

COMPARAÇÃO ENTRE ESTIMATIVAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATES COMPARISON

Entrega dos originais à redação
em: 18/09/2021

Cássio Luiz Vellani

Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
São Paulo campus Barretos

Edição em: 21/09/2023

A evapotranspiração (ET) pode ser estimada por meio dos métodos Penman-Monteith, Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo. O objetivo deste artigo foi identificar como comparar ETo calculada por essas quatro possibilidades, a partir dos mesmos dados meteorológicos gratuitos disponibilizados por estações automáticas do INMET. Essa base pública foi utilizada para coletar valores de temperatura do ar, umidade, ponto de orvalho, pressão, vento, radiação e chuva. Foram escolhidas aleatoriamente três datas, com três repetições, total de 36 observações ou 36 cálculos de ETo para cada uma das quatro possibilidades (métodos). Ao testar a proposição desta Pesquisa Estudo de Caso, conseguiu apontar um roteiro para estimar ETo e permitiu comparações entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo. Esse roteiro pode ser utilizado em futuras pesquisas para projetar um aplicativo de telefone móvel que consiga, ao ser alimentado com dados provenientes de sensores simples, estimar ETo com dados meteorológicos do local do cultivo e auxiliar no manejo da irrigação.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Agricultura. Irrigação.

Evapotranspiration (ET) can be estimated using Penman-Monteith, Hargreaves & Samani; Thornthwaite; and Camargo. The objective of this article was to identify how to compare the ETo calculated by these four possibilities, from the same free meteorological data provided by INMET automatic stations. This public database was used to collect values for air temperature, humidity, dew point, pressure, wind, radiation and rain. Three dates were randomly chosen, with three replications, a total of 36 observations or 36 ETo calculations for each of the four possibilities (methods). By testing the proposition of this Case Study Research, it was able to point out a roadmap to estimate ETo and allowed comparisons between the Penman-Monteith, Hargreaves & Samani methods; Thornthwaite; and Camargo. This script can be used in future research to design a mobile phone application that can, when fed with data from simple sensors, estimate ETo with meteorological data from the cultivation site and assist in irrigation management.

Keywords: Evapotranspiration. Agriculture. Irrigation.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração (ET) pode ser utilizada no manejo da irrigação, como substituto ou complementar aos sensores de umidade do solo. A medição da ET pode ser feita por tanques, conforme Tanner (1967), Morton (1983) e Kelley (2020), porém oneroso segundo Sarnighausen et al. (2021). Além dessas possibilidades de manejo da irrigação, estimativas para a ET podem ser obtidas com uso de dados meteorológicos gratuitos de estações automáticas localizadas no Brasil, por meio do site do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, <https://tempo.inmet.gov.br/#>), contido em INMET (2021).

Kelley (2020), por meio de dados acessíveis com sensores de baixo custo, verificou o aprendizado de máquina ao expandir o monitoramento de ET real, complementou os modelos de ET de referência existentes e criou uma programação para irrigação, com estimativas de ET de determinadas localidades, a partir de variáveis climáticas, no lugar de equações empiricamente calibradas, semelhante a Alves Sobrinho et al. (2011), que a partir de dados diários de temperatura do ar, estimaram com uso de uma Rede Neural Artificial (RNA).

Os resultados de Kelley (2020) com RNA foram úteis para ampliar os dados disponíveis para estimar a ET real específica do local em tempo real, integraram e divulgaram como ferramenta de apoio à decisão com informações críticas necessárias para a gestão da irrigação ao orientar o uso inteligente dos recursos hídricos, abrandar o risco de estresse hídrico e garantir colheitas desejadas. Sarnighausen et al. (2021) complementaram ao compararem performance de modelos de estimativas de ET citados em Sanchez et al. (2017).

Essas estimativas de Sarnighausen et al. (2021) partiram de dados da Estação Meteorológica da FCA/UNESP/Botucatu, dados diários de temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento (2 m de altura), saldo de radiação, equação Penman-Monteith (PM), calibrados com modelos de regressão dinâmico, linear múltiplo e polinomial. De forma diferente, Balaghi et al. (2008) mediram ET com imagens de satélites para prever com alta precisão a produção de grãos de trigo no Marrocos. Aqui a expectativa ao redor da ET foi para conseguir com o mínimo de dados meteorológicos estimar valores próximos do modelo Penman-Monteith, calculado pelo programa SMAI (Sistema para o manejo da Agricultura Irrigada), contido em Feitosa et al.

Esse modelo utilizado pelo SMAI foi testado em Carvalho et. al (2011) e concluíram como o mais adequado em situações com disponibilidade de dados. Caso contrário, escolher-se-á um entre diversos métodos alternativos, para diferentes condições climáticas diversas e disponibilidade de dados. Estimaram a Evapotranspiração ao coletar registros compreendidos entre 1/1/2008 até 20/3/2011 a partir das seguintes variáveis: informação horária de temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do ponto de orvalho (Tpo), pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação pluvial das estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), com objetivo de avaliar a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), para a região Sudeste do Brasil, a partir de dados meteorológicos limitados.

Souza et al. (2022) explicaram que o modelo Penman–Monteith produz bons resultados sob distintas condições ambientais e intervalos de tempo, porém o número alto de variáveis necessárias pode restringir o seu uso onde os dados meteorológicos são coletados localmente por meio de estações meteorológicas e sugere métodos alternativos que utilizam uma quantidade menor de variáveis. Diante dessa sugestão, este artigo buscou métodos alternativos que demandam uma menor quantidade de dados meteorológicos para estimar a Evapotranspiração e comparar os resultados obtidos pelo método Penman–Monteith.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui foram utilizadas algumas dessas variáveis contidas também em Carvalho et al. (2015), a partir de estações meteorológicas do sistema Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), além do SMAI e planilha eletrônica para estimar ETo diária. Para efeito de comparação, os dados inseridos no SMAI (Penman-Monteith) foram os mesmos para estimar na planilha eletrônica conforme três modelos de ET: Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo, cujas fórmulas estão contidas em Hargreaves e Samani (1982), Hargreaves e Samani (1985), Hargreaves e Allen (2003), Thornthwaite (1948), Camargo (1962), Camargo (1971), Camargo e Camargo (1983).

