

ISSN 0104-1347

Avaliação de métodos para espacialização de índices de necessidade hídrica das culturas e sua aplicação em zoneamento agrícola

Spatialization methods of crop water stress index applied to agricultural zoning

Mariza Alves de Macedo¹, Eduardo Delgado Assad², Gilberto Câmara³,
Julio César de Oliveira¹ e Alda Monteiro Barbosa¹

Resumo - Métodos de espacialização de valores numéricos foram comparados e aplicados na determinação de riscos climáticos para a cultura de milho. As datas de semeadura foram definidas a partir da combinação de dados diários de precipitação pluvial, de ciclo e de necessidade de água da cultura e de capacidade de retenção de água no solo. Estabeleceu-se um índice, ISNA (Índice de Satisfação de Necessidade de Água) em cada ponto onde foi feita a simulação. Para a espacialização dos índices foram utilizados métodos de interpolação como média móvel, krigeagem e krigeagem por indicação. A krigeagem por indicação foi o método mais apropriado para espacializar os índices de necessidade de água das culturas.

Palavras-chave: geostatística, interpolação, balanço hídrico, milho, *Zea mays* L., Brasil.

Abstract - This paper compares spatialization methods of numerical values applied to agrometeorology. The sowing dates were defined by combination of precipitation daily data, crop cycle, and water soil retention. Three interpolation methods (moving average, ordinary kriging, indicator kriging), are use to spatialize the water index calculated outputted by simulation. The results showed that the performance of the indicator krigeagen model was more reliable.

Key words: geostatistic, interpolation, water balance, maize, *Zea mays* L., Brazil.

Introdução

A produtividade das culturas agrícolas é altamente dependente da quantidade de chuvas, bem como da frequência e intensidade dos períodos secos durante a estação de crescimento. A escolha das melhores datas de semeadura, pode ser realizada a partir da simulação dos componentes de um balanço hídrico, cujos resultados quando georreferenciados, podem ser espacializados por

meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), (ASSAD et al., 1998).

Diferentes métodos estão disponíveis em SIGs no mercado, quando o objetivo é mapear a variabilidade espacial de um atributo. Entretanto, nem todos os modelos inferenciais propostos, respondem a questões básicas relacionadas à forma, ao tamanho e à orientação do domínio a ser considerado na interpolação, e tampouco fornecem informações a respeito da incerteza associada aos valores es-

¹ Estudante do curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, SP. Bolsista do CNPq.

² Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, CEP 13089-970 Campinas, SP. E-mail: assad@cnptia.embrapa.br

³ Pesquisador do INPE/DPI, Caixa Postal 515, CEP 12201-097 São José dos Campos, SP. Bolsista do CNPq-PQ. E-mail: gilberto@dpi.inpe.br

timados, (BURROUGH & McDONNELL, 1998). Normalmente, são utilizados métodos de interpolação como a média móvel ponderada, onde não se considera a continuidade no espaço. Assim, ao se definir datas de semeadura e deparar-se com limites de atributo, necessita-se conhecer o erro envolvido e sua extensão espacial. Esta avaliação é importante pois, caso determinada região esteja localizada numa área considerada inapropriada para semeadura naquela data, os agricultores daquela região, poderão não receber crédito de custeio da lavoura, por exemplo.

Desde 1995, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento recomenda épocas de semeadura, para as culturas de soja, de feijão e de milho, com base em um método de balanço hídrico (FARIAS *et al.*, 1997; MEIRELES *et al.*, 1997; SANS *et al.*, 1997), do qual obtém-se o valor de um Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), calculado da relação entre evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima da cultura (ASSAD *et al.*, 1998). O período de enchimento de grãos é considerado o período crítico para as culturas, em termos de dependência de água. São então calculados os ISNAs médios dessa fase, para cada ano da série histórica e, em seguida, é realizada uma análise freqüencial para 20%, 50% e 80% de ocorrência. Somente a freqüência de 20% é espacializada, pois sendo a mais conservadora, indica se o índice é maior ou igual a um valor para oito em cada dez anos, isto é, em 80% dos anos. Os valores médios desse índice são espacializados para se delimitar as áreas de acordo com o risco de déficit hídrico. No mapeamento das datas de semeadura são feitos fatiamentos das classes indicando-as como sendo de alto, médio e baixo risco para semeadura.

