

**COKRIGAGEM NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CAMPINAS  
(SP)**

**COKRIGING IN ESTIMATION THE EVAPOTRANSPIRATION IN CAMPINAS (SP)**

**COKRIGING EN LA ESTIMATIVA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN  
CAMPINAS (SP)**

ALESSANDRA FAGIOLI DA SILVA<sup>1</sup>

CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK<sup>2</sup>

RONE BATISTA DE OLIVEIRA<sup>3</sup>

Recebido em agosto de 2010. Aprovado em setembro de 2010.

---

<sup>1</sup> Engenheira Agrônoma. Mestranda em Agronomia pela Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP/Botucatu.

<sup>2</sup> Professora Adjunta da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP/Botucatu. Graduada em Engenharia Agrônômica. Mestrado e Doutorado em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

<sup>3</sup> Graduado em Agronomia. Mestre em Produção Vegetal pelo Centro de Ciências Agrárias – UFES. Doutorando em Agronomia pela Faculdade de Ciências Agrônômica – UNESP/Botucatu.

# **COKRIGAGEM NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CAMPINAS (SP)**

## **RESUMO**

A quantificação da evapotranspiração é de grande importância para o manejo da irrigação das culturas agrícolas. Este trabalho teve por objetivo mapear a evapotranspiração por meio da cokrigagem, utilizando a umidade relativa do ar e a radiação solar como variável auxiliar na estimativa devido ao menor custo e maior facilidade de obtenção. Os dados climáticos foram coletados na Estação Agrometeorológica Automática de Campinas, pertencente a Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas (SP), referente ao ano de 2007. Os dados de evapotranspiração (mm), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (MJ) foram analisados, utilizando a técnica de geoestatística. A análise variográfica indicou que todas as variáveis climáticas apresentaram dependência temporal, satisfazendo os pressupostos para a interpolação por krigagem e cokrigagem. A cokrigagem mostrou-se um método eficiente para estimativa dos valores de evapotranspiração utilizando como covariável a umidade relativa do ar (coeficiente de correlação de -0,75) ou a radiação solar (coeficiente de correlação de 0,98), uma vez que essas variáveis apresentam elevada correlação com a evapotranspiração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cokrigagem. Interpolação. Variabilidade espacial.

## **COKRIGING IN ESTIMATION THE EVAPOTRANSPIRATION IN CAMPINAS (SP)**

### **ABSTRACT**

The quantification of evapotranspiration is great importance for the crops irrigation. This paper aims to map evapotranspiration cokriging through the relative humidity and solar radiation as a variable used to estimate due to lower cost and greater ease to obtaining. Climatic data were collected at the automatic weather station of Campinas, Embrapa Satellite Monitoring, Campinas (SP), in 2007. Data evapotranspiration (mm), relative humidity (%) and solar radiation (MJ) were analyzed using the technique of geostatistics. The variography analysis showed that all climatic variables time-dependent was applied to kriging and cokriging. The cokriging proved to be an efficient method for estimation of evapotranspiration using the covariate relative humidity (correlation coefficient -0.75) or solar radiation (correlation coefficient 0.98), since these variables have high correlation with evapotranspiration.

**KEYWORDS:** Cokriging. Interpolation. Spatial variability.

## **COKRIGING EN LA ESTIMATIVA DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN EN CAMPINAS (SP)**

### **RESUMEN**

La cuantificación de la evapotranspiración es de gran importancia para el manejo de la irrigación de las culturas agrícolas. Este trabajo tuvo por objetivo mapear la evapotranspiración por medio del cokriging, utilizando la humedad relativa el aire y la radiación solar como variable auxiliar en la estimativa debido al menor costo y mayor facilidad de obtención. Los datos climáticos fueron recolectados en la Estación Agrometeorológica Automática de Campinas, que pertenece a Embrapa Monitoreo por Satélite, Campinas-SP, referente al año de 2007. Los datos de evapotranspiración (mm), humedad relativa el aire (%) y radiación solar (MJ) fueron analizados, utilizando la técnica de geoestadística. El análisis variograma indicó que todas las variables climáticas presentaron dependencia temporal, satisfaciendo los presupuestos para la interpolación por kriging y cokriging. El cokriging, se mostró un método eficiente para estimativa de los valores de evapotranspiración utilizando como covariable la humedad relativa del aire (coeficiente de correlación de -0,75) o la radiación solar (coeficiente de correlación de 0,98), una vez que esas variables presentan elevada correlación con la evapotranspiración.

