ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Estimativa pluviométrica através das técnicas da krigagem e cokrigagem no Estado de Sergipe

Wellington Jorge Cavalcanti Lundgren¹, Inajá Francisco da Silva², Giovanna Alencar Lundgren³

¹ Doutor em Ciências Florestais, Professor da UFRPE. wellingtonlundgren@yahoo.com.br (autor correspondente). ² Doutor em Recursos Naturais, Professor da UFSE. inajafrancisco@gmail.com. ³ Mestranda em Horticultura, UNESP. giolundgren@gmail.com.

Artigo recebido em 24/11/2016 e aceito em 13/04/2017

RESUMO

A previsão da intensidade de chuva em determinado local não amostrado é de grande interesse para a meteorologia e hidrologia. Esta pesquisa teve como objetivo a construção de mapas mensais de chuvas para todo o Estado de Sergipe. Para isso foram utilizados dados de 64 estações meteorológicas distribuídas irregularmente por todo o estado. Para a construção dos mapas foram utilizadas duas técnicas de interpolação denominadas de krigagem e cokrigagem. Para a cokrigagem a variável secundária utilizada foi a altitude, sendo utilizadas 162 altitudes obtidas com distribuição geográfica irregular para todo o Estado. A cokrigagem apresentou resultados mais consistentes do que a krigagem, a comparação entre as duas técnicas foi realizada pela validação cruzada, em que a reta de regressão entre os valores estimados e observados, forneceu a inclinação angular, o intercepto e o R². Como parâmetros de erros ainda foram utilizados a média dos erros, o desvio padrão dos erros, a soma dos erros individuais e o erro padrão da estimativa. Para todos os meses do ano a cokrigagem apresentou a maioria dos erros com melhores resultados do que a krigagem, os únicos erros que a krigagem apresentou resultados superiores a cokrigagem foi a média dos erros e/ou o intercepto.

Palavras-chave: chuvas, nordeste, geoestatística, isolinhas, secas.

Rainfall estimate by kriging and cokriging in the State of Sergipe

ABSTRACT

This paper, rain maps for the State of Sergipe were constructed, a map for each month of the year. For this, data from 64 meteorological stations distributed irregularly throughout the state were used. Two interpolation techniques were used, kriging and cokriging. For cokriging the secondary variable used was altitude, 162 altitudes obtained with irregular geographical distribution throughout the state. Cokriging presented more consistent results than kriging, the comparison between the two techniques was performed by cross-validation, in which the regression line between the estimated and obtained values provided its angular slope, the intercept and R², were still used. The mean of the errors, the standard deviation of the errors, the sum of the individual errors and the standard error of the estimate. For all months of the year, cokriging presented the majority of the errors with better results than the kriging, the only errors that the kriging presented superior results to the cokriging was the average of the errors and / or the intercept.

Keywords: Rainfall, Northeast, Geostatistics, Isolines, Droughts.

Introdução

A previsão de chuvas ainda não é um problema resolvido principalmente no Nordeste do Brasil (NEB), tendo em vista o grande número de sistemas meteorológicos atuantes nessa região, tornando um desafio para a comunidade técnica científica. Outra questão importante a considerar é a má distribuição temporal e espacial das chuvas no NEB, o que dificulta sua previsão com alto grau de precisão. O volume de precipitação, o local e o momento em que ocorrerá a chuva são variáveis de extrema imprevisibilidade quando

necessitamos da informação para períodos curtos, como por exemplo: quanto choverá no dia 08 de dezembro de 2021 na cidade de Mirandiba no sertão do estado de Pernambuco?

Porém, para períodos longos de tempo, geralmente na quadra chuvosa, mensal ou anual, as previsões realizadas são aceitáveis dentro de uma margem de erro estatístico.

Os mapas de chuvas têm a vantagem de fornecer informação detalhada geograficamente,

para um período de tempo pré-determinado e a quantidade de chuva prevista (local, tempo, mm).

O problema com os mapas de chuvas é que eles realizam previsão de locais não amostrados baseados nas amostras existentes, e que geralmente não são em grande número. Mello et al., (2003) compararam dois tipos de estimação (krigagem e inverso do quadrado) para o estado de São Paulo usando 140 estações meteorológicas. Um mapa de chuvas foi construído por Dereczynski; et al. (2009) para a cidade do Rio de Janeiro – RJ utilizando 20 estações meteorológicas, os autores afirmam que o número de estações meteorológicas era insuficiente.

