



Danyllo Gomes Figueredo de Andrade

Análise quantitativa entre métodos de estimativa da evapotranspiração horária integrada e diária no Brasil

Recife

2018

Danyllo Gomes Figueredo de Andrade

Análise quantitativa entre métodos de estimativa da evapotranspiração horária integrada e diária no Brasil

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Departamento de Estatística e Informática

Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Glauco Estácio Gonçalves

Recife

2018

*À Deus, embora ele não precise, e a todos aqueles que amam a ciência e a praticam
a partir do princípio epistemológico verdadeiro, isto é, Teo-Referência.*

Soli Deo Gloria.

Agradecimentos

Agradeço à Deus, pois Nele vivo, me movo e existo (At 17:28a). O término desta etapa lembra-me que fui criado à Sua imagem e semelhança, que manchada pelo pecado é restaurada na redenção em Cristo. Por isso, não posso dizer que eu perseverarei até aqui, essa virtude é Dele. Ele o fez por mim. Sua mão me sustentou.

À minha amada esposa pelos cafés das madrugadas, sua amável companhia e seu incentivo diário. Seu cuidado e dedicação me constrangem. Você é a mais fina graça que Deus me presenteou.

Aos meus pais que em momentos oportunos e inoportunos dedicaram-me conselhos. Certamente o esforço de vocês não foi em vão. A conclusão desta etapa é possível porque vocês sempre estiveram presentes cumprindo a missão entregue à vocês. Ao meu irmão que me abençoou com a sua presença acompanhado de um belo Cojiba.

Ao Conselho da Igreja Presbiteriana Pedras Vivas que me suportou incessantemente, apoiando-me com longanimidade e oração. Agradeço aos meus amigos do corpo de Cristo que constantemente encorajavam-me. Um agradecimento especial ao meu amigo Victor que não mediu esforços para ajudar-me.

Ao professor Glauco pela paciência, dedicação, alta disponibilidade, amizade e estímulo durante esta jornada. Sem você não seria possível concluir. Muito obrigado.

Todos vocês são a providência de Deus em ação.

*“Ninguém Te adorará sobre um altar
Lavrado em pedra pela arte ou ciência.
De terra o desejas puro, alvar,
Em que te louve muda transparência.
Não és madeira, ouro ou escultura.”
(Wladislau Martins Gomes)*

Resumo

A evapotranspiração é a fusão de dois processos naturais de perda de água do solo, que são: evaporação e transpiração. A evaporação consiste na mudança de estado da água que está contida no solo, passando do estado líquido para o gasoso. Por sua vez, a transpiração das plantas ocorre quando o vegetal realiza o processo de nutrição. As informações quantitativas de tais processos proporcionam uma lâmina de água mais precisa que auxiliam na resolução de problemas que envolvem o manejo de água na agricultura. A equação de Penman-Monteith FAO56 possibilita o cálculo da estimativa da medida da evapotranspiração de referência em um dia a partir dos dados horários somados ao longo de 24 horas e a partir de dados diários.

O objetivo principal deste trabalho é promover um ensaio quanto à avaliação estatística das estimativas de evapotranspiração de referência em um dia a partir dos dados horários somados ao longo de 24 horas e a partir de dados diários, comparando-as através da regressão linear, intervalo de confiança, viés estatístico, índice de concordância de Willmott, índice de correlação, índice de confiança e classificação de desempenho segundo o índice de confiança. Os dados utilizados foram de todo o Brasil, no período de 1 de janeiro à 31 de dezembro de 2017. Como objetivo específico pretende-se avaliar as estimativas dos dois métodos sob o aspecto quantitativo. Os resultados mostraram que no Brasil a medida da estimativa da evapotranspiração de referência diária é superestimada em aproximadamente 8.32% quando comparada a evapotranspiração de referência horária integrada. O Sul apresentou o maior R^2 com 0,927, enquanto que o Centro-Oeste apresentou o menor com 0,857. O R variou entre 0,963 e 0,926, sendo Sul e Centro-Oeste, respectivamente. O d variou entre 0,979 e 0,960, para o Sul e o Centro-Oeste, respectivamente. O c também apresentou maior valor no Sul e o menor no Centro-Oeste. Para todas as regiões, a classificação de desempenho segundo o índice de confiança mostrou-se "Ótima".

Palavras-chave: Evapotranspiração de referência, Penman-Monteith FAO56, Irrigação.

Abstract

Evapotranspiration is the fusion of two natural processes of soil water loss, which are: evaporation and transpiration. The evaporation consists of a change of state of the water that is contained in the soil, passing from the liquid to the gaseous state. In turn, the transpiration of plants occurs when the vegetable performs the nutrition process. Quantitative information from such processes provides a more accurate water slide that helps solve problems involving water management in agriculture. The Penman-Monteith FAO56 equation makes it possible to calculate the estimate of the reference evapotranspiration measure in one day from the hourly data summed over 24 hours and from daily data.

The main objective of this work is to promote a trial regarding the statistical evaluation of estimates of evapotranspiration reference evapotranspiration in one day from the hourly data summed over 24 hours and from daily data, comparing them through linear regression, interval confidence interval, statistical bias, Wilmott concordance index, decorrelation index, confidence index, and performance rating according to the confidence index. The data used were from all over Brazil, from January 1 to December 31 of 2017. The specific objective is to evaluate the estimates of the two methods under the quantitative aspect. The results showed that in Brazil the estimated daily evapotranspiration estimate is overestimated by approximately 8.32% when compared to the integrated hourly reference evapotranspiration. The South had the highest R^2 with 0.927, while the Midwest had the lowest with 0.857. The R ranged between 0.963 and 0.926, being South and Center-West, respectively. The d ranged from 0.979 to 0.960, to the South and the Midwest, respectively. The c also presented higher value in the South and the lowest in the Center-Oente. For all regions, the performance rating according to the confidence index was "Great".

Keywords: Reference Evapotranspiration, Penman-Monteith FAO56, Irrigation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Tanque Classe A	17
Figura 2 – Diagrama de Caixa da ET_0^h e da ET_0^d	27
Figura 3 – Gráfico da diferença entre ET_0^d e ET_0^h	28
Figura 4 – Gráfico entre ET_0^d (x) e ET_0^h (y)	29
Figura 5 – Gráfico de regressão da região Norte	30
Figura 6 – Distribuição acumulada da diferença entre a evapotranspiração acumulada por cada método de estimativa	32

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela dos critérios para a primeira validação dos dados	24
Tabela 2 – Tabela de Desempenho do índice c	26
Tabela 3 – Tabela com os resultados dos coeficientes da equação de regressão ($ET_0^h = \alpha * ET_0^d - \beta$). Região observada (Estrato: Global - Brasil; N - Norte; NE - Nordeste; CO - Centro-Oeste; SE - Sudeste; S - Sul), número de observações (n), intervalo de confiança para α (IC para α), intervalo de confiança para β (IC para β) e viés estatístico.	28
Tabela 4 – Tabela com os resultados dos índices. Região observada (Estrato: Global - Brasil; N - Norte; NE - Nordeste; CO - Centro-Oeste; SE - Sudeste; S - Sul), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), índice de correlação (R), índice de confiança (c) e classificação do desempenho segundo o índice de confiança (desempenho).	29

Lista de abreviaturas e siglas

OMM	Organização Metereológica Mundial
INMET	Instituto nacional de Meteorologia
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
ET	Evapotranspiração
ET_0	Evapotranspiração de referência de uma cultura de plantação hipotética padrão
ET_c	Evapotranspiração de Cultura
K_c	Coeficiente de Cultura
ET_0^h	Evapotranspiração de referência horária integrada
ET_0^d	Evapotranspiração de referência diária

Sumário

	Lista de ilustrações	7
1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Motivação e Justificativa	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Organização do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Irrigação e Evapotranspiração	14
2.2	Métodos para a medição da evapotranspiração	15
2.3	Método para a estimativa da ET_0	16
2.3.1	Estimativa de ET_0 por meio de Tanque Classe A	16
2.3.2	Estimativa da evapotranspiração através de dados climáticos	17
2.4	Trabalhos relacionados	20
3	MÉTODO DE AVALIAÇÃO	23
4	RESULTADOS	27
4.1	Análise Global	27
4.2	Análise Por Regiões	30
4.3	Discussão	31
5	CONCLUSÕES	33
5.1	Contribuições e resultados alcançados	33
5.2	Trabalhos futuros	33
	REFERÊNCIAS	35
A	GRÁFICOS DA ET_0^h E ET_0^d DAS REGIÕES DO BRASIL	40

1 Introdução

Nos últimos anos tem havido um aumento gradativo das áreas cultivadas no planeta. Sabe-se que a água doce é fundamental para manutenção de tais cultivos, no entanto, ela está se tornando cada vez mais escassa e cara. Portanto, é necessário aprimorar a irrigação para obter uma melhor alocação da água, recurso essencial para a agricultura (RODRIGUES et al., 2018).

Atualmente, a agricultura irrigada é responsável pela produção de 40% dos alimentos do mundo e utiliza cerca de 70% de toda a água doce do planeta. Estima-se que devido ao crescimento populacional mundial esses números tendem a crescer significativamente (BICUDO; TUNDISI; SCHEUENSTUHL, 2016). Por isso, ocorre uma grande conscientização popular em relação aos recursos hídricos quando comparada à décadas passadas (CAMPOS et al., 2008). Sendo assim, neste contexto, o conhecimento da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) torna-se uma informação importante e indispensável para o bom manejo da água.

