



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Maiara Tatiane de Lima Silva

Serra Talhada – PE

2019

Maiara Tatiane de Lima Silva

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Monografia apresentada à
Universidade Federal Rural de
Pernambuco (UFRPE) - Unidade
Acadêmica de Serra Talhada (UAST),
como requisito parcial para obtenção
do título de Bacharel em Agronomia.

Serra Talhada – PE

2019

Autorizo com base no disposto na **Lei Federal nº 9.610**, de 19 de fevereiro de 1998 e na **Lei nº 10.973**, de 2 de dezembro de 2004, a Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST) disponibilizar, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, a publicação eletrônica desta monografia, “AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO”, de minha autoria, para fins de leitura e/ou download a título de divulgação da produção científica gerada pela Universidade.

Assinatura

Data

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca da UAST, Serra Talhada - PE, Brasil.

S586a Silva, Maiara Tatiane Lima

Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região do vale do São Francisco / Maiara Tatiane Lima Silva. – Serra Talhada, 2019.

42 f.: il.

Orientadora: Luciana Sandra Bastos de Souza

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco. Unidade Acadêmica de Serra Talhada, 2019.

Inclui referências.

1. Evapotranspiração. 2. Semiárido brasileiro. 3. Irrigação agrícola. I. Souza, Luciana Sandra Bastos de, orient. II. Título.

CDD 630

Maiara Tatiane de Lima Silva

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) - Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Aprovada em _____ de _____ de 2019.

Banca Examinadora

Dr^a Luciana Sandra Bastos de Souza
(Orientadora, UAST/UFRPE)

MSc. José Francisco da Cruz Neto
(Examinador externo, UFRPE)

Dr. Thieres George Freire da Silva
(Examinador interno, UAST/UFRPE)

Serra Talhada – PE
2019

Dedico este trabalho aos inesquecíveis, *In memoriam*, que mesmo sem estar, me deram força e vontade de concluir mais uma etapa. À Dagui, minha professora mais memorável, D. Creuza, a avó mais orgulhosa que alguém poderia ter, e ao pequeno Igor, minha estrelinha.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Aquele para quem o impossível não existe, que permitiu cada amanhecer nessa caminhada e que em nada me deixou só.

A Millena, minha irmã e companhia de vida, meu apoio e refugio.

Aos meus pais, Gilberto e Helena, eles que abriram mão de muitas vontades, para que as nossas prevalecessem, meu norte.

Ao meu namorado, Neto, que tem me ajudado e apoiado nas decisões, obrigada por toda paciência e carinho, por me incentivar e inspirar a ser melhor sempre.

Aos meus avôs, Arão e Miguel, que de uma forma muito carinhosa, sempre torceram por meus sonhos.

As famílias, Lima e Silva, que sempre fizeram me sentir forte e amada.

Aos meus parceiros da universidade e agora da vida, Lucas, Mateus, Darlene, Cintya e Jessica, obrigada por me proporcionarem momentos tão agradáveis e também por estarem comigo naqueles em que me senti só e distante da família; a esta última, Jéssica, meu agradecimento especial, por ter se tornada essa amiga tão companheira e incentivadora, obrigada por cada momento. Ainda das amizades especiais, agradeço a Thayná, que cuidou tão bem de mim, e acredito ter me dado muita sorte. Obrigada Thay.

Aos amigos que fizeram me sentir querida e aqueles que mesmo distante mantiveram os laços, Patrícia, Mirian, Niel, Maria, Glícia, Fábio, Marcos, Genicélio, Baltazar, Fabiana, Augusto, Odilon, Marcia, Fagner, Yara, Raquel, Lauyzi.

As meninas do apartamento 10, pela convivência e parceria, por toda diversão em meio aos dias atarefados de todas nós.

Aos colegas da farmácia Santa Clara, por toda compreensão e apoio.

Ao grupo de pesquisa Biohimet e aos colegas de pesquisa que me acolheram e me fizeram progredir academicamente.

A professora orientadora Luciana Sandra, por todo ensinamento, apoio e dedicação, pelas horas desprendidas para me ajudar no desenvolvimento acadêmico e pelas palavras de incentivo, sempre no momento certo.

Aos professores, por cada ensinamento, para a profissão e para a vida, principalmente. Por me incentivarem e mostrarem a beleza da profissão, bem como as dificuldades, mas sempre com doçura.

A universidade, direção e funcionários, pela oportunidade e por, apesar das dificuldades, oferecerem um ambiente agradável e propício a minha formação.

A Dr^a Magna Soelma, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A todos aqueles que de alguma maneira, contribuíram com minha formação, desejo sorte e sucesso.

Obrigada.

Silva, Maiara Tatiane Lima Silva, Eng., Universidade Federal Rural de Pernambuco/Unidade Acadêmica de Serra Talhada, janeiro de 2019. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região do vale do São Francisco.** Orientadora: Luciana Sandra Bastos de Souza.

RESUMO

Informações relacionadas a evapotranspiração de referência (ET₀) são muito importantes para o manejo de irrigação, principalmente em regiões dependentes da agricultura. Para determiná-la vários métodos podem ser utilizados, dentre os quais estão os métodos alternativos, que utilizam-se de poucos dados. Esse trabalho teve como hipótese que novos modelos para estimativa da evapotranspiração e aqueles desenvolvidos localmente representam melhor a ET₀ do Submédio Vale do São Francisco. Com o objetivo de investigar a adequação de modelos históricos e contemporâneos para a estimativa da ET₀ e desenvolver um novo método para sua estimativa na região do Vale do Submédio São Francisco. O trabalho foi desenvolvido em Juazeiro, Ba, foram utilizados dados referentes a uma estação meteorológica pertencente a EMBRAPA Semiárido, sendo utilizados dados de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e radiação solar global, para os anos de 2017 e 2018, e para validação do modelo proposto foram utilizados dados de 2016. Os dados foram utilizados na determinação da evapotranspiração usando os métodos de Penman-Monteith e os alternativos, subdivididos em dois grupos: histórico, aqueles desenvolvidos antes do ano 2000, com os métodos de Hargreaves-Samani, Camargo, Jensen-Haise, Makkink, Radiação solar FAO 24 e Benevides-Lopes, e contemporâneo, desenvolvidos após o ano 2000, com Irmak, Castaneda-Rao, Moretti-Jerszurki-Silva, Silva-Souza, adicionalmente as informações foram utilizadas no desenvolvimento de um modelo simples para a estimativa da ET₀. Essas informações foram comparadas por meio dos índices para os quais consideram-se coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente de determinação (r²) e o índice de concordância de Willmont. E com base nesses resultados foi possível observar que os métodos contemporâneos, com exceção de Moretti-Jerszurki-Silva, tenderam a reduzir os erros na estimativa da evapotranspiração de referência. O método mais indicado para estimativa da ET₀ foi o da Radiação Solar FAO-24. O modelo alternativo obtido no presente trabalho baseou-se apenas em dados de temperatura e umidade e foi classificado como muito bom para a estimativa da ET₀. Os métodos alternativos de Camargo, Makkink e Moretti-Jerszurki-

Silva não apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa da evapotranspiração de referência em Juazeiro-BA.

Palavras-chave: Evapotranspiração, Semiárido, Modelo alternativo

Silva, Maiara Tatiane Lima, Eng., University Federal Rural de Pernambuco/Academic Unit of Serra Talhada, February, 2019. **Evaluation of methods of estimation of the reference evapotranspiration for the region of the Vale do São Francisco.** Advisor: Luciana Sandra Bastos de Souza.

ABSTRACT

Information related to reference evapotranspiration (ET₀) is very important for irrigation management, especially in regions dependent on agriculture. To determine if several methods can be used, among which are the alternative methods, which are used with few data. This work hypothesized that new models for estimating evapotranspiration and those developed locally better represent ET₀ of the Submediterranean São Francisco. In order to investigate the adequacy of historical and contemporary models for the estimation of ET₀ and to develop a new method for its estimation in the region of the Vale do São Francisco. The work was carried out in Juazeiro, Ba, using data referring to a meteorological station belonging to EMBRAPA Semi-arid, using data of temperature, relative humidity, wind speed, precipitation and global solar radiation, for the years 2017 and 2018, and for validation of the proposed model, data from 2016. The data were used in the determination of evapotranspiration using the Penman-Monteith method and the alternative ones, subdivided into two groups: historical, those developed before the year 2000 with the methods of Hargreaves-Samani, Camargo, Jensen-Haise, Makkink, Solar radiation FAO 24 and Benevides- Lopes, and contemporary, developed after the year 2000, with Irmak, Castaneda-Rao, Moretti-Jerszurki-Silva, Silva-Souza, additionally, the information was used in the development of a simple model for ET₀ estimation. This information was compared using the indices for which Pearson's correlation coefficient (r), coefficient of determination (r²) and Willmont's concordance index were considered. Based on these results, it was possible to observe that contemporary methods, with the exception of Moretti-Jerszurki-Silva, tended to reduce errors in the estimation of reference evapotranspiration. The most appropriate method to estimate ET₀ was the FAO-24 Solar Radiation. The alternative model obtained in the present work was based only on temperature and humidity data and was classified as very good

for ET₀ estimation. The alternative methods of Camargo, Makkink and Moretti-Jerszurki-Silva did not present satisfactory results for the estimation of reference evapotranspiration in Juazeiro-BA.

