA, G. H. S.; LANDIM, F. M. Eficiência no uso da água de duas cultivares de batata-doce em resposta a diferentes lâminas de irrigação. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 31, n. 4, p. 602-606, 2013.

MARTINS, J. D.; RODRIGUES, G. C.; PAREDE, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 115, n. 3, p. 291-310, 2013.

MARUYAMA, T.; ITO, K.; TAKIMOTO, H. Abnormal data rejection range in the Bowen ratio and inverse analysis methods for estimating evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 269-270, p. 323-334, 2019.

MCLEOD, M. K.; DANIEL, H.; FAULKNER, R.; MURISON, R. Evaluation of an enclosed portable chamber to measure crop and pasture actual evapotranspiration at small scale. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 15-34, 2004.

MORAN, M. S.; MASS, S. J.; PINTER JUNIOR, P. J. Combining remote sensing and modelling for estimating surface evaporation and biomass production. **Remote Sensing Reviews**, Basel, v. 12, n. 3-4, p. 335-353, 1995.

MORO, M. J.; WERE, A.; VILLAGARCÍA, L.; CANTÓN, Y.; DOMINGO, F. Dew measurement by Eddy covariance and wetness sensor in a semiarid ecosystem of SE Spain. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 335, n. 3-4, p. 295-302, 2007.

MÜLLER, J.; ESCHENRÖDER, A.; DIEPENBROCK, W. Through-flow chamber CO₂/H₂O canopy gas exchange system-Construction, microclimate, errors, and measurements in a barley (*Hordeum vulgare* L.) field. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 2, p. 214-229, 2009.

MUNIANDY, J. M.; YUSOP, Z.; ASKARI, M. Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum*

annuum. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 169, p. 77-89, 2016.

NEALE, C. M. U.; BAUSCH, W. C.; HEERMAN, D. F. Development of reflectance -based crop coefficients for corn. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 32, n. 6, p. 1891-1899, 1989.

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 77, n. 3-4, p. 263-293, 1995.

NOURI, H.; BEECHAM, S.; KAZEMI, F.; HASSANLI, M. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. **Urban Water Journal**, Amsterdam, v. 10, n. 4, p. 247-259, 2013.

ODHIAMBO, L. O.; IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface residue cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 104, p. 221-234, 2012.

PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões Citrícola paulistas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 38-47, 2014.

PAUWELS, V. R. N.; SAMSON, R. Comparison of different methods to measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 82, n. 1-2, p. 1-24, 2006.

PAYERO, J. O.; IRMAK, S. Construction, installation, and performance of two repacked weighing lysimeters. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 26, n. 2, p. 191-202, 2008.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 147, p. 4-20, 2015.

PINTO JÚNIOR, O. B.; VOURLITIS, G. L.; SANCHES, L.; DALMAGRO, H. J.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S. Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em floresta de transição Amazônica-Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 3, p. 268-274, 2013.

PIOUCEAU, J.; PANFILI, F.; BOIS, G.; ANASTASE, M.; DUFOSSÉ, L.; ARFI, V. Actual evapotranspiration and crop coefficients for five species of three-year-old bamboo plants under a tropical climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 137, p. 15-22, 2014.

POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; ORTEGA-FARIASA, S.; ZUÑIGAA, M.; FUENTES, S. Evaluation of compensated heat-pulse velocity method to determine vine transpiration using combined measurements of eddy covariance system and microlysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 109, p. 11-19, 2012.

PÔÇAS, I.; PAÇO, T. A.; PAREDES, P.; CUNHA, M.; PEREIRA, L. S. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. **Remote Sensing**, Basel, v. 7, n. 3, p. 2373-2400, 2015.

RAMÍREZ-CUESTA, J. M.; MIRÁS-AVALOS, J. M.; RUBIO-ASENSIO, J. S.; INTRIGLILOLO, D. S. A novel ArcGIS toolbox for estimating crop water demands by integrating the dual crop coefficient approach with multi-satellite imagery. **Water**, Basel, v. 11, n. 1, 2019.

RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the eld under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Montrouge, v. 13, n. 2-3, p. 125-153, 2000.

REICOSKY, D. C.; PETERS, D. B. A portable chamber for rapid evapotranspiration measurements on field plots. **Agronomy journal**, Madison, v. 69, n. 4, p. 729-732, 1977.