**PALABRAS-CLAVE:** Cokriging. Interpolación. Variabilidad espacial.

## 1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um processo importante do ciclo hidrológico no ecossistema terrestre, afetando o regime de vazão do rio, a recarga da água subterrânea e as condições de água do solo disponíveis para as plantas. A quantificação da evapotranspiração é indispensável para o manejo hídrico sustentável de cultivos irrigados.

Uma grande quantidade de fórmulas é utilizada para se determinar a evapotranspiração, porém apenas poucas delas possuem a praticidade necessária para o uso em situações comuns do dia a dia, por necessitarem de informações disponíveis apenas com uso de aparelhos caros e sofisticados. Por outro lado, as equações mais simples não possuem a confiabilidade e a precisão das anteriores (BISCARO, 2007).

As medidas da evapotranspiração em campo são complexas e de difícil determinação. Essa complexidade baseia-se nas incertezas da representatividade das medidas, nas dificuldades operacionais e também na variabilidade espacial da superfície (PEREIRA et al., 1997).

Estudos sobre evapotranspiração têm-se desenvolvido muito rapidamente nos últimos anos em função do avanço da eletrônica, empregada nos equipamentos de coleta de dados, e da inclusão da *Tékhnē e Lógos*, Botucatu, SP, v.2, n.1, out. 2010.

informática como ferramenta útil nesse campo de aplicação. Entretanto, Carvalho et al. (2002a) comentaram que, embora haja essa facilidade, a aquisição de instrumentação elaborada é ainda onerosa e envolve metodologia geralmente sofisticada e laboriosa.

A geoestatística procura prever valores em pontos não amostrados, tanto para a confecção de mapas por meio da krigagem, como na modelagem de determinada variável. Assim, a análise geoestatística pode estar ligada à obtenção de um modelo de dependência temporal (SILVA JUNIOR et al., 1987).

Inúmeros métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, estão disponíveis na literatura, dentre eles os métodos geoestatísticos de interpolação (GOOVAERTS, 1999; CARVALHO et al., 2002b).

A krigagem é o método de interpolação da geoestatística, o qual usa a dependência espacial expressa no variograma entre amostras vizinhas para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Estas duas características fazem da krigagem um interpolador ótimo (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Em situações em que exista correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas

no variograma cruzado, denominado de método da cokrigagem (VIEIRA, 2000).

A cokrigagem é um procedimento geoestatístico em que diversas variáveis regionalizadas podem ser estimadas em conjunto, com base na correlação temporal entre elas. O fundamental na utilização da cokrigagem é a verificação prévia da correlação temporal existente entre as variáveis, a qual deve ser alta para que as estimativas sejam consistentes. Também, deve ser notado que, a melhoria de interpretação somente é significativa quando uma das variáveis tem um número extremamente reduzido de casos em relação à outra (LANDIM, 2003).

A técnica também possibilita a redução de custos, uma vez que permite fazer inferências sobre uma variável com base nos valores de outra variável quando essas forem correlacionadas (SILVA et al., 2009).

Este trabalho teve por objetivo mapear a evapotranspiração através da cokrigagem, utilizando a umidade relativa do ar e a radiação solar como variável auxiliar na estimativa a fim de reduzir o número de amostras, os custos e a complexidade de obtenção da evapotranspiração.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados climáticos diários foram coletados na Estação Agrometeorológica Automática de Campinas, pertencente a Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas (SP), referente ao ano de 2007. A estação está situada na latitude de 22° 56' 15" S, e na longitude de 47° 03' 45" W, com 685 m de altitude. O clima de Campinas, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa, com uma estação quente e chuvosa de outubro a março, de temperatura média entre 22 e 24°C e precipitação de 1.057 mm e uma estação seca de abril a setembro, de temperatura média entre 18 e 22°C e precipitação de 325 mm (ORTOLANI et al. 1995). Os dados diários de evapotranspiração (mm), umidade relativa do ar (%) e radiação solar (MJ) foram analisados, utilizando a técnica de geoestatística por meio da krigagem ordinária e cokrigagem.

A geoestatística foi utilizada para verificar e quantificar o grau de dependência temporal, a partir do ajuste de funções teóricas aos modelos de variogramas experimentais, conforme equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

onde:  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$ , separados por um vetor  $h$ .

No ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais foram determinados os coeficientes efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0 + C$ ), variância estrutural ( $C$ ) e alcance ( $a$ ). Segundo Isaaks e Srivastava (1989), à medida que  $h$  aumenta a variância  $\gamma(h)$  também aumenta até um valor máximo no qual ele se estabiliza correspondente à distância “ $a$ ”. Este valor no qual  $\gamma(h)$  se estabiliza chama-se patamar ( $C_0+C$ ). A distância na qual  $\gamma(h)$  atinge o patamar é chamada de alcance ( $a$ ), e é a distância limite de dependência espacial. O efeito pepita ( $C_0$ ) é a distância entre o eixo  $x$  e onde começa o modelo teórico, e a variância estrutural ( $C$ ) é a diferença do patamar ( $C_0+C$ ) e o efeito pepita ( $C_0$ ).

Para verificar a dependência temporal foi utilizado um índice de dependência temporal (IDT) adaptado da metodologia proposta por Zimback (2001).

$$IDT = \frac{C}{C + C_0} \times 100 \quad (2)$$

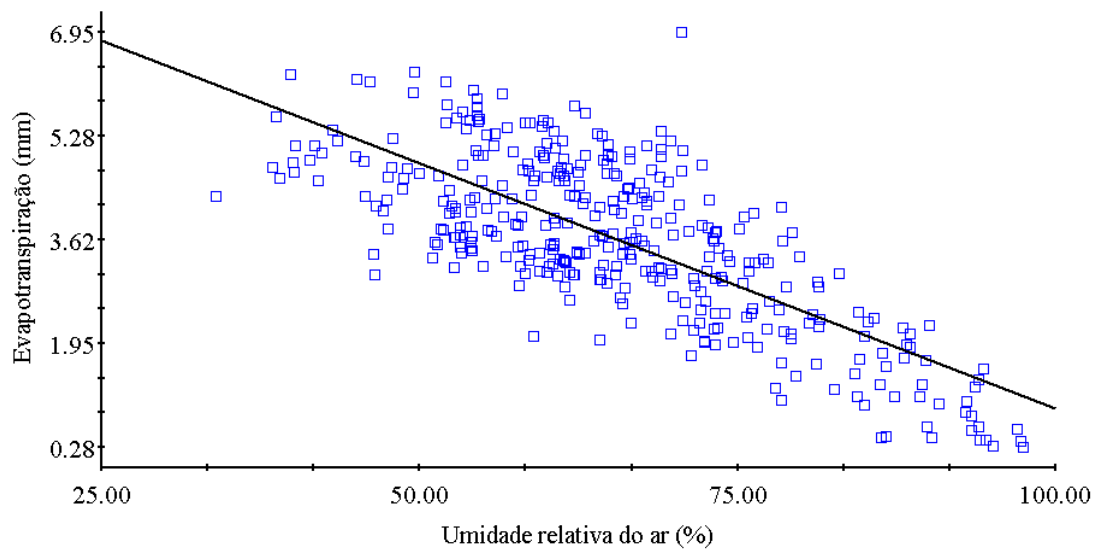
Para estimar valores dos dados climáticos em tempo não amostrados e confeccionar os mapas de isolinhas, utilizou-se a krigagem ordinária. Esse

interpolador geoestatístico utiliza-se de um estimador linear não-viciado com mínima variância e leva em consideração a estrutura de variabilidade temporal encontrada para o dado climático. Para a obtenção da evapotranspiração em função da umidade relativa do ar e da radiação solar, utilizou-se a extensão multivariada da krigagem, conhecida como cokrigagem.

A análise geoestatística, bem como as interpolações, foi realizada no software GS+ 9.0 (ROBERTSON, 2008).