Keywords: Evapotranspiration, Semiarid, Alternative model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da estação meteorológica.	27
Figura 2. Valores médios de evapotranspiração diária obtida pela utilização dos diferentes métodos de estimativa.	32
Figura 3. Comparação entre os valores de ET ₀ média pelo método de Penman-Monteith (PM) e a ET ₀ calculada pelos métodos simplificados.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da constante c para o cálculo de evapotranspiração de referência da Radiação Solar FAO-24	25
Tabela 2. Modelos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência em Juazeiro-Ba.	28
Tabela 3. Equações utilizadas e valores ideais dos índices estatísticos e erros utilizados para avaliar o desempenho dos modelos.	30
Tabela 4. Desempenho de um modelo de acordo com os valores do coeficiente (c) proposto por Camargo e Sentelhas.	31
Tabela 5. Índices estatísticos para comparação entre modelos de evapotranspiração de referência em Juazeiro-Ba.	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. Semiárido brasileiro.....	17
3.2. Vale do São Francisco	18
3.3. Evapotranspiração	19
3.3.1. Evapotranspiração de referência (ET ₀)	19
3.3.2. Evapotranspiração da cultura (ET _c)	20
3.3.3. Fatores determinantes da evapotranspiração.....	20
3.4. Métodos para estimativa de ET ₀	21
3.4.1. Penman-Monteith	21
3.4.2. Hargreaves-Samani.....	23
3.4.3. Camargo	23
3.4.4. Jensen-Haise.....	24
3.4.5. Makkink	24
3.4.6. Radiação Solar FAO-24.....	25
3.4.7. Benevides-Lopes	25
3.4.8. Irmak.....	25
3.4.9. Castaneda-Rao.....	26
3.4.10. Moretti-Jerszurki-Silva	26
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
6. CONCLUSÃO	36
7. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

A agricultura representa uma das atividades de maior importância no Brasil, apresentando atualmente cerca de 6,97 milhões de hectares de áreas irrigáveis as quais contribuíram com 5,7% do PIB referente ao ano de 2017 (IBGE, 2018; ANA, 2017). O desenvolvimento agrícola tem sido um dos principais impulsionadores do consumo hídrico no país, com utilização total de 69 % da água retirada (ANA, 2017). Nos próximos anos o aumento populacional demandará incrementos na produção de alimentos para o qual será necessário o uso de estratégias de manejo eficientes para maximização do uso da água (ANA, 2018).

O manejo eficiente de irrigação pode ser feito por meio do compute da evapotranspiração da cultura (ET), a qual representa a perda simultânea de água por evaporação do solo e transpiração da planta de uma determinada espécie, em qualquer estágio de desenvolvimento e sem que haja restrição hídrica. A evapotranspiração tem sido considerada elemento chave para o entendimento do balanço hídrico local, logo que representa a principal perda de água da superfície para a atmosfera (PARAJULI et al., 2019; MU et al., 2007; SCHELDE et al., 2011). A determinação desta variável localmente pode ser efetuada de modo direto, pelo uso de lisímetros (WIDMOSER; WOHLFAHRT, 2018). Ou indiretos pelo método do balanço de água no solo (SCHELDE et al., 2011; , balanço de energia baseado na razão de Bowen (BUTTAR et al., 2018) ou pelo uso da técnica de “*eddy covariance*” (SUN et al., 2008; WILSON et al., 2001). Os métodos supracitados normalmente são onerosos, motivo pelo qual a sua utilização normalmente está associada à trabalhos de pesquisa. Assim, como alternativa para a sua utilização, tem-se a determinação da evapotranspiração com base no produto entre o coeficiente da cultura (k_c) e a evapotranspiração de referência (ET_0) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2004).

Valores do coeficiente de cultura (k_c) foram determinados para as mais diversas culturas e estágios de crescimento. Por outro lado, para a determinação da ET_0 , o método de Penman-Monteith parametrizado pelo boletim FAO56 tem sido preterido por se adequar a uma grande diversidade de locais, condições climáticas e pequenos intervalos de tempo (ALLEN et al., 1998; HLAVACIKOVA; NOVAK, 2016). Entretanto, o mesmo requer a utilização de grande quantidade de dados, os quais nem sempre estão disponíveis. Deste modo, vários modelos alternativos têm sido propostos para quantificar a ET_0 como é o caso daqueles que utilizam-se de dados de radiação ou temperatura (RAZIEI; PEREIRA, 2013). Esses modelos tem sido muito utilizados e

consolidados, como mostra a literatura, podendo ser definidos como históricos. Normalmente, estes modelos são aplicáveis às condições específicas, apresentando limitações quando se tratam de regiões heterogêneas ou diferentes daquelas para a qual foi proposto (JERSZURKI; SOUZA; SILVA, 2017). Por este motivo, novos modelos (contemporâneos) têm sido desenvolvidos na tentativa de minimizar as incoerências observadas, como é o caso daqueles que se baseiam no déficit de pressão de vapor de água na atmosfera (JERSZURKI; SOUZA; SILVA, 2017; CASTANHEDA;RAO, 2005).

Na região do Submédio Vale do São Francisco a agricultura irrigada é bastante intensa, logo que a área se destaca como sendo uma das maiores produtoras de frutas do mundo (IBGE, 2018). Sob este contexto, informações relativas à adequação de métodos para a estimativa da evapotranspiração são extremamente úteis para melhoria da utilização da água, gerenciamento e planejamento das atividades agrícolas. Diversos estudos foram realizados para estimativa da ET_0 utilizando o método de Penman-Monteith com dados faltosos (MORAIS et al., 2015) ou alternativos (SANTOS et al., 2017; SILVA et al., 2014; MORAIS et al., 2015). Entretanto, os mesmos não fazem alusão a novas metodologias disponíveis e não foram desenvolvidos para esta região específica. Assim, a hipótese deste trabalho é que: “Novos modelos para estimativa da evapotranspiração e aqueles desenvolvidos localmente representam melhor a evapotranspiração de referência do Submédio Vale do São Francisco”.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Investigar a adequação de modelos históricos e contemporâneos para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) e desenvolver um novo método para sua estimativa na região do Vale do Submédio São Francisco.

2.2. Objetivos específicos

- Indicar o método para estimativa da ET_0 que melhor se adeque as condições climáticas da região do Vale do São Francisco;
- Desenvolver método simplificado para estimativa da ET_0 na região do Vale do São Francisco.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. *Semiárido brasileiro*

A região semiárida do Brasil apresenta maior parte de sua área localizada na região Nordeste (85%) representa uma área peculiar do Brasil, ocupa atualmente cerca de 12% do território nacional, onde vivem aproximadamente 27 milhões de brasileiros, segundo Ministério da Integração Nacional, sendo que a maior parte do Semiárido situa-se no nordeste (85%). Deste total, a área agricultável é dividida em área utilizada pela agricultura familiar, que detêm 4,2%, e as propriedades de mais de 1 mil hectares com 38% das terras (ASA, 2018).

As regiões semiáridas são geralmente classificadas pela aridez de seu clima, característica de baixas precipitações pluviométricas, e longos períodos de seca. Definindo assim o grau de aridez que por sua vez depende da precipitação e da temperatura que influencia na evapotranspiração potencial, elevando ou reduzindo a perda de água (SILVA, 2008). Segundo a ASA, 2018, o Semiárido brasileiro apresenta em média precipitações entre 200 e 800 mm anuais, distribuída de forma irregular no tempo e espaço, no entanto, tais valores de precipitação caracterizam nosso semiárido como o mais chuvoso do planeta. Porém o índice de evaporação é de 3000 mm/ano, o que provoca o déficit hídrico e torna o índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e o déficit hídrico diário igual ou inferior a 60%, considerando todos os dias do ano, essa situação torna-se mais crítica ao observar a hidrografia da região que não tem condições hídricas suficientes de manter rios perenes ao longo da estação seca, sendo o Rio São Francisco a única exceção (IBGE Semiárido, 2017), fonte responsável por manter o desenvolvimento da agricultura e sociedade ao longo do seu curso.

