



Avaliação de interpoladores geoestatísticos e determinísticos da evapotranspiração de referência diária para o estado do Espírito Santo

Evaluation of geostatistics interpolators and deterministic of the daily reference evapotranspiration in the state of Espírito Santo

Giselle Sabadim Saraiva^{1*}, Robson Bonomo², Joabe Martins de Souza³

Resumo: No estado do Espírito Santo é notório o destaque da agricultura na sua economia, mas, devido a irregularidade na distribuição das chuvas, as culturas têm sido irrigadas, sendo assim, o manejo da irrigação se torna importante para a produção das culturas. A evapotranspiração de referência (ET_o) diária é uma variável importante no manejo da irrigação, possibilitando quantificar a demanda hídrica de uma cultura e região. Objetivou-se com este trabalho comparar métodos de interpolação visando à espacialização da ET_o diária. A área de abrangência do estudo foi o estado do Espírito Santo, com área total de 46.184,1 km². Foram selecionadas 15 estações meteorológicas automáticas, como base para a interpolação, e dez para a validação cruzada. Os dados diários analisados foram do período 2010 – 2012, sendo utilizado três métodos de interpolação, sendo: geoestatística Krigagem, determinísticos Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e Spline tensionado. Três conjuntos de dados foram interpolados. A interpolação IQD apresentou o melhor desempenho para a variável, entre os três métodos, apresentando menor desvio e variação entre os valores de ET_o estimados pelo método de Penman-Monteith. O interpolador IQD mostrou ser um bom método para estimar a variável evapotranspiração de referência diária em locais onde não tem estações meteorológicas instaladas. Os valores estimados de ET_o, obtidos pelo método de interpolação IQD, podem ser usados com confiança no manejo da irrigação.

Palavras-chave: Geoprocessamento. Manejo da irrigação. Métodos de interpolação.

Abstract: In the state of Espírito Santo it is notorious the importance of agriculture for the State economy, several crops have been irrigated due to irregular distribution of rainfall. The daily reference evapotranspiration (ET_o) is an important variable in irrigation management, making it possible to quantify the water demand of a culture and region. This study aimed to compare interpolation methods to the spatial distribution of daily ET_o. The study included the state of Espírito Santo, Brazil, with a total area of 46,184.1 km². Fifteen automatic meteorological stations were selected as the basis for interpolation and ten for cross-validation. The daily data analyzed were from the period 2010-2012, using three methods of interpolation, employed: the Kriging geostatistical method and deterministic methods Distance Square Inverse (IQD) and Spline Tensioned. Three sets of data were interpolated. The IQD interpolation presented the best performance for the variable among the three methods, presenting lower deviation and variation among the ET_o values estimated by the Penman-Monteith method. The IQD interpolator showed, as a good method to estimate the daily reference evapotranspiration variable in places where do not have weather stations installed. The estimated values of ET_o obtained by IQD interpolation method can be used with confidence in irrigation management.

Key words: Geoprocessing. Irrigation management. Interpolation methods.

*Autor para correspondência

Enviado para publicação em 15/04/2016 e aprovado em 17/11/2016.

¹Mestre em Agricultura Tropical, Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, São Mateus, ES. E-mail: gizellesabadim@gmail.com

²Doutor em Engenharia Agrícola/Irrigação e Drenagem, Professor da Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, Departamento de Ciências Agrárias e Biológicas, São Mateus, ES. E-mail: robsonbonomo@ceunes.ufes.br

³Pós-Doutorando no Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, CEUNES/ UFES, São Mateus-ES, joabenv@gmail.com

INTRODUÇÃO

Em uma atividade agrícola irrigada, o manejo da irrigação constitui uma técnica importante do ponto de vista econômico e ambiental, proporcionando economia de água, energia, aumento da produtividade da cultura e melhoria na qualidade do produto (BONOMO *et al.*, 2013). Luna *et al.* (2013) ressaltam que a agricultura irrigada tem sido uma importante estratégia para otimização da produção de alimentos, promovendo, assim, desenvolvimento sustentável no campo, com geração de emprego e renda.

Vários componentes são importantes no manejo da irrigação vários componentes são importantes, dentre eles a evapotranspiração de referência (ET_o) é um dos principais componentes do balanço de água, sendo de grande utilidade na climatologia, quer em classificações climáticas ou para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais, bem como no manejo da água em sistemas de irrigação (SOUZA *et al.*, 2011). A ET_o é, portanto, importante para o dimensionamento de sistemas e manejo da água de irrigação, o que requer a adoção de estudos, avaliações e ajustes para sua correta utilização (SOUZA *et al.*, 2014).

A estimativa da ET_o por equações, mais usualmente pela equação de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998), produz valores satisfatórios para as condições climáticas de uma determinada região ou dia. A utilização dos métodos de interpolação para a variável ET_o, assim como para diferentes variáveis, possibilita a sua estimativa em regiões onde não há presença de estação meteorológica instalada.

Os interpoladores, por sua vez, são ferramentas matemáticas que atribuem valores relativos a alguma variável em pontos inseridos em um campo de valores já existente, transformando dados discretos em contínuos (CASTRO *et al.*, 2010a). Dentre os métodos de interpolação, os determinísticos são os mais fáceis de entendimento das equações, que levam em consideração, principalmente, a distância entre os pontos.