Porém, a transição entre uma classe considerada de baixo risco, para outra de alto risco é abrupta e descontínua no espaço. Torna-se então, necessário testar outros métodos que possam mapear a variabilidade espacial, bem como a propagação espacial do erro da interpolação. Um método assim definido permite reduzir o erro na tomada de decisão na hora da semeadura e auxilia na montagem de matriz de risco espacial, à partir de variáveis agroclimáticas.

Diante das questões que se interpõe quando se pretende estimar valores de atributos, em locais

não amostrados (ISNA, por exemplo), a partir de informações pontuais em localizações conhecidas, o objetivo deste trabalho foi aplicar métodos geostatísticos (krigeagem ordinária e krigeagem por indicação), como alternativa ao interpolador média ponderada, na espacialização das datas de semeadura, atendendo aos objetivos do Programa Zoneamento Agrícola, coordenado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, (MAPA, 2001), com vista a comparar os diferentes métodos e identificar o mais adequado para este fim.

Material e métodos

a) Balanço hídrico

O método de balanço hídrico usado por FARIAS *et al.* (1997), MEIRELES *et al.* (1997) e SANS *et al.* (1997), foi utilizado em séries históricas com período mínimo de 15 anos de dados, considerando a precipitação pluvial diária, a capacidade de armazenamento de água do solo, os coeficiente de cultura (K_c), a evapotranspiração potencial e a duração do ciclo e das fases fenológicas da cultura. O ciclo da planta foi dividido em quatro fases fenológicas: germinação-emergência, fase vegetativa, floração-enchimento de grãos e maturação. Considerou-se o período de enchimento de grãos sendo o mais crítico quanto a dependência de água. Da relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (ETR/ETM) obteve-se o Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), ou índice de penalização, que varia de zero a um e representa a fração entre a quantidade de água consumida pela planta e a quantidade que seria demandada para se garantir a máxima produtividade (ASSAD *et al.*, 1998). Foram, então, calculados os valores médios de ISNA da fase de enchimento de grãos, para cada ano da série histórica e, em seguida, foi realizada uma análise freqüencial para 20%, 50% e 80% de ocorrência. Somente a freqüência de 20% foi espacializada pois, sendo a mais conservadora, indica se o índice é maior ou igual a um valor para oito em cada dez anos, isto é, em 80% dos anos (ASSAD *et al.*, 1998).

b) Métodos de interpolação

Média móvel ponderada - O interpolador média ponderada calcula o valor de cota (z), de cada ponto da grade, a partir da média ponderada das cotas dos oito vizinhos mais próximos, porém, atribui pesos variados para cada ponto amostrado por meio de uma função $w(x,y)$ que considera a distância do ponto cotado ao ponto da grade.

$$f(x, y) = \frac{\left(\sum_1^8 w(x, y) \right) z}{\left(\sum_1^8 w(x, y) \right)} \quad (1)$$

Um estimador determinístico por média móvel pode considerar a anisotropia do atributo a partir da definição do raio de busca dos vizinhos, que variam com a distância e com a direção. Entretanto, na determinação dos pesos das amostras vizinhas por krigagem, há um formalismo mais rigoroso tendo em vista que tem sua base no modelo de correlação espacial denominado variografia (FELGUEIRAS, 2000).

Krigeagem ordinária - A krigagem é um procedimento de inferência espacial estocástico que apresenta uma etapa de análise variográfica anterior aos procedimentos inferenciais, onde a estrutura de covariância espacial é modelada (FUKS, 1998). De acordo com FELGUEIRAS (2000), um estimador de krigagem ordinária utiliza médias locais ou tendências locais estimadas a partir das amostras vizinhas, ao invés de uma única média estacionária, como o faz um algoritmo de krigagem simples. Os valores (z) são estimados em localizações espaciais não observadas (u), sem a necessidade de se conhecer a média estacionária μ , segundo uma combinação linear dos valores de um subconjunto amostral local. A condição para isso é que a somatória dos ponderadores da krigagem ordinária $\lambda_0 \alpha(u)$ seja igual a um. O estimador de krigagem ordinária é dado por:

$$z_0^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{0\alpha}(u) \cdot z(u_\alpha) \quad (2)$$