No Semiárido ocorrem dois biomas naturalmente, Cerrado e Caatinga, que juntos representam cerca de 33% da vegetação brasileira, sendo que a Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro e reconhecido como uma das grandes regiões do planeta, e fundamental para a biodiversidade, já que 15% de seus animais e 30% das plantas não existem em nenhuma outra parte, no entanto atualmente tem 45% de sua área total desmatada, sendo o terceiro bioma mais degradado depois da Mata Atlântica e do Cerrado um dos mais ameaçados do planeta, mesmo possuindo as maiores reservas de água doce do mundo, responsável pela formação e alimentação de rios importantes como o Tocantins e o São Francisco (ASA, 2018)

3.2. Vale do São Francisco

A bacia hidrográfica do rio São Francisco, abrange uma área territorial de 645.067,2 km², trata-se da terceira bacia hidrográfica do Brasil, e a primeira contida inteiramente em território nacional, entre as coordenadas 13°-21° Lat. S e 36°-48° Log. W (GODINHO, 2003). Esta se divide em quatro segmentos: alto, médio, sub-médio e baixo São Francisco. O alto compreende da nascente até Pirapora-MG, numa extensão de 630 km; o médio, com 1.090 km, estende-se de Pirapora até Remanso-BA; o sub-médio, de Remanso até a cachoeira de Paulo Afonso também na Bahia, no entanto este também banha municípios pernambucos, com 686 km de comprimento e, finalmente, o trecho mais curto com 274 km – o baixo, que se estende de Paulo Afonso até a foz (PAIVA, 1982).

A cobertura pedológica da bacia apresenta os principais tipos e ordens de solos já mapeados no Brasil (IBGE, 1999). A bacia do São Francisco pode ser englobada nos domínios morfoclimáticos brasileiros do Cerrado, constituídos por chapadões tropicais interiores e da Caatinga, formada por depressões intermontanhas e interplanálticas semiáridas, além de uma faixa de transição não diferenciada (AB'SÁBER, 1971). A bacia contém os biomas da Mata Atlântica, do Cerrado e da Caatinga (COSTA, 1998).

O clima varia de úmido a moderadamente tropical nas elevações do Sul, semiárido tropical, no Médio; semiárido no Sub-médio, e semiúmido no Baixo São Francisco. A precipitação pluviométrica varia de menos de 400 mm a mais de 1600 mm anuais (CODEVASF, 1975). A estação chuvosa nas regiões do Alto, Médio e Sub-médio ocorrem geralmente no período de novembro a abril, e no Baixo São Francisco a estação chuvosa vai de março a setembro.

O vale do sub-médio São Francisco, que abrange municípios de Pernambuco e Bahia, com uma população de mais de 700 mil habitantes e com uma área de cerca de 35 mil km² (CECOMP, 2019), encontra-se como um polo da fruticultura irrigada em pleno Semiárido, região situada sob o domínio Caatinga que apresenta condições climáticas bem definidas, caracterizadas pelos altos níveis de radiação, que proporcionam temperaturas elevadas e baixa umidade relativa do ar, que quando associados aos baixos índices pluviométricos, resultam em altas taxas de evaporação e extensos períodos de estiagem (CUNHA et al., 2015). Segundo a CODEVASF, 2012, a região apresenta ainda características bem peculiares quanto a sua natureza, sendo estas

muito heterogêneas, especialmente em relação a seus solos, topografia, vegetação e características socioeconômicas.

3.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração consiste na contabilização das perdas de água evaporadas pelo solo somada a transpiração das plantas (MENDONÇA et al., 2003). A primeira citação de evapotranspiração ocorreu em 1948 feita por Thornthwaite quando este dizia que a evapotranspiração potencial é considerado como a perda de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta por uma vegetação em crescimento ativo, com dimensões suficientemente grandes para minimizar os efeitos de energia advectiva local. Ainda em 1948, Penman também definiu a evapotranspiração potencial, ressaltando que a vegetação deveria ser rasteira e de altura uniforme.

A estimativa da evapotranspiração pode ser calculada por vários métodos, podendo ser diretos ou indiretos, dentre os diretos os mais comuns são os lisímetros, estruturas isoladas em que um volume de solo com vegetação é colocado, onde todas as entradas e saídas de água são controladas (CARVALHO et al. 2007). Dentre os métodos indiretos temos os modelos simples, que requerem poucos dados de clima local, como dados de temperatura mensal apenas, ou mais complexos que envolvam modelos físicos, necessitando de uma base de dados mais completa (HATFIELD e ALLEN, 1996). Assim a escolha do modelo depende da disponibilidade de dados e da escala de tempo desejada (LIMA JUNIOR, 2010).

3.3.1. Evapotranspiração de referência (ET₀)

Bernardo e Mantovani, 2006, definiram ET₀ como a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de cultura hipotética, com altura de 12 cm, albedo de 0,23 e resistência do dossel constante e igual a 70 s. m⁻¹. O objetivo da ET₀ é quantificar a demanda evapotranspirativa da atmosfera, sem considerar a cultura em questão, seu estágio de desenvolvimento, as práticas culturais empregadas e os fatores de solo, o que facilita aos cálculos para a determinação da (ALLEN et al., 1998).

O conceito passou a substituir o de evapotranspiração Potencial (ET_p) após a conferência da FAO, em 1999, ser realizada com o objetivo de definir uma nova cultura de referência e um novo método para a estimativa da evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997). Nesta conferência foi recomendado como padrão de estimativa da ET₀ o

método de Penman-Monteith, a partir de então denominado Penman-Monteith FAO (PM-FAO), por conter maior número de variáveis (ALLEN, 1998).

O uso de modelos simplificados para a estimativa de ET_0 é muito utilizado, porém estes apresentam problemas de precisão uma vez que foram estudados para determinados locais e situações agronômicas, assim quando aplicados em regiões climáticas diferentes da de sua origem, erros de precisão podem ser relatados, devido, principalmente, a falta de ajustes de seus coeficientes, erros de leitura e precisão dos sensores, causando então, limitações para seus usos (BARROS et al., 2009; MAES e STEPPE, 2012; MEKASHA et al., 2014).

3.3.2. Evapotranspiração da cultura (ET_c)

A evapotranspiração de uma cultura (ET_c) é estimada a partir da ET_0 multiplicada pelo coeficiente de cultivo (K_c) que é variado de acordo com a cultura, seu estágio fenológico, com o clima e as condições agronômicas adotadas (DOORENBOS & PRUITT 1977).

Para se obter as curvas de cultura, são realizados experimentos nos quais se divide o ciclo da cultura em quatro fases e definindo um K_c para cada. Essa mudança de fases representa a mudança que ocorre ao longo do ciclo em relação à área foliar, altura da planta, grau de cobertura e resistência do dossel e albedo em relação à cultura de referência (JENSEN et al., 1990). Para uma estimativa correta dos coeficientes é fundamental que os valores de ET_0 sejam confiáveis, assim os dados de ET_c das culturas ganham consistência. Pesquisadores (DOORENBOS e PRUITT, 1977; WRIGHT, 1981, 1982 e DOORENBOS e KASSAN, 1979) reuniram uma grande quantidade de informações sobre a necessidade hídrica da maioria das espécies de importância agronômica e que ainda são utilizados.

3.3.3. Fatores determinantes da evapotranspiração

Os fatores climáticos, determinantes da evapotranspiração, constituem as variáveis de entrada nas equações para estimativa de ET_0 . Para que ocorra o processo de evapotranspiração é necessário que haja uma fonte de energia, esta é a radiação líquida, que depende da radiação solar incidente e do albedo da vegetação, que é a capacidade de refletir a radiação solar de uma superfície, a temperatura, variando ao longo do dia, tornando maior a demanda evapotranspirativa, assim como ocorre com a variação da

umidade relativa do ar, que quanto mais seca maior será a demanda atmosférica (CARVALHO, 2005?). E o vento é a última variável climática, que pode remover vapor de água e a energia, via transporte horizontal, para outras áreas.

Dentre os fatores relativos à cultura observa-se principalmente, a morfologia e fisiologia das plantas, o seu estágio de desenvolvimento, altura do dossel e profundidade das raízes que determinam a profundidade de solo em que deve ser controlado o volume de água a que este deve ser mantido para potencializar o desenvolvimento da cultura, sendo esta, dependente das características do solo e de sua cobertura vegetal. Ainda relativo à cultura, deve-se considerar o manejo aplicado a esta e ao solo, sendo que a densidade do plantio, que pode resultar em competição pela água disponível e aumentar a cobertura vegetal do solo, e os impedimentos físico-químicos inerentes ao solo que podem prejudicar o desenvolvimento das raízes, limitantes ao desenvolvimento das plantas (CARVALHO, 2005?).

3.4. Métodos para a estimativa de ET_0

Os custos de produção dos sistemas agrícolas podem ser interferidos por muitos fatores, dentre eles, pelo consumo de energia e água de irrigação, principalmente, sendo este último causado pela baixa precisão e exatidão da evapotranspiração de referência (TAGLIAFERRE et al. 2010), no entanto o uso da tecnologia nas estações meteorológicas permite medir e registrar elementos meteorológicos com intervalos de tempo cada vez menores, possibilitando o uso de equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência, pela facilidade de acesso e manipulação dos dados por meios eletrônicos (TAGLIAFERRE et al. 2010), porém o uso de tais equações, exigem certo nível de conhecimento sobre os parâmetros empregados, especificamente, o que dificulta seu uso e o mantém cada vez menos frequente, tendo em vista a necessidade de utilizar racionalmente os recursos hídricos, cada vez mais escassos.