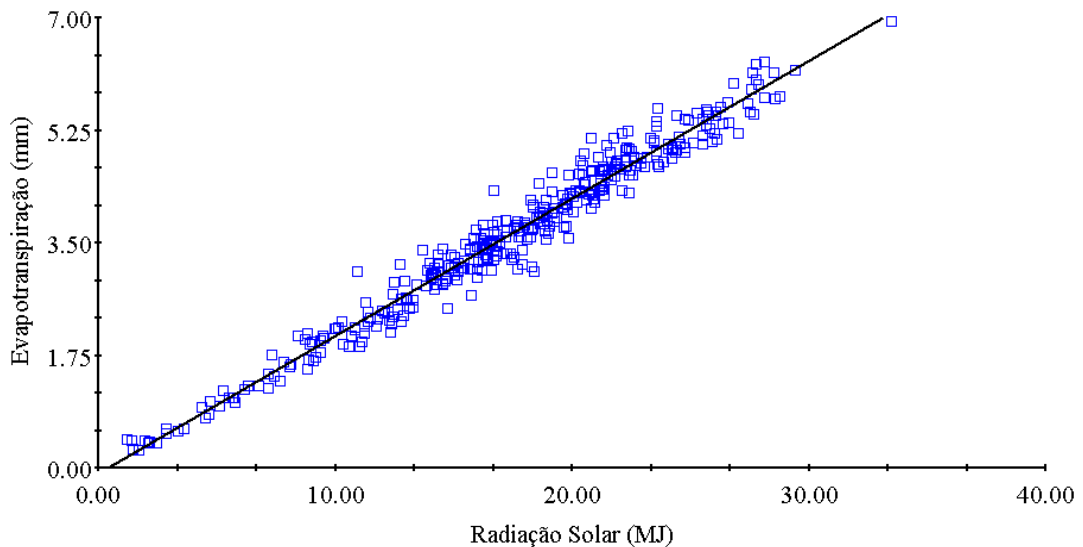
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados climáticos (Figura 1 e 2) apresentaram correlação negativa entre a evapotranspiração e umidade relativa do ar ( $r^2 = -0,75$ ), e correlação positiva entre a evapotranspiração e radiação solar ( $r^2 = 0,98$ ). Todas as correlações foram significativas a 5% de probabilidade pelo teste  $t$ . Tal resultado garante a utilização da cokrigagem na estimativa de valores não amostrados para a evapotranspiração, tendo a umidade relativa do ar ou a radiação solar como covariável nessa estimativa.



Correlação de -0.75

Figura 1 – Correlação da evapotranspiração com umidade relativa do ar.



Correlação de 0.98

Figura 2 – Correlação da evapotranspiração com a radiação solar.

A correlação entre as variáveis é um dos pontos necessários para a realização da cokriganagem (VIEIRA, 2000). A outra exigência é que exista dependência

temporal para as variáveis. Observa-se (Tabela 1) que todas as variáveis apresentaram forte dependência temporal (IDT>75%), conforme Zimback (2001).



Tabela 1 – Modelos e parâmetros dos variogramas das variáveis climáticas de Campinas (SP).

Variáveis	Modelo	Ao	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C	r <sup>2</sup>	IDT	C <sub>r</sub>
Evapotranspiração	Exponencial	3,09	0,18	1,80	91,00	89,00	0,97
Umidade relativa	Exponencial	4,17	18,90	167,30	95,00	88,00	0,88
Radiação Solar	Exponencial	3,06	4,50	38,55	91,00	88,00	0,96
Evapotranspiração x UR	Esférico	2,26	-1,59	-12,75	78,00	88,00	0,83
Evapotranspiração x R Solar	Exponencial	3,09	0,91	8,20	91,00	89,00	0,83

Ao: alcance da dependência temporal; C<sub>0</sub>: efeito pepita; C<sub>0</sub>+C: patamar; IDT: índice de dependência temporal e r<sup>2</sup>: coeficiente de determinação múltipla do ajuste. C<sub>r</sub>: coeficiente de correlação da validação cruzada.

A umidade relativa do ar apresentou o maior valor de alcance (4 dias) e o menor alcance foi encontrado para a relação evapotranspiração x umidade relativa do ar (2 dias). A evapotranspiração, a radiação solar e a relação evapotranspiração x radiação solar apresentaram valores de alcance próximos, possivelmente devido à elevada correlação ( $r^2 = 0,98$ ) existente entre estas variáveis climáticas.

Para os modelos teóricos são encontradas, basicamente, quatro funções teóricas que se ajustam aos modelos de variograma: a) linear; b) esférico; c) exponencial; d) gaussiano (STURARO, 1988; VIEIRA et al., 1983).

As variáveis climáticas ajustaram-se ao modelo exponencial, exceto a relação evapotranspiração x umidade relativa do ar que se ajustou ao modelo esférico (Figura 3).

