

DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO ESPAÇO-TEMPORAL DE ESTIMATIVA DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR PARA ESTADO DE GOIÁS

JORGE CESAR DOS ANJOS ANTONINI¹, EUZEBIO MEDRADO SILVA², LUIZ FERNANDO COUTINHO DE OLIVEIRA³, EDSON EYJI SANO⁴

¹ Eng. Agrícola, Pesquisador, Doutor, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, Fone: (0 xx 61) 3388 9990, jorge.antonini@cpac.embrapa.br.

² Eng. Agrônomo, Pesquisador, Doutor, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

³ Eng. Agrícola, Prof. Doutor, Departamento Engenharia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

⁴ Geólogo, Pesquisador, Doutor, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011
SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES.

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático de estimativa da temperatura média diária do ar, que considera, simultaneamente, suas variações espaciais e temporais, ajustado para as condições climáticas do Estado de Goiás. Para o desenvolvimento do modelo, foi utilizada uma combinação linear dos valores de altitude, latitude, longitude e tempo, na escala diária, que é representado pela série trigonométrica de Fourier incompleta com os três primeiros harmônicos. Os parâmetros do modelo foram ajustados aos dados históricos de temperatura média diária de 21 estações meteorológicas, por meio de regressão linear múltipla. O coeficiente de correlação resultante do ajuste do modelo foi de 0,91, mostrando que o modelo é satisfatório para modelar a variação espacial e temporal da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem climática, regressão linear múltipla, série de Fourier.

DEVELOPMENT OF A SPATIAL-TEMPORAL MATHEMATICAL MODEL TO ESTIMATE DAILY AVERAGE AIR TEMPERATURE OF GOIÁS STATE, BRAZIL

ABSTRACT: The objective of this study was to develop a mathematical model to predict daily average air temperature that considers, simultaneously, its spatial and temporal variations, adjusted to the climate conditions of Goiás State, Brazil. Model was developed using a linear combination of altitude, latitude, longitude, and time, at the daily-based scale, which is represented by incomplete trigonometric Fourier series with the first three harmonics. Model parameters were adjusted to the historical data of daily average temperature from 21 weather stations, using multiple linear regression. The correlation coefficient from the adjusted model was 0.91, showing that the model is suitable for modeling the spatial and temporal variations of daily mean air temperature for the State of Goiás, Brazil.

KEYWORDS: climatic modeling, multiple linear regression, Fourier series.

INTRODUÇÃO: O conhecimento das variáveis meteorológicas é importante para estudos do desenvolvimento das culturas agrícolas. A temperatura do ar é a que mais interfere nos processos fisiológicos que ocorrem nas plantas (Benevides et al., 2007). O conhecimento da temperatura auxilia no zoneamento agrícola, na estimativa do ciclo das culturas e na definição da época de semeadura.

O monitoramento da temperatura do ar é feito nas estações meteorológicas. No entanto, na ausência destas estações, podem-se utilizar métodos de estimativa para a caracterização térmica da região. (Cargnelutti Filho et al., 2006).

A temperatura tem sido estimada em função da altitude, longitude e latitude, utilizando-se modelos lineares, com aceitável grau de precisão (Ferreira et al., 2006; Stahl et al., 2006; Cargnelutti Filho et al., 2008). Estes modelos foram desenvolvidos com uso de variáveis espaciais ou temporais, separadamente. No entanto, para aplicação no zoneamento agrícola de risco climático há necessidade de modelos que utilizem simultaneamente, variáveis espaciais e temporais.

A variação da temperatura média diária do ar ao longo do ano apresenta uma nítida sazonalidade, evento que se repete todos os anos. Para o desenvolvimento de modelos de estimativa com dados de séries temporais que apresentam variações periódicas, pode-se utilizar a análise harmônica por séries de Fourier (Carvalho et al., 2005). Portanto, o objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo matemático de estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás, que considera, simultaneamente, as variações espaciais e temporais.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi realizado no Estado de Goiás, localizado entre 12° 00' 00"S e 19° 45' 44"S e 45° 45' 32"W e 53° 30' 00"W. Os dados utilizados no presente estudo foram obtidos junto às bases do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO) e da Embrapa Arroz e Feijão, totalizando 21 estações meteorológicas distribuídas dentro do Estado de Goiás e do Distrito Federal (Figura 1).

