

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE CASCAVEL

CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARANÁ

NEIVA SALES RODRIGUES

CASCAVEL - PARANÁ - BRASIL
ABRIL DE 2020

NEIVA SALES RODRIGUES

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARANÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para defesa do doutorado em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Dr. Benedito Martins Gomes

CASCADEL - PARANÁ - BRASIL

ABRIL DE 2020

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Rodrigues, Neiva Sales
Evapotranspiração de referência no estado do Paraná /
Neiva Sales Rodrigues; orientador(a), Benedito Martins
Gomes, 2019.
60 f.

Tese (doutorado), Universidade Estadual do Oeste do
Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, 2019.

1. Agrometeorologia. 2. Evapotranspiração. 3.
Hidrologia. I. Gomes, Benedito Martins. II. Título.

NEIVA SALES RODRIGUES

Métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no estado do Paraná

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADA pela seguinte banca examinadora:

Orientador - Benedito Martins Gomes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Jian Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)

Wagner Alessandro Pansera

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Eloy Lemos de Mello

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 18 de junho de 2019

BIOGRAFIA

Nasceu no ano de 1989, sendo natural de Ivinhema–MS.

Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental pelo Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas da Universidade Federal de Mato Grosso-UFMT, Campus de Rondonópolis- MT (2007-2011).

Especialista em Ciências do Solo e Nutrição de Plantas pela Universidade de Cuiabá (UNIC), Campus de Primavera do Leste-MT (2012-2014).

Mestra em Recursos Hídricos pelo Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PPGRH) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Campus de Cuiabá- MT, na Área de Concentração: Manejo e Conservação, Linha de Pesquisa: Dinâmica Superficial e Subterrânea (2013-2014).

Atuou como Professora na Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia (SECITEC), Campus de Rondonópolis-MT (2013-2014).

Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Campus de Cascavel-PR, na Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (RHESA), Linha de Pesquisa: Recursos Hídricos (2015-2020).

Professora na Universidade Estadual de Mato Grosso (Unemat) (2020-atual).

“O assunto mais importante do mundo pode ser simplificado até o ponto em que todos possam apreciá-lo e compreendê-lo. Isso é - ou deveria ser – a mais elevada forma de arte” Charles Chaplin (1889-1977).

DEDICATÓRIA

Ao meu saudoso amigo Crysthian (In Memoriam), o qual me acompanhou em toda minha jornada acadêmica e pessoal. Eternamente grata ao apoio, conversas, incentivos, divisão e união de tarefas, ajuda emocional e, muitas vezes, financeira. Sempre lembrado e amado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, saúde, fé, força física e espiritual para prosseguir.

A meus pais, alicerce, incentivo e motivo principal de toda a jornada profissional e acadêmica. A meu esposo, por toda dedicação, apoio e entendimento. Ao meu filhinho amado, por toda bondade, alegria, motivação, leveza e também por mostrar não existir maior “Tese” prática que ser Mãe.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela possibilidade do desenvolvimento da presente Tese de Doutorado.

Ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), pelo fornecimento dos dados primários de pesquisa.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela disponibilização de dados para pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento e Pesquisa (CAPES), pelo apoio financeiro ao projeto de doutorado.

Ao orientador, pela oportunidade de orientação, paciência e ensinamentos.

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO: Evapotranspiração (ET_o) é o conjunto de dois processos: evaporação do solo, corpos hídricos e transpiração das plantas. O estudo da evapotranspiração é fundamental na determinação do balanço hídrico de uma região, de forma que a aplicação de métodos de estimativas de perdas por evapotranspiração é necessária para fins de disponibilidade hídrica em diversas regiões, como exemplo, a quantificação das deficiências hídricas de culturas agrícolas. A ET_o pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, quando há restrições de dados no local de estudo. Assim, a presente Tese objetivou estimar a evapotranspiração de referência no estado do Paraná, por meio de diferentes métodos, assim como calibrar e avaliar o desempenho do método de Hargreaves (1985) (Hargreaves-Samani), em relação ao método padrão FAO Penman-Monteith. Os dados de temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa do ar (insolação e velocidade do vento) diários, para estimativa da evapotranspiração de 30 anos (disponíveis de 1989 a 2018), foram obtidos de estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR). Foi realizado o preenchimento de falhas por média de três estações; a evapotranspiração foi obtida pelos métodos FAO 54 Penman-Monteith (1998), Makkink (1957), Hargreaves (1985) (Hargreaves-Samani), Priestley-Taylor (1972), FAO 24 Blaney-Criddle e Turc (1961); a calibração de Hargreaves-Samani foi obtida pelo método Gradiente Reduzido Generalizado (GRN) não-linear e a validação dos dados efetivou-se por meio de análises estatísticas. Os resultados indicam boa aplicabilidade dos métodos alternativos, sendo que a equação de Hargreaves-Samani reduziu significativamente os erros após calibração. A análise de dados diários de estimativa de evapotranspiração para o estado do Paraná é indicada, sendo que os ajustes das equações alternativas melhoram o desempenho dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Agrometeorologia. Calibração. Hidrologia. Métodos de estimativa.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN PARANÁ STATE

ABSTRACT: Evapotranspiration (ET_o) is the set of two processes: soil evaporation and water bodies and plants transpiration. The study of evapotranspiration is essential to determine the water balance of a region and the application of methods for estimating losses by evapotranspiration is necessary for the water availability in several regions, such as the quantification of water deficiencies in agricultural crops. ET_o can be determined by direct and indirect methods when there are data restrictions at the study site. Thus, this dissertation aimed to estimate the reference evapotranspiration in Paraná state using different methods, as well as to calibrate and evaluate the performance of the Hargreaves method (1985) (Hargreaves-Samani), in relation to the standard FAO Penman-Monteith method. Daily air temperature (maximum and minimum) and relative humidity (insolation and wind speed) data for 30-year evapotranspiration estimation (available from 1989 to 2018) were obtained from conventional weather stations at the National Institute of Meteorology (INMET) and Paraná Agronomic Institute (IAPAR). Gap filling was carried out of three stations; evapotranspiration was obtained by FAO 54 Penman-Monteith (1998), Makkink (1957), 1985 Hargreaves (Hargreaves-Samani), Priestley-Taylor (1972), FAO 24 Blaney-Criddle and Turc (1961) methods; the Hargreaves-Samani calibration was obtained by the Nonlinear Generalized Reduced Gradient (NRG) method and the data was validated through statistical analysis. The results indicate good applicability of alternative methods, and the Hargreaves-Samani equation significantly reduced errors after calibration. The analysis of daily evapotranspiration estimation data for the state of Paraná is indicated, and the adjustments of the alternative equations improve the performance of the results.

KEYWORDS: Agrometeorology. Calibration. Hydrology. Estimation Methods.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	14
3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	15
3.3.1 Velocidade do vento (U)	16
3.3.3 Temperatura do ar (T).....	17
3.3.4 Umidade relativa do ar (UR)	18
3.4 MÉTODOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.....	19
3.5 CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA	20
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21
5 CAPÍTULOS.....	24
5.1 CAPÍTULO 1 – ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARANÁ	24
1 INTRODUÇÃO	25
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
2.2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE DADOS	27
2.3 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO	28
2.3.1 Método de Penman-Monteith (PM-FAO) (ALLEN et al., 1998)	28
2.3.2 Método de Makkink (1957) (MK).....	30
2.3.3 Método 1985 Hargreaves (Hargreaves and Samani) (HS)	31
2.3.4 Método Priestley-Taylor (1972) (PT)	31
2.3.5 Método FAO 24 Blaney-Criddle (BC-FAO).....	32
2.3.6 Turc (1961).....	33
2.4 Análise estatística.....	33
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4 CONCLUSÕES	43
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

CAPÍTULO 2 – CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE HARGREAVES-SAMANI, PARA O ESTADO DO PARANÁ	46
1 INTRODUÇÃO	46
2 MATERIAL E MÉTODOS	47
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
2.2 OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	48
2.3 CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO HARGREAVES-SAMANI.....	50
2.4 VALIDAÇÃO DOS DADOS	50
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4 CONCLUSÕES	58
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala de Beaufort para a velocidade do vento	17
Tabela 2 - Classificação do índice de confiança ou desempenho (c)	34
Tabela 3 - Valores médios dos dados meteorológicos	38
Tabela 4 - Média geral dos valores diários estimados (1989 a 2015).....	39
Tabela 5 - Resultados obtidos pela correlação linear de Pearson (r)	40
Tabela 6 - ET0 anual em estações meteorológicas do Paraná.	42
Tabela 7 - Características das estações meteorológicas.	49
Tabela 8 - Dados meteorológicos utilizados para obtenção da evapotranspiração	51
Tabela 9 - Estatística descritiva dos dados amostrais de evapotranspiração	52
Tabela 10 - Coeficientes da equação de HS, após calibração.	53
Tabela 11 - Classificação do coeficiente de Pearson (COHEN, 1988)	58

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO UM

Figura 1 - Localização das estações meteorológicas do IAPAR-PR.	27
Figura 2 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Insolação.	35
Figura 3 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Umidade Relativa.....	36
Figura 4 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Velocidade do Vento.....	37
Figura 5 - Comparação dos valores de ET0 obtidos pelos métodos alternativos ao método padrão FAO-PM.....	41
Figura 6 - Estimativa anual de ET0 para o estado do Paraná.	43

CAPÍTULO DOIS

Figura 7 - Calibração da equação de Hargreaves-Samani.....	54
--	----

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural fundamental para a vida no planeta Terra. As regiões do planeta, onde esse recurso é escasso, apresentam dificuldades de uma forma geral. Já por outro lado, o excesso, pode causar prejuízos financeiros, sociais, entre outros, como é o exemplo de inundações em centros urbanos. Portanto, é de fundamental importância a compreensão do ciclo da água e seu comportamento numa determinada área/região, para a criação de mecanismos e até políticas públicas, com o objetivo de minimizar ou eliminar os impactos causados, pelo excesso ou escassez de água, na sociedade (MOREIRA, 2013).

Em Recursos Hídricos, o ciclo hidrológico tem papel fundamental, não só para o estudo de entradas de água, exemplo da precipitação, como também às perdas e saídas, caso da evapotranspiração, considerada a principal saída de água. A evapotranspiração relaciona-se a problemas de disponibilidade hídrica, tanto em escassez como em excesso, levando a eventos extremos de seca e cheia, principalmente, em regiões mais suscetíveis. No ciclo hidrológico, ela é um dos principais componentes, podendo afetar o clima e o comportamento hidrológico.

Para fins culturais, tornam-se importante estudos relacionados à evapotranspiração de referência, pois identifica a quantidade de água que um determinado solo necessita. A partir da disponibilidade hídrica, pode-se, então, estabelecer se essa região é indicada para o cultivo de determinada espécie vegetal ou se é necessário o uso de irrigação. O termo evapotranspiração de referência (ET₀) foi definido, por Doorenbos e Pruitt (1977), como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água.

O estudo da evapotranspiração é importante na determinação do balanço hídrico de uma região e a aplicação de métodos de estimativas de perdas, por evapotranspiração, é necessária para fins de disponibilidade hídrica em diversas regiões, como exemplo, a quantificação do nível de água que permanece disponível às culturas agrícolas, após o processo de evapotranspiração. Além disso, também quantifica, por meio de dados coletados em estações meteorológicas, o vapor de água disponibilizado à atmosfera.

A estimativa da ET₀ é de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, para a previsão da produção agrícola, à programação de irrigação e resolução de problemas no domínio da hidrologia e meteorologia (GOCIC; TRAJKOVIC, 2010).

Na utilização de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência, o processo de calibração é fundamental. Com ele, é possível utilizar equações que exigem um menor número de variáveis, uma vez que dados de elementos meteorológicos não estão disponíveis em determinada região.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar a evapotranspiração de referência do estado do Paraná, por meio de diferentes métodos; calibrar e validar a equação de Hargreaves-Samani, utilizando como base o método padrão FAO Penman-Monteith.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Estimar a evapotranspiração de referência do estado do Paraná, por meio do método padrão FAO-Penman-Monteith, e métodos alternativos de estimativas.

Calibrar a equação de Hargreaves-Samani, utilizando o método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) não-linear.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO

O balanço hídrico é a somatória das quantidades de água que entram e saem de uma certa porção do solo em um determinado intervalo de tempo. O resultado é a quantidade líquida de água que nele permanece disponível às plantas (TOMASELLA; ROSSATO, 2005).

O balanço hídrico é uma primeira avaliação de uma região, em que se determina a contabilização de água de uma determinada camada do solo, em que se definem os períodos secos (deficiência hídrica) e úmidos (excedente hídrico) (REICHARDT, 1990).

O método do balanço hídrico se refere à contabilidade hídrica do solo, ou seja, consiste no cômputo do ganho (entrada), perda (saída) e armazenamento de água no solo. A água é fornecida à superfície do solo por meio da precipitação e/ou irrigação. Quanto à precipitação, o grau de molhamento do perfil do solo depende da intensidade e duração da precipitação, além da topografia do terreno. Assim, em solos com topografia acentuada, predomina o processo de escoamento superficial, de forma que a duração da precipitação não constitui fator importante no molhamento do solo. Entretanto, solos com topografia suave favorecem a infiltração; a duração da precipitação torna-se um fator importante para o processo de molhamento do perfil do solo, principalmente, se a intensidade de precipitação é baixa (CAMPOS et al., 2007).

Para prover as disponibilidades hídricas no solo, necessárias à agricultura, não basta

considerar os dados pluviométricos do período. Eles correspondem apenas ao processo de suprimento de água natural para o uso das plantas. É necessário considerar também os processos de perda de água do solo para a atmosfera, devido à evapotranspiração, fazendo-se o balanço hídrico da água no solo (ALMEIDA, 1993).

No cálculo do balanço hídrico no solo, considera-se um volume de controle no campo delimitado por duas superfícies paralelas - a interface solo-atmosfera (limite superior do volume ou simplesmente superfície do solo) e uma superfície horizontal, localizada à profundidade do sistema radicular do cultivo (limite inferior do volume) (LIBARDI, 1995).

Os principais componentes do balanço hídrico para definir a demanda e disponibilidade hídrica são a precipitação (P), evapotranspiração real (ETR), evapotranspiração potencial ou de referência (ETP/ET₀), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC) (PEREIRA et al., 2002).

A evapotranspiração e a deficiência hídrica são os parâmetros indispensáveis para se determinar a produtividade da água em uma determinada região (RIBEIRO et al., 2015).

3.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

O conhecimento da evapotranspiração é de grande importância na estimativa da necessidade de irrigação das culturas e para o manejo racional dos recursos hídricos. Vários modelos de balanço hídrico são empregados para esses fins. Porém, existem carências de informações sobre a evapotranspiração e, devido às dificuldades de medida, essa é estimada com base nos valores da ET₀ e coeficiente da cultura (K_c) (CHAVES, 2015).

Os estudos relativos à evapotranspiração são importantes para subsidiar um adequado manejo de água, a gestão de recursos hídricos, além de contribuir para a conservação da biodiversidade. A evapotranspiração influi na disponibilidade de água e na distribuição da vegetação (DA SILVA et al., 2014).

Para a determinação da evapotranspiração, são utilizados métodos agrupados em categorias: empíricos; aerodinâmicos; balanço de energia; combinados; correlação dos turbilhões (PEREIRA et al., 1997a).

Na escolha de um método para a determinação da evapotranspiração, devem ser levados em consideração praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, eles também apresentam limitações, principalmente, quanto à precisão instrumental, o que pode restringir a sua utilização. Diante de tais limitações, ocorre certa tendência para a utilização de estações meteorológicas automatizadas, que auxiliam a determinar a evapotranspiração de referência, diminuindo, assim, por exemplo, erros na lâmina de água a ser aplicada à cultura (BORGES, 2011).

Como algumas regiões ainda não possuem estações automáticas, utilizam-se dados meteorológicos provenientes de estações de uso convencional. Segundo Berlatto e Molion (1981), os fatores meteorológicos, utilizados nos métodos de estimativa, que condicionam a evapotranspiração em grau de importância, são, em ordem: radiação solar; temperatura; vento e umidade do ar, sendo que os métodos baseados na radiação solar são os mais adequados para estimativa da ET₀, pois a maior fonte de energia disponível para o fenômeno provém da radiação. Na falta de informações sobre radiação solar, vários softwares de cálculo de evapotranspiração utilizam dados de insolação, nebulosidade.

3.3.1 Velocidade do vento (U)

A velocidade do vento expressa a distância percorrida pelo vento em um determinado intervalo de tempo. É medida a 10 m de altura (para fins meteorológicos) ou 2 m (para fins agrônômicos). Normalmente, é expressada em metros por segundo ($m\ s^{-1}$), quilômetros por hora ($km\ h^{-1}$) ou knots (kt) (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009).

A velocidade do vento é um elemento climático necessário no cálculo da evapotranspiração, pois o processo de remoção do vapor de água depende, em grande parte, do vento e da turbulência que transfere o ar sobre a superfície evaporante. O vento remove a camada de ar acima da superfície evaporante, criando uma condição favorável à formação de um gradiente de pressão de vapor, o que aumenta, dessa forma, o poder evaporante no local (LIMA, 2005).