Pode-se afirmar que a evapotranspiração é a fusão de dois processos naturais de perda de água do solo, que são: evaporação e transpiração. A evaporação consiste na mudança de estado da água que está contida no solo, passando do estado líquido para o gasoso. Por sua vez, a transpiração das plantas ocorre quando o vegetal realiza o processo de nutrição (SILVA, 2006).

O processo padronizado para obter a estimativa da ET_0 é dispendioso e caro. No entanto, conhecer a ET_0 de determinada área é fundamental para mensurar o valor exato da lâmina de água que deverá ser aplicada por um sistema de irrigação, visando melhorar a efetividade na irrigação e economizar água (TRAJKOVIC; KOLAKOVIC, 2009).

Uma alternativa de baixo custo para obter a estimativa da ET_0 para uma dada localidade é calculá-la a partir de dados meteorológicos (ESTEVES et al., 2010), cujos valores podem ser obtidos por meio de estações meteorológicas instaladas no local ou de agências de meteorologia. Tais dados são geralmente organizados em séries históricas, levando em consideração a hora e o dia em que foram registrados, conforme as normas definidas pela OMM (Organização Meteorológica Mundial). No Brasil, o órgão INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) é uma das agências que fornecem dados ambientais em formato digital, viabilizando pesquisas como a realizada neste trabalho.

1.1 Motivação e Justificativa

Segundo (ALLEN et al., 1998), para determinar a evapotranspiração da cultura (ET_c) é necessário calcular a evapotranspiração potencial de uma cultura de referência (ET_0) e multiplicá-la pelo coeficiente de cultura que se refere à plantação (K_c). Este dado é obtido por meio de observações e pesquisas no ambiente do experimento, explicitando a relação entre a ET_c e ET_0 .

É sabido que os lisímetros, instrumento oficial para obtenção da evapotranspiração, possuem um alto custo de implantação. Já os métodos para o estimativa de ET_0 baseados em variáveis climáticas, segundo (BONOMO, 1999), são mais baratos porque demandam dados de fácil obtenção. De tais métodos, aqueles que obtém estimativas a partir somente da temperatura do ar são frequentemente usados (JAHANBANI; EL-SHAFIE, 2011; KHOOB, 2008; TRAJKOVIC; KOLAKOVIC, 2009) e considerados os mais baratos, uma vez que necessitam de poucos parâmetros de entrada. Os métodos de Hargreaves-Samani (HARGREAVES; ALLEN, 2003) e Blaney-Criddle se enquadram nesta categoria. A credibilidade dessas estimativas são estabelecidas pelo grau de aproximação frente ao valor estimado pelo método padrão Penman-Monteith FAO56 (VESCOVE; TURCO, 2005), que obtém a estimativa de ET_0 a partir de uma quantidade expressiva de variáveis climáticas, o que melhora sobremaneira a sua precisão mas dificulta sua utilização (CONCEIÇÃO, 2010).

A equação de Penman-Monteith FAO56 possibilita o cálculo da estimativa da medida diária de ET_0 de duas formas: a partir da integração dos valores horários (ET_0^h) e a partir do cálculo direto do valor diário (ET_0^d). (BACK, 2007) afirma que a escolha de uma ou outra forma depende do objetivo, da precisão desejada e do intervalo de tempo usado no cálculo das variáveis meteorológicas. (EVETT et al., 2000) afirma que a evapotranspiração diária é mais precisa quando soma-se todas as horas do dia (ET_0^h) do que quando calcula-se a estimativa a partir dos dados diários (ET_0^d). Inclusive, sabe-se que a ET_0^d exibe geralmente valores mais elevados que a ET_0^h (YILDIRIM; CAKMAK; KOSE, 2004).

Com o presente trabalho pretende-se avaliar a estimativa de medição do método Penman-Monteith FAO56 diário a partir de medidas horárias frente ao cálculo diário diretamente, observando os índices apresentados em todo o território brasileiro durante o ano de 2017. Com esses resultados saberemos qual o comportamento geral das duas formas de cálculo nas diferentes regiões do Brasil.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é promover um ensaio quanto à avaliação estatística das estimativas de ET_0^h e ET_0^d , comparando-as através da regressão linear, intervalo de confiança, viés estatístico, índice de concordância de Wilmott, índice de correlação, índice de confiança e classificação de desempenho segundo o índice de confiança.

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. Além deste capítulo introdutório que insere o leitor no assunto a ser tratado no presente trabalho, têm-se o capítulo 2 que traz conceitos básicos sobre irrigação, evapotranspiração e métodos para cálculo da evapotranspiração. O capítulo 3 descreve em detalhes o método seguido no experimento realizado neste trabalho. O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos e realiza uma avaliação comparativa frente a trabalhos similares a este. Finalmente, as contribuições, resultados alcançados e trabalhos futuros serão apresentados no capítulo 5.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Irrigação e Evapotranspiração

A irrigação pode ser definida como um método artificial que provê abastecimento hídrico para uma cultura agrícola, onde a água é limitada. Ela tem como objetivo modificar as possibilidades agrícolas da região onde está sendo aplicada para corrigir a distribuição natural das chuvas (LIMA; FERREIRA; CHRISTOFIDIS, 1999).

Para obter um resultado preciso na irrigação, deve-se levar em consideração as condições particulares do solo, clima e tipo específico da cultura (ALENCAR et al., 2009). Esses fatores vão determinar qual a melhor forma de irrigação, que pode ser: localizada, quando a aplicação da água é realizada de forma direcionada por meio de gotejadores próximos às plantas; superfície, quando a água é aplicada de forma concentrada entre as fileiras das plantas; aspersão, quando a água é aplicada por meio de aspersores com bocais proporcionando uma forma de chuva artificial; e subterrânea, quando visa a formação de um lençol freático artificial ou o controle de um natural.

Para um bom projeto e manejo da irrigação, faz-se necessário a observação de fatores que influenciam diretamente na produção agrícola. Um desses fatores é a evapotranspiração (ET) que é a medida da quantidade de água (dada em mm por unidade de tempo) transferida para a atmosfera pelo processo de evaporação de água em solo e pela transpiração das plantas (ALENCAR et al., 2009).

A evaporação é a mudança da água do estado líquido para o estado gasoso. Nesse processo a água recebe calor de tal forma que o calor latente conduz a água ao ponto de ebulição. A água no estado gasoso é denominada vapor d'água e, neste estado, integra a atmosfera (SILVA, 2006).

A transpiração das plantas, por sua vez, é o processo fisiológico que faz parte do metabolismo da planta na atmosfera. As plantas retiram água do solo através de suas raízes, utilizam uma porção e liberam o restante pelos estômatos presentes nas folhas, sendo a temperatura, umidade e velocidade do vento fatores que afetam diretamente neste processo.

Além de ser afetada por fenômenos meteorológicos, a evapotranspiração também depende do tipo da cultura e seu respectivo estágio de desenvolvimento. Desta forma, a evapotranspiração real de uma cultura em situações normais de cultivo (ET_c) pode ser estimada a partir da evapotranspiração potencial de uma cultura de referência, representada por ET_0 , que consiste na estimativa de evapotranspiração para uma cultura de crescimento ativo, sem restrição hídrica nem nutricional (ALENCAR et al.,

2009).

O procedimento padrão para calcular a ET_c é ajustar a ET_0 usando um coeficiente de cultura (K_c) (DJAMAN et al., 2017), conforme equação abaixo

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (2.1)$$

onde K_c representa os efeitos integrados das mudanças na área foliar, altura da planta, características da cultura, taxa de desenvolvimento da cultura, plantio ou data de semeadura, condições de solo, condições gerais de clima e práticas de manejo (DJAMAN; IRMAK, 2013). Já o valor de ET_0 captura os efeitos da transferência de água causada por fatores meteorológicos e ambientais.

Os valores de K_c são estimados experimentalmente para cada cultura em uma dada região. Em Uberaba-MG o K_c foi estimado para o plantio de rúcula e alface em 1,2 e 1,21, respectivamente (SANTANA; RIBEIRO; MANCIN, 2016), enquanto que para o plantio de feijão em Patos de Minas-MG o K_c foi estimado em 0,78 (SANTANA et al., 2018). No solo de gramínea em Nebraska-EUA, estimou-se os valores mínimos e máximos mensais do K_c em 0,05 e 1,05, respectivamente, na estação fria, enquanto que na estação quente variou entre 0,28 e 0,99 (ROMERO; DUKES, 2016). A estimativa de ET_0 pode ser feita por diferentes métodos como será detalhado na seção 2.3.