RIEDERER, M.; SERAFIMOVICH, A.; FOKEN, T. Net ecosystem CO₂ exchange measurements by the closed chamber method and the eddy covariance technique and their dependence on atmospheric conditions. **Atmospheric Measurement Techniques**, Katlenburg-Lindau, v. 7, n. 4, p. 1057-1064, 2014.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, Bristol, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

ROSA, R. D.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G. C.; ALVES, I.; FERNANDO, R. M.; PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 103, p. 8-24, 2012.

ROSA, R.; TANNY, J. Surface renewal and eddy covariance measurements of sensible and latent heat fluxes of cotton during two growing seasons. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 136, p. 149-161, 2015.

RUIZ-PEÑALVER, L.; VERA-REPULLO, J. A.; JIMÉNEZ-BUENDÍA, M. GUZMÁN, I.; MOLINA-MARTÍNEZ, J. M. Development of an innovative low cost weighing lysimeter for potted plants: Application in lysimetric stations. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 151, p. 103-113, 2015.

SÁNCHEZ, J. M.; LÓPEZ-URREA, R.; VALENTÍN, F.; CASELLES, V.; GALVE, J. M. Lysimeter assessment of the Simplified Two-Source Energy Balance model and eddy covariance system to estimate vineyard evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 274, p. 172-183, 2019.

SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 25, n. 3, p. 365-374, 2010.

SANTOS, O. F.; CUNHA, F. F.; TAIRA, T. L.; SOUZA, E. J.; LEAL, A. J. F. Increase in pea productivity associated with irrigation management. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 36, n. 2, p. 178-183, 2018.

SCHRIER-UIJL, A. P.; KROON, P. S.; HENSEN, A.; LEFFELAAR, P. A.; BERENDSE, F.; VEENENDAAL, E. M. Comparison of chamber and eddy covariance-based CO₂ and CH₄ emission estimates in a heterogeneous grass ecosystem on peat. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, n. 6, p. 825-831, 2010.

SENAY, G.B.; BOHMS, S.; SINGH, R.K.; GOWDA, P.H.; VELPURI, N.M.; ALEMU, H., VERDIN, J.P. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. **Journal of the American Water Resources Association**, Woodbridge, v. 49, n. 3, p. 577-591, 2013.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, n. 2, p. 1729-1737, 1998.

SILVA, A. L.; REICHARDT, K.; ROVERATTI, R.; BACCHI, O. O. S.; TIMM, L. C.; OLIVEIRA, J. C. M.; DOURADO-NETO, D. On the use of soil hydraulic conductivity functions in the field. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 162-170, 2007.

SILVA, G. H.; FERREIRA, M. G.; PEREIRA, S. B.; DELAZARI, F. T.; SILVA, D. J. H. DA. Response of bell pepper crop subjected to irrigation depths calculated by different methodologies. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 1, p. 45-50, 2018.

SIMMONS, L. J.; WANG, J. SAMMIS, T. W.; MILLER, D. R. An evaluation of two inexpensive energy-balance techniques for measuring water use in flood-irrigated pecans (*Carya illinoensis*). **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 88, n. 1-3, p. 181-191, 2007.

SINGH, R. K.; IRMAK, A. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 135, n. 5, p. 597-608, 2009.

SOARES, A. A.; BORGES, H. B.; MEDEIROS, S. S.; MANTOVANI, E. C.; COSTA, L. C.; GUIMARAES, J. C. Manejo da irrigação utilizando o SISDA (Sistema de Suporte à Decisão Agrícola). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 450-459, 2003.

STANNARD, D. I.; WELTZ, M. A. Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. **Water Resources Research**, Hoboken, v. 42, n. 2, p. 1-13, 2006.

STEDUTO, P.; ÇETINKÖKÜ, Ö.; ALBRIZIO, R.; KANBER, R. Automated closed-system canopy-chamber for continuous field-crop monitoring of CO₂ and H₂O fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 111, n. 3, p. 171-186, 2002.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Karlsruhe, v. 6, n. 1, p. 85-99, 2002.

SWINBANK, W. C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, Boston, v. 8, n. 3, p. 135-145, 1951.

TASUMI, M.; ALLEN, R. G.; TREZZA, R. Calibrating satellite-based vegetation indices to estimate evapotranspiration and crop coefficients. In: Proceedings of the 2006 USCID water management conference, ground water and surface water under stress: competition, interaction, solutions, Denver. **Proceedings...** Denver, USA: USCID, 2006. p. 103-112.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TOLK, J. A.; HOWELL, T. A. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1553-1558, 2001.

