

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo
Departamento de Propriedade Intelectual e Tecnologia da Agropecuária*

GEOESTATÍSTICA APLICADA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO UTILIZANDO O VESPER

*Ronaldo Pereira de Oliveira
Célia Regina Grego
Ziany Neiva Brandão
Editores Técnicos*

Embrapa
Brasília, DF
2015

Capítulo 5

Modelagem de Variogramas

Ronaldo Pereira de Oliveira

5.1 Opções de Ajuste do Variograma

No Vesper, o processo de análise variográfica é executado na aba “Variogram” da janela principal, onde a modelagem do variograma envolve dois componentes básicos, sendo: o cálculo do variograma empírico e o ajuste do variograma teórico. Nesta aba (Figura 5.1), o ajuste do variograma pode ser executado em modo local ou global, como detalhado a seguir. Os procedimentos têm embasamento teórico como apresentado para o exemplo de ajuste em planilha eletrônica no Capítulo 3 (Itens 3.2, 3.3 e 3.4). Os resultados do ajuste caracterizam a dependência espacial da variável com parâmetros quantitativos que são posteriormente utilizados nas equações de estimativas por krigagem.

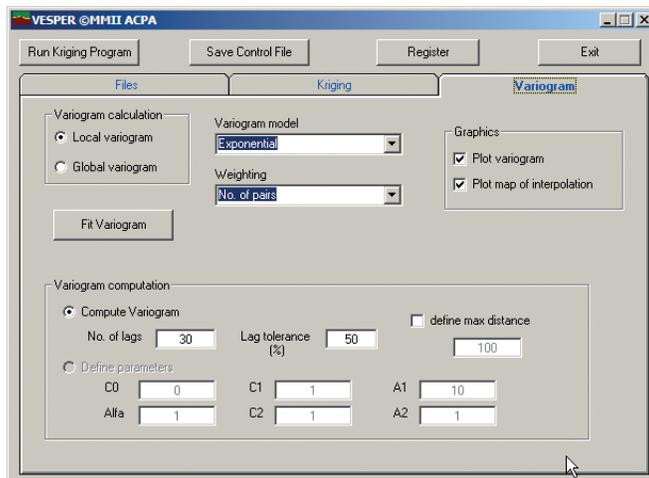


Figura 5.1. Aba “Variogram” para ajuste de parâmetros e seleção do modo em que o variograma será calculado, sendo: “Local variogram” ou “Global variogram”.

O ajuste do variograma pode ser feito em modo local ou global. O variograma em modo global estima e ajusta um único variograma considerando todos os pontos observados. O procedimento em modo global é executado em uma sub-janela de ajuste interativo do variograma. Este procedimento segue o método clássico de ajustes semiautomáticos do variograma com posterior refinamento visual empírico, usualmente utilizado com um número limitado de dados (i.e.: < 500 pontos) provenientes de monitoramentos manuais discretizados, como informações de perfis, mini trincheiras ou tradagens de solo ou de tecido foliar. Nada impede que o modo local seja usado com acervos de dados em alta densidade, apenas resultando numa interpolação mais suavizada. Já o inverso não é viável, pois arquivos com um número limitado de registros não propiciarão um número de vizinhos suficientes para permitir estimativas locais. Durante a execução da krigagem, o Vesper emite uma janela de alerta nestes dois casos. Para arquivos com menos de 100 pontos, restringindo a krigagem de se o modo local estiver selecionado e indicando o uso do modo global. Para arquivos com mais de 5000 pontos, sugerindo o uso do modo local se o modo global estiver selecionado.

O ajuste em modo local é feito automaticamente durante a execução da krigagem ordinária, considerando acervo de dados de entrada com alta densidade amostral. A execução deste procedimento requisita apenas uma pré-seleção de um modelo teórico e a definição de parâmetros de cálculo do variograma empírico na aba "**Variogram**". Estes ajustes locais automáticos do variograma são executados durante o procedimento de krigagem ordinária, usando a técnica de variogramas delimitados por uma janela móvel como sugerido em Haas (1990). Esta janela móvel percorre toda a área observada estando centrada nos pontos da grade de predição sendo estimados, e define o grupamento de vizinhos considerados na krigagem. Os pontos vizinhos são selecionados a partir dos campos de coordenadas (i.e.: X e Y) registrados no arquivo de entrada (Item 4.3) e definem o grupamento de valores absolutos da variável selecionada para o cálculo da regressão. Este ajuste local captura a variação numa escala mais refinada ao redor dos pontos interpolados. O método local potencializa uma predição mais precisa quando modelado com dados do monitoramento intensivo (i.e.: em alta densidade amostral), uma vez que o variograma

em modo global só é capaz de capturar uma variação média para toda área (WALTER et al., 2001). Ou seja, este método captura a variação numa escala proporcional as diferenças locais entre os valores da variável analisada, enquanto em modo global a variação tende a ser proporcional ao tamanho do talhão por considerar diferenças em relação a pontos de observação muito distantes.