2.2 Métodos para a medição da evapotranspiração

A ET_c e a ET_0 podem ser medidas por meio de instrumentos denominados lisímetros, que podem ser de três tipos: percolação, pesagem mecânica e flutuação. Através da lisimetria de pesagem mecânica mede-se a variação do peso de um bloco de solo, devido à entrada e saída de água, por meio de uma célula de carga que monitora a dinâmica da água no solo (CAMPECHE et al., 2011). Essa técnica é considerada padrão na determinação da evapotranspiração de cultura e de referência já que oferece maior precisão (MENDONÇA et al., 2003), embora seja a mais cara. Além disso, permite realizar leituras em intervalos de tempo reduzido e cálculo simples. A ET , neste caso, é o resultado de duas pesagens consecutivas (SANTOS, 2002), sendo calculada pela equação 2.2

$$ET = \frac{\Delta P}{S} \quad (2.2)$$

onde, ΔP é a variação do peso do tanque em quilogramas dividido pela área do tanque em m^2 representado por S .

No lisímetro de percolação há tanques impermeáveis enterrados no solo que contêm o solo local. Um dreno acoplado permite o escoamento da água, impedindo

que o solo fique saturado em caso de excesso (SANTOS, 2002). O cálculo é realizado conforme a equação 2.3, em que se soma P , que é a precipitação sobre o lisímetro, com I , que é a água adicionada ao lisímetro para fazê-lo atingir novamente a capacidade de campo, e subtrai-se C , que é a água drenada e coletada nos baldes. Este total é dividido pela área do tanque em m^2 representada por S .

$$ET = \frac{P + I - C}{S} \quad (2.3)$$

O lisímetro de flutuação consiste de dois tanques, de diâmetros diferentes. O maior é enchido com água, e o menor, que contém o solo, é colocado dentro do maior (SANTOS, 2002). A ET é calculada pela variação no nível da água no tubo de medida, segundo equação 2.4, onde F é o fator de conversão determinado para cada lisímetro, a expressão $h_1 - h_2$ mede a variação do nível do tubo de medida em centímetros, e soma-se a precipitação ou irrigação ocorrida sobre o lisímetro em milímetros representado pelo termo l .

$$ET = F \cdot (h_1 - h_2) + l \quad (2.4)$$

Embora os lisímetros sejam as ferramentas padrão para medição da evapotranspiração é muito difícil manter as condições internas dos lisímetros iguais ou semelhantes às condições externas do solo (PEREIRA; NOVA; SEDIYAMA, 1997). Esse fator dificulta a precisão das medidas da evapotranspiração por estes instrumentos.

2.3 Método para a estimativa da ET_0

Para obtenção da evapotranspiração de referência, especificamente, pode-se empregar instrumentos, como os Tanques Classe A descritos na Seção 2.3.1, ou métodos baseados em dados climatológicos discutidos na Seção 2.3.2.

2.3.1 Estimativa de ET_0 por meio de Tanque Classe A

O tanque classe A é construído numa chapa galvanizada, pintada de prata ou cromada. Possui um formato circular com 1,21m de diâmetro e 25,4cm de altura e é construído sobre um palanque pintado de branco com 15cm de altura (SANTOS, 2002), conforme figura 1. Para realizar uma leitura mais precisa do nível de água do tanque utiliza-se um poço tranquilizador para estabilizar a superfície da água.

Para realizar o cálculo da evaporação do tanque classe A (ECA) realiza-se diariamente a leitura às 9:00 horas, subtrai-se o resultado da leitura do dia anterior e a resultante será o valor da evaporação, segundo equação 2.5, onde $h_n - h_{n+1}$ representa a diferença entre as leituras diárias, e P é a precipitação ocorrida no período

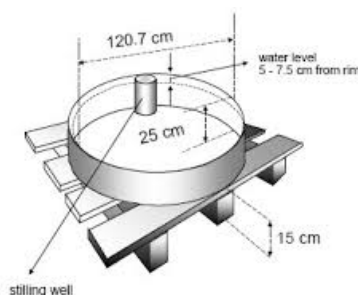


Figura 1 – Tanque Classe A

Fonte: (OLIVEIRA, 2007)

em milímetros. Para calcular a ET_0 necessita-se multiplicar o ECA pelo coeficiente do tanque (K_T), conforme equação 2.6, onde K_T incorpora fatores globais como umidade relativa do ar e velocidade do vento (SANTOS, 2002).

$$ECA = (h_n - h_{n+1}) + P \quad (2.5)$$

$$ET_0 = K_T \times ECA \quad (2.6)$$

A estimativa de ET_0 através do método do Tanque Classe A possui baixo custo e facilidade no manuseio (PEIXOTO et al., 2010). O tanque possui uma pequena dimensão e está constantemente exposto ao sol, não existindo mecanismos para impedir o processo de evaporação. Portanto, o valor da evaporação é sempre maior em relação à perda efetiva da cultura, mesmo apresentando ótimas condições (ANGELOCCI; SENTELHAS; PEREIRA, 2002). Além disso, a estimativa de ET_0 através do método do Tanque Classe A é menos precisa quando comparada ao método Penman-Monteith utilizando dados climáticos (PRAHARAJ; MOHANTY; SAHOO, 2018).

2.3.2 Estimativa da evapotranspiração através de dados climáticos

A estimativa de ET_0 a partir de dados meteorológicos é uma importante alternativa utilizada largamente no manejo agrícola dado que depende apenas de um conjunto de equações pré-definidas e de dados meteorológicos cuja disponibilidade tem aumentado atualmente.

Existem diferentes métodos para estimativa da ET_0 que utilizam um ou mais dados meteorológicos, tais como: temperatura do ar, saldo de radiação solar, umidade relativa do ar e dados sobre o vento (BRIXNER; SCHÖFFEL; TONIETTO, 2014). A escolha de um ou outro método para determinação da evapotranspiração deve considerar a praticidade e a precisão do modelo, visto que os modelos apresentam diferente sensibilidade sobretudo quanto à precisão instrumental (SILVA et al., 2015).

O método de Hargreaves-Samani ([HARGREAVES; SAMANI, 1985](#)), por exemplo, requer a temperatura máxima e mínima do ar e a radiação solar estimada a partir da latitude do local e dia do ano. Desta forma, permite a estimativa de ET_0 quando os dados meteorológicos são limitados. Já o método de Blaney-Criddle ([PRUITT, 1977](#)) faz uso de componentes meteorológicas adicionais como a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. ([GAO et al., 2017](#)) fazem uma avaliação de sete métodos diferentes para estimativa de evapotranspiração por meio de dados meteorológicos e apresentam resultados para regiões úmidas, áridas e semi-áridas.

A despeito da multiplicidade de métodos existentes, o método de Penman-Monteith FAO56 é considerado padrão para estimativa da evapotranspiração de referência segundo a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations* - Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) ([ALLEN et al., 1998](#)).

A equação de Penman-Monteith FAO56 possibilita o cálculo da estimativa da medida de evapotranspiração de referência em um dia de duas formas. Na primeira forma, considerada a mais precisa para estimar a ET_0 ([JENSEN; ALLEN, 2016](#)), calcula-se a evapotranspiração diária pela integração dos valores horários de evapotranspiração, conforme equação

$$ET_0^h = \sum_{i=1}^{24} ET_{0,i}^h \quad (2.7)$$

onde ET_0^h é a evapotranspiração diária (dada em mm/dia) obtida a partir da integração dos valores horários $ET_{0,i}^h$ (dados em mm/h). Por sua vez, a evapotranspiração de referência horária é calculada conforme a equação

$$ET_{0,i}^h = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_h + 273} u_2 (e^o(T_h) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2.8)$$

onde R_n é o saldo da radiação líquida por hora ($MJ.m^{-2}.h^{-1}$); G é o fluxo de calor sensível no solo ($MJ.m^{-2}.h^{-1}$); T_h é a temperatura média horária do ar ($^{\circ}C$); u_2 é a velocidade do vento a 2m de altura ($m.s^{-1}$); e_0 é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa); e_a é a pressão atual de vapor d'água (kPa); Δ é a inclinação da curva de saturação da pressão do vapor à temperatura média do ar ($kPa.^{\circ}C^{-1}$); e γ é o coeficiente psicrométrico ($kPa.^{\circ}C^{-1}$).

Similarmente, a evapotranspiração diária ET_0^d (dada em $mm.d^{-1}$) é obtida pela equação,

$$ET_0^d = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{media} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (2.9)$$

onde R_n é o saldo de radiação líquida por dia ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$); G é o fluxo de calor sensível no solo por dia ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$); T_{media} é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$); u_2 é a velocidade média do vento a 2m de altura ($m.s^{-1}$); e_s é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa); e_a é a pressão atual de vapor d'água (kPa); Δ é a inclinação da curva de saturação da pressão do vapor à temperatura média do ar ($kPa.^{\circ}C^{-1}$); e γ é o coeficiente psicrométrico ($kPa.^{\circ}C^{-1}$).

Note-se que para a estimativa de ET_0^d considera-se que $G \approx 0$ (ALLEN et al., 1998), enquanto que para $ET_{0,i}^h$ considera-se que $G = 0.1 \times R_n$ nos horários em que há luz solar e $G = 0.5 \times R_n$ nos horários da noite.

O parâmetro psicrométrico γ , em ambos os casos, pode ser calculado segundo a equação

$$\gamma = 0,665 * 10^{-3} Patm \quad (2.10)$$

onde $Patm$ é a pressão atmosférica local (kPa).