3.4.1. Penman-Monteith

A utilização de um modelo para a determinação da ET_0 depende de uma série de fatores relacionados, principalmente a disponibilidade de dados e da escala de tempo em que se deseja trabalhar (LIMA JUNIOR, 2010). Sendo possível utilizar modelos simplificados, menos exigentes em dados de entrada, no entanto apenas a metodologia

padronizada de Penman-Monteith FAO 56 é indicada como modelo padrão e serve para calibração dos demais modelos.

Esta metodologia foi proposta pela FAO em maio de 1990, adotado como padrão de estimativas em escala diária, sendo necessária a utilização de um grande número de dados onde as variáveis meteorológicas mais influentes no processo de evapotranspiração são a temperatura, a precipitação, a radiação solar, a velocidade dos ventos e a umidade relativa (VILLA NOVA, 1987) tornando assim sua aplicação reduzida quando da indisponibilidade de dados, sendo mais amplamente utilizada em campos experimentais e em grandes áreas agrícolas em que se tem um alto investimento no padrão tecnológico (ANDRADE JÚNIOR et. al., 2003). Em alguns casos a inviabilidade do uso da equação de Penman-Monteith ocorre pela não existência de estações meteorológicas na área, e pela falta de instrumentação. Assim, para casos onde não se tem todos os dados disponíveis a FAO recomenda que sejam usados dados de estações que apresentem as mesmas condições climáticas ou que estes sejam estimados a partir de dados de $T_{\text{máx}}$ e $T_{\text{mín}}$ (ALLEN, 1998).

Quando em 1948, Penman em sua equação original utilizou um método onde combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa, derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície de água aberta a partir de dados climáticos (ALLEN, 1998). Mais tarde baseando-se na equação de Penman, Monteith desenvolveu uma nova equação, em que incluía as resistências aerodinâmicas e de superfície, passando a chamar-se equação de Penman-Monteith (CARVALHO, [2005?]).

A resistência da superfície, aqui representada por “ r_s ”, descreve a resistência do fluxo de vapor através das aberturas dos estômatos da área foliar e da superfície do solo. Enquanto que a resistência aerodinâmica, “ r_a ”, é a resistência da vegetação para cima e envolve o atrito do ar que flui sobre as superfícies vegetativas; embora seja difícil descrever esse processo em uma camada de vegetação devido sua complexidade, obtém-se boas taxas de evapotranspiração medidas e calculadas, principalmente quando medidas sobre superfícies gramadas uniformes. (CARVALHO, [2005?]).

A equação seguinte representa o modelo padrão FAO Penman-Monteith conforme recomendado por Allen et al. (1998).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta [R_n - G] + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)}$$

Em que, R_n -Radiação solar global (mm/dia); G -Fluxo de calor no solo ($Mj.m^2.dia^{-1}$); γ -coeficiente psicrométrico ($kPa\ ^\circ C^{-1}$); T - Temperatura média ($^\circ C$); U_2 - Velocidade média do vento medida a 2 metros de altura (m/s); e_s - Pressão de vapor de saturação (kPa); e_a - Pressão real de vapor (kPa); Δ - Tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água ($kPa\ ^\circ C^{-1}$).

3.4.2. Hargreaves-Samani

O modelo de estimativa da evapotranspiração de referência proposto por Hargreaves e Samani, é descrito na literatura como sendo um dos de mais simples uso, por requerer apenas dados de temperatura máxima e mínima, que estão diretamente relacionadas ao grau de cobertura de nuvens, onde as condições de céu claro favorecem altas temperaturas já que a atmosfera livre permite a passagem da radiação solar, enquanto que durante a noite a incidência é mínima e as temperaturas atingem seus menores valores (SILVA, 2017), algo parecido ocorre em dias nublados, quando menos radiação é interceptada pela superfície terrestre (ALLEN et al., 1998). Portanto, a variação entre as temperaturas máxima e mínima do ar pode indicar a fração de radiação solar que atingiu a superfície terrestre (OLIVEIRA, 2016).

$$ET_0 = 0,0023 \times Q_0 (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} (17,8 + T)$$

em que, Q_0 - Radiação solar o topo da atmosfera (mm/dia); $T_{\text{máx}}$ - Temperatura máxima ($^\circ C$); $T_{\text{mín}}$ - Temperatura mínima ($^\circ C$); T - Temperatura média ($^\circ C$).

Este método é recomendado por requerer poucos dados, sendo estes apenas de temperatura e radiação solar extraterrestre, podendo este ser tabelado de acordo com a latitude local (ALLEN, et al, 1998), ainda por sua vez este método fora originalmente desenvolvido para regiões semiáridas (MORAIS, 2015), no entanto, observa-se que este Tende a superestimar a ET_0 em climas úmidos e subestimá-la em condições de elevada velocidade do vento (SILVA, 2017).

3.4.3. Camargo

Em 1971, Camargo propôs um método para evapotranspiração de referência baseados em resultados obtidos em diversas localidades (BORGES; MENDIONDO, 2007), este método é baseado no modelo de Thornthwaite, simplificado, podendo estimar a evapotranspiração em escala mensal e diária (CARVALHO et al., 2011), e

fornece praticamente os mesmos resultados que aqueles obtidos na equação original de Thornthwaite (CAMARGO & CAMARGO, 2000), utilizando apenas dados de temperatura, considera-se como um dos modelos de mais simples aplicação.

$$ET0 = 0,01 Q_{0\text{mm/dia}} T$$

Em que: Q_0 - Radiação solar o topo da atmosfera (mm/dia); T- Temperatura média (°C).

3.4.4. *Jensen-Haise*

Jensen e Haise definiram evapotranspiração de referência como sendo aquela que ocorre em uma superfície de área irrigada em regiões áridas ou semiáridas, com a radiação solar global expressa em mm/dia (SOUZA et al, 2011)

$$ET0 = Q_g (0,0252T + 0,078)$$

Em que: Q_g - Radiação solar global (mm/dia); T- Temperatura média (°C).

3.4.5. *Makkink*

Baseado no modelo de Penman, este método foi desenvolvido na Holanda, e é recomendado para regiões de clima úmido e não apresenta bons resultados em climas áridos, no entanto é um modelo bastante empregado devido a vantagem de utilizar apenas dados de temperatura e radiação solar (FERNANDES et al., 2010).

$$ET0 = 0,61 W Q_g - 0,12$$

Em que: Q_g - radiação solar global (MJ.m⁻².d⁻¹); $W = s / (s + y)$ é um fator de correção, calculado a partir da temperatura do bulbo molhado e do coeficiente psicrométrico. Esta pode ser calculada através de equações propostas por Wilson & Rouse (1972) e viswanadham et al. (1991):

$W = 0,407 + 0,0145 T_u$ quando $0 < T_u < 16^\circ\text{C}$ e $W = 0,483 + 0,01 T_u$ onde “ T_u ” é a temperatura do bulbo úmido. Em casos onde a temperatura do bulbo úmido não esta disponível utiliza-se a temperatura média diária, mas vale lembrar que em condições normais de atmosfera não saturada, a temperatura média do ar é maior que a do bulbo úmido o que resulta no aumento da estimativa da evapotranspiração.

3.4.6. Radiação Solar FAO-24

Também conhecido como método FAO-24 da radiação, trata-se de uma adaptação feita por Doorenbos & Pruitt (1977) e Doorenbos & Kassam (1994) ao método de Makkink substituindo os coeficientes a e b por um parâmetro c, que é função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (Tabela 1). A equação simplificada reduz-se a:

$$ET_0 = c(W * Q_g)$$

Em que: c- Coeficiente de inclinação da reta de regressão; W- Definido pelo método de Makkink; Q_g -Radiação solar global (mm/dia).

Tabela 1- Valores da constante c para cálculo de ET_0 FAO-24.

Intervalos de velocidade média do vento (m.s ⁻¹)	Intervalos de umidade relativa (%)			
	<40	40-50	55-70	>70
0-2	0,971	0,92	0,857	0,814
2-5	1,057	1,014	0,927	0,886
5-8	1,143	1,100	0,986	0,923
>8	1,229	1,172	1,043	1,000

FONTE: DOORENBOS & ASSAM (1994).

3.4.7. Benevides-Lopes

O método de Benavides-Lopez, foi desenvolvido por Garcia Benevides e Lopez Diaz (1970) e, baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar (Pereira et al., 1997).

$$ET_0 = -1,21 * 10^{\left[\frac{7,5T}{237,5+T}\right]} * (1 - 0,01 * U_R) + 0,21 * T - 2,30$$

Em que: T- Temperatura média (°C); U_R - Umidade relativa do ar (%).

3.4.8. Irmak

A equação proposta por Irmak (2003) baseia-se na formação de equação multilinear que relaciona variáveis independentes, é uma extensão direta de um modelo de regressão polinomial com uma variável independente.

$$ET_0 = -0,611 + 0,149 * Q_g + 0,079 * T$$

Onde: Q_g -Radiação solar global (MJ. m². dia⁻¹); T- Temperatura média (°C).