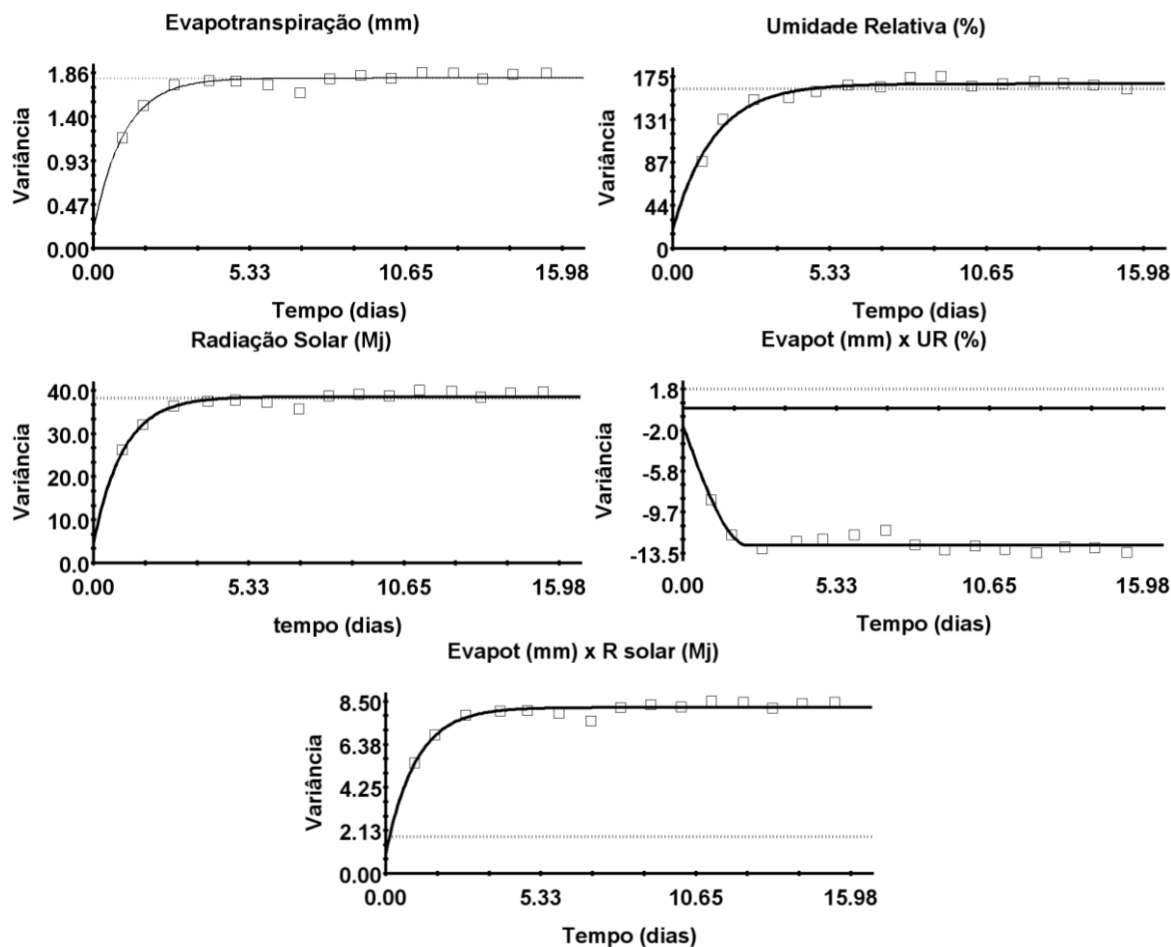


Figura 3 – Variogramas das variáveis climáticas diárias de Campinas (SP).

O valor de variância positivo observado para o variograma cruzado entre a evapotranspiração e a radiação solar enfatiza que a relação entre essas variáveis é diretamente proporcional, conforme a Figura 2, ou seja, com o aumento dos valores da radiação solar, a evapotranspiração também se eleva e, com

isso, há redução de água no solo e nas plantas.

De posse dos modelos e parâmetros ajustados para os variogramas, os dados foram submetidos à interpolação pelo método da krigagem ordinária (Figura 4, 5 e 6) e pela cokrigagem (Figura 7 e 8), a fim de mapear a sua distribuição temporal.