Sob condições climáticas úmidas, a alta umidade do ar e a presença de nuvens tornam a taxa de evapotranspiração mais baixa. Nessa condição, o vento substitui o ar saturado pelo ar não saturado e, conseqüentemente, remove a energia de calor latente. No entanto, a velocidade do vento afeta a taxa de evapotranspiração a um menor grau do que sob condições áridas, em que pequenas variações na velocidade do vento podem resultar em variações maiores na taxa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

Segundo Pereira et al. (1997a), a evapotranspiração, em áreas vegetadas, circundadas por áreas secas, é maior na interface dessas áreas e decresce com a distância à medida que o vento avança na área úmida. Nesse local, a evapotranspiração diminui na direção dos ventos predominantes até um valor limite inferior, que é resultante somente do balanço vertical de energia.

Quando o registro de dados de velocidade do vento foi perdido ou não é feito em uma estação meteorológica, suas interações com a temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor e outros são difíceis de se estimar por equações. Assim, a importação de dados de velocidade do vento de uma estação meteorológica próxima é uma opção quando tais dados não estão disponíveis para determinado local, desde que caracterizada a

homogeneidade de condições de clima. Dessa forma, os dados de uma estação próxima podem ser importados quando as massas de ar são de mesma origem ou as mesmas frentes governam fluxos de ar na região onde o relevo é semelhante (LIMA, 2005).

Pereira et al. (2002) citam que a velocidade do vento pode ser categorizada de acordo com a interação com objetos naturais, gerando uma escala de percepção que se tem da movimentação atmosférica. É uma categorização empírica, associando-se a velocidade registrada com eventos característicos (Tabela 1).

Tabela 1 - Escala de Beaufort para a velocidade do vento

Grau	Descrição	Velocidade (km h ⁻¹)
0	Calmaria	0–2
1	Vento calmo	2–6
2	Brisa amena	7–11
3	Brisa leve	12–19
4	Brisa moderada	20–29
5	Brisa forte	30–39
6	Vento forte	40–50
7	Vento muito forte	51–61
8	Vento fortíssimo	62–74
9	Temporal	75–87
10	Temporal forte	88–101
11	Temporal muito forte	102–117
12	Tornado, furacão	>118

Essa escala ajuda a interpretar os dados de velocidade máxima do vento (rajadas), medidos nas estações meteorológicas convencionais (a 10 m de altura) (SENTELHAS; ANGELOCCI, 2009).

3.3.3 Temperatura do ar (T)

A temperatura do ar indica o quanto o ar está sendo aquecido ou resfriado pela energia solar e pela superfície. No Brasil, a unidade de medida da temperatura é o Celsius ou centígrado (°C), sendo internacionalmente aceita e recomendada para o intercâmbio de dados. A escala absoluta (Kelvin; K) é usada para fins científicos e, em alguns países, utiliza-se a escala Fahrenheit (°F) (ALMEIDA, 2016).

Dentre os elementos climáticos, a temperatura do ar tem a maior influência direta e

significativa sobre muitos processos fisiológicos que ocorrem na natureza. Ela está relacionada, por exemplo, com o desenvolvimento e crescimento das plantas, devido ao seu efeito na velocidade das reações químicas e dos processos internos de transporte (PEREIRA et al., 2002).

Devido à sua grande importância, a temperatura é o principal elemento climático medido nas estações meteorológicas, porém, a estimativa da temperatura diária é complexa, quando não é medida em determinada estação. Por isso, existem modelos que estimam as temperaturas média mensal e anual, a partir da latitude, longitude e altitude (LIMA, 2005).

3.3.4 Umidade relativa do ar (UR)

Umidade relativa do ar, de um determinado local, é a relação entre a quantidade de vapor de água (g/m^3), o volume e a temperatura da atmosfera. Segundo Sentelhas e Angelocci (2009), o teor de vapor d'água na atmosfera varia de 0 a 4% do volume de ar. Isso quer dizer que, em uma dada massa de ar, o máximo de vapor d'água que ela pode reter é 4% de seu volume.

A UR tem interferência, por exemplo, na produção para fins agrícolas. Em regiões de baixa umidade relativa do ar, temperaturas elevadas, solos pouco úmidos e fortes rajadas de ventos, os frutos não conseguem manter o equilíbrio hídrico, ocasionado, assim, queda de flores, frutos e folhas. Como exemplos de plantas que perdem grande quantidade de frutos, é possível citar a manga, a maçã e os citros (FIORIN, 2015).

De acordo com a lei de Dalton, a pressão atmosférica (P_{atm}) é igual à soma das pressões parciais exercidas por todos os constituintes atmosféricos. Isso pode ser representado, resumidamente, pela Equação 1:

$$P_{\text{atm}} = P_{\text{Ar Seco}} + P_{\text{H}_2\text{Ov}} \quad \text{Eq. (1)}$$

A pressão parcial, exercida pelo vapor d'água ($P_{\text{H}_2\text{Ov}}$), é simbolizada pela letra "e". Para a condição de saturação, ou seja, para o máximo de vapor d'água que o ar pode reter, utiliza-se o símbolo "es" e, para a condição de ar úmido, ou seja, para a condição real de vapor d'água no ar, utiliza-se o símbolo "ea". Portanto, para se obter a umidade relativa (UR, em %), tem-se a seguinte Equação 2:

$$\text{UR} = \frac{ea}{es} * 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que: "ea" e "es" são expressos em unidade de pressão (atm, mm Hg, mb, hPa ou kpa).

Para obtenção da pressão de saturação de vapor (e_s), utiliza-se a temperatura do ar na seguinte Equação 3:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 273,3}\right) \quad \text{Eq. (3)}$$

A determinação da pressão real de vapor (e_a) pode se efetivar, de forma mais simples, pela Equação 4 abaixo, em que se conhece a umidade relativa e a temperatura do ar, utilizada para calcular o “ e_s ” na equação anterior.

$$e_a = (UR * e_s)/100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em locais nos quais não existem dados de umidade do ar, uma estimativa da “ e_a ” pode ser obtida quando a $T_{\text{Mín}}$ do ar diária equivale à temperatura do ponto de orvalho (T_o). A relação de T_o ser, equivalente a $T_{\text{Mín}}$, é verdadeira em locais onde a cultura é bem irrigada. Porém, particularmente, em regiões áridas, o ar pode não estar saturado quando sua temperatura está em seu mínimo. Uma explicação para isso é o grande “reservatório” de calor sensível, criado durante o dia, na atmosfera, que é transferido para a superfície durante a noite, reduzindo o resfriamento pela radiação de onda longa (LIMA, 2005).

3.4 MÉTODOS INDIRETOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A escolha de um método de estimativa da evapotranspiração potencial depende basicamente de três fatores: da disponibilidade de dados meteorológicos, pois métodos complexos, que exigem grande número de variáveis, somente terão aplicabilidade quando houver disponibilidade de todos os dados necessários; da escala de tempo requerida, pois existem métodos melhor calibrados na escala mensal e outros na escala diária; e da necessidade de conhecimento das condições climáticas para as quais foram desenvolvidos ou calibrados (PEREIRA et al., 1997a).

Dentre o grande número de métodos indiretos, existentes para estimativa da ET_0 , a Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) consideram o método de Penman-Monteith (PMF), proposto por Allen et al. (1998), como padrão para a estimativa dessa variável, principalmente, em escala diária, por combinar componentes aerodinâmicos e de balanço de energia (MINUZZI et al., 2014).

Segundo Alcântara et al. (2014), o método de Penman-Monteith-FAO (PMFAO) requer, como variáveis meteorológicas de entrada, a radiação, a temperatura do ar, a umidade do ar e os dados de velocidade do vento. Mas, nem sempre todos esses dados estão

disponíveis para uma dada localidade ou região. Assim, outros métodos, que não necessitam de tantas variáveis para a obtenção da evapotranspiração de referência, também são utilizados.

Segundo Chagas et al. (2013), o método de FAO-Penman-Monteith é o mais utilizado para estimativa da ET_0 , por ser o que melhor se ajusta a valores de medida em lisímetros; porém, há uma necessidade de se pesquisar métodos alternativos de estimativa, que necessitem de um menor número de informações meteorológicas e que se ajustem às diferenças climatológicas de cada região de interesse.

Dentre os métodos alternativos, destaca-se: Makkink, Radiação Solar, Linacre, Hargreaves e Samani (HeS). Makkink e Radiação Solar levam em consideração a irradiância solar global, ou seja, tem como princípio a quantidade de energia que chega à superfície e é utilizada para os processos de evaporação e transpiração. O método Linacre também é bastante simples e amplamente utilizado, pois a temperatura é a única variável de entrada. Por fim, HeS é um método um pouco mais complexo, que utiliza a irradiância solar extraterrestre e a temperatura na estimativa da evapotranspiração de referência (ALCÂNTARA et al., 2014).

Fanaya Júnior et al. (2012) avaliaram o desempenho de diferentes métodos nas escalas diária, quinzenal e mensal, na região de Aquidauana-MS, e observaram que o método de Priestley e Taylor (1972) obteve o melhor desempenho dentre os analisados. No período quinzenal, o método de Hargreaves-Samani obteve desempenho superior, sendo de grande utilidade para quando não há dados de radiação solar.

Borges e Mendingo (2007) compararam equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na bacia do Rio Jacupiranga, estado de São Paulo, e concluíram que, para a localidade, as equações originais de Hargreaves e Camargo, com confiabilidade superior a 0,9, atenderam mais satisfatoriamente à estimativa da ET_0 , na região da bacia. Isso embora as equações de Hargreaves, Camargo, Kharrufa, Hamon, Blaney-Criddle e Thornthwaite também sejam aceitáveis para a área de estudo.

3.5 CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMATIVA

A equação de Penman-Monteith FAO-56 é padrão para estimar a evapotranspiração de referência (ET_0), na escala diária e mensal em todos os climas; pode ser utilizada globalmente sem qualquer calibração local e até para estimativas horárias, devido à incorporação de parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. O processo de cálculo exige medições confiáveis de elementos meteorológicos, como a temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento (LIMA JÚNIOR et al., 2016).

Quando há um número limitado de variáveis meteorológicas, medido em determinada

estação, há necessidade de busca por métodos alternativos, que demandem menor quantidade de variáveis meteorológicas para estimar a ET₀, como uma solução viável para contornar esse problema (FERNANDES et al., 2012).

Qualquer método de estimativa de evapotranspiração necessita de cuidados ao ser aplicado, pois alguns podem sub ou superestimar os resultados que representam; por exemplo, a quantidade de água que deve ser reposta em um solo, trazendo resultados finais insatisfatórios, de forma que pode conduzir ao inadequado manejo da água, afetando a produtividade (VESCOVE; TURCO, 2005). Faz-se, assim, necessária a calibração de cada método. A calibração pode ser feita utilizando-se equações simples, complexas ou mesmo softwares.

Segundo Lima (2017), antes de aplicar um método de estimativa da evapotranspiração de referência, para determinado local, é necessário verificar o desempenho desse método e, quando necessário, fazer calibrações a fim de minimizar erros de estimativa. Esse desempenho tem sido analisado com a comparação dos métodos alternativos ao método de Penman-Monteith FAO-56.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, C. R.; DA SILVA, G. J. F.; DE ALMEIDA CALDAS, R. Comparação entre diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração de referência para Juazeiro- BA. **OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa-PB, v. 8, n. 1, p. 156-179, 2014.

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

ALMEIDA, J. P. **Estimativa de déficits e excessos hídricos em regiões de clima úmido através de diferentes modelos de balanço hídrico**. 1993. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

ALMEIDA, H. A. de. **Climatologia aplicada à geografia**. 2016.

BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. Evaporação e evapotranspiração. **Boletim Técnico**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas – Departamento de Pesquisa. Secretaria da Agricultura, 1981. 95p.

BORGES, A. C., MENDIONDO, E. M. Comparação das equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

BORGES, C. J. R. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivos simples e dual da cana-de açúcar cultivada em condições tropicais**. Orientadores: Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva/Dr. Carlos Henrique de Azevedo Farias. 2011. 85 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade de Campina Grande, Campina Grande/PB, 2011.

CAMPOS, J. H. B.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; BORGES, C. J. R.; SOARES, J. M.; MOURA, M. S. B.; SILVA, B. B. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB, v. 12, n.2, p. 150-156, 2007.

CHAGAS, R. M.; FACCIOLI, G. G.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; VASCO, A. N.; SILVA, M. G. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) no município de rio Real - BA. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 351-363, 2013.

CHAVES, L. H. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Jaboticabal-SP**. Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco. 2015. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

DA SILVA, J. R. L.; DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, A. A.; DOS SANTOS, T. E. M.; DOS SANTOS, E. S. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Fernando de Noronha. **Irriga**, Botucatu-SP, v. 19, n. 3, p. 390, 2014.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. Crop water requirement. Rome: FAO, 1977. 144p. FAO **Irrigation and Drainage**. Paper 24, 1997.

FANAYA JÚNIOR, E. D.; LOPES, A. S.; OLIVEIRA, G. Q.; JUNG, L. H. Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Aquidauana, MS. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 418-434, 2012.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.F.; AMORIN, A. O. Calibração regional e local da equação de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de 38 referência. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 43, n.2, p. 246-255, 2012.

FIORIN, T. T. **Climatologia agrícola**. Tatiana Taschetto Fiorin, Meridiana Dal Ross. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico; Rede e-Tec Brasil, 2015.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n.2, p. 158-162, 2010.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba/SP: ESALQ – Departamento de Física e Meteorologia, 1995. 497 p.

LIMA, E. de P. **Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais**. Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. 2005. 67 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

LIMA, L. G. S. **Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves em clima subtropical**. Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco. 2017. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D.A.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 47, n.3, p. 447-454, 2016.

MINUZZI, R. B., RIBEIRO, A. J., DA SILVA, D. O., & KUNESKI, A. C. Estimativa da evapotranspiração de referência diária por Penman-Monteith FAO com dados de temperatura do ar para Santa Catarina. *Irriga*, v. 19, n. 4, p. 548-558, 2014.

MOREIRA, A. Á. C.I. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Rio Granjeiro–Crato-CE: composição do cenário atual e simulações de uso e ocupação do solo.** Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Lacerda Tavares. 2013. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia hidráulica e ambiental, programa de Pós-graduação em Engenharia civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

PEREIRA, A. R.; VILA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração.** Fundação de Estudos Agrários. Luiz de Queiroz: FEALQ, Piracicaba, 183p. 1997a.

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

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** Barueri (SP): Manole, 1990.

RIBEIRO, A. A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A. R. B. Balanço hídrico climatológico para os municípios de Piripiri e São João do Piauí, Piauí, Brasil/Water climatological balance for municipalities of Piripiri and Sao Joao do Piauí, Piauí, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã-SP, v. 9, n. 3, p. 228-235, 2015.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Meteorologia Agrícola.** USP/ESALQ. 2009.

OLIVEIRA, KEPLER S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia & Astrofísica.** 2ª ed. Departamento de Astronomia – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora livraria da Física, 2004.

TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.** Balanço Hídrico. São José dos Campos. 2005. Disponível em: http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/iris@1915/2005/04.14.13.12/doc/Rodriguez_Balanco%20hidrico.pdf?metadataarepository=sid.inpe.br/iris@1915/2005/04.14.13.12.24&mirror=cptec.inpe.br/walmeida/2003/04.25.17.13. Acesso em: 23 abr. 2020.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 713-721, 2005.

5 CAPÍTULOS

5.1 CAPÍTULO 1 – ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARANÁ

RESUMO: Evapotranspiração de referência é a união dos processos de evaporação do solo, corpos hídricos e a transpiração das plantas, sendo efetivada como a principal saída de água no ciclo hidrológico. Considerando sua importância, o presente artigo objetivou a composição dos dados faltantes em banco de dados meteorológicos, assim como a estimativa da evapotranspiração de referência, em escala diária e anual, por meio de equações de estimativa e comparação dos valores obtidos, com base nos métodos alternativos, com os valores obtidos pelo método padrão FAO Penman-Monteith. A metodologia consistiu no preenchimento de falhas meteorológicas do banco de dados, por meio de média aritmética simples, na obtenção da evapotranspiração de referência, no estado do Paraná, com as equações FAO 54 Penman-Monteith (1998), Makkink (1957), Hargreaves (1985) (Hargreaves and Samani), Priestley-Taylor (1972), FAO 24 Blaney-Criddle e Turc (1961). Os menores valores foram registrados por Makkink e os maiores por Hargreaves and Samani. Em relação à mínima, foi registrada de 989,26 mm ano⁻¹, com a equação de Makkink, e a máxima de 1462,44 mm ano⁻¹, com Hargreaves and Samani. Penman-Monteith registrou valores médios em relação aos demais métodos, com picos máximos nos anos de 1991, 1994, 1999 e 2012; e mínimos em 1998 e 2009. As equações alternativas de estimativa de preenchimento de falhas aplicadas à área de estudo se mostraram eficientes ao serem comparadas ao método padrão FAO, podendo ser utilizadas como opção em estudos relacionados.