Procedimento de Ajuste em Modo Local

O Vesper ajusta automaticamente os variogramas locais quando no menu “**Variogram calculation**” a opção “**Local Variogram**” é selecionada (Figura 5.1). Neste caso, o procedimento de ajuste sendo apenas necessária a seleção de parâmetros iniciais entre valores predefinidos aba “**Variogram**”. Estes parâmetros são selecionados da seguinte forma: a) nas barras de rolagem dos campos “**Variogram model**”, para seleção do modelo teórico, e “**Weighting**”, para seleção do tipo de ponderação durante a regressão (Figura 5.2.a); e b) nos campos “**No. lags**”, “**Lag tolerance**” e “**define max distance**” do menu de opções “**Variogram computation**”, definindo parâmetros de cálculo do variograma empírico (Figura 5.2.b). Sendo que neste menu, o botão de opção “**Compute Variogram**” deve estar selecionado quando o variograma em modo local é selecionado. As opções disponíveis na interface da aba “**Variogram**” para o modelo teórico e o tipo de ponderador são detalhadas no Item 5.2, os parâmetros de cálculo do variograma empírico os mesmos disponíveis na sub-janela “**Variogram Model**” ativada durante o procedimento em modo global detalhado a seguir.

As opções de modelos teóricos e tipos de ponderadores disponíveis, bem como os parâmetros predefinidos para o cálculo do variograma empírico foram incorporados com base no conhecimento tácito da aplicação destas **técnicas. Recomenda-se manter os parâmetros predefinidos no menu de opções “Variogram computation”** (Figura 5.2.b) no caso de ilustrações comparativas de variogramas quando considerando muitas variáveis ou diferentes acervos de dados da mesma variável. Nas análises de dados do monitoramento intensivo em AP é indicado que a distância máxima entre os pares observados (i.e.: “**define max distance**”) tenha um valor maior do que raio de busca considerado no procedimento de krigagem, devendo ser limitado a um valor aproximadamente igual a seis vezes ao tamanho da plataforma usada no

implemento agrícola. Esta indicação tende a melhorar as estimativas da variografia e reduzir o tempo de computação. Isto implica que para uma análise de dados de produtividade coletados numa plataforma de 20 m, a distância máxima entre os pares a serem considerados em investigações de zonas de manejo é sugerida no entorno de 120 m.

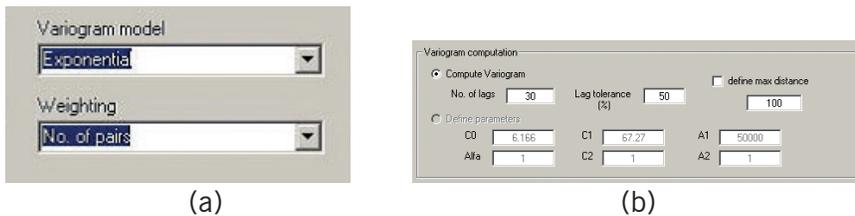


Figura 5.2. Pré-seleção de parâmetros da aba “**Variogram**” para o ajuste de variogramas em modo local, sendo: a) o modelo teórico (“**Variogram model**”) e o tipo de ponderação (“**Weighting**”) do ajuste; e b) definição dos parâmetros para **cálculo do variograma empírico** no menu de opções “**Variogram computation**”.

A experiência australiana ainda indica que, usualmente, o modelo teórico exponencial apresenta o melhor ajuste para estimativas considerando dados de sensores de produtividade com variogramas locais. Outra observação, é que os modelos mais complexos (e.g.: Gaussiano, Mattern e Duplo Esférico) frequentemente se tornam instáveis durante o ajuste automático, sendo recomendado utilizar como predefinição os modelos exponenciais ou esféricos.