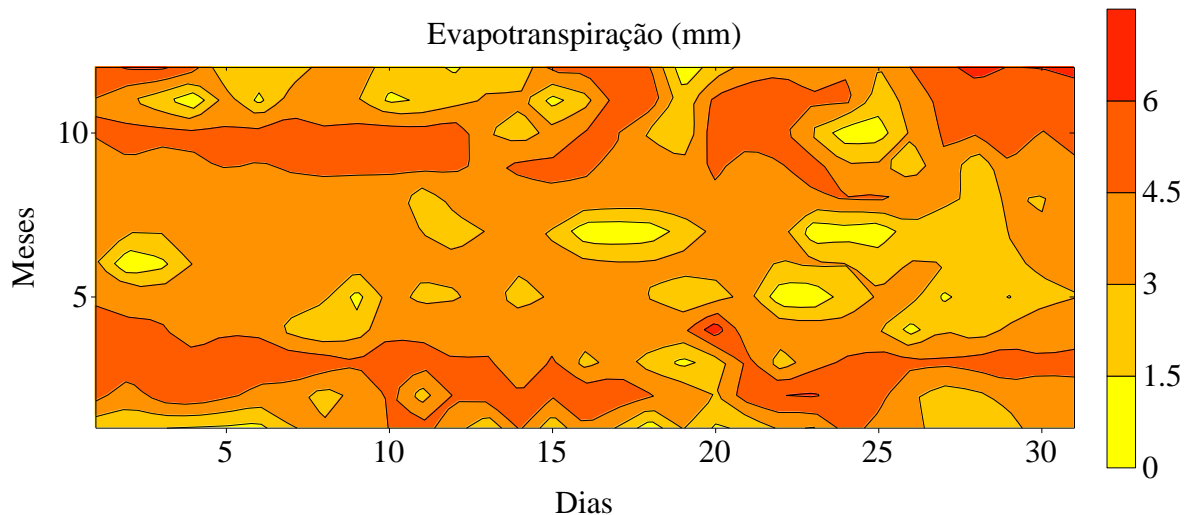


Figura 4 – Mapa de krigagem da evapotranspiração (mm) de Campinas (SP).

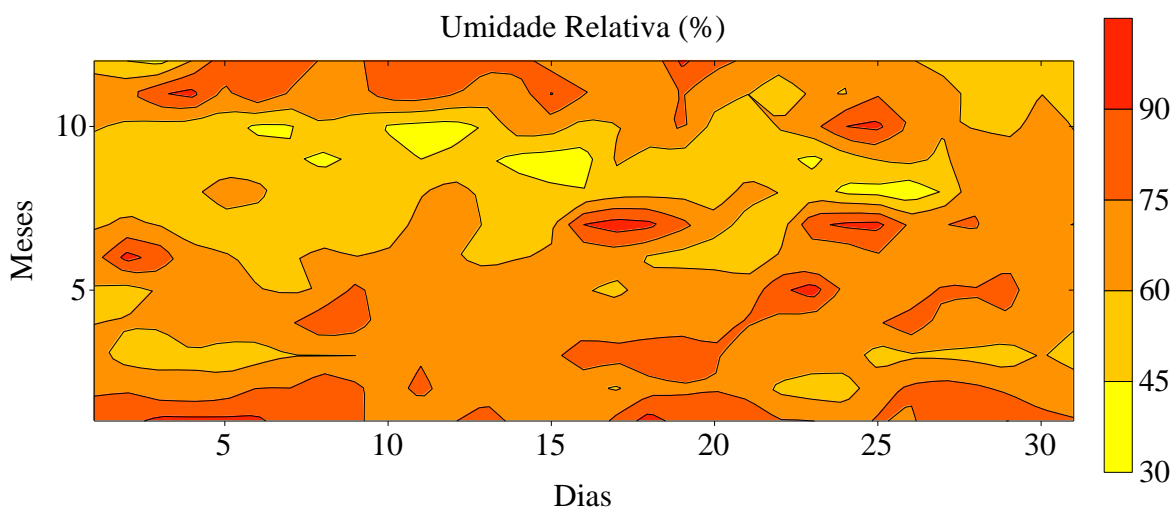


Figura 5 – Mapa de krigagem da umidade relativa do ar (%) de Campinas (SP).