TRCALA, M.; CERMÁK, J. A new heat balance equation for sap flow calculation during continuous linear heating in tree sapwood. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 102, p. 532-538, 2016.

TRCALA, M.; CERMÁK, J. Nonlinear finite element analysis of thermal inertia in heat-balance sap flow measurement. **International Journal of Thermal Sciences**, Paris, v. 76, p. 200-207, 2014.

UDDIN, J.; HANCOCK, N. H.; SMITH, R. J.; FOLEY, J. P. Measurement of evapotranspiration during sprinkler irrigation using a precision energy budget (Bowen ratio, eddy covariance) methodology. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 116, p. 89-100, 2013.

VALIPOUR, M. Temperature analysis of reference evapotranspiration models. **Meteorological Applications**, Amsterdam, v. 22, n. 3, p. 385-394, 2015.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 516-523, 2009.

VELLAME, L. M.; COELHO, R. D.; TOLENTINO, J. B. Transpiração de plantas jovens de laranja “valência” sob porta-enxerto limão “cravo” e citrumelo “swingle” em dois tipos de solo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 24-32, 2012.

VENANCIO, L. P.; CUNHA, F. F.; MANTOVANI, E. C. Demanda hídrica do cafeeiro conilon irrigado por diferentes sistemas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.10, n. 4, p. 767 - 776, 2016.

VERA, J.; MOUNZER, O.; RUIZ-SÁNCHEZ, M. C.; ABRISQUETA, I.; TAPIA, L. M.;

ABRISQUETA, J. M. Soil water balance trial involving capacitance and neutron probe measurements. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 6, p. 905-911, 2009.

VICENTE, M. R.; MANTOVANI, E. C.; FERNANDES, A. L. T.; NEVES, J. C. L.; FIGUEREDO, E. M.; DELAZARI, F. T. Spacial distribution of fertigated coffee root system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, n. 1, p. 72-80, 2017.

VIEIRA, G. H. S., MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Produtividade e rendimento industrial da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 3, p. 55-64, 2014.

WANG, S.; PAN, M.; MU, Q.; SHI, X.; MAO, J.; BRÜMMER, C.; JASSAL, R. S.; KRISHNAN, P.; LI, J.; BLACK, T. A. Comparing evapotranspiration from eddy covariance measurements, water budgets, remote sensing, and land surface models over Canada. **Journal of Hydrometeorology**, Boston, v. 16, n. 4, p. 1540-1559, 2015.

WERLE, P. Time domain characterization of micrometeorological data based on a two sample variance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 150, n. 6, p. 832-840, 2010.

WILSON, K. B.; HANSON, P. J.; MULHOLLAND, P. J.; BALDOCCHI, D. D.; WULLSCHLEGER, S. D. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: Sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, n. 2, p. 153-168, 2001.

WOLF, A.; SALIENDRA, N.; AKSHALOV, K.; JOHNSON, D. A.; LACA, E. Effects of different eddy covariance correction schemes on energy balance closure and comparisons with the modified Bowen ratio system. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 6-7, p. 942-952, 2008.

XU, C. Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717-3734, 2005.

YANG, F.; ZHANG, Q.; WANG, R.; ZHOU, J. Evapotranspiration measurement and crop coefficient estimation over a spring wheat farmland ecosystem in the Loess Plateau. **PLoS ONE**, San Francisco, v. 9, n. 6, p. 1-8, 2014.

YANG, P.; HU, H.; TIAN, F.; ZHANG, Z.; DAI, CHAO. Crop coefficient for cotton under plastic mulch and drip irrigation based on eddy covariance observation in an arid area of northwestern China. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 171, p. 21-30, 2016.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 148, n. 10, p. 1629-1640, 2008.

ZHANG, B.; KANG, S.; ZHANG, L.; TONG, L.; DU, T.; LI, F.; ZHANG, J. An evapotranspiration model for sparsely vegetated canopies under partial root-zone irrigation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 149, n. 11, p. 2007-2011, 2009.

ZHANG, K.; HILTON, H. W.; GREENWOOD, D. J.; THOMPSON, A. J. A rigorous approach of determining FAO56 dual crop coefficient using soil sensor measurements and inverse modeling techniques. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, n. 6, p. 1081-1090, 2011.

ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, Hoboken, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.

ZHAO, T.; WANG, Q. J.; SCHEPEN, A. A Bayesian modelling approach to forecasting short-term reference crop evapotranspiration from GCM outputs. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 269-270, p. 88-101, 2019.