A krigagem e a cokrigagem são técnicas geoestatísticas já bastante conhecidas, a krigagem utiliza o atributo de interesse e os locais em que ele foi medido, para realizar estimativas do próprio atributo em um local não medido. A cokrigagem, além de utilizar a mesma informação da krigagem, associa a estimativa do atributo primário de interesse, medições de outro atributo secundário, correlacionado com o primário.

No atual trabalho, os mapas de chuvas mensais para o Estado de Sergipe foram construídos utilizando a krigagem e a cokrigagem. Para a cokrigagem foram utilizadas como variáveis secundárias as altitudes locais de vários pontos distribuídos irregularmente pelo Estado.

As previsões realizadas para cada um dos métodos foram comparadas entre si.

Material e métodos

Na atual pesquisa foram utilizadas 63 estações meteorológicas distribuídas irregularmente pelo estado de Sergipe.

O estado de Sergipe, que está indicado na Figura 1, possui, segundo a SEMARH-SE - Secretaria de Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos uma área de 21.910 km² e está localizado na faixa tropical entre as coordenadas geográficas: 9°31'S e 11°33'S e 36°25'W e 38°25'W, podendo ser dividido em três grandes regiões: Zona da mata, onde historicamente chove mais, com média anual aproximada de 1350 mm. Agreste, região intermediária com média anual de 1000 mm e o Sertão, que abrange uma pequena área do estado onde as chuvas concentram-se em quatro meses do ano com média de 750 mm anuais.

Foram calculadas as seguintes estatísticas das chuvas e das altitudes de cada um dos postos pluviométricos: Média; Mediana; Máximo; Mínimo; Desvio padrão; Coeficiente de variação; Curtose; Assimetria; Primeiro quartil; Terceiro quartil; Correlação entre as altitudes; Chuvas mensais e o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

Figura 1. Mapa do Brasil e a localização do estado de Sergipe.

Análise exploratória dos dados

Teste de normalidade

Para aplicação da krigagem ou cokrigagem, segundo Yamamoto e Landim (2013), é desejável, porém não necessário, que os dados apresentem normalidade, ou pelo menos não apresentem forte assimetria positiva.

Caso a assimetria positiva ocorra é recomendável à realização de uma transformação de dados que corrija essa característica. Foram tentadas as transformações logarítmicas e raiz quadrada.

Quando a transformação não conseguiu normalizar os dados, a krigagem e cokrigagem foram realizadas com os dados naturais.

Análise de tendência

Não é desejável que a tendência esteja presente quando se efetua a krigagem ou a cokrigagem. A existência de tendência foi verificada usando a metodologia descrita por Deutsch e Journel (1992). Para a detecção dois gráficos de dispersão são construídos, o primeiro com os valores do eixo da abscissa x atributo, e o outro com os valores da ordenada x atributo.

Se a equação de regressão ajustada apresentar $R^2 \geq 0,7$, é considerada a existência de tendência. A tendência será retirada, construindo-se o semivariograma com a diferença entre o valor

observado do atributo e a estimativa da equação de regressão ajustada aos dados. (Landim et al. 2002).

Todas as altitudes foram encontradas no Google Earth. O software para a construção do mapa por krigagem foi o ArcMap 10.1, a construção dos mapas de cokrigagem foram realizadas pelo software GS+ 9.0, as estatísticas básicas foram efetuadas pelo Minitab 16

A Figura 02 apresenta a foto aérea do Estado de Sergipe com a localização dos postos meteorológicos e com a localização onde foram medidas as altitudes.

Figura 2. Localização dos postos pluviométricos (A) e localização dos pontos amostrais das altitudes.

Krigagem

Segundo Landim, (2006) no estudo das variáveis regionalizadas o variograma é a ferramenta fundamental. A construção do variograma amostral é realizada pela equação:

$$Y(h) = \frac{1}{2.N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_{xi} - Z_{xi+h})^2 \quad (1)$$

Em que:

$Y(h)$ = semivariância amostral,

$N(h)$ = número de pares de pontos separados pela distância h ,

Z_{xi} = valor do atributo no ponto x_i

Z_{xi+h} = valor do atributo no ponto distante h do atributo x_i

x_i = local no plano onde foi medido o atributo.

Encontrado as semivariâncias amostrais para um número adequado de pontos, pode-se então construir o variograma, que relaciona a distância entre dois pontos com a semivariância amostral. Esse variograma é chamado de teórico, ele apresenta geralmente três parâmetros que devem ser estimados. Os parâmetros são:

O Efeito pepita (C_0) indica micro variações não detectadas pela medição ou então erros nos equipamentos de medição. Quando a distância h é zero, a semivariância amostral também deveria ser zero. (CAMARGO, 1998).

O patamar (P) é a semivariância máxima onde a dependência espacial deixou de influenciar no atributo.

O alcance (A) é a maior distância onde ainda se encontra influência da dependência espacial.

Construído o gráfico, um modelo pode ser ajustado aos dados amostrais, o modelo fornece então a semivariância teórica.

Vários modelos são apresentados por Sturaro, (2015), onde ele apresenta as características e particularidades de cada um deles.

Os modelos mais comuns encontrados na literatura são o exponencial, o gaussiano, o potencial o linear, e o esférico.

A escolha do melhor modelo foi efetuada pelo software GS+ que leva em conta quatro parâmetros, a menor soma dos quadrados dos resíduos, o maior R^2 , e o maior índice de dependência espacial. Porém o ajuste a sentimento foi realizado quando se achou necessário.

O índice de dependência espacial fornece uma noção de quanto os dados são mais ou menos correlacionados espacialmente.

$$DE = 1 - \frac{C_0}{P} \quad (2)$$

Em que:

DE = dependência espacial

C_0 = efeito pepita

P = Patamar

Quanto mais próximo da unidade maior será a dependência espacial.

Escolhido o modelo teórico, foi então realizada a krigagem seguindo a seguinte equação:

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} \quad (3)$$

Com a exigência de que

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

Em que:

$Z_{x_0}^*$ = valor estimado do atributo no local x_0 não amostrado,

n = número de pontos utilizados na estimação do atributo no ponto x_0 ,

Z_{x_i} = valor do atributo no ponto x_i ,

λ = peso do atributo

Cokrigagem

A cokrigagem utiliza informações da variável primária, no caso, a precipitação, e da variável secundária, que deve ser de fácil medição e correlacionada com a primária, no caso, a altitude.

O variograma construído para a precipitação será novamente utilizado na cokrigagem. Foram também construídos os variogramas para a altitude. Quartezi et al., (2011) apresentam todos os passos para se efetuar a cokrigagem, começando com o variograma cruzado que utiliza a equação:

$$Y^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z_{1(x_i)} - Z_{1(x_i+h)})(Z_{2(x_i)} - Z_{2(x_i+h)})] \quad (5)$$

Em que:

$Y^*(h)$ = semivariância cruzada amostral,

$N(h)$ = número de pares de pontos separados pela distância h,

$Z_{1(x_i)}$ = valor da variável primária no ponto x_i ,

$Z_{1(x_i+h)}$ = valor da variável primária no ponto x_{i+h} distante h do ponto x_1 ,

$Z_{2(x_i)}$ = valor da variável secundária no ponto x_i ,

$Z_{2(x_i+h)}$ = valor da variável secundária no ponto x_{i+h} distante h do ponto x_1 .

Escolhidos os modelos a cokrigagem pode então ser realizada, usando a seguinte equação:

$$Z_{(x_0)}^* = \sum_{i=1}^{n_1} \lambda_i Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^{n_2} \lambda_j Z_2(x_j) \quad (6)$$

Em que

$Z_{(x_0)}^*$ = valor estimado da variável primária estimada em um ponto não amostrado,

λ_i, λ_j = são os pesos respectivos para as variáveis primárias e secundárias,

Z_1, Z_2 = são os valores da variável primária e secundária respectivamente,

x_0, x_i = são os locais no plano cartesiano.

Após a construção dos mapas, os resultados conseguidos com a krigagem e com a cokrigagem foram comparados utilizando-se a validação cruzada pré-existente no software GS+, a validação cruzada consiste em se retirar um ponto amostrado e realizar todos os cálculos como se ele não existisse, depois se comparar o valor conhecido do ponto retirado com o valor estimado. Esse procedimento gera um gráfico de dispersão de Estimados x Observados.

Foram também utilizados alguns dos erros apresentados por Gallas, (2010) que são os seguintes:

a = coeficiente angular da reta de regressão linear simples construída para o gráfico de dispersão estimados x observados. Quanto mais próximo de 1 mais preciso as estimativas.

b = intercepto da reta de regressão. Quanto mais próximo de zero melhor a estimativa

R^2 = coeficiente de determinação da reta de regressão. Quanto mais próximo de 1 melhor a estimativa.

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{n}} \quad (7)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})}{n} \quad (8)$$

$$SEIQ = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(Y_{obs} - Y_{est})^2}}{Y_{obs}} \quad (9)$$

$$DPE = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(Y_{obs} - ME)^2}}{n} \quad (10)$$

Em que:

EPE = erro padrão da estimativa

ME = média dos erros

SEI = soma dos erros individuais

Y_{obs} e Y_{est} = valores observados e estimados respectivamente.

Resultados e discussão

As estatísticas básicas foram calculadas e estão apresentadas na Tabela 01.

Apenas a altitude e os meses de fevereiro e abril não tiveram distribuição considerada normal, porém as médias e as medianas foram relativamente próximas.

As assimetrias destes dois meses foram próximas a zero, apesar de positivas. A assimetria da altitude foi negativa. Não foram, portanto, executadas transformações de dados em nenhum dos atributos.

As maiores médias de chuvas ocorreram nos meses de maio, junho e julho, historicamente os meses de maior intensidade pluviométrica no Nordeste brasileiro.

Os meses de setembro a fevereiro tiveram mínimas extremamente baixas, inferiores a 18 mm, segundo Troleis e Santos, (2011), a média para esses seis meses é aproximadamente igual ao dos grandes desertos secos do Saara e Atacama.

O atributo altitude que será utilizado como variável secundária na cokrigagem, apresentou moderada correlação com os meses de março a novembro, correlação fraca com janeiro e

fevereiro e correlação quase nula com o mês de dezembro.

A correlação entre altitude e precipitação em Sergipe, apresentou comportamento contrário ao registrado por Roldão et al. (2012) que em pesquisa em Minas Gerais registrou correlação positiva entre altitude e precipitação.

Esse resultado em Sergipe talvez se deva mais ao distanciamento dos postos pluviométricos do mar, do que a própria altitude. Já que no Nordeste brasileiro, quanto mais distante do mar a tendência é que ocorram menos chuvas.

A análise de tendência só detectou a característica na altitude e nos meses de fevereiro e março, em todas as outras variáveis foi utilizado o modelo isotrópico.

Os variogramas foram construídos e os seus parâmetros estão apresentados na Tabela 02.

É preciso ressaltar que, as coordenadas geográficas utilizadas foram em UTM, que utiliza como medida de distância, metros, portanto, todos os alcances descritos na Tabela 02 estão em metros.

As chuvas do mês de janeiro, tiveram moderada dependência espacial (62%), o alcance foi de aproximadamente 300 km, ou seja, a dependência espacial é moderada para distâncias menores que 300 km.

Para a altitude a dependência espacial é forte, o pequeno valor do efeito pepita, mostrou a força da dependência espacial, que em Sergipe é forte até distâncias de aproximadamente 416 km.

Fenille e Cardim, (2007) verificaram que a dependência espacial da altitude em São Paulo também era muito forte, porém eles utilizaram coordenadas geográfica em graus, não informando assim, a distância em unidades de medidas.

A dependência espacial cruzada das chuvas de janeiro e a altitude, foi muito forte com alcance mínimo de 840 km e máximo de 1.185 km.

A dependência espacial se apresentou forte para as chuvas de todos os meses e também para as semivariâncias cruzadas das precipitações com a altitude, excetuando o mês de dezembro, que forneceu dependência espacial moderada para a chuva e alcance de 438 km.

Tabela 2. Parâmetros dos variogramas simples e cruzado. C0 = efeito pepita, A menor = alcance menor, A maior = alcance maior, Alt = altitude

Parâmetros	Mês	mm x mm	mm x alt	alt x alt	Mês	mm x mm	mm x alt	alt x alt
Modelo		Exp	Gau	Exp		Gau	Exp	Exp
C ₀		80	-0,01	0,01		0,074	-0,001	0,01
Patamar	jan	210	-73,89	53,46	fev	0,44169	-3,799	53,463
A menor		291900	840300	416100		159349	1071600	416100
A maior		-----	1185000	416100		507491	1409700	416100
DE		0,62	1,00	1,00		0,83	1,00	1,00
Modelo		Gau	Esf	Exp		Gau	Gau	Exp
C ₀		393	-0,1	0,01		1300	-0,01	0,01
Patamar	mar	1892	-361	53,463	abr	6300	-235	53,463
A menor		215467	752000	416100		9500	87000	416100
A maior		701307	752000	416100		-----	-----	416100
DE		0,79	1,00	1,00		0,79	1,00	1,00
Modelo		Gau	Gau	Exp		Esf	Gau	Exp
C ₀		1890	-0,1	0,01		850	-0,1	0,01
Patamar	mai	6759	-208,3	53,463	jun	5700	-159,2	53,463
A menor		116394	76730	416100		130000	171187	416100
A maior		-----	-----	416100		-----	-----	416100
DE		0,72	1,00	1,00		0,85	1,00	1,00
Modelo		Esf	Gau	Exp		Exp	Gau	Exp
C ₀		610	-0,1	0,01		222	-0,1	0,01
Patamar	jul	5503	-141,2	53,463	ago	3098	-82,74	53,463
A menor		182700	78462	416100		343800	78808	416100
A maior		-----	-----	416100		-----	-----	416100
DE		0,89	1,00	1,00		0,93	1,00	1,00
Modelo		Exp	Gau	Exp		Esf	Gau	Exp
C ₀		137	-0,1	0,01		47	-0,1	0,01
Patamar	set	1768	-58,75	53,463	out	473,4	-42,89	53,463
A menor		472800	75344	416100		161000	77249	416100
A maior		-----	-----	416100		-----	-----	416100
DE		0,92	1,00	1,00		0,9	1,00	1,00
Modelo		Gau	Gau			Exp	Gau	Exp
C ₀		15,3	-0,1	0,01		52,73	-0,01	0,01
Patamar	nov	240	-34,55	53,463	dez	161	-3,79	53,463
A menor		74050	67030	416100		438086	51962	416100
A maior		-----	-----	416100		-----	-----	416100
DE		1,00	1,00	1,00		0,67	1,00	1,00

Determinados os melhores modelos de variogramas, foram construídos os mapas com a krigagem, que estão apresentados na Figura 03.

As chuvas em janeiro vão do mínimo 17 mm até o máximo 69 mm, as médias mais altas ocorrem próximo ao oceano em uma pequena área próxima ao mar e na parte de baixo do mapa, um pouco a esquerda, indicada pelas cores amarela, laranja e vermelha, no resto do mapa, percebe-se certa homogeneidade com uma baixa intensidade de chuva.

O mês de fevereiro tem chuvas na faixa de 33 mm até 81 mm. A partir de fevereiro é possível

perceber um padrão geográfico na distribuição das chuvas pelo estado, faixas de intensidade aparecem acompanhando a faixa de mar, esse padrão se mantém até o mês de outubro. Em novembro, dezembro e novamente em janeiro o padrão de faixas acompanhando a linha do litoral se desfaz e as faixas de mesma intensidade começam a tomar formato circular. Com um local, de mais baixa ou então mais alta intensidade como centro, e camadas sucessivas aumentando ou diminuindo as intensidades de chuvas conforme o centro.

Os limites mínimos das primeiras classes, ou seja, as chuvas mínimas (ver legendas da Figura 03) aumentam progressivamente de janeiro até maio, começando com 17,41 mm em janeiro,

aumentando até 67,47 em maio, quando começam novamente a diminuir até chegar a 9,77 mm em outubro, quando novamente começa a aumentar.

Figura 3. Mapas da pluviometria médias mensais construídos por krigagem para o estado de Sergipe.

O limite máximo das últimas classes de quantidade de chuvas, tem como menor valor 69,47 mm em janeiro e continua aumentando até o mês de Julho com 333,60 mm e novamente começa a decair até 53 mm em dezembro.

Nos mapas duas regiões do estado chamam a atenção. Em todos os meses a zona demarcada como zona A na Figura 04, apresenta as menores chuvas, o fato talvez se explique facilmente pela distância da região para o oceano, Essa região faz parte do semiárido nordestino.

A zona definida como zona B na Figura 04, é próxima ao litoral, porém nela chove em todos os meses mais do que as outras zonas litorâneas do estado, por quê? Aragão et al., (2013) identificaram essa mesma área como sendo o litoral úmido, porém eles não explicam o motivo.

Mapas foram construídos novamente pela cokrigagem, utilizando o software GS+.

Foram realizadas as validações cruzadas para os dados de cada mês tanto da krigagem como da cokrigagem.

Figura 4. Foto aérea de Sergipe com as zonas de menor precipitação (A) e maior precipitação (B).

Os gráficos de dispersão estão apresentados na Figura 05.

Para o mês de janeiro, nota-se que a krigagem forneceu dados muitos dispersos, não acompanhando a reta 1:1, e que a reta de regressão tem baixa inclinação, quase invalidando as estimativas.

Figura 5. Gráficos de dispersão da validação cruzada das previsões de chuvas, através da krigagem e cokrigagem para cada mês do ano no Estado de Sergipe.

Para a cokrigagem, ainda em janeiro, a inclinação da reta de regressão esta muito mais próxima à reta 1:1, e também os pontos estão mais próximos à reta 1:1.

Para o mês de fevereiro, as estimativas da krigagem estão melhores que as de janeiro, pois a

reta de regressão tem maior inclinação e os pontos estão mais próximos da reta 1:1. Quando comparamos a krigagem com a cokrigagem, é visível que a reta de regressão da cokrigagem tem maior inclinação que a reta de regressão da

krigagem, e que os pontos da cokrigagem estão mais próximos da reta 1:1 do que na krigagem.

Para março, as estimativas da krigagem parecem boas, a reta da regressão está próxima à reta 1:1 e os pontos não estão muito distantes da reta 1:1, contudo, quando comparamos com a cokrigagem de março, vemos que, na cokrigagem as duas retas estão muito próximas em termos de inclinação, e que os pontos seguem a reta 1:1 com forte tendência.

Para o mês de abril, na krigagem, os pontos seguem próximos à reta 1:1, e essa tem inclinação próxima à reta da regressão. Na cokrigagem vemos claramente que as estimativas foram bem melhores, pois, as retas 1:1 e regressão quase que coincidem e os pontos bem próximos às duas.

Para maio, a krigagem tem boa estimativa, a reta da regressão e 1:1 tem inclinação próximas e muitos pontos também estão acompanhando de perto a inclinação. Na cokrigagem, é visível que as inclinações das duas retas estão bem próximas uma da outra, e que a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 é bem menor do que na krigagem.

Para junho, a krigagem apresentou inclinação da reta de regressão próxima à reta 1:1, porém a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 é um pouco mais acentuada do que no mês anterior maio. Já a cokrigagem apresentou as duas retas quase como uma só, as suas inclinações praticamente coincidiram, e a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 é muito baixa.

Para julho a reta de regressão e 1:1 possuem inclinações bem distintas, porém os pontos se acumulam próximos ao cruzamento das duas retas e sem grande dispersão, indicando boas estimativas. Para a cokrigagem, a inclinação entre as duas retas é bem próxima, os pontos estão menos dispersos em torno da reta 1:1.

Para agosto, as retas 1:1 e de regressão possuem inclinação não muito diferentes uma da outra, os pontos em torno da reta 1:1 estão dispersos, mas, mesmo assim indicam uma boa estimativa. A cokrigagem forneceu retas quase coincidentes e uma aproximação excelente dos pontos em torno da reta 1:1.

Em setembro, outubro e novembro o padrão observado em agosto foi praticamente o mesmo, a krigagem fornecendo boas estimativas, porém a cokrigagem novamente forneceu excelente estimativa.

Em dezembro, a krigagem foi quase tão ruim nas estimativas como em janeiro, as retas 1:1

e regressão forneceram inclinações bem distintas, e a dispersão em torno da reta 1:1 também foi grande, já a cokrigagem melhorou visivelmente os resultados, as duas retas tiveram inclinações bem mais próximas do que a krigagem, e a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1 também foi menor.

Chahouki et al., (2014) utilizaram a altitude como variável secundária na cokrigagem para realizar previsões de chuvas nos estados de Nebraska e Kansas nos Estados Unidos da América e também obtiveram excelentes resultados.

Os resultados melhores da cokrigagem, visualmente percebidos nos gráficos da Figura 5, podem ser comprovados pelos resultados numéricos apresentados pela Tabela 3.

No mês de janeiro, apesar de a reta de regressão da cokrigagem apresentar inclinação de apenas 0,572, o que indica uma estimativa apenas razoável, e o $R^2 = 0,581$, quando comparados esses valores, com as estimativas da krigagem, é fácil de constatar a nítida vantagem do uso da cokrigagem para esse mês. Em janeiro a média dos erros da krigagem foi melhor do que a da cokrigagem, mesmo assim, ambas foram bem próximas a zero. Em todos os outros tipos de erros a cokrigagem se apresentou melhor.

No mês de fevereiro a cokrigagem só não foi melhor no intercepto, porém novamente ambos os valores, da krigagem e cokrigagem, foram próximos um do outro. A inclinação da reta de regressão e o R^2 da cokrigagem oferecem resultados com estimativas confiáveis, enquanto a krigagem apresenta valores para esses dois parâmetros ainda baixos.

De março a novembro a cokrigagem apresentou os parâmetros da inclinação à reta de regressão e R^2 com bons resultados, apresentando assim estimativas bem confiáveis, enquanto a krigagem apenas nos meses de outubro e novembro apresentou inclinação da reta superior a 0,7, e nunca um R^2 superior a 0,7.

Os únicos parâmetros de erro que a krigagem apresentou (quando apresentou) melhores resultados do que a cokrigagem foram o intercepto da reta de regressão e a média dos erros. Dentre todos os parâmetros de erros observados, pode-se afirmar que esses parâmetros são os de menor expressão para as comparações de estimativas.

Erros	Mês	interpolação	Mês	interpolação	Mês	interpolação
-------	-----	--------------	-----	--------------	-----	--------------

		kri	cok		kri	cok		kri	cok
a		0,232	0,572		0,530	0,628		0,533	0,723
EPE		0,223	0,099		0,118	0,092		0,119	0,064
R ²		0,210	0,581		0,502	0,705		0,517	0,842
b	jan	4,19	3,04	fev	6,01	-6,92	mar	2,44	-12,48
ME		0,069	-0,872		-0,184	0,045		-0,14	-0,202
DPE		10,196	7,419		15,019	11,702		16,638	10,007
SEI		80,935	55,169		94,193	71,951		93,647	51,142
a		0,646	0,854		0,668	0,781		0,666	0,882
EPE		0,094	0,032		0,095	0,041		0,096	0,028
R ²		0,651	0,953		0,634	0,899		0,631	0,962
b	abr	-1,12	-15,78	mai	-5,49	-25,69	jun	-0,25	-14,39
ME		-0,005	0,454		3,243	1,033		-0,105	-0,098
DPE		30,575	12,423		42,207	24,146		38,307	13,357
SEI		130,865	50,603		154,21	90,329		146,705	50,080
a		0,618	0,812		0,693	0,921		0,688	0,904
EPE		0,1	0,042		0,085	0,017		0,085	0,0204
R ²		0,606	0,921		0,688	0,984		0,689	0,970
b	jul	3,59	-20,05	ago	0,47	-6,66	set	-0,22	-4,24
ME		-0,481	-0,389		0,262	-0,216		0,122	-0,341
DPE		36,269	17,490		21,959	5,550		15,106	5,037
SEI		120,225	58,978		114,250	28,292		99,169	29,530
a		0,706	0,874		0,740	0,952		0,363	0,756
EPE		0,083	0,037		0,081	0,02		0,167	0,083
R ²		0,691	0,929		0,669	0,967		0,330	0,567
b	out	0,98	-2,16	nov	3,5	-0,65	dez	1,51	10,28
ME		-0,102	-0,470		0,408	-0,224		-0,268	-1,459
DPE		10,022	4,918		8,730	2,757		8,223	7,058
SEI		83,157	41,224		73,657	19,293		67,802	58,152

O mês de dezembro assim como o mês de janeiro, foram os que ofereceram maior dificuldade nas estimativas, talvez a dificuldade se deva as baixas chuvas ocorridas normalmente nesses meses. Em todo caso, para dezembro, a cokrigagem apresentou inclinação da reta = 0,756 contra apenas 0,363 da krigagem, e o R² da cokrigagem também foi melhor, apesar de não apresentar um bom resultado (0,567) contra o da krigagem com (0,330).

Conclusões

- 1) A altitude é uma excelente variável secundária para a cokrigagem.
- 2) A cokrigagem fornece resultados de previsão de chuvas mais confiáveis do que a krigagem.
- 3) As chuvas possuem correlação espacial.

Referências

- Aragão, R., Santana, G.R., Costa, C.E.F.F., Cruz, M.A.S., Figueiredo, E.E., Srinivasan, V.S., 2013. Chuvas intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental* 17, 243–252.
- Camargo, E.C.G., 1998. *Geoestatística: Fundamentos e Aplicações. Geoprocessamento em projetos ambientais* [online] 36. Disponível: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf. Acesso: 01 jun.2017.
- Chahouki, M.A.Z., Chahouki, A.Z., Malekian, A., Bgheri, R., Vesali, S.A., 2014. Evaluation of Different Cokriging Methods for Rainfall Estimation in Arid Regions (Central Kavir Basin in Iran). *Desert* [online] 1. Disponível: https://jdesert.ut.ac.ir/article_51048_e630f74fd49ea70d40d89a874f925107.pdf. Acesso: 01 jul. 2017.
- Dereczynski, C.P., Oliveira, J.S., Machado, C.O., 2009. *Climatologia da Precipitação no*

- Município do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Meteorologia 24, 24–38.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G. 1992. GSLIB - Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, Oxford.
- Fenille, M.C., Cardim, M. 2007. Correlação espacial entre a altitude e as precipitações pluviométricas no estado de São Paulo. Geociências 26, 135–141.
- Gallas, M.R., 2010. Incerteza de Medição. Instituto de Física – UFRGS. Disponível: <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/medidas.pdf>. Acesso: 07 jul. 2017.
- Landim, P.M.B., Sturaro, J.R., Monteiro, R.C. 2002. Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. Disponível: [file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/Krigagem_Ordinaria_para_situacoes_com_Te%20\(5\).pdf](file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/Krigagem_Ordinaria_para_situacoes_com_Te%20(5).pdf). Acesso: 11. Jul. 2017.
- Landim, P.M.B., 2006. Sobre Geoestatística e mapas. Terra e Didática 2, 19–33.
- Mello, C.R., Lima, J.M., Silva, A.M., Mello, J.M., Oliveira, M.S., 2003. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 7, 501–504.
- Quartezani, W.Z., Zimback, C.R.L., Landim, P.M.B., Oliveira, R.B., 2011. Eficiência da cokrigagem na estimativa da produtividade do café conilon. Energia na Agricultura 26, 113–125.
- Roldão, A.F., Santos, J.G., Oliveira, L.A., 2012. Correlação entre as variáveis climáticas (altitude, temperatura e precipitação) na mesorregião sul e sudoeste de Minas Gerais – MG. Revista Geonorte 1, 515–525.
- SEMARH-SE. Secretaria de Meio Ambiente e dos recursos Hídricos do Estado de Sergipe, 2016. Sistema de informações sobre recursos hídricos – Clima. Disponível: http://sirhse.semarh.se.gov.br/sirhse/index.php/macroplanejamento/bacias_hidrograficas/estadoClima/estado. Acesso: 11. Nov. 2016.
- Sturaro, J.R., 2015. Apostila de geoestatística básica. Disponível: <http://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>. Acesso: 11 Jul. 2017.
- Troleis, A.L., Santos, A.C.V., 2011. Estudos do Semiárido, 2 ed. EDUFRRN, Natal.
- Yamamoto, J.K., Landim, P.M.B., 2013. Geoestatística: Conceitos e aplicações. Oficina de Textos, São Paulo.