3.4.9. Castaneda-Rao

A equação para estimativa da ET0 por Castaneda e Rao (2005) foi desenvolvida com dados climáticos de estações meteorológicas do estado da Califórnia, onde as temperaturas podem variar bastante, apresentando desde regiões onde há neve nos invernos rigorosos, até regiões desérticas.

$$ET0 = 0,408 * 0,07 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) Q_0 - 0,12$$

Em que: Q_0 - Radiação solar no topo da atmosfera (mm/dia); Δ - declividade da curva de pressão de saturação de vapor; γ - constante psicrométrica.

3.4.10. Moretti-Jerszurki-Silva

O método alternativo de Moretti-Jerszurki-Silva, foi proposto com base em valores de radiação solar, o modelo foi desenvolvido para regiões semiáridas e é facilmente calibrado. A validação do método foi determinada com base na análise de regressão para os dois últimos anos da série histórica com dados lisimétricos (JERSZUKI, 2017)

$$ET0 = a + b * Q_g$$

Em que: a-Coeficiente linear; b-Coeficiente angular; Q_g -Radiação solar global (mm/dia).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática (Figura 1), pertencente à EMBRAPA Semiárido e localizada na zona rural de Juazeiro na Bahia (latitude: 09° 24' S, longitude: 40° 26' O, altitude: 355m). O clima da região é classificado como BSw_h' segundo a classificação climática de Köppen e Geiger, com baixos índices de pluviosidade mal distribuídos ao longo do ano com valores médios de 550 mm anuais e temperatura média de 24,8 °C (MOURA et al., 2007; ALVARES et al., 2017).



Figura 1. Localização da estação meteorológica, em Juazeiro – BA, 2019. (Fonte: Autor)

Foram utilizados dados de temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa máxima, mínima e média, velocidade do vento, precipitação e radiação solar global, para os anos de 2017-2018. As informações referentes aos elementos meteorológicos foram processadas por meio do software Excel[®] versão 2010, para obtenção dos valores médios diários. Posteriormente, obtiveram-se os valores da evapotranspiração de referências (ET₀) por meio de diferentes métodos: Penman-Monteith parametrizado pelo boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998), Hargreaves-Samani (HARGREAVES-SAMANI, 1985), Camargo (CAMARGO, 1971), Jensen-Haise (JENSEN-HAISE, 1963), Makkink (MAKKINK, 1957), Radiação solar - FAO (DOOREMBOS e PRUIT, 1985), Benevides-Lopes (BENEVIDES-LOPES, 1970), Irmak (IRMAK, 2003), Castaneda-Rao (CASTANEDA-RAO, 2005), Moretti-Jerszurki-Silva (MORETTI-JERSZURKI-SILVA, 2017). Os valores médios obtidos foram submetidos à análise e construídos os gráficos no software SigmaPlot[®]. Tais metodologias foram divididas em dois grandes grupos: modelos históricos e contemporâneos (Tabela 2).

Tabela 2. Modelos utilizados na estimativa da evapotranspiração (ET0) em Juazeiro – BA, 2019.

GRUPO	MODELO	EQUAÇÃO	VARIÁVEIS	CITADO
Históricos (<2000)	Penman-Monteith	$ET0 = \frac{0,408\Delta[Rn-G] + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)}$	Rn, G, T, vv, Patm e UR	Allen et al. 1990
	Hargreaves-Samani	$ET0 = 0,0023 Q_o (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} (17,8 + T)$	Qo, Tmáx, Tmín e T	Hargreaves e Samani, 1985
	Camargo	$ET0 = 0,01 Q_{0_{mm}/dia} T$	Qo e T	Camargo, 1971
	Jensen-Haise	$ET0 = Q_{gmm}/dia (0,025t + 0,08)$	Qg	Jensen e Haise, 1963
	Makkink	$ET0 = 0,61 W Q_g - 0,12$	Qg	Makkink, 1957
	Radiação Solar	$ET0 = a + b(W Q_g)$	Qg	Doorembos e Pruitt, 1977
Contemporâneos (>2000)	Bennevides-Lopes	$ET0 = a * 10^{\left[\frac{7,5T}{237,5+T}\right]} * (1 - 0,01 * U_R) + b * T * c$	T e UR	Benevides e Lopes, 1970
	Irmak	$ET0 = -0,611 + 0,149 * Q_g + 0,079 * T$	Qg e T	Irmak, 2003
	Castaneda-Rao	$ET0 = 0,408 * 0,07 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) Q_g - 0,12$	Qg	Castaneda e Rao, 2005
	Moretti-Jerszurki-Silva	$ET0 = a + b * Q_g$	Qg	Jerszurki, Souza e Silva, 2017

Em que: ET0= evapotranspiração de referência, T= temperatura média, Tmáx= temperatura máxima, Tmín= temperatura mínima, Qg= irradiância solar global, Qo= irradiância solar extraterrestre.

Os dados de meteorológicos obtidos para os anos de 2017-2018 foram ajustados aos valores de ET0 obtidos pelo método padrão de Penman-Monteith parametrizado pelo boletim FAO56 para obtenção de modelo local para estimativa da ET0. Neste caso, o modelo obtido considerou dados da pressão real de vapor (ea, kPa) e da temperatura

média do ar (T, °C). Para estimativa da pressão real de vapor (ea, kPa), utilizou-se a expressão:

$$ea = \frac{UR \times es}{100}$$

em que: UR é a umidade relativa (%), obtida por meio da estação meteorológica automática e es é a pressão de saturação do vapor d'água na atmosfera (es, kPa), a qual foi obtida por:

$$es = 0,61078 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}\right)}$$

A partir dos valores de es, ea, UR, e T, foi obtido o seguinte modelo para a estimativa da local (Modelo: SILVA-SOUZA):

$$ET0 = 0,36 \times T - 1,67 \times e_a$$

Posteriormente, foi realizada a validação do modelo, para a qual utilizou-se dados referentes ao ano de 2016. Neste caso, os dados estimados pelo modelo foram comparados aos obtidos por meio do método de Penman-Monteith para observância da precisão e qualidade dos dados estimados.

A comparação dos valores observados x estimados foi feita utilizando regressão linear e índices estatísticos para os quais considerou-se (PINHEIRO et al., 2015; SILVA et al., 2015): coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de concordância de Willmont (WILLMONT et al., 1985). Além da estimativa dos erros estatísticos: erro absoluto médio (EAM) e raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME) (SOUZA et al., 2011) (Tabela 3) e do coeficiente de desempenho c de Camargo e Sentelhas (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) (Tabela 4). De acordo com Moraes et al. (2014) os valores EAM está relacionado ao erro relacionado à sub ou superestimava nos valores de ET à longo prazo. Já os valores de RQME permitem quantificar estas variações em curto prazo de tempo.

Tabela 3. Equações utilizadas e valores ideais dos índices estatísticos e erros utilizados para avaliar o desempenho dos modelos

Símbolo	Equação	Valor ideal	Fonte
R	$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(E_i - E_m)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2\right] \left[\sum_{i=1}^n (E_i - E_m)^2\right]}}$ (Adaptada)	-1 e +1	Citado por Filho e Júnior (2009)
r²	$r^2 = R^2$ (Adaptada)	+1	Citado no Portal Action (2017)
C	$c = R_d$	>0,85	Camargo e Sentelhas (1997)
D	$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(E_i - O_m) + (O_i - O_m)]^2} \right]$	+1	Willmontt (1985)
EAM	$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n}$	0	Citado por Souza et al. (2011)
RQME	$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}}$	0	Citado por Souza et al. (2011)

Onde: O_i : valores observados, O_m : média dos valores observados, E_i : valores estimados, E_m : média dos valores estimados, n : número de observações.

Tabela 4. Desempenho de um modelo de acordo com os valores do coeficiente (c) proposto por Camargo e Sentelhas (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

Coeficiente de confiança “c”	Classificação
>0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito Bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados avaliados foram correspondentes aos anos cuja precipitação foi inferior da normal climatológica da região que é de 530 mm. Neste caso, os volumes de precipitação foram iguais a 340 mm no ano de 2018 e 490 mm no ano de 2017. Os valores médios da evapotranspiração de referência (ET₀) são apresentados na Figura 2, e situaram-se em torno de 5,29 mm dia⁻¹. Neste caso, os métodos históricos tenderam a superestimar os valores médios anuais de observados pelo método de Penman-Monteith, já os contemporâneos, com exceção de Moretti-Jerszurki-Silva (2017), promoveram subestimativas de até 26%. O método de Moretti-Jerszurki-Silva (2017) apesar de ter sido desenvolvido para condições climáticas muito semelhantes ao do presente estudo, apresentou superestimava nos valores de ET₀ em relação estimado pelo método de Penman-Monteith de até 29%, semelhante ao observado com uso do método de Makink. Por outro lado, o método desenvolvido neste trabalho, resultou em diferenças nos valores médios anuais de apenas 2%. Os resultados tornam-se significativos para a região por esta ser caracterizada como polo fruticultor do Semiárido, principalmente quando da aquisição de estações meteorológicas, já que estas podem conter menos sensores e assim serem menos onerosas aos produtores.