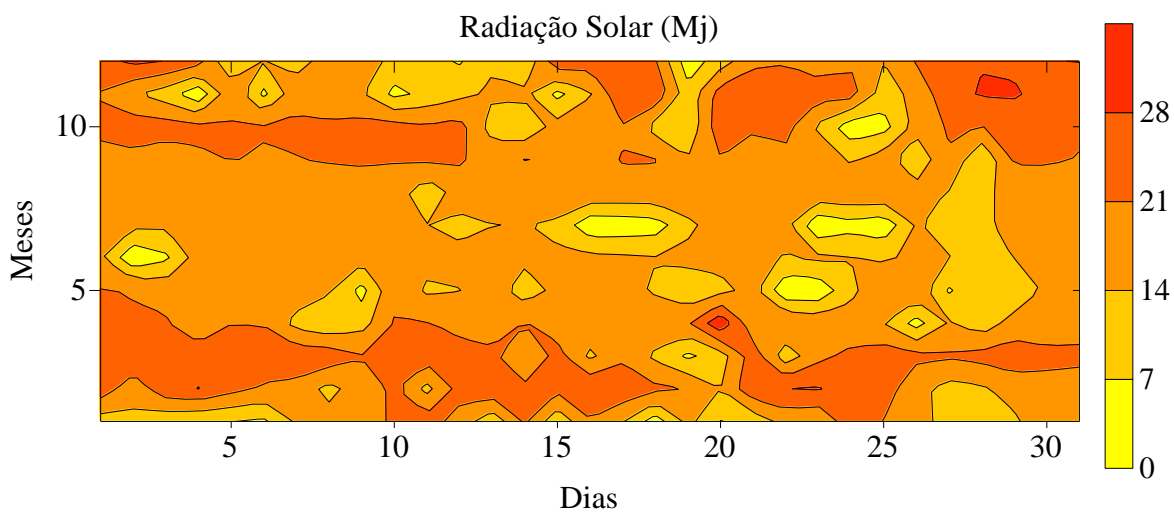


Figura 6 – Mapa de krigagem da radiação solar (MJ) de Campinas (SP).

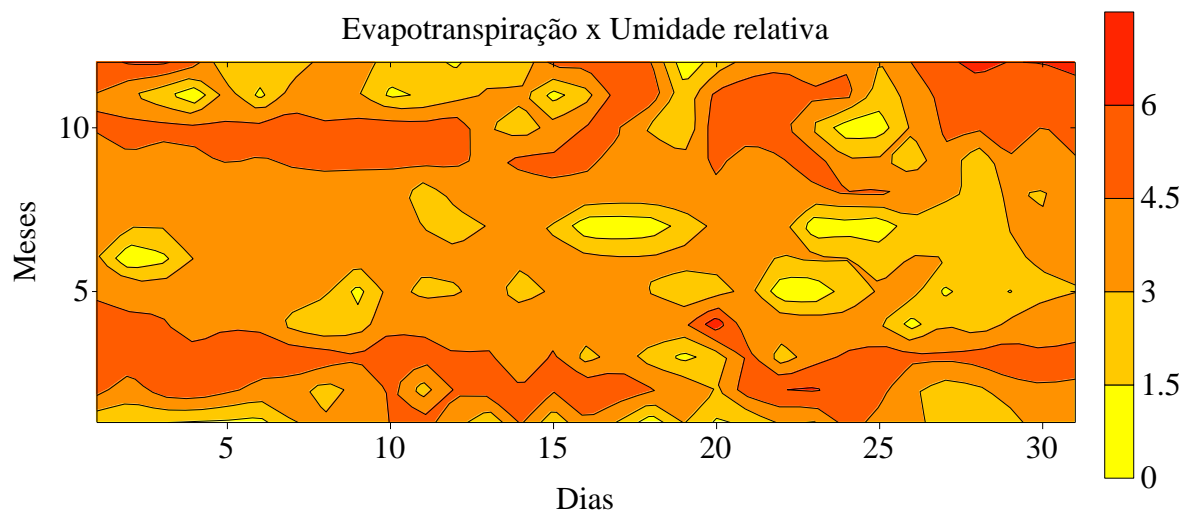


Figura 7 – Mapa de cokrigagem da evapotranspiração x umidade relativa do ar de Campinas (SP).