A variância do erro de estimação, conhecida como variância de krigagem, também pode ser traçada para informar sobre a confiança dos

valores interpolados sobre a área de interesse (BURROUGH & McDONNELL, 1998). Entretanto, baseia-se apenas na localização geométrica do atributo, não considerando a variabilidade do atributo. Isso implica em que o resultado fornecido é apenas uma comparação entre diferentes configurações geométricas, conforme já observado por DEUTSCH & JOURNAL (1998), citados por FELGUEIRAS (2000).

Krigeagem por indicação - Krigeagem por indicação pode ser definida como uma técnica de inferência estatística, que permite a estimativa dos valores e das incertezas associadas ao atributo durante o processo de espacialização de uma propriedade amostrada. A propriedade em estudo é considerada uma variável aleatória em cada posição (u) não amostrada, e as inferências dos valores $z(u)$ e das incertezas são obtidas a partir da construção da função de distribuição acumulada, ($F^*(u; z_k | (n))$) condicionada aos 'n' dados amostrados de cada variável aleatória (FELGUEIRAS et al., 1999). Trata-se de uma técnica de inferência estatística não linear, pois é aplicada sobre os valores do atributo transformados por um mapeamento não linear, a codificação por indicação. São então definidos valores de corte, z_k , $k=1, 2, \dots, K$, em função do número de amostras. O estimador de krigagem de indicação é dado pela expressão abaixo, considerando-se a somatória dos pesos de ponderação $\lambda_0 \alpha(u; z_k)$ igual a 1.

$$F_0^*(u; z_k | (n)) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{0\alpha}(u; z_k) j(u; z_k) \quad (3)$$

De acordo com FELGUEIRAS (2000), a krigagem por indicação é tida como não-paramétrica, por não considerar nenhum tipo de distribuição de probabilidade a priori para a variável aleatória. Ao invés disso, ela possibilita a construção de uma aproximação discretizada da função de distribuição acumulada da variável aleatória. Os valores de probabilidade discretizados podem ser usados diretamente para se estimar valores estatísticos característicos da distribuição, tais como: média, variância, mediana, quantis etc. Para o tratamento dos dados, estes foram, primeiramente, submetidos ao procedimento de interpolação pela média móvel ponderada, o que é realizado de forma direta e automática nos diversos SIGs,

bastando selecionar o interpolador desejado entre os disponíveis.

c) Dados agrometeorológicos

Os dados utilizados referem-se ao ISNA do terceiro subperíodo fenológico (período de enchimento de grãos) da cultura de milho (ciclo médio), obtido por meio do balanço hídrico, assumindo a data de semeadura de 25 de novembro. Esses dados georreferenciados correspondem, geograficamente, à localização das 252 estações pluviométricas do estado do Rio Grande do Sul, escolhida como área teste.

Foram consideradas três classes de ISNA para a cultura do milho (ciclo médio):

- $ISNA > 0,55 \Rightarrow$ a semeadura é favorável naquela data;
- $0,45 < ISNA < 0,55 \Rightarrow$ risco intermediário para a semeadura naquela data; e
- $ISNA < 0,45 \Rightarrow$ alto risco de perdas agrícolas para aquela data, sendo portanto, considerada desfavorável.

Para realização dos procedimentos de interpolação a que os dados foram submetidos, utilizou-se o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas Spring - INPE.

No caso da krigeagem ordinária, a partir de uma análise exploratória dos dados, realizada com base na observação do histograma e gráfico de probabilidade normal, foi suposta a hipótese de normalidade dos dados.

Realizou-se uma análise de superfície, necessária para verificação da continuidade espacial do atributo, para verificar se os dados em questão possuíam distribuição espacial isotrópica. Confirmada esta característica, um único modelo foi suficiente para descrever a sua variabilidade espacial.

A modelagem do semivariograma, a etapa na qual foi modelada a interpretação da estrutura de correlação espacial utilizada nos procedimentos inferenciais da krigeagem, envolveu o levantamento do semivariograma experimental, o ajuste a uma família de modelos de semivariogramas e a validação do modelo a ser utilizado nos procedimentos da krigeagem.