Procedimento de Ajuste em Modo Global

Para a execução do procedimento de ajuste do variograma em modo global durante a interpolação por krigagem a opção “**Global Variogram**” no menu de opções “**Variogram calculation**” da aba “**Variogram**” deve estar selecionada (Figura 5.1). Este procedimento envolve interações do usuário com uma interface específica em duas etapas: o cálculo do variograma empírico e o ajuste do variograma teórico. Para isto é necessário clicar no botão operacional “**Fit Variogram**” da aba “**Variogram**” para ativar a sub-janela “**Variogram Model**” para ajuste interativo do variograma em modo global (Figura 5.3). O cálculo do variograma empírico requisita a definição de dois parâmetros básicos,

sendo o tamanho do “*lag*” (Item 3.4) e a distância máxima entre pontos observados.

Assim como para o procedimento em modo local, são os seguintes os parâmetros de referência para cálculo do variograma empírico na sub-janela “*Variogram Model*” (Figura 5.4):

“ <i>Lag tolerance</i> (% of lags)”	Define a tolerância percentual do “ <i>lag</i> ”, flexibilizando a distância definida na busca por pares que serão considerados para as distâncias entre os pares de observações. Uma tolerância de 50% implica que para um “ <i>lag</i> ” definido em 18 metros, os pares distantes entre 9 e 27 metros (i.e.: 18 ± 9) serão considerados (valor predefinido = 50%);
“ <i>No. lags</i> ”	Especifica o número de intervalos que irão definir o tamanho do “ <i>lag</i> ” ao dividir a distância máxima entre os pontos observados em passos iguais, tornando o tamanho do “ <i>lag</i> ” proporcional a distância máxima computada entre todos os pontos (e.g.: escala do talhão monitorado) ou limitada pelo usuário. Na prática, define o tamanho do tamanho do “ <i>lag</i> ” para seleção dos pares de pontos que irão compor o cálculo da variância média. Um exemplo está na razão entre o campo “ <i>No. Lags</i> ” com valor 20 e o campo “ <i>Define max distance</i> ” limitado em 400 m, definindo assim (i.e.: $400/20 = 20$) o cálculo da semivariância em incrementos de 20 m (valor predefinido = 30); e
“ <i>Define max distance</i> ”	Limita a distância máxima de separação entre os pares de pontos em relação a distância máxima entre todos os pontos do talhão que é calculada automaticamente. Não tem valor predefinido e precisa ser ativada com o botão de seleção

Uma vez tendo estes parâmetros definidos, o usuário clica no botão operacional “*Calculate Variogram*” do menu de opções “*Variogram Computation*” (Figura 5.4) para executar o cálculo do variograma empírico e o ajuste automático pelo método de regressão não-linear ponderada proposta por JIAN et al. (1996) para todos os modelos teóricos disponíveis (Item 5.2). Na execução o variograma empírico é plotado no gráfico do variograma, sendo representado por pontos indicando a variância média entre pares distantes numa dada distância. As cores dos pontos são referenciadas por uma escala de cores que dimensiona o número de pares considerados no cálculo, pontos em

azul com médias computadas para um maior número de pares, e em vermelho médias com um conjunto menor de pares. O traçado da linha azul contínua ilustra a função do modelo teórico sendo ajustado.

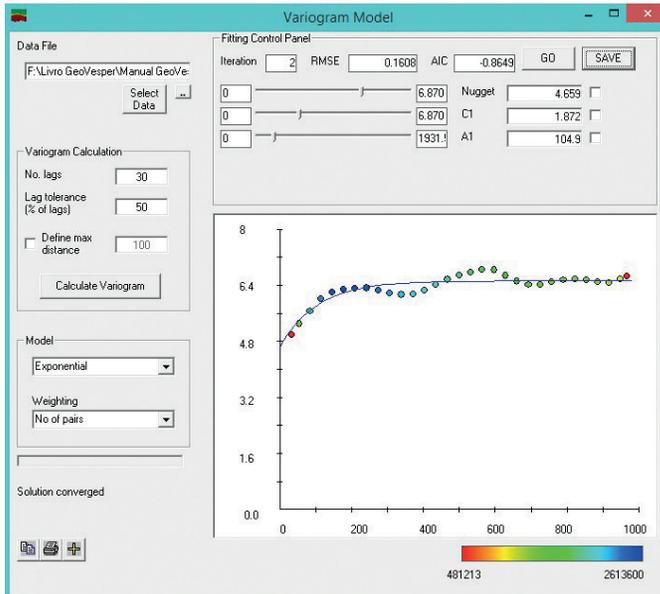


Figura 5.3. Sub-janela “*Variogram Model*” com interface interativa para cálculo do variograma empírico, o ajuste automático e/ou manual dos modelos teóricos e avaliação do ajuste.