Em alguns estudos, utilizam-se métodos de interpolação espacial para estimativas e espacialização de variáveis meteorológicas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, evapotranspiração), porém, ainda não há um método considerado como o mais adequado para uma determinada variável (CASTRO *et al.*, 2010b; SILVA *et al.*, 2011a; GARDIMAN JUNIOR *et al.*, 2012; MAGALHÃES *et al.*, 2013). Logo, é necessário o estudo de vários métodos de interpolação para, assim, obter um modelo apropriado às condições climáticas locais, já que carece de trabalhos bases nessa área.

Uma ferramenta promissora na estimativa precisa da ET_o diária e no correto manejo da irrigação é a disponibilidade, quase que em tempo real, dos valores estimados da ET_o, por meio de softwares via internet, que necessitam apenas da inclusão das coordenadas geográficas do local, para, assim, obter a lâmina de água a ser aplicada em uma determinada cultura. Dessa forma, objetivou-se com o presente estudo

comparar diferentes métodos de interpolação, visando à espacialização da evapotranspiração de referência (ET_o) diária no estado do Espírito Santo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo é representada pelo estado do Espírito Santo, que possui área territorial de 46.053,19 km². Está localizado entre os paralelos de 17°53'29" a 21°18'03" de latitude Sul e os meridianos 39°41'18" a 41°52'45" longitude Oeste de Greenwich (EUGENIO *et al.*, 2014). A altitude média é de 312 m, sendo que 65% do estado possui altitude inferior a 300 m, enquanto 15% com altitudes superiores a 700 m. As regiões de faixa litorânea apresentam temperatura média anual acima de 24°C, enquanto que a região serrana apresenta, em sua maior parte, temperatura média anual entre 16 e 22°C (CASTRO *et al.*, 2010b).

O clima, segundo a classificação de Köppen, enquadra-se nas zonas climáticas A e C, sendo a primeira quente e úmida e a outra tropical de altitude (mesotérmico) (SIQUEIRA *et al.*, 2004).

Foram utilizadas 15 estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instaladas dentro do estado do Espírito Santo e estações limítrofes, instaladas em seus estados vizinhos (Bahia, Minas Gerais e Rio de Janeiro). Além dessas, foram utilizadas oito estações da empresa Fibria e duas do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), totalizando 25 estações meteorológicas (Figura 1), com dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade do vento e radiação solar a cada hora.

As estações utilizadas para validação cruzada são pertencentes à empresa de celulose Fibria e ao CPTEC/INPE. A série histórica utilizada e presente em todas as estações foram de 2010 a 2012, em razão da estação meteorológica de Manhauçu ter sido instalada no ano de 2010, totalizando assim 1096 dias com dados meteorológicos diários. Em todas as estações foram eliminados os dias que não apresentavam dados coletados por falha de coleta do aparelho ou por falha de envio aos órgãos responsáveis.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada empregando-se planilhas eletrônicas do programa Microsoft Excel, tendo-se por base a Equação 1 (ALLEN *et al.*, 1998):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹); R_n = saldo de radiação na superfície da cultura (MJ m⁻² dia⁻¹); G = densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T = temperatura média diária (°C); U₂ = velocidade do vento a 2 metros de altura (m s⁻¹); e_s = pressão de saturação de