Esta pesquisa faz parte de uma projeto maior com as seguintes etapas: coletar dados meteorológicos de estações automáticas públicas, gratuitas, calcular o Diagrama da Água nos últimos 10 anos e estimar ET mensal (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); estimar ET diária (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); estimar ETc, evapotranspiração de cultura, com uso do coeficiente de cultura Kc (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); estimar ETr, evapotranspiração real, com uso do coeficiente de estresse hídrico (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); verificar a possibilidade de prever a evapotranspiração potencial, ou referência, de cultura e real, evapotranspiração de cultura (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); verificar sobre as possibilidade de uso dos resultados das etapas anteriores na manejo da irrigação (Explanatório, Experimento).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Contextualizado a problemática, segue a pergunta deste estudo: como comparar ETo a partir dos mesmos dados meteorológicos gratuitos disponibilizados por estações automáticas do INMET? O método escolhido para responder essa pergunta de pesquisa, segundo Yin (2005) pode ser enquadrado como Pesquisa Estudo de Caso, adequado para pesquisas onde as variáveis associadas ao fenômeno bem como o comportamento das mesmas não são plenamente compreendidas e a respondem questões do tipo “Como?” e “Por quê?”. Aqui a proposição do estudo, tópico exigido em Pesquisa Estudo de Caso, conforme Yin (2005), foi a seguinte: comparações são possíveis ao estimar ET diária com dados por hora do INMET ao serem inseridos no sistema SMAI (Penman-Monteith) e planilhado (Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo).

Essa proposição equivale ao objeto de pesquisa que utilizam a estratégia Pesquisa Estudo de Caso, como Staudt et al. (2011) com dados da estação meteorológica do país Noruega FLUXNET-station Waldstein–Weidenbrunnen (DE-Bay), 50° 08'31" N, 11° 52' 01" W, 775 m e Fernandes, Paiva e Rotunno Filho (2012), a partir de dados da cidade brasileira latitude 21° 48' S, longitude 41° 20' W e 11 metros acima do nível do mar, para calcular ET por meio dos modelos Penman-Monteith, Makkink, Jensen-Haise, Camargo, Priestley–Taylor, Hargreaves e Hargreaves-Samani.

Os resultados de Fernandes, Paiva e Rotunno Filho (2012) convergiram para viabilidade de modelos quando o conjunto total de dados meteorológicos está parcialmente disponível. Compararam métodos de estimação de ET, como fizeram Camargo e Sentelhas (1997) e Bautista, Bautista e Delgado-Carranza (2009), diferente de Rahimi et al. (2015), pois a base foi imagens de satélite para uma área de captação de Tajan (4667 km², latitude de 35° 51' N a 35° 56' N e longitude de 52° 56' E a 54° 09' E), no país Irã. No Brasil, Teixeira et al. (2015) compararam a estimação da ET com uso de imagens dos satélites MODIS, Landsat e RapidEye e concluíram viabilidade no manejo da irrigação. Mais uma possibilidade para estimar ET.

Aqui também foi estimada a ET diária, com base em dados por hora de estações meteorológicas, para serem inseridos em um sistema, uso do modelo Penman-Monteith e planilhado para resultar em

ETo conforme equações dos modelos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo por meio da estratégia Pesquisa Estudo de Caso, que exigiu a criação dos seguintes contextos e unidades de análise:

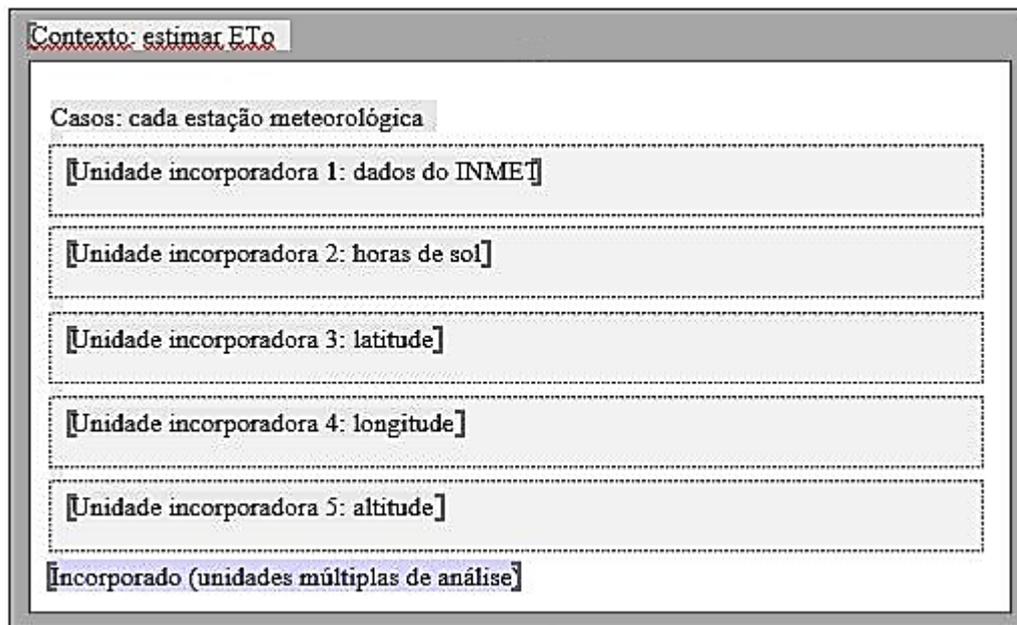


Figura 1 - Pesquisa Estudo de Múltiplos Casos Incorporado

Conforme essa figura as unidades incorporadoras representam os grupos de variáveis que foram inseridas no SMAI e/ou planilha eletrônica. Cada estação foi considerada como um caso. O resultado desta Pesquisa Estudo de Caso foi utilizado para fazer comparações entre as estimativas de ETo, além de criar um roteiro para conseguir comparar estimativas de ET com base numa série de referência. Westgren e Zering (1998) refletiram que essa estratégia pode resultar em teste e análise de teorias aplicadas em fenômenos semelhantes ao experimento em laboratório, com dados reais, que possibilita contribuições para pesquisas descritivas.

Aqui o objetivo foi identificar como comparar ETo a partir dos mesmos dados meteorológicos gratuitos disponibilizados por estações automáticas do INMET

Existe o modelo Penman-Monteith citado em Beven (1979), Chiew et al. (1995) e Allen et al. (2006), utilizado por um software gratuito, o SMAI que estima evapotranspiração por dia, com base nas variáveis meteorológicas Temperatura Máxima Diária (Temp. Máx.), Temperatura Mínima Diária (Temp. Mín.), Umidade Máxima Diária (UR. Max.), Umidade Mínima Diária (UR. Mín.), Pressão, Radiação Global (Rad. Global), Radiação Líquida (Rad. Líquida), Fluxo de Calor, Velocidade do Vento (Vel. Vento) e coeficiente de cultura (kc) para adicionar a ETc. Então o resultado estima ETo e ETc.

Outras estimativas de ETo são oriundas da aplicação dos modelos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo, contidos em Bautista, Bautista e Delgado-Carranza (2009), Sepaskhah e Razzaghi (2009), Melo e Fernandes (2012), Almorox, Quej e Martí (2015) e Cunha et al. (2017). Para isso, coletaram-se dados meteorológicos de um sistema disponível no Brasil desenvolvido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, site: <https://tempo.inmet.gov.br/>).

Essa base de dados pública e gratuita foi utilizada no presente trabalho para coletar dados sobre temperatura do ar, umidade, ponto de orvalho, pressão, vento, radiação e chuva, possibilita fazer download dos dados para uma planilha eletrônica com possibilidades de manuseio. As estações foram

escolhidas de forma aleatória e primeiramente foi estimada ETo pelo SMAI, conforme apresentado na próxima figura:

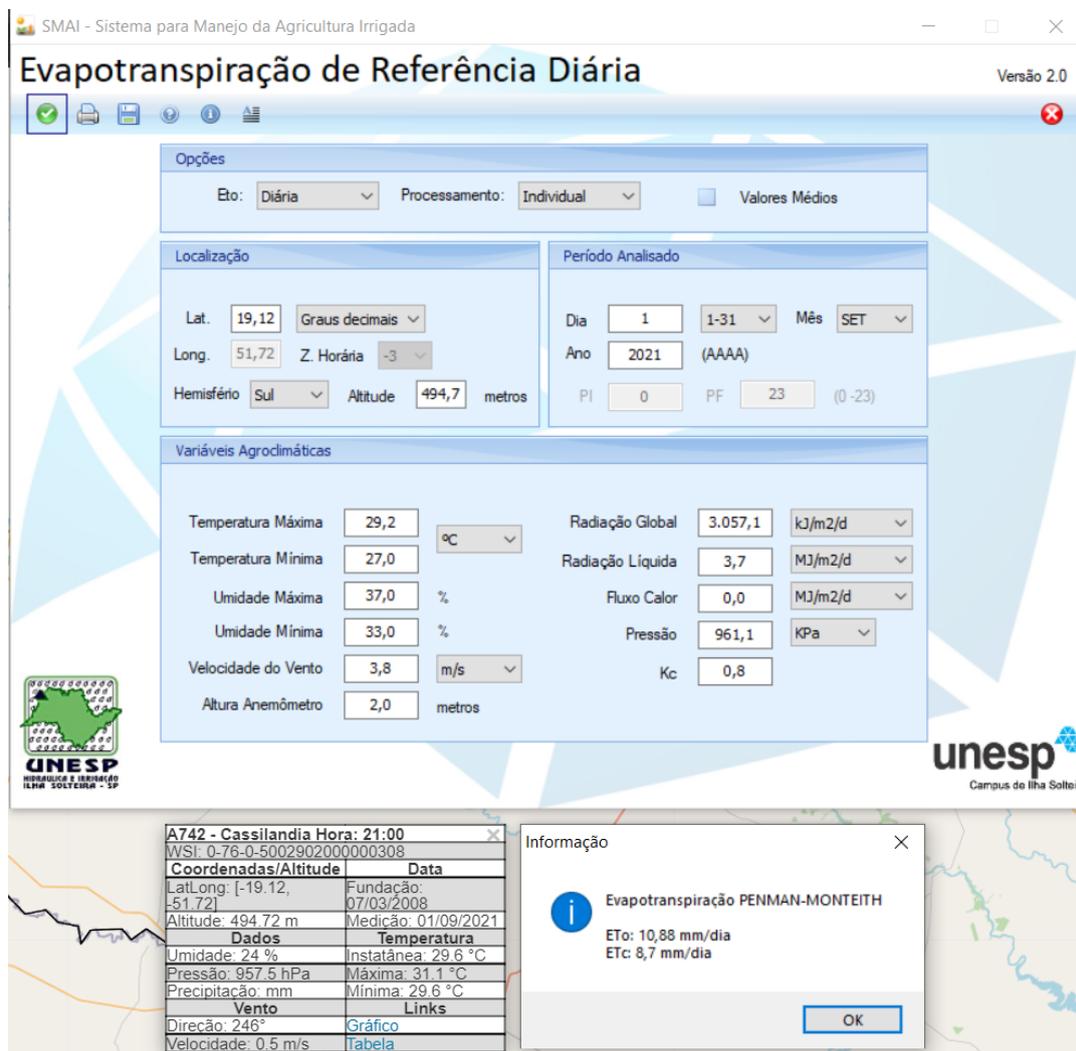


Figura 2 – Exemplo de inserção de dados diários do INMET no SMAI

4. RESULTADOS

Conforme essa figura a ETo diária foi estimada para a data 01/09/2021 com dados da estação CASSILANDIA (A742) na latitude -19,12°, longitude -51,72°. Em seguida, foi planejado para obter ETo pelos outros métodos, no formato da seguinte tabela:

Tabela 1 - Formato na planilha eletrônica para cálculos da ETo segundo Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo

Data	Fotoperíodo (em horas), contido em Pereira e Pruitt (2004)	Radiação (em MJm²), contido em Pereira e Pruitt (2004)	Temperatura Máxima (em °C)	Temperatura Mínima (em °C)

Fonte: elaboração própria.

Conforme essa figura as entradas de valores são reduzidas em relação ao sistema SMAI. Esse foi o intuito deste trabalho, obter alternativas para estimar a ETo que necessitem de quantidades mínimas para cada dia ou hora, pois enquanto no SMAI é preciso ter uma estação meteorológica para obter os valores das variáveis necessárias, na planilha eletrônica apenas temperatura máxima e temperatura mínima, que são possíveis de serem coletadas com equipamentos de baixo custo, pois radiação e fotoperíodo uma vez obtidas para o ano todo, pode ser utilizado para cada entrada diferente de temperatura máxima e temperatura mínima.

Diante disso, este trabalho identificou direções para futuras pesquisas onde um software que programado para utilizar as fotoperíodo e radiação calcularia ETo pelo conforme a escolha de latitude, longitude e a cada opção de data para coletar o registro da temperatura máxima e mínima. Essas informações foram inseridas nas fórmulas dos modelos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo, conforme Bautista, Bautista e Delgado-Carranza (2009), Sepaskhah e Razzaghi (2009), Melo e Fernandes (2012), Almorox, Quej e Martí (2015) e Cunha et al. (2017).

As fotoperíodo foram calculadas conforme formulação contida em Silva (2006), enquanto a variável radiação (em MJm²) foi obtida por meio do seguinte código do pacote Sirad do software R:

```
library(sirad)

df1<-data.frame(extrat(dayOfYear("2021-12-31"), radians(-19.117)))
df2<-data.frame(extrat(dayOfYear("2021-12-30"), radians(-19.117)))
( ... )
df365<-data.frame(extrat(dayOfYear("2021-01-01"), radians(-19.117)))

pradRbind1<-df1[1, 1]
pradRbind2<-df2[1, 1]
(...)
pradRbind365<-df365[1, 1]

df2021<-data.frame(pradRbind1)
df2021<-rbind (df2021, pradRbind2)
df2021<-rbind (df2021, pradRbind3)
df2021<-rbind (df2021, pradRbind4)
df2021<-rbind (df2021, pradRbind5)
(...)
df2021<-rbind (df2021, pradRbind365)

View(df2021)
library(writexl)
write_xlsx(df2021, 'df2021SolarRad_OrdemDecrescente_CASSILANDIA.xlsx')
```

Esse código serviu para obter a radiação por dia de 2021 (serve para os outros anos ao alterar no código as datas) e 2020, cujo resultado foi inserido na mesma planilha das fotoperíodo que junto com os dados meteorológicos alimentaram as fórmulas necessárias para obter a ETo conforme os modelos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo. Em seguida, por meio de escolha aleatória de datas entre quatro grupos que apresentaram as seguintes características:

- temperatura máxima acima de 30° C; e umidade em torno de 50% ou mais;
- temperatura máxima abaixo de 30° C; e umidade em torno de 50% ou mais;
- temperatura máxima acima de 30° C; e umidade abaixo de 50%;
- temperatura máxima abaixo de 30° C; e umidade abaixo de 50%;

Dentro das possibilidades desses quatro agrupamentos, foram escolhidas aleatoriamente três datas para cada um, com três repetições, totalizando 36 observações ou 36 cálculos de ETo para cada

um dos quatro modelos utilizados, apresentado a seguir:

Tabela 2 – ETo estimado

Data	Temperatura abaixo ou acima de 30°C	Umidade se 50% ou mais; e Seco se abaixo de 50%	HAR (método Hargreaves & Samani)	THOR (método Thornthwaite)	CAM (método Camargo)	SMAI (Sistema para o manejo da Agricultura Irrigada, utiliza o método Penman-Monteith)
01/03/2021	Abaixo	Umidade	5,38	6,06	13,31	7,21
02/03/2021	Abaixo	Umidade	6,2	5,78	13,13	5,88
03/03/2021	Abaixo	Umidade	6,31	5,73	13,06	3,66
03/07/2021	Abaixo	Seco	3,84	4,02	7,93	6,59
04/07/2021	Abaixo	Seco	4,62	3,76	7,78	7,47
05/07/2021	Abaixo	Seco	4,63	3,28	6,82	7,23
12/01/2020	Acima	Umidade	6,59	11,23	16,03	6,45
20/01/2020	Acima	Umidade	6,48	9,93	15,65	5,44
21/01/2020	Acima	Umidade	6,08	9,21	15,44	4,79
28/11/2020	Acima	Seco	6,77	15,73	16,75	13,47
29/11/2020	Acima	Seco	7,31	16,28	16,83	13,42
30/11/2020	Acima	Seco	7,11	20,58	17,34	13,97
04/03/2021	Abaixo	Umidade	5,94	5,25	12,75	2,29
05/03/2021	Abaixo	Umidade	7,34	3,38	11,01	3,82
06/03/2021	Abaixo	Umidade	3,39	3,96	11,66	3,28
06/07/2021	Abaixo	Seco	3,53	3,23	7,41	10,81
07/07/2021	Abaixo	Seco	4,15	2,96	6,28	7,68
08/07/2021	Abaixo	Seco	4,08	3,45	7,62	6,94
03/02/2021	Acima	Umidade	7,01	9,79	15,39	5,12
21/12/2020	Acima	Umidade	6,28	8,91	15,47	5,44
22/12/2020	Acima	Umidade	6,44	8,67	15,39	4,71
01/12/2020	Acima	Seco	6,82	16,86	16,93	12,17
03/12/2020	Acima	Seco	6,16	13,68	16,47	16,09
09/12/2020	Acima	Seco	6,56	10,63	15,9	6,51
07/03/2021	Abaixo	Umidade	5,96	4,91	12,41	1,95
08/03/2021	Abaixo	Umidade	4,15	5,25	12,6	1,84
19/03/2021	Abaixo	Umidade	4,12	4,92	11,91	3,66
09/07/2021	Abaixo	Seco	4,18	3,51	7,69	6,23
10/07/2021	Abaixo	Seco	4,22	4,52	8,31	9,37
11/07/2021	Abaixo	Seco	4,52	3,94	8,02	6,48
01/02/2021	Acima	Umidade	6,18	9,19	15,26	5,3
14/02/2021	Acima	Umidade	6,03	7,14	14,27	6,23
22/02/2021	Acima	Umidade	6,79	8,32	14,45	5,56
06/09/2021	Acima	Seco	6,42	11,75	12,97	14,91
05/09/2021	Acima	Seco	5,1	22,48	14,01	17,23
04/09/2021	Acima	Seco	6,57	21,61	13,88	16,68

Fonte: elaboração própria

Com base nessa tabela foi possível comparar qual dos três modelos alternativos (Hargreaves & Samani, Thornthwaite ou Camargo) mais se aproximou do utilizado pelo SMAI (Penman-Monteith). Para isso, foram aplicados, primeiramente, o test t no software R, com os seguintes resultados:

Tabela 3 – Testes estatísticos

Par testado	Resultado do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov no R (<i>p-value</i>)	Resultado do teste t no R (<i>p-value</i>)	Resultado do teste wilcoxon no R (<i>p-value</i>)	<i>Bootstrapping</i>
SMAI e Hargreaves & Samani	0,03663 (presença de normalidade)	0,01018 (diferença significativa)	0,111 (diferença significativa)	<i>False</i> (diferença significativa)
SMAI e Thornthwaite	0,5041 (presença de normalidade)	0,4239 (diferença pode não ser significativa)	0,8438 (diferença pode não ser significativa)	<i>True e False</i> (diferença pode não ser significativa)
SMAI e Camargo	2,90E-03 (ausência de normalidade)	Não se aplica, pois ausência de normalidade	2,06E-03 (diferença significativa)	<i>False</i> (diferença significativa)

Fonte: elaboração própria

Essa tabela indicou que o método Thornthwaite foi o menos distante (diferença pode não ser significativa) do Penman-Monteith, utilizado pelo SMAI, diferente de Camargo e Sentelhas (1997) e convergente em períodos com temperatura abaixo de 30°C e umidade abaixo de 50%. Independente disso, a tabela 3 representa um modelo que pode ser aplicado para comparar métodos de estimação de evapotranspiração, seja com muitos dados meteorológicos ou com apenas temperatura máxima e mínima. Para isso, o seguinte código foi executado no software R (exemplo do par testado SMAI e Hargreaves & Samani):

```
d <- read.table("pmhar.txt", header = TRUE)
View(d)
names(d)
levels(d$grupo)
table(d$grupo)
boxplot(d$Temp~d$grupo, las=1, ylab="ETo",
        xlab="grupo",main="ETo Hargreaves & Samani na planilha eletrônica (pred) e ETo Penman-Monteith no SMAI (real)")
mean(d$Temp[d$grupo=="pred"]) # mean for pred
mean(d$Temp[d$grupo=="real"]) # mean for real
with(d, tapply(Temp, grupo, mean))
test.stat1 <- abs(mean(d$Temp[d$grupo=="real"]) - mean(d$Temp[d$grupo=="pred"])) #diff in means
test.stat1
abs( diff( with(d, tapply(Temp, grupo, mean)) ) )
median(d$Temp[d$grupo=="pred"]) # median for pred
```

```
median(d$Temp[d$grupo=="real"]) # median for real
with(d, tapply(Temp, grupo, median))
test.stat2 <- abs(median(d$Temp[d$grupo=="real"]) - median(d$Temp[d$grupo=="pred"]))
test.stat2
abs( diff( with(d, tapply(Temp, grupo, median)) ) )
t.test(d$Temp~d$grupo, paired=F, var.eq=F) # tests Ho: means are equal
wilcox.test(d$Temp~d$grupo, paired=F) # tests Ho: medians are equal
ks.test(d$Temp[d$grupo=="real"], d$Temp[d$grupo=="pred"], paired=F) # tests Ho: distributions
are same
x <- jitter(d$Temp[d$grupo=="real"])
y <- jitter(d$Temp[d$grupo=="pred"])
ks.test(x,y)
plot(ecdf(x = x), main = "ECDF of x and y")
lines(ecdf(x = y), col = 2)
n <- length(d$grupo)
n

B <- 10000
variable <- d$Temp
BootstrapSamples <- matrix( sample(variable, size= n*B, replace=TRUE),
                             nrow=n, ncol=B)
dim(BootstrapSamples)
Boot.test.stat1 <- rep(0,B)
Boot.test.stat2 <- rep(0,B)
for (i in 1:B){
  Boot.test.stat1[i] <- abs( mean(BootstrapSamples[1:36,i]) -
                           mean(BootstrapSamples[37:72,i]) )
  Boot.test.stat2[i] <- abs( median(BootstrapSamples[1:36,i]) -
                           median(BootstrapSamples[37:72,i]) )
}

test.stat1; test.stat2
round(Boot.test.stat1[1:20], 1)
round(Boot.test.stat2[1:20], 1)
(Boot.test.stat1 >= test.stat1)[1:20]
```

```
mean( Boot.test.stat1 >= test.stat1)
mean( Boot.test.stat2 >= test.stat2)

#table(d)
plot(density(Boot.test.stat1),
     xlab=expression( group("|", bar(Yc) - bar(Ym), "|") ),
     main="Bootstrap Test Stats", las=1)
abline(v=test.stat1, col="blue", lty="dotted")
text(60,0.0005, "p-value", col="blue", cex=0.7)
test.stat3 <- abs(quantile(d$Temp[d$grupo=="real"], prob=0.9) -
quantile(d$Temp[d$grupo=="pred"], prob=0.9)) #diff in medians
test.stat3
Boot.test.stat3 <- rep(0,B)
for (i in 1:B){
Boot.test.stat3[i] <- abs( quantile(BootstrapSamples[1:36,i], prob=0.9) -
                           quantile(BootstrapSamples[37:72,i], prob=0.9) )
}
}
```

Na primeira linha desse código consta o arquivo pmhar.txt que deve ter o seguinte formato:

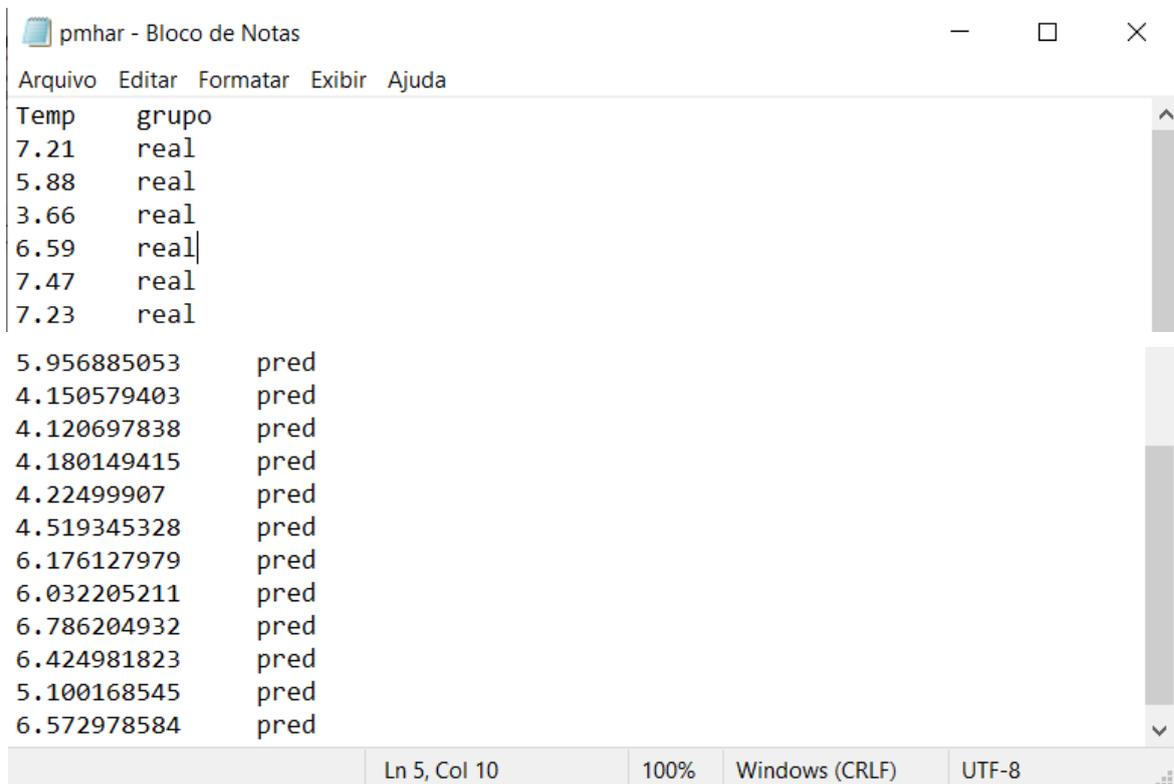


Figura 3 – Exemplo de inserção de dados diários do INMET no SMAI

Esse formato serviu para esta pesquisa e também pode ser utilizado em futuras pesquisas com o objetivo de comparar séries de valores agrupados em dois conjuntos para verificar se: diferença não é significativa ($p\text{-value} > 0,05$, não rejeita H_0); ou se podem estatisticamente ser diferentes ($p\text{-value} < 0,05$, rejeita H_0). A partir desse arquivo em .txt o código em R foi executado, obtido os valores para o $p\text{-value}$ e o resultado do teste bootstrapping. Adequado também para receber valores de outras variáveis quando o intuito for verificar se diferença significativa.

A ideia central deste artigo foi testar a proposição desta Pesquisa Estudo de Caso, conseguiu ao apontar um roteiro para estimar ET_0 , permitiu comparações entre os métodos Penman-Monteith (SMAI), Hargreaves & Samani (planilhado); Thornthwaite (planilhado); e Camargo (planilhado). Almejou-se com esse roteiro projetar em futuras pesquisas um aplicativo de telefone móvel que consiga ser alimentado com sensores simples de temperatura do ar, estimar ET_0 com dados meteorológicos do local do cultivo e auxiliar no manejo da irrigação.

Uma solução de baixo custo para agricultura familiar, que necessita de precisão para obter o máximo de colheita e fornecer alimentos para a sociedade. Este artigo representou mais uma etapa desse projeto maior, a cada artigo publicado uma contribuição para o manejo da irrigação, além de possibilitar a identificação de localidades do Brasil adequadas para determinadas plantas. Dentro desse contexto de possibilidades, outros experimentos podem ser feitos para comparar a rendimento de uma plantação com uso da ET_0 em relação ao processo sem essa informação.

Para isso, poderia se pensar na tabulação conforme o pacote Agricolae no software R que aplica ANOVA e teste Tukey. Esses testes estatísticos podem revelar se o manejo da irrigação com uso da ET_0 estimada por diversos métodos podem influenciar significativamente as colheitas ou outras variáveis. Por enquanto, neste artigo visou os possíveis cálculos de ET_0 e comparações, com resultados que contribuem para aplicação popular dos modelos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo, enquanto o Penman-Monteith necessitou de uma quantidade maior de variáveis meteorológicas.

5. CONCLUSÕES

A pergunta deste estudo foi em torno de como comparar ET_0 a partir dos mesmos dados meteorológicos gratuitos disponibilizados por estações automáticas do INMET? O termo “como” nessa pergunta de pesquisa permitiu o uso da estratégia Pesquisa Estudo de Caso dentro do contexto descritivo, guiou-se por meio da seguinte proposição: comparações são possíveis ao estimar ET diária com dados por hora do INMET, inseridos no sistema SMAI (Penman-Monteith) e planilhado (Hargreaves & Samani; Thornthwaite; e Camargo). Também poderia ser entre outros modelos, por exemplo, em relação ao testado por Balaghi et al. (2008).

A comparação entre estimativa de ET está presente em Camargo e Sentelhas (1997) como esteve aqui também, que complementou essa direção ao roteirizar um caminho que pode ser utilizado por futuras pesquisas. Como resultado, um caminho foi trilhado para comprovar que estimativas para ET_0 diária puderam ser calculadas com muitas variáveis meteorológicas ou com apenas temperatura máxima e mínima. Um dos próximos passos poderia ser um aplicativo para telefone móvel para ser útil, como refletido em Weiss, Cowder e Bernardi (2000), à agricultura familiar que conectado com sensores que captariam a temperatura do ar, alimentaria o sistema para estimar a ET_0 do local, conforme os métodos Hargreaves & Samani, Thornthwaite e Camargo.

Contudo, este trabalho executou umas das etapas de uma série que visa contribuir para o manejo da irrigação com dados provenientes de estações meteorológicas automáticas. As próximas etapas, retro citadas, são: estimar ET_c (evapotranspiração de cultura), com uso do coeficiente de cultura K_c (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); estimar ET_r , evapotranspiração real, com uso do

coeficiente de estresse hídrico (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); verificar a possibilidade de prever a E_{Tc} (Exploratório-Descritivo, Estudo de Caso); e verificar sobre as possibilidades de uso dos resultados das etapas anteriores na manejo da irrigação (Explanatório, experimento).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PRUITT, W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL, T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA, J.; YRISARRY, J. B.; SMITH, M.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference E_{T0} by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.03.007>. Acesso em: 22 ago. 2021.

ALMOROX, J.; QUEJ, V. H.; MARTÍ, P.. Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 514-522, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057>. Acesso em: 22 ago. 2021.

ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D. B. B.; OLIVEIRA, P. T. S.; REBUCCI, L. C. S.; PERTUSSATTI, C. A.. Estimativa da evapotranspiração de referência através de redes neurais artificiais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.26, n.2, 197 - 203, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000200004>. Acesso em: 22 ago. 2021.

BALAGHI, R.; TYCHON, B.; EERENS, H.; JLIBENE, M. Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 10, n. 4, p. 438-452, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.12.001>

BAUTISTA, F.; BAUTISTA, D.; DELGADO-CARRANZA, C. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, v. 22, n. 4, p. 331-348, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/pdf/atm/v22n4/v22n4a1.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2021.

BEVEN, Keith. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, v. 44, n. 3-4, p. 169-190, 1979. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-62362009000400001. Acesso em: 22 ago. 2021.

CAMARGO, A. P. O balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo, 24 p., 1971. (Boletim 116).

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. *Bragantina*. Campinas, v. 21, p. 63-213, 1962. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051962000100012>. Acesso em: 22 ago. 2021.

CAMARGO, A. P., CAMARGO, M.P.B. Teste de uma equação simples para estimativa da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura do ar. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, SP. Anais [...]. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/IAC, 1983, p. 229-244. Disponível em: <http://sbagro.org/files/biblioteca/3927.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2021.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997. Disponível em: [http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5\(1\)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf](http://www.leb.esalq.usp.br/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_RB_Agro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf). Acesso em : 22 ago. 2021.

CARVALHO, D. F.; ROCHA, H. S.; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100001>. Acesso em: 22 ago. 2021.

CARVALHO, L.G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760>. Acesso em: 22 ago. 2021.