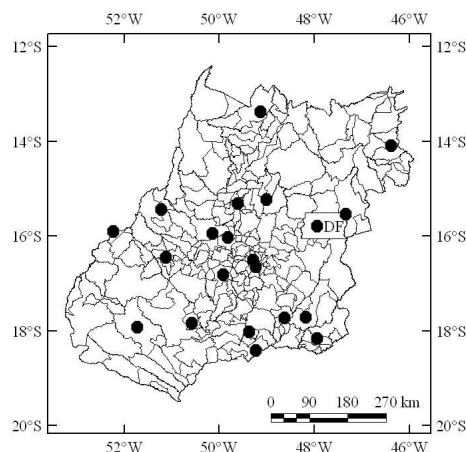


Figura 1. Localização das estações meteorológicas no Estado de Goiás e no Distrito Federal.

A seleção das estações meteorológicas para ajuste do modelo foi feita considerando a distribuição e disponibilidade de séries históricas de dados de temperatura com, no mínimo, oito anos de observação.

A partir dos dados diários de temperatura máxima e mínima do ar e considerando os dias do ano em uma seqüência de 1 dia a 365, foi calculada a temperatura média do ar do dia i no ano j (To_{ij}) da série histórica analisada. Com estes valores foi calculada a temperatura média para cada dia do ano em °C (To_{ip}), referente ao período de observação da série histórica.

Para compor o modelo de estimativa da temperatura média diária do ar, em função do espaço e do tempo, utilizou-se uma combinação linear, entre as coordenadas geográficas e a série trigonométrica de Fourier incompleta, com os três primeiros harmônicos (Eq. 1):

$$To_{ip} = \beta_0 + \beta_1 Alt + \beta_2 Lat + \beta_3 Long + \sum_{n=1}^3 [a_n \cos(nwt_i) + b_n \sin(nwt_i)] \quad (1)$$

em que β_0 é o coeficiente linear e β_1 , β_2 e β_3 são os coeficientes angulares das variáveis espaciais; Alt é o valor da altitude do local (m); Lat e $Long$ são os valores positivos de latitude e longitude do local (graus decimais); a_n e b_n são os coeficientes dos termos da série

trigonométrica de Fourier incompleta; t_i é o dia do ano da observação i , que varia de 1 a 365 dias; n é o número de harmônicos da série trigonométrica de Fourier; e w é a frequência angular fundamental igual a $2\pi/360$.

Para ajustar o modelo proposto, utilizaram-se, como variável dependente, os valores de To_{ip} das séries históricas de 21 estações meteorológicas (Figura 1). As variáveis independentes utilizadas foram os valores de altitude, latitude e longitude de cada estação e a sequência dos dias do ano (t_i). Desta forma, o modelo ajustado se aplica somente ao Estado de Goiás, dentro dos limites de altitude de 284 m e 1.161 m, em função do menor e maior valor de altitude das estações meteorológicas estudadas.

Os valores de To_{ip} ($^{\circ}C$), juntamente com os valores de latitude, longitude e altitude e os valores dos componentes dos três primeiros harmônicos da série trigonométrica de Fourier - $\cos(wt)$, $\cos(2wt)$, $\cos(3wt)$, $\sin(wt)$, $\sin(2wt)$ e $\sin(3wt)$ -, formaram uma matriz com 7.665 linhas e 10 colunas, obtida com o programa MS ExcelTM para efetuar a determinação dos coeficientes do modelo pela análise de regressão linear múltipla. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação e a verificação da significância dos coeficientes pelo teste de t de Student a 5% de probabilidade de erro. A quantificação das diferenças entre os valores estimados pelo modelo e os observados, nas estações meteorológicas foi feita aplicando-se as estatísticas de média dos erros, variância dos erros, raiz do quadrado médio dos erros e média dos erros absolutos (MAE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: O modelo ajustado por meio de análise de regressão linear múltipla apresentado na Eq. 2, resultou em 10 coeficientes significativos ($C_0 = 39,862522$; $C_1 = -0,007314$; $C_2 = -0,185049$; $C_3 = -0,144706$; $a_1 = 1,448522$; $a_2 = -1,182537$; $a_3 = 0,223580$; $b_1 = -0,407352$; $b_2 = 0,119402$; $b_3 = 0,099942$), com valores de p -valor próximos de zero, o que indica que os componentes são todos necessários para representar a variação espaço-temporal da temperatura média diária do ar (Tm_i) no Estado de Goiás:

$$Tm_i = C_0 + C_1Alt + C_2Lat + C_3Long + a_1\cos(wt) + a_2\cos(2wt) + a_3\cos(3wt) + b_1\sin(wt) + b_2\sin(2wt) + b_3\sin(3wt) \quad (2)$$

Resultado semelhante foi encontrado por Ferreira et al. (2006) que desenvolveram equações para a estimativa da temperatura média mensal dos Estados de Minas Gerais e Pará, considerando apenas as variáveis espaciais.

O coeficiente C_1 , da componente altitude, indica que a Tm_i decresce $0,73^{\circ}C$ para cada cem metros de variação positiva em altitude. Este valor, apesar de ter sido derivado de uma regressão linear, é coerente, pois está entre os valores do gradiente adiabático seco e o úmido da troposfera, $0,98^{\circ}C$ e $0,40^{\circ}C$ de decréscimo, para cada cem metros de variação positiva em altitude, respectivamente e não difere muito do valor médio de $0,62^{\circ}C$, encontrados por Cargnelutti Filho et al. (2008), para temperatura média decendial no Rio Grande do Sul. No caso do coeficiente da latitude C_2 , o aumento de 1° de latitude, correspondeu à diminuição aproximada de $0,19^{\circ}C$ na temperatura do ar. Resultados semelhantes foram encontrados por Pezzopane et al. (2004), ao desenvolver modelos matemáticos para estimativa das médias mensais das temperaturas mínimas, médias e máximas do ar, no Espírito Santo. Em relação à longitude, observou-se o decréscimo da temperatura de $0,14^{\circ}C$ para cada aumento de 1° de longitude, comportamento este, também, observado por Lima & Ribeiro (1998), no Piauí.

O valor encontrado do coeficiente de determinação r^2 foi de 0,82, ou seja, 82% (Tabela 1). Assim, 18% da variabilidade de Tm_i pode ter ocorrido em razão de outros fatores que podem ser: deslocamento de massas de ar, nebulosidade, ventos e chuvas (Pereira et al., 2002). Este valor de r^2 está dentro da faixa de 0,75 a 0,86, encontrada por Oliveira Neto et al. (2002) ao ajustarem equações de regressão em função da Alt, Lat e Long, para estimar os valores médios mensais de temperatura média entre 16° e $24^{\circ}S$ e 48° e $60^{\circ}W$, no Brasil; e dentro da

faixa de 0,75 a 0,93, encontrada por Cargnelutti et al. (2008), ao ajustarem equações de regressão, com essas mesmas variáveis espaciais, para estimar os valores médios decendiais de temperatura média do Rio Grande do Sul. Ao analisar as diferenças entre os valores estimados de temperatura média diária do ar (Eq. 2) e os observados nas séries históricas, verificou-se que a magnitude do erro médio absoluto foi apenas de 0,71°C. Esse valor abrange 58,9% das 7665 diferenças observadas. Dessas diferenças 74,4% são menores do que 1,0°C e 90,7% são menores do que 1,5°C.

Tabela 1. Medidas estatísticas e de ajuste do modelo proposto na estimativa da temperatura média diária nas condições espaciais e climáticas do Estado de Goiás.