O ajuste dos semivariogramas foi realizado iterativamente buscando-se adequar o variograma experimental a um modelo teórico. Foram introduzidos valores para os parâmetros: incremento (distância máxima entre duas amostras em que ainda haja correlação entre elas), “lag”, (distância pré-definida utilizada no cálculo do semivariograma), e tolerância (deve corresponder, aproximadamente, à metade do valor do incremento para que não haja sobreposição considerável da área de influência).

Uma vez obtido o semivariograma experimental, procurou-se realizar o seu ajuste aos modelos teóricos. O passo seguinte, validação do variograma, consistiu na re-estimação dos valores conhecidos de cada ponto amostrado da área. Este procedimento permite identificar possíveis erros de estimativa. Em seguida, foi realizado o procedimento de krigeagem para espacialização do ISNA, a partir dos parâmetros obtidos nas etapas acima descritas.

Para execução da krigeagem por indicação, os valores do atributo foram organizados em ordem crescente e em seguida divididos em decis, definindo-se nove valores de corte, abaixo dos quais os valores das amostras são transformados em um e acima destes em zero, gerando assim um conjunto amostral por indicação.

Para os dados analisados, cujo valores variaram entre 0,18 a 0,83, foram definidos os seguintes valores de corte: 0,395, 0,465, 0,505, 0,535, 0,565, 0,585, 0,605, 0,645, 0,685. Para cada valor de corte, foi gerado um semivariograma, os quais foram ajustados aos modelos teóricos conforme realizado para a krigeagem ordinária.

Os valores dos atributos, foram estimados pelo valor médio e os valores de incerteza local correspondem a dois desvios padrão, sendo definidos o mínimo de um e máximo de oito pontos na área de busca.

Resultados e discussão

Ao se estabelecer a krigeagem ordinária, foi possível fazer o histograma (Figura 1-a), o gráfico de probabilidade normal (Figura 1-b) e concluída a análise de superfície, verificou-se que os dados possuem uma distribuição espacial isotrópica (Fi-

gura 1-c), confirmando-se a hipótese de que um só modelo seria suficiente para descrever sua variabilidade espacial.

O grau de ajuste do modelo definido pôde ser verificado pelo diagrama onde encontram-se plotados os valores observados e inferidos, pelo histograma do erro e diagrama espacial do erro (Figura 2 -a, b e c).

Na Figura 3 -a, b e c - são ilustradas as imagens em níveis de cinza obtidas pelo interpolador média ponderada, krigeagem ordinária e krigeagem por indicação, respectivamente.

À primeira vista os resultados são semelhantes para os três métodos, entretanto, pode ser notado que a superfície gerada pelos métodos geostatísticos, sobretudo, a krigeagem por

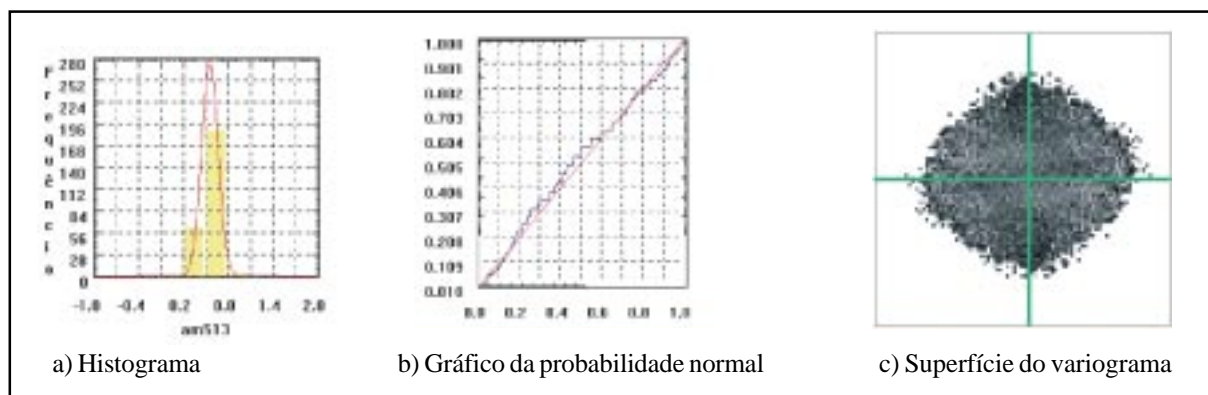


Figura 1. Elementos gráficos para análise exploratória e de superfície.