CHIEW, F. H. S.; KAMALADASA, N. N.; MALANO, H. M.; MCMAHON, T. A.. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. Agricultural Water Management, v. 28, n. 1, p. 9-21, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(95\)01172-F](https://doi.org/10.1016/0378-3774(95)01172-F). Acesso em: 22 ago. 2021.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Performance of estimative models for daily reference evapotranspiration in the city of Cassilândia, Brazil. Engenharia Agrícola, v. 37, n. 1, p. 173-184, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n1p173-184/2017>. Acesso em 22 ago. 2021.

SOUZA, L. S. B.; SILVA, M. T. L.; ALBA, E.; MORA, M. S. B.; CRUZ NETO, J. F. C.; SOUZ, C. A. A.; SILVA, T. G. F. New method for estimating reference evapotranspiration and comparison with alternative methods in a fruit-producing hub in the semi-arid region of Brazil. Theoretical and Applied Climatology, p. 1-10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04069-6>. Acesso em: 07 nov. 2022.

FEITOSA, D. G.; MARIANO, J. C. Q.; HERNANDEZ, F. B. T.; . SANTOS, ; G. O.; TEIXEIRA, A. H. C. Software SMAI 2.0 para estimativa da evapotranspiração de referência diária e horária. Anais ... In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. 2014. p. 1-6.

FERNANDES, Lázaro Costa; PAIVA, Célia Maria; ROTUNNO FILHO, Otto Corrêa. Evaluation of six empirical evapotranspiration equations-case study: Campos dos Goytacazes/RJ. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 27, n. 3, p. 272-280, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300002>. Acesso em: 22 ago 2021.

HARGREAVES, George H.; ALLEN, Richard G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. Journal of irrigation and drainage engineering, v. 129, n. 1, p. 53-63, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)). Acesso em: 22 ago. 2021.

HARGREAVES, George H.; SAMANI, Zohrab A. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the irrigation and Drainage Division*, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>. Acesso em: 22 ago. 2021.

HARGREAVES, George H.; SAMANI, Zohrab A. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. Disponível em: DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>. Acesso em: 22 ago. 2021.

INMET-INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados climáticos da Estação de CASSILANDIA (A742). Banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia. 2021. KELLEY, J.; MCCAULEY, D.; ALEXANDER, G. A.; GRAY, W. F.; SIEGFRIED, R.; OLDROYD, H. J.. . Using Machine Learning to Integrate On-Farm Sensors and Agro-Meteorology Networks into Site-Specific Decision Support. *Transactions of the ASABE*, v. 63, n. 5, p. 1427-1439, 2020. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=51768>. Acesso em 22 ago. 2021.

MELO, Giovani L. de; FERNANDES, André LT. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 5, p. 875-888, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/rMVCLmCsPnTDDLqKphMQdKC/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 21 ago. 2021.

MORTON, Fred I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology. *Journal of hydrology*, v. 66, n. 1-4, p. 1-76, 1983. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90177-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90177-4). Acesso em: 22 ago. 2021.

PEREIRA, Antonio Roberto; PRUITT, William Oregon. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural water management*, v. 66, n. 3, p. 251-257, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.11.003>. Acesso em: 22 ago. 2021.

RAHIMI, S.; SEFIDKOUHI, M. A. G.; RAEINI-SARJAZ, M.; VALIPOUR, M.. Estimation of actual evapotranspiration by using MODIS images (a case study: Tajan catchment). *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 61, n. 5, p. 695-709, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.944904>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SANCHES, A.C.; SOUZA, D.P. de; MENDONCA, F.C.; MAFFEI, R.G. Construction and calibration of weighing lysimeters with an automated drainage system. *Rev. bras. eng. agríc. Ambiente*, v.21, n.7, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p505-509>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SARNIGHAUSEN, V. C. R. GOMES, F. G.; PAI, A. D.; RODRIGUES, S. A. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, p. 766-785, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14911>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SEPASKHAH, Ali Reza; RAZZAGHI, Fatemeh. Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves-Samani methods for estimation of daily evapotranspiration in a semi-arid region of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, v. 55, n. 1, p. 51-66, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340802383148>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SILVA, Roberto G.. Predição da configuração de sombras de árvores em pastagens para bovinos.

Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p. 268-281, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eagri/a/7dWzBrhMGWN46hs3G33p6Km/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 21 ago. 2021.

STAUDT, K.; SERAFIMOVICH, A.; SIEBICKE, L.; PYLES, D. R.; FALGE, E.. Vertical structure of evapotranspiration at a forest site (a case study). *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 151, n. 6, p. 709-729, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.10.009>. Acesso em: 21 ago. 2021.

TANNER, C. B. Measurement of evapotranspiration. In: HAGAN, R. M.; HAISE, H. R.; EDMINSTER, T. W. (ed.). *Irrigation of agricultural lands*, v. 11, p. 534-574, 1967. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronmonogr11.c30>. Acesso em: 21 ago. 2021.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. . Determinação da evapotranspiração através de imagens de satélites de diferentes resoluções com e sem a banda termal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2015. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1015416>. Acesso em: 21 ago. 2021.

THORNTHWAITE, Charles Warren. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/210739>. Acesso em: 21 ago. 2021.

WEISS, Albert; VAN CROWDER, Loy; BERNARDI, Michele. Communicating agrometeorological information to farming communities. *Agricultural and forest Meteorology*, v. 103, n. 1-2, p. 185-196, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00111-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00111-8). Acesso em: 21 ago. 2021.

WESTGREN, Randall; ZERING, Kelly. Case study research methods for firm and market research. *Agribusiness: an international journal*, v. 14, n. 5, p. 415-423, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-6297\(199809/10\)14:5<415::AID-AGR7>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6297(199809/10)14:5<415::AID-AGR7>3.0.CO;2-Y). Acessado em: 21 ago. 2021.

YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. trad. Daniel Grassi, v. 3, 2005.