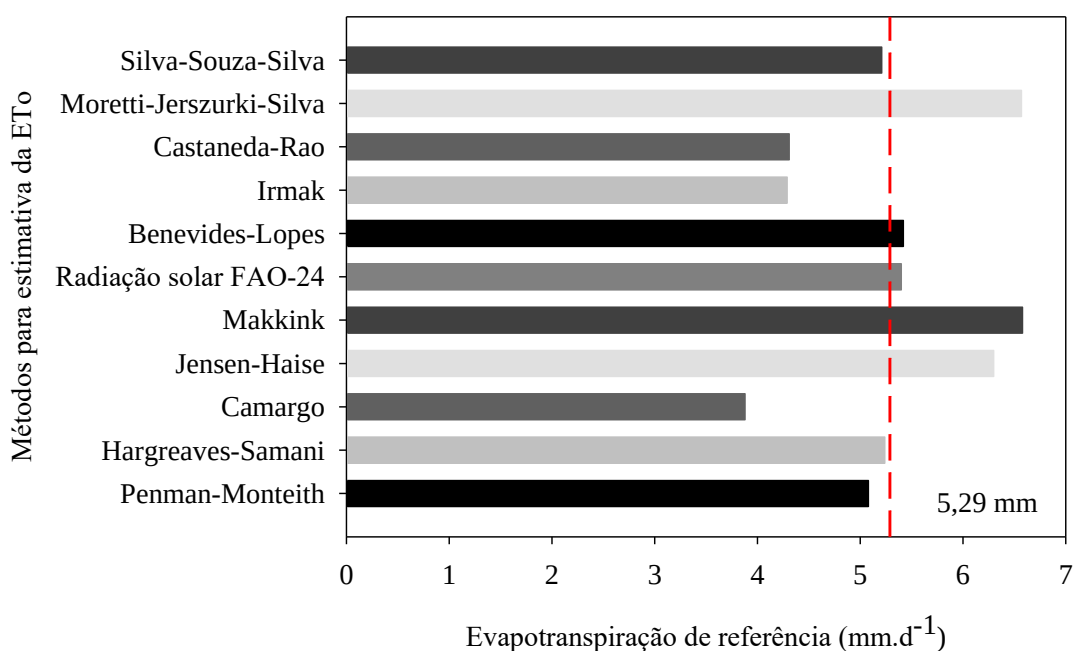
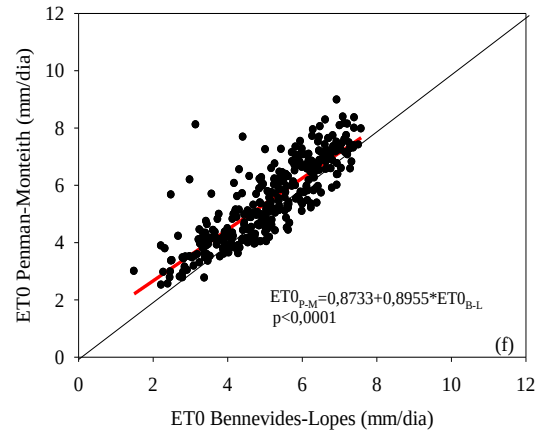
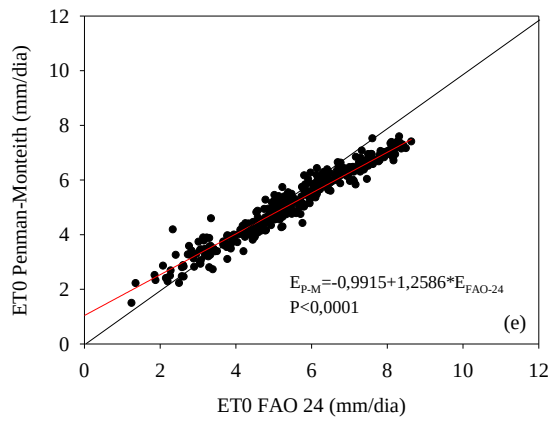
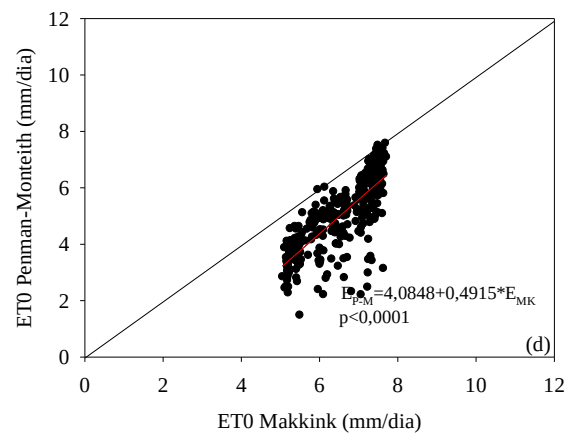
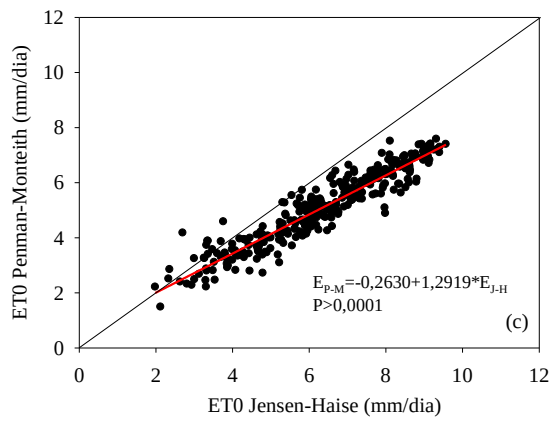
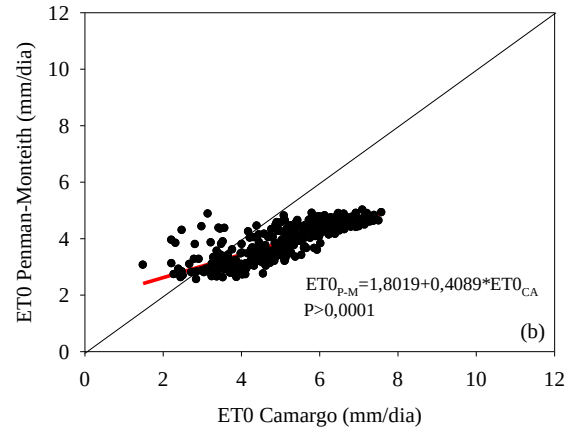
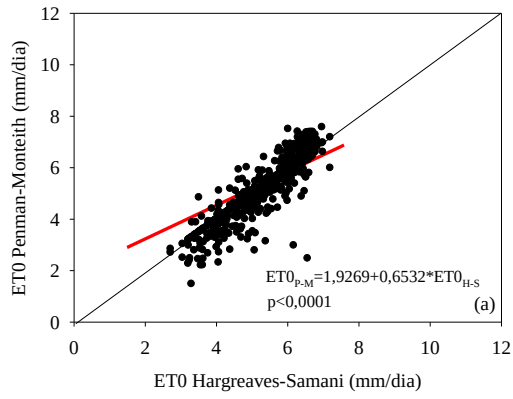


Figura 2. Valores médios de evapotranspiração diária obtida pela utilização dos diferentes métodos de estimativa, Juazeiro-BA, 2018.

Quando se analisou o desempenho dos diferentes métodos por meio dos índices estatísticos, pode-se observar que de acordo com os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r), os métodos que utilizam como variável de entrada dados de radiação solar (Q_g) apresentaram melhores resultados quando comparados aos que usam apenas dados de temperatura e umidade (Figura 3), sendo os melhores valores observados para os modelos de Radiação Solar FAO-24, Jensen-Haise, seguidos por Irmak, Castaneda-Rao e Silva-Souza, respectivamente (Tabela 4). Silva et al. (2014) em estudo realizado para avaliação de desempenho de métodos para estimativa da ET_0 em Petrolina-PE, também atestaram o bom desempenho dos métodos que consideraram a radiação. Tais resultados podem estar associados de a R_g ser a principal fonte de energia para a ocorrência dos processos de ET, logo a sua utilização é de extrema importância (MORAIS et al., 2014; SILVA et al., 2011).