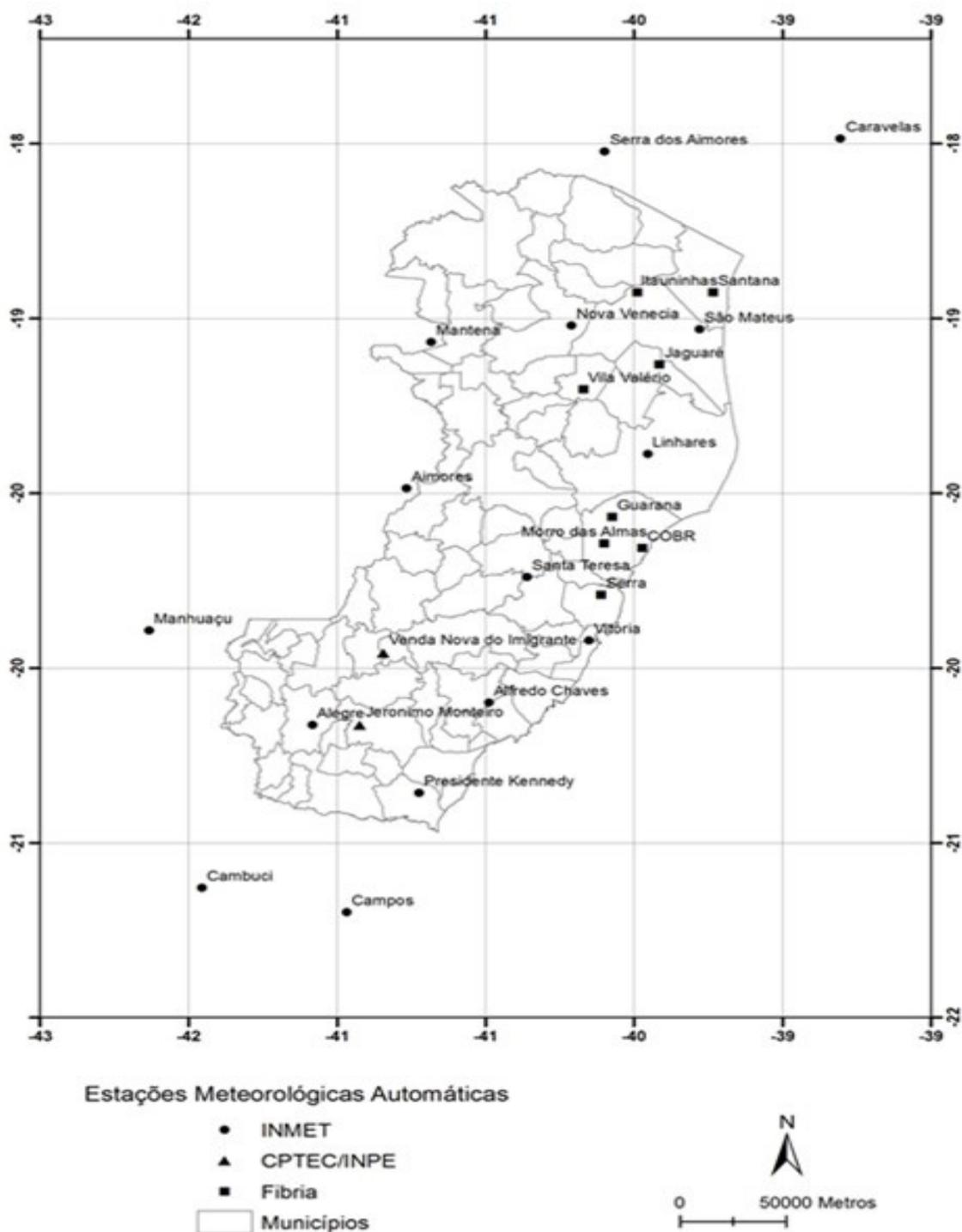


Figura 1 – Localização das estações meteorológicas automáticas no estado do Espírito Santo e nos estados limítrofes.

Figure 1 - Location of the automatic weather stations in the state of Espírito Santo and in neighbouring states.

vapor (kPa); e_a = pressão de vapor atual (kPa). Os valores de R_n e G foram estimados de acordo com a metodologia descrita por Allen *et al.* (1998).

Os dados foram agrupados em três grupos com condições diferenciadas para serem interpolados: o primeiro

grupo com 75% das estações com radiação solar global \leq 40% da R_a (radiação solar no topo da atmosfera), sendo caracterizado como “Dias com baixa radiação relativa”; o segundo grupo com 75% das estações com radiação solar global $>$ 60% da R_a (radiação solar no topo da atmosfera),

caracterizado como “Dias com alta radiação relativa”; e o terceiro grupo como “Todos os Dias”, com interpolação de todos os dias sem falhas comuns a todas as estações.

Foram utilizados três métodos de interpolação espacial da ETo diária da série histórica de três anos (2010 a 2012). O primeiro método foi o geoestatístico Krigagem Ordinária, calculada seguindo a Equação 2 (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N [\lambda_i Z(x_i)] \quad (2)$$

Em que: $Z^*(x_0)$ = valor estimado no ponto x_0 não amostrado; $Z(x_i)$ = valor obtido por amostragem no campo; N = número de valores medidos, envolvidos na estimativa; λ_i = pesos associados a cada valor medido $Z(x_i)$.

Além do método geoestatístico, utilizaram-se os métodos determinísticos Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e o Spline Tensionado. A interpolação do método determinístico, IQD, seguiu a Equação 3, segundo Amorim *et al.* (2008), já o Spline Tensionado seguiu a Equação 4 (ESRI, 2011).

$$X_i = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j}{d_{ij}^k}\right)}{\sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{d_{ij}^k}\right)} \quad (3)$$

$$S(x,y) = T(x,y) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(r_j) \quad (4)$$

Em que: x_i = valor estimado no ponto i ; d_{ij} = distância entre os pontos i e j ; x_j = valor amostrado de x no ponto j ; n = número de pontos da amostra; k = coeficiente da potência do interpolador, empregando dois neste trabalho. $j = 1, 2, 3, \dots, N$; N = número de pontos; λ_j = coeficientes encontrados pela solução de um sistema de equações lineares; r_j = distância do ponto (x, y) até o ponto j^{th} . Para a opção Tensão, $T(x, y)$ e $R(r)$ foram calculados conforme descrito em ESRI (2011).

Os pesos foram calculados em função da matriz de semivariâncias, entre os pares de pontos utilizados na interpolação e o vetor de semivariância referente a cada ponto usado na interpolação e o ponto de interesse, conforme Marques *et al.* (2012). A partir do semivariograma experimental, foi realizado o ajuste para o modelo esférico, sendo esse bastante utilizado na literatura, descrito por Gomes *et al.* (2007).

O desempenho dos interpoladores da evapotranspiração (ETo) foi avaliado usando a metodologia de validação cruzada apresentada em Robinson e Metternicht (2006) e Amorim *et al.* (2008), na qual um posto específico é descartado sucessivamente na realização da interpolação; assim, é possível obter o valor estimado relativo ao posto retirado e, posteriormente, compará-lo com o valor real da variável.

A precisão dos valores interpolados foi aferida por meio dos índices estatísticos: Viés Médio (VM), Erro Absoluto Médio (EAM), Erro Quadrático Médio (EQM), Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), Estimativa do Erro Padrão (EEP), Percentual de Eficiência (EF%), índice de concordância (d), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (r^2) e índice de confiança ou desempenho (c), apresentado na Tabela 1 (AMORIM *et al.*, 2008; GARDIMAN JUNIOR *et al.*, 2012; GOIS *et al.*, 2015).

O viés médio (VM) ou erro médio é um parâmetro que identifica se o modelo tende a subestimar (viés negativo) ou superestimar (viés positivo) a variável estimada do seu valor verdadeiro. O erro quadrático médio (EQM) indica a magnitude média do erro estimado, onde o melhor interpolador é aquele que apresenta valor próximo de zero (ALVES; VECCHIA, 2011). E a raiz do erro quadrático médio (REQM) segue o mesmo raciocínio apresentado no EQM.

O erro absoluto médio (EAM) é a diferença entre o valor observado e o valor estimado, indicando assim que quanto menor for o valor do EAM, mais próximo o valor estimado é do valor observado.

A estimativa do erro padrão (EEP) e o percentual de eficiência (EF%), citados em Gardiman Junior *et al.* (2012), indicam que quanto maior for o valor encontrado, mais distante está o valor estimado do valor observado, sendo assim, o melhor modelo é aquele que apresentar menores valores de EEP e EF%.

O índice de concordância de Willmott (d), citado em Saraiva *et al.* (2013) e Silva *et al.* (2011b), possui valores que variam de “zero” (não existe concordância) a “um” (concordância perfeita), valorizando os ajustes nos valores altos, próximos a 1.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi usado para analisar o desempenho dos métodos de interpolação, sendo caracterizados da seguinte forma: Forte ($r = 0,70$ até 1); Moderado ($r = 0,40$ até 0,60); Fraco ($r = 0,10$ até 0,30), valorizando também os ajustes nos valores altos, na característica “Forte” (DANCEY; REIDY, 2006).

O coeficiente de determinação (r^2) é a razão entre a soma de quadrados da regressão e a soma de quadrados total, varia entre 0 e 1, em que, quanto mais próximo da unidade 1, mais explicativo é o modelo e melhor se ajusta à amostra (GARDIMAN JUNIOR *et al.*, 2012).

O indicador estatístico índice de confiança ou desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1996), foi usado para comparar os valores estimados pelos métodos de interpolação com os valores observados. Os desempenhos dos modelos de interpolação quanto aos valores da ETo foram caracterizados da seguinte forma: Ótimo ($c > 0,85$); Muito Bom ($0,76 \leq c \leq 0,85$); Bom ($0,66 \leq c \leq 0,75$); Mediano ($0,61 \leq c \leq 0,65$); Sofrível ($0,51 \leq c \leq 0,60$); Mau ($0,41 \leq c \leq 0,50$); e Péssimo ($c \leq 0,40$).

Tabela 1 - Índices estatísticos para avaliação do desempenho dos interpoladores

Table 1 - Statistical indices for assessing the performance of interpolators

Índice estatístico	Identificador	Definição
Viés Médio	VM	$\frac{1}{N} \sum (Y_i - X_i)$
Erro Absoluto Médio	EAM	$\frac{1}{N} \sum Y_i - X_i $
Erro Quadrático Médio	EQM	$\sum \frac{(Y_i - X_i)^2}{N}$
Raiz do Erro Quadrático Médio	REQM	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y_i - X_i)^2}$
Estimativa do Erro Padrão	EEP	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{Y}_i)^2}{N-1} \right]^{1/2}$
Percentual de Eficiência	EF%	$100 * \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \right)$
Índice de concordância	d	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{X}_i) + (X_i - \bar{X}_i)]}$
Coefficiente de correlação de Pearson	r	$\frac{\sum (X_i - \bar{X}_i) (Y_i - \bar{Y}_i)}{\sqrt{[\sum (X_i - \bar{X}_i)^2] [\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2]}}$
Coefficiente de determinação	r ²	$\left\{ \frac{\sum (X_i - \bar{X}_i) (Y_i - \bar{Y}_i)}{\sqrt{[\sum (X_i - \bar{X}_i)^2] [\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2]}} \right\}^2$
Índice de confiança ou desempenho	c	r * d

X_i: valor medido (calculado por PM-FAO-56); Y_i: valor estimado pelo método de interpolação; N: número de amostras consideradas; \bar{X} : média de todos os valores medidos (calculado por PM-FAO-56); \bar{Y}_i : média de todos os valores estimados pelo método de interpolação.

X_i: measured value (calculated by PM-FAO-56); Y_i: estimated value by the method of interpolation; N: Number of samples considered; \bar{X} : mean of all measured values (calculated by FAO-PM-56); \bar{Y}_i : mean of all the values estimated by the method of interpolation.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise dos valores locais médios para “Dias com baixa radiação relativa”, o método de interpolação Inverso do Quadrado da Distância (IQD) mostrou ser o mais eficiente para a interpolação espacial da variável ETo na região do Espírito Santo (Tabela 2), uma vez que apresentou, em geral, os menores valores para os índices estatísticos EAM, EQM, REQM, EEP e EF%. Para o VM, os métodos IQD, Spline Tensionado e Krigagem superestimaram os valores locais médios. Para Amorim *et al.* (2008), que trabalharam com a espacialização da precipitação pluvial no estado de Alagoas, o método IDW também se mostrou mais adequado à variável em estudo em comparação com o método Spline.

O índice de concordância (d) para os métodos IQD e Spline Tensionado apresentaram valores próximos de “um”, representando assim uma elevada concordância.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) para todos os interpoladores se caracterizou com o índice “forte” (r = 0,70 até 1). Para o coeficiente de determinação (r²), o interpolador que apresentou melhor desempenho foi o método Spline Tensionado, porém, o método IQD também obteve resultados satisfatórios. Os interpoladores IQD, Spline Tensionado e Krigagem, para valores locais médios, apresentaram valores do índice desempenho “c” classificados como Muito Bom (0,76 ≤ c ≤ 0,85).

Para os valores locais médios dos “Dias com alta radiação relativa” (Tabela 3), os métodos de interpolação Spline Tensionado e IQD se apresentaram, no geral, como os métodos de interpolação espacial mais indicados para interpolações da variável ETo na região do estado do Espírito Santo. Esses resultados corroboram os de Magalhães *et al.* (2013), que verificaram que os métodos de interpolação IDW e Spline apresentaram resultados mais consistentes

Tabela 2 - Valores locais médios para “Dias com baixa radiação relativa”

Table 2 - Average site values for “Days of low relative radiation”

Métodos de Interpolação	Dias com baixa radiação relativa									
	Médias Locais									
	VM	EAM	EQM	REQM	EEP	EF%	d	r	r ²	c
Inverso do Quadrado da Distância	0,09	0,42	0,37	0,56	0,62	30,69	0,91	0,90	0,82	0,83
Spline Tensionado	0,07	0,46	0,41	0,60	0,62	35,76	0,91	0,92	0,85	0,84
Krigagem Ordinária Esférica	0,03	0,47	0,44	0,62	0,67	39,45	0,89	0,88	0,79	0,79

VM: viés médio; EAM: erro absoluto médio; EQM: erro quadrático médio; REQM: raiz do erro quadrático médio; EEP: estimativa do erro padrão; EF%: percentual de eficiência; d: índice de concordância; r: coeficiente correlação de Pearson; r²: coeficiente de determinação; c: índice de desempenho ou confiança.

VM: mean bias; E: mean absolute error; NDE: mean square error; RMSE: the root mean square error; EEP: estimated standard error; EF%: percentage efficiency; d: concordance index; r: Pearson correlation coefficient; r²: coefficient of determination; c: performance index or confidence.

Tabela 3 - Valores locais médios para “Dias com alta radiação relativa”

Table 3 - Average site values for “Days of high relative radiation”

Métodos de Interpolação	Dias com alta radiação relativa									
	Médias Locais									
	VM	EAM	EQM	REQM	EEP	EF%	d	r	r ²	c
Inverso do Quadrado da Distância	0,29	0,63	0,78	0,79	0,81	44,11	0,82	0,85	0,75	0,73
Spline Tensionado	0,23	0,63	0,76	0,79	0,79	46,65	0,83	0,84	0,73	0,72
Krigagem Ordinária Esférica	0,32	0,66	0,84	0,83	0,84	50,10	0,80	0,83	0,72	0,69

VM: viés médio; EAM: erro absoluto médio; EQM: erro quadrático médio; REQM: raiz do erro quadrático médio; EEP: estimativa do erro padrão; EF%: percentual de eficiência; d: índice de concordância; r: coeficiente correlação de Pearson; r²: coeficiente de determinação; c: índice de desempenho ou confiança.

VM: mean bias; E: mean absolute error; NDE: mean square error; RMSE: the root mean square error; EEP: estimated standard error; EF%: percentage efficiency; d: concordance index; r: Pearson correlation coefficient; r²: coefficient of determination; c: performance index or confidence.

e eficientes para a espacialização da precipitação média anual na região em estudo, diferente do encontrado por Carvalho *et al.* (2012), que verificaram que as estimativas de precipitação anual média obtidas pelos interpoladores geoestatísticos são mais precisas do que as obtidas pelo interpolador do inverso do quadrado da distância.

O método Spline Tensionado apresentou os menores valores para os índices estatísticos EAM, EQM, REQM e EEP, exceto o IQD, que apresentou REQM igual. Já para o índice estatístico EF%, o método IQD obteve o melhor ajuste. Para o VM, todos os métodos superestimaram os valores locais médios. O índice de concordância (d) para os métodos Spline Tensionado e IQD apresentaram valores superiores a 0,81, representando, assim, boa concordância. O coeficiente de correlação de Pearson (r) para todos os interpoladores se caracterizou com o índice “forte” (r = 0,70 até 1), exceto a Krigagem Ordinária Esférica. Para o coeficiente de determinação (r²), o interpolador que apresentou melhor desempenho foi o método IQD. Os interpoladores IQD, Spline Tensionado e Krigagem mostraram desempenho Bom (0,66 ≤ c ≤ 0,75).

Castro *et al.* (2010a) observaram que o método spline apresentou um mapa completamente diverso daquele obtido por meio da técnica de Krigagem indicando, assim, total ineficiência do primeiro quando aplicado exclusivamente no estado do Espírito Santo, ainda segundo os autores a Krigagem foi o método de interpolação diferentemente desse trabalho, que apresentou as melhores estimativas das variáveis precipitação, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real, deficiência hídrica, excedente hídrico e disponibilidade hídrica, relatando ainda que poucos trabalhos se propuseram a espacializar a evapotranspiração real no Brasil, atendo-se apenas à evapotranspiração potencial.

Na Figura 2, são apresentados os valores de ETo calculados por cada método, FAO-PM 56, Spline, IDW e Krigagem, para os dias comuns em todas as estações meteorológicas usadas no presente trabalho. Sendo observados os valores de máximos, médios e mínimos. Os menores valores de ETo foram observados nas estações de Santa Teresa, Cambuci e Mantena, porém, houve um comportamento semelhante entre os métodos estudados.

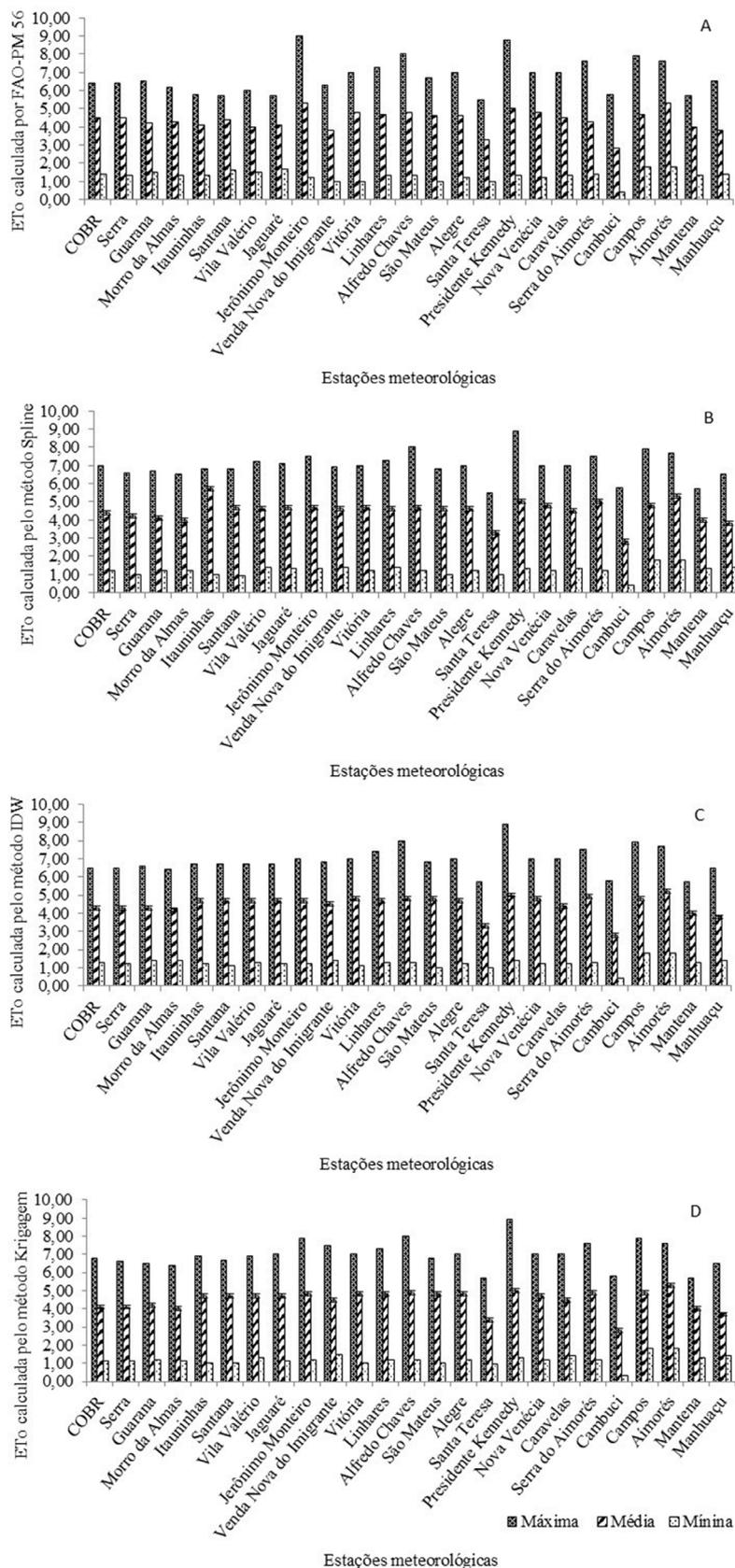


Figura 2 – Valores de máximos, médias e mínimos de ET₀ calculados por FAO-PM 56 (A), método Spline (B), método IDW (C) e método Krigagem para os dias comuns em todas as estações meteorológicas.

Figure 2 - Maximum, mean and minimum values for ET₀ calculated by FAO-56 PM (A), Spline method (B), IDS method (C) and kriging method (D) for ordinary days at all weather station.

Para o grupo “Todos os Dias”, a variação da ETo calculada pela equação de Penman-Monteith na região Sul do estado do Espírito Santo, que abrange as estações de Alfredo Chaves, Alegre, Presidente Kennedy, Venda Nova do Imigrante e Jerônimo Monteiro, apresentou amplitudes de 0,74 mm dia⁻¹ a 8,98 mm dia⁻¹, entre os anos de 2010 e 2012. Já para a região Norte, que abrange as estações de Nova Venécia, São Mateus, Linhares, Itauninhas, Santana, Jaguaré e Vila Valério, foram verificadas amplitudes de 1,03 mm dia⁻¹ a 7,33 mm dia⁻¹, na região Central, que abrange as estações de Santa Teresa, Vitória, Guarana, Morro das Almas, COBR e Serra, amplitudes de 0,90 mm dia⁻¹ a 7,04 mm dia⁻¹.

Essa maior variação de ETo observada na região Sul ocorre em função do relevo presente nessa área, em que as serras e montanhas dificultam a circulação das massas de ar, ocasionando a concentração dessas, aumentando, assim, a variação de ETo. Além disso, ela se deve, também, ao clima predominante na região, Cwa (inverno seco e verão quente), que apresenta maior variabilidade ao longo do ano, segundo classificação de Köppen.

O interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IQD) para os valores locais médios de “Todos os Dias” (Tabela 4) também se apresentou como a melhor alternativa para a interpolação espacial da variável ETo na região do Espírito Santo.

O IQD apresentou os menores valores para os índices estatísticos EAM, EQM, REQM, EEP e EF%, exceto para a Krigagem Ordinária Esférica, que apresentou EEP igual. Para o VM, todos os métodos de interpolação superestimaram os valores locais médios. O índice de concordância (d) para todos os métodos de interpolação apresentou valores superiores a 0,88, representando assim uma elevada concordância. O coeficiente de correlação de

Pearson (r) para todos os interpoladores se caracterizou com o índice “forte” (r = 0,70 até 1).

Para o coeficiente de determinação (r²), o interpolador que apresentou melhor desempenho foi o método IQD. Os interpoladores, IQD, Spline Tensionado e Krigagem apresentaram índice de desempenho “c” Muito Bom (0,76 ≤ c ≤ 0,85), indicando boa adaptação desses métodos para a estimativa da ETo por interpolação. Segundo Lucas *et al.* (2013) o método Krigagem foi o interpolador com os melhores parâmetros estatísticos para chuvas mensais e eventos diários de maior intensidade. Muitos trabalhos em climatologia utilizam-se do interpolador IDW, porém os resultados dessa pesquisa mostram que além dos problemas visuais, geração de ilhas concêntricas, apresenta menor qualidade estatística na estimativa.

Com relação às performances dos métodos, destaca-se que os valores são muito próximos e dentro da faixa de incerteza da própria variável evapotranspiração de referência (ETo). Considerando isso, quaisquer dos três métodos possibilitam resultados satisfatórios para a interpolação. Já Gardiman Junior *et al.* (2012), diferente do encontrado nesse trabalho, verificaram que os melhores desempenhos foram obtidos nessa ordem, pelos métodos Krigagem com modelo semivariograma esférico, IDW 2, Spline regularizada, Vizinho natural e, por último, Topo to Raster.

O método geoestatístico Krigagem Ordinária requer o uso do semivariograma, ferramenta básica de suporte às técnicas de Krigagem. O método Spline Tensionado é um estimador determinístico que ajusta uma superfície analítica tomando como base as equações polinomiais, já o método Inverso do Quadrado da Distância (IQD) é um estimador determinístico de valores não amostrais a partir

Tabela 4 - Valores locais médios para “Todos os Dias”

Table 4 - Average site values for “Every Day”

Métodos de Interpolação	Todos os dias									
	Médias Locais									
	VM	EAM	EQM	REQM	EEP	EF%	d	r	r ²	c
Inverso do Quadrado da Distância	0,21	0,53	0,59	0,69	0,87	30,07	0,90	0,90	0,83	0,82
Spline Tensionado	0,19	0,56	0,63	0,72	0,88	33,22	0,90	0,90	0,82	0,82
Krigagem Ordinária Esférica	0,17	0,56	0,63	0,73	0,87	34,30	0,89	0,89	0,81	0,81

VM: viés médio; EAM: erro absoluto médio; EQM: erro quadrático médio; REQM: raiz do erro quadrático médio; EEP: estimativa do erro padrão; EF%: percentual de eficiência; d: índice de concordância; r: coeficiente correlação de Pearson; r²: coeficiente de determinação; c: índice de desempenho ou confiança.

VM: mean bias; E: mean absolute error; NDE: mean square error; RMSE: the root mean square error; EEP: estimated standard error; EF%: percentage efficiency; d: concordance index; r: Pearson correlation coefficient; r²: coefficient of determination; c: performance index or confidence.

de uma combinação linear de valores de pontos conhecidos, ponderados pela função distância.

Assim, os dois primeiros métodos são dependentes de ferramentas SIG para a realização de interpolações. Logo, o modelo IQD se sobressai com uma vantagem, a não obrigatoriedade de ferramentas SIG para a realização de interpolações de valores da ETo, uma vez que, trabalha apenas com a distância entre os pontos a serem estimados e as estações meteorológicas mais próximas.