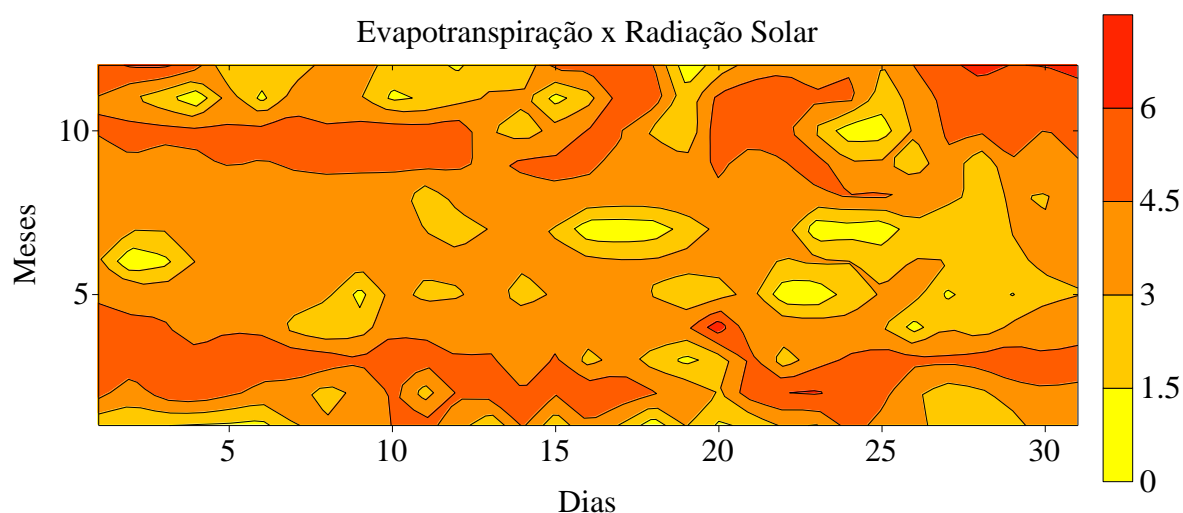


Figura 8 – Mapa de cokrigagem da evapotranspiração x radiação solar (MJ) de Campinas (SP).

Comparando-se o mapa da evapotranspiração individualmente e os mapas resultantes da cokrigagem, a respeito da sua distribuição em função dos níveis de umidade relativa e de radiação solar, observa-se que estes são coerentes, ou seja, a cokrigagem representou com boa exatidão as variações dessa variável, evidenciando a

concentração de maiores valores na estação de verão como também se observa no mapa interpolado por krigagem ordinária.

São raros, na literatura, trabalhos com radiação solar, umidade relativa do ar e evapotranspiração utilizando geoestatística. Porém, Silva et al. (2009), trabalhando com atributos químicos do solo sob cultivo de

café, verificaram que a cokrigagem mostrou-se um método eficiente para estimativa dos valores de cálcio utilizando como covariável o pH do solo. Pringle et al. (2004) compararam krigagem ordinária, krigagem regressão e cokrigagem para a previsão de rendimento de resposta a uma série de variáveis de tratamento, descobrindo que o melhor preditor global foi a cokrigagem, utilizando os dados de rendimento do ano anterior como covariável.

#### 4 CONCLUSÃO

Como as variáveis umidade relativa do ar e radiação solar apresentam elevada correlação com a evapotranspiração, a cokrigagem mostrou-se um método eficiente para estimativa dos valores de evapotranspiração utilizando estas variáveis como covariável.

#### 5 REFERÊNCIAS

- BISCARO, G.A. **Meteorologia agrícola básica**. Cassilândia: UNIGRAF, 2007. 86p.
- BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **The journal of soil science**, Oxford, v.31, p.315-331, 1980.
- CARVALHO, D.F.; FERNANDES, J.M.; CRUZ, E.S.; SILVA, W.A.; OLIVEIRA, L.F.C. Comparação entre diferentes metodologias de estimativa da evapotranspiração de referência e sua influência da demanda máxima suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) no Estado do Rio de Janeiro. **Revista agronomia**, Seropédica, v.36, n.1/2, p.48-55, 2002a.
- CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P.M. da; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-9, ago. 2002b.
- GOOVAERTS, P. Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOCOMPUTATION, 4th, 1999, Fredericksburg. **GeoComputations conference proceedings...** [Fredericksburg]: Mary Washington College, 1999.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. Ver e ampl. São Paulo: Editora UNESP, 2003.
- ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P.; PEDRO JUNIOR, M.J. 1995. **Normais climatológicas dos postos meteorológicos do Instituto Agrônomo**: 1. Centro Experimental de Campinas. Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDYIAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PRINGLE, M.J.; MCBRATNEY, A.B.; COOK, S.E. Field-scale experiments for site-specific crop management: Part II. A geostatistical analysis. **Precision agriculture** v. 5, p.625-645, 2004.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: Geoestatistics for the environmental sciences – GS+ user's guide. Plainwell, Gamma Design Software, 2008. 152 p.

SILVA JÚNIOR, M. C.; BARROS, N. F.; CÂNDIDO, J. F. Relações entre parâmetros do solo e da vegetação de cerrado na Estação Florestal de Experimentação e Paraopeba – MG. **Revista brasileira de botânica**, São Paulo, v. 10, p.125-137, 1987.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R. B. de; SOUZA, G. S. de. Cokrigagem aplicada ao mapeamento de atributos químicos do solo em Reduto – MG. In: **Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias**, Botucatu – SP, maio de 2009.

STURARO, J.R. **Estudo do comportamento espacial de variáveis geológicas e hidrogeológicas da área urbana de Ribeirão Preto - SP**, 1988.

124p. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo, 2000. p.1-54.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 p. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP, Botucatu, 2001.