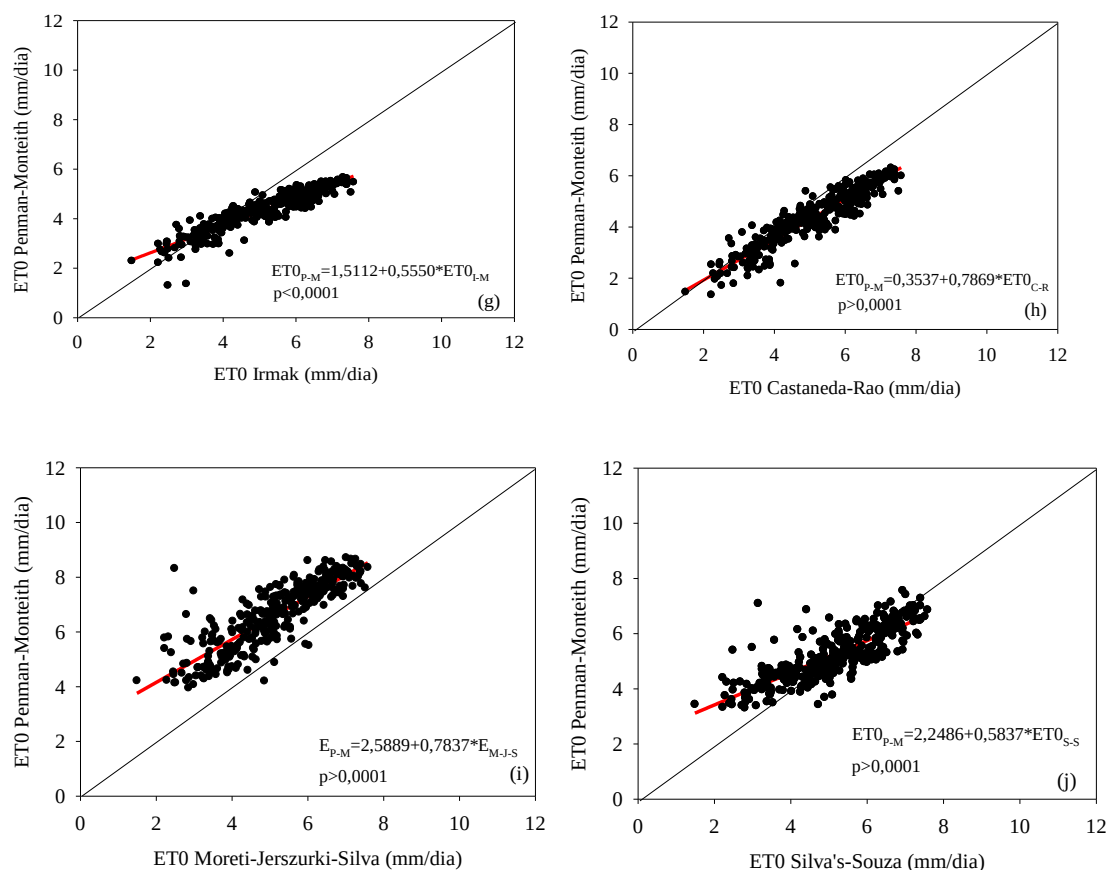


Figura 3. Comparação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração obtidos por meio do método padrão de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani (a), Camargo (b), Jensen-Haise (c), Makkink (d), FAO24 (e), Benevides-Lopes (f), Irmak (g), Castanheda-Rao (h), Moretti-Jerszuki-Silva (i) e Silva-Souza (j), para Juazeiro –BA, 2019.

A eficiência dos modelos pode ser analisada tanto com constantes mais simples como o coeficiente de correlação de Pearson (R), como as mais específicas como o índice de concordância de Willmontt (d) e o índice de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (c). Neste caso, para os modelos históricos embora no geral os valores do coeficiente de correlação de Pearson tenham sido maiores quando comparados aos contemporâneos, estes últimos tenderam a apresentar melhor precisão e exatidão, com valores de d na maioria dos casos superior a 0,8 (80%).

Tabela 5. Índices estatísticos para comparação entre os modelos de evapotranspiração de referência em Juazeiro-BA.

Grupo	MODELO	R	RQEM	EAM	d	c	Classificação
Históricos (<2000)	Camargo	0,84	3,52	-1,21	0,65	0,54	Sofrível
	Jensen-Haise	0,97	1,43	1,24	0,82	0,79	Muito bom
	Makkink	0,77	1,73	1,50	0,62	0,48	Mau
	Radiação Solar FAO-24	0,98	0,64	0,33	0,95	0,94	Ótimo
	Bennevides- Lopes	0,88	0,78	0,33	0,91	0,80	Muito bom
Contemporâneos (>2000)	Irmak	0,95	0,99	-0,75	0,80	0,76	Muito bom
	Castaneda-Rao	0,93	0,90	-0,73	0,87	0,82	Muito bom
	Moretti- Jerszurki-Silva	0,87	1,65	1,49	0,70	0,61	Mediano
	Silva-Souza	0,92	0,78	0,11	0,88	0,80	Muito bom

O modelo de Penman-Monteith é considerado o mais adequado para a estimativa da evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). Apesar disso, a grande quantidade de dados requeridos pode limitar sua aplicação quando os dados estiverem indisponíveis. Os modelos mais simples, em que foram considerados apenas dados de temperatura e umidade do ar, Benevides-Lopes e Silva-Souza, apresentaram valores relativamente baixos de RQEM, da ordem de 0,7841 mm.d⁻¹ e 0,77 mm.d⁻¹, respectivamente, os quais foram classificados como “*muito bom*” (Tabela 4). Isso demonstra que estes modelos têm elevado potencial para utilização na estimativa da ET₀. Sentelhas et al. (2010), em trabalho realizado para estimativa da evapotranspiração de referência em Ontário no Canadá observaram valores de RQEM 0,76 à 1,96 mm.d⁻¹. Por outro lado, Moretti-Jerszuzki-Silva ocasionou superestimativas da ET₀ de 1,64 mm.d⁻¹, demonstrando a baixa adequabilidade deste modelo ao local, que foi enquadrado como “*mediano*”. A baixa adequação dos modelos para a estimativa da ET₀ podem minimizar a eficiência da utilização da água na agricultura, maximizando o desperdício deste recurso (TAGLIAFERRE et al., 2010).

O modelo da FAO-24 produziu os menores valores de RQEM, sendo enquadrado como “ótimo”, conforme também constatado por Silva et al. (2011). De modo geral os modelos contemporâneos reduziram os erros na estimativa da ET₀ em curto prazo em relação aos históricos (Tabela 5). Os maiores desvios de estimativa foram observados para o modelo de Camargo, que apresentou RQEM de até 3,51 mm.d⁻¹, seguido do modelo de Hargreaves-Samani, o qual apesar de ter sido desenvolvido para regiões semiáridas apresentou elevada superestimativa RQME de 2,31 mm.d⁻¹. Desempenhos ruins do modelo de Hargreaves-Samani também foram relatados por Moraes et al. (2011).

Quando se analisou o EMA, pode-se constatar que a maioria dos modelos históricos tenderam a apresentar altos valores com subestimativas de até -1,21 (Hargreaves –Samani) ou superestimativas de até 1,5 (Makkink). Back (2008) obteve um erro médio absoluto (MAE) de 1,141 para o modelo de Hargreaves –Samani, o que o autor considerou um resultado insatisfatório, justificando o fato do mesmo ter sido desenvolvido para condições semiáridas e desse modo recomendou fazer devidas correções para melhor aplicação do método. Com exceção do modelo FAO-24 que promoveu leves superestimativas da ordem de 0,33.

6. CONCLUSÃO

Os métodos contemporâneos, com exceção de Moretti-Jerszurki-Silva, tenderam a reduzir os erros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀), quando comparados aos métodos históricos.

O método mais indicado para estimativa da ET₀ foi o da Radiação Solar FAO-24.

O modelo alternativo obtido no presente trabalho baseou-se apenas em dados de temperatura e umidade e foi classificado como muito bom para a estimativa da ET₀.

Os métodos alternativos de Camargo, Makkink e Moretti-Jerszurki-Silva não apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa da evapotranspiração de referência em Juazeiro-BA.

7. REFERÊNCIAS

AB’SÁBER, A. N. **A organização natural das paisagens inter e subtropicais brasileiras**, p. 1-14. In: M. G. FERRI (org.). III Simpósio sobre o cerrado. São Paulo:

Edgard Blücher, 1971. 375p.

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

alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São
ANA-Agência Nacional das Águas. **Atlas irrigação. Uso da água na agricultura irrigada**. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br>. Acessado em 26 de dezembro de 2018.

ANDRADE JÚNIOR, A.S., BASTOS, E.A., SENTELHAS, P.C, SILVA, A.A.G.DA. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, p.63-68, 2003.

ASA. Articulação Semiárido Brasileiro. **Semiárido. É no Semiárido que a vida pulsa**. Disponível em: <http://www.asabrasil.org.br/semiarido>. Acesso em: 18 de janeiro de 2019.

BACK, A. J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.

BALDOCCHI D.D., RYU Y. A Synthesis of Forest Evaporation Fluxes – from Days to Years – as Measured with Eddy Covariance. **Forest Hydrology and Biogeochemistry**, v. 216, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1363-5_5. Acesso em: 05 fev. 2019.