Com isso, infere-se que o uso do método de interpolação IQD se mostrou satisfatório na estimativa da ETo diária para o estado do Espírito Santo, apresentando-se como uma ferramenta confiável e fácil para a interpolação dos valores diários da ETo, que podem ser empregados com segurança no manejo da irrigação, em locais onde não se dispõem de dados meteorológicos medidos “in situ”.

CONCLUSÕES

Os métodos de interpolação apresentaram bom desempenho, gerando valores muito próximos e dentro da faixa de incerteza da variável evapotranspiração de referência (ETo);

O interpolador Inverso do Quadrado da Distância (IQD) obteve os menores valores para os índices estatísticos e uma forte correlação e bom desempenho para estimativa da ETo;

Os valores estimados da ETo pelo Inverso do Quadrado da Distância podem ser usados com confiança no manejo da irrigação.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo, pelo apoio financeiro na realização do trabalho.

LITERATURA CIENTÍFICA CITADA

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

ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. *Acta Scientiarum*, v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011.

AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C.; LEAL, B. G.; SILVA, J. B. G. Avaliação do desempenho de dois métodos de espacialização da precipitação pluvial para o estado de Alagoas. *Acta Scientiarum Technology*, v. 30, n. 1, p. 87-91, 2008.

BONOMO, D. Z.; BONOMO, R.; PARTELLI, F. L.; SOUZA, J. M.; MAGIERO, M. Desenvolvimento vegetativo do cafeeiro Conilon submetido a diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 7, n. 2, p. 157-169, 2013

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, baseada no método de Hargreaves – 1974. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 4, n. 1, p. 77-81, 1996.

CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1235-1242, 2012.

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010a.

CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; PEZZOPANE, J. R. M.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. *Revista Floresta*, v. 40, n. 1, p. 235-250, 2010b.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Artmed, p.172-180, 2006. 608p.

ESRI – Environmental Systems Research Institute, Inc., 2011, **User Manual – Help Online**, version 9.3, Disponível em: <[http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=how%20spline%20\(3d%20analyst\)%20works&](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3/index.cfm?topicname=how%20spline%20(3d%20analyst)%20works&)>. Acesso em: 15 nov. 2013.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; MAGALHÃES, I. A. L.; FREITAS, C. A. A.; CECÍLIO, R. A. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, v. 8, n. 1. p. 61-71, 2012.

GOIS, G.; DELGADO, R. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Modelos teóricos transitivos aplicados na interpolação Espacial do índice de precipitação padronizada (spi) para Episódios de el niño forte no estado do Tocantins. *Irriga*, v. 20, n. 2, p. 371-387, 2015.

- GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 435-443, 2007.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- LUCAS, T. P. B.; PLEC, D.; ABREU, M. L.; PARIZZI, M. G. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, n. 9, p. 7-21, 2013.
- LUNA, N. R. S.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, A. C. M.; AQUINO, D. N. Dinâmica do nitrato e cloreto no solo e a qualidade das águas subterrâneas do distrito de irrigação Baixo Acaraú, CE. **Revista Agro@mbiente Online**, v. 7, n. 1, p. 53-62, 2013.
- MAGALHÃES, I. A. L.; ALMEIDA, K. L.; THIAGO, C. R. L.; GARDIMAN JUNIOR, B. S.; ZANETTI, S. S.; CECÍLIO, R. A. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região norte do estado do Espírito Santo. In: **Anais. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Foz do Iguaçu, Paraná, 2013.
- MARQUES, A. P. S.; MARCATO JUNIOR, J.; AMORIM, A.; FLORES, E. F. Aplicação do interpolador krigagem ordinária para a elaboração de planta de valores genéricos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 2, p. 175-186, 2012.
- ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 50, n. 2, p. 97-108, 2006.
- SARAIVA, G. S.; BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Perdas de água por evaporação e arraste pelo vento, em sistemas de aspersão fixa, norte do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, n. 4, p. 235-247, 2013.
- SILVA, K. R.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; GARCIA, G. O. Interpolação Espacial da Precipitação no Estado do Espírito Santo. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 417-427, 2011a.
- SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; DA SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011b.
- SIQUEIRA, J. D. P.; LISBOA, R. S.; FERREIRA, A. M.; SOUZA, M. F. R.; ARAÚJO, E.; LISBÃO JÚNIOR, L.; SIQUEIRA, M. M. Estudo ambiental para os programas de fomento florestal da Aracruz Celulose S. A. e extensão florestal do governo do estado do Espírito Santo. **Revista Floresta**, v. 34, n. 2, p. 3-67, 2004.
- SOUZA, J. M.; PEREIRA, L. R.; RAFAEL, A. M.; SILVA, L. D.; REIS, E. F.; BONOMO, R. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in two locations of Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n.2, p. 114-126, 2014.
- SOUZA, L. P.; FARIAS, O. S.; MOREIRA, J. G. V.; GOMES, F. A.; JUNIOR, E. F. F. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Cruzeiro do Sul – Acre. **Enciclopédia biosfera**, v. 7, n. 12, p. 1-8, 2011.