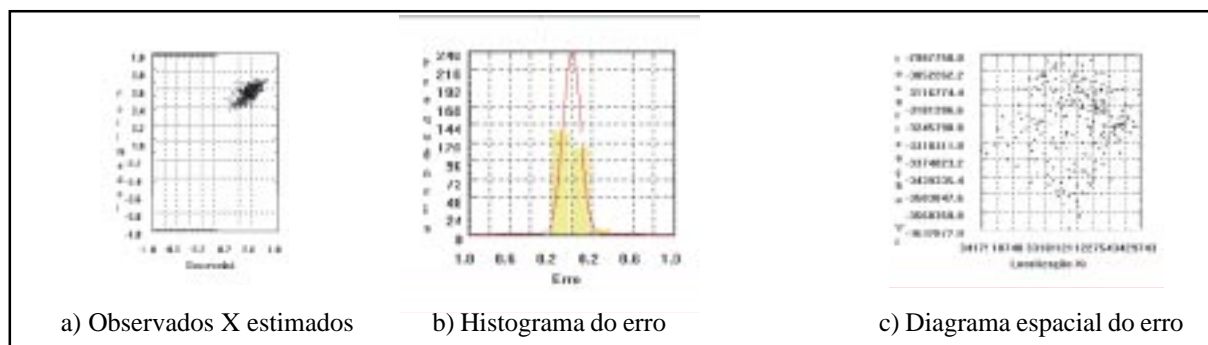


Figura 2. Resultado da re-estimação dos pontos amostrais para a krigeagem ordinária.

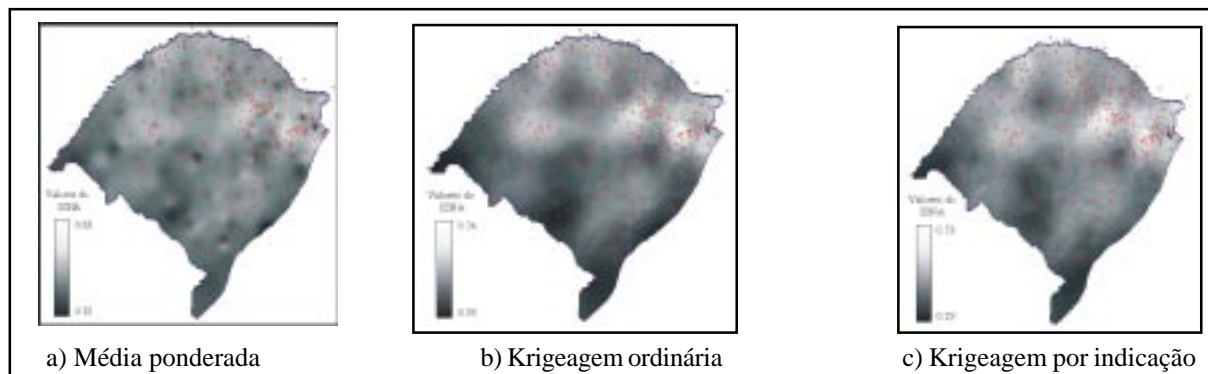


Figura 3. Superfícies geradas pelos métodos de interpolação.

indicação é mais suave. Conforme já observado por CAMARGO (2000), o ponto crítico ocorre justamente onde há subestimação e superestimação do valor do atributo, que no resultado gerado pela krigagem por indicação ocorre de maneira gradual, mais coerente, portanto, com o que ocorre na natureza.

A variância do erro de estimação (Figura 4-a) fornece informações a respeito da confiabilidade dos valores interpolados, o que representa uma importante vantagem sobre o método da média ponderada, onde os valores inferidos são tratados como dados sem erro. Entretanto, a variância de krigagem é obtida em função do estimador e da distribuição espacial das amostras, não considerando o valor do atributo. Pode-se observar que, onde os valores interpolados coincidiram com os pontos amostrais a variância foi nula, e aumentou com a distância dos mesmos.