BARROS, V.R., SOUZA, A.P.DE, FONSECA, D.C., SILVA, L.B.D.DA. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** [online]. Disponível: [http:// dx.doi.org/ 10.5039/agraria.v4i2a13](http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v4i2a13). Acesso: 14 jan. 2019.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BUTTAR, N. A; YONGGUANG, H; SHABBIR, A; LAKHIAR, I. A; ULLAH, I; ALI, A; ALLEM, M; YASIN, M. A. Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method. **IFAC- PapersOnLine**. [Online] Vol. 51, issue 17, p. 807-810, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896318312126>. Acesso em: 05 fev. 2019.

- CAMARGO, Â. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89–97, 1997.
- CAMARGO, M.B.P. & CAMARGO, A. P. Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial. **Bragantia**. v.59 n.2 Campinas, p. 125-137 2000.
- CARVALHO, L. G.; DANTAS, A. A. A; NETO, P. C. **Evapotranspiração**. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NÚCLEO DE AGROMETEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA GNE109 – Agrometeorologia-UFL. Lavras-MG. [2005?]
- CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B.; GUERRA, J.G.M.; CRUZ, F.A.; SOUZA, A.P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.363-372, 2007.
- CHRISTOFIDIS, D. **A água e a crise alimentar**. [www.iica.org.br/ Aguatrab/ Demetrios%20Christofidis/P2TB01.htm](http://www.iica.org.br/Aguatrab/Demetrios%20Christofidis/P2TB01.htm). 1997. 14p.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima Juazeiro**. Disponível em: <http://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/bahia/juazeiro-31939/>. Acesso em 21 de janeiro de 2019.
- CODEVASF, II Plano Nacional de Desenvolvimento - Programa de Ação do governo para o Vale do São Francisco - 1975.
- CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e Vale do Parnaíba, 2012. **Polígono das secas**. Disponível: <http://www.codevasf.gov.br/osvales/vale-dosao-francisco/poligono-das-ecas>. Acesso: 20 dez. 2018.
- Colegiado de Engenharia da Computação. CECOMP-UNIVASF, Vale do São Francisco. Disponível em: <http://www.cecomp.univasf.edu.br/index.php/vale-do-sao-francisco>. Acesso em 16 de janeiro de 2019.
- COSTA, C. M. R.; G. HERMANN; C. S. MARTINS; L. V. LINS & I. R. LAMAS (org.). **Biodiversidade em Minas Gerais: um atlas para sua conservação**. Belo Horizonte: Fundação Biodiversitas, 1998. 94p.
- CRIPPEN, J. R.; Natural Water Loss and Recoverable Water in Mountain Basins of Southern California. U.S. **Geological Survey Professional Paper**, v.417, p. 24, 1965.

- CUNHA, A. P. M. et al. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agricultural and forest meteorology**, v. 214, p. 494-505, 2015.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome, FAO. 1979, 193 p. (Irrigation and Drainage Paper 33).
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage**. Roma, v. 24, p. 136, 1977.
- FILHO, M. A. C.; PEREIRA, F. A. C.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; OLIVEIRA, G. X. S. **O processo de evapotranspiração**. 1. Ed. Brasília-DF: Embrapa Informação Tecnologia, 2011. 771 p.
- FILHO, D. B. F.; JÚNIOR, J. A. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.
- GODINHO, ALEXANDRE LIMA; GODINHO, HUGO PEREIRA. **Breve visão do São francisco. Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC Minas, v. 468, p. 15-23, 2003.
- HATFIELD, J. L.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration estimates under deficient water supplies. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 122, n. 5, p. 301-308, 1996.
- HLAVACIKOVA, H, NOVAK, V. Comparison of daily potential evapotranspiration calculated by two procedures based on Penman-Monteith type equation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**. [online] p. 173-176, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/269477718_Comparison_of_daily_potential_e_vapotranspiration_calculated_by_two_procedures_based_on_Penman-Monteith_type_equation. Acesso em: 05 fev. 2019.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA **Dados Econômicos**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acessado em 26 de dezembro de 2018.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário Estatístico do Brasil** 59:1/1-8/29, 1999.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

LIMA JUNIOR, F.E.B. Análise comparativa da evapotranspiração de referência estimada por diferentes métodos no município de Limoeiro do Norte, Ceará. **Dissertação (Mestrado)**. Fortaleza, UFC. 2010.

MAES, W.H., STEPPE, K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. **Journal of Experimental Botany** [online] 63, 2012. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1093/jxb/ers165>. Acesso: 14 jan. 2019.

MEKASHA, A., TESFAYE, K., DUNCAN, A.J. Trends in daily observed temperature and precipitation extremes over three Ethiopian eco-environments. **International Journal of Climatology** [online] v.34, 2014. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1002/joc.3816>. Acesso: 14 jan. 2019.

MENDONÇA, J. C. SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MORAIS, J.E.F.; SILVA, T.G.F.; SOUZA, L.S.B.; MOURA, M.S.B.; DINIZ, W.J.S.; SOUZA, C.A.A. Avaliação do método de Penman Monteith FAO 56 com dados faltosos e de métodos alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**. [Online] vol. 8, n.6, 2015 p.1644-1660. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233665>. Acesso em 16 jan. 2019.

MU, Q; HEINSCH, F. A; ZHAO, M; RUNNING, S. W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**. [Online] Vol 111, Issue 4, p. 519-536. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.04.015>. Acesso em: 05 fev. 2019.

OLIVEIRA, L.F.C.; CARVALHO, D.F.; ROMÃO, P.A.; CORTÊS, F.C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia**, v.31, n.2, p.121-126, 2001.

PAIVA, M. P. **Grandes represas do Brasil**. Brasília: Editerra, 1982. 304p.

PARAJULI, K; JONES, S. B; TARBOTON, D. G; FLERCHINGER, G. N; HIPPS, L. E; ALLEN, N; SEYFRIED, M. S. Estimating actual evapotranspiration from stony-soils in montane ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**. [Online] 2019. Vol 256. P. 183-194. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/agricultural-and-forest-meteorology/vol/265/suppl/C>. Acesso em: 05 fev. 2019.

PEREIRA, A. R., NOVA, N. A. V., SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração. Piracicaba**, SP. Editora FAELQ, 183p. 1997.

RAZIEI, T. PEREIRA, L.S. Estimation of ETo with Hargreaves–Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Manegement**. [Online] 121, p. 1-18, 2013. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.5/9100>. Acesso em: 05 fev. 2019.

SANTOS, R. D. DA S.; SOUZA, M. H. C. DE .; BISPO, R. DE C.; VENTURA, K. M.; BASSOI, L. H. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Petrolina, PE. **Irriga**, Edição Especial, p. 31-39, 2017.

SCHELDE, K; RINGGAARD, R; HERBST, M; THOMSEN, A; FRIBORG, T; SOGAARD, H. Comparing evapotranspiration rates estimated from atmospheric flux and TDR soil moisture measurements. **Vadose Zone Journal**. [Online] 10, p. 78-83. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0060>. Acesso em: 05 fev. 2019.

SENTELHAS, P.C., GILLESPIE, T.J., SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontário, Canadá. **Agricultural Water Management** [online] v. 97, 2010. Disponível: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.agwat.2009.12.001>. Acesso: 16 ago. 2015.

SILVA, H. C. D; SILVA, M. T; SILVA, M. M. M. A; ROCHA JUNIOR, C. A. N. Comparação entre métodos de estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETo) na região de Petrolina-PE. **Ciência e Natura** [Online]. Vol. 36 Ed. Especial II, p. 456–461, Santa Maria, Rs. 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/13154>. Acesso em: 05 fev. 2019.

SILVA, R. M. A. Entre o Combate a Seca e a Convivência com o Semiárido - **Transições paradigmáticas e sustentabilidade do desenvolvimento. Sustentabilidade em debate**. Fortaleza-CE, 2008.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome FAO. 45p. 1991.

SUM, G; NOORMETS, A; CHEN, J; MCNULTY, S. G. Evapotranspiration estimates from eddy covariance towers and hydrologic modeling in managed forests in Northern Wisconsin, USA. **Agricultural and Forest Meteorology**. [Online] Vol. 148, p. 257-267. 2008. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/29056>. Acesso em: 05 fev. 2019.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.A.J.; ROCHA, F.A.; SANTOS, L.C.; SILVA, C.S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.23, n.1, p.103-111, 2010.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos climáticos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba. ESALQ/ Departamento de Física e Meteorologia, 22p. 1987

WIDMOSER, P; WOHLFAHRT, G. Attributing the energy imbalance by concurrent lysimeter and eddy covariance evapotranspiration measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**. [Online] Vol. 263, Issue 15, p. 287-291. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.003>. Acesso em: 05 fev. 2019.

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 Forest Meteorology**. [Online] Vol. 106, issue 2, p. 153-168. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/agricultural-and-forest-meteorology/vol/106/issue/2>. Acesso em: 05 fev. 2019.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Irrig. and Drain. Div.**, v. 108, n. IRI, p. 57-74, 1982.