Figura 5.4. Menu de opções “*Variogram Calculation*” com a definição de parâmetros para o cálculo do modelo empírico do variograma e execução do ajuste automático.

5.2 Modelos Teóricos e Técnicas de Ajuste

Conforme fórmulas apresentadas no Anexo III, são nove os modelos teóricos disponíveis na barra de rolagem do campo de opções **“Model”** (Figura 5.5). Estes sendo: **“Spherical”** (esférico), **“Exponential”** (exponencial), **“Gaussian”** (gaussiano), **“Linear with sill”** (linear com patamar), **“Stable”** (Stable), **“Generalized Cauchi”** (Cauchi genérico), **“Matern”** (Matern), **“Double spherical”** (duplo esférico) e **“Double exponential”** (duplo exponencial). Entretanto, algumas das opções de modelos teóricos são fruto de experimentação científica de cunho bastante específico (e.g. **“Double spherical”** e **“Double exponential”**), tendendo a ter pouca aplicação prática nos processos de decisão em áreas de manejo da produção por sítio-específico.

Quando o botão de comando **“Calculate Variogram”** para cálculo do variograma é ativado, o modelo empírico é calculado e todos os modelos teóricos são ajustados automaticamente considerando o tipo de ponderador selecionado para a regressão. Na execução, um sumário dos resultados relativos aos ajustes de cada modelo é armazenado em um único arquivo denominado de **“Variofitted”**, que é criado automaticamente pelo sistema na pasta onde o Vesper foi instalado. Este é um arquivo de texto que pode ser utilizado em outros procedimentos de modelagem da dependência espacial como discutido na aplicação prática destes procedimentos (Item 8.7).

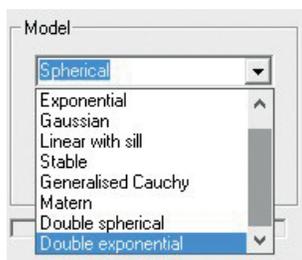


Figura 5.5. Barra de rolagem na seção **“Model”** para seleção interativa do modelo teórico de melhor ajuste automático, na sub-janela **“Variogram Model”**.

Ponderadores Disponíveis para Ajuste dos Modelos Teóricos

Os modelos teóricos de variogramas são ajustados ao modelo empírico por um método de regressão não-linear ponderada (JIAN et al., 1996), onde os pesos computados durante o ajuste (Anexo III) podem ser definidos segundo as opções na barra de rolagem “**Weighting**” (Figura 5.6), no campo de opções “**Model**”, como segue:

“ Unity ”	Todas as <i>lags</i> tem o mesmo peso (i.e. sem pesos)
“ No. of pairs ”	Pesos calculados pelo número de pares utilizados para determinar a semivariância da “ <i>lag</i> ”.
“ 1/std.dev ”	Pesos calculados pelo desvio padrão da semivariância de cada “ <i>lag</i> ” específica.
“ No_pairs/std_dev ”	Pesos calculados na razão do número de pares pelo desvio padrão da semivariância de cada “ <i>lag</i> ” específica.

Entre as opções, destaca-se o ponderador “**No_pairs/std_dev**” como sendo o mais utilizado no uso prático com dados do monitoramento intensivo.



Figura 5.6. Barra de rolagem “**Weighting**” para seleção do modo de ponderação dos pesos no ajuste automático do variograma, na sub-janela “**Variogram Model**”.

Ajuste Manual dos Modelos Teóricos

Como indicado na execução do Os parâmetros do melhor ajuste automático de cada modelo são salvos num arquivo texto da pasta

de instalação do Vesper (i.e.: “**Variofitted**”). Estes resultados são exibidos nos campos dos parâmetros de ajuste do variograma do menu de opções “**Fitting Control Panel**” da sub-janela “**Variogram Model**” (Figura 5.7) em relação ao modelo teórico selecionado no campo de opções “**Model**” (Figura 5.5). Neste menu interativo é possível fazer um ajuste manual refinando dos parâmetros de ajuste (i.e.: “ C_0 ”, “ C_1 ” e “ A_1 ”), enquanto observando simultaneamente o comportamento da curva do variograma teórico sendo ajustado e a variação dos indicadores disponíveis para avaliação da qualidade do ajuste (Item 5.4). Os parâmetros de ajuste ainda podem ser predefinidos, sendo digitados e fixados clicando na caixa de seleção ao lado do parâmetro, a exemplo do alcance (i.e.: “ A_1 ”) fixado em 95.5 como indicado na Figura 5.7. Nesse tipo de pré-seleção, o botão de comando “**Calculate Variogram**” deverá ser reativado para cada nova simulação. Por fim, os botões de comando “**GO**” e “**Save**” tem as respectivas funções de: validar a convergência da regressão computando o número de iterações; e salvar os parâmetros do melhor ajuste considerado para o posterior procedimento de krigagem.