PALAVRAS-CHAVE: Estimativa de Evapotranspiração. Métodos alternativos. Penman-Monteith.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE IN PARANÁ STATE

ABSTRACT: Reference evapotranspiration is the combination of soil evaporation process, water bodies and plants transpiration, being considered the main water outlet in the hydrological cycle. Considering its importance, this paper aimed to compose the missing data in a meteorological database, as well as to estimate the reference evapotranspiration, on a daily and annual scale, using estimating equations and comparing the values obtained using alternative methods with the values obtained by the standard FAO Penman-Monteith method. The methodology consisted of gap filling meteorological flaws in the database by means of simple arithmetic mean, obtaining reference evapotranspiration in Paraná state with the FAO 54 Penman-Monteith equations (1998), Makkink (1957), 1985 Hargreaves (Hargreaves and Samani), Priestley-Taylor (1972), FAO 24 Blaney-Criddle and Turc (1961). The lowest values were recorded by Makkink and the highest by Hargreaves and Samani. The minimum recorded was 989.26 mm year⁻¹, with the Makkink equation and the maximum was 1462.44 mm year⁻¹, with Hargreaves and Samani. Penman-Monteith recorded average values in relation to the other methods, with maximum peaks in the years 1991, 1994, 1999, 2012, and minimum in 1998 and 2009. Alternative equations for estimating gap filling applied to the study area proved to be efficient when compared to the standard FAO method and can be used as an option in related studies.

KEYWORDS: Evapotranspiration estimation. Alternative methods. Penman-Monteith.

1 INTRODUÇÃO

Evapotranspiração é o conjunto de dois processos: evaporação e transpiração. Evaporação é o processo de transferência de água em forma líquida para vapor diretamente de superfícies como lagos, rios, reservatórios, poças e gotas de orvalho. A água que umedece o solo também pode ser transferida para a atmosfera diretamente por evaporação. Mais comum, nesse caso, entretanto, é a transferência de água com base no processo de transpiração. A transpiração envolve a retirada da água do solo pelas raízes das plantas, o transporte da água, através da planta até as folhas, e a passagem da água para a atmosfera, através dos estômatos da folha (COLLISCHONN et al., 2008).

A evapotranspiração pode ser do tipo Real, de Oasis, da Cultura ou de Referência. A Evapotranspiração de Referência (ET₀), também chamada de Evapotranspiração Potencial, representa as condições tidas como ideais, sendo: um solo totalmente coberto por vegetação, em condições de contorno controladas, perdendo água em forma de vapor pela transpiração das plantas, evaporação do solo e corpos hídricos.

A Evapotranspiração de Referência tem sua importância para fins ambientais e sociais, como previsão de secas e cheias, fins agrícolas, a exemplo da determinação da demanda hídrica da cultura. Sendo considerada a maior perda de água no ciclo hidrológico, pode determinar condições climáticas locais, assim como em regiões mais distantes.

A demanda evaporativa da atmosfera é caracterizada por elementos meteorológicos como: precipitação, velocidade do vento, umidade e temperatura do ar. Depende diretamente da disponibilidade de energia e de água no solo, plantas, superfícies líquidas. Nos métodos de estimativa da evapotranspiração, cada um desses elementos torna-se uma variável determinante na obtenção de um resultado final preciso.

Em medições meteorológicas, feitas de modo manual nas estações meteorológicas de uso convencional, pode haver falhas. Essa falha, em dados meteorológicos, efetiva-se por falta de medição, medições erradas, ou mesmo anotações e tratamento dos dados em planilhas, por exemplo. Assim, é imprescindível o preenchimento de falhas por meio de equações, utilizadas em programas simples ou softwares, desenvolvidos especialmente para esses fins.

A ET₀ pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos os que utilizam lisímetros (método mais preciso, lisímetro de pesagem), parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo, método de entrada e saída de água em grandes áreas. Porém, por apresentarem custos elevados, seu uso tem ficado restrito a instituições de pesquisas, tendo sua utilização justificada na calibração regional de métodos indiretos (BERGAMASCHI et al. 2004).

Com restrições para o uso de métodos diretos, opta-se pelo uso dos métodos indiretos,

os quais são compostos por modelos e/ou equações matemáticas, sendo considerados métodos de estimativa de evapotranspiração, muitas vezes, empíricos. Os métodos indiretos são alternativas e apresentam bons resultados para a estimativa da evapotranspiração em diferentes localizações.

Portanto, o presente estudo objetivou estimar a ET_0 , em escala diária e anual, por meio de equações de estimativa, bem como a comparação dos valores de ET_0 , obtidos por meio de métodos alternativos, com os valores alcançados por meio da utilização do método padrão FAO Penman-Monteith.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o estado do Paraná, localizado entre as coordenadas $22^{\circ} 30' 58''$ e $26^{\circ} 43' 00''$, de latitude Sul, e $48^{\circ} 05' 37''$ e $54^{\circ} 37' 08''$, de longitude Oeste; encontra-se no Planalto Meridional e na Região Sul do Brasil. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017), a densidade demográfica do Estado é 52,40 hab km^2 , em uma área de 199.305,236 km^2 .

A hidrografia do Paraná pode ser classificada em cinco bacias hidrográficas: Bacia do Rio Paraná, cujos afluentes mais importantes são os rios Piquiri e Ivaí; Bacia do Rio Paranapanema, drenada pelos rios Pirapó, Tibagi, das Cinzas e Itararé; Bacia do Rio Iguaçu, que tem como principais afluentes o rio Chopim, no sul do estado, e o rio Negro, no limite com o Estado de Santa Catarina; Bacia do Rio Ribeira do Iguape, cujas águas seguem para o rio Ribeira do Iguape; Bacia Atlântica ou do Litoral Paranaense, cujas águas seguem direto para o Oceano Atlântico.

O relevo é formado por três planaltos: Primeiro Planalto ou Planalto de Curitiba; Segundo Planalto ou Planalto de Ponta Grossa e Terceiro Planalto ou de Guarapuava. Os solos encontrados no Paraná são das ordens: Neossolos, Cambissolos, Argissolos, Nitossolos, Latossolos, Espodossolos, Gleissolos e Organossolos.

O Paraná tem uma temperatura do ar média anual que varia entre 15 e 24°C. Os valores mais altos e mais baixos foram observados nas regiões noroeste e sudeste, respectivamente. Os índices pluviométricos do Estado variam entre 1100 e 1920 mm anuais. Chuvas anuais, acima de 1800 $mm\ ano^{-1}$, foram mapeadas, principalmente, nas partes sudeste e sudoeste, aumentando com a latitude. A precipitação anual inferior a 1200 $mm\ ano^{-1}$ ocorre nas regiões setentrionais (APARECIDO et al., 2016).

Segundo Aparecido et al. (2016), o Estado do Paraná mostra 2 grupos (A e C) e 4 classes climáticas (A_w , C_w , CFA e CFB), de acordo com a classificação climática de Köppen.

A classe climática com maior predominância foi a Cfa, representando 50% da área. A classe Cfb foi o segundo maior, representando 39,8% da área, sendo que ocorrem em áreas de alta altitude. As classes Aw e CWA foram observadas apenas no Norte, representando apenas 5,7 e 4,3% do Estado, respectivamente. Em relação ao clima Aw (úmido savana tropical), a estação mais seca coincide com o inverno; a precipitação máxima, nos meses mais secos, tende a ser inferior a 60 mm mês⁻¹. Em relação ao clima Cwa (clima temperado úmido, com inverno seco), o verão é quente, com a temperatura do ar, no mês mais quente, ficando acima de 22°C; a precipitação média é inferior a 60 mm em pelo menos um dos meses da temporada. O Cfa (clima temperado úmido, com verão quente) e Cfb (clima temperado úmido, com verão moderadamente quente) são climas oceânicos sem uma estação seca.

Devido a condições, como boa fertilidade dos solos, abundância de águas e relevo relativamente plano, o Estado do Paraná é um dos maiores produtores brasileiros de grãos do país, como milho, soja, sendo o maior produtor de feijão. É um dos maiores produtores brasileiros de culturas permanentes, a exemplo do abacate, café, caqui, erva-mate e culturas temporárias, como cana-de-açúcar.

2.2 METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE DADOS

Os dados meteorológicos, diários de 27 anos (1989 a 2015), foram obtidos de 16 estações meteorológicas convencionais, distribuídas em todas as regiões do Estado do Paraná, e fornecidos pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) (Figura 1).

Figura 1 - Localização das estações meteorológicas do IAPAR-PR



As estações do IAPAR são de acionamento mecânico, com leituras às 09, 15 e 21 h. As variáveis monitoradas são: Temperatura do ar (Média, Máxima e Mínima), Temperatura do Solo, Precipitação, Ocorrência de Geadas, Umidade Relativa do Ar, Insolação, Radiação Solar, Velocidade e Direção dos Ventos, Evaporação, Fenômenos Diversos (trovoada, relâmpago, granizo, outros).

Os dados analisados, para o presente artigo, são temperatura máxima do ar (TM_{ax}) (°C), temperatura mínima do ar (TM_{ín}) (°C), temperatura média do ar (TM_{éd}) (°C), umidade relativa do ar (UR) (%), precipitação (mm d⁻¹), insolação (Insol.) (h) e velocidade do vento (U₂) (acumulado em m s⁻¹).

Para as estações que possuíam séries históricas incompletas, as falhas do banco de dados meteorológicos foram preenchidas por meio de equações, utilizando o Excel. Utilizou-se a Média Aritmética Simples para o preenchimento de falhas diárias, ou seja, fez-se a média dos demais dias do mês que possuíam dados.

Para falhas mensais, meses que possuíam falhas, em todo o período, utilizou-se a Média Aritmética de três estações que possuíam dados (Equação 1). Foram consideradas, como critério, as estações utilizadas para preenchimento, que possuíam dados completos, as quais estavam localizadas em regiões meteorológicas semelhantes, com proximidade das estações e altitudes menos discrepantes. Os elementos meteorológicos que possuíam falhas foram umidade relativa média do ar, velocidade do vento, insolação e precipitação.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que: “xi” representa os elementos do conjunto de dados e “n” o número de elementos da amostra.

2.3 ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Após análise e definição do banco de dados, a evapotranspiração da área de estudo foi calculada, utilizando o Software Ref-ET, versão 4.1, da Universidade de Idaho (Richard G. Allen). Foram considerados resultados obtidos por meio das seguintes equações: FAO 54 Penman-Monteith (1998), Makkink (1957), Hargreaves (1985) (Hargreaves and Samani), Priestley-Taylor (1972), FAO 24 Blaney-Cridle e Turc (1961).

2.3.1 Método de Penman-Monteith (PM-FAO) (ALLEN et al., 1998)

A estimativa da evapotranspiração por meio desse método requer os seguintes dados

meteorológicos de entrada: radiação solar global, temperaturas máxima, mínima e média do ar, velocidade média do vento, umidade relativa máxima e mínima do ar. Outros dados também são considerados, como altitude, latitude, pressão atmosférica, insolação. A Equação 2 descreve sua aplicação.

$$ET_{o(PMF)} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

ET_o (PMF) - evapotranspiração de referência, segundo o método de Penman-Monteith (mm d^{-1});

Rn - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m^{-2}); G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m^{-2});

T - temperatura do ar, a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$);

U_2 - velocidade de vento, a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s - pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a - pressão parcial de vapor (kPa);

$e_s - e_a$ - déficit de pressão de vapor de saturação (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e

γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Na falta de um saldo-radiômetro, é possível estimar os valores diários de Rn , medindo-se ou estimando Q_g , além de usar o valor adequado de r para a superfície de trabalho, aplicando-se esses valores à expressão de BOC (balanço de ondas curtas). O BOL (balanço de ondas longas) pode ser estimado por equações empíricas, como a de Brunt, que envolve a lei de Stefan-Boltzman, corrigida para condições de umidade (e_a) e nebulosidade (n). O saldo de radiação será estimado a partir da Equação 3:

$$Rn = BOC + BOL = [Qg(1 - r)] + \{ -(\sigma * T^4 * (0,56 - 0,25\sqrt{e_a}) * (0,1 + 0,9n/N) \} \quad \text{Eq. (3)}$$

Assim, emprega-se o BOL para clima úmido em $\text{MJ m}^{-2}\text{d}$; T em Kelvin - $273 + T$ em $^{\circ}\text{C}$;

Q_g - radiação solar global (MJ m^{-2});

σ - constante de Stefan-Boltzman ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); r - albedo de culturas = 0,2;

n - número de horas de brilho do sol ou insolação; N - foto período em horas.

A exemplo do que ocorre com o saldo de radiação, poucas estações meteorológicas possuem registros do fluxo de calor no solo; assim, devido aos baixos valores de "G", normalmente, registrados em escala diária, pode-se considerá-lo como sendo igual a zero, quando não houver medições disponíveis (ALLEN et al., 1998).

Quando o valor de "U₂" não estiver disponível, Allen et al. (1998) sugerem um valor médio fixo igual a 2,0 m s⁻¹, que é a média obtida em 2000 estações ao redor do mundo. Esse valor, entretanto, é mais representativo para escalas mensais, já que, para valores diários, a utilização de um valor fixo de "U₂" pode resultar erros significativos. Ressalta-se que os dados de velocidade do vento, medidos nas estações, são de 10 m da superfície do solo (U₁₀) e ajustados para a altura de dois metros, utilizando-se a equação de função do vento, Equação 4, abaixo.

$$U_{2m} = 0,748 * U_{10m} \quad \text{Eq. (4)}$$

O valor de "Δ" é calculado pela seguinte expressão, Equação 5:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{12,27 T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad \text{Eq. (5)}$$

Assim, "exp" refere-se à base do logaritmo natural "e" (2,71828), elevada ao valor que está entre parênteses.

De acordo com o boletim da FAO Nº 56 (1998), para calcular o Δ, emprega-se a TMéd.

O coeficiente "γ" é calculado, empregando-se a Equação 6:

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} * Patm \quad \text{Eq. (6)}$$

Dessa forma, "Patm" pode ser calculada com base na altitude do local (z) em metros, Equação 7:

$$Patm = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Eq. (7)}$$

2.3.2 Método de Makkink (1957) (MK)

O método de Makkink (1957) é uma simplificação do método original de Penman (1948), eliminando o termo aerodinâmico. Portanto, o saldo de Radiação é substituído pela

radiação solar global, justificando, na época, a grande dificuldade de se obter dados do Saldo de Radiação. O método de MK é descrito na Equação 8:

$$ET_{0(MK)} = 0,61 * W * R_g - 0,12 \quad \text{Eq. (8)}$$

Sendo:

ET₀ (MK) - evapotranspiração de referência, segundo o método de Makkink (mm d⁻¹);

R_g – radiação Solar Global (MJ m⁻² d⁻¹);

W – fator de ponderação, calculado pela Equação 9:

$$W = \left(0,392 + \left((3 * 10^{-5}) * z \right) \right) + 0,0175 * t_{med} - 0,0001 * t_{med}^2 \quad \text{Eq. (9)}$$

Em que: Z – Altitude do local (m); t_{med} – temperatura média do ar (°C).

2.3.3 Método 1985 Hargreaves (Hargreaves and Samani) (HS)

Hargreaves e Samani recomendam uma equação mais simples para estimar radiação solar, utilizando a diferença de temperatura; no ano de 1985, propuseram a seguinte Equação (10) para estimativa da ET₀, utilizando apenas os valores das Temperaturas máxima, mínima e média do ar, além da radiação no topo da atmosfera:

$$ET_0 = \alpha \cdot (T_{max} - T_{min})^\beta (T_{med} + 17,8) R_a \cdot 0,408 \quad \text{Eq. (10)}$$

Assim: α é um parâmetro empírico, sendo utilizado o seu valor original de 0,0023; β é um parâmetro empírico exponencial, sendo seu valor original de 0,5. A temperatura média, obtida por meio da metodologia, é descrita por Allen et al. (1998) (Equação 11).

$$T_{med} = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad \text{Eq. (11)}$$

2.3.4 Método Priestley-Taylor (1972) (PT)

O Método de Priestley-Taylor é uma simplificação das equações de Penman e de Penman-Monteith. Esse método considera que a ET, resultante do poder evaporante do ar, é uma porcentagem da ET, condicionada pelo termo energético. Assim, a equação considera o

balanço de energia, mas também possui um componente empírico adimensional, assumindo o valor de 1,26 (SENTELHAS & ANGELOCCI, 2009). Suas variáveis de entrada são: saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar, por meio da seguinte Equação (12).

$$ET_0 = 1,26 \left[\frac{\Delta}{(y+\Delta)} \right] * (R_n - G) \quad \text{Eq. (12)}$$

Assim:

ET₀-evapotranspiração de referência (mm d⁻¹)

Γ-constante psicrométrica (kPa/°C)

Δ-derivada da função de saturação de vapor de água

R_n-radiação útil, recebida pela cultura de referência (mm d⁻¹)

G-fluxo de calor, recebido pelo solo (mm d⁻¹)

2.3.5 Método FAO 24 Blaney-Criddle (BC-FAO)

Esse método foi desenvolvido na região oeste dos Estados Unidos, sendo recomendado para regiões em que as temperaturas são mais estáveis; porém, outros parâmetros climáticos são mais instáveis, utilizam dados de temperatura e dados gerais de umidade, insolação e velocidade do vento (FOOLADMAND & AHMADI, 2009), conforme a Equação 13:

$$ET_0 = a + b * [p * (0,46 * T_m + 8)] \quad \text{Eq. (13)}$$

$$a = 0,0043 \times UR_{\min} - \left(\frac{n}{N} \right) - 1,41$$

$$b = 0,81917 - 0,0041 \times UR_{\min} + 1,0705 \times \frac{n}{N} + 0,06565 \times U_2 - 0,00597 \times UR_{\min} \times \frac{n}{N} - 0,000597 \times UR_{\min} \times U_2$$

Assim:

p-percentagem mensal de horas de luz solar, em relação ao total anual.

T-temperatura média do período, em °C;

UR_{min}-umidade relativa mínima do período, em %;

n-insolação do período (número real de horas de brilho solar);

N-foto período (número máximo de horas de brilho solar) e,

U₂-velocidade do vento a 2 m, em m s⁻¹.