Descrição da medida estatística	Simbologia	Ajuste do modelo
Média dos erros (°C)	BEM	0,00
Variância dos erros	s^2	0,85
Raiz do quadrado médio dos erros (°C)	RMSE	0,92
Erro médio absoluto (°C)	MAE	0,71
Valores abaixo de MAE (%)	-	58,90
Valores abaixo de 1 °C (%)	-	74,59
Valores abaixo de 1,5 °C (%)	-	90,97
Média dos valores observados (°C)	To_{ipm}	24,82
Média dos valores estimados (°C)	Tm_{im}	24,83
Coefficiente de determinação	r^2	0,82
Coefficiente de correlação	r	0,91
Número de observações	N	7665

O grau de correlação entre os valores estimados e observados dá uma idéia da dispersão das estimativas em relação à regressão linear dos dados. Nessa comparação, quanto mais próximo de um for o coeficiente angular e mais próximo de zero for o coeficiente linear, menor é o desvio em relação à linha 1:1 e maior é a concordância entre os valores observados e os estimados pelo modelo. No presente trabalho, o coeficiente angular foi de 0,8215, o coeficiente linear de 4,4313 (Figura 2), a variância dos erros, foi de apenas 0,85 (Tabela 1), o que indica que a dispersão média dos dados foi menor do que 1°C. O ajuste do modelo aos dados espaciais e climáticos, dentro dos limites do Estado de Goiás, resultou em $r = 0,91$, o que reflete o alto grau correlação entre os dados observados e os estimados pelo modelo.

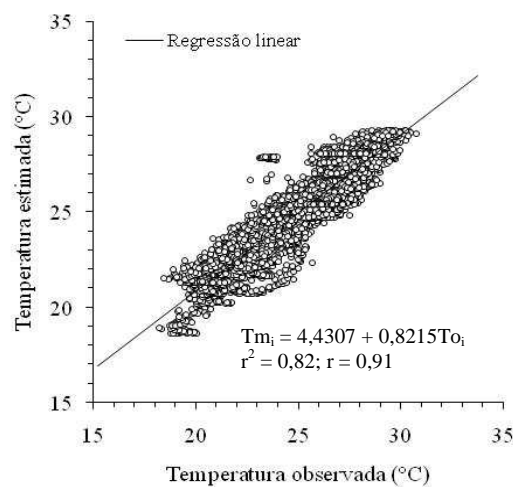


Figura 2. Diagrama de dispersão dos valores de temperatura média diária do ar, observados (To_{ip}) e estimados (Tm_i) pelo modelo proposto.

CONCLUSÃO: A combinação linear dos efeitos da altitude, latitude e longitude, com a série trigonométrica de Fourier, mostrou-se satisfatória para modelar a variação espacial e temporal da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENAVIDES, R.; MONTES, F.; RUBIO, A.; OSORO, K. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.146, p.173-188, 2007.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZANAUER, R.; STOLZ, A. P. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.6, p.893-901, 2006.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZANAUER, R. Coordenadas geográficas na estimativa das temperaturas máxima e médias decendiais do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cr/2008nahead/a05cr165.pdf>. Acesso em: 25 de julho de 2008.

CARVALHO, L. G. de; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R.; ALVES, H. M. R. Aplicação da análise harmônica por série de Fourier para a previsão de produtividade da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.732-741, 2005.

FERREIRA, W. P. M.; VALADARES, G. S.; HOTT, M. C. Estimativa da temperatura média mensal do ar para o Estado de Minas Gerais e do Pará, utilizando-se modelos originais de elevação. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG. v.14, n.4, p.293-303, 2006.

LIMA, M. G. de; RIBEIRO, V. Q. Equações de estimativa da temperatura do ar para o Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.221-227, 1998.

OLIVEIRA NETO, S. N. de; REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F.; LEITE, H. G.; COSTA, J. M. N. da. Estimativa de temperaturas mínima, média e máxima do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 60° longitude oeste. **Engenharia na Agricultura**, v.10, n.1, p.8-17, 2002.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEZZOPANE, J. E. M.; SANTOS, E. A.; ELEUTÉRIO, M. M.; REIS, E. F. dos; SANTOS, A. R. dos. Espacialização da temperatura do ar no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.12, n.1, p.151-158, 2004.

STAHL, K.; MOORE, R. D.; FLOYER, I. A.; ASPLIN, M. G.; MECKENDRY, I. G. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.139, p.224-236, 2006.