A inclinação da curva de saturação do vapor d'água (Δ) pode ser calculada pela equação 2.11, observando-se que T será substituído pela média horária (T_h) ou diária (T_{media}) em cada caso.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right) \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (2.11)$$

Pode-se chamar a diferença entre e_s e e_a de déficit de saturação, cujo cálculo é definido pela seguinte equação

$$e_s = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (2.12)$$

$$e_a = 0,6108 * \exp\left(\frac{17,27T_{dewpoint}}{T_{dewpoint} + 237,3}\right) \quad (2.13)$$

onde $T_{dewpoint}$ é a temperatura de ponto de orvalho (em C) e T é a T_{media} ou T_h .

A radiação líquida diária (R_n) é definida pela diferença $R_{ns}-R_{nl}$, em que R_{ns} é a radiação útil de comprimentos de ondas curtas, que pode-se obter utilizando a equação

$$R_{ns} = (1 - a)R_s \quad (2.14)$$

onde a representa o albedo para grama (normalmente o valor de 0,23), e R_s (MJ/m^2) é a radiação solar. A R_{nl} pode ser definida pela seguinte equação

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{maxk} + T_{mink}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (2.15)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman ($MJm^{-2}dia^{-1}$); T_{maxk} e T_{mink} são as temperaturas absolutas máxima e mínima durante o período das 24 horas (K), respectivamente, e no caso horário deve-se usar a temperatura absoluta média horária; e R_{so} é a radiação de céu claro diária ($MJm^{-2}dia^{-1}$). O R_{so} pode ser calculado pela expressão $R_{so} = (a_s + b_s)R_a$, onde $a_s + b_s$ é a fração de radiação extraterrestre atingindo a terra em dias de céu claro e R_a é a constante de radiação extraterrestre ($0,0820MJm^{-2}$).

Como visto acima, diversos parâmetros necessários ao cálculo da ET_0^d e da ET_0^h são derivados por meio de equações padronizadas. Contudo, a T_{media} , T_h , u_2 , $Patm$, UR , R_s são dados que precisam ser obtidos via sensores.

Ambos os métodos de Penman-Monteith FAO56 possuem aspectos termodinâmicos e aerodinâmicos em seu equacionamento; resultados precisos tanto em climas úmidos quanto áridos; e aceitação e aplicação mundial (ER-RAKI et al., 2010). Embora o método seja considerado mais preciso quando usado na base horária e somado os valores para obter a estimativa diária (JENSEN; ALLEN, 2016), a aquisição de dados para o cálculo na base horária é um obstáculo em alguns contextos (MOURA et al., 2010).

2.4 Trabalhos relacionados

A seguir são apresentados alguns trabalhos similares que avaliam a estimativa da ET_0^d e da ET_0^h , observando as diferenças entre as estimativas em locais e tipos de solo distintos.

O trabalho de (LOPES; LEAL, 2016) avalia estimativas de ET_0 pelo método de Penman-Monteith em períodos diários e a horária integrada no Polo de Desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA, analisando dados de 17 estações meteorológicas. A avaliação baseou-se no índice de concordância, coeficientes da regressão linear e os respectivos teste t. A análise apontou alta correlação entre as duas medidas, sendo que o maior valor do coeficiente de determinação entre ET_0^d e ET_0^h foi igual a 0,980 e o menor igual a 0,872. De acordo com o índice de concordância de Willmott, os dados ficaram próximos de 1, apresentando uma concordância de classificação "Ótima" entre os dados. O maior desvio padrão foi de 0,349 mm/dia, enquanto que o menor foi de 0,157 mm/dia. Os autores concluem observando que o conjunto dos dados apresentou uma correlação satisfatória com o uso de dados horários integrados e diários, embora

tenha uma pequena variação do desvio padrão, que de acordo com os autores, pode estar associado a uma instabilidade da velocidade do vento. Além disso, os coeficientes de regressão apresentaram precisão e uma classificação ótima, segundo o índice de concordância de Willmott.

(DJAMAN et al., 2017) quantificam as diferenças associadas à ET_0^d e ET_0^h para condições áridas, semiáridas e úmidas na África Ocidental. Para tal, utilizou-se regressão linear simples, coeficiente de determinação e erro quadrático médio. A regressão linear entre ET_0^h e ET_0^d variam de 1,02 a 1,08, com alto coeficiente de determinação, cuja variação ficou entre 0,86 e 0,95. O erro quadrático médio, por sua vez, variou de 0,36 a 0,84. Ademais, as variações horárias de temperatura e umidade relativa são mais exatas quando comparadas à média diária desses dados.

Em outro trabalho, (DJAMAN et al., 2018) comparam a estimativa da ET_0^h com a ET_0^d com base nos dados de quatro estações meteorológicas automatizadas no Estado do Novo México (EUA) para o período de 2009-2017. Para tal comparação utilizou-se as técnicas teste t, gráficos, regressão linear simples e erro quadrático médio. As inclinações de regressão variaram de 1,00 a 1,10, e o coeficiente de determinação entre 0,63 a 0,97, evidenciando-se uma concordância satisfatória dos dados. O erro quadrático médio, por sua vez, variou de 0,21 a 0,98. Os autores concluem que a irrigação baseada na estimativa da ET_0^h é mais precisa devido ao tipo de solo avaliado neste trabalho, o qual possui pequena capacidade de retenção de água e é submetido a alta temperatura durante o período de crescimento e desenvolvimento da cultura. Afirma-se que o método ET_0^h variou, a depender da localização, de -0.2 a 16.6% maior que o anual quando comparado ao ET_0^d .

O trabalho de (PERERA et al., 2015) possui quatro objetivos, no entanto, para nosso trabalho, é relevante a comparação entre a ET_0^h e ET_0^d . A análise utilizou-se de dados climáticos de todo o continente australiano. Para calcular as diferenças utilizou-se o desvio padrão e a regressão linear. Os autores argumentam que em princípio, a ET_0^d calculada usando a equação diária é igual a ET_0^h . No entanto, deve-se racionalizar a base de soma de horas para a ET_0^h apenas para as horas de luz do dia, porque à noite a fotossíntese é inativa e a radiação líquida pode ser negativa, sugerindo zero na $ET_{0,i}^h$ destas horas. Não obstante, como resultado, os índices estatísticos indicam que é obtida uma melhor concordância entre as estimativas horárias e diárias da ET_0 quando os valores horários são agregados ao longo de 24 horas, em vez de ao longo das horas do dia somente.

Os trabalhos apresentados nesta seção apresentam métodos de avaliação comuns para a ET_0^h e a ET_0^d . Todos os trabalhos concluem que os métodos de estimativa da ET_0^h e ET_0^d apresentam uma boa correlação, sendo necessário atentar-se para o clima, estação do ano, velocidade do vento, e outras variáveis que podem influenciar

o resultado. O trabalho de (PERERA et al., 2015) observa que a ET_0^h no período da noite tende à zero.

3 Método de avaliação

Este capítulo descreve o experimento realizado para calcular as estimativas da ET_0^h e da ET_0^d . O principal objetivo deste experimento é verificar a diferença entre os resultados das estimativas. Primeiramente apresenta-se a fonte e consistência dos dados analisados, e em seguida explica-se as conversões necessárias dos dados obtidos.

A fonte de dados utilizada para este trabalho são dados climáticos coletados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As estações meteorológicas automáticas do INMET possuem um *data logger* que armazena os dados das variáveis ambientais (temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento, etc.) coletados minuto a minuto pelos sensores e integralizados a cada hora (INMET, 2011). Antes de serem armazenados, os dados passam por um controle de qualidade interno do INMET. Foram utilizados os dados do ano de 2017 para a execução destas análises, contudo os dados recentes podem ser consultados pelo site¹.

Devido a necessidade de obter uma cobertura espacial e temporal significativa na análise, decidiu-se realizar o experimento com um grande recorte espacial e temporal, onde foram consideradas 543 estações meteorológicas do Brasil inteiro no período de 1 de janeiro à 31 de dezembro de 2017. Neste período houve indisponibilidade de dados para 6188 dias, portanto foram avaliados 191642 dias ao total, considerando todas as estações meteorológicas.

Os cálculos de evapotranspiração diária e horária foram computados conforme as equações 2.9 e 2.8, respectivamente. Uma ferramenta em linguagem Python foi desenvolvida para computar automaticamente os valores de ET_0^d e ET_0^h de cada dia empregando a biblioteca *RefET*². Esta biblioteca proporciona opções para calcular a ET_0 a partir de funções de evapotranspiração de referência padronizadas conforme o método da FAO (ALLEN et al., 1998).

Cada uma das alternativas para o cálculo da evapotranspiração dependem de um conjunto diferente de parâmetros ambientais. Para calcular a $ET_{0,i}^h$ utilizou-se, além da hora do dia, o valor horário de T_{inst} (temperatura instantânea, em $^{\circ}C$), a temperatura de ponto de orvalho horária ($T_{dewpoint}$, em $^{\circ}C$), a radiação solar (Rs) ao longo da hora (em $MJ/m^2/h$) e a velocidade média do vento medida a 2m do solo ao longo da hora ($u2$, em m/s). Note-se que a evapotranspiração horária integrada é computada pela soma dos valores de $ET_{0,i}^h$, além disso deve-se ressaltar que alguns dados de Rs

¹ <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>

² <<https://pypi.org/project/RefET/>>

coletados pelo INMET apresentam valor menor que zero, para estes casos o valor de R_s é considerado zero.