2.3.6 Turc (1961)

Para a aplicação do Método de Turc, são necessários dados de: umidade relativa do ar (%), nebulosidade (n/N), temperatura média mensal do ar (°C) e latitude (m). As equações empregadas são as seguintes (Equações 14 e 15):

$$ET0-0013*[T / (T+15)]*(Rs+50)*[1 + (50-UR) / 70] \text{ para } UR < 50\% \text{ e} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$ET0-0,013*[T / (T+15)]*(Rs+50) \text{ para } UR \geq 50\% \quad \text{Eq. (15)}$$

2.4 Análise estatística

Foi aplicada a estatística descritiva básica, sendo: Média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), valor mínimo (Mín.) e máximo (Máx.), além da regressão linear, coeficiente de correlação de Pearson, nos dados de elementos meteorológicos. Avaliou-se a precisão dos métodos de estimativa de ET0, em comparação ao método padrão PM-FAO, com base no coeficiente de correlação (r) (Equação 16), coeficiente de determinação (R²) (Equação 17), índice de concordância (d) (WILLMOTT, 1982) (Equação 18) e no coeficiente de confiança ou desempenho (c) (Equação 19), o qual é o produto entre r e d.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n p_i o_i - n \bar{p} \bar{o}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n p_i^2 - n \bar{p}^2)(\sum_{i=1}^n o_i^2 - n \bar{o}^2)}} \quad \text{Eq. (16)}$$

O coeficiente de correlação de Pearson (r) pode ser classificado (COHEN, 1988) como: “muito baixo” (r < 0,1); “baixo” (0,1 < r < 0,3); “moderado” (0,3 < r < 0,5); “alto” (0,5 < r < 0,7); “muito alto” (0,7 < r < 0,9); e “quase perfeito” (r > 0,9). Valores negativos indicam correlação negativa, ou seja, as variáveis são inversamente proporcionais.

$$R^2 = \frac{b_1 \sum p_i o_i - \frac{1}{n} (\sum p_i) (\sum o_i)}{\sum o_i^2 - \frac{1}{n} (\sum o_i)^2} \times 100 \quad \text{Eq. (17)}$$

O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1; isto é, $0 \leq R^2 \leq 1$.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad \text{Eq. (18)}$$

Assim, “d” é o índice de concordância ou ajuste; P_i é a evapotranspiração de referência, obtida pelo método considerado, mm d^{-1} ; O_i é a evapotranspiração de referência, obtida pelo método padrão, mm d^{-1} e $O_{\text{méd}}$ é a média dos valores da ET_0 , obtida pelo método padrão, mm d^{-1} . A variação dos valores de “d” é, $0 \leq d \leq 1$.

$$C = r * d \quad \text{Eq. (19)}$$

O índice $C = 0$ indica confiança nula e o índice $C = 1$ significa confiança perfeita.

A Tabela 2 apresenta os valores do índice C e sua classificação, de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 2 - Classificação do índice de confiança ou desempenho (c)

C	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estações com falhas meteorológicas mensais para Insolação, Velocidade do Vento e Umidade Relativa, bem como as estações meteorológicas utilizadas para seu preenchimento, estão esquematizadas nas figuras a seguir, juntamente com as devidas altitudes (Alt.), distâncias (Km) e direções (Figuras 2, 3, 4):

Figura 2 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Insolação

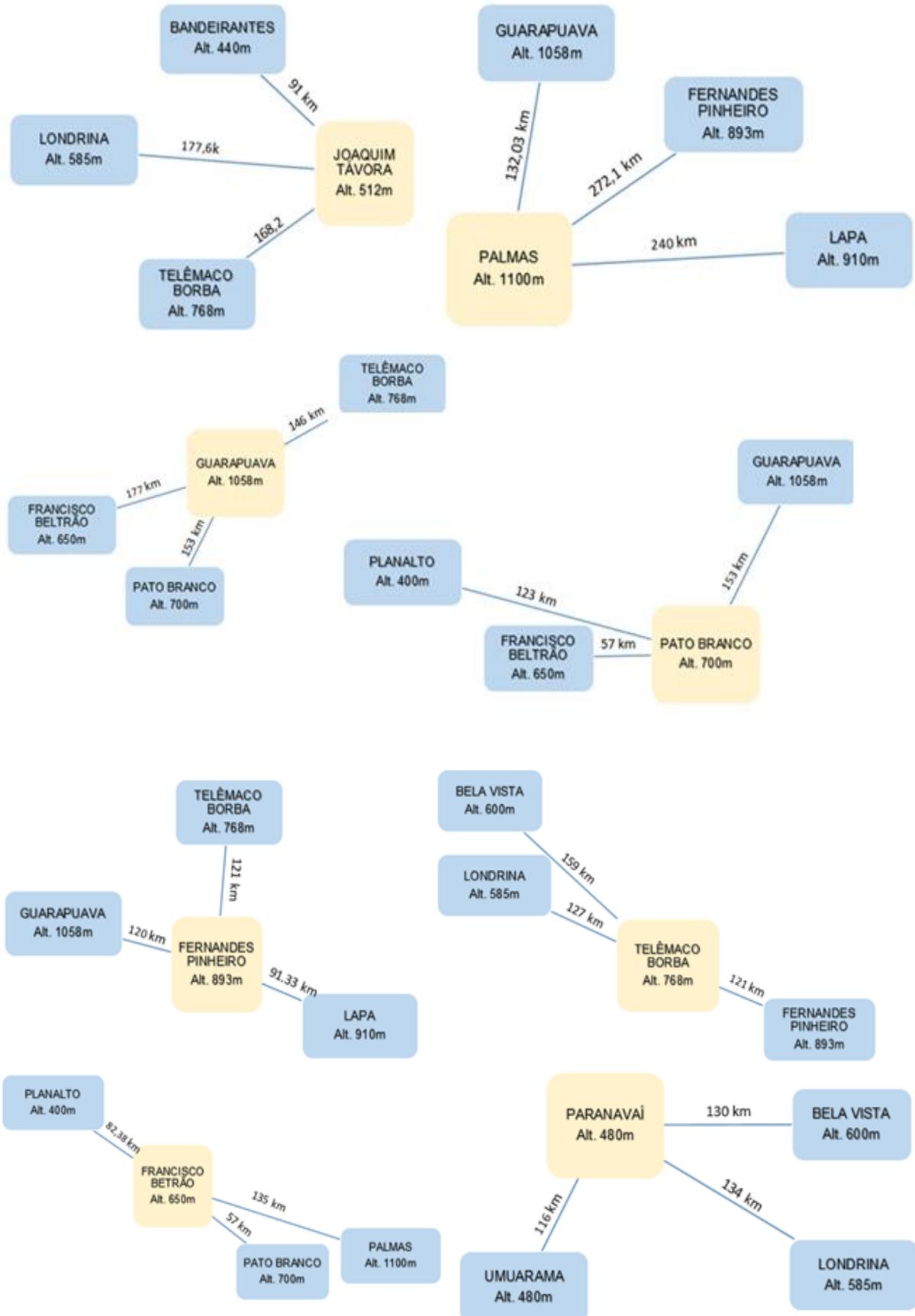




Figura 3 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Umidade Relativa

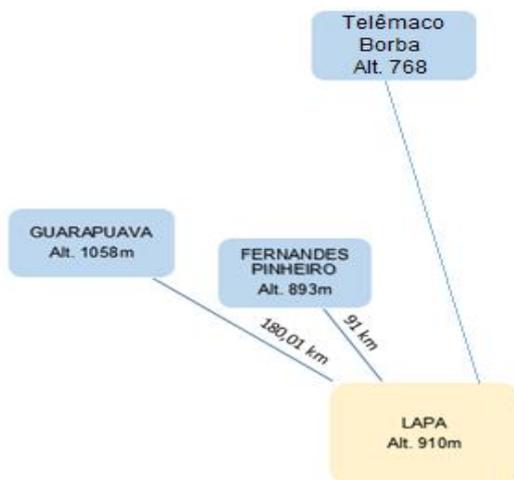
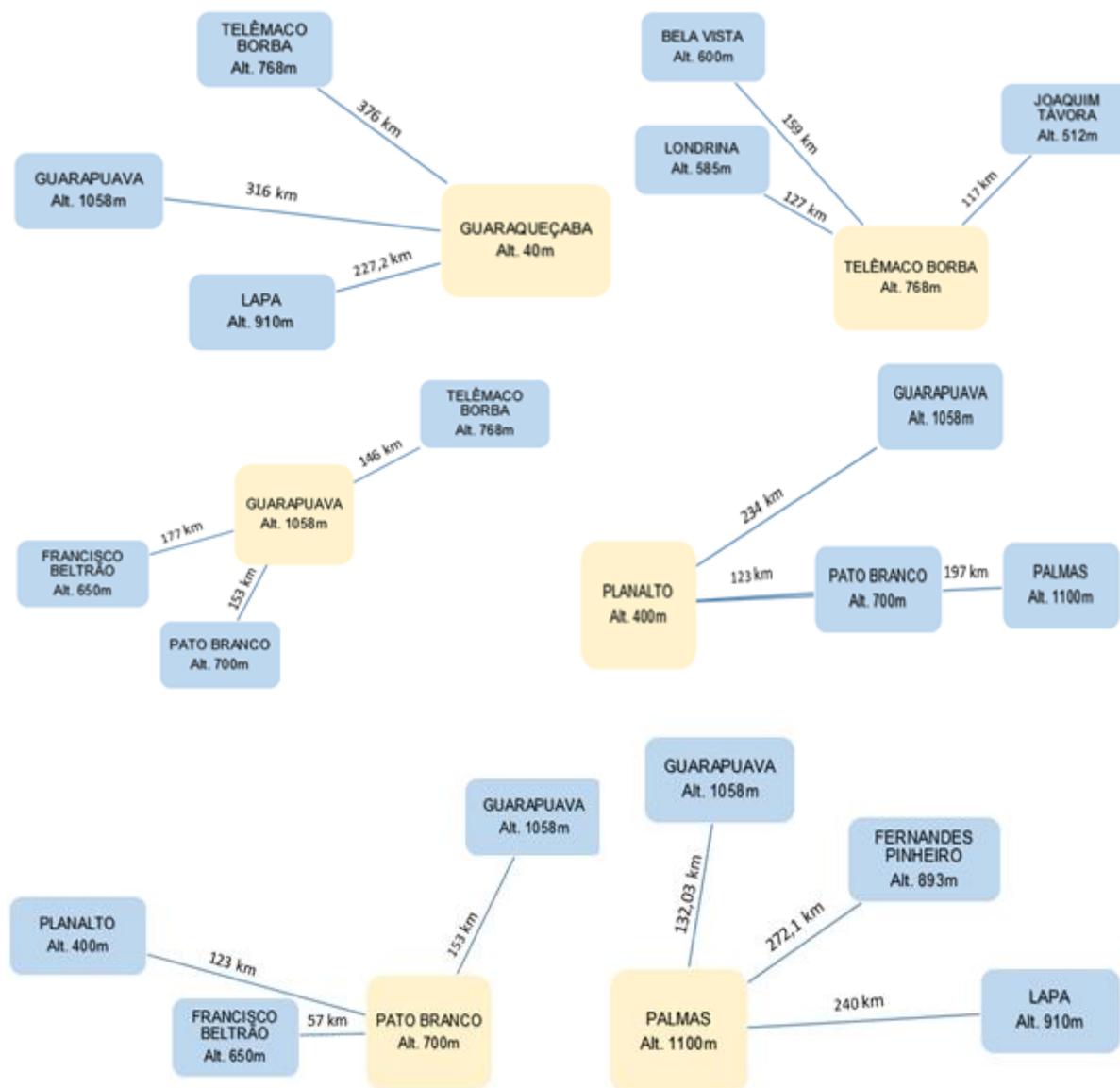


Figura 4 - Estações utilizadas para preenchimento de falhas de Velocidade do Vento



Em artigo elaborado por Ventura et al. (2016), obtiveram como resultados que a média simples possui o melhor desempenho, ao preencher falhas de temperatura, umidade relativa, ponto de orvalho, pressão atmosférica e radiação solar, se comparada à média móvel e à regressão linear simples. Assim, é menos precisa que a regressão linear múltipla para dados de temperatura, umidade relativa e ponto de orvalho, de cidades dos Estados Amazonas, Rio de Janeiro e Porto Alegre.

Com o banco de dados de elementos meteorológicos completo (1989 a 2015), a estação de Bandeirantes obteve o maior valor de $TM_{\text{máx}}$; Umuarama de $TM_{\text{mín}}$ e $TM_{\text{éd}}$, e menor valor de UR; Morretes de UR; Paranaíba de Insol.; Pato Branco de U_2 ; Guaraqueçaba de Prec., assim como os menores valores de Insol. e U_2 ; Joaquim Távora teve o menor valor de Prec. e Palmas obteve os menores valores de temperaturas máxima, mínima e média (Tabela

2).

Tabela 3 - Valores médios dos dados meteorológicos

Código da Estação	Município	TMáx	TMín	TMéd	UR	Prec.	Insol.	U2
2350019	Bandeirantes	28,85	16,89	22,00	69,37	3,97	7,09	1,92
2251028	Bela Vista do Paraíso	27,24	17,28	21,53	69,74	4,19	7,07	1,56
2550026	Fernandes Pinheiro	24,19	13,37	17,73	79,87	4,60	5,21	1,99
2653013	Francisco Beltrão	26,06	14,06	19,24	75,14	5,81	6,18	2,15
2551011	Guarapuava	23,53	12,97	17,30	76,85	5,41	6,35	2,15
2548040	Guaraqueçaba	26,29	17,53	20,99	85,69	6,90	4,19	0,92
2349031	Joaquim Távora	27,85	16,36	21,06	72,29	3,94	6,91	2,08
2549092	Lapa	23,16	13,27	17,08	81,93	4,51	5,65	2,00
2351004	Londrina	27,50	16,26	21,23	70,39	4,50	7,09	1,72
2548039	Morretes	26,38	17,65	20,96	85,84	5,68	4,38	1,15
2651044	Palmas	22,54	12,24	16,48	77,50	5,99	6,31	2,15
2352018	Paranavaí	28,45	17,97	22,30	68,92	4,20	7,19	1,59
2652036	Pato Branco	25,11	14,48	18,85	73,89	5,82	6,67	2,70
2553016	Planalto	27,18	16,73	21,23	70,46	5,51	6,95	2,12
2450012	Telêmaco Borba	26,05	13,74	18,72	78,67	4,57	6,25	1,16
2353009	Umuarama	28,15	18,11	22,38	67,45	4,62	7,08	1,59
Média Geral	Paraná	26,16	15,56	19,94	75,25	5,01	6,28	1,81

A estatística descritiva dos valores médios, descritos acima (Tabela 2), para o estado do Paraná, demonstrou elevada amplitude térmica ao longo dos dias, umidade relativa com alta variação, precipitação altamente variável, insolação de grande variação e velocidade do vento de graus 0 a 4, calmaria à brisa moderada, de acordo com a escala de Beaufort (Tabela 3).

Tabela 3 Média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), valor mínimo (Mín.) e máximo (Máx.) dos dados de temperatura máxima do ar (TMáx), temperatura mínima do ar (TMín), temperatura média do ar (TMéd), umidade relativa do ar (UR), precipitação (Prec.), insolação (Insol.) e velocidade do vento a 2 metros de altura (U₂), no estado do Paraná (série de 1989 a 2015).

	Média	DP	CV (%)	Mín.	Máx.
TMáx (°C)	26,16	4,93	18,84	3,00	41,60
TMín (°C)	15,56	4,61	29,64	-6,40	28,90
TMéd (°C)	19,94	4,40	22,05	-0,90	32,10
UR (%)	75,25	13,67	18,17	15,80	100,00
Prec. (mm d ⁻¹)	5,01	12,54	250,11	0,00	282,60
Insol. (h)	6,28	3,73	59,36	0,00	13,20
U2 (m s ⁻¹)	1,81	0,87	48,10	0,00	7,12

A precipitação (1828 mm ano⁻¹) e a insolação (6,6 h) médias estão de acordo com os valores médios para o estado, que, segundo o Atlas Climático do Paraná (2019), são de 1800 a 2000 mm ano⁻¹ e 4 e 8 h, respectivamente. Gurski et al. (2016) encontraram valores médios similares para temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, (série de 1998 a 2007), para Curitiba-PR.

A Tabela 4, abaixo, descreve os valores médios totais (1989 a 2015), por estação meteorológica e para estado, da ET₀ (mm d⁻¹), obtida por todos os métodos de estimativa empregados.