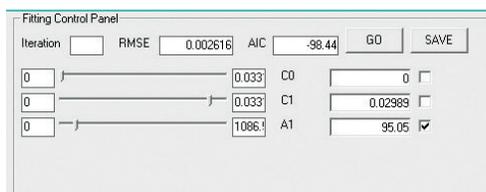


Figura 5.7. Menu de opções “**Fitting Control Panel**” com interface interativa para refinamento manual dos parâmetros de ajuste, enquanto observando o comportamento do variograma teórico e a da qualidade do ajuste.

5.3 Avaliação da Qualidade do Ajuste

A qualidade dos ajustes dos diferentes variogramas pode ser observada pelos indicadores apresentados na parte superior do painel de controle “**Fitting Control Panel**” da sub-janela “**Variogram Model**” (Figura 5.7), sendo: o “**RMSE**” (i.e.: *Root Mean Square Error*) e o “**AIC**” (i.e.: *Akaike Information Criteria*). O “**RMSE**” é a medida da magnitude média dos erros estimados como apresentado na equação

11 do Item 3.3. O **"AIC"** é o critério de parcimônia proposto em Akaike (1973) e referido no Anexo III. Para os dois indicadores, quanto menor for o valor, melhor o ajuste. Diferente do **"RMSE"**, a estatística do **"AIC"** aceita números negativos. Referências sobre a aplicação do método **"AIC"** para seleção de variogramas de propriedades de solos são introduzidas em Webster e McBratney (1989).

Salvando Parâmetros do Melhor Ajuste

Após a seleção do melhor ajuste para o variograma, os parâmetros do modelo teórico selecionado precisam ser salvos para uso nos processos de krigagem. Ao clicar no botão operacional **"Save"**, os parâmetros de ajuste são automaticamente transferidos para os campos da opção **"Define parameters"** do menu de opções **"Variogram computation"**. Na execução, a opção de interface vai abrir uma janela de gerenciamento de arquivos para seleção da pasta de trabalho onde o arquivo em formato texto seja armazenado conforme ilustrado na Figura 5.8. Este arquivo registra: todos os parâmetros de ajuste do modelo selecionado, os indicadores de qualidade deste ajuste e os valores das estimativas com o número de pares para cada **"lag"** individualmente.

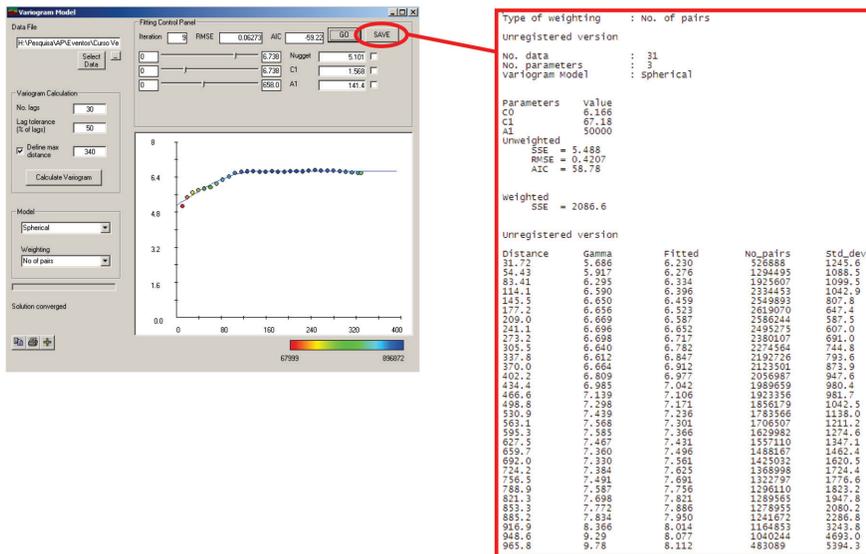


Figura 5.8. Arquivo com resultados do ajuste selecionado (i.e.: tipo de ponderação, tamanho das lags, valores estimados, número de pares e índices de validação).