Já o cálculo da ET_0^d depende da máxima temperatura do dia (T_{max} , em $^{\circ}C$), da mínima temperatura do dia (T_{min} , em $^{\circ}C$), da temperatura de ponto de orvalho média ($T_{dewpoint}$, em $^{\circ}C$) do dia, da radiação solar ao longo do dia (soma dos valores de R_s horários dada em $MJ/m^2/dia$) e da velocidade média do vento medida a 2m do solo ao longo do dia (média dos valores horários de u_2 , em m/s).

Em ambos os casos, o valor de $T_{dewpoint}$ é utilizado para o cálculo da pressão do vapor d'água (e_a , medida em kPa), que é feito conforme a equação 2.13 antes da inserção do cálculo da evapotranspiração na biblioteca *RefET*. Além disso, são utilizados no cálculo de ambos os valores de latitude e longitude no formato decimal, o dia juliano e a altitude da estação meteorológica em relação ao nível do mar (em metros).

Para uma melhor confiabilidade dos resultados, faz-se necessária a validação dos dados ambientais que, neste trabalho, foi realizada em duas etapas. A primeira etapa da validação seguiu o método de (XAVIER; KING; SCANLON, 2016) em que os dados capturados são verificados contra valores ambientais típicos do Brasil. A Tabela 1 apresenta os critérios da validação realizada. Vale salientar que o valor de R_s é validado de acordo com a irradiância solar extraterrestre R_a . Após esta etapa, os dados que não foram validados são marcados como *NA* para posterior filtro.

Tabela 1 – Tabela dos critérios para a primeira validação dos dados

Variável	Validação
U^2	$0 \leq u^2 \leq 100$
R_2	$0.003R_a \leq R_s \leq R_a$
$T_{max}, T_{min}, T_{inst}$	$-30 \leq T_{max}, T_{min}, T_{inst} < 50$

A segunda etapa da validação é feita de forma concomitante ao cálculo da evapotranspiração. No caso da ET_0^h , caso algum dado requerido para o cálculo de ET_0^h não exista na base de dados ou seja igual à *NA*, o valor *NA* é atribuído à $ET_{0,i}^h$ e a próxima hora é processada até concluir-se o somatório das 24 horas do dia em questão. Quando ao menos uma das horas de um dia possui um valor igual a *NA* entende-se que há ao menos uma hora inválida e, portanto, a ET_0^h para este dia específico é considerada inválida e, por isso, removida da análise. Portanto, para a ET_0^h utilizou-se os dias que possuem todas as horas computadas.

Para a ET_0^d , diferentemente, se algum dado requerido para o cálculo não existir, atribui-se à ET_0^d o valor *NA*. As amostras diárias contendo *NA* ou 0 são removidas do conjunto de dados. Note-se que, para remoção, basta que uma das estimativas de evapotranspiração (ET_0^h e ET_0^d) seja considerada inválida, assim remove-se o dia da

estação correspondente já que não é possível comparar os valores de evapotranspiração no dia em questão. Após as validações chegou-se a quantidade de 152655 dias válidos para a análise.

Após calculados, os dados de ET_0^d e ET_0^h de cada estação em cada dia foram analisados quanto à sua aderência e correlação. Os dados são analisados tanto de forma global, isto é, considerando todas as estações indistintamente, quanto de forma estratificada por região do Brasil: Norte, Nordeste, Centro-oeste, Sul e Sudeste. Todas as análises foram realizadas no Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE) RStudio, utilizando-se a linguagem R.

A análise desenvolvida neste trabalho segue o método aplicado em trabalhos similares tal como (LEAL, 2016) que avalia as estimativas da ET_0^d e ET_0^h a partir do índice de concordância, índices de determinação e intervalo de confiança, sendo os dois últimos indicadores também utilizados por (FEITOSA et al., 2011). O trabalho de (YILDIRIM; CAKMAK; KOSE, 2004) também avalia as mesmas estimativas, mas realiza a análise utilizando a regressão linear como base para as avaliações. O índice de concordância e o índice de desempenho também são usados por (NOIA et al., 2014) em um contexto similar para comparação entre as estimativas da ET_0 calculadas pelo método de Penman-Monteith FAO56 e Hargreaves Samani com base em dados horários, diários, decendiais e mensais.

Primeiramente, utiliza-se a regressão linear $ET_0^h = \alpha * ET_0^d - \beta$ como critério base para comparação entre as duas estimativas de evapotranspiração. Note-se que o uso da regressão linear neste trabalho tem como intuito capturar o quanto as estimativas horária integrada e diária divergem, em relação a um ideal que seria a concordância perfeita entre as duas estimativas.

A partir da regressão linear obtida são avaliados o coeficiente de determinação (R^2), que indica o desvio dos dados em relação à reta, e os respectivos intervalos de confiança para α e para β com 95% de confiança. O principal objetivo dos intervalos de confiança, neste caso, é determinar a tendência geral dos valores de ET_0^d em relação a ET_0^h , isto é, se os valores de uma estimativa tendem a ser maiores ou menores do que os valores da outra. De modo a investigar melhor esta tendência, utilizou-se o viés estatístico, conforme a equação abaixo

$$V = \widehat{ET_0^d} - \widehat{ET_0^h} \quad (3.1)$$

onde $\widehat{ET_0^d}$ é a média da evapotranspiração diária e $\widehat{ET_0^h}$ é a média da evapotranspiração integrada horária.

Foram considerados ainda outros indicadores estatísticos de precisão, que são, respectivamente, o índice de correlação (R), o índice de concordância de Willmott (d)

e o índice de confiança³ (c).

O índice R indica o quanto e de que forma as duas amostras se correlacionam (se positiva ou negativamente), pois esse método obtém o grau de tendência geral das estimativas em relação uma à outra. A partir desse índice observa-se se a ET_0^d e a ET_0^h tendem a se comportar da mesma forma.

O índice d , por sua vez, indica a exatidão comparada dos valores das estimativas, já que realiza o cálculo do afastamento dos valores de uma estimativa de evapotranspiração em relação à outra (WILLMOTT et al., 1985). Os valores variam entre 0 e 1, que indicam nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente, e são calculados conforme equação 3.2

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{j=1}^n (ET_{0,j}^h - ET_{0,j}^d)^2}{\sum_{j=1}^n (|ET_{0,j}^h - \widehat{ET}_0^d| + |ET_{0,j}^d - \widehat{ET}_0^d|)^2} \right] \quad (3.2)$$

onde n é o número de observações; $ET_{0,j}^h$ é o valor da evapotranspiração horária integrada para a observação j ; $ET_{0,j}^d$ é o valor da evapotranspiração diária para a observação j e \widehat{ET}_0^d a média dos valores de evapotranspiração diária observados.

Utilizou-se por fim o índice de confiança c proposto por (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), que é computado a partir dos índices de correlação e concordância de Willmott da forma $c = R * d$. Esta medida combina as medidas de correlação e concordância para produzir um índice único que indique o quanto as estimativas de evapotranspiração estão próximas, tanto em termos de tendência quanto de seu próprio valor. A Tabela 2, proposta por (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), é um guia para avaliar o grau de proximidade entre as duas estimativas em estudo.

Tabela 2 – Tabela de Desempenho do índice c

Valor de c	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
$0,76 \text{ a } 0,85$	Muito Bom
$0,66 \text{ a } 0,75$	Bom
$0,61 \text{ a } 0,65$	Mediano
$0,51 \text{ a } 0,60$	Sufrível
$0,41 \text{ a } 0,50$	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

³ Não confundir com o nível de confiança usado no cálculo dos intervalos de confiança

4 Resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados estatísticos do experimento descrito no Capítulo 3. A Seção 4.1 aborda a análise dos dados globais a partir da regressão linear, intervalo de confiança, viés estatístico, índice de concordância de Willmott, índice de correlação, índice de confiança e classificação do desempenho segundo o índice de confiança. A Seção 4.2 discute os resultados levando em consideração as nuances identificadas nas análises regionais. Por fim, a Seção 4.3 sintetiza e discorre sobre os resultados, comparando-os com aqueles obtidos em outros trabalhos.

4.1 Análise Global

Na Figura 2 pode-se observar que os diagramas de caixa para as duas estimativas estão muito próximas, a mediana de ambas as estimativas estão posicionadas próximo à 4, significando que os resultados da ET_0 são similares. O terceiro e o quarto quartil também são distribuídos de forma análoga no gráfico, sendo, respectivamente, aproximadamente 2,5 e 5,5. A ET_0^h apresenta o limite superior abaixo do limite superior da ET_0^d . Por sua vez, a ET_0^d apresenta maior intervalo de dados discrepantes (*outliers*) quando comparada à ET_0^h .

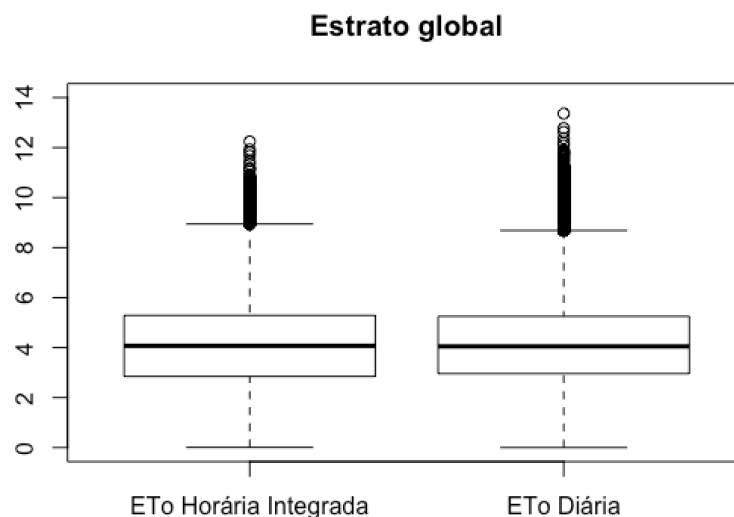


Figura 2 – Diagrama de Caixa da ET_0^h e da ET_0^d

A Figura 3 mostra a diferença (em mm/dia) entre as duas formas de cálculo de evapotranspiração. A diferença foi feita para cada dia válido em cada estação meteorológica. Pode-se notar um agrupamento das diferenças próximo à 0, significando que a maior parte dos dados levantados apresenta pequena diferença.

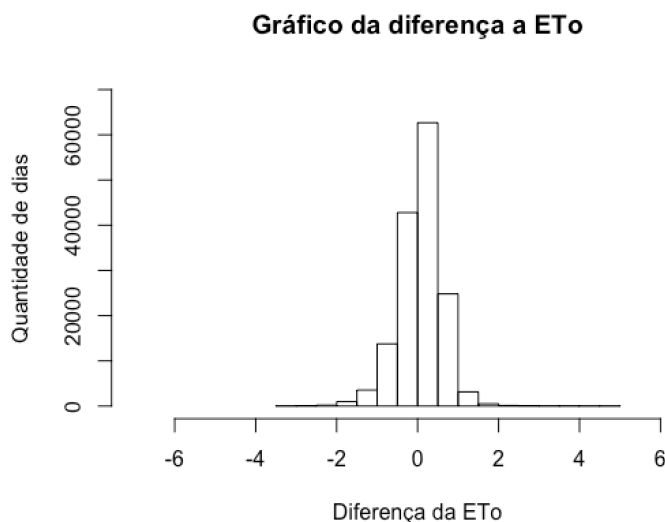


Figura 3 – Gráfico da diferença entre ET_0^d e ET_0^h

Tabela 3 – Tabela com os resultados dos coeficientes da equação de regressão ($ET_0^h = \alpha * ET_0^d - \beta$). Região observada (Estrato: Global - Brasil; N - Norte; NE - Nordeste; CO - Centro-Oeste; SE - Sudeste; S - Sul), número de observações (n), intervalo de confiança para α (IC para α), intervalo de confiança para β (IC para β) e viés estatístico.

Estrato	n	IC para α	IC para β	Viés
Global	152655	[0,984;0,987]	[-0,026;-0,012]	0,079
N	20759	[1,056;1,066]	[-0,270;-0,228]	0,005
NE	39883	[0,944;0,949]	[0,098;0,128]	0,155
CO	23919	[0,999;1,009]	[-0,002;0,042]	-0,036
SE	41587	[0,999;1,005]	[-0,085;-0,060]	0,064
S	26507	[0,997;1,004]	[-0,170;-0,143]	0,155

A Tabela 3 apresenta os resultados dos coeficientes da regressão linear $ET_0^h = \alpha * ET_0^d + \beta$. Com 152655 observações, o estrato global apresenta um intervalo de confiança para α (IC para α) que não inclui o 1, significando que para este conjunto de dados a ET_0^d é superior a ET_0^h . Tal conclusão é corroborada pelo viés, que apresenta o valor de 0,079 (superior a 0). O trabalho de (YILDIRIM; CAKMAK; KOSE, 2004) que avalia a região de Koruklu - Turquia apresentou resultado semelhante, no que diz respeito à superestimação da ET_0^d em relação à ET_0^h .

Os coeficientes e índices apresentaram resultados satisfatórios, como observado na Tabela 4. Os coeficientes de determinação (R^2) apresentam uma boa relação com o modelo observado. O R^2 do estrato global aproxima-se de 1, com o valor de 0,913. Na Tunísia, o trabalho de (JABLOUN; SAHLI, 2008) apresenta resultados cujos R^2 são superiores a 0,90. No Canadá, (SENTELHAS; GILLESPIE; SANTOS, 2010) obtém resultados para R^2 que variam entre 0,96 e 0,99. Dessa forma, o R^2 do estrato global (0,913) aproxima-se dos resultados obtidos nos trabalhos citados.

Tabela 4 – Tabela com os resultados dos índices. Região observada (Estrato: Global - Brasil; N - Norte; NE - Nordeste; CO - Centro-Oeste; SE - Sudeste; S - Sul), coeficiente de determinação (R^2), índice de concordância de Willmott (d), índice de correlação (R), índice de confiança (c) e classificação do desempenho segundo o índice de confiança (desempenho).

Estrato	R^2	d	R	c	Desempenho
Global	0,913	0,977	0,956	0,933	Ótimo
N	0,892	0,968	0,944	0,914	Ótimo
NE	0,917	0,977	0,958	0,935	Ótimo
CO	0,857	0,960	0,926	0,888	Ótimo
SE	0,917	0,978	0,958	0,936	Ótimo
S	0,927	0,979	0,963	0,942	Ótimo

Os índices de concordância de Willmott (d) aproximam-se de 1, conforme tabela 4. O estrato global apresentou um alto índice de exatidão nos resultados, com o valor de 0,977. Ainda sobre o estrato global, observa-se o alto índice de correlação (R), significando forte correlação positiva entre as variáveis estudadas. Por meio da figura 4 pode-se observar melhor a correlação entre a ET_0^d e a ET_0^h .

Os resultados obtidos nos índices d e R influenciam diretamente na classificação do desempenho do índice de confiança de Willmott (c). De forma geral, pode-se observar na tabela 4 que os resultados do índice c de todos os estratos avaliados apresentaram valores superiores a 0,85, obtendo a classificação de confiança de Willmott "Ótimo".

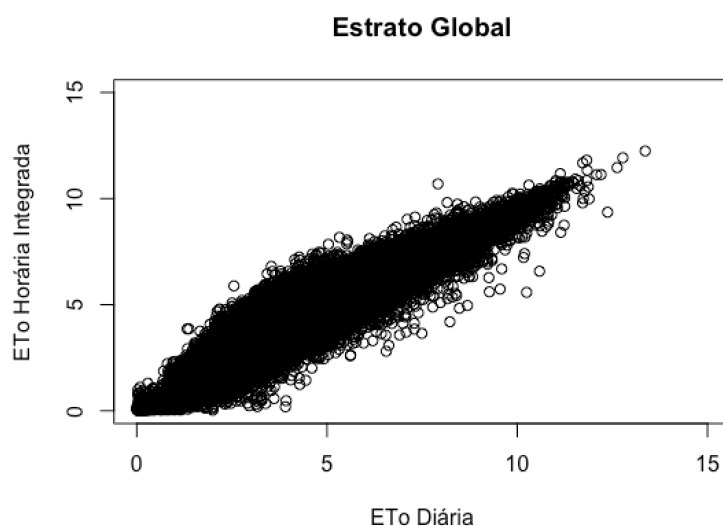


Figura 4 – Gráfico entre ET_0^d (x) e ET_0^h (y)

4.2 Análise Por Regiões

Ao avaliar as regiões na Tabela 3 percebeu-se que nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul o IC para α inclui o 1. Dessa forma, não pode-se determinar precisamente, a partir do α , se a ET_0^d é superior ou inferior a ET_0^h . Não obstante, a partir do viés pode-se concluir que no Centro-Oeste a ET_0^h é superior a ET_0^d , enquanto que no Sul e Sudeste o contrário ocorre. O trabalho de (NOIA et al., 2014) analisou estimativas na região de Dourados - MS (Centro-Oeste) e chegou à conclusão que a ET_0^d é superestimada em relação à ET_0^h , embora o nosso trabalho apresente o resultado inverso para o Centro-Oeste.

No Nordeste pode-se observar que o IC para α não inclui o 1, significando que a ET_0^d é superior a ET_0^h , o que é corroborado pelo viés que apresenta o valor de 0,155 (superior a 0). Tal conclusão é diferente da encontrada no trabalho de (LEAL, 2016) que avalia 17 estações do Nordeste, das quais 14 apresentam ET_0^h maior que a ET_0^d , enquanto que apenas 3 estações apresentam ET_0^d maior que ET_0^h .

Para o Norte observa-se que o IC para α apresenta um valor superior a 1, indicando que a ET_0^h é superior a ET_0^d . No entanto, o viés vai de encontro à essa conclusão, pois apresenta o valor de 0,005 (superior a 0), significando que a ET_0^d é superior a $ET_{0,i}^h$.

Todavia, observa-se que o valor de α é estimado a partir de uma amostra de dados, cuja distribuição inclui valores discrepantes que modificam o coeficiente angular da reta de regressão, como pode ser observado na Figura 5. Observa-se que a reta da regressão apresenta um pequeno desvio para cima ($\alpha > 1$), que nos leva a concluir que para essa amostra, o α não é uma métrica confiável, uma vez que a estimativa do seu valor é influenciada pelos valores discrepantes da amostra.

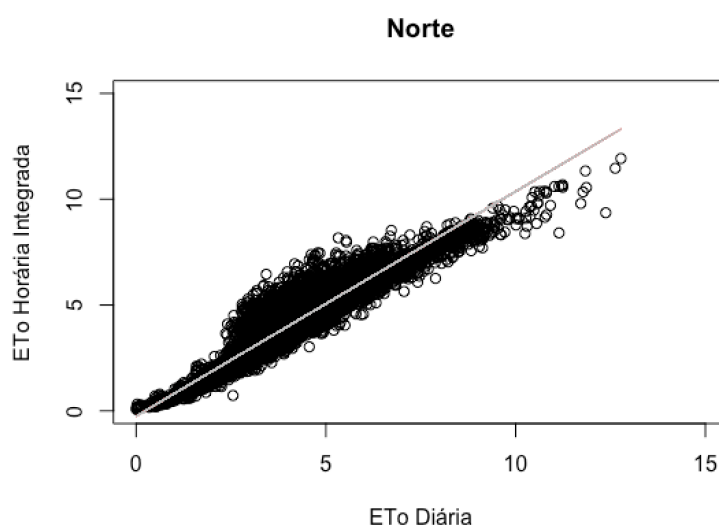


Figura 5 – Gráfico de regressão da região Norte

O Sul apresentou o maior R^2 (0,927), enquanto que o Centro-Oeste apresentou o menor com 0,857. O Sudeste e o Nordeste apresentaram o valor de 0,917 e o Norte mostrou 0,892. O trabalho de (LEAL, 2016) corrobora o resultado mostrando a variação do R^2 entre 0,872 e 0,980 para 17 estações na região do Nordeste. (FEITOSA et al., 2011) apresenta o valor de 0,97 para o Sudeste, corroborando o resultado deste trabalho.

O índice de Willmott (d) variou entre 0,979 e 0,960, conforme Tabela 4. O Sul apresentou o maior índice e o Centro-Oeste o menor. Pode-se concluir que os resultados apresentam índices de exatidão satisfatórios (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). O trabalho de (NOIA et al., 2014) corrobora este resultado apresentando o valor de 0,94 e 0,93 para d e c , respectivamente, no Centro-Oeste.

O índice de confiança (c) apresenta maior valor no Sul e menor valor no Centro-Oeste. Para todas as regiões, a classificação de desempenho segundo o índice de confiança mostrou-se "Ótima". Tal resultado também foi obtido no trabalho de (NOIA et al., 2014).

4.3 Discussão

Em trabalho realizado na Albânia, (GRAZHDANI et al., 2010) compararam as ET_0^d e ET_0^h obtendo na maioria dos resultados os valores da ET_0^d 1% a 8% superiores a ET_0^h . Em locais onde a altitude é maior obtêm-se resultados inversos, onde a ET_0^d é 3,9% menores do que a ET_0^h . Ao calcular a ET_0^d e a ET_0^h , (FEITOSA et al., 2011) concluíram que a ET_0^d apresentou valores em média 6% acima dos valores de ET_0^h para uma estação no noroeste paulista. Tais conclusões corroboram os resultados obtidos neste trabalho, já que no Brasil a ET_0^d superou a ET_0^h em aproximadamente 8.32%.

(LEAL, 2016) afirma que o comportamento dos métodos sejam diferentes quando se leva em consideração meses ou estações do ano, mas, mesmo as maiores variações de correlação entre ET_0^d e ET_0^h são insignificantes. Da mesma forma, (NOIA et al., 2014) estudaram o município de Dourados - MS e concluíram que há pouca diferença entre as duas formas para estimativa da ET_0 . Assim, confirma-se o presente estudo que apresenta alto índice de proximidade entre os resultados.

(EVETT et al., 2000) realiza uma comparação entre a estimativa da ET_0 pelos métodos Penman-Monteith FAO56 horário/diário e lisímetros, onde conclui-se que os valores da ET_0^h fornecem resultados mais confiáveis em relação aos lisímetros do que os valores obtidos com a ET_0^d .

Embora o nosso estudo não faça comparações em relação aos lisímetros, podemos, a partir deste dado, concluir que embora as estimativas diárias sejam próximas,

o uso da ET_0^h para o manejo de irrigação pode oferecer redução significativa no consumo de água ao analisarmos em uma escala de tempo maior. A Figura 6 procura ilustrar este resultado. O gráfico mostra a diferença entre a evapotranspiração acumulada ao longo do ano todo em cada estação meteorológica obtida por cada método de estimativa.

Conforme pode-se observar, a maior parte (aproximadamente 65%) das estações do Brasil apresentaram uma ET_0^h menor que a ET_0^d . Em alguns casos, esta diferença significou mais de 400 mm/ano, o que implicaria em um uso de 20 milhões de litros de água a menos no ano, considerando uma plantação de 5 hectares. Note-se que esta diferença equivale à quantidade de água gasta para irrigar uma propriedade de mesmo tamanho durante aproximadamente 50 dias no clima semi-árido.

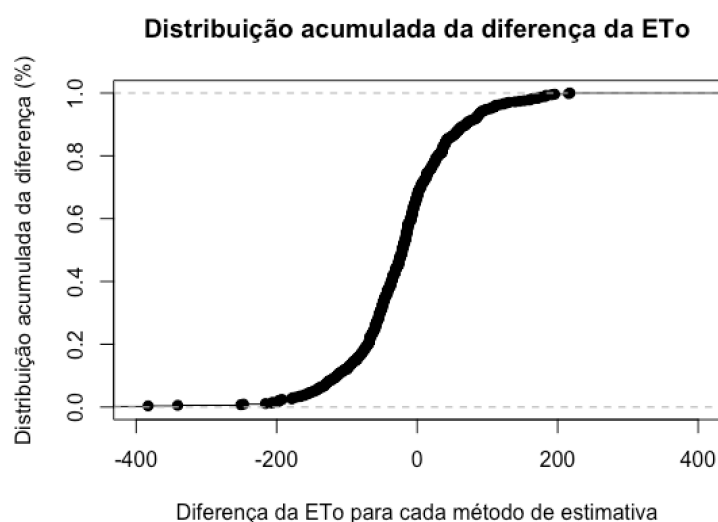


Figura 6 – Distribuição acumulada da diferença entre a evapotranspiração acumulada por cada método de estimativa

5 Conclusões

O presente trabalho investigou estatisticamente o cálculo da estimativa da evapotranspiração utilizando o método Penman-Monteith FAO56 sob duas formas diária (ET_0^d) e horária integrada ET_0^h no período de 1 de janeiro a 31 de dezembro de 2017 em todo o território brasileiro.

Os resultados mostraram que no Brasil a ET_0^d é maior quando comparada a ET_0^h , corroborando resultados encontrados na literatura para o Brasil e outras regiões no mundo. As regiões Sul, Sudeste, Norte e Nordeste concordaram com o estrato do território brasileiro, apresentando a ET_0^d superior a ET_0^h . Apenas a região Centro-Oeste apresentou a ET_0^h superior a ET_0^d . A classificação do desempenho segundo o índice de confiança foi "Ótimo" para todos os estratos. Os demais índices estatísticos corroboraram esta classificação.

5.1 Contribuições e resultados alcançados

No melhor do conhecimento do autor, este trabalho é pioneiro no que diz respeito a abrangência da análise espacial escolhida como objeto de estudo e ao grande volume de dados utilizados no experimento.

Como resultado geral, o presente trabalho apresentou e confirmou a relação existente entre os métodos de estimativa da ET_0 Penman-Monteith FAO56 discutidos na literatura. Trabalhos anteriores observaram que a estimativa da ET_0^h é mais precisa do que a ET_0^d quando comparada ao lisímetro. Isto somado ao fato de que a ET_0^h tende a ser menor, indicam que a estimativa horária integrada é mais indicada para ser empregada nos projetos de manejo de irrigação, já que estimar a ET_0 o mais preciso possível em relação ao lisímetro, aumenta consideravelmente a chance de obter uma lâmina de irrigação mais acurada em relação a necessidade de água do solo.

Outra contribuição deste trabalho é que ele permite corrigir o valor de uma estimativa em relação a outra, para que um projeto de irrigação possa obter um melhor manejo da água mesmo a partir da ET_0^d , contribuindo para a utilização consciente da água.

5.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, espera-se realizar novas investigações a partir dos dados levantados neste trabalho para uma análise comparativa de ET_0^d e ET_0^h em diferen-

tes bacias brasileiras. Além disso, pretende-se avaliar outras estratégias para o cálculo de ET_0 baseada em métodos alternativos como aqueles baseados em aprendizagem de máquina (DOU; YANG, 2018).

Referências

- ALENCAR, C. A. B. d. et al. Irrigação de pastagem: atualidade e recomendações para uso e manejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 38, n. spe, p. 98–108, jul. 2009. ISSN 1516-3598. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982009001300012&lng=pt&lng=pt>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 12, 18, 19 e 23.
- ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R. Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas. *Guairá: Agropecuária*, 2002. Citado na página 17.
- BACK, A. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. *Engenharia Agrícola*, SciELO Brasil, v. 27, n. 1, p. 139–145, 2007. Citado na página 12.
- BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. *Waters of Brazil: Strategic Analysis*. [S.l.]: Springer, 2016. Citado na página 11.
- BONOMO, R. Análise da irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de minas gerais. Universidade Federal de Viçosa, 1999. Citado na página 12.
- BRIXNER, G. F.; SCHÖFFEL, E. R.; TONIETTO, J. Determinação da evapotranspiração por diferentes métodos e sua aplicação no índice de seca na campanha gaúcha, brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 36, n. 4, p. 780–793, dez. 2014. Citado na página 17.
- CAMARGO, A. d.; 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. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 31.
- CAMPECHE, L. F. d. S. et al. Lisímetro de pesagem de grande porte. parte i: Desenvolvimento e calibração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, v. 15, n. 5, 2011. Citado na página 15.
- CAMPOS, J. d. C. et al. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. *Embrapa Semiárido-Artigo em periódico indexado (ALICE)*, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 12 ..., 2008. Citado na página 11.
- CONCEIÇÃO, M. A. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de bristow-campbell reference evapotranspiration based on solar radiation estimated by the bristow-campbell model. *Engenharia Agrícola*, Directory of Open Access Journals, v. 30, n. 4, p. 619–626, 2010. Citado na página 12.

- DJAMAN, K.; IRMAK, S. Actual Crop Evapotranspiration and Alfalfa- and Grass-Reference Crop Coefficients of Maize under Full and Limited Irrigation and Rainfed Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 139, n. 6, p. 433–446, jun. 2013. Disponível em: <[https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000559](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000559)>. Citado na página 15.
- DJAMAN, K. et al. Comparison of sum-of-hourly and daily time step standardized ASCE Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Theoretical and Applied Climatology*, out. 2017. ISSN 1434-4483. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2291-6>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 21.
- DJAMAN, K. et al. Sum of hourly vs. daily penman-monteith grass-reference evapotranspiration under semiarid and arid climate. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, v. 7, n. 1, 2018. Citado na página 21.
- DOU, X.; YANG, Y. Evapotranspiration estimation using four different machine learning approaches in different terrestrial ecosystems. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 148, p. 95–106, 2018. Citado na página 34.
- ER-RAKI, S. et al. Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *Journal of Arid Environments*, Elsevier, v. 74, n. 12, p. 1587–1596, 2010. Citado na página 20.
- ESTEVES, B. d. S. et al. Avaliação do kt para estimativa da evapotranspiração de referência (eto) em campos dos goytacazes, rj. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, SciELO Brasil, v. 14, n. 3, 2010. Citado na página 11.
- EVETT, S. et al. Alfalfa reference et measurement and prediction. In: *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium*, Nov. [S.l.: s.n.], 2000. p. 14–16. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 31.
- FEITOSA, D. et al. Evapotranspiração de referência calculada à intervalos de dados horários e diário. In: IN: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 21., 2011, PETROLINA. AS *Embrapa Semiárido-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 31.
- GAO, F. et al. Evaluation of reference evapotranspiration methods in arid, semiarid, and humid regions. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Wiley Online Library, v. 53, n. 4, p. 791–808, 2017. Citado na página 18.
- GRAZHDANI, S. et al. An evaluation and comparison of reference crop evapotranspiration in climatic conditions of albania. *NaturaMontenegrina, Montenegro*, v. 9, n. 3, p. 937–950, 2010. Citado na página 31.
- HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 129, n. 1, p. 53–63, 2003. Citado na página 12.
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 1, n. 2, p. 96–99, 1985. Citado na página 18.

INMET. *NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET*. 2011. <http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf>. [Online; acessado em 10-Dezembro-2018]. Citado na página 23.

JABLOUN, M. d.; SAHLI, A. Evaluation of fao-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to tunisia. *Agricultural water management*, Elsevier, v. 95, n. 6, p. 707–715, 2008. Citado na página 28.

JAHANBANI, H.; EL-SHAFIE, A. H. Application of artificial neural network in estimating monthly time series reference evapotranspiration with minimum and maximum temperatures. *Paddy and Water Environment*, Springer, v. 9, n. 2, p. 207–220, 2011. Citado na página 12.

JENSEN, M. E.; ALLEN, R. G. Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements. In: AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. [S.I.], 2016. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

KHOOB, A. R. Comparative study of hargreaves's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment. *Irrigation Science*, Springer, v. 26, n. 3, p. 253–259, 2008. Citado na página 12.

LEAL, I. L. B. G. Evapotranspiração horária x diária utilizando penman-monteith para o polo de desenvolvimento petrolina-pe/juazeiro-ba. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v. 10, n. 5, p. 914–924, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 25, 30 e 31.

LIMA, J.; FERREIRA, R.; CHRISTOFIDIS, D. O USO DA IRRIGAÇÃO NO BRASIL. p. 17, 1999. Citado na página 14.

LOPES, I.; LEAL, B. Evapotranspiração horária x diária utilizando penmanmonteith para o polo de desenvolvimento petrolinape/juazeiro-ba. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, p. 914–924, 10 2016. Citado na página 20.

MENDONÇA, J. C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 2, p. 275–279, ago. 2003. ISSN 1415-4366. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662003000200015&lng=pt&lng=pt>. Citado na página 15.

MOURA, C. R. et al. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração horária para alface cultivada em sistema hidropônico em ambiente protegido evaluation of methods of estimation of hourly evapotranspiration for hydroponic lettuce under protected environment. *Engenharia Agrícola*, Directory of Open Access Journals, v. 30, n. 4, p. 646–656, 2010. Citado na página 20.

NOIA, C. P. Z. et al. Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos penman–monteith-fao (56) e hargreaves & samani para o município de dourados, ms. *Agrarian*, v. 7, n. 24, p. 300–308, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 25, 30 e 31.

OLIVEIRA, A. d. Fundamentos de meteorologia e climatologia. *Cp XI: Precipitação Pluviométrica, NEAS-UFRB*, 2007. Citado na página 17.

PEIXOTO, T. D. C. et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA UTILIZANDO MÉTODOS DE TANQUE CLASSE A PROPOSTOS PELA FAO, NA REGIÃO DE MOSSORÓ, RN. p. 7, 2010. Citado na página 17.

PEREIRA, A. R.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. *Evapo (transpi) razão*. [S.l.]: Fealq Piracicaba, 1997. v. 183. Citado na página 16.

PERERA, K. C. et al. Comparison of hourly and daily reference crop evapotranspiration equations across seasons and climate zones in australia. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 148, p. 84–96, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.

PRAHARAJ, S.; MOHANTY, P.; SAHOO, B. Quantification of error in estimation of reference crop evapotranspiration by class a pan evaporimeter and its correction. In: *Hydrologic Modeling*. [S.l.]: Springer, 2018. p. 85–96. Citado na página 17.

PRUITT, W. *Guidelines for predicting crop water requirements*. [S.l.], 1977. Citado na página 18.

RODRIGUES, S. B. S. et al. Necessidades hídricas de mudas de eucalipto na região centro-oeste de minas gerais. *Irriga*, v. 16, n. 2, p. 212, 2018. Citado na página 11.

ROMERO, C. C.; DUKES, M. D. Review of turfgrass evapotranspiration and crop coefficients. *Transactions of the ASABE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 59, n. 1, p. 207–223, 2016. Citado na página 15.

SANTANA, M. J. de et al. Coeficiente de cultura e análise do rendimento do feijoeiro sob regime de irrigação. *Irriga*, v. 13, n. 1, p. 92–112, 2018. Citado na página 15.

SANTANA, M. J. de; RIBEIRO, A. A.; MANCIN, C. A. Evapotranspiração e coeficientes de cultura para a alface e rúcula cultivadas em uberaba, mg. *Revista Inova Ciência & Tecnologia/Innovative Science & Technology Journal*, n. 2, p. 7–13, 2016. Citado na página 15.

SANTOS, A. R. d. EvaporaÇÃO e evapotranspiraÇÃO. in: Apostila de climatologia. *Apostila de Climatologia*, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of fao penman–monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern ontario, canada. *Agricultural Water Management*, Elsevier, v. 97, n. 5, p. 635–644, 2010. Citado na página 28.

SILVA, M. A. V. Meteorologia e climatologia. 2006. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 14.

SILVA, V. P. R. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 5, p. 411–417, 2015. Citado na página 17.

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resources Management*, Springer, v. 23, n. 14, p. 3057, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

VESCOVE, H. V.; TURCO, J. E. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de araraquara-sp. *Engenharia Agrícola*, SciELO Brasil, p. 713–721, 2005. Citado na página 12.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985. Citado na página 26.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in brazil (1980–2013). *International Journal of Climatology*, Wiley Online Library, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, 2016. Citado na página 24.

YILDIRIM, Y. E.; CAKMAK, B.; KOSE, T. Comparison of hourly and daily reference evapotranspiration values for gap project area. *Journal Of Applied Sciences*, v. 4, n. 1, p. 53–57, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 12, 25 e 28.

A Gráficos da ET_0^h e ET_0^d das regiões do Brasil

Estes gráficos apresentam a distribuição dos dados em cada região do Brasil. Além disso, sobreposto é apresentada a linha da função da regressão linear.