Tabela 4 - Média geral dos valores diários estimados (1989 a 2015)

Código da Estação	Município	PM-FAO	BC-FAO	HS	PT	MK	Turc
2350019	Bandeirantes	3,91	4,08	4,34	3,86	3,14	3,78
2251028	Bela Vista do Paraíso	3,83	3,94	3,95	3,86	3,14	3,76
2550026	Fernandes Pinheiro	3,05	2,89	3,64	3,21	2,51	2,96
2653013	Francisco Beltrão	3,49	3,46	4,00	3,49	2,79	3,31
2551011	Guarapuava	3,25	3,09	3,53	3,42	2,76	3,18
2548040	Guaraqueçaba	2,87	2,68	3,59	3,28	2,41	2,97
2349031	Joaquim Távora	3,79	3,81	4,15	3,77	3,03	3,62
2549092	Lapa	3,01	2,77	3,41	3,26	2,57	2,99
2351004	Londrina	3,89	4,00	4,12	3,82	3,12	3,71
2548039	Morretes	2,85	2,80	3,57	3,18	2,37	2,97
2651044	Palmas	3,27	3,10	3,40	3,34	2,71	3,08
2352018	Paranavaí	4,04	4,17	4,12	3,92	3,20	3,85
2652036	Pato Branco	3,83	3,75	3,72	3,51	2,87	3,37
2553016	Planalto	3,79	3,93	3,96	3,74	3,05	3,66
2450012	Telêmaco Borba	3,26	3,20	3,98	3,51	2,80	3,29
2353009	Umuarama	4,01	4,17	4,04	3,87	3,17	3,84
Média Geral	Paraná	3,51	3,49	3,85	3,57	2,85	3,40

A maior média foi obtida para a estação de Bandeirantes, pelo método HS (4,34 mm d⁻¹), provavelmente, relacionada a uma das menores taxas de precipitação acumulada e maior T_{Máx} no local. Lapa obteve o menor valor desse mesmo método (3,41 mm d⁻¹). Os resultados aproximam-se com os obtidos por Gurski et al. (2018), nos quais a média, entre os anos de 1986 e 2015, resultou em 3,92 mm d⁻¹, para quatro estações localizadas no tipo climático Cfa, e em 3,62 mm d⁻¹, para quatro estações no tipo climático Cfb. Segundo os autores, o método HS apresentou melhor desempenho na estimativa da ET₀ para os principais tipos climáticos do estado do Paraná.

Paranavaí (maior Insol.) obteve as maiores médias para todas as demais equações, com valor igual ao de Umuarama (menor UR) (4,17 mm d⁻¹) para a equação BC-FAO. Os valores gerais são semelhantes aos obtidos por Santos et al. (2017), que encontraram os

dados mais altos para Bandeirantes, Paranavaí e Umuarama.

A menor média foi de 2,37, para a estação de Morretes, obtida com a equação de Makkink, que também obteve as menores média para PM-FAO (2,35) e PT (3,18), estando esses valores dentro do esperado, levando-se em consideração o maior valor médio de UR para a estação. Santos et al. (2017) também encontraram os menores valores de ET₀ para Guarapuava e Morretes.

A média geral foi de 3,51 mm d⁻¹, para a Equação de Penman-Monteith. Em dados obtidos por Gurski et al. (2018), a média, nos anos de 1986 a 2015, resultou em 2,6 mm d⁻¹, para quatro estações localizadas no tipo climático Cfa e, em 2,73 mm d⁻¹, para quatro estações no tipo climático Cfb. Para Jerszurki et al. (2015), a média de ET₀, de 1981 a 2011, foi de 2,62 mm d⁻¹, na região de Telêmaco Borba.

A correlação entre os resultados obtidos pela ET₀ e as variáveis meteorológicas está disposta na tabela abaixo (Tabela 5).

Tabela 5 - Resultados obtidos pela correlação linear de Pearson (r)

	TMáx.	TMín.	TMéd.	UR	Prec.	Insol.	U ₂
PM	0,77	0,42	0,63	-0,64	nc	0,69	0,19
BC	0,79	0,35	0,64	-0,76	nc	0,79	0,14
HS	0,84	0,50	0,75	nc	nc	0,47	nc
PT	0,74	0,50	0,71	nc	nc	0,59	nc
M	0,72	0,34	0,61	nc	nc	0,80	nc
T	0,77	0,41	0,68	-0,60	nc	0,77	nc

*nc= elementos não considerados nos cálculos.

Os dados mostram que a Equação de PM possui correlação diretamente proporcional, muito alta, com TMáx e baixa, com U₂; apresentou correlação negativa alta com UR, ou seja, os valores de ET₀ são inversamente proporcionais aos valores de umidade relativa. Resultados semelhantes foram obtidos por Jerszurki (2016), com correlação muito alta para TMáx, inversamente proporcional com UR e moderada com U₂, para a região de Curitiba, de 1970 a 2014.

A equação de BC possui correlação positiva muito alta, com TMáx e Insol., negativa muito alta, com UR, e positiva baixa, com U₂. Nas equações que utilizam U₂, seus valores pouco influenciaram na ET₀, para a presente pesquisa, podendo demonstrar que as equações que não utilizam velocidade do vento como componente podem ser facilmente empregadas na estimativa da ET₀, assim como as que não utilizam radiação solar.

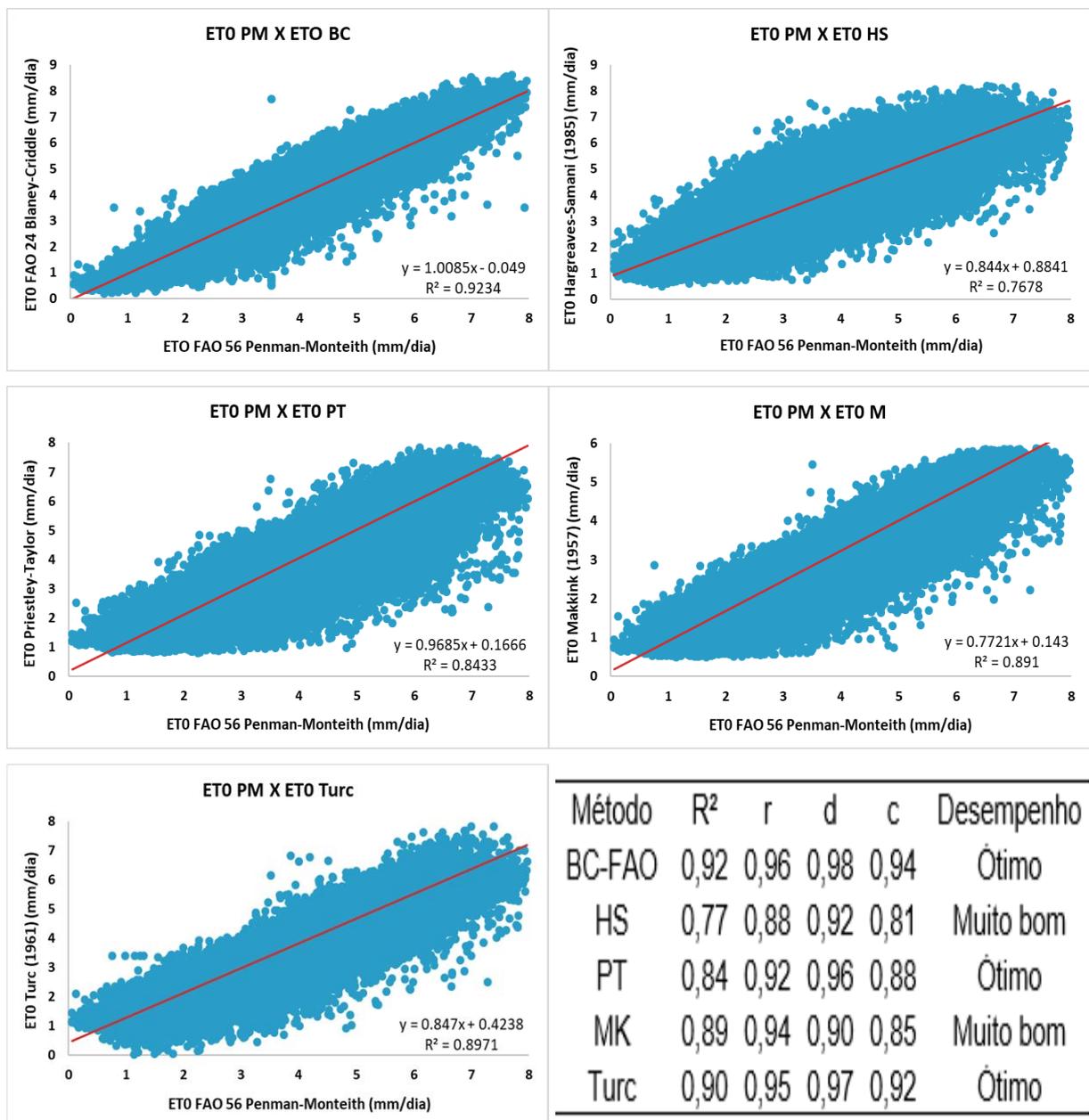
A equação de HS possui correlação positiva muito alta, com TMáx e TMéd, e moderada, com TMín e Insol. O método PT assemelhou-se com HS, possuindo correlação positiva muito alta, com TMáx e TMéd, e moderada, com TMín. O método M possui correlação positiva muito alta, com TMáx e Insol., e alta, com TMéd. O método de Turc demonstrou

correlação positiva muito alta, com TMáx. e Insol., alta, com TMéd, e negativa alta, com UR.

Dentre os elementos utilizados, a TMáx e a Insol. apresentaram maior correlação positiva com os valores de ET₀; a UR influencia altamente, porém de modo inverso, nos valores obtidos.

Comparando-se os valores diários (série histórica) de ET₀, obtidos pelo método padrão FAO-PM, para o estado do Paraná, com os demais métodos, temos os seguintes resultados para o coeficiente de determinação (R²), coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e coeficiente de desempenho (c) (Figura 5).

Figura 5 - Comparação dos valores de ET₀ obtidos pelos métodos alternativos ao método padrão FAO-PM.



Em comparação à equação de BC, os valores de ET₀-PM se distribuem melhor ao longo das escalas, concentrando-se mais próximos à linha de tendência e apresentando maior coeficiente de determinação ($R^2=0,92$) e correlação quase perfeita de 0,96. Esse método, juntamente com os métodos PT e Turc, apresentaram ótimos coeficientes de desempenho, podendo ser utilizados com excelente performance para estimativa da ET₀, em substituição ao padrão PM-FAO, na falta de todos os dados meteorológicos, por exemplo, para a área de estudo. Os métodos HS e MK também são alternativas usuais, os quais apresentaram um coeficiente de desempenho muito bom.

Dlugosz da Silva et al. (2017) obtiveram ótima performance com os métodos alternativos, HS ($c=0,93$), cujos valores estimados de evapotranspiração foram de 0 a 9 mm d⁻¹; PT ($c=0,92$) (ET₀= 0 a 8 mm d⁻¹); MK ($c=0,86$) (ET₀= 0 a 7 mm d⁻¹) e Turc ($c=0,93$) (ET₀= 0 a 8 mm d⁻¹), ao avaliar seus desempenhos em relação à PM-FAO, em Londrina-PR.

Os menores valores de ET₀ anual foram obtidos pelas estações de Morretes (864,18 mm ano⁻¹) e Guaraqueçaba (881,36 mm ano⁻¹), com a equação de MK. Os maiores valores para Bandeirantes (1584,01 mm ano⁻¹), equação de HS e Umuarama (1523,84 mm ano⁻¹), equação de BC (Tabela 6).

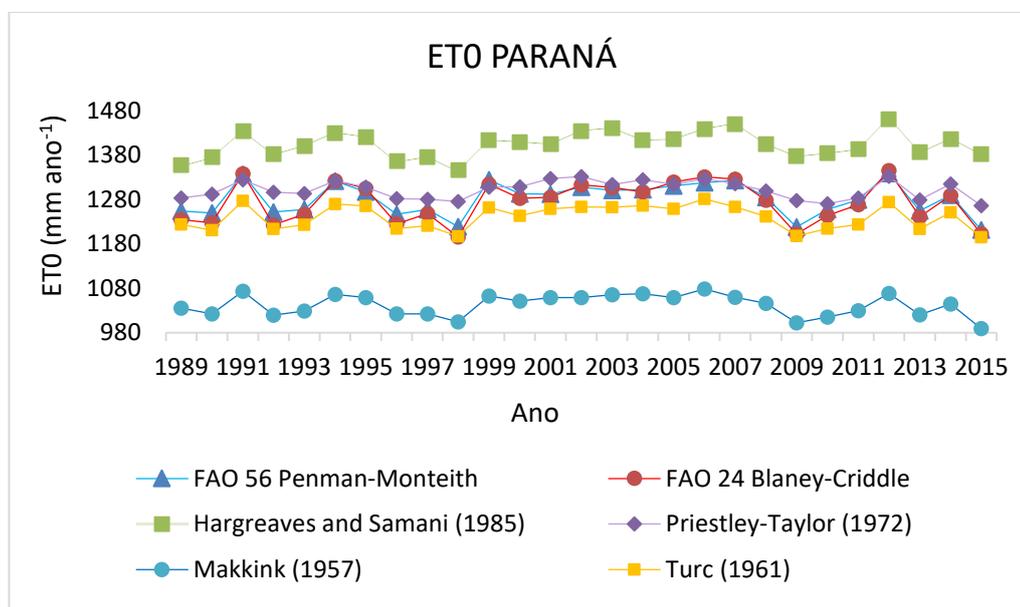
Tabela 6 - ET₀ anual em estações meteorológicas do Paraná.

MUNICÍPIO	MÉTODO					
	PM-FAO	BC-FAO	HS	PT	MK	Turc
Bandeirantes	1428,56	1488,73	1584,01	1408,41	1148,38	1380,76
Bela Vista do Paraíso	1398,72	1438,93	1443,34	1409,38	1148,49	1373,99
Fernandes Pinheiro	1113,78	1054,38	1328,98	1171,99	916,89	1081,45
Francisco Beltrão	1273,39	1265,33	1461,25	1276,03	1019,93	1209,47
Guarapuava	1188,19	1127,13	1290,92	1247,82	1009,25	1160,44
Guaraqueçaba	1047,39	978,09	1312,96	1199,28	881,36	1085,75
Joaquim Távora	1383,81	1390,69	1516,47	1378,51	1107,77	1320,33
Lapa	1098,91	1010,62	1244,16	1191,54	939,10	1093,64
Londrina	1419,27	1462,34	1505,53	1394,25	1138,46	1355,91
Morretes	1042,41	1023,03	1302,29	1159,70	864,18	1085,73
Palmas	1193,94	1133,37	1241,44	1219,63	988,33	1123,46
Paranavaí	1476,59	1523,04	1506,39	1431,96	1167,15	1405,45
Pato Branco	1399,16	1370,43	1359,01	1282,12	1046,59	1229,69
Planalto	1385,68	1435,87	1448,01	1367,06	1113,62	1337,77
Telêmaco Borba	1191,53	1167,85	1452,93	1281,93	1022,01	1199,88
Umuarama	1463,78	1523,84	1475,81	1413,22	1156,76	1401,15

Comparando os valores médios anuais de ET₀ por diferentes métodos, estimados para o Estado do Paraná, temos que (Figura 6) os menores valores foram registrados por MK e os maiores por HS. Assim, a mínima registrada de 989,26 mm ano⁻¹, com a equação de MK, e a

máxima de 1462,44 mm ano⁻¹, com HS. PM registrou valores médios em relação aos demais métodos, com picos máximos em 1991, 1994, 1999 e 2012, e mínimos em 1998 e 2009.

Figura 6 - Estimativa anual de ET₀ para o estado do Paraná.



4 CONCLUSÕES

A metodologia de preenchimento de falhas mostrou-se adequada ao estudo proposto, preenchendo as falhas sem comprometer os valores obtidos.

As equações alternativas de estimativa de evapotranspiração, aplicadas à área de estudo, mostraram-se eficientes ao serem comparadas ao método padrão FAO, podendo ser utilizadas como opção em estudos relacionados, quando há poucos dados meteorológicos.

Os resultados estatísticos indicam excelentes desempenhos e aplicabilidade de todas as equações de estimativa de evapotranspiração para a região e série histórica analisadas.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. de S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S. de; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite e Camargo. Classificações climáticas para zoneamento climático no Estado do Paraná. **Brasil.Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 405-417, ago., 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542016000400405&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 23 abr. 2020.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; MENEGASSI, B.; Müller, A. G.; COMIRAN, F. e HECKLER, B. M. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.9, p.831-839, 2004.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: USDA Soil Conservation Service, 1950. 48 p. (Technical Paper, n. 96).

CAMARGO, A. P. de; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1998. Disponível em: <http://www.utstat.toronto.edu/~brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2020.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS: IPH/UFRGS, 2008.

DA SILVA CARVALHO, R. L.; DELGADO, A. R. S. Estimativas Da Evapotranspiração De Referência Do Município De Ariquemes (Ro) Utilizando Os Métodos Penman-Monteith-Fao E Hargreaves-Samani. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v. 10, n. 6, p. 1038-1048, 2016.

DE SOUZA, J. L., LYRA, G. B., FERNANDES, V. R., SILVA-JUNIOR, R. S., Lyra, G. B., SPERLING, V. B., & FERREIRA-JUNIOR, R. A. Evapotranspiração De Referência Estimada Pelo Método De Penman-Monteith Fao-56 Em Função Das Simulações Do Modelo Atmosférico De Mesoescala Wrf-Weather Research And Forecasting. **IRRIGA**, Botucatu-SP, v. 20, n. 4, p. 762-775, 2018.

DLUGOSZ DA SILVA, R.; AGUIAR E SILVA, M. A. de; CANTERI, M. G.; RODRIGUES ROSISCA, J.; VIEIRA JUNIO, N. A. Reference evapotranspiration for Londrina, Paraná, Brazil: Performance of different estimation methods. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina-PR, v. 38, n. 4, p. 2363-2374, 2017.

FOOLADMAND, H.R.; AHMADI, S.H. Monthly spatial calibration of Blaney-Criddle equation for calculating monthly ET₀ in south of Iran. **Irrigation and Drainage, slough**, v.58, n.2, p.234-245, 2009.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de. Alternative reference evapotranspiration methods for the main climate types of the state of Paraná, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Curitiba-PR, v. 53, n. 9, p. 1003-1010, 2018.

GURSKI, B. C.; SOUZA, J. L. M. de; JERSZURKI, D. Métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência anual e nas diferentes estações do ano em Curitiba-PR, Brasil. **Cultura Agrônômica: Revista de Ciências Agrônômicas**, Ilha Solteira-SP, v. 25, n. 2, p. 155-166, 2016.

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.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. **IBGE-Estados**, 2017. [online]

Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/panorama>. Acesso em: 23 abr. 2020.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de; EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba-PR. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v.33, n.2, p.118-129, s/m., 2015.

JERSZURKI, Daniela. **Dinâmica da água no continuum solo-planta-atmosfera: tópicos em evapotranspiração de referência e disponibilidade de águas às plantas**. Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza. 2016. 147 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MAKKINK, G.H. Ekzameno de la formula de Penman. **Netherlands Journal Agricultural Science**, Wageningen, v.5, p.290-305, 1957.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society-Series A**, London, v. 193, n.1032, p. 120-145, 1948.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Rev.**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

SANTOS, L. D. C., JOSÉ, J. V., ALVES, D. S., NITSCHKE, P. R., REIS, E. F. D., & BENDER, F. D. Space-time variability of evapotranspiration and precipitation in the State of Paraná, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 5, p. 743-759, 2017.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Meteorologia Agrícola**. USP/ESALQ, 2009.

Disponível em:

http://www.leb.esalq.usp.br/leb/aulas/lce306/MeteorAgricola_Apostila2007.pdf. Acesso em: 23 abr. 2020.

TURC, L. Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. **Annales Agronomiques**, Paris, v. 12, n. 1, p. 13-49, 1961.

VENTURA, T. M., SANTANA, L. L. R., MARTINS, C. A., & DE FIGUEIREDO, J. M. Análise da Aplicabilidade de Métodos Estatísticos para Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos (Analysis Methods Of Application For Statistical Data In Meteorology). **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba-PR, v. 19, p. 168-177, 2016.

WILLMOTT, C. J. Some comments on evaluation of model performance. **Bulletin of American Meteorological Society**, Boston, v.63, n.11, p. 1309-1313, 1982.

CAPÍTULO 2 – CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO DE HARGREAVES-SAMANI PARA O ESTADO DO PARANÁ

RESUMO: A obtenção da evapotranspiração, utilizando o método padrão FAO Penman-Monteith, torna-se impedida quando a área de estudo apresenta falhas ou poucos dados meteorológicos estimados. O método alternativo Hargreaves-Samani é uma opção, pois trabalha apenas com dados de temperatura e radiação solar, porém, pode superestimar ou subestimar os valores de ETo em relação ao método padrão FAO. Assim, a calibração de HS proporciona a proximidade dos dados estimados aos dados observados. A metodologia consistiu em estimar a evapotranspiração do estado do Paraná pelos métodos PM-FAO e HS e calibrar a equação de HS em relação ao método padrão FAO-PM, utilizando série histórica de dados de temperaturas, insolação, umidade relativa e velocidade do vento. Para isso, foi aplicado o método Gradiente Reduzido Generalizado (GRN) não-linear, com a finalidade de adequar os parâmetros da equação HS à realidade da área de estudo. Após, os dados foram validados estatisticamente. Os resultados indicam que o método de HS superestimou os valores de ETo. Os valores melhoraram estatisticamente após a calibração, reduzindo os erros e melhorando o desempenho. A metodologia teve efeito positivo ao estudo, atingindo-se os objetivos propostos, de maneira que os dados foram validados estatisticamente.

PALAVRAS-CHAVE: Elementos meteorológicos. Evapotranspiração de referência. Penman-Monteith

CALIBRATION OF THE HARGREAVES-SAMANI EQUATION FOR THE STATE OF PARANÁ-BRAZIL

ABSTRACT: The evapotranspiration, using the standard FAO Penman-Monteith method, is not achieved when the study area has gaps or little estimated meteorological data. The alternative Hargreaves-Samani method is an option, as it only works with temperature and solar radiation data. However, it can overestimate or underestimate ETo values compared to the standard FAO method. Thus, the HS calibration provides the proximity of the estimated data to the observed data. The methodology consisted of estimating the evapotranspiration in the state of Paraná using the PM-FAO and HS methods, and calibrating the HS equation in relation to the standard FAO-PM method, using a historical series of data on temperatures, insolation, relative humidity, and wind speed. For this, the Nonlinear Generalized Reduced Gradient (NGR) method was applied to adapt the parameters of the HS equation to the reality of the study area. Afterwards, the data were statistically validated. The results indicate that the HS method overestimated the ETo values. The values improved statistically after calibration, reducing errors, and improving performance. The methodology had a positive effect on the study, reaching the proposed objectives, and the data were statistically validated.

KEYWORDS: Meteorological elements. Reference evapotranspiration. Penman-Monteith.

1 INTRODUÇÃO

Mudanças meteorológicas, ocorrendo gradativamente ao longo do espaço-tempo, podem levar a uma mudança climática a nível local e global. Isso porque elementos meteorológicos, como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, insolação, contribuem diretamente para mudanças no ciclo-hidrológico, interferindo na precipitação,

infiltração, evapotranspiração, o que acarreta menor ou maior demanda hídrica por determinada cultura.

Segundo Awal et al. (2020), como resultado da crescente demanda por recursos hídricos, devido ao crescimento populacional, da urbanização e da agricultura irrigada, a disponibilidade hídrica, especialmente nos sistemas de produção agrícola, está se tornando mais crítica a cada ano. Portanto, para gerenciar e conservar recursos hídricos, cada vez mais escassos, é importante examinar vários métodos que aumentam a eficiência do uso da água e reduzem o consumo excessivo.

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma das principais saídas de água na atmosfera, sendo essencial ao ciclo hidrológico. Está relacionada a condições culturais, como demanda e disponibilidade hídrica, a condições de seca e cheia, em ambiente naturais e culturais. Portanto, seu estudo torna-se necessário em vários campos, como agricultura, meio ambiente, meteorologia.

A equação amplamente utilizada para estimar a evapotranspiração de referência é a equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), padronizada pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e a Alimentação (FAO) (HOWES et al., 2015; GURSKI et al., 2018; AKUMAGA et al., 2017; GUNDALIA e DHOLAKIA, 2016). Essa equação requer dados climáticos detalhados para estimar o ET_o, os quais, muitas vezes, estão indisponíveis. Alternativamente, podemos utilizar outros métodos, que fornecem estimativas confiáveis e consistentes de ET_o, exigindo um menor número de dados climáticos, como a equação de Hargreaves-Samani (HS) (HARGREAVES e SAMANI, 1985).

Para aplicação de métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência, considera-se importante a sua calibração em relação ao método padrão FAO. Entre os diferentes métodos de calibração, a abordagem mais comum é a calibração usando regressão linear simples, na qual o ajuste dos coeficientes HS é obtido pela calibração local, baseada em regressão.

Desse modo, o presente estudo objetivou a estimativa da evapotranspiração de referência, utilizando dados disponíveis para o estado do Paraná, a calibração da equação de Hargreaves-Samani, em relação à equação padrão de Penman-Monteith, e a validação estatística dos dados, usando dados disponíveis para o estado do Paraná.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o estado do Paraná, situado no sul do Brasil, nas coordenadas 22° 30' 58" e 26° 43' 00", de latitude Sul, e 48° 05' 37" e 54° 37' 08", de longitude

Oeste.

A hidrografia do Paraná pode ser classificada em cinco bacias hidrográficas: Bacia do Rio Paraná, cujos afluentes mais importantes são os rios Piquiri e Ivaí; Bacia do Rio Paranapanema, drenada pelos rios Pirapó, Tibagi, das Cinzas e Itararé; Bacia do Rio Iguaçu, que tem como principais afluentes o rio Chopim, no sul do estado, e o rio Negro, no limite com o Estado de Santa Catarina; Bacia do Rio Ribeira do Iguape, cujas águas seguem para o rio Ribeira do Iguape; Bacia Atlântica ou do Litoral Paranaense, cujas águas seguem direto para o Oceano Atlântico.

O relevo é formado por três planaltos: Primeiro Planalto ou Planalto de Curitiba; Segundo Planalto ou Planalto de Ponta Grossa e Terceiro Planalto ou de Guarapuava. Os solos encontrados no Paraná são das ordens: Neossolos, Cambissolos, Argissolos, Nitossolos, Latossolos, Espodossolos, Gleissolos e Organossolos.

O Paraná tem uma temperatura do ar média anual entre 15 e 24°C. Os valores mais altos e mais baixos foram observados nas regiões noroeste e sudeste, respectivamente. Os índices pluviométricos do Estado variam entre 1100 e 1920 mm anuais. Chuvas anuais, acima de 1800 mm ano⁻¹, foram mapeadas, principalmente, nas partes sudeste e sudoeste, aumentando com a latitude. A precipitação anual, inferior a 1200 mm ano⁻¹, ocorre nas regiões setentrionais (APARECIDO et al., 2016).

Segundo a classificação de Köppen, o estado do Paraná possui 2 classes climáticas, “Cfb” e “Cfa” (IAPAR, 2019). Sendo a classe climática com maior predominância, a Cfa representa 50% da área; a classe Cfb, a segunda maior, representando 39,8% da área, de maneira que ocorrem em áreas de alta altitude. Os climas Cfa (clima temperado úmido, com verão quente) e Cfb (clima temperado úmido, com verão moderadamente quente) são climas oceânicos, sem uma estação seca (APARECIDO et al., 2016).

A capital do estado é Curitiba, um grande centro consumidor de alimentos; sua região metropolitana produz hortifrutigranjeiros durante o ano inteiro e quase a totalidade dos agricultores utiliza irrigação, sendo esse o principal custo da produção (GURSKI et al., 2016).

2.2 OBTENÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Os dados foram obtidos das estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e complementados, incluindo as demais regiões do estado, com dados do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) (Tabela 1). Foram coletados dados mensais de Temperatura Máxima (TMáx), Temperatura Mínima (TMín), Insolação (Insol.), Umidade Relativa (UR) e Velocidade do Vento, medida a 10 m (U₁₀), no período de 1989 a 2018, dados mínimos necessários aos cálculos de Evapotranspiração Referencial (ET_o) pelo método padrão.

Tabela 7 - Características das estações meteorológicas

Código	Fonte	Município	Altitude (metros)	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Köppen-Geiger
2350018	IAPAR	Bandeirantes - PR	440	-23,06 S	-50,21 O	Cfa
83783	INMET	Campo Mourão - PR	616,4	-24,05 S	-52,36 O	Cfa
83813	INMET	Castro - PR	1008,8	-24,78 S	-50 O	Cfb
83842	INMET	Curitiba - PR	923,5	-25,43 S	-49,26 O	Cfb
83836	INMET	Irati - PR	836,95	-25,46 S	-50,63 O	Cfb
83811	INMET	Ivaí - PR	808	-25,00 S	-50,86 O	Cfa
83766	INMET	Londrina - PR	566	-23,31 S	-51,13 O	Cfa
83767	INMET	Maringá - PR	542	-23,40 S	-51,91 O	Cfa
2651043	IAPAR	Palmas - PR	1100	-26,29 S	-51,59 O	Cfb
83844	INMET	Paranaguá - PR	4,50	-25,53 S	-48,51 O	Cfa
2352017	IAPAR	Paranavaí - PR	480	-23,05 S	-52,26 O	Cfa
2553015	IAPAR	Planalto - PR	400	-25,42 S	-53,47 O	Cfa
2353008	IAPAR	Umuarama - PR	480	-23,44 S	-53,17 O	Cfa

A evapotranspiração de referência diária, utilizando a equação Penman-Monteith FAO (PM-FAO) (ALLEN, 1998) (Equação 2), foi utilizando o software Ref-Et, versão 4.1 da Universidade de Idaho-EUA (Allen, 2016).

$$ET_{0(PMF)} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad \text{Eq. (2)}$$

Assim:

ET₀ (PMF) - evapotranspiração de referência, segundo o método de Penman-Monteith (mm d⁻¹);

R_n - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m⁻²);

G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m⁻²);

T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

u₂ - velocidade de vento a 2 m de altura (m s⁻¹); e_s - pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a - pressão parcial de vapor (kPa);

e_s - e_a - déficit de pressão de vapor de saturação (kPa);

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação à temperatura T (kPa °C⁻¹);

γ - coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹).

Como algumas estações do IAPAR não dispunham de dados de velocidade do vento (U₂), utilizou-se o valor médio fixo de 2,0 m s⁻¹, conforme Allen et al. (1998), que é a média obtida em 2000 estações ao redor do mundo. Ressalta-se que os dados de velocidade do vento, medidos nas estações, são de 10 m da superfície do solo (U₁₀) e ajustados para a altura de dois metros, utilizando-se a equação de função do vento, Equação 4, abaixo.

$$U_{2m} = 0,748 * U_{10m} \quad \text{Eq. (4)}$$

Para obtenção da ETo diária, pelo método Hargreaves-Samani (HS-ETo) (equação 10), foram utilizados apenas os valores das Temperaturas máxima (Tmax), mínima (Tmin) e média (Tmed) do ar, em graus Celsius, além da radiação no topo da atmosfera (Ra), em MJ/m²/d:

$$ET_0 = \alpha \cdot (T_{max} - T_{min})^\beta (T_{med} + Ht) Ra \cdot 0,408 \quad \text{Eq. (10)}$$

Assim: α é um parâmetro empírico, sendo utilizado o seu valor original de 0,0023; β é um parâmetro empírico exponencial, sendo seu valor original de 0,5 e Ht um parâmetro empírico de valor igual a 17,8. A temperatura média é obtida com base na metodologia descrita por Allen et al. (1998) (Equação 11).

$$T_{med} = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad \text{Eq. (11)}$$

2.3 CALIBRAÇÃO DA EQUAÇÃO HARGREAVES-SAMANI

Calibraram-se os três parâmetros da equação simultaneamente (α , β e Ht), pois foi o método que, em teste, resultou nos melhores valores de redução de erros. As iterações foram testadas pelo método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), do algoritmo de otimização não-linear, utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel, de forma a reduzir o erro médio absoluto (EMA), medida mais natural da magnitude média do erro.

No processo de calibração, os valores originais dos parâmetros da equação, propostos por Hargreaves e Samani (1985), foram utilizados como valores iniciais para o processo de ajuste, conforme metodologia utilizada por Cobaner et al. (2016); Ferreira et al. (2018); Pinheiro et al. (2019).

2.4 VALIDAÇÃO DOS DADOS

Foi feita a estatística descritiva (Média, Desvio padrão, Variância da amostra, Mínimo, Máximo e Coeficiente de variação) dos dados, originais (PM, HS) e calibrados (HS Cal).

Após, procedeu-se com análises de inclinação da regressão forçada à origem (RFO), considerando ETo-PM, como dados observados (Oi), e ETo-HS/ETo-HS Cal, como valores previstos (Pi); o Coeficiente de determinação (R^2) da regressão de mínimos quadrados ordinários (MQO), correlação linear (r), erro médio absoluto (EMA), raiz do erro quadrado médio (REQM) e erro viés médio (EVM), baseando-se nos trabalhos de Althoff et al. (2019);

Awal et al. (2020); Ferreira et al. (2018); Zanetti et al. (2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um resumo (média dos dados diários) dos dados climáticos, de 30 anos, utilizados para cálculos da evapotranspiração, está disposto da Tabela 8. Segundo Nitsche (2019), a Tmax média anual varia de 20 a 31 graus Celsius para o estado do Paraná; a Tmin média anual, de 12 a 18°C; a UR média anual, de 80 a 85%; e a Insol. média anual, de 1900 a 2000 h, não apresentando dados de velocidade do vento.

Tabela 8 - Dados meteorológicos utilizados para obtenção da evapotranspiração

Código	Município	Tmax (°C)	Tmin (°C)	Insol. (h)	UR (%)	U₂ (m/s)
2350018	Bandeirantes – PR	28.85	16.90	7.09	69.45	2.78
83783	Campo Mourão - PR	26.97	15.11	6.72	84.15	2.53
83813	Castro - PR	24.32	12.67	4.17	82.79	0.85
83842	Curitiba - PR	23.70	13.72	5.11	80.60	2.13
83836	Irati – PR	24.02	13.04	5.07	80.15	1.75
83811	Ivaí – PR	25.47	13.85	5.81	78.55	1.19
83766	Londrina – PR	28.34	16.60	6.81	74.29	0.58
83767	Maringá – PR	28.20	17.91	7.05	69.06	1.09
2651043	Palmas - PR	22.55	12.26	6.29	77.59	2.00
83844	Paranaguá – PR	26.35	18.53	3.67	85.66	2.00
2352017	Paranavaí - PR	28.45	17.98	7.18	68.99	2.12
2553015	Planalto - PR	27.18	16.73	6.95	70.46	2.00
2353008	Umuarama – PR	28.15	18.12	7.13	67.53	2.00

Paredes et al. (2018) obtiveram maior precisão com o método FAO Penman-Monteith, utilizando apenas dados de temperatura, comparando ao método Hargreaves, de forma a demonstrar a importância e influência desse elemento na estimativa da ET₀. Em região de clima distinto (BSw'h'), o modelo de Penman-Monteith mostrou-se mais sensível à temperatura máxima do ar e umidade relativa do ar, seguidos da insolação, velocidade do vento e temperatura mínima do ar. No período chuvoso, a sensibilidade do modelo às alterações dos elementos do clima é menor do que nos meses mais secos do ano (OLIVEIRA et al., 2017).

Os dados de evapotranspiração, pelos métodos de PM-FAO, HS e HS cal, assim como a estatística, estão dispostos na Tabela 9. São apresentados os dados de valores mínimo (Mín), máximo (Máx), média (Méd), desvio padrão (DP), variância amostral (VAR) e coeficiente de variação (CV), para os métodos de estimativa da evapotranspiração aplicados.

Tabela 9 - Estatística descritiva dos dados amostrais de evapotranspiração.

Município	Método	Mín	Máx	Média	DP	VAR	CV
Bandeirantes – PR	<i>FAO PM</i>	0.80	7.99	4.08	1.58	2.49	38.65
	HS	0.90	8.26	4.41	1.37	1.89	31.16
	<i>HS Cal</i>	0.50	8.31	4.03	1.36	1.85	33.75
Campo Mourão - PR	<i>FAO PM</i>	0.78	8.32	3.38	1.40	1.96	41.46
	HS	0.74	8.48	4.18	1.40	1.96	33.43
	HS Cal	0.36	8.30	3.40	1.29	1.66	37.94
Castro - PR	<i>FAO PM</i>	0.71	5.79	2.38	1.02	1.03	42.61
	HS	0.79	7.34	3.78	1.31	1.70	34.52
	HS Cal	0.51	4.45	2.34	0.82	0.68	35.21
Curitiba - PR	<i>FAO PM</i>	0.72	7.30	2.92	1.28	1.64	43.74
	HS	0.72	7.13	3.59	1.33	1.76	36.95
	<i>HS Cal</i>	0.41	6.33	2.89	1.19	1.42	41.21
Irati – PR	<i>FAO PM</i>	0.72	6.54	2.87	1.24	1.54	43.30
	HS	0.57	8.49	3.72	1.39	1.93	37.31
	HS Cal	0.37	6.81	2.85	1.07	1.14	37.52
Ivaí – PR	<i>FAO PM</i>	0.73	6.26	3.02	1.27	1.62	42.16
	HS	0.73	7.54	3.95	1.43	2.04	36.17
	<i>HS Cal</i>	0.38	6.25	3.01	1.20	1.44	39.86
Londrina – PR	<i>FAO PM</i>	0.82	6.91	3.10	1.37	1.87	44.13
	HS	0.55	7.66	4.38	1.41	1.99	32.21
	HS Cal	0.23	6.26	3.17	1.20	1.43	37.77
Maringá – PR	<i>FAO PM</i>	0.85	8.04	3.48	1.36	1.86	39.23
	HS	0.69	8.30	4.15	1.32	1.75	31.83
	HS Cal	0.38	7.96	3.50	1.25	1.57	35.77
Palmas - PR	<i>FAO PM</i>	0.67	6.63	2.98	1.31	1.73	44.10
	HS	0.61	6.70	3.49	1.35	1.81	38.56
	HS Cal	0.39	6.42	3.06	1.29	1.65	42.03
Paranaguá – PR	<i>FAO PM</i>	0.79	7.26	2.28	1.04	1.07	45.32
	HS	0.40	7.75	3.50	1.28	1.64	36.59
	HS Cal	0.28	5.71	2.49	0.96	0.91	38.48
Paranavaí - PR	<i>FAO PM</i>	0.75	7.90	3.95	1.48	2.20	37.58
	HS	0.83	7.38	4.20	1.35	1.82	32.10
	HS Cal	0.40	8.08	3.95	1.44	2.08	36.48
Planalto - PR	<i>FAO PM</i>	0.74	7.42	3.65	1.58	2.49	43.22
	HS	0.70	7.82	4.03	1.51	2.29	37.61
	HS Cal	0.42	8.18	3.75	1.57	2.46	41.82
Umuarama – PR	<i>FAO PM</i>	0.72	7.46	3.81	1.46	2.14	38.41
	HS	0.74	7.91	4.10	1.35	1.82	32.89
	HS Cal	0.40	8.77	3.97	1.47	2.15	36.96

Os valores de evapotranspiração de PM-FAO estão dentro da normalidade. Gurski et al. (2018) obtiveram uma média de 2,67 mm d⁻¹ (1986 a 2015), utilizando a equação PM-FAO para a região de Curitiba-PR e uma média de 3,14 mm d⁻¹ (1986 a 2015), utilizando a equação PM-FAO para Campo Mourão-PR.

Os valores de evapotranspiração, pelo método HS original, foram superiores aos obtidos pela equação padrão em todas as regiões estudadas, porém, não superestimaram significativamente os dados. Segundo Farias et al. (2020), valores de ETo HS elevados, maiores que 5 mm dia⁻¹, indicam alta demanda atmosférica, que ocorre quando a umidade relativa do ar é baixa e o déficit de pressão de vapor é alto; portanto, controla o ETo, apesar da energia solar.

Os dados da Tabela 9 demonstram que, após a calibração da equação de HS, os valores se aproximaram dos obtidos pelo método padrão PM. O método calibrado apresentou o menor desvio padrão e o coeficiente de variação também obteve maior aproximação dos valores de PM, se comparados aos valores de HS, obtidos por meio da equação original. Os valores do coeficiente de variação indicam a heterogeneidade dos dados amostrais, devido à disparidade do espaço-temporal avaliado (30 anos) em escala diária.

Os valores dos coeficientes calibrados estão descritos na tabela 10. Novos valores dos parâmetros da equação Hargreaves-Samani foram obtidos para cada estação de dados diários.

Tabela 10 - Coeficientes da equação de HS, após calibração.

Município	Coeficientes de HS calibrados		
	α	β	Ht
Bandeirantes – PR	0,0009	0,8	29,1
Campo Mourão – PR	0,0014	0,7	10,2
Castro – PR	0,0020	0,4	11,9
Curitiba – PR	0,0017	0,6	10,6
Irati – PR	0,0012	0,6	26,5
Ivaí – PR	0,0016	0,6	10,6
Londrina – PR	0,0018	0,6	3,1
Maringá – PR	0,0018	0,7	7,8
Palmas – PR	0,0014	0,7	16,4
Paranaguá – PR	0,0022	0,5	7,9
Paranavaí - PR	0,0011	0,8	16,6
Planalto – PR	0,0014	0,7	14,6
Umuarama - PR	0,0014	0,7	13,1

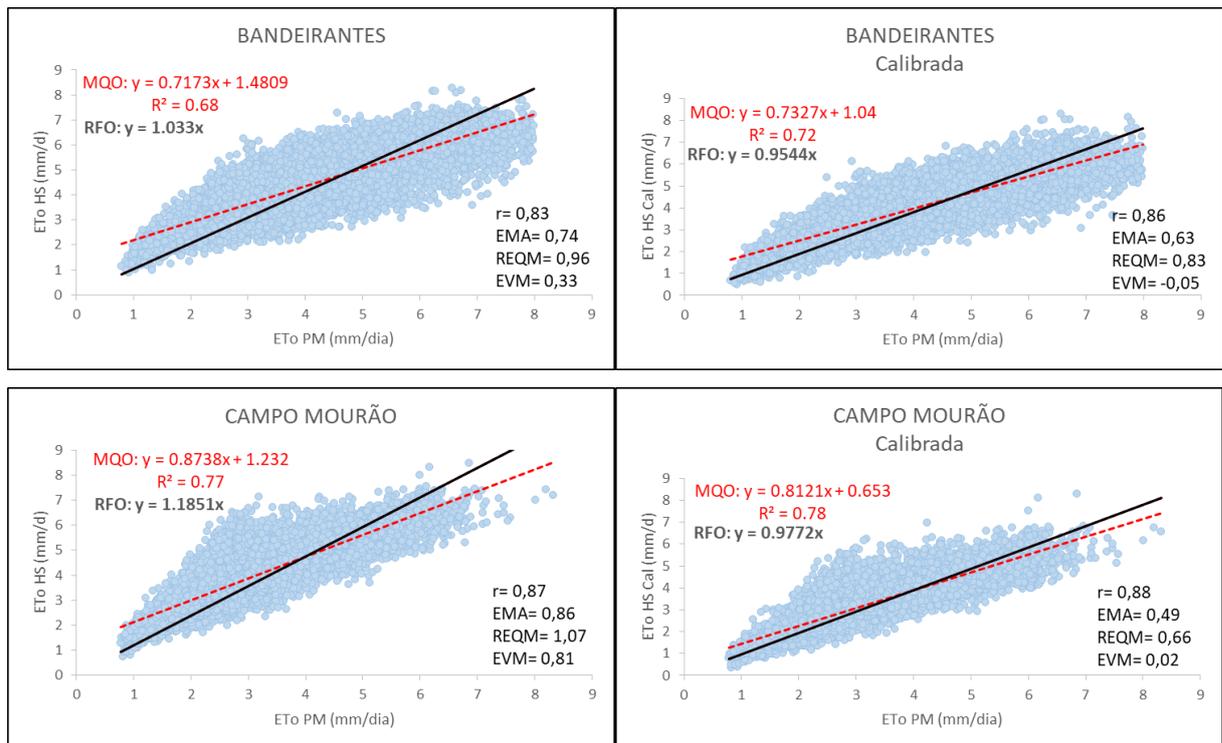
Paredes et al. (2018); Paredes e Pereira (2019) obtiveram melhores desempenhos após a calibração dos parâmetros de Hargreaves-Samani. Senatore et al. (2020), em clima de temperaturas amenas e precipitações elevadas, destacaram o potencial dos coeficientes de Hargreaves calibrados e sua alta correlação com a faixa de temperatura média diária,

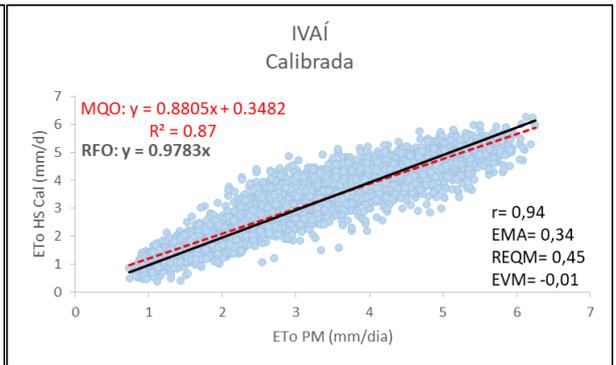
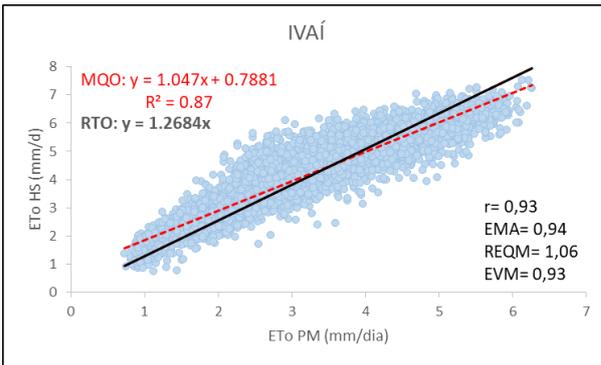
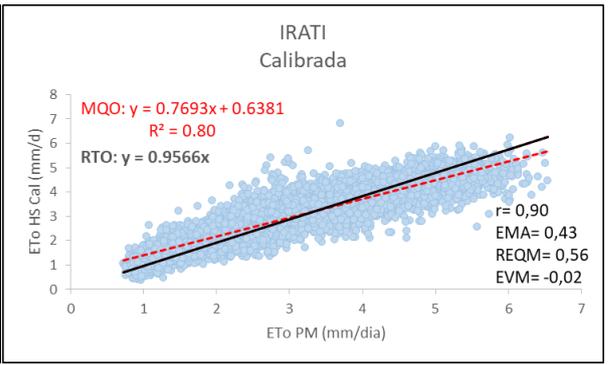
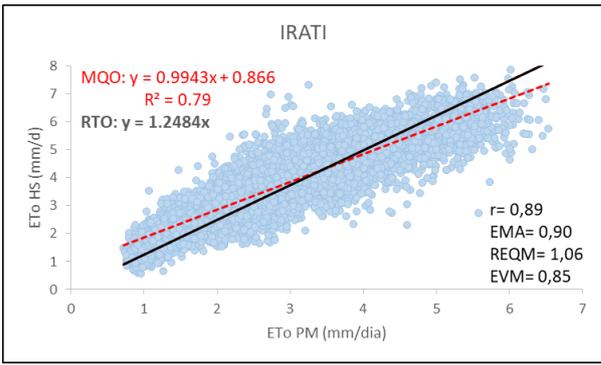
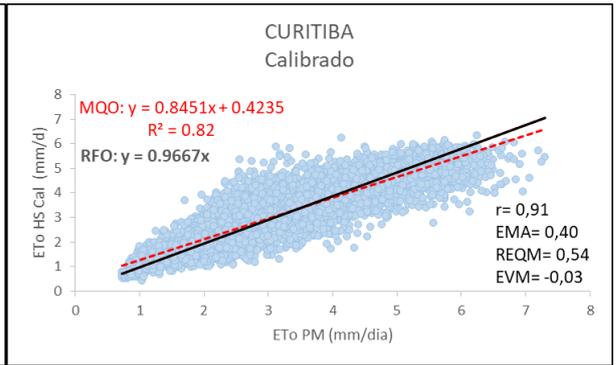
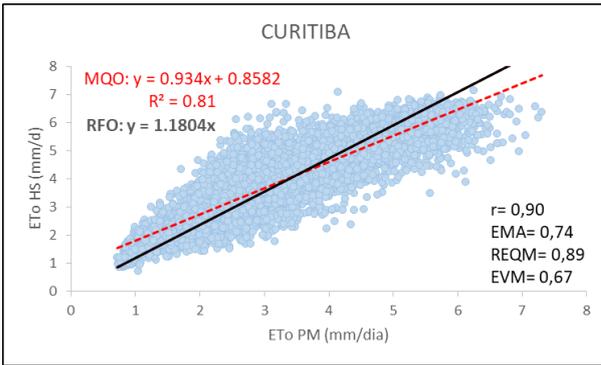
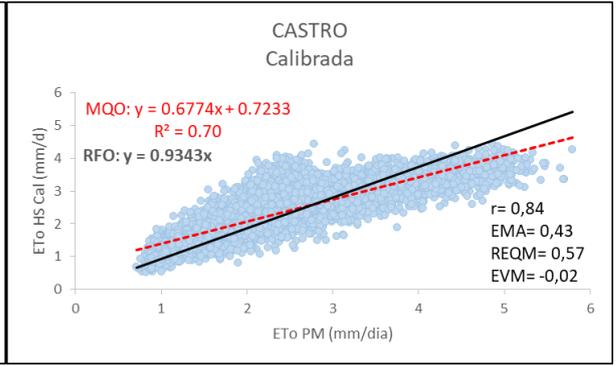
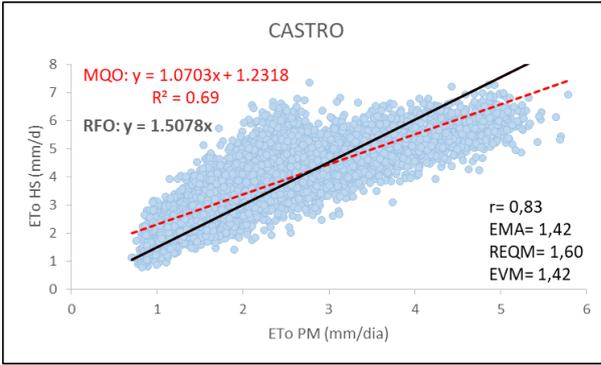
permitindo equações de regionalização confiáveis, especialmente, em regiões climáticas homogêneas.

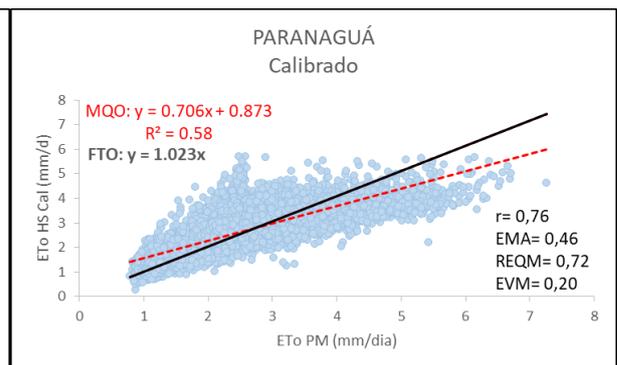
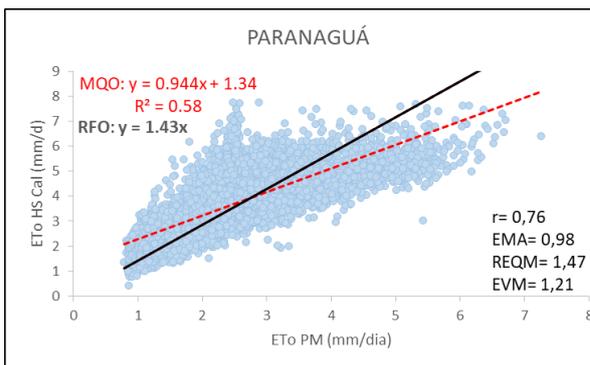
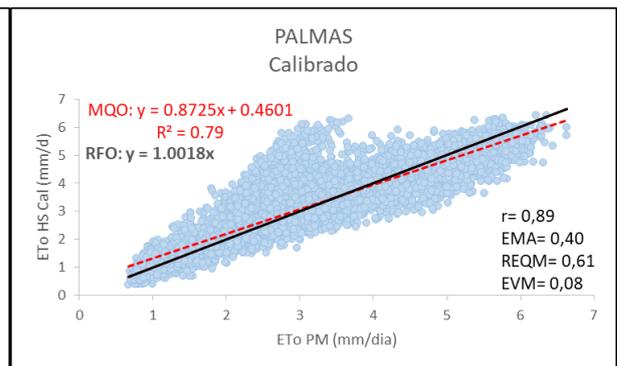
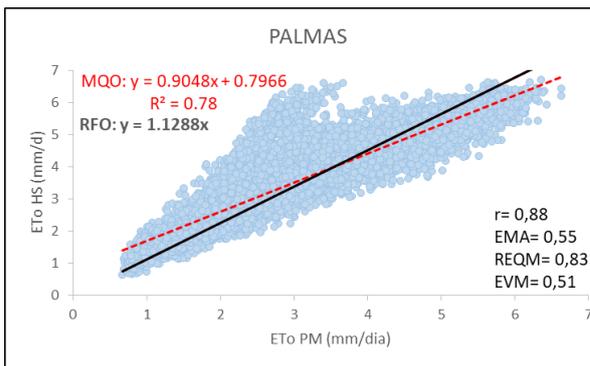
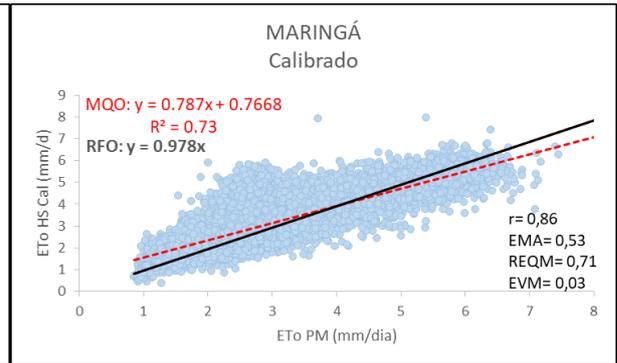
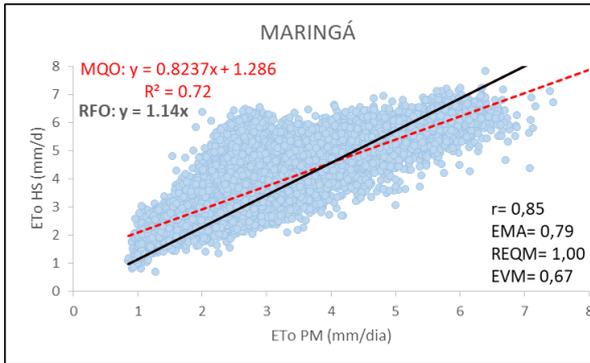
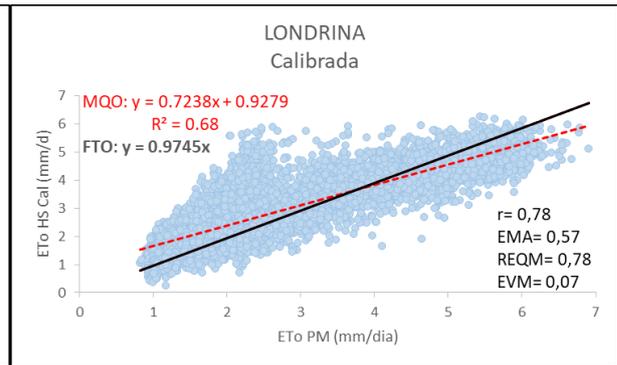
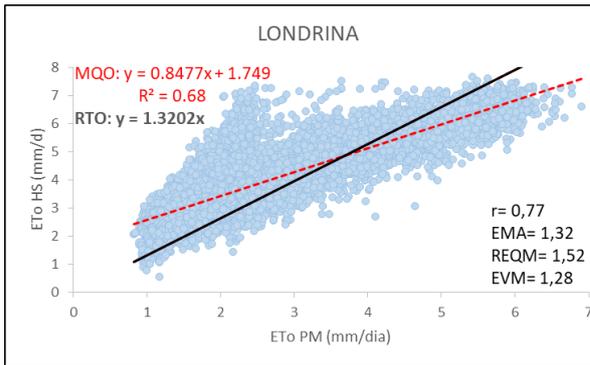
Mehdizadeh et al. (2016) obtiveram os maiores coeficientes de α HS ajustados, para o noroeste do Irã, com valores de 0,0035, 0,0031 e 0,0028, sendo o valor geral de 0,0026. Em estações com alta velocidade do vento, os valores dos coeficientes calibrados foram máximos. Os resultados indicaram que a nova equação de HS calibrada tem boa concordância com o método PM, para estimativa do ETo.

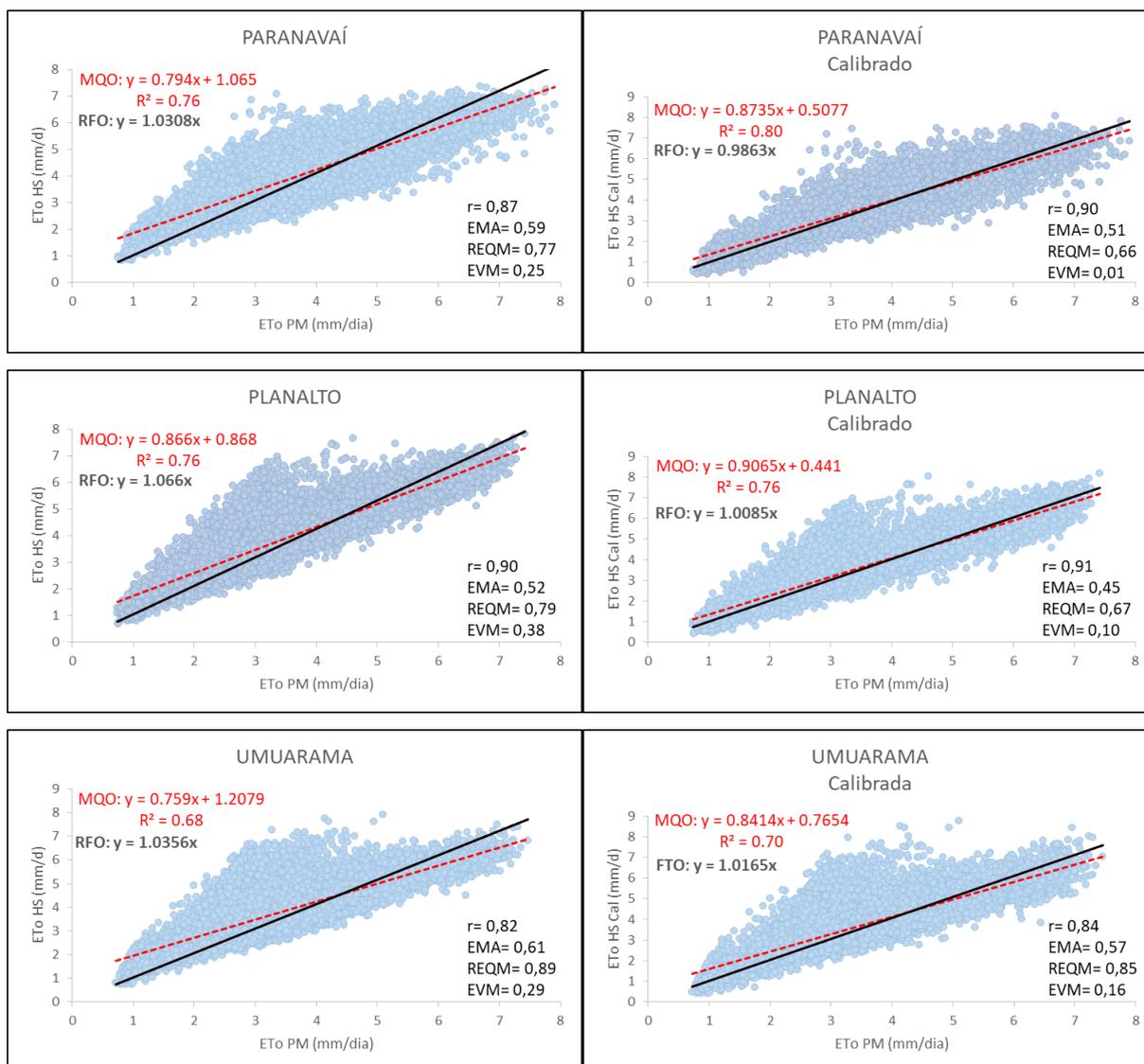
A figura 7, abaixo, mostra a dispersão dos dados de evapotranspiração pelo método original de Hargreaves-Samani, bem como o método calibrado, comparados ao método padrão FAO Penman-Monteith, assim como as análises estatísticas utilizadas para validação dos parâmetros ajustados. Estão representados os dados de mínimos quadrados ordinários (MQO), coeficiente de determinação (R^2), regressão forçada à origem (RFO), correlação de Pearson (r), erro médio absoluto (EMA), raiz do erro quadrado médio (REQM) e erro viés médio (EVM).

Figura 7 - Calibração da equação de Hargreaves-Samani.









O R^2 da regressão MQO, que indica quanto da variação do ETo PM é explicada pela variação do ETo HS/ETo HS Cal, permaneceu o mesmo em quatro estações, aumentando, na maioria, de forma a se aproximar mais de 1,0.

Para Althoff et al. (2019), as inclinações da regressão do RFO, próximas a 1,0, indicam que ETo PM e ETo HS/ETo HS Cal são semelhantes, enquanto valores $>1,0$ sugerem superestimação e $<1,0$ subestimação. Na maioria dos dados, os valores de HS original subestimaram os valores obtidos pela equação padrão FAO. Os valores, para as estações estudadas, após calibração, aproximaram-se significativamente de 1,0, indicando ótima similaridade dos dados, com exceção de Bandeirantes-PR, cujo valor reduziu, porém, com baixa significância.

A correlação dos dados melhorou nas estações adotadas, com exceção de Paranaguá-PR, que permaneceu a mesma. Os valores aproximaram-se de 1,0, indicando correlações muito altas e quase perfeitas, segundo a classificação de Pearson (Tabela 11). A

calibração foi fundamental para a minimização de erros nas estimativas de ETo, diminuindo o EMA, RQEM e EVM, em todas as estações.

Tabela 11 - Classificação do coeficiente de Pearson (COHEN, 1988)

Muito baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito alto	Quase perfeito
$r < 0,1$	$0,1 < r < 0,3$	$0,3 < r < 0,5$	$0,5 < r < 0,7$	$0,7 < r < 0,9$	$r > 0,9$

Portanto, recomenda-se, para o local, os novos coeficientes calibrados de Hargreaves-Samani.

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam uma boa calibração do método de Hargreaves-Samani, considerando redução dos erros, melhores valores de regressão, determinação e correlação dos dados.

Um agrupamento dos dados, calibração e análise por regiões homogêneas, como as de mesma classificação climática, são indicados para uma significativa melhora estatística dos dados.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUMAGA, U., TARHULE, A., YUSUF, A.A. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa. **Agric. For. Meteorol., Netherlands - SIR**, v.232, p. 225-234, 2017.

ALLEN, R. REF-ET. **Reference Evapotranspiration Calculator**. University of Idaho, 2016. Disponível em: <https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/research/water-resources/ref-et-software>. Acesso em: 23 abr. 2020.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage**, Rome, v.56, p.1-15, 1998.

ALTHOFF, D., SANTOS, R. A. D., BAZAME, H. C., CUNHA, F. F. D., & FILGUEIRAS, R. Improvement of Hargreaves-Samani Reference Evapotranspiration Estimates with Local Calibration. **Water**, Basel, Switzerland, v. 11, n. 11, p. 2272-2287, 2019.

APARECIDO, L. E. de O.; ROLIM, G. de S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S. de; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite e Camargo. Classificações climáticas para zoneamento climático no Estado do Paraná, Brasil. **Ciênc. agrotec**. Lavras, v. 40, n. 4, p. 405-417, ago., 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542016000400405&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 23 abr. 2020.

AWAL, R., HABIBI, H., FARES, A., & DEB, S. Estimating reference crop evapotranspiration

under limited climate data in West Texas. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Beltsville-USA, v. 28, p. 100677-100695, 2020.

COBANER, M., CITAKOĞLU, H., HAKTANIR, T., & KISI, O. Modifying Hargreaves–Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey. **Hydrology Research**, London/UK, v. 48, n. 2, p. 480-497, 2016.

COHEN, J. **A análise estatística de energia** (2 ed ND.). Hillsdale NJ: Erlbaum, 1988.

FARIAS, V. D. da S., COSTA, D. L. P., de NOVOA PINTO, J. V., de SOUZA, P. J. O. P., de SOUZA, E. B.; ORTEGA-FARIAS, S. Calibração de modelos de evapotranspiração de referência no Pará. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá-PR, v. 42, n.1, p. e42475-42484, 2020.

FERREIRA, L. B., CUNHA, F. F. D., DUARTE, A. B., SEDIYAMA, G. C., & CECON, P. R. Lucas Borges et al. Calibration methods for the Hargreaves-Samani equation. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 42, n. 1, p. 104-114, mês, 2018.

GUNDALIA, M., DHOLAKIA, M., 2016. Modelling daily reference evapotranspiration in Middle South Saurashtra Region of India for monsoon season using dominant meteorological variables and the FAO-56 Penman-Monteith method. **Int. J. of Sustainable Water & Environmental Systems**, Canadá-USA, v. 8, n. 2, p. 101-108, 2016.

GURSKI, B. C., de SOUZA, J. L. M., JERSZURKI, D., SCHÄFER, R. F., & SCHÄFER, H. Métodos alternativos de estimativa da evapotranspiração de referência anual e nas diferentes estações do ano em Curitiba-PR, Brasil. **Cultura Agronômica: Revista de Ciências Agronômicas**, Ilha Solteira-SP, v. 25, n. 2, p. 155-166, 2016.

GURSKI, B. C.; JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M. Métodos alternativos de evapotranspiração de referência para os principais tipos climáticos do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 53, n. 9, p. 1003-1010, 2018.

HARGREAVES, G.H., SAMANI, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HOWES, D.J.; FOX, P.; HUTTON, P.H., 2015. Evapotranspiration from natural vegetation in the Central Valley of California: monthly grass reference-based vegetation coefficients and the dual crop coefficient approach. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston-USA, v. 20, n. 10, p. 04015004-1 a 04015004-17, 2015.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Cartas Climáticas**. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>. Acesso em: 23 abr. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 23 abr. 2020.

MEHDIZADEH, S., SAADATNEJADGHARAHASSANLOU, H., & BEHMANESH, J. Calibration of Hargreaves–Samani and Priestley–Taylor equations in estimating reference evapotranspiration in the Northwest of Iran. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 63, n. 7, p. 942-955, 2017.

NITSCHKE, P. R.; CARAMORI, P. H.; RICCE, W. da S.; PINTO, L. F. D. **Atlas Climático do Estado do Paraná**. Londrina, PR: IAPAR, 2019.

OLIVEIRA, J. B. DE; BARBOSA, P. J. DE A.; NOGUEIRA, D. H.; ARAÚJO, E. M.; ARRAES, F. D. D. Análise da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Tauá, no Ceará. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Pernambuco, v. 2, n. 4, p. 403-411, 2017.

PAREDES, P., J. C. FONTES, E. B. AZEVEDO, AND L. S. PEREIRA. 2018. "Daily reference crop evapotranspiration in the humid environments of Azores islands using reduced data sets: Accuracy of FAO-PM temperature and Hargreaves-Samani methods." **Theoretical and Applied Climatology**, Springer-Verlag GmbH Austria, v.134, n.1-2, p.595–611. 2018.

PAREDES, P., L. S. PEREIRA. Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ET_o from temperature with focus on solar radiation. **Agric. Water Manage**, v.215, n.1-2, p. 86-102, 2019.

PINHEIRO, M. A. B., OLIVEIRA, A. L. M., BORGES JÚNIOR, J. C. F., OLIVEIRA, E. C. D., & CARVALHO, L. G. D. Reference evapotranspiration based on temperature in Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras-MG, v. 43, p.4219, 2019.

SENATORE, A., PARRELLO, C., ALMOROX, J., & MENDICINO, G. Exploring the Potential of Temperature-Based Methods for Regionalization of Daily Reference Evapotranspiration in Two Spanish Regions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 146, n. 3, p. 0502000-1-13, 2020.

ZANETTI, S. S., DOHLER, R. E., CECÍLIO, R. A., PEZZOPANE, J. E. M., & XAVIER, A. C. Proposal for the use of daily thermal amplitude for the calibration of the Hargreaves-Samani equation. **Journal of hydrology**, v. 571, n.1, p. 193-201, 2019.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trabalhando-se com médias mensais ou anuais, pode-se obter e analisar dados como um todo, sem perder a veracidade das informações, porém, mesmo com a obtenção de valores máximos e mínimos, torna-se difícil a visualização de valores pontuais e casos isolados, o que pode interferir nos resultados, quando se trabalha com comparações de metodologias, regiões hidrográficas, localizações físicas ou tipos climáticos, dentre outros.

Assim, a análise dos dados no período diário foi de significativa validação. Recomenda-se, como trabalhos futuros, o uso de dados diários, mensais e sazonais, para resultados mais amplos e fins de comparação.