Diferentemente da observação anterior, o mapa de incertezas locais (Figura 4-b), fornecido pela krigagem por indicação, utiliza a função de distribuição acumulada condicionada da variável alea-

tória que representa o atributo, independentemente do estimador. Assim, maiores incertezas são encontradas onde o valor do atributo tem maior variação, enquanto a ocorrência de valores com menor variação geram superfícies mais suaves caracterizando menor incerteza.

Os cartogramas, ilustrados na Figura 5, são resultado do fatiamento das grades geradas pela média ponderada, krigagem ordinária e krigagem por indicação. Algumas diferenças podem ser observadas no resultado obtido pelos diferentes métodos. Sendo a condição para obtenção do seguro agrícola a inserção do município na área definida como favorável, algumas diferenças, embora sutis, podem ser observadas na configuração das classes, o que afeta, principalmente, aos municípios de menor área. Os resultados do fatiamento no caso da krigagem por indicação, deixam mais evidente a condição de continuidade espacial. Os três resultados são parecidos, mas o menos fragmentado é o da krigagem por indicação, o que pode facilitar as recomendações de liberação de crédito no âmbito municipal.

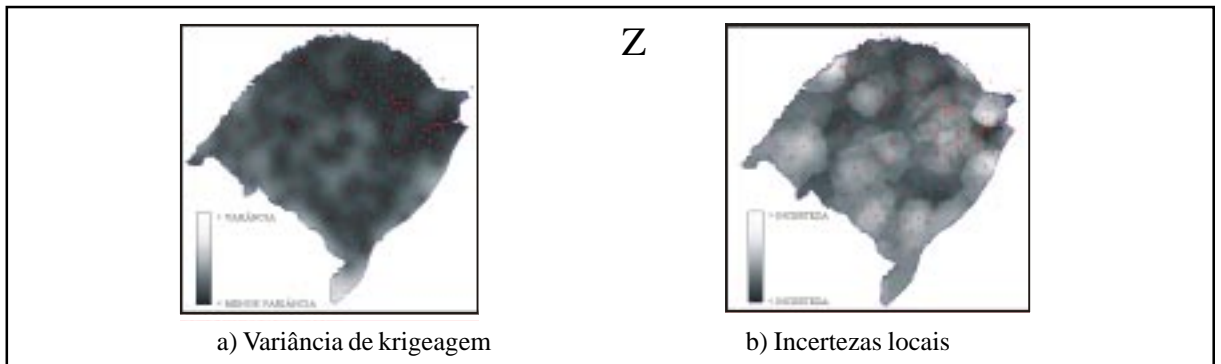


Figura 4. Variância de krigagem e das incertezas locais associadas às inferências.

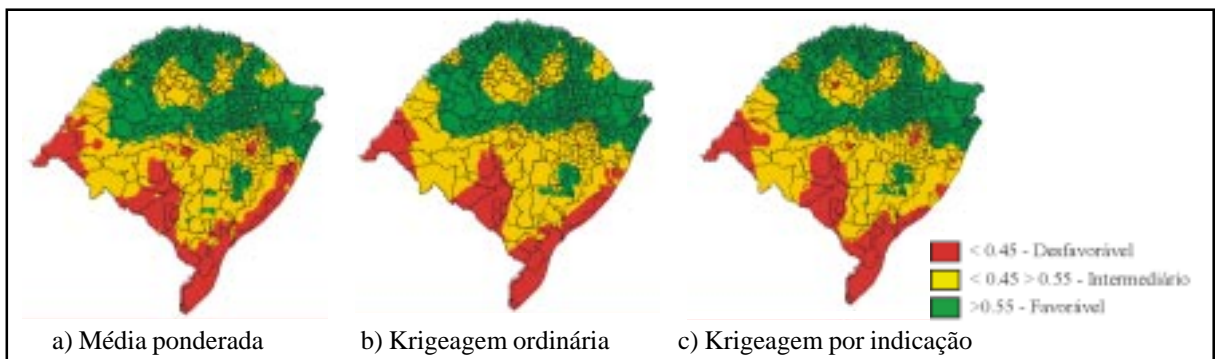


Figura 5. Fatiamento das grades geradas pelos diferentes interpoladores, para semeadura do milho em 25 de novembro.

Conclusões

- O trabalho mostrou o potencial e a viabilidade da utilização de métodos geoestatísticos como alternativa aos modelos inferenciais determinísticos, na espacialização do Índice de Satisfação das Necessidades de Água, o ISNA;
- além de possibilitar a definição da forma e orientação do domínio a ser considerado na interpolação e de atribuir pesos às amostras levando em conta a variabilidade do atributo na área, os interpoladores geoestatísticos permitem ainda modelar as incertezas associadas às inferências;
- foi possível observar ainda que, embora a krigeagem ordinária tenha se apresentado como um interpolador robusto em relação à média ponderada, apresentou algumas desvantagens em relação a krigeagem por indicação. Com relação a informações relacionadas à confiabilidade dos dados interpolados, enquanto a krigeagem ordinária considera apenas a distribuição espacial dos pontos amostrais, a krigeagem por indicação leva em conta a variabilidade do atributo, permitindo uma análise da incerteza dos valores nos locais não amostrados;
- além disso, a krigeagem por indicação destacou-se entre os métodos utilizados por ter aplicação mais ampla, pois é possível utilizá-la ainda que a distribuição do atributo analisado não fosse normal, e que possuísse valores fora da tendência, o que poderia ocorrer uma vez que, neste trabalho, foi espacializado apenas o ISNA para uma data específica entre as dezessete disponíveis para a cultura de milho, ciclo médio; e
- o ISNA define a data de semeadura onde o risco de perdas na agricultura é menor. Diante da importância desse dado e das conseqüências práticas da sua espacialização, identificou-se a krigeagem por indicação como o método mais adequado, entre os aqui analisados, por permitir, inclusive, uma análise mais confiável da qualidade da informação gerada.

Referências bibliográficas

ASSAD, E.D., SANO, E.E., BEZERRA, H.S. et al. Uso de modelos numéricos de terreno na espacialização de épocas de plantio. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. **Sistemas de Informações Geográficas**. Aplicações na agricultura.

ra. Brasília: EMBRAPA-SPI/Embrapa Cerrados, 1998. p.311-327.

BURROUGH, P.A., McDONNELL R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford: University Press, 1998. 333p.

CAMARGO, E.C.G. Análise Espacial de Superfície por Geoestatística. In: **Análise Espacial**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser_301/cap3/superficies.pdf>. Acesso em: nov. 2000.

FARIAS, J.R.B., ASSAD, E.D., ALMEIDA, I.R. et al. Identificação de regiões com riscos de déficit hídrico à cultura da soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1997. p.345-347.

FELGUEIRAS, C. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos>>. Acesso em: nov. 2000.

FELGUEIRAS, C.A., MONTEIRO, A.M.V., FUKS, S.D. "Inferências e estimativas de incertezas utilizando técnicas de krigeagem não linear". In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA, 7., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: gisbrasil'99. Seção de palestras técnico-científicas. CD-ROM.

FUKS, S.D. Novos modelos para mapas derivados de informações de solos. In: ASSAD, E.D., SANO, E.E. **Sistemas de Informações Geográficas**. Aplicações na agricultura. Brasília: EMBRAPA-SPI/Embrapa Cerrados, 1998. p.373-410.

MAPA. Ministério da Agricultura. **Zoneamento Agrícola, Safra 2000/2001**. Culturas: Algodão, arroz, milho, soja e trigo. UF: RS, SC, PR, MG, RJ, SP, DF, GO, MT, MS, TO, AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN e SE. Brasília: MAA/CER. Coordenação Nacional do Zoneamento agrícola. MMA, 2001. 510p.

MEIRELES, E.J.L., SILVA, S.C., ASSAD, E.D. Estudo espaço-temporal do risco climático do feijoeiro, ciclo de 90 dia, em Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1997. p.348-350.

SANS, L.M.A., ASSAD, E.D., AVELLAR, G. et al. Riscos climáticos para a cultura do milho nos estados de Minas Gerais, Tocantins, Mato Grosso, e Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